
UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB 50051—201X

烟囱工程技术标准

Code Requirements for Chimneys

(征求意见稿)

201X—X—X 发布

201X—X—X 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

目 次

1	总则	1
2	术语、符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	6
3	基本规定	11
3.1	设计规定	11
3.2	施工规定	20
3.3	验收规定	21
4	材料	23
4.1	砖石	23
4.2	混凝土	24
4.3	钢筋和钢材	25
4.4	材料热工计算指标	29
5	荷载与作用	30
5.1	荷载与作用的分类	30
5.2	风荷载	30
5.3	平台活荷载与积灰荷载	33
5.4	裹冰荷载	34
5.5	地震作用	34
5.6	温度作用	36
5.7	烟气压力计算	42
6	地基与基础	44
6.1	一般规定	44
6.2	地基计算	45
6.3	变形计算	46
6.4	稳定性计算	49
6.5	刚性基础计算	50
6.6	板式基础计算	51

6.7	桩基础计算	57
6.8	基础构造	64
6.9	土方和基坑工程施工	66
6.10	钢筋工程施工	66
6.11	模板工程施工	67
6.12	混凝土工程施工	67
6.13	基础工程施工质量检验	68
7	钢筋混凝土烟囱	71
7.1	一般规定	71
7.2	附加弯矩计算	72
7.3	烟囱筒壁极限承载能力状态计算	73
7.4	烟囱筒壁正常使用极限状态计算	77
7.5	设计构造	90
7.6	钢筋工程施工	93
7.7	模板工程施工	94
7.8	混凝土工程施工	94
7.9	混凝土筒壁施工质量检验	95
8	钢内筒与砖内筒	99
8.1	一般规定	99
8.2	计算规定	100
8.3	自立式钢内筒	100
8.4	悬挂式钢内筒	104
8.5	砖内筒	104
8.6	设计构造	105
8.7	制作	108
8.8	焊接	108
8.9	安装	109
8.10	施工质量验收	109

9	纤维增强塑料内筒	115
9.1	一般规定	115
9.2	材料	115
9.3	铺层设计	117
9.4	自立式纤维增强塑料内筒	122
9.5	悬挂式纤维增强塑料内筒	126
9.6	连接与加劲	127
9.7	设计构造	129
9.8	制作	130
9.9	安装	132
9.10	施工质量检验	132
10	钢烟囱	136
10.1	一般规定	136
10.2	钢塔架设计	136
10.3	自立式钢烟囱	138
10.4	拉索式钢烟囱	143
10.5	安装	144
11	砖烟囱	145
11.1	一般规定	145
11.2	水平截面计算	145
11.3	环向钢箍计算	146
11.4	环向钢筋计算	147
11.5	竖向钢筋计算	148
11.6	构造规定	150
11.7	施工	153
11.8	施工质量检验	155

12	烟囱的防腐蚀	156
12.1	一般规定	156
12.2	烟囱材料和烟囱结构型式的选择	157
12.3	砖烟囱的防腐蚀	158
12.4	单筒式钢筋混凝土烟囱的防腐蚀	158
12.5	套筒式和多管式烟囱的砖内筒防腐蚀	159
12.6	套筒式和多管式烟囱的钢内筒防腐蚀	159
12.7	钢烟囱的防腐蚀	160
12.8	施工	160
13	烟囱平台	162
13.1	一般规定	162
13.2	平台设计	162
13.3	平台制作和安装工程	163
13.4	施工质量检验	163
14	单筒烟囱内衬及隔热层施工	167
14.1	一般规定	167
14.2	砖内衬（筒）和隔热层	167
14.3	不定型材料内衬	167
14.4	施工质量验收	168
15	烟道	170
15.1	一般规定	170
15.2	地下烟道	171
15.3	架空烟道	173
15.4	施工质量验收	174
16	航空障碍灯和标志	177
16.1	一般规定	177
16.2	障碍灯的分布	177
16.3	航空障碍灯设计要求	178
16.4	施工质量验收	178
17	既有烟囱加固与防腐改造	179

17.1	一般规定	179
17.2	烟囱加固与防腐改造设计原则	179
17.3	加固与修复材料的选用	180
17.4	纤维增强塑料内筒顶部吊装	182
17.5	施工质量检验	185
18	附属工程施工质量检验	191
19	冬期施工	193
19.1	一般规定	193
19.2	基础	193
19.3	砖烟囱筒壁	193
19.4	钢筋混凝土烟囱筒壁	195
19.5	钢烟囱、钢内筒和钢构件	195
19.6	单筒烟囱内衬	196
20	施工安全	197
21	烟囱烘干	199
22	工程质量验收	200
附录 A	环形截面几何特性计算公式	202
附录 B	焊接圆筒截面轴心受压稳定系数	203
附录 C	圆形基础竖向平均附加应力系数	204
附录 D	施工现场质量管理检查记录	207
附录 E	检验批质量验收记录	208
附录 F	分项工程质量验收记录	209
附录 G	分部（子分部）工程质量验收记录	210
附录 H	单位（子单位）工程质量预验收记录	211
附录 J	单位（子单位）工程质量竣工验收记录	212
	本标准用词用语说明	213
	引用标准名录	214
	条文说明	216

1 总则

- 1.0.1 为了在烟囱设计、施工中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全、适用、经济、环保、保证质量，制定本标准。
- 1.0.2 本标准适用于砖烟囱、钢筋混凝土烟囱、钢烟囱、纤维增强塑料烟囱等单筒烟囱以及由上述材质所构成的套筒式烟囱和多管式烟囱设计、施工、验收、加固改造。
- 1.0.3 本标准依据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 及《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068 的原则制定。
- 1.0.4 烟囱设计、施工、验收除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 烟囱 chimney

用于排放烟气或废气的高耸构筑物。

2.1.2 干烟囱 Dry chimney

排放相对湿度小于 60%、温度大于或等于 90℃ 的烟气的烟囱。

2.1.3 潮湿烟囱 Humid chimney

排放相对湿度大于 60%、温度大于 60℃ 但小于 90℃ 的烟气的烟囱。

2.1.4 湿烟囱 Wet chimney

排放相对湿度为饱和状态、温度小于或等于 60℃ 的烟气的烟囱。

2.1.5 筒身 shaft

烟囱基础以上部分，包括筒壁、隔热层和内衬等部分。

2.1.6 筒壁 shell

烟囱筒身的最外层结构，是整个筒身承重部分。

2.1.7 隔热层 insulation

置于筒壁与内衬之间，使筒壁受热温度不超过规定的最高温度。

2.1.8 内衬 lining

分段支承在筒壁牛腿之上的自承重结构或依靠分布于筒壁上的锚筋直接附于筒壁上的浇筑体，对隔热层或筒壁起到保护作用。

2.1.9 钢烟囱 steel chimney

筒壁材质为钢材的烟囱。

2.1.10 钢筋混凝土烟囱 reinforced concrete chimney

筒壁材质为钢筋混凝土的烟囱。

2.1.11 砖烟囱 brick chimney

筒壁材质为砖砌体的烟囱。

2.1.12 自立式烟囱 self-supporting chimney

筒身在不加任何附加支撑的条件下，自身构成一个稳定结构的烟囱。

2.1.13 自立式内筒 self-supporting liner

在自重荷载作用下，其竖向以承受压应力为主、水平依靠外筒支撑的排烟筒。

2.1.14 悬挂式内筒 **Suspended liner**

在重力荷载作用下，其竖向以承受拉应力为主、水平依靠外筒支撑的排烟筒。

2.1.15 拉索式烟囱 **guyed chimney**

筒身与拉索共同组成稳定体系的烟囱。

2.1.16 塔架式钢烟囱 **framed steel chimney**

排烟筒主要承担自身竖向荷载，水平荷载主要由钢塔架承担的钢烟囱。

2.1.17 单筒式烟囱 **single tube chimney**

内衬和隔热层直接分段支承在筒壁牛腿上的普通烟囱。

2.1.18 套筒式烟囱 **single liner chimney**

筒壁内设置一个排烟筒的烟囱。

2.1.19 多管式烟囱 **multi-liner chimney**

两个或多个排烟筒共用一个外部筒壁或塔架组成的烟囱。

2.1.20 内筒 **liner**

套筒式和多管式烟囱筒壁内的排烟筒。

2.1.21 封闭层 **confining bed**

砖内筒外部的耐酸砂浆层，用于封闭烟气，防治或减少烟气渗漏。

2.1.22 烟道 **flue**

排烟系统的一部分，用以将烟气导入烟囱。

2.1.23 横风向风振 **across-wind sympathetic vibration**

在烟囱背风侧产生的旋涡脱落频率较稳定且与结构自振频率相等时，产生的横风向的共振现象。

2.1.24 临界风速 **critical wind speed**

结构产生横风向共振时的风速。

2.1.25 锁住区 **lock in range**

风的旋涡脱落频率与结构自振频率相等的范围。

2.1.26 破风圈 **strake(vane)**

通过破坏风的有规律的旋涡脱落来减少横风向共振响应的减振装置。

2.1.27 温度作用 **temperature action**

结构或构件受到外部或内部条件约束，当外界温度变化时或在有温差的条件下，不能

自由胀缩而产生的作用。

2.1.28 传热系数 heat transfer coefficient

结构两侧空气温差为 1 k，在单位时间内通过结构单位面积的传热量，单位：

$W / (m^2 \cdot K)$

2.1.29 导热系数 thermal conductivity

材料导热特性的一个物理指标。数值上等于热流密度除以负温度梯度，单位：

$W / (m \cdot K)$

2.1.30 附加弯矩 additional bending moment

因结构侧向变形，结构自重作用或竖向地震作用在结构水平截面产生的弯矩。

2.1.31 机场净空 aerodrome obstacle free space

为保障飞机起降安全而规定的障碍物限制面以上的空间，用以限制机场及其周围地区障碍物的高度。

2.1.32 航空障碍灯 warning lamp

在机场一定范围内，用于标识高耸构筑物或高层建筑外形轮廓与高度、对航空飞行器起到警示作用的灯具。

2.1.33 航空标志 warning sign

用于标识高耸构筑物或高层建筑外形轮廓与高度，并对飞行器起警示作用的航空障碍灯和色标。

2.1.34 纤维增强塑料内筒 fiber reinforced plastic (FRP) chimney

以纤维及其制品为增强材料、以合成树脂为基体材料，用机械缠绕成型工艺分段制造、连接和安装的一种烟囱。

2.1.35 反应型阻燃树脂 reactive flame-retardant resin

树脂的分子主链中含有氯、溴、磷等阻燃元素，在不添加或少量添加辅助阻燃材料(如三氧化二锑)后，可使固化后的纤维增强塑料材料具有点燃困难、离火自熄的性能。这类树脂在液态时不具有阻燃性。

2.1.36 基体材料 matrix

纤维增强塑料材料中的树脂部分。

2.1.37 极限氧指数 limited oxygen index (LOI)

在规定条件下，试件在氮、氧混合气体中，维持平衡燃烧所需的最低氧浓度(体积百分

含量)。

2.1.38 火焰传播速率 flame-spread rating

采用标准方法对一厚度为3 mm~4 mm, 且以玻璃纤维短切原丝毡增强、树脂含量为70%~75%的纤维增强塑料层合板所测定的一个指数值。

2.1.39 缠绕 winding

在控制张力和预定线型的条件下, 以浸有树脂的连续纤维或织物缠到芯模或模具上成型制品的一种方法。

2.1.40 缠绕角 winding angle

缠绕在芯模上的纤维束或带的长度方向与芯模子午线或母线间的夹角。

2.1.41 增强材料 reinforcement

加入树脂基体中能使复合材料制品的力学性能显著提高的纤维材料。

2.1.42 热变形温度 heat-deflection temperature(HDT)

当树脂浇铸体试件在等速升温的规定液体传热介质中, 按简支梁模型, 在规定的静荷载作用下, 产生规定变形量时的温度。

2.1.43 玻璃化温度 Glass transition temperature (T_g)

当树脂浇铸体试件在一定升温速率下达到一定温度值时, 从一种硬的玻璃状脆性状态转变为柔性的弹性状态, 物理参数出现不连续的变化, 这个现象称为玻璃化转变, 所对应的温度为玻璃化温度(T_g), 它是确定树脂最高使用温度的依据, 其数值通常高于热变形温度(15~25) °C。

2.1.44 液压滑模 hydraulic sliding form

以筒(墙)壁预埋支撑杆为支点, 利用液压千斤顶提升工作平台和滑动模板, 连续施工的工艺。

2.1.45 电动(液压)提模 motor-driven (hydraulic) promote form

以筒(墙)壁预留孔或预埋支撑杆为支点, 利用电动机或液压千斤顶提升工作平台和模板, 倒模间歇性施工的工艺。

2.1.46 双滑 two-side sliding form

同时进行筒壁和内衬液压滑模施工的工艺。

2.1.47 液压顶升法 hydraulic jacking

利用液压顶升设备进行钢烟囱或钢内筒从上至下逐段(节)安装的方法。

2.1.48 液压提升法 hydraulic lifting

利用液压提升设备进行钢烟囱或钢内筒从上至下逐段（节）安装的方法。

2.1.49 气顶倒装法 pneumatic jacking

利用气压顶升设备进行钢烟囱或钢内筒从上至下逐段（节）安装的方法。

2.1.50 烟囱评估使用年限 assessed working life for existing chimney

可靠性评定所预估的既有烟囱在规定条件下的使用年限。

2.1.51 烟囱加固设计使用年限 design working life for strengthening of existing chimney

加固设计规定的烟囱加固后无需重新进行检测、鉴定，即可按其预定目的使用的年限。

2.1.52 烟囱防腐设计使用年限 design working life for corrosion resistance of chimney

防腐设计规定的烟囱在正常施工和维护条件下，即可按其预定目的使用的年限。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应

M 、 M_k ——按作用效应基本组合、标准组合计算的弯矩值；

M_a 、 M_{ak} ——附加弯矩设计值、标准值；

M_w 、 M_{wk} ——风荷载设计值、标准值作用下的弯矩；

M_E 、 M_{Ek} ——地震弯矩设计值、标准值；

M_{Ea} ——地震附加弯矩设计值；

N 、 N_k ——按作用效应基本组合、标准组合计算的轴向力值；

G_i 、 G_{ik} ——第 i 个永久作用的设计值、标准值；

Q_{1k} ——第 1 个可变作用（主导可变作用）的标准值；

Q_{jk} ——第 j 个可变作用的标准值；

F_{Ehk} ——水平地震作用标准值；

F_{Evk} ——竖向地震作用标准值；

$S_{G_{ik}}$ ——第 i 个永久作用标准值的效应；

$S_{Q_{1k}}$ ——第 1 个可变作用（主导可变作用）标准值的效应；

$S_{Q_{jk}}$ ——第 j 个可变作用标准值的效应；

S_{Ehk} 、 S_{Evk} ——水平地震作用标准值、竖向地震作用标准值的效应。

2.2.2 材料性能

E_c 、 E_{ct} —— 混凝土在常温和温度作用下的弹性模量；

E'_{ct} —— 混凝土在温度和荷载长期作用下的弹塑性模量；

E_s —— 钢筋的弹性模量；

E 、 E_t —— 钢材在常温和温度作用下的弹性模量；

E_m —— 砖砌体的弹性模量；

E'_m —— 砖砌体在温度作用下的弹塑性模量；

E_{sh} —— 环箍的折算弹性模量；

f_{ck} 、 f_c —— 混凝土轴心抗压强度的标准值、设计值；

f_{ctk} 、 f_{ct} —— 混凝土在温度作用下轴心抗压强度的标准值、设计值；

f_{tk} —— 混凝土轴心抗拉强度标准值；

f_t —— 混凝土轴心抗拉强度设计值或钢材在温度作用下的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

f_{tk} 、 f_t —— 混凝土在温度作用下轴心抗拉强度的标准值、设计值；

f_{yk} 、 f_y —— 钢筋抗拉强度的标准值、设计值；

f_{ytk} 、 f_{yt} —— 钢筋在温度作用下抗拉强度的标准值、设计值；

f'_{yk} 、 f'_y —— 钢筋抗压强度的标准值、设计值；

f'_{ytk} 、 f'_{yt} —— 钢筋在温度作用下抗压强度的标准值、设计值；

f —— 砖砌体的抗压强度设计值或钢材的抗拉、抗压、抗弯强度设计值；

f_v 、 f_{ce} —— 钢材的抗剪和端面承压强度设计值；

f_c^w 、 f_t^w 、 f_v^w —— 钢材对接焊缝的抗压、抗拉和抗剪强度设计值；

f_f^w —— 钢材角焊缝的抗拉、抗压和抗剪强度设计值；

f_{vt} —— 钢材在温度作用下的抗剪强度设计值；

f_{ct}^w 、 f_t^w 、 f_{vt}^w —— 钢材对接焊缝在温度作用下的抗压、抗拉和抗剪强度设计值。

f_{ft}^w —— 钢材角焊缝在温度作用下的抗拉、抗压和抗剪强度设计值；

f_{at} —— 环箍抗拉强度的设计值；

2.2.3 几何参数

A —— 构件的截面面积、基础的底面面积；

A_o —— 钢筋混凝土筒壁计算截面的换算面积；

A_s —— 钢筋混凝土筒壁竖向钢筋的总截面面积；

t —— 筒壁厚度；

t_o —— 筒壁有效厚度；

I —— 截面的惯性矩；

W —— 截面的抵抗矩；

r —— 钢筋混凝土筒壁截面的平均半径；

r_{co} —— 钢筋混凝土筒壁水平截面的核心距；

r_{com} —— 砖筒壁水平截面的核心距；

c 、 c' —— 钢筋混凝土筒壁外侧竖向钢筋、内侧竖向钢筋保护层的厚度；

θ —— 钢筋混凝土筒壁计算截面有一个孔洞时的孔洞半角；

θ_1 —— 钢筋混凝土筒壁计算截面有两个孔洞时大孔洞的半角；

θ_2 —— 钢筋混凝土筒壁计算截面有两个孔洞时小孔洞的半角；

d —— 钢筋的直径；

e_k —— 按荷载效应标准组合计算的轴向力值对钢筋混凝土筒壁圆心水平线的偏心距；

e —— 按荷载效应基本组合计算的轴向力值对钢筋混凝土筒壁水平截面中心的偏心距；

e_o ——按荷载效应基本组合计算的轴向力值对砖筒壁水平截面重心的偏心距；

h ——烟囱筒身的高度；

h_i ——烟囱筒身第 i 计算截面距离基础顶面的高度。

2.2.4 其他

α_{cr} ——钢筋混凝土构件的受力特征系数；

ξ_{wt} ——在荷载标准值和温度共同作用下钢筋混凝土筒壁厚度内受压区的相对高度系数；

η_{ct1} ——混凝土温度应力的衰减系数；

ρ 、 ρ' ——钢筋混凝土筒壁外侧竖向钢筋、内侧竖向钢筋的配筋率；

ρ_{te} ——以有效受拉混凝土截面面积计算的受拉钢筋配筋率；

ξ_1 ——钢筋混凝土筒壁块体水平截面和垂直截面在温度效应单独作用下受压区的相对高度系数；

ε_t ——筒壁内表面与外侧钢筋的相对自由变形值；

ψ_{st} ——受拉钢筋在温度效应作用下裂缝间的应变不均匀系数；

λ ——砖筒壁计算截面以上的长细比；

i ——砖筒壁计算截面的回转半径；

φ ——砖砌筒壁的长细比 λ 及轴向力偏心距 e_o 对承载力的影响系数及钢筋混凝土筒壁计算截面的受压区半角；

β_c ——混凝土在温度作用下的弹性模量折减系数；

α_{Et} 、 α_{Eta} ——在温度和荷载长期作用下，钢筋的弹性模量与混凝土的弹塑性模量的比值；

β_d ——钢材在温度作用下的弹性模量折减系数；

γ_{ct} ——混凝土在温度作用下轴心抗压强度的分项系数；

γ_u ——混凝土在温度作用下轴心抗拉强度的分项系数；

γ_{yt} —— 钢筋在温度作用下抗拉和抗压强度的分项系数；

γ_s —— 钢材在温度作用下抗拉及抗压强度的折减系数；

γ_{RE} —— 承载力的抗震调整系数；

α_c —— 混凝土的线膨胀系数；

α_s —— 钢筋及钢材的线膨胀系数；

α_m —— 砖砌体的线膨胀系数；

R_{tot} —— 总热阻；

R_{in} —— 内衬内表面的热阻；

R_{ex} —— 筒壁外表面的热阻；

R_i —— 第 i 层的热阻；

λ_i —— 第 i 层的导热系数；

α_{in} —— 内衬内表面的传热系数；

α_{ex} —— 筒壁外表面的传热系数。

3 基本规定

3.1 设计规定

3.1.1 本标准采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，以可靠指标度量结构构件的可靠度，采用分项系数的设计表达式进行结构计算。

3.1.2 烟囱及其附属构件的极限状态计算应包括以下内容：

- 1 烟囱筒身及附属构件应进行承载力计算以及失稳验算；
- 2 发生横风向共振且无可靠减震措施的钢烟囱，应进行疲劳验算；
- 3 有抗震设防要求时，应进行抗震承载力承载力计算；
- 4 烟囱基础应进行承载力计算及稳定性验算。

3.1.3 烟囱的安全等级与结构重要性系数应符合以下规定：

1 烟囱安全等级不应低于二级，当烟囱高度不小于 200m 或单机容量不小于 300MW 时，烟囱的安全等级应为一级；

2 烟囱的结构重要性系数应按以下规定选取：

- 1) 安全等级为一级时，应不小于 1.1；
- 2) 安全等级为二级时，应不小于 1.0。

3.1.4 烟囱的抗震设防类别应符合国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223)的规定，并应符合以下要求：

1 单机容量为 300MW 及以上或规划容量为 800MW 及以上的火力发电厂和地震时必须维持正常供电的重要电力设施的烟囱、烟道应划分为重点设防类；

2 烟囱高度大于或等于 200m 时，其抗震设防类别应划分为重点设防类；

3 50 万人口以上城镇的集中供热烟囱，抗震设防类别应划分为重点设防类。

4 其余各类烟囱最低设防类别不宜低于标准设防类。

3.1.5 对于承载能力极限状态，应根据不同的设计状况分别进行基本组合、偶然组合和地震组合设计。对于正常使用极限状态，应分别按作用效应的标准组合、频遇组合和准永久组合进行设计。

3.1.6 对于持久设计状况和短暂设计状况，烟囱承载能力极限状态设计应按下列作用效应基本组合中的最不利值确定：

1 持久设计状况

- 1) 套筒式与多管式烟囱的内筒支承平台的荷载效应设计值，应满足下式要求：

$$\gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_{PL} \psi_{CPL} S_{PLk} \right) \leq R_d \quad (3.1.6-1)$$

2) 套筒式与多管式烟囱的内筒的效应设计值, 应满足下式要求:

$$\gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_T S_T + \gamma_{CP} S_{CP} \right) \leq R_d \quad (3.1.6-2)$$

2 短暂设计状况

1) 单筒式烟囱、塔架式钢烟囱、套筒式与多管式烟囱的外筒, 以及由风荷载、平台活荷载等可变荷载控制的荷载效应设计值, 应满足下式要求:

$$\gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_{Q_1} \gamma_{L1} S_{Q_{1k}} + \sum_{j=2}^n \gamma_{Q_j} \psi_{cj} \gamma_{Lj} S_{Q_{jk}} \right) \leq R_d \quad (3.1.6-3)$$

2) 由风荷载控制的套筒式与多管式烟囱的内筒的荷载效应设计值, 应满足下式要求:

$$\gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_T S_T + \gamma_{CP} S_{CP} + \gamma_w S_w \right) \leq R_d \quad (3.1.6-4)$$

式中 γ_0 —— 烟囱重要性系数, 按本标准第 3.1.3 条的规定采用;

γ_{G_i} —— 第 i 永久作用分项系数, 按本标准第 3.1.9 条的规定采用;

γ_{PL} —— 烟囱平台活荷载分项系数, 按本标准第 3.1.9 条的规定采用;

γ_{Q_1} —— 第 1 个可变作用(主导可变作用)的分项系数, 按本标准第 3.1.9 条的规定采用;

γ_{Q_j} —— 第 j 个可变作用的分项系数, 按本标准第 3.1.9 条的规定采用;

G_{ik} —— 第 i 个永久作用的标准值;

Q_{1k} —— 第 1 个可变作用(主导可变作用)的标准值;

Q_{jk} —— 第 j 个可变作用的标准值;

$S_{G_{ik}}$ —— 第 i 个永久作用标准值的效应;

$S_{Q_{1k}}$ —— 第 1 个可变作用(主导可变作用)标准值的效应;

$S_{Q_{jk}}$ —— 第 j 个可变作用标准值的效应;

S_{PLk} —— 烟囱平台活荷载标准值的效应;

ψ_{cj} ——第 j 个可变作用的组合值系数，按本标准第 3.1.9 条的规定采用；

ψ_{CPL} ——烟囱平台活荷载组合系数，按本标准第 3.1.9 条的规定采用；

γ_{L1} 、 γ_{Lj} ——第 1 个和第 j 个考虑烟囱设计使用年限的可变作用调整系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009)采用；

γ_T ——正常烟气温度作用分项系数，按本标准第 3.1.9 条的规定采用；

S_T ——正常烟气温度作用标准值的效应；

γ_{CP} ——正常烟气温度作用工况下，烟气负压分项系数，按本标准第 3.1.9 条的规定采用；

S_{CP} ——正常烟气温度作用工况下，烟气负压标准值的效应；

γ_w ——风荷载分项系数，按本标准表 3.1.9 的规定采用；

R_d ——烟囱或烟囱构件的抗力设计值，对不同设计状况应采用相应的抗力设计值。

3.1.7 对于烟气爆炸、事故温度等偶然设计状况，烟囱承载能力极限状态设计应满足下式要求：

$$\sum_{i=1}^m S_{G_{ik}} + S_{Ad} + \psi_{f1} S_{Q_{1k}} + \sum_{j=2}^n \psi_{qj} S_{Q_{jk}} \leq R_d \quad (3.1.7)$$

式中 S_{Ad} ——按偶然荷载标准值 A_d 计算的荷载效应值；

ψ_{f1} ——第一个可变荷载的频遇值系数；

ψ_{qi} ——第 i 个可变荷载的准永久值系数。

注：烟气爆炸和事故温度下风荷载的频遇值系数取 0.2。

3.1.8 对于需要抗震设防的烟囱除按本标准第 3.1.5~3.1.6 条极限承载能力计算外，尚应按以下地震设计状况进行抗震验算：

1 单筒烟囱及套筒式与多管式烟囱的外筒

$$\gamma_{GE} S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} + \psi_{wE} \gamma_w S_{wk} + \psi_{MaE} S_{MaE} \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.1.8-1)$$

2 套筒式与多管式烟囱的内筒

$$\gamma_{GE}S_{GE} + \gamma_T S_T + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} + \psi_{wE} \gamma_w S_{wk} + \psi_{MaE} S_{MaE} \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.1.8-2)$$

式中 γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，砖烟囱取 1.0；钢筋混凝土烟囱取 0.9；钢烟囱取 0.8；钢塔架应按塔柱、腹杆支座斜杆和塔柱节点分别取 0.85、0.8、0.90 和 1.00；当仅计算竖向地震作用时，各类烟囱和构件均应采用 1.0；纤维增强塑料内筒按本标准第 9 章的有关规定执行；

γ_{Eh} ——水平地震作用分项系数，按表 3.1.9 的规定采用；

γ_{Ev} ——竖向地震作用分项系数，按表 3.1.9 的规定采用；

S_{Ehk} ——水平地震作用标准值的效应，按本标准第 5.5 节的规定进行计算；

S_{Evk} ——竖向地震作用标准值的效应，按本标准第 5.5 节的规定进行计算；

S_{MaE} ——由地震作用、风荷载、日照和基础倾斜引起的附加弯矩效应，按本标准第 7.2 节的规定计算；

S_{GE} ——重力荷载代表值的效应，重力荷载代表值取烟囱及其构配件自重标准值和各层平台活荷载组合值之和。活荷载的组合值系数，应按表 3.1.9 的规定采用；

S_T ——烟气温度的作用效应；

ψ_{wE} ——风荷载的组合值系数，取 0.20；

ψ_{MaE} ——由地震作用、风荷载、日照和基础倾斜引起的附加弯矩组合值系数，取 1.0；

γ_T ——烟气温度作用分项系数，取 1.0；

γ_{GE} ——重力荷载分项系数，一般情况应取 1.2，当重力荷载对烟囱承载能力有利时，不应大于 1.0。

3.1.9 对不同的设计状况，应按下列规定选用不同的荷载作用分项系数与组合值系数。

1 对于持久设计状况和短暂设计状况，作用效应基本组合的分项系数应按表 3.1.9-1 的规定采用。

表 3.1.9-1 荷载分项系数

作用名称	分项系数		备注	
	符号	数值		
永久作用	γ_G	1.20	由可变荷载效应控制时	其效应对承载能力不利时
		1.35	由永久荷载效应控制时	
		0.90	其效应对承载能力有利时	
风荷载	γ_w	1.40	—	
平台上活荷载	γ_{PL}	1.40	当平台活荷载标准值不大于 4.0kN/m ² 时	当对结构承载力有利时取 0.0
		1.30	当平台活荷载标准值大于 4.0kN/m ² 时	
安装检修荷载	γ_A	1.30	当对结构承载力有利时取 0.0	
烟气负压	γ_{CP}	1.10	—	
裹冰荷载	γ_I	1.40	—	
温度作用	γ_T	1.10	烟气温度, 套筒式与多管式烟囱的内筒	
		1.00	极端环境温度、事故温度	

2 对于持久设计状况和短暂设计状况, 应按表 3.1.9-2 的规定确定相应的组合值系数。

表 3.1.9-2 作用效应的组合情况及组合值系数

作用效应的组合情况		第 1 个可变作用	其他可变作用	组合值系数		
				ψ_{cw}	ψ_{cMa}	ψ_{cPL}
<i>I</i>	$G+W+PL$	W	M_a+P	1.00	1.00	0.70
<i>II</i>	$G+A+W+PL$	A	$W+M_a+P$	0.60	1.00	0.70
<i>III</i>	$G+I+W+PL$	I	$W+M_a+P$	0.60	—	0.70

注: 1 G 表示烟囱或结构构件自重, W 为风荷载, M_a 为附加弯矩, A 为安装荷载 (包括施工吊装设备重量, 起吊重量和平台上的施工荷载), I 为裹冰荷载, PL 为平台活荷载 (包括检修维护和生产操作活荷载)。

2 砖烟囱和塔架式钢烟囱可不考虑附加弯矩 M_a 。

3 对于地震设计状况, 地震作用的分项系数及计算重力荷载代表值时活荷载组合值系数应分别按表 3.1.9-3 和表 3.1.9-4 的规定采用。

表 3.1.9-3 地震作用分项系数

地震作用		γ_{Eh}	γ_{Ev}
仅计算水平地震作用		1.3	0
仅计算竖向地震作用		0	1.3
同时计算水平和竖向地震作用	水平地震作用为主时	1.3	0.5
	竖向地震作用为主时	0.5	1.3

表 3.1.9-4 计算重力荷载代表值时活荷载组合值系数

活荷载种类		组合值系数
积灰荷载		0.9
筒壁顶部平台活荷载		不计入
其余各层平台	按实际情况计算的平台活荷载	1.0
	按等效均布荷载计算的平台活荷载	0.2

3.1.10 对于正常使用极限状态,应根据不同设计要求,采用作用效应的标准组合或准永久组合进行设计,并应满足本标准规定的各项限值。

1 标准组合应用于验算钢筋混凝土烟囱筒壁的混凝土压应力、钢筋拉应力、裂缝宽度以及地基承载力或结构变形验算等,并按下式计算:

$$\sum_{i=1}^m S_{G_{ik}} + S_{Q_{1k}} + \sum_{j=2}^n \psi_{cj} S_{Q_{jk}} \leq C \quad (3.1.10-1)$$

式中 C——烟囱或结构构件达到正常使用要求的规定限值,如允许应力、变形、裂缝等限值,或地基承载力特征值。

2 准永久组合用于地基变形的计算,应按下列式确定:

$$\sum_{i=1}^m S_{G_{ik}} + \sum_{j=1}^n \psi_{qj} S_{Q_{jk}} \leq C \quad (3.1.10-2)$$

式中 ψ_{qj} ——第 j 个可变作用效应的准永久值系数,平台活荷载取 0.6;积灰荷载取 0.8;一般情况下不考虑风荷载,但对于风玫瑰图呈严重偏心的地区,可采用风荷载频遇值系数 0.4 进行计算。

3.1.11 烟囱与烟道宜按两个防火分区考虑,并应在烟囱前端设备维修期间采取防火措施。

3.1.12 设计烟囱时,应根据使用条件、烟囱高度、材料供应及施工条件等因素,确定采用砖烟囱、钢筋混凝土烟囱、钢烟囱或纤维增强塑料内筒。下列情况不应采用砖烟囱:

- 1 高度大于 60m 的烟囱;
- 2 抗震设防烈度为 9 度地区的烟囱;
- 3 抗震设防烈度为 8 度时, III、IV 类场地的烟囱。

3.1.13 烟囱内衬的设置应符合下列规定:

1 砖烟囱

- 1) 当烟气温度大于 400℃ 时,内衬应沿筒壁全高设置;
- 2) 当烟气温度小于或等于 400℃ 时,内衬可在筒壁下部局部设置,其最低设置高度

应超过烟道孔顶，超过高度不宜小于 $1/2$ 孔高。

2 钢筋混凝土单筒烟囱的内衬应沿筒壁全高设置。

3 当筒壁温度符合第 3.1.26 条温度限值且满足防腐蚀要求时，钢烟囱可以不设置内衬。但当筒壁温度较高时，应采取防烫伤措施。

4 当烟气腐蚀等级为弱腐蚀及以上时，烟囱内衬设置尚应符合本标准第 12 章的有关规定。

5 内衬厚度应由温度计算确定，但烟道进口处一节（或地下烟道基础内部分）的厚度不应小于 200mm 或一砖。其它各节不应小于 100mm 或半砖。内衬各节的搭接长度不应小于 300mm 或六皮砖。

3.1.14 隔热层的构造应符合下列规定：

1 如采用砖砌内衬、空气隔热层时，厚度宜为 50mm，同时在内衬靠筒壁一侧按竖向间距 1m，环向间距为 500mm，挑出顶砖，顶砖与筒壁间应留 10mm 缝隙。

2 填料隔热层的厚度宜采用 80 mm~200mm，同时应在内衬上设置间距为 1.5m~2.5m 整圈防沉带，防沉带与筒壁之间留出 10mm 的温度缝。

3.1.15 烟囱在同一平面内，有两个烟道口时，宜设置隔烟墙，其高度宜采用烟道孔高度的（0.5~1.5）倍。隔烟墙厚度应根据烟气压力（抗震设防地区应考虑地震作用）进行计算确定。

3.1.16 烟囱外表面的直爬梯应按下列规定设置：

1 爬梯应离地面 2.5m 处开始设置，直至烟囱顶端；

2 爬梯应设在常年主导风向的上风向；

3 烟囱高度大于 40m 时，应在爬梯上设置活动休息板，其间隔不应超过 30m。

3.1.17 烟囱直爬梯、斜钢梯、防护栏杆及钢平台应分别符合现行国家标准《固定式钢梯及平台安全要求》GB4053 的有关规定，并取栏杆顶部水平荷载应不小于 1.0kN/m，竖向荷载应不小于 1.2kN/m。

3.1.18 烟囱外部检修平台，应按下列规定设置：

1 烟囱高度小于 60m 时，无特殊要求可不设置；

2 烟囱高度为 60m~100m 时，可在顶部设置；

3 烟囱高度大于 100m 时，在中部适当增设平台；

4 当设置航空障碍灯时，检修平台可与障碍灯维护平台共用；

5 当设置烟气排放监测系统时，并根据本标准第 3.1.28 条规定设置采样平台后，采样平台可与检修平台共用。

3.1.19 无特殊要求时，砖烟囱一般可不设置检修平台和信号灯平台。

3.1.20 爬梯和烟囱外部平台各杆件长度不宜超过 2.5m，杆件之间可以采用螺栓连接。

3.1.21 爬梯和平台等金属构件，宜采用热浸镀锌防腐，镀层厚度应满足表 3.1.21 最小值要求，并符合《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法》(GB/T 13912) 有关规定。

表 3.1.21 金属热浸镀锌最小厚度

镀层厚度(μm)	钢构件厚度 t (mm)			
	t<1.6	1.6≤t≤3.0	3.0≤t≤6.0	t>6
平均厚度	45	55	70	85
局部厚度	35	45	55	70

3.1.22 爬梯、平台与筒壁的连接应满足强度和耐久性要求。

3.1.23 烟囱筒身应设置防雷设施。

3.1.24 烟囱筒身应设沉降观测点和倾斜观测点。应根据实际烟气情况确定是否设清灰装置。

3.1.25 筒壁的计算截面位置可按下列规定采用：

- 1 水平截面可取筒壁各节的底截面；
- 2 垂直截面可取各节底部单位高度的截面。

3.1.26 烟囱筒壁和基础的受热温度应符合下列规定：

- 1 烧结普通粘土砖筒壁的最高受热温度不应超过 400℃；
- 2 钢筋混凝土筒壁和基础以及素混凝土基础的最高受热温度不应超过 150℃；
- 3 钢烟囱及纤维增强塑料内筒的最高受热温度应符合表 3.1.26 的规定；

表 3.1.26 钢烟囱及纤维增强塑料内筒的最高受热温度

材 料	最高受热温度 (℃)	备 注
碳素结构钢	250	用于沸腾钢
	350	用于镇静钢
低合金结构钢和可焊接低合金耐候钢	400	—
纤维增强塑料内筒	100	长期运行温度
	玻璃化温度 (T _g)	时间不允许超过 30min

3.1.27 在荷载的标准组合效应作用下，钢筋混凝土烟囱、钢结构烟囱和纤维增强塑料内筒

任意高度的水平位移不应大于该点离地高度的 1/100，砖烟囱不应大于 1/300。

3.1.28 钢筋混凝土烟囱最大裂缝宽度应符合表 3.1.28 的规定。

表 3.1.28 最大裂缝宽度限值

部 位	裂缝宽度限值 (mm)
筒壁顶部 20m 范围内	0.15
其余部位	0.20

3.1.29 钢筋混凝土烟囱应根据设计使用年限和环境类别进行耐久性设计。耐久性设计除满足现行《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关要求外，尚应符合以下规定：

- 1 钢筋混凝土烟囱的环境类别应按不低于“二 b”考虑；
- 2 严寒地区的单筒式钢筋混凝土湿烟囱，其烟囱顶部 10m 范围应考虑冻融影响；
- 3 严寒地区的套筒式与多管式湿烟囱，当内筒高出钢筋混凝土外筒高度小于内筒直径及 3m 时，其烟囱顶部 10m 范围宜考虑冻融影响；
- 4 对于烟羽下洗部位的烟囱顶部，除严寒地区应考虑冻融影响外，尚应考虑烟气腐蚀影响；
- 5 钢筋混凝土烟囱的混凝土保护层最小厚度应不小于 35mm；
- 6 单筒式钢筋混凝土湿烟囱或潮湿烟囱的内侧混凝土保护层最小厚度应不小于 40mm；
- 7 钢筋混凝土烟囱的混凝土最低强度等级不应低于 C30，有冻融和烟羽下洗部位的混凝土最低强度等级不应低于 C40。

3.1.30 烟囱设计应根据有关专业或环保部门提出的要求，为固定污染源烟气排放连续监测系统（Continuous Emissions Monitoring Systems，简称 CEMS）提供采样（或监测）平台和采样孔。采样平台、钢梯及升降梯的设置应符合现行标准《固定污染源烟气（SO₂、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75 的要求。

3.1.31 烟囱抗震验算及风振计算时，其结构阻尼比可表 3.1.31 选取。

表 3.1.31 结构阻尼比

烟囱结构类型	结构阻尼比
钢筋混凝土烟囱	0.04
砖烟囱	0.05
无内衬钢烟囱	0.01
有内衬钢烟囱	0.02
塔架式钢烟囱	0.025
拉索式钢烟囱	0.04
纤维增强塑料内筒	0.015~0.03

注：对于上部钢结构、下部钢筋混凝土的高耸结构换算阻尼系数可根据该振型振动时能量耗散等效的原则确定。

3.2 施工规定

3.2.1 烟囱工程应按设计文件施工。

3.2.2 烟囱工程施工单位应制定针对性安全管理制度、计划和措施，建立健全安全生产组织管理体系，加强施工现场安全管理。

3.2.3 烟囱工程施工现场质量管理应制定相应的施工技术标准、质量管理体系、施工质量控制和质量检验制度。

3.2.4 在烟囱工程施工中应积极采用“五新”技术。新技术应经过试验和鉴定，并应制定专门规程后方可推广使用。

3.3 验收规定

3.3.1 烟囱工程的施工及验收除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

3.3.2 烟囱工程可划分为单位工程或子单位工程。烟囱的分部工程可按基础、筒身、烟囱平台、烟囱防腐蚀、烟道、附属工程等划分。塔架式钢烟囱可将塔架和筒身划分为两个分部工程。筒身可根据不同烟囱型式划分为多个子分部工程。可按表 3.3.2 规定具体划分。

表 3.3.2 烟囱工程分部工程、子分部工程和分项工程划分

序号	分部工程	子分部工程	分 项 工 程
1	地基与基础	土方工程	定位及高程控制、土方开挖、土方回填
		钢筋混凝土基础或桩基承台	垫层、模板、钢筋、混凝土、基础防腐
		无筋扩展基础	砖砌体，石砌体，混凝土与毛石混凝土
2	筒 身	钢筋混凝土筒壁	模板、钢筋、混凝土
		砖筒壁	砖砌体、钢筋
		砖内筒	耐酸砖砌体、耐酸砂浆封闭层、钢筋
		钢管壁或钢内筒	筒体制作、筒体预拼装、焊接、筒体安装
		纤维增强塑料烟囱	原材料检验、筒体制作、筒体安装、成品检验
		塔架	塔架制作、塔架预拼装、焊接、塔架安装
		内衬与隔热层	砌筑类内衬与隔热层、浇筑类内衬与隔热层、喷涂类内衬与隔热层
3	烟囱平台	钢平台	钢平台制作、钢平台安装、焊接
		组合平台	钢构件制作、钢构件安装、焊接、压型钢板、钢筋、栓钉、混凝土、混凝土预制构件
		混凝土平台	模板、钢筋、混凝土、金属灰斗制作与安装
4	烟囱防腐	涂料类防腐工程	基层、涂装
		耐酸砖和水玻璃类防腐工程	耐酸砖、水玻璃耐酸胶泥和耐酸砂浆、水玻璃轻质耐酸混凝土
5	烟道	砖混结构烟道	模板、钢筋、混凝土、耐酸砖砌体
		钢烟道	钢烟道制作、钢烟道焊接、钢烟道安装、防腐内衬、隔热层
6	烟囱附属工程	-	爬梯与平台、航空障碍灯、航空色标漆、避雷设施、电气照明、地面及门窗

3.3.3 烟囱的分项工程应由一个或若干个检验批组成，各分项工程的检验批应按本标准有关规定划分。

3.3.4 检验批合格质量标准应符合下列规定：

- 1 主控项目的质量应符合本标准的有关规定。当没有注明检查数量时，均应全数检查；
- 2 一般项目的质量应经抽样检验合格。当采用计数检验时，除有专门规定外，其检验结果应有 80%及以上符合本标准所规定的合格质量标准的要求，且不得有严重缺陷或最大偏差不得超过允许偏差值的 1.2 倍；
- 3 应具有完整的施工操作依据、质量检查记录文件及证明文件等资料。

3.3.5 分项工程合格质量标准应符合下列规定：

- 1 分项工程所含的各检验批均应符合合格质量的规定；
- 2 质量控制资料应完整。

3.3.6 分部工程和子分部工程合格质量标准应符合下列规定：

- 1 分部工程和子分部工程所含的各分项工程的质量均应验收合格；
- 2 质量控制资料应完整；
- 3 有关安全及功能的检验和抽样检测结果应符合本标准的有关规定；
- 4 观感质量验收应符合要求。

3.3.7 烟囱工程合格质量标准应符合下列规定：

- 1 烟囱工程所含的各分部和子分部工程的质量均应验收合格；
- 2 质量控制资料应完整；
- 3 烟囱工程所含的各分部和子分部工程有关安全及功能的检测资料应完整；
- 4 观感质量验收应符合要求。

3.3.8 当烟囱工程质量不符合要求时，应按下列规定处理：

- 1 经返工重做或更换器具、设备的检验批，应重新进行验收；
- 2 经有资质的检测单位检测鉴定达到设计要求的检验批，应予以验收；
- 3 经有资质的检测单位检测鉴定不能达到设计要求时，经原设计单位核算认可能满足结构安全和使用功能的检验批，可予以验收；
- 4 经返修或加固处理的分部或分项工程，当外形尺寸改变且能满足安全使用要求时，可按技术处理方案和协商文件验收。

3.3.9 经返修或加固处理仍不能满足烟囱安全使用要求的分部工程和单位工程，严禁验收。

3.3.10 烟囱工程所用的材料应有产品的合格证书或产品性能检测报告。水泥、砂石、钢筋、外加剂、耐酸材料等尚应有材料主要性能的复验报告。钢材的复检应符合国家现行标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的有关规定。

3.3.11 普通黏土砖内衬和砖烟囱筒壁，其施工质量控制等级不应低于国家现行标准《砌体工程施工质量验收规范》GB50203 中的 B 级要求。耐火砖内衬、砌筑类防腐蚀内衬和砖内筒，其施工质量控制等级应满足国家现行标准《砌体工程施工质量验收规范》GB50203 的 A 级要求。

4 材 料

4.1 砖 石

4.1.1 砖烟囱筒壁宜采用烧结普通粘土砖，且强度等级不应低于 MU10，砂浆强度等级不应低于 M5。

4.1.2 烟囱及烟道的内衬材料可按下列规定采用：

1 当烟气温度低于 400℃时，可采用强度等级为 MU10 的烧结普通粘土砖和强度等级为 M5 的混合砂浆；

2 当烟气温度为 400℃~500℃时，可采用强度等级为 MU10 的烧结普通粘土砖和耐热砂浆；

3 当烟气温度高于 500℃时，可采用粘土质耐火砖和粘土质火泥泥浆，也可采用耐热混凝土。

4 当烟气腐蚀等级为弱腐蚀及以上时，内衬材料尚应符和本标准第 12 章的有关规定。

4.1.3 石砌基础的材料应采用未风化的天然石材，并应根据地基土的潮湿程度按下列规定采用：

1 当地基土稍湿时，应采用强度等级不低于 MU30 的石材和强度等级不低于 M5 的水泥砂浆砌筑；

2 当地基土很湿时，应采用强度等级不低于 MU30 的石材和强度等级不低于 M7.5 的水泥砂浆砌筑；

3 当地基土含水饱和时，应采用强度等级不低于 MU40 的石材和强度等级不低于 M10 的水泥砂浆砌筑。

4.1.4 砖砌体在温度作用下的抗压强度设计值和弹性模量，可不计入温度的影响，按现行国家标准《砌体结构设计规范》GB 50003 的有关规定执行。

4.1.5 砖砌体的线膨胀系数 α_m 可按下列规定采用：

1 当砌体受热温度 T 为 20℃~200℃时， α_m 可采用 $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ；

2 当砌体受热温度 $T > 200^\circ\text{C}$ ，且 $T \leq 400^\circ\text{C}$ 时， α_m 可按下式确定：

$$\alpha_m = 5 \times 10^{-6} + \frac{T - 200}{200} \times 10^{-6} \quad (4.1.5)$$

4.2 混 凝 土

4.2.1 钢筋混凝土烟囱筒壁的混凝土宜按下列规定采用：

1 混凝土宜采用普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥配制，混凝土的水胶比不宜大于 0.45，每立方米混凝土水泥用量不应超过 450kg；

2 对于腐蚀环境下的烟囱，筒壁和基础混凝土的基本要求尚应符合现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 和本标准第 12 章的有关规定；

3 混凝土的骨料应坚硬致密，粗骨料宜采用玄武岩、闪长岩、花岗岩等破碎的碎石或河卵石。细骨料宜采用天然砂，也可采用玄武岩、闪长岩、花岗岩等岩石经破碎筛分后的产品，但不得含有金属矿物、云母、硫酸化合物和硫化物；

4 粗骨料粒径不应超过筒壁厚度的 1/5 和钢筋净距的 3/4，同时最大粒径不应超过 60mm；泵送混凝土时最大粒径不应超过 40mm。

4.2.2 基础与烟道混凝土最低强度等级应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 的有关规定，钢筋混凝土基础混凝土强度等级不应低于 C 25。

4.2.3 混凝土在温度作用下的强度标准值应按表 4.2.3 的规定采用。

表 4.2.3 混凝土在温度作用下的强度标准值 (N/mm²)

受力状态	符号	温度 (°C)	混凝土强度等级						
			C 20	C 25	C 30	C 35	C 40	C45	C50
轴心抗压	f_{ctk}	20	13.40	16.70	20.10	23.40	26.80	29.60	32.40
		60	11.30	14.20	16.60	19.40	22.20	26.00	29.50
		100	10.70	13.40	15.60	18.30	20.90	24.30	27.50
		150	10.10	12.70	14.80	17.30	19.80	22.90	25.80
轴心抗拉	f_{tk}	20	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64
		60	1.24	1.41	1.57	1.74	1.86	2.12	2.33
		100	1.08	1.23	1.37	1.52	1.63	1.84	2.01
		150	0.93	1.06	1.18	1.31	1.40	1.72	1.79

注:温度为中间值时,可采用线性插入法计算。

4.2.4 受热温度值应按以下规定采用:

- 1 轴心受压及轴心受拉时取计算截面的平均温度;
- 2 弯曲受压时取表面最高受热温度。

4.2.5 混凝土强度设计值应按下列公式计算:

$$f_{ct} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{ct}} \quad (4.2.5-1)$$

$$f_{tt} = \frac{f_{tk}}{\gamma_{tt}} \quad (4.2.5-2)$$

式中 f_{ct} 、 f_{tt} ——混凝土轴心抗压、轴心抗拉强度设计值(N/mm²);

f_{ctk} 、 f_{tk} ——混凝土轴心抗压、轴心抗拉强度标准值,按本标准表 4.2.3 的规定采用(N/mm²);

γ_{ct} 、 γ_{tt} ——混凝土轴心抗压强度、轴心抗拉强度分项系数,按表 4.2.5 的规定采用。

表 4.2.5 混凝土在温度作用下的材料分项系数

序号	构件名称	γ_{ct}	γ_{tt}
1	筒壁	1.60	1.60
2	基础及其他构件	1.40	1.40

4.2.6 混凝土在温度作用下的弹性模量可按下式计算：

$$E_{ct} = \beta_c E_c \quad (4.2.6)$$

式中 E_{ct} ——混凝土在温度作用下的弹性模量(N/mm²)；

β_c ——混凝土在温度作用下的弹性模量折减系数，按表 4.2.6 的规定采用；

E_c ——混凝土弹性模量(N/mm²)，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用。

表 4.2.6 混凝土弹性模量折减系数 β_c

系数	受热温度 (°C)				受热温度的取值
	20	60	100	150	
β_c	1.00	0.85	0.75	0.65	承载力极限状态计算时，取筒壁、壳体基础等的平均温度。正常使用极限状态计算时，取筒壁内表面温度。

注：温度为中间值时，应采用线性插入法计算。

4.2.7 混凝土的线膨胀系数 α_c 可采用 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

4.3 钢筋和钢材

4.3.1 钢筋混凝土筒壁的配筋宜采用 HRB335 级钢筋，也可采用 HRB400 级钢筋。抗震设防烈度 8 度以上地区（含 8 度地区），宜选用 HRB335E、HRB400E 级钢筋。砖筒壁的环向钢筋可采用 HPB300 级钢筋。钢筋性能应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第一部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1 和《钢筋混凝土用钢 第二部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2 的有关规定。

4.3.2 在温度作用下，钢筋的强度标准值应按下面公式计算：

$$f_{ytk} = \beta_{yt} f_{yk} \quad (4.3.2)$$

式中： f_{ytk} ——钢筋在温度作用下强度标准值(N/mm²)；

f_{yk} ——钢筋在常温下强度标准值(N/mm²)，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 采用；

β_{yt} ——钢筋在温度作用下强度折减系数，温度不大于 100°C 时取 1.00，150°C 时取 0.90，中间值采用线性插入。

4.3.3 钢筋的强度设计值应按下列公式计算：

$$f_{yt} = \frac{f_{ytk}}{\gamma_{yt}} \quad (4.3.3)$$

式中 f_{yt} ——钢筋在温度作用下的抗拉强度设计值(N/mm²);

γ_{yt} ——钢筋在温度作用下的抗拉强度分项系数, 按表 4.3.3 的规定采用。

表 4.3.3 钢筋在温度作用下的材料分项系数

序号	构件名称	γ_{yt}
1	钢筋混凝土筒壁	1.6
2	砖筒壁竖筋	1.9
3	砖筒壁环筋	1.6
4	其他构件	1.1

注: 当钢筋在温度作用下的抗拉强度设计值的计算值低于国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的常温下相应数值时, 应取常温下强度设计值。

4.3.4 钢烟囱的钢材、钢筋混凝土烟囱及砖烟囱附件的钢材, 应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定, 并应符合下列规定:

1 钢烟囱塔架和筒壁可采用 Q 235、Q 345、Q 390、Q 420 钢。其质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。

2 处在大气潮湿地区的钢烟囱塔架和筒壁或排放烟气属于中等腐蚀性的筒壁, 宜采用 Q 235NH、Q 295NH 或 Q 355NH 可焊接低合金耐候钢。其质量应符合现行国家标准《耐候结构钢》GB/T 4171 的有关规定。腐蚀性烟气分级按本标准第 12 章的规定执行。

3 烟囱的平台、爬梯和砖烟囱的环向钢箍宜采用 Q 235B 级钢材。

4.3.5 当作用温度不大于 100℃时, 钢材和焊缝的强度设计值应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定采用。对未作规定的耐候钢应按表 4.3.5-1 和表 4.3.5-2 的规定采用。

表 4.3.5-1 耐候钢的强度设计值 (N/mm²)

钢 材		抗拉、抗压和 抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压(刨平顶紧) f_{ce}
牌 号	厚度 t (mm)			
Q235NH	$t \leq 16$	210	120	275
	$16 < t \leq 40$	200	115	275
	$40 < t \leq 60$	190	110	275
Q295NH	$t \leq 16$	265	150	320
	$16 < t \leq 40$	255	145	320
	$40 < t \leq 60$	245	140	320
Q355NH	$t \leq 16$	315	185	370
	$16 < t \leq 40$	310	180	370
	$40 < t \leq 60$	300	170	370

表 4.3.5-2 耐候钢的焊缝强度设计值 (N/mm²)

焊接方法和焊条型号	构件钢材		对接焊缝			角焊缝 抗拉、 抗压和 抗剪 f_f^w	
	牌号	厚度 $t(\text{mm})$	抗压强度 f_c^w	焊接质量为下列等级 时, 抗拉强度 f_t^w			抗剪 强度 f_v^w
				一级、二级	三级		
自动焊、半自动焊和 E43 型焊条的手工焊	Q235NH	$t \leq 16$	210	210	175	120	140
		$16 < t \leq 40$	200	200	170	115	140
		$40 < t \leq 60$	190	190	160	110	140
自动焊、半自动焊和 E43 型焊条的手工焊	Q295NH	$t \leq 16$	265	265	225	150	140
		$16 < t \leq 40$	255	255	215	145	140
		$40 < t \leq 60$	245	245	210	140	140
自动焊、半自动焊和 E50 型焊条的手工焊	Q355NH	$t \leq 16$	315	315	270	185	165
		$16 < t \leq 40$	310	310	260	180	165
		$40 < t \leq 60$	300	300	255	170	165

注: 1 自动焊和半自动焊所采用的焊丝和焊剂, 应保证其熔敷金属抗拉强度不低于相应手工焊焊条的数值;

2 焊缝质量等级应符合现行国家标准《钢结构工程施工及验收规范》GB 50205 的有关规定;

3 对接焊缝抗弯受压区强度取 f_c^w , 抗弯受拉区强度设计值取 f_t^w 。

4.3.6 Q235、Q345、Q390 和 Q420 钢材及其焊缝在温度作用下的强度设计值, 应按下列公式计算:

$$f_t = \gamma_s f \quad (4.3.6-1)$$

$$f_{vt} = \gamma_s f_v \quad (4.3.6-2)$$

$$f_{xt}^w = \gamma_s f_x^w \quad (4.3.6-3)$$

$$\gamma_s = 1.0 + \frac{T}{767 \times \ln \frac{T}{1750}} \quad (4.3.6-4)$$

式中 f_t ——钢材在温度作用下的抗拉、抗压和抗弯强度设计值(N/mm²);

f_{vt} ——钢材在温度作用下的抗剪强度设计值(N/mm²);

f_{xt}^w ——焊缝在温度作用下各种受力状态的强度设计值(N/mm²), 下标字母 x 为字母 c

(抗压)、t (抗拉)、v (抗剪) 和 f (角焊缝强度) 的代表;

γ_s ——钢材及焊缝在温度作用下强度设计值的折减系数;

f ——钢材在温度不大于 100℃时的抗拉、抗压和抗弯强度设计值(N/mm²);

f_v ——钢材在温度不大于 100℃时的抗剪强度设计值(N/mm²);

f_x^w ——焊缝在温度不大于 100℃时各种受力状态的强度设计值(N/mm²), 下标字母 x

为字母 c (抗压)、 t (抗拉)、 v (抗剪) 和 f (角焊缝强度) 的代表;

T ——钢材或焊缝计算处温度 (℃)。

4.3.7 钢筋在温度作用下的弹性模量可不计及温度折减, 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 采用。钢材在温度作用下的弹性模量应折减, 并按下式计算:

$$E_t = \beta_d E \quad (4.3.7)$$

式中: E_t ——钢材在温度作用下的弹性模量(N/mm²);

β_d ——钢材在温度作用下弹性模量的折减系数, 按表 4.3.7 的规定采用;

E ——钢材在作用温度小于或等于 100℃时的弹性模量(N/mm²), 按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定采用。

表 4.3.7 钢材弹性模量的温度折减系数

系数	作用温度 (℃)						
	≤100	150	200	250	300	350	400
β_d	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.88	0.83

注: 温度为中间值时, 应采用线性插入法计算。

4.3.8 钢筋和钢材的线膨胀系数 α_s 可采用 $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

4.4 材料热工计算指标

4.4.1 隔热材料应采用无机材料, 其干燥状态下的重力密度不宜大于 8kN/m^3 。常用的隔热材料有: 硅藻土砖、膨胀珍珠岩、水泥膨胀珍珠岩制品、高炉水渣、矿渣棉和岩棉等。

4.4.2 材料的热工计算指标, 应按实际试验资料确定。当无试验资料时, 对几种常用的材料, 干燥状态下可按表 4.4.2 的规定采用。在确定材料的热工计算指标时, 应考虑下列因素对隔热材料导热性能的影响:

1 对于松散型隔热材料, 应考虑由于运输、捆扎、堆放等原因所造成的导热系数增大的影响;

2 对于烟气温度低于 150℃时, 宜采用憎水性隔热材料, 否则应考虑湿度对导热性能的影响。

表 4.4.2 材料在干燥状态下的热工计算指标

材料种类	最高使用温度 (°C)	重力密度 (kN/m ³)	导热系数 [W/m·K]
普通粘土砖砌体	500	18	0.81+0.0006T
粘土耐火砖砌体	1400	19	0.93+0.0006T
陶土砖砌体	1150	18~22	(0.35~1.10)+0.0005T
漂珠轻质耐火砖	900	6~11	0.20~0.40
硅藻土砖砌体	900	5	0.12+0.00023T
		6	0.14+0.00023T
		7	0.17+0.00023T
普通钢筋混凝土	200	24	1.74+0.0005T
普通混凝土	200	23	1.51+0.0005T
耐火混凝土	1200	19	0.82+0.0006T
轻骨料混凝土(骨料 为页岩陶粒或浮石)	400	15	0.67+0.00012T
		13	0.53+0.00012T
		11	0.42+0.00012T
膨胀珍珠岩(松散体)	750	0.8~2.5	(0.052~0.076)+0.0001T
水泥珍珠岩制品	600	4.5	(0.058~0.16)+0.0001T
高炉水渣	800	5.0	(0.1~0.16)+0.0003T
岩 棉	500	0.5~2.5	(0.036~0.05)+0.0002T
矿渣棉	600	1.2~1.5	(0.031~0.044)+0.0002T
矿渣棉制品	600	3.5~4.0	(0.047~0.07)+0.0002T
垂直封闭空气层(厚 度为 50mm)			0.333+0.0052T
建筑钢		78.5	58.15
自然干燥下:			
砂土		16	0.35~1.28
粘土		18~20	0.58~1.45
粘土夹砂		18	0.69~1.26
纤维增强塑料		17~20	0.23~0.29

注: 1 有条件时应采用实测数据;
2 表中 T —烟气温度(°C)。

5 荷载与作用

5.1 荷载与作用的分类

5.1.1 烟囱的荷载与作用可分为下列四类：

- 1 永久作用：结构自重、正常烟气温度作用、正常烟气压力、土压力、拉线的拉力；
- 2 可变荷载与作用：风荷载、大气温度作用、安装检修荷载、平台活荷载、雪荷载、裹冰荷载等；
- 3 偶然作用：烟囱非正常操作烟气压力或烟气爆炸作用、事故温度作用和拉线断线等；
- 4 地震作用：常遇地震作用和罕遇地震作用。

5.1.2 烟气产生的烟气温度作用和烟气压力作用应按正常运行工况和非正常运行工况两种情况考虑；因脱硫装置或余热锅炉设备故障等原因所引起事故状态可按偶然设计状况进行设计；烟气爆炸应按偶然设计状况设计。

5.1.3 本标准未规定的荷载与作用，均按现行国家标准《建筑结构荷载规范》（GB50009）和《建筑抗震设计规范》（GB50011）的规定采用。

5.2 风荷载

5.2.1 顺风向作用在烟囱表面单位面积上的风荷载标准值应按下列公式计算：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (5.2.1-1)$$

$$\mu_s = \begin{cases} 0.65 & \text{当 } z < H - 1.5d_H \\ 1.0 & \text{当 } z \geq H - 1.5d_H \end{cases} \quad (5.2.1-2)$$

式中 w_k —— 作用烟囱 z 高度处单位投影面积上的风荷载标准值（ kN/m^2 ）；

w_0 —— 基本风压（ kN/m^2 ），按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 规定的 50 年重现期的风压采用，且不得小于 0.35kN/m^2 ，烟囱高度超过 200m 时，其计算风压应按 1.1 倍基本风压考虑；

μ_z —— z 高度处的风压高度变化系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 规定的方法计算；

μ_s —— 圆形截面烟囱风荷载体型系数；对于有破风圈的钢烟囱，其破风圈范围

钢烟囱筒身体形系数取 1.4；其他非圆形截面烟囱体形系数按实际情况确定；

β_z —— z 高度处的风振系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 规定的方法计算；

H ——地面以上烟囱总高度 (m)；

d_H ——烟囱顶部外直径 (m)，式中 $1.5d_H \leq 15m$ 。

5.2.2 对于钢筋混凝土烟囱和钢结构烟囱，当其顶部 1/3 高度范围内的坡度不大于 2%时，且顶部风速满足下列条件时，应验算其横风向共振响应。

$$1.2v_H > v_{cr,j} \quad (5.2.2-1)$$

$$v_{cr,j} = \frac{d}{S_t \times T_j} \quad (5.2.2-2)$$

$$v_H = 40\sqrt{\mu_H w_0} \quad (5.2.2-3)$$

式中 $v_{cr,j}$ ——第 j 振型临界风速(m/s)；

v_H ——烟囱顶部 H 处风速(m/s)；

d ——烟囱 2/3 高度处外径；

S_t ——斯脱罗哈数，取值范围为 0.15~0.3；

T_j ——结构或杆件的第 j 振型自振周期(s)；

μ_H ——烟囱顶部 H 处风压高度变化系数。

5.2.3 横风向共振响应可采用以下等效风荷载进行简化计算

$$w_{czj} = \left| \lambda_j \right| \frac{v_{cr,j}^2 \varphi_{zj}}{12800 \zeta_j} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (5.2.3-1)$$

$$\lambda_j = \lambda_j(H_1 / H) - \lambda_j(H_2 / H) \quad (5.2.3-2)$$

$$H_1 = H \left(\frac{v_{cr,j}}{1.2v_H} \right)^{1/\alpha} \quad (5.2.3-3)$$

$$H_2 = H \left(\frac{1.3v_{cr,j}}{v_H} \right)^{1/\alpha} \quad (5.2.3-4)$$

式中 ζ_j ——第 j 振型结构阻尼比，对于第一振型按本标准 3.1.31 条规定选取。对于高振

型的阻尼比，如无实测资料，可参考第一振型选用；

H_1 ——横风向共振荷载范围起点高度(m)；

H_2 ——横风向共振荷载范围终点高度(m)；

α ——地面粗糙度系数，对应 A、B、C 和 D 类地面粗糙度，可分别取 0.12、0.15、0.22 和 0.30，对于钢烟囱可根据实际情况取不利数值；

φ_{zj} ——在 z 高度处结构的 j 振型系数；

$\lambda_j(H_i/H)$ —— j 振型计算系数，根据“锁住区”起点高度 H_1 或终点高度 H_2 与烟囱整个高度 H 的比值按表 5.2.3 选用。

表 5.2.3 $\lambda_j(H_i/H)$ 计算系数

振型 序号	H_i/H										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	1.56	1.55	1.54	1.49	1.42	1.31	1.15	0.94	0.68	0.37	0
2	0.83	0.82	0.76	0.60	0.37	0.09	-0.16	-0.33	-0.38	-0.27	0

注：中间值可采用线性插值计算。

5.2.4 在径向风压作用下，烟囱竖向截面最大环向风弯矩可按下列公式计算：

$$M_{\alpha} = 0.31\beta_{gz}\mu_z w_0^2 r_0^2 \quad (5.2.4-1)$$

$$M_{\omega} = 0.27\beta_{gz}\mu_z w_0^2 r_0^2 \quad (5.2.4-2)$$

$$\beta_{gz} = 1 + 2gI_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha} \quad (5.2.4-3)$$

式中 M_{α} ——筒壁内侧受拉环向风弯矩 ($kN \cdot m/m$)；

M_{ω} ——筒壁外侧受拉环向风弯矩 ($kN \cdot m/m$)；

μ_z ——风压高度变化系数；

β_{gz} ——高度 z 处的阵风系数，对应 A、B、C 和 D 类地面粗糙度，其在烟囱根部取值应分别不大于 1.65、1.70、2.05 和 2.40；

r_0^2 ——计算高度处烟囱筒壁中心半径(m);

g ——峰值因子, 可取 2.5;

I_{10} ——10m 高度名义湍流强度, 对应 A、B、C 和 D 类地面粗糙度, 可分别取 0.12、0.14、0.23 和 0.39。

5.2.5 在验算横风向共振时, 应考虑风速小于基本设计风压工况下可能发生的最不利共振响应。

5.2.6 当烟囱发生横风向共振时, 可将横风向共振荷载效应与对应风速下顺风向荷载效应按下式进行组合:

$$F_k = \sqrt{\left(\frac{F_{Dk}}{\beta_z}\right)^2 + F_{Lk}^2} \quad (5.2.6)$$

式中 F_k ——顺风向风荷载与横风向风振荷载组合值 (kN/m);

F_{Dk} ——对应横风向共振风速下顺风向单位高度风力标准值 (kN/m);

F_{Lk} ——横风向单位高度风力标准值 (kN/m)。

5.2.7 计算塔架式钢烟囱风荷载时, 可不考虑塔架与排烟筒的相互影响, 可分别计算塔架和排烟筒的基本风荷载。

5.2.8 塔架式钢烟囱的排烟筒为两个和两个以上时, 排烟筒的风荷载体型系数, 应由风洞试验确定。

5.3 平台活荷载与积灰荷载

5.3.1 烟囱平台活荷载取值应符合下列规定:

1 承重平台。分段支承排烟筒和悬挂式排烟筒的承重平台除考虑承受排烟筒自重荷载外, 还应考虑 7kN/m^2 的施工检修荷载。

2 非承重检修平台、采样平台和障碍灯平台, 活荷载可取 3kN/m^2 。

3 套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱顶部平台活荷载可取 7kN/m^2 。

5.3.2 排烟筒内壁应根据内衬材料特性及烟气条件, 考虑 $0\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 厚积灰荷载。干积灰重力密度可取 10.4 kN/m^3 ; 潮湿积灰重力密度可取 11.7 kN/m^3 ; 湿积灰重力密度可取 12.8

kN/m³。

5.4 裹冰荷载

5.4.1 拉索式钢烟囱的拉索和塔架式钢烟囱的塔架，当符合裹冰气象条件时，应考虑裹冰荷载。裹冰荷载的计算原则，可按现行国家标准《高耸结构设计规范》(GB50135)的有关规定进行计算。

5.5 地震作用

5.5.1 本节的规定适用于抗震设防烈度为6度到9度地区的烟囱地震作用计算。本节未做规定的均按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011的规定执行。烟囱的结构阻尼比按本标准3.1.31条执行。

5.5.2 抗震设防烈度为6度时，I、II类场地的砖烟囱，可以仅配置环向钢箍或环向钢筋，否则应按本标准第11.5节的规定配置竖向钢筋。

5.5.3 水平地震作用可按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011规定的振型分解反应谱法进行计算。高度不超过150m时，可考虑前3个振型组合；高度超过150m时，可考虑前3~5个振型组合；高度大于200m时，考虑的振型数量不应少于5个。

5.5.4 烟囱竖向地震作用标准值可按下列公式计算。

1 烟囱根部的竖向地震作用按下式计算：

$$F_{Ev0} = \pm 0.75 \alpha_{v\max} G_E \quad (5.5.4-1)$$

2 其余各截面按下列公式计算：

$$F_{Evik} = \pm \eta \left(G_{iE} - \frac{G_{iE}^2}{G_E} \right) \quad (5.5.4-2)$$

$$\eta = 4(1+C)\kappa_v \quad (5.5.4-3)$$

式中 F_{Evik} ——计算截面*i*的竖向地震作用标准值(kN)，对于烟囱根部截面，当 $F_{Evik} < F_{Ev0}$

时，取 $F_{Evik} = F_{Ev0}$ ；

G_{iE} ——计算截面*i*以上的烟囱重力荷载代表值(kN)，取截面*i*以上的重力荷载标

准值与平台活荷载组合值之和，活荷载组合值系数按本标准表3.1.9条的规

定采用；套筒或多筒式烟囱，当采用自承重式排烟筒时， G_{iE} 不包括排烟

筒重量；当采用平台支承排烟筒时，则平台及排烟筒重量通过平台传给外承重筒，在 G_{iE} 中应计入平台及排烟筒重量；

G_E ——基础顶面以上的烟囱总重力荷载代表值（kN），取烟囱总重力荷载标准值与各层平台活荷载组合值之和，活荷载组合值系数按本标准表 3.1.9 条的规定采用；套筒或多筒式烟囱，当采用自承重式排烟筒时， G_E 不包括排烟筒重量；当采用平台支承排烟筒时，则平台及排烟筒重量通过平台传给外承重筒，在 G_E 中应计入平台及排烟筒重量；

C ——结构材料的弹性恢复系数，砖烟囱取 $C = 0.6$ ；钢筋混凝土烟囱与纤维增强塑料内筒取 $C = 0.7$ ；钢烟囱取 $C = 0.8$ ；

κ_v ——竖向地震系数，按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 所规定的设计基本地震加速度与重力加速度比值的 65% 采用，即：7 度取 $\kappa_v = 0.065(0.1)$ ；8 度取 $\kappa_v = 0.13(0.2)$ ；9 度取 $\kappa_v = 0.26$ ； $\kappa_v = 0.1$ 和 $\kappa_v = 0.2$ 分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.3g 的地区；

α_{vmax} ——竖向地震影响系数最大值，按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 的规定，取水平地震影响系数最大值的 65%。

5.5.5 悬挂式和分段支承式排烟筒竖向地震力计算时，可将悬挂（或支承）平台作为排烟筒根部、排烟筒自由端作为顶部按本标准第 5.5.4 条进行计算，并应根据悬挂（或支承）平台的高度位置，对计算结果乘以竖向地震效应增大系数，增大系数可按下列公式进行计算：

$$\beta = \zeta \beta_{vi} \quad (5.5.5-1)$$

$$\beta_{vi} = 4(1+C)\left(1 - \frac{G_{iE}}{G_E}\right) \quad (5.5.5-2)$$

$$\zeta = \frac{1}{1 + \frac{G_{vE} L^3}{47 E I T_{vg}^2}} \quad (5.5.5-3)$$

式中 β ——竖向地震效应增大系数；

β_{vi} ——修正前第 i 层悬挂（或支承）平台竖向地震效应增大系数；

ζ ——平台刚度对竖向地震效应的折减系数;

G_{vE} ——悬挂 (或支承) 平台一根主梁所承受的总重力荷载(包括主梁自重荷载)代表
值(kN);

L ——主梁跨度 (m);

E ——主梁材料的弹性模量 (kN/m²) ;

I ——主梁截面惯性矩 (m⁴);

T_{vg} ——竖向地震场地特征周期 (s), 可取设计第一组水平地震特征周期的 65%。

5.6 温度作用

5.6.1 烟囱内部的烟气温度, 应符合下列规定:

1 计算烟囱最高受热温度和确定材料在温度作用下的折减系数时, 应采用烟囱使用时的最高温度。

2 确定烟气露点温度和防腐蚀措施时, 应采用烟气温度变化范围下限值。

5.6.2 烟囱外部的环境温度, 应按下列规定采用:

1 计算烟囱最高受热温度和确定材料在温度作用下的折减系数时, 应采用当地气象资料极端最高温度。

2 计算筒壁温度差时, 应采用当地气象资料极端最低温度。

5.6.3 筒壁计算出的各点受热温度, 均不应大于本标准第 3.1.26 条和 4.4 节中规定的相应材料最高使用温度允许值。

5.6.4 烟囱内衬、隔热层和筒壁以及基础和烟道各点的受热温度(图 5.6.4-1 或图 5.6.4-2)可按下列式计算:

$$T_{cj} = T_g - \frac{T_g - T_a}{R_{tot}} (R_{in} + \sum_{i=1}^j R_i) \quad (5.6.4)$$

式中 T_{cj} ——计算点 j 的受热温度 (°C);

T_g ——烟气温度 (°C);

T_a ——空气温度 (°C);

R_{tot} ——内衬、隔热层、筒壁或基础环壁及环壁外侧计算土层等总热阻 (m²·K / W);

R_i ——第 i 层热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$);

R_{in} ——内衬内表面的热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)。

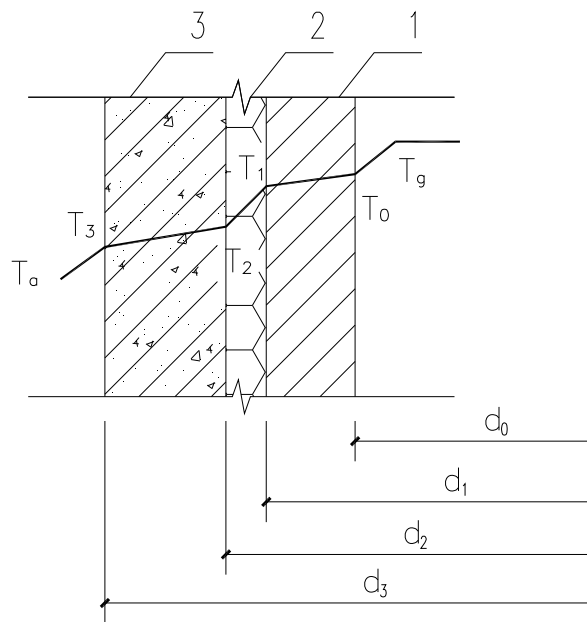


图 5.6.4-1 单筒烟囱传热计算

1-内衬; 2-隔热层; 3-筒壁

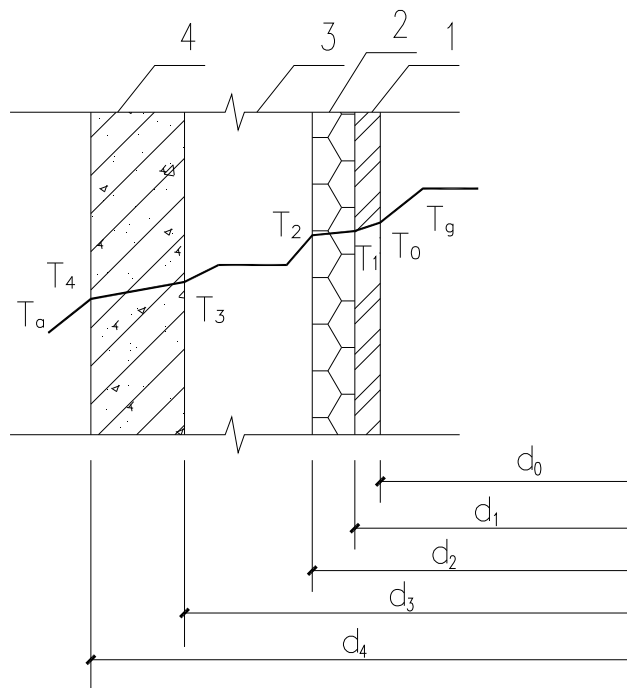


图 5.6.4-2 套筒烟囱传热计算

1-内筒; 2-隔热层; 3-空气层; 4-筒壁

5.6.5 单筒烟囱内衬、隔热层、筒壁热阻以及总热阻可分别按下列公式计算：

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_{i=1}^3 R_i + R_{ex} \quad (5.6.5-1)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in} d_0} \quad (5.6.5-2)$$

$$R_i = \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_{i-1}} \quad (5.6.5-3)$$

$$R_{ex} = \frac{1}{\alpha_{ex} d_3} \quad (5.6.5-4)$$

式中： R_i ——筒身第 i 层结构热阻 ($i=1$ 代表内衬； $i=2$ 代表隔热层； $i=3$ 代表筒壁)
($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)；

λ_i ——筒身第 i 层结构导热系数 [$\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$]；

α_{in} ——内衬内表面传热系数 [$\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$]；

α_{ex} ——筒壁外表面传热系数 [$\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$]；

R_{ex} ——筒壁外表面的热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)。

d_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 ——分别为内衬、隔热层、筒壁内直径及筒壁外直径 (m)。

5.6.6 套筒烟囱内筒、隔热层、筒壁热阻以及总热阻可分别按下列公式进行计算：

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_{i=1}^4 R_i + R_{ex} \quad (5.6.6-1)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\beta \alpha_{in} d_0} \quad (5.6.6-2)$$

$$R_1 = \frac{1}{2\beta \lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (5.6.6-3)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\beta \lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (5.6.6-4)$$

$$R_3 = \frac{l}{\alpha_s d_2} \quad (5.6.6-5)$$

$$R_4 = \frac{l}{2\lambda_4} \ln \frac{d_4}{d_3} \quad (5.6.6-6)$$

$$R_{ex} = \frac{l}{\alpha_{ex} d_4} \quad (5.6.6-7)$$

$$\alpha_s = 1.211 + 0.0681T_g \quad (5.6.6-8)$$

式中 β ——有通风条件时的外筒与内筒传热比,外筒与内筒间距不应小于 100mm,并取 β

$=0.5$;

α_s ——有通风条件时,外筒内表面与内筒外表面的传热系数。

5.6.7 矩形烟道侧壁或地下烟道的烟囱基础底板的总热阻可按本标准公式(5.6.5-1)计算,各层热阻可按下列公式进行计算:

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}} \quad (5.6.7-1)$$

$$R_1 = \frac{t_i}{\lambda_1} \quad (5.6.7-2)$$

$$R_{ex} = \frac{1}{\alpha_{ex}} \quad (5.6.7-3)$$

式中 t_i ——分别为内衬、隔热层、筒壁或计算土层厚度 (m)。

5.6.8 内衬内表面的传热系数和筒壁或计算土层外表面的传热系数,可分别按表 5.6.8-1 及表 5.6.8-2 采用。

表 5.6.8-1 内衬内表面的传热系数 α_{in}

烟气温度 (°C)	传热系数[W / (m ² · K)]
50~100	33
101~300	38
>300	58

表 5.6.8-2 筒壁或计算土层外表面的传热系数 α_{ex}

季 节	传热系数[W / (m ² · K)]
夏 季	12
冬 季	23

5.6.9 烟道口上部烟气温差可按下式进行计算：

$$\Delta T_g = A \cdot \Delta T_0 \cdot e^{-(B \cdot C \cdot K \cdot z / d)} \quad (5.6.9-1)$$

$$\Delta T_0 = T_A - T_B \quad (5.6.9-2)$$

式中 ΔT_g ——距离烟道口顶部z高度处的横跨内筒直径两端烟气不均匀分布温差 (°C)；

A——热量传递修正系数，按表5.6.9-1选取；

ΔT_0 ——烟道顶部位置处的横跨内筒直径两端烟气不均匀分布温差 (°C)，单个烟道

及 $\Delta T_0 = 0$ 时，取 $\Delta T_0 = 15$ °C；

T_A ——温度较高烟道的烟气温度 (°C)；

T_B ——温度较低烟道的烟气温度 (°C)；

B——烟气流量修正系数，按表5.6.9-2选取；

K——烟道宽度修正系数，按表5.6.9-3选取；

C——隔烟墙或倒流平台修正系数，当无隔烟墙或倒流平台时取C=1.0；当有隔烟墙或倒流平台时取C=0.375；

z——距离烟道口顶部计算点的距离 (m)；

d——内筒内直径 (m)。

表5.6.9-1 热量传递修正系数A

ΔT_0 (°C)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
A	1.0	0.96	0.92	0.86	0.79	0.74	0.69	0.65	0.62

表5.6.9-2 烟气流量修正系数B

烟气流量比	1.0	0.8	0.6	0.4
B	0.40	0.48	0.57	0.65

注：单个烟道时，取B=0.40。

表5.6.9-3 烟道宽度修正系K

d/W	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
K	1.00	1.03	1.07	1.10	1.13	1.17	1.20

注：W为烟道口宽度。

5.6.10 横跨内筒直径两端，筒壁厚度中点处温度差可按式进行计算：

$$\Delta T_m = \Delta T_g \left(1 - \frac{R_{tot}^c}{R_{tot}}\right) \quad (5.6.10)$$

式中 R_{tot}^c ——从烟气到内筒筒壁中点的总热阻 ($m^2 \cdot K / W$)。

5.6.11 横跨内筒直径两端烟气不均匀分布温差对内筒产生的水平位移可按下列公式计算：

1 烟道口区域温差产生的变形

$$u_{x1} = \theta_0 H_B \left(z + \frac{1}{2} H_B\right) \quad (5.6.11-1)$$

$$\theta_0 = 0.811 \times \frac{\alpha_z \Delta T_{m0}}{d} \quad (5.6.11-2)$$

2 烟道口以上截面温差引起的变形

$$u_{x2} = \frac{\theta_0}{V} \left[z - \frac{1}{V} (1 - e^{-Vz})\right] \quad (5.6.11-3)$$

$$V = (B \cdot C \cdot K) / d \quad (5.6.11-4)$$

式中 u_{x1} 、 u_{x2} ——距离烟道口顶部z处筒壁截面的水平位移 (m)；

θ_0 ——在烟道口范围内的截面转角变位 (弧度)；

H_B ——烟道口高度 (m)；

α_z ——筒壁材料的纵向膨胀系数；

ΔT_{m0} ——为z=0时 ΔT_m 值。

5.6.12 钢或纤维增强塑料内筒轴向温度应力应根据各层支承平台约束情况确定。内筒可按梁柱计算模型处理，并令各层支承平台位置的位移与按 5.6.11 条计算的相应位置处的位移相等来计算梁柱应力，该应力可近似为内筒的轴向温度应力。内筒轴向温度应力也可按下列公式近似计算：

$$\sigma_m^T = 0.4 E_{zc} \alpha_z \Delta T_m \quad (5.6.12-1)$$

$$\sigma_{sec}^T = 0.10E_{zc}\alpha_z\Delta T_g \quad (5.6.12-2)$$

$$\sigma_b^T = 0.5E_{zb}\alpha_z\Delta T_w \quad (5.6.12-3)$$

式中 σ_m^T ——筒身弯曲温度应力 (MPa);

σ_{sec}^T ——温度次应力 (MPa);

σ_b^T ——筒壁内外温差引起的温度应力 (MPa);

E_{zc} ——筒壁轴向受压或受拉弹性模量 (MPa);

E_{zb} ——筒壁轴向弯曲弹性模量 (MPa);

α_z ——筒壁材料轴向膨胀系数;

ΔT_w ——筒壁内外温差 (°C)。

5.6.13 钢或纤维增强塑料内筒环向温度应力可按下式计算。

$$\sigma_\theta^T = 0.5E_{\theta b}\alpha_\theta\Delta T_w \quad (5.6.13)$$

式中 α_θ ——筒壁材料环向膨胀系数;

$E_{\theta b}$ ——筒壁环向弯曲弹性模量 (MPa)。

5.7 烟气压力计算

5.7.1 烟气负压可按下列公式计算:

$$p_g = 0.01(\rho_a - \rho_g)h \quad (5.7.1-1)$$

$$\rho_a = \rho_{ao} \frac{273}{273 + T_a} \quad (5.7.1-2)$$

$$\rho_g = \rho_{go} \frac{273}{273 + T_g} \quad (5.7.1-3)$$

式中 p_g ——烟气负压 (kN/m²);

ρ_a ——烟囱外部空气密度 (kg/m³);

ρ_g ——烟气密度 (kg/m³);

h ——烟道口中心标高到烟囱顶部的距离 (m);

ρ_{ao} ——标准状态下的大气密度 (kg/m^3)，按 $1.285 \text{ kg}/\text{m}^3$ 采用；

ρ_{go} ——标准状态下的烟气密度 (kg/m^3)，按燃烧计算结果采用；无计算数据时，

干式除尘（干烟气）取 $1.32 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，湿式除尘（湿烟气）取 $1.28 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；

T_a ——烟囱外部环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

T_g ——烟气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

5.7.2 烟囱非正常操作压力或烟气爆炸压力应根据各工程实际情况确定，且其负压值按不小于 $2.0 \text{ kN}/\text{m}^2$ 计算。压力值可沿钢内筒高度取恒定值。

5.7.3 烟气压力对排烟筒产生的环向拉应力（或压应力）可按下式计算：

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_g r}{t} \quad (5.7.3)$$

式中 σ_{θ} ——烟气压力产生的环向拉应力（烟气正压运行）或压应力（烟气负压运行）
(kN/m^2)；

r ——排烟筒内半径 (m)；

t ——排烟筒有效壁厚 (m)。

6 地基与基础

6.1 一般规定

6.1.1 烟囱地基基础设计应取得详细的勘察资料，并满足以下要求：

1 勘探布点不宜少于 3 个，地基情况复杂时不得少于 5 点，其中控制性勘探点不应少于 1 个。

2 当采用桩基时，一般性勘探孔深度不小于预估桩端持力层以下 $(3\sim 5)d$ ，且不小于 $3\sim 5m$ ；控制性勘探孔深度应满足下卧层验算和地基变形计算深度。

3 岩土勘察中应对工程场地中的水和土对基础及桩的腐蚀性进行评价。水试样和土试样的取样方法、水和土腐蚀性指标的测试以及腐蚀性评价应按国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的规定执行。

4 对于单项工程，应根据任务要求、勘察阶段、工程特点和地质条件等编写报告；烟囱属于工程中的一部分的勘察报告，烟囱区域的岩土性能描述应清晰。勘察报告应包括下列内容：

- 1) 勘察目的、任务要求和依据的技术标准；
- 2) 工程概况、场地位置、地形及地貌的描述；
- 3) 勘察方法和勘察工作布置；
- 4) 对建筑场地有不良地质作用（如岩溶、土洞、滑坡、构造断裂）、孤石、坚硬夹层的分布及成因、岩面坡度对桩端稳定性的影响等，有明确的判断结论，提出整治措施和建议；
- 5) 地下水类型、稳定水位埋深、标高及其变化幅度等；
- 6) 场地地下水和地基土对桩或基础腐蚀性的评价；
- 7) 地震烈度、地震液化地层分布、液化等级、场地土类型和场地类别等；
- 8) 标准贯入试验、重型动力触探、静力触探等原位测试试验成果；
- 9) 岩土物理力学性质指标值；
- 10) 冻结深度；
- 11) 桩端持力层、单桩承载力估算指标和试桩方案建议；
- 12) 对沉桩可行性分析评价；
- 13) 基础施工可能对周边环境的影响；

14) 勘探点平面布置图、工程地质柱状图、工程地质剖面图等必要图表及岩芯彩色照片等。

6.1.2 烟囱地基基础的计算,除符合本标准的规定外,尚应符合国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007)和《建筑桩基技术规范》(JGJ 94)的有关规定。在抗震设防地区还应符合国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011)的规定。

6.1.3 基础截面极限承载能力计算和正常使用极限状态验算,应按国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010)的有关规定进行。

6.1.4 对于有烟气通过的基础,其材料强度应计算温度作用的影响。

6.2 承载力计算

6.2.1 烟囱基础地基压力计算,应符合下列规定:

1 轴心荷载作用时

$$p_k = \frac{N_k + G_k}{A} \leq f_a \quad (6.2.1-1)$$

2 偏心荷载作用时除满足式(6.2.1-1)外,尚应符合下列要求:

1) 地基最大压力

$$p_{k \max} = \frac{N_k + G_k}{A} + \frac{M_k}{W} \leq 1.2 f_a \quad (6.2.1-2)$$

2) 地基最小压力

$$p_{k \min} = \frac{N_k + G_k}{A} - \frac{M_k}{W} \geq 0 \quad (6.2.1-3)$$

式中 N_k ——相应荷载效应标准组合时,上部结构传至基础顶面竖向力值(kN);

G_k ——基础自重标准值和基础上土重标准值之和(kN);

f_a ——修正后的地基承载力特征值(kPa);抗震验算时,应采用地基抗震承载力 f_{aE} 代替

地基承载力特征值 f_a ;

M_k ——相应于荷载效应标准组合时,传至基础底面的弯矩值(kN·m);

W ——基础底面的抵抗矩(m³);当为圆形基础时: $W = \frac{\pi \cdot r_1^3}{4}$;当为环形基础时:

$$W = \frac{\pi(r_1^4 - r_4^4)}{4r_1^3}。 r_1、r_4 \text{ 分别为基础底面的水平外半径和内半径；}$$

A ——基础底面面积(m^2)。

6.2.2 钢烟囱的地基计算可按现行国家标准《高耸结构设计规范》(GB 50135) 相关规定进行。

6.3 变形计算

6.3.1 烟囱应进行地基变形验算。当烟囱满足表 6.3.1 条件时，可不进行地基变形验算。

表 6.3.1 不作地基变形验算的烟囱范围

地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	$80 \leq f_{ak} < 100$	$100 \leq f_{ak} < 130$	$130 \leq f_{ak} < 160$	$160 \leq f_{ak} < 200$	$200 \leq f_{ak} < 300$
烟囱高度 (m)	≤ 40	≤ 50	≤ 75	≤ 75	≤ 100

注：地基承载力特征值 f_{ak} 取基础底面以下 $b = 1.5\sqrt{\pi}r_1$ (且不小于 5m) 范围内各土层承载力特征值的加权值。

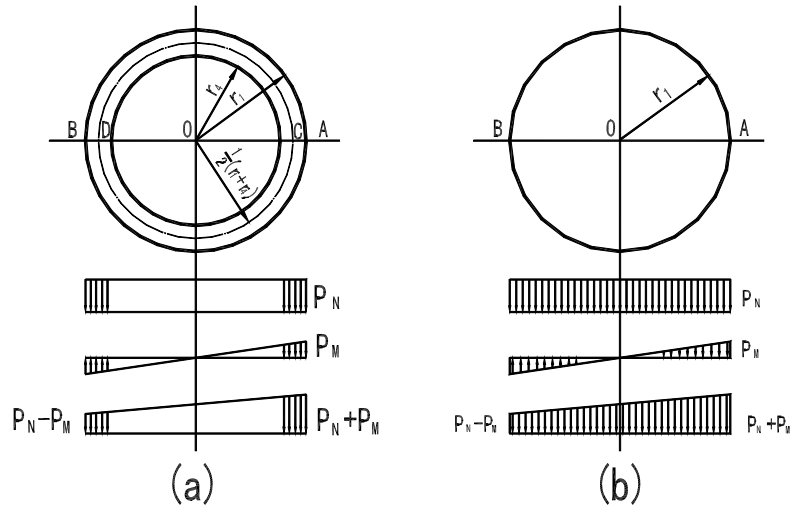
6.3.2 烟囱基础的地基变形允许值应按表 6.3.2 规定采用。有工艺等特殊要求时，可按相关专业标准规范另行确定。

表 6.3.2 烟囱基础沉降及倾斜允许值

烟囱高度 (m)	允许倾斜值 $\tan \theta$	允许沉降值 (mm)
$H \leq 20$	0.008	400
$20 < H \leq 50$	0.006	
$50 < H \leq 100$	0.005	
$100 < H \leq 150$	0.004	300
$150 < H \leq 200$	0.003	
$200 < H \leq 250$	0.002	200

6.3.3 烟囱基础的地基变形计算位置可按下列规定进行计算：

- 1 环形基础可计算环宽中点 C、D[图 6.3.3(a)] 的沉降。
- 2 圆形基础应计算圆心 O 点[图 6.3.3(b)] 的沉降。



a 环形基础；b 圆形基础

图 6.3.3 板式基础底板下压力

6.3.4 计算地基变形时，地基内的应力分布，可采用各向同性均质线性变形体理论。其最终变形量可按下式进行计算：

$$S = \psi_s \cdot s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{P_0}{E_{si}} (z_i \cdot \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \cdot \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (6.3.4-1)$$

式中 s ——地基最终变形量 (mm)；

s' ——按分层总和法计算出的地基变形量 (mm)；

ψ_s ——沉降计算经验系数，根据地区沉降观测资料及经验确定，无地区经验时可根

据变形计算深度范围内压缩模量的当量值 (\bar{E}_s)、基底附加压力按表 6.3.4 取值；

n ——地基变形计算深度范围内所划分的土层数，见图 6.3.4；

p_0 ——相应于作用的准永久组合时基础底面处的附加压力 (kPa)；

E_{si} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量 (MPa)，应取土的自重压力至土的自重压力与附加压力之和的压力段计算；

z_i, z_{i-1} ——基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离 (m)；

$\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{i-1}$ ——基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数，可按本标准附录 C 采用。

表 6.3.4 沉降计算经验系数 ψ_s

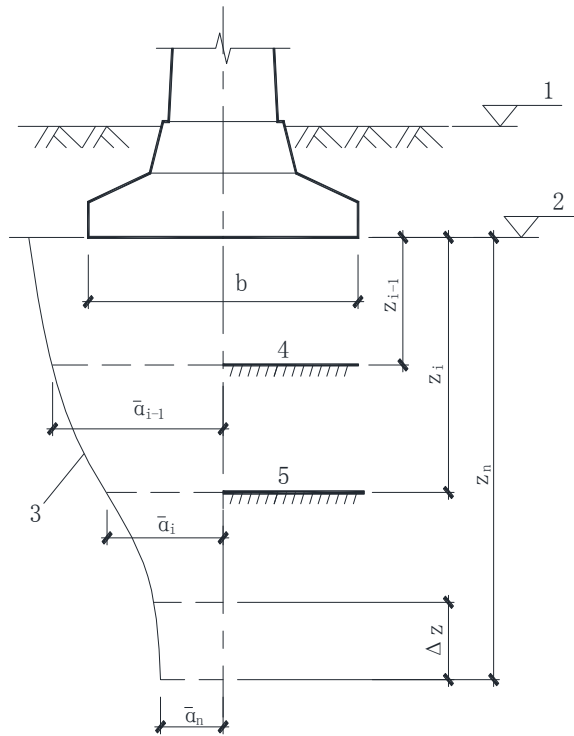
\bar{E}_s (MPa)	2.5	4.0	7.0	15.0	20.0
基底附加压力					
$p_0 \geq f_{ak}$	1.4	1.3	1.0	0.4	0.2
$p_0 \leq 0.75f_{ak}$	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

表中 \bar{E}_s 为变形计算深度范围内压缩模量的当量值，按 (6.3.4-2) 公式计算

$$\bar{E}_s = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{E_{si}}} \quad (6.3.4-2)$$

式中 A_i —第 i 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值

$$A_i = p_0 \bar{a}_i \cdot z_i - p_0 \bar{a}_{i-1} \cdot z_{i-1} \quad (6.3.4-3)$$



1—天然地面标高; 2—基底标高; 3—平均附加应力系数 \bar{a} 曲线; 4— $i-1$ 层; 5— i 层

图 6.3.4 基础沉降计算的分层示意

6.3.5 地基变形计算深度 z_n ，应符合下式要求：

$$\Delta s'_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta s'_i \quad (6.3.5)$$

式中 $\Delta s'_i$ —在计算深度范围内，第 i 层土的计算变形值

$\Delta s'_n$ —在计算深度向上取厚度为 Δz 的土层计算变形值， Δz 见图 6.3.4，并按表 6.3.5 确定。如确定的计算深度下部仍有较软土层时，应继续计算。

表 6.3.5 Δz 取值

$b(m)$	$b \leq 2$	$2 < b \leq 4$	$4 < b \leq 8$	$b > 8$
Δz	0.3	0.6	0.8	1.0
注：圆形基础，可按等效宽度 $b = \sqrt{\pi} r_1$ 选取				

6.3.6 基础倾斜计算时，分别计算与基础最大压力 P_{\max} 及最小压力 P_{\min} 相对应的基础边缘 A、B 两点(图 6.3.3)的沉降量 s_A 和 s_B ，基础的倾斜值 m_0 可按下列式计算：

$$m_0 = \frac{s_A - s_B}{2r_1} \quad (6.3.6)$$

式中 r_1 —圆形基础的半径或环形基础的外圆半径。

6.3.7 基础倾斜计算按下列规定进行：

1 计算在梯形荷载作用下的基础沉降量 s_A 和 s_B 时，可将荷载分为均布荷载和三角形荷载两部分，分别计算其相应的沉降量再进行叠加。

2 计算环形基础在三角形荷载作用下的倾斜值时，可按半径 r_1 的圆板在三角形荷载作用下，算得 A、B 两点沉降值，减去半径为 r_1 的圆板在相应的梯形荷载作用下，算得的 A、B 两点沉降值。

6.4 稳定性计算

6.4.1 烟囱基础抗倾覆稳定性应符合下列规定：

1 单筒或套筒混凝土烟囱基础底面不应出现零应力区；

2 塔架式或拉索式烟囱基础，塔基或拉索基础底面出现拔力时，应按现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 相关规定进行抗拔稳定性验算。

6.4.2 基础的抗滑移稳定性可按下列要求进行计算：

1 基础埋置深度较浅时，仅由基底摩擦力抵抗滑动，可按式 6.4.2 进行验算：

$$P_H \leq \frac{(N+G)\mu}{v_k} \quad (6.4.2)$$

式中 P_H —基底上部结构传至基础底面的水平作用代表值 (kN)；

N —上部结构传至基础底面的竖向作用代表值 (kN)；

G —基础自重及其台阶上的土重 (kN)；

μ —基础底面对地基的摩擦系数，一般宜由实验确定，或可按表 6.4.2 选用；

v_k —基础抗滑稳定系数，一般取 1.5。

表 6.4.2 基础底面对地基的摩擦系数

土的种类		摩擦系数 μ
黏性土	可塑	0.25~0.30
	硬塑	0.30~0.35
	坚硬	0.35~0.45
粉土		0.30~0.40
中砂、粗砂、砾砂		0.40~0.50
碎石土		0.40~0.60
软质岩		0.40~0.60
表面粗糙的硬质岩		0.65~0.75

注：1 对易风化的软质岩和塑性指数 I_p 大于 22 的黏性土，基底摩擦系数应通过试验确定；

2 对碎石土，可根据其密实程度、填充物状况、风化程度等确定。

2 基础埋置较深时，除基底的摩擦力外，可考虑计入基础埋深范围内的被动土压力以抵抗滑动，但要求基础侧面的回填土应夯实到可靠的密实度。

6.4.3 地基稳定性及抗浮稳定性按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 中相关规定进行计算。

6.4.4 烟囱基础应尽量位于地下水位之上，当无法避免时，应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007) 进行抗浮稳定性验算及采取相应措施。

6.5 刚性基础计算

6.5.1 刚性基础的外形尺寸 (图 6.5.1)，应按下列条件确定：

1 当为环形基础时

$$b_1 \leq 0.8h \tan \alpha \quad (6.5.1-1)$$

$$b_2 \leq h \tan \alpha \quad (6.5.1-2)$$

2 当为圆形基础时

$$b_1 \leq 0.8h \tan \alpha \quad (6.5.1-3)$$

$$h \geq \frac{D}{3 \tan \alpha} \quad (6.5.1-4)$$

式中 b_1 、 b_2 ——基础台阶悬挑尺寸(m);

h ——基础高度(m);

$\tan \alpha$ ——基础台阶宽高比,按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007)的规定采用;

D ——基础顶面筒壁内直径(m)。

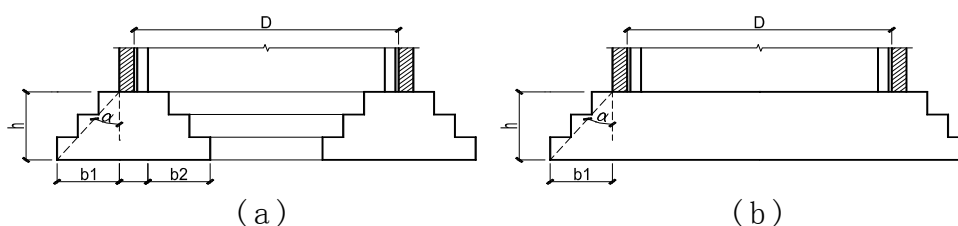


图 6.5.1 刚性基础(单位: mm)

(a) 环形基础 (b) 圆形基础

6.6 板式基础计算

6.6.1 板式基础外形尺寸(图 6.6.1)的确定,宜符合下列规定:

1 当为环形基础时

$$r_4 \approx \beta r_z \quad (6.6.1-1)$$

$$h \geq \frac{r_1 - r_2}{2.2} \quad (6.6.1-2)$$

$$h \geq \frac{r_3 - r_4}{3.0} \quad (6.6.1-3)$$

$$h_1 \geq \frac{h}{2} \quad (6.6.1-4)$$

$$h_2 \geq \frac{h}{2} \quad (6.6.1-5)$$

2 当为圆形基础时

$$\frac{r_1}{r_z} \approx 1.5 \quad (6.6.1-6)$$

$$h \geq \frac{r_1 - r_2}{2.2} \quad (6.6.1-7)$$

$$h \geq \frac{r_3}{4.0} \quad (6.6.1-8)$$

$$h_1 \geq \frac{h}{2} \quad (6.6.1-9)$$

式中 β ——基础底板平面外形系数，根据 r_1 与 r_2 的比值，由图 6.6.11-2 查得，或按 $\beta = -3.9$

$$\times \left(\frac{r_1}{r_z}\right)^3 + 12.9 \times \left(\frac{r_1}{r_z}\right)^2 - 15.4 \times \frac{r_1}{r_z} + 7.3 \text{ 进行计算；}$$

r_z ——环壁底面中心处半径。 $r_z = \frac{r_2 + r_3}{2}$ 其余符号见图 6.6.1。

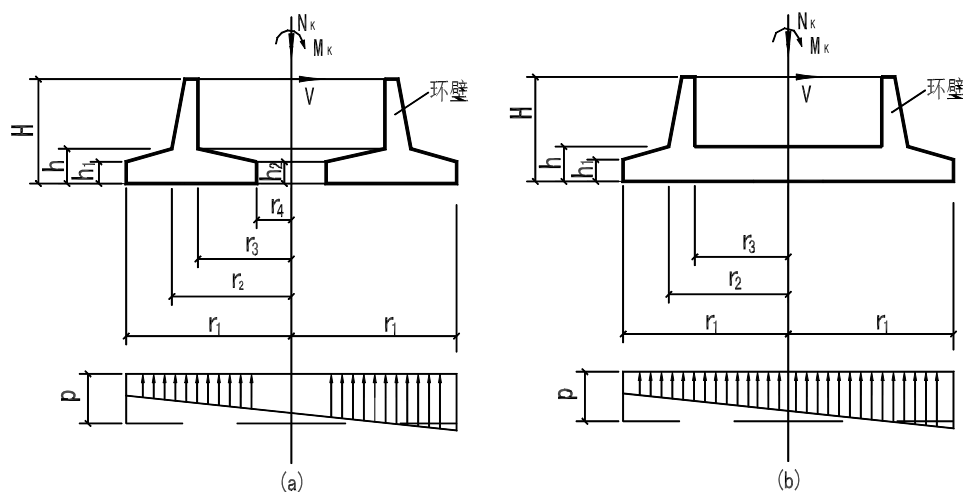


图 6.6.1 基础尺寸与底面压力计算

(a) 环形基础； (b) 圆形基础

6.6.2 计算基础底板的内力时，基础底板的压力可按均布荷载采用，并取外悬挑中点处的最大压力（图 6.6.1），其值应按下式计算：

$$p = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I} \times \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (6.6.2)$$

式中 M_z ——作用于基础底面的总弯矩设计值(kN·m);

N ——作用于基础顶面的垂直荷载设计值(kN) (不含基础自重及土重);

A ——基础底面面积(m²);

I ——基础底面惯性矩(m⁴)。

6.6.3 在环壁与底板交接处的冲切强度可按下式计算 (图 6.6.4)

$$F_\ell \leq 0.35\beta_h f_{tt} (b_t + b_b) h_0 \quad (6.6.3)$$

式中 F_ℓ ——冲切破坏体以外的荷载设计值(kN), 按本标准 6.6.4 条计算;

f_{tt} ——混凝土在温度作用下的抗拉强度设计值(kN/m²);

b_b ——冲切破坏锥体斜截面的下边圆周长(m):

$$\text{验算环壁外边缘时, } b_b = 2\pi(r_2 + h_0)$$

$$\text{验算环壁内边缘时, } b_b = 2\pi(r_3 - h_0)$$

b_t ——冲切破坏锥体斜截面的上边圆周长(m):

$$\text{验算环壁外边缘时, } b_t = 2\pi r_2$$

$$\text{验算环壁内边缘时, } b_t = 2\pi r_3$$

h_0 ——基础底板计算截面处的有效厚度(m)。

β_h ——受冲切承载力截面高度影响系数, 当 h 不大于 800mm 时, β_h 取 1.0; 当 h 大

于等于 2000mm 时, β_h 取 0.9, 其间接线性内插法采用。

6.6.4 冲切破坏锥体以外的荷载 F_ℓ , 可按下列公式计算。

1 计算环壁外边缘时

$$F_\ell = p\pi[r_1^2 - (r_2 + h_0)^2] \quad (6.6.4-1)$$

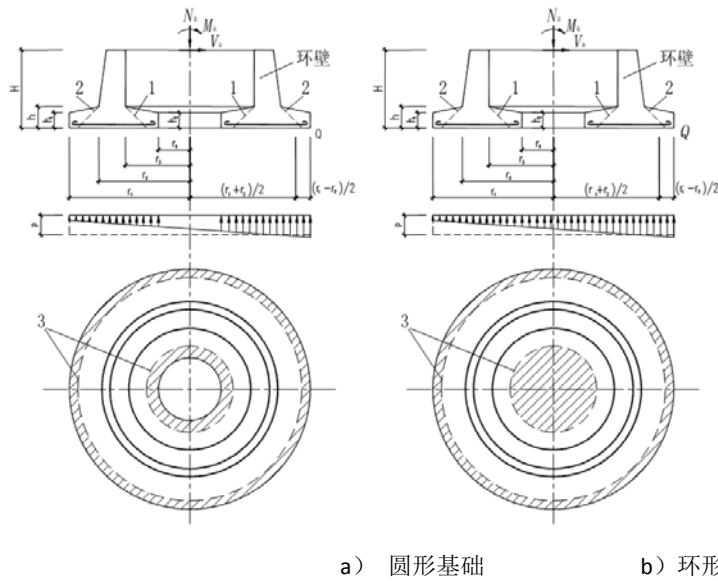
2 计算环壁内边缘时

1) 环形基础

$$F_\ell = p\pi[(r_3 - h_0)^2 - r_4^2] \quad (6.6.4-2)$$

2) 圆形基础

$$F_\ell = p\pi(r_3 - h_0)^2 \quad (6.6.4-3)$$



a) 圆形基础 b) 环形基础

图 6.6.4 底板冲切强度计算

- 1—验算环壁内边缘冲切强度时破坏锥体的斜截面；
- 2—验算环壁外边缘冲切强度时破坏锥体的斜截面；
- 3—冲切破坏锥体的底截面。

6.6.5 环形基础底板下部和底板内悬挑上部采用径、环向配筋时，确定底板配筋用的弯矩设计值，可按下列规定计算：

- 1 底板下部半径 r_2 处单位弧长的径向弯矩设计值：

$$M_R = \frac{p(r_1^2 - r_2^2)(r_1 - r_2)}{12r_2(4r_1^4 + r_2^4)}(12r_1^4 + 2r_1^2r_2^2 + r_2^4) \quad (6.6.5-1)$$

- 2 底板下部单位宽度的环向弯矩设计值：

$$M_\theta = \frac{M_R}{2} \quad (6.6.5-2)$$

- 3 当 $r_1/r_2 > 1.32$ 时，底板内悬挑上部单位宽度的环向弯矩设计值应按下式计算：

$$M_{or} = \frac{3p}{10(2r_z^2 + 3r_4^2)}[r_z^4 - r_4^4 - 4r_z^2r_4^2 \log(\frac{r_z}{r_4})] \quad (6.6.5-3)$$

4 当 $r_1/r_2 \leq 1.32$ 时，底板内悬挑上部单位宽度的环向弯矩设计值应按下式计算，并不应小于公式 (6.6.5-3) 的计算值：

$$M_{or} = \frac{P}{10} [2r_1^2 + 2r_z^2 - r_4^2 - \frac{6r_1^4 \log(\frac{r_1}{r_z}) - 6r_1^2 r_z^2 \log(\frac{r_z}{r_4})}{r_1^2 - r_z^2}] \quad (6.6.5-4)$$

6.6.6 圆形基础底板下部采用径、环向配筋，环壁以内底板上部为等面积方格网配筋时，确定底板配筋用的弯矩设计值，可按下列规定计算：

1 底板下部径向和环向弯矩设计值，分别应按本标准公式（6.6.5-1）和公式（6.6.5-2）进行计算。

2 环壁以内底板上部两个正交方向单位宽度的弯矩设计值，应按下式计算：

$$M_T = \frac{P}{40r_1} [4r_1^3 - 4r_1^2 r_2 + 4r_1 r_2^2 - r_2^3 - 12r_1^2 \log(\frac{r_1}{r_2})] \quad (6.6.6)$$

6.6.7 圆形基础底板下部采用等面积方格网配筋时，确定底板配筋用的弯矩设计值可按本标准公式（6.6.5-1）计算。

6.6.8 当按本标准公式（6.6.5-3）、（6.6.5-4）或（6.6.6）计算所得的弯矩 M_{or} （或 M_T ）不大于 0 时，环壁以内底板上部应按构造配筋。

6.6.9 当地基反力最小边扣除基础自重和土重、基础底面出现负值（ $p_{k\min} - \frac{G_k}{A} < 0$ ）时，环形和圆形基础底板外悬挑上部应配置钢筋。其弯矩值可近似按承受均布荷载 q 的悬臂构件进行计算，且实际配筋不得小于构造配筋。

$$q = \frac{M_z r_1}{I} - \frac{N}{A} \quad (6.6.9)$$

6.6.10 底板下部配筋，应取半径 r_2 处的底板有效高度 h_0 ，按等厚度进行计算。

当采用径、环向配筋时，其径向钢筋可按 r_2 处满足计算要求呈辐射状配置；环向钢筋可按等直径等间距配置。

6.6.11 圆形基础底板下部不需配筋范围半径 r_d （图 6.6.11-1），应按下列公式计算。

径、环向配筋时：

$$r_d \leq \beta_0 r_z - 35d \quad (6.6.11-1)$$

等面积方格网配置时：

$$r_d \leq r_3 + r_2 - r_1 - 35d \quad (6.6.11-2)$$

式中 β_0 ——底板下部钢筋理论切断系数，按 r_1/r_2 由图 6.6.11-2 查得；

d ——受力钢筋直径 (mm)。

注：当计算出的 $r_d \leq 0$ 时，底板下部各处均应配筋（不切断）。

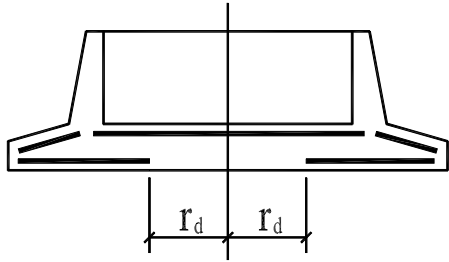


图 6.6.11-1 不需配筋范围 r_d

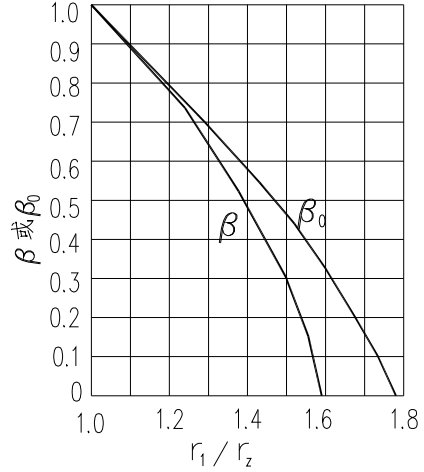


图 6.6.11-2 β 与 β_0 系数

6.6.12 当有烟气通过基础时，基础底板与环壁，可按下列规定计算受热温度：

1 基础环壁的受热温度，按本标准公式 (5.6.4) 进行计算。计算时环壁外侧的计算土层厚度 (图 6.6.12) 可按下列式计算：

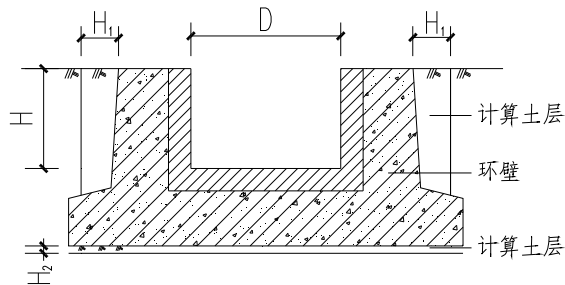


图 6.6.12 计算土层厚度示意

$$H_1 = 0.505H - 0.325 + 0.05DH \quad (6.6.12)$$

式中 H_1 ——计算土层厚度(m)；

H 、 D ——分别为由内衬内表面计算的基础环壁埋深(m)和直径(m)，见图 6.6.12 所示。

2 基础底板的受热温度，可采用地温代替本标准公式 (5.6.5) 中的空气温度 T_a ，按第一类温度边界问题进行计算。计算时基础底板下的计算土层厚度 (见图 6.6.12) 和地温可按下列规定采用：

1) 计算底板最高受热温度时 $H_2 = 0.3m$ ，地温取 15°C ；

2) 计算底板温度差时 $H_2 = 0.2m$ ，地温取 10°C 。

3 计算出的基础环壁及底板的最高受热温度，应小于或等于混凝土的最高受热温度允许值。

6.6.13 计算基础底板配筋时，应根据最高受热温度，采用本标准第 4 章规定的混凝土和钢筋在温度作用下的强度设计值。

6.6.14 在计算基础环壁和底板配筋时，如未考虑温度作用产生的应力时，配筋宜增加 15%。

6.7 桩基础计算

6.7.1 当地基存在震陷性、湿陷性、膨胀性、冻胀性或侵蚀性等不良土层时，或上覆土层为强度低、压缩性高的软弱土层，不能满足强度和变形要求时，或在抗震设防地区地基持力层范围内有可液化土层时，宜考虑采用桩基础。

6.7.2 烟囱桩基础可采用预制钢筋混凝土桩、混凝土灌注桩和钢桩。桩型、桩横断面尺寸及桩端持力层的选择应综合考虑地质情况、施工条件、施工工艺、建筑场地环境等因素，充分利用各桩型特点以满足安全、经济及工期等方面的要求，可参照国家现行标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的规定进行设计。

6.7.3 烟囱桩基础的承台平面可为圆形或环形，桩的平面布置应以承台平面中心点，呈放射状布置。桩的分布半径，应考虑烟囱筒身荷载的作用点的位置，在荷载作用点（基础环壁中心）两侧近似对称布置，内疏外密，以加大群桩的平面抵抗矩，不宜采用单圈布置。桩间距应满足国家现行标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的要求。

6.7.4 烟囱桩基计算应按照国家现行标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的规定进行。桩顶作用效应应按下列公式计算：

1 竖向力

轴心竖向力作用时

$$N_k = \frac{F_k + G_k}{N} \quad (6.7.4-1)$$

偏心荷载作用时，以承台中心对称布置的桩可按下列公式计算：

$$N_{ik} = \frac{F_k + G_k}{n} \pm \frac{M_k r_i}{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n r_j^2} \quad (6.7.4-2)$$

2 水平力

$$H_{ik} = \frac{H_k}{n} \quad (6.7.4-3)$$

- 式中 N_k ——相应于荷载效应标准组合时，桩的平均竖向力 (kN)；
 N_{ik} ——相应于荷载效应标准组合时，第 i 根桩的竖向力 (kN)；
 F_k ——相应于荷载效应标准组合时作用于桩基承台顶面的竖向力 (kN)；
 G_k ——桩基承台自重及承台上土自重标准值；
 M_k ——相应于荷载效应标准组合时作用承台底面的弯矩值 (kN·m)；
 R_a ——单桩竖向承载力特征值 (kN)；
 r_i ——第 i 根桩所在圆的半径(m)；
 H_{ik} ——单桩顶水平力标准值 (kN)；
 H_k ——相应于荷载效应标准组合时，作用于承台底面的水平力 (kN)；
 n ——桩基中的桩数。

6.7.5 桩基竖向承载力验算应按荷载效应标准组合取值与承载力特征值进行比较，计算时应符合下列要求：

1 荷载效应标准组合：

轴心竖向力作用下

$$N_k \leq R \quad (6.7.5-1)$$

偏心竖向力作用下，除满足上式外，尚应满足下式要求

$$N_{kmax} \leq 1.2R \quad (6.7.5-2)$$

2 地震作用效应和荷载效应标准组合：

轴心竖向力作用下

$$N_{Ek} \leq 1.25R \quad (6.7.5-3)$$

偏心竖向力作用下，除满足上式外，尚应满足下式要求

$$N_{Ekmax} \leq 1.5R \quad (6.7.5-4)$$

式中 N_k ——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下，基桩或复合基桩的平均竖向力；
 N_{kmax} ——荷载效应标准组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力；
 N_{Ek} ——地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩或复合基桩的平均竖向力；
 N_{Ekmax} ——地震作用效应和荷载效应标准组合下，基桩或复合基桩的最大竖向力；
 R ——基桩或复合基桩竖向承载力特征值。

6.7.6 烟囱桩基的单桩竖向承载力特征值、软弱下卧层验算、负摩阻力计算与抗拔验算、桩基水平承载力与位移计算、桩身承载力与裂缝控制计算等均应按照现行国家标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的规定进行。

6.7.7 桩基变形验算，应按荷载效应准永久组合进行计算，一般情况下不计入风荷载与地震作用。当风玫瑰图严重偏心时，取风的频遇值组合，一般取组合系数 0.4，不应计入地震作用。

6.7.8 桩基变形主要包括：沉降量、沉降差、倾斜与水平侧移，其变形计算值不应大于桩基变形允许值。设计按照现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007) 和《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 进行。桩基沉降量和倾斜可按实体深基础法或等效作用分层总和法计算，计算位置和平均附加应力系数可参考本标准第 6.3 节的相关内容。桩基沉降与倾斜变形允许值应符合表 6.7.8 的规定，并满足特殊工艺或地方标准等相关规范规程的要求。

表 6.7.8 桩基沉降与倾斜变形允许值

烟囱高度 (m)	允许倾斜值 $\tan\theta$	允许沉降量 (mm)
$H \leq 20$	0.0080	350
$20 < H \leq 50$	0.0060	
$50 < H \leq 100$	0.0050	
$100 < H \leq 150$	0.0040	250
$150 < H \leq 200$	0.0030	
$200 < H \leq 250$	0.0020	150

6.7.9 承台受冲切计算

1 冲切破坏锥体采用自环壁底部与承台相交的变阶处，至相应桩顶边缘连线所构成的锥体，锥体斜面与承台底面夹角不小应于 45° ，见图 (6.7.9)。其冲切强度可按下式计算：

$$F_l \leq \beta_{hp} \beta_0 u_m f_u h_0 \quad (6.7.9-1)$$

$$\beta_0 = \frac{0.84}{\lambda + 0.2} \quad (6.7.9-2)$$

式中 F_l ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下冲切破坏锥体以外的荷载设

计值；按式 (6.7.9-3)、(6.7.9-4) 计算；

f_t ——承台混凝土在温度作用下抗拉强度设计值；

β_{hp} ——承台受冲切承载力截面高度影响系数，当 $h \leq 800\text{mm}$ 时，取 1.0， $h \geq 2000$

时，取 0.9，其间接线性内插法取值；

u_m ——承台冲切破坏锥体一半有效高度处的周长；

h_0 ——环壁对承台破坏锥体的有效高度；

β_0 ——冲切系数；

λ ——冲跨比， $\lambda = a_0 / h_0$ ， a_0 为环壁底部承台变阶处到桩边水平距离；当

$\lambda < 0.25$ 时，取 $\lambda = 0.25$ ；当 $\lambda > 1.0$ 时，取 $\lambda = 1.0$ ；

2 冲切破坏锥体以外的荷载 F_l 按下列公式计算：

1) 计算环壁外边缘时：

$$F_l = \sum N_{wi} \quad (6.7.9-3)$$

式中 $\sum N_{wi}$ ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下作用于冲切破坏体以外的各基桩或复合基桩的竖向净反力设计值之和。

2) 计算环壁内边缘时：

$$F_l = \sum N_{Ni} \quad (6.7.9-4)$$

式中 $\sum N_{Ni}$ ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下作用于冲切破坏体以内的各基桩或复合基桩的竖向净反力设计值之和。

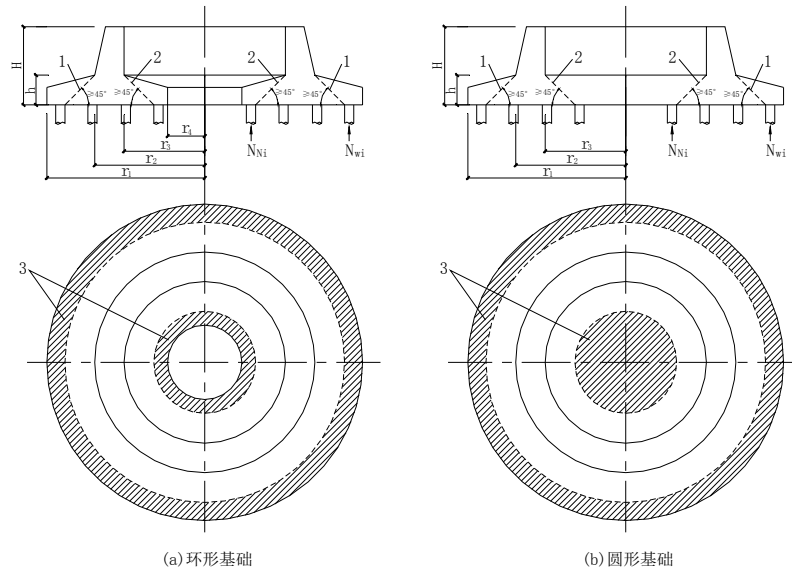


图 6.7.9 承台冲切强度验算

- 1— 验算环壁外边缘冲切强度时破坏锥体的斜截面；
- 2— 验算环壁内边缘冲切强度时破坏锥体的斜截面；
- 3— 冲切破坏锥体的底截面。

6.7.10 承台受剪计算

1 桩基承台应对环壁与承台相交的变阶处和桩边连线形成的贯通承台的斜截面受剪承载力进行验算。当承台悬挑边有多排基桩形成多个斜截面时，应对每个斜截面的受剪承载力进行验算，见图（6.7.10）。其验算公式如下：

$$V \leq \beta_{hs} \beta f_{tt} b_0 h_0 \quad (6.7.10-1)$$

$$\beta = \frac{1.75}{\lambda + 1} \quad (6.7.10-2)$$

$$\beta_{hs} = \left(\frac{800}{h_0} \right)^{1/4} \quad (6.7.10-3)$$

式中 V ——不计承台及其上土自重，在荷载效应基本组合下，斜截面的最大剪力设计值；按式（6.7.10-4）、（6.7.10-5）计算；

f_{tt} ——混凝土在温度作用下的抗拉强度设计值(kN/m²)；

b_0 ——计算截面处的圆周长；验算环壁以外时， $b_0 = 2\pi r_2$ ；验算环壁以内时，

$$b_0 = 2\pi r_3, \quad r_2 \text{ 与 } r_3 \text{ 见图(6.7.10);}$$

h_0 ——承台计算截面处的有效高度；

β_{hs} ——受剪切承载力截面高度影响系数；

λ ——计算截面的剪跨比， $\lambda = \frac{a}{h_0}$ ， a 为承台变阶处至计算一排桩桩边的水平距离，当 $\lambda < 0.25$ 时，取 $\lambda = 0.25$ ；当 $\lambda > 3$ 时，取 $\lambda = 3$ 。

2 斜截面的最大剪力设计值 V 按下列公式计算：

1) 计算环壁以外的斜截面时：

$$V = \sum Q_{wi} \quad (6.7.10-4)$$

式中 $\sum Q_{wi}$ ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下计算斜截面以外的各基桩或复合基桩的竖向净反力设计值之和。

2) 计算环壁以内的斜截面时：

$$V = \sum Q_{Ni} \quad (6.7.10-5)$$

式中 $\sum Q_{Ni}$ ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下计算斜截面以内的各基桩或复合基桩的竖向净反力设计值之和。

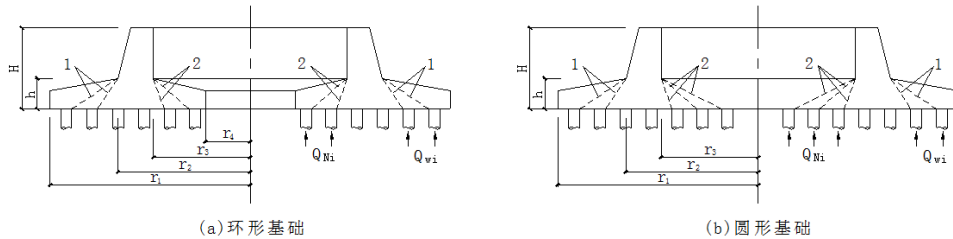


图 6.7.10 承台受剪承载力验算

1—验算环壁外边缘受剪的破坏斜截面；2—验算环壁内边缘受剪的破坏斜截面。

6.7.11 桩基承台应进行正截面受弯承载力计算，计算承台弯矩可按下列各式计算，受弯承载力和配筋可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定进行。

1 环形承台下部和内悬挑上部均采用径、环向配筋时，确定承台配筋用的弯矩设计值，可按下列规定计算：

(1) 承台底板下部半径 r_2 处单位弧长的径向弯矩设计值：

$$M_R = \frac{1}{2\pi(3r_1^2 + 2r_2^2)} \cdot \sum_{i=1}^w p_{iw} N_{iw} [(r_{iw}^2 - r_2^2) + 3r_1^2 \lg(\frac{r_{iw}}{r_2})] \quad (6.7.11-1)$$

式中 p_{iw} ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下，作用于环壁以外 r_{iw} 半径处的单桩竖向净反力设计值 (kN)；

r_1 、 r_2 ——承台外径和环壁外缘半径；

r_{iw} ——环壁以外第 i 圈桩的半径，共 w 圈； $i=1$ 表示 r_2 以外的第一圈桩的序号；

N_{iw} ——环壁以外第 i 圈桩的数量。

(2) 底板下部单位宽度的环向弯矩设计值：

$$M_\theta = \frac{M_R}{2} \quad (6.7.11-2)$$

(3) 底板内悬挑上部单位宽度的环向弯矩设计值应取下式 6.7.11-3 和式 6.7.11-4 计算值的较大值

$$M_\theta = \frac{3}{5\pi(2r_z^2 + 3r_4^2)} \cdot \sum_{j=1}^n p_{jn} N_{jn} [(r_{jn}^2 - r_z^2) - 2r_z^2 \lg(\frac{r_{jn}}{r_z})] \quad (6.7.11-3)$$

$$M_\theta = \frac{\sum_{j=1}^n p_{jn} N_{jn}}{10\pi(r_z^2 - r_4^2)(r_1^2 - r_4^2)} \left[(3r_1^2 + r_z^2 - r_4^2)(r_z^2 - r_4^2) - 6r_1^2 r_4^2 \lg\left(\frac{r_z}{r_4}\right) \right] - \frac{1}{5\pi(r_1^2 - r_4^2)} \cdot \sum_{i=1}^w p_{iw} N_{iw} [(r_{iw}^2 - r_z^2) + 3r_1^2 \lg(\frac{r_{iw}}{r_z})] \quad (6.7.11-4)$$

式中 p_{jn} ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下，作用于环壁以内 r_{jn} 半径处的单桩竖向净反力设计值，kN；

r_z 、 r_4 ——环壁中线半径和环形承台内径；

r_{jn} ——环壁以内第 j 圈桩的半径，共 n 圈； $j=1$ 表示 r_z 内侧的第一圈桩的序号；

N_{jn} ——环壁内侧 j 圈桩的数量。

2 圆形承台底板下部采用径、环向配筋，环壁以内底板上部为等面积方格网配筋时，确定底板配筋用的弯矩设计值，可按下列规定计算：

(1) 底板下部径向和环向弯矩设计值，分别应按本标准公式 (6.7.11-1) 和公式

(6.7.11-2) 进行计算。

(2) 环壁以内底板上部两个正交方向单位宽度的弯矩设计值，应按下式计算：

$$M_{\theta} = \frac{r_1 - r_z}{10\pi r_1^3} \sum_{i=1}^{w+n} p'_{iwn} N'_{iwn} \left[r_z^2 - r_{iwn}'^2 + 3r_1^2 \lg(r_z/r_{iwn}') \right] - \frac{3}{20\pi r_1 r_z} \sum_{j=1}^n p_{jn} r_{jn} \left[(r_z^2 - r_{jn}^2) - 2r_z^2 \lg(r_z/r_{jn}) \right] \quad (6.7.11-5)$$

式中 p'_{iwn} ——不计承台及其上土重，在荷载效应基本组合下，作用于（环壁内和环壁外）

r'_{iwn} 半径处的单桩竖向净反力设计值，kN；

r'_{iwn} ——第 i 圈桩（环壁内和环壁外）的半径，共 $w+n$ 圈；

N'_{iwn} ——第 i 圈桩（环壁内和环壁外）的数量。

3 圆形基础底板下部采用等面积方格网配筋时，确定底板配筋用的弯矩设计值可按本标准公式 (6.7.11-1) 计算。

6.8 基础构造

6.8.1 烟囱与烟道沉降缝设置，应符合下列规定：

- 1 当为地面烟道或地下烟道时，沉降缝应设在基础的边缘处。
- 2 当为架空烟道时，沉降缝可设在筒壁边缘处。

6.8.2 基础的底面应设混凝土垫层，厚度宜采用 100mm。

6.8.3 设置地下烟道时，基础宜设贮灰槽，槽底面应较烟道底面低 250~500mm。

6.8.4 设置地下烟道的基础，当烟气温度较高，采用普通混凝土不能满足本标准第 3.1.26 条规定时，宜将烟气入口提高至基础顶面以上。

6.8.5 烟囱周围的地面应设护坡，坡度不应小于 2%。护坡的最低处，应高出周围地面 100mm。护坡宽度不应小于 1.5m。

6.8.6 板式基础的环壁宜设计成内表面垂直，外表面倾斜的形式，上部厚度应比筒壁、隔热层和内衬的总厚度增加 50~100mm。

6.8.7 板式基础底板下部采用径、环向配筋时，径向与环向钢筋的最小配筋率均不宜小于 0.15%，采用方格网配筋时，纵向与横向钢筋的最小配筋率均不宜小于 0.15%，配筋最小直径和最大间距应符合表 6.8.7 的规定。当底板厚度大于 2000mm 时，宜在板厚中间部位设置

温度应力钢筋。

表 6.8.7 板式基础配筋最小直径及最大间距 (mm)

部 位	配 筋 种 类		最小直径	最大间距
环 壁	竖向钢筋		12	250
	环向钢筋		12	200
底板下部	径环向配筋	径 向	12	r_2 处 250, 外边缘 400
		环 向	12	250
	方 格 网 配 筋		12	250

6.8.8 板式基础底板上部按构造配筋时,其钢筋最小直径与最大间距,应符合表 6.8.8 的规定。

表 6.8.8 板式基础底板上部的构造配筋 (mm)

基 础 形 式	配 筋 种 类	最 小 直 径	最 大 间 距
环 形 基 础	径 环 向 配 筋	12	径向 250 环向 250
圆 形 基 础	方 格 网 配 筋	12	250

6.8.9 基础环壁设有孔洞时,应符合本标准第 7.5.8 条的有关规定。洞口下部距基础底部距离较小时,该处的环壁应增加补强钢筋。必要时可按两端固接的曲梁进行计算。

6.8.10 桩基承台构造应符合以下规定:

1 承台外形尺寸宜满足板式基础合理外形尺寸(第 6.6.1 条)的要求;底板厚度不小于 300mm;承台周边距桩中心距离不应小于桩直径或桩断面边长,且边桩外缘至承台外缘的距离不应小于 150mm;

2 承台钢筋保护层厚度不应小于 40mm,当无混凝土垫层时,不应小于 70mm。承台混凝土强度等级不应低于 C25;

3 承台配筋应按计算确定,底板下部径向与环向钢筋最小配筋率均不宜小于 0.15%,且环壁及底板上、下部配筋最小直径和最大间距应符合表 6.8.7,表 6.8.8 的规定;当底板厚度大于 2000mm 时,宜在板厚中间部位设置温度应力钢筋;

4 承台其他构造要求与本节基础构造的相关内容相同,并应符合国家现行标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94)的规定。

6.8.11 桩基及承台防腐蚀应满足现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》(GB 50046)的有关规定。

6.9 土方和基坑工程施工

6.9.1 烟囱基础基坑开挖前应根据基坑侧壁安全等级编制相应的基坑支护及开挖方案。土方施工应符合国家现行标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ120的有关规定。

6.9.2 烟囱基础的基坑挖至设计标高后,应由施工单位会同建设、设计、勘察和监理等单位检查基坑的中心坐标、基底尺寸、标高和水平度是否符合设计要求,以及基底的土质是否符合设计所采用的勘察资料;当不符合时,应由建设单位和设计单位提出处理方案。

6.9.3 当基坑处在地下水位以下时,开挖基坑前,应根据水文地质情况,采取降水或排水措施,并保持地下水位在施工底面最低标高以下,同时应采取防止地表水流入基坑的措施。基坑的降水或排水措施,应持续至回填土回填到地下水位以上时方可停止。

6.9.4 天然地基基底表面应平整,严禁采用填土的方法找平基坑底面。

6.9.5 基坑验收合格后,应及时进行基础施工。当停顿时间较长,应重新复查无误后才可施工。对个别低于设计标高的低凹处,可采用垫层混凝土找平。当基坑表面被水浸泡或扰动时,被浸泡或扰动的土应除尽,并应采取加厚垫层的方法使其达到设计标高。当基土破坏严重时,应由建设、设计和监理单位确定相应的补救措施。

6.9.6 基础完成后,应及时进行基础的验收和基坑的回填,回填土应分层夯实,压实系数应符合设计要求;当设计无要求时,压实系数不应小于0.94。

6.10 钢筋工程施工

6.10.1 HPB300级钢筋绑扎接头的末端应做弯钩,HRB335、HRB400和RRB400级钢筋可不做弯钩。钢筋的弯钩及绑扎后的铁丝头应背向保护层。

6.10.2 采用绑扎接头时,钢筋搭接长度应符合设计要求;当设计无规定时,钢筋的搭接长度应为钢筋直径的40倍。采用焊接接头时,钢筋接头的构造和技术要求应符合国家现行标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ18的有关规定。

6.10.3 环壁内纵向钢筋当长度不足时应焊接,也可采用机械连接。钢筋机械连接应符合国

家现行标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ107 的有关规定。

6.10.4 钢筋的接头应交错布置，在同一连接区段内绑扎接头的根数不应多于钢筋总数的 25%，焊接和机械连接接头的根数不应多于钢筋总数的 50%。

6.10.5 钢筋的交叉点应采用铁丝绑扎牢。底板钢筋网，除靠近外围两行钢筋的交叉点应全部绑扎牢外，中间部分交叉点可间隔交错绑扎牢，但应保证受力钢筋不产生位置偏移。

6.10.6 插入环壁内的筒壁竖向钢筋，应按设计要求进行分组，应与基础钢筋绑扎或焊接牢固，同时应有防止钢筋位移的措施。

6.11 模板工程施工

6.11.1 环壁的模板当采用分节支模时，各节模板应在同一锥面上，相邻模板间高低偏差不应超过 5mm。

6.11.2 模板与混凝土的接触面应涂刷隔离剂，隔离剂不得污染钢筋表面。

6.11.3 模板间缝隙应采取防止漏浆的措施。

6.11.4 预留洞口处的模板支设应采取防止变形的加固措施。洞口处弧顶模板及支撑设计应满足承载力、刚度和整体稳固性要求。

6.12 混凝土工程施工

6.12.1 底板混凝土宜分层浇筑，并应一次连续浇筑完成。

浇筑环壁混凝土时，应沿环壁圆周均匀地分层进行；有地下烟道时，烟道两侧混凝土应对称浇筑。

6.12.2 环形和圆形板式基础的施工缝可留设在底板与环壁的连接处（图 6.12.2）。

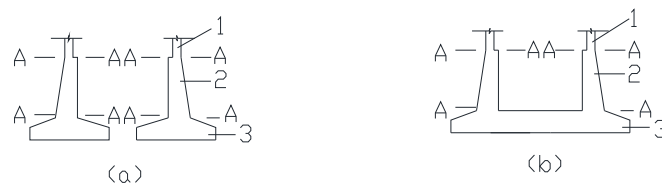


图 6.12.2 基础施工缝留设位置

a-环形板式基础 b-圆形板式基础
1-筒壁 2-环壁 3-底板 A-A 施工缝

6.12.3 基础大体积混凝土施工，除应符合现行国家标准《大体积混凝土施工规范》GB50496 的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 基础混凝土施工前，应通过计算确定混凝土浇筑体内的温度应力，应根据计算结果确定混凝土的浇筑、养护措施；

2 应选用中、低热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥等水化热低和凝固时间长的水泥品

种。应选用连续级配的粗骨料，含泥量不大于 1%。细骨料宜采用中砂，其细度模数宜大于 2.3，含泥量不大于 3%；

3 应采取降低混凝土入模温度的措施。混凝土宜采用分层浇筑或薄层推移浇筑工艺，应控制混凝土浇筑时间和速度，在不出现冷缝的条件下，宜扩大浇筑范围，降低混凝土内部温度。

4 应进行温度监测，测温点不应少于三组，每组应设置不少于三个不同深度的测点，每组间距应根据实际情况确定，测温及记录应由专人负责。测温可采用传感器监测，使用前应统一校核；

里表温差不宜大于 25℃，降温速率不宜大于 2℃/d；

5 混凝土养护应选用保温保湿法，保温层的厚度应按测温参数确定。拆除模板后应及时回填土；

6 环壁混凝土应在底板混凝土降温的早期浇筑；

6.13 基础工程施工质量检验

6.13.1 烟囱基础钢筋工程的质量标准及检验方法应符合表 6.13.1 的规定。

表 6.13.1 烟囱基础钢筋工程的质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	钢筋的品种、级别、规格和数量	应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的有关规定	-	检查质量合格证明文件、标志及检验报告
	2	纵向受力钢筋的连接方式	应符合设计要求	-	观察
	3	接头试件	应做力学性能检验，其质量应符合国家现行标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 和《钢筋机械连接技术规程》JGJ107 的有关规定	-	检查产品合格证、试验报告
一般项目	1	接头位置和数量	宜设在受力较小处。同一竖向受力钢筋不宜设置两个或两个以上接头。接头末端至钢筋弯起点距离不应小于钢筋直径 10 倍	-	观察，钢尺检查
	2	接头外观质量	应符合国家现行标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 和的有关规定	-	观察
	3	钢筋绑扎、焊接和机械连接接头设置	应符合本标准第 6.10.3 条和第 6.10.4 条的规定	-	观察，钢尺检查
	4	主筋间距	±20	mm	尺量检查，抽查数量不少于 10 处
	5	钢筋保护层	+15 -5		
	6	预留插筋	中心位移		
外露长度			+30 0		

6.13.2 混凝土烟囱基础模板安装质量标准及检验方法应符合表 6.13.2 的规定。一般项目检查数量不应少于 10 处。

表 6.13.2 混凝土烟囱基础模板安装质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检 验 方 法		
主控项目	1	模板及其支撑结构与加固措施	应根据工程结构形式、荷载大小、地基土类别、施工设备和材料供应等条件设计，应具有足够的承载能力、刚度和稳固性	-	观察检查		
	2	避免隔离剂玷污	在涂刷模板隔离剂时不得玷污钢筋和混凝土接槎处	-	观察检查		
一般项目	1	模板安装的一般要求	1、模板的接缝不应漏浆，在浇筑混凝土前木模板应浇水湿润，模板内不应有积水； 2、模板与混凝土接触面应清理干净并涂刷隔离剂，不得采用影响结构性能或妨碍装饰工程施工的隔离剂； 3、浇筑前，模板内杂物应清理干净。	-	观察检查		
	2	用作模板的地坪、胎膜质量	应平整光洁，不得产生影响混凝土质量的下沉、裂缝、起砂或起鼓	-	观察检查		
	3	烟道模板起拱高度（大于半径）	+10 +5	mm	钢尺检查		
	4	预埋件、预留孔洞	预埋钢板中心线位置			3	
			预埋管、预留孔中心线位置			3	
			预埋螺栓			中心线位置	2
						外露长度	+10 0
			预留孔洞			中心线位置	10
						尺寸	+10 0
	5	模板安装	基础中心点相对设计坐标的位移			10	线坠经纬仪 尺量检查
			底板或环板的外半径			外半径 1%，且 ≤50	
			环壁或壳体的内半径			内半径的 1%，且 ≤40	
			烟道口中心线			10	
烟道口标高			±15				
烟道口的高度和宽度			+20 -5				
相邻模板高低差			5				

6.13.3 烟囱基础混凝土质量标准及检验方法应符合表 6.13.3 的规定。一般项目检查数量不应少于 10 处。

表 6.13.3 烟囱基础混凝土质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法		
主控项目	1	混凝土组成材料的品种、规格和质量	应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的有关规定	-	检查合格证和检验报告		
	2	配合比设计	根据混凝土强度等级、耐久性和工作性等进行配合比设计, 并应符合国家现行标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55 的有关规定	-	检查配合比设计资料		
	3	混凝土强度等级及试件的取样和留置	应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的有关规定	-	检查施工纪录及试件检验报告		
	4	原材料每盘称量的偏差	应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的有关规定	-	检查衡器计量合格证和复称		
一般项目	1	基础中心点相对设计坐标的位移	15	mm	尺寸检查		
	2	环壁上表面标高	±20			水准仪检查	
	3	环壁厚度	±20				
	4	环壁内半径	内半径的 1%, 且≤40				
	5	环壁或内表面局部凹凸不平(沿半径方向)	内半径的 1%, 且≤40				
	6	底板外半径	外半径的 1%, 且≤50				
	7	底板厚度	+20 0				
	9	烟道口	中心线			15	
			标高			±20	
高度和宽度			+30 -10				

7 钢筋混凝土烟囱

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于高度不大于 240m 的钢筋混凝土烟囱设计。

7.1.2 钢筋混凝土烟囱筒壁设计，应进行下列计算或验算：

1 附加弯矩计算应符合下列规定：

1) 承载能力极限状态下的附加弯矩。当在抗震设防地区时，尚应计算地震作用下的附加弯矩。

2) 正常使用极限状态下的附加弯矩。该状态下不考虑地震作用。

2 水平截面承载能力极限状态计算。

3 正常使用极限状态的应力计算应分别计算水平截面和垂直截面的混凝土和钢筋应力。

4 正常使用极限状态的裂缝宽度验算。

7.1.3 烟囱筒身刚度取值应符合下列规定：

1 结构自振特性和正常使用极限状态计算时，可将筒身视为弹性体系。其截面刚度可按下列规定取值：

结构自振特性计算时： $0.85 E_{ct} I$ ；

正常使用极限状态计算时： $0.65 E_{ct} I$ 。

2 极限承载能力状态下计算时： $0.40 E_{ct} I$ 。

其中， E_{ct} 为筒壁混凝土在温度作用下的弹性模量 (kN/m^2)； I 为筒身截面惯性矩 (m^4)。

7.1.4 钢筋混凝土烟囱筒壁施工时，可根据具体条件采用电动（液压）提模工艺、滑模工艺、移置模板工艺或其它工艺。

7.1.5 采用滑动模板工艺施工时，除应按本标准执行外，尚应符合国家现行标准《滑动模板工程技术规范》GB50113 的有关规定。

7.1.6 采用滑动模板工艺施工时，筒壁的厚度不宜小于 160mm；采用电动（液压）提模工艺或移置模板工艺施工时，筒壁厚度不宜小于 140mm。

7.1.7 采用滑动模板工艺施工时，混凝土在脱模后不应坍落，不应拉裂，其脱模强度不得低于 0.2MPa。

7.1.8 采用电动（液压）提模工艺施工时，受力层混凝土的强度值应根据平台荷载经过计算确定，低于该值时不得提升平台。

7.1.9 烟道口、门洞、灰斗平台等处的承重模板，应在混凝土强度达到现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的要求后方可拆除。

7.1.10 烟囱施工应设置沉降观测点，设置后应作首次沉降观测，施工过程中应每 50m 做一次沉降观测。筒壁施工完后，应按国家现行标准《建筑变形测量规范》JGJ8 的要求继续进行观测，还应进行倾斜度观测。

7.2 附加弯矩计算

7.2.1 承载能力极限状态和正常使用极限状态计算时，筒身重力荷载对筒壁水平截面 i 产生的附加弯矩 M_{ai} ，可按下列公式计算（图 7.2.1）：

$$M_{ai} = \sum_{j=i+1}^n G_j (u_j - u_i) \quad (7.2.1)$$

式中： G_j ——筒身 j 质点的重力（计算地震作用时应包括竖向地震作用）；

u_i 、 u_j ——筒身 i 、 j 质点的最终水平位移，计算时包括日照温差和基础倾斜的影响。

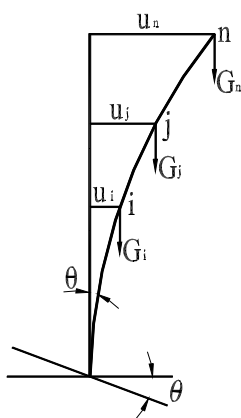


图 7.2.1 附加弯矩计算

7.2.2 烟囱筒身变形计算应包括以下因素的影响：

- 1 附加弯矩作用，在地震状况时应考虑竖向地震响应；
- 2 日照温差作用；
- 3 基础倾斜作用，可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定的地基允许倾斜值采用。

7.2.3 计算不均匀日照引起的筒身变位时，截面曲率可按下列公式计算：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha_c \Delta T}{d} \quad (7.2.3)$$

式中：1/ρ ——筒身不均匀日照引起的变形曲率；

α_c ——混凝土的线膨胀系数，取 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ；

ΔT ——由日照引起的筒身向阳面和背阳面的温度差 ($^\circ\text{C}$)，应按当地实测数据采用。

当无实测数据时，可按 20°C 采用；

d ——高度为 0.4 倍筒身高度处的筒身外直径 (m)。

7.2.4 荷载作用下，筒身计算截面 i 处的变形曲率可按下式计算：

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{M_i}{\alpha_{Ec} E_c I} \quad (7.2.4)$$

式中：1/ρ_{*i*} ——荷载作用下，筒身 i 计算截面处的变形曲率；

M_i ——计算截面弯矩代表值；

α_{Ec} ——筒身刚度折减系数，按 7.1.3 条规定选取。

7.3 烟囱筒壁承载能力极限状态计算

7.3.1 钢筋混凝土烟囱筒壁水平截面极限状态承载能力，应按下列公式计算：

1 当烟囱筒壁计算截面无孔洞时[图 7.3.1 (a)]：

$$M + M_a \leq \alpha_1 f_{ct} A r \frac{\sin \alpha \pi}{\pi} + f_{yt} A_s r \frac{\sin \alpha \pi + \sin \alpha_i \pi}{\pi} \quad (7.3.1-1)$$

$$\alpha = \frac{N + f_{yt} A_s}{\alpha_1 f_{ct} A + 2.5 f_{yt} A_s} \quad (7.3.1-2)$$

当 $\alpha \geq \frac{2}{3}$ 时：

$$\alpha = \frac{N}{\alpha_1 f_{ct} A + f_{yt} A_s} \quad (7.3.1-3)$$

2 当筒壁计算截面有孔洞时：

1) 有一个孔洞[图 7.3.1 (b)]：

$$M + M_a \leq \frac{r}{\pi - \theta} \left\{ (\alpha_1 f_{ct} A + f_{yt} A_s) [\sin(\alpha\pi - \alpha\theta + \theta) - \sin\theta] + f_{yt} A_s \sin[\alpha(\pi - \theta)] \right\} \quad (7.3.1-4)$$

$$A = 2(\pi - \theta)rt \quad (7.3.1-5)$$

2) 有两个孔洞, 且 $\alpha_0 = \pi$ 时 [图 7.3.1 (c)]:

$$M + M_a \leq \frac{r}{\pi - \theta_1 - \theta_2} \left\{ (\alpha_1 f_{ct} A + f_{yt} A_s) [\sin(\pi\alpha - \alpha\theta_1 - \alpha\theta_2 + \theta_1) - \sin\theta_1] + f_{yt} A_s [\sin(\alpha\pi - \alpha\theta_1 - \alpha\theta_2 + \theta_2) - \sin\theta_2] \right\} \quad (7.3.1-6)$$

$$A = 2(\pi - \theta_1 - \theta_2)rt \quad (7.3.1-7)$$

3) 有两个孔洞, 且当 $\alpha_0 \leq \alpha(\pi - \theta_1 - \theta_2) + \theta_1 + \theta_2$ 时, 可按 $\theta = \theta_1 + \theta_2$ 的单孔洞截面计算;

4) 有两个孔洞, 且当 $\alpha(\pi - \theta_1 - \theta_2) + \theta_1 + \theta_2 < \alpha_0 \leq \pi - \theta_2 - \alpha_t(\pi - \theta_1 - \theta_2)$ 时 [图 7.3.1 (d)]:

$$M + M_a \leq \frac{r}{\pi - \theta_1 - \theta_2} \left\{ (\alpha_1 f_{ct} A + f_{yt} A_s) [\sin(\alpha\pi - \alpha\theta_1 - \alpha\theta_2 + \theta_1) - \sin\theta_1] + f_{yt} A_s \sin(\alpha\pi - \alpha\theta_1 - \alpha\theta_2) \right\} \quad (7.3.1-8)$$

5) 有两个孔洞, 且当 $\alpha_0 > \pi - \theta_2 - \alpha_t(\pi - \theta_1 - \theta_2)$ 时 [图 7.3.1 (e)]:

$$M + M_a \leq \frac{r}{\pi - \theta_1 - \theta_2} \left\{ (\alpha_1 f_{ct} A + f_{yt} A_s) [\sin(\alpha\pi - \alpha\theta_1 - \alpha\theta_2 + \theta_1) - \sin\theta_1] + \frac{f_{yt} A_s}{2} [\sin(\beta'_2) + \sin\beta_2 - \sin(\pi - \alpha_0 + \theta_2) + \sin(\pi - \alpha_0 - \theta_2)] \right\} \quad 7.3.1-9$$

$$\beta_2 = k - \arcsin\left(-\frac{m}{2\sin k}\right) \quad (7.3.1-10)$$

$$\beta'_2 = k + \arcsin\left(-\frac{m}{2\sin k}\right) \quad (7.3.1-11)$$

$$m = \cos(\pi - \alpha_0 - \theta_2) - \cos(\pi - \alpha_0 + \theta_2) \quad (7.3.1-12)$$

$$k = \alpha_t(\pi - \theta_1 - \theta_2) + \theta_2 \quad (7.3.1-13)$$

$$A = 2(\pi - \theta_1 - \theta_2)rt \quad (7.3.1-14)$$

式中: N ——计算截面轴向力设计值 (kN);

α ——受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值;

α_t ——受拉竖向钢筋截面面积与全部竖向钢筋截面面积的比值, $\alpha_t = 1 - 1.5\alpha$, 当

$$\alpha \geq \frac{2}{3} \text{ 时, } \alpha_t = 0;$$

A ——计算截面的筒壁截面面积 (m^2);

f_{ct} ——混凝土在温度作用下轴心抗压强度设计值 (kN/m^2);

α_1 ——受压区混凝土矩形应力图的应力与混凝土抗压强度设计值的比值, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, $\alpha_1 = 1.0$; 当为 C80 时, $\alpha_1 = 0.94$, 其间按线性内插法取用;

A_s ——计算截面钢筋总截面面积 (m^2);

f_{yt} ——计算截面钢筋在温度作用下的抗拉强度设计值 (kN/m^2);

M ——计算截面弯矩设计值 ($\text{kN}\cdot\text{m}$);

M_a ——计算截面附加弯矩设计值 ($\text{kN}\cdot\text{m}$);

r ——计算截面筒壁平均半径 (m);

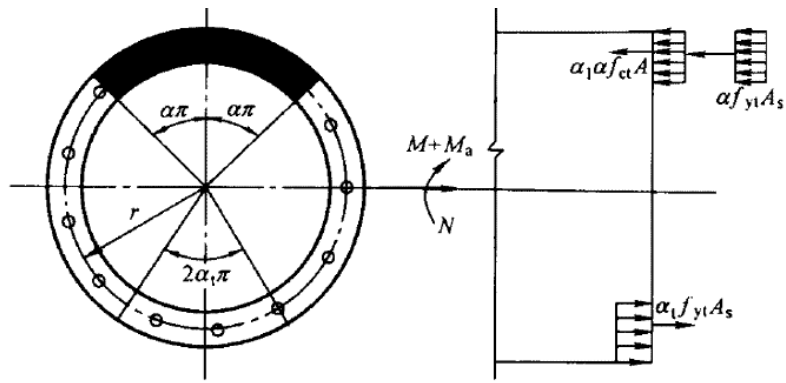
t ——筒壁厚度(m);

θ ——计算截面有一个孔洞时的孔洞半角 (rad);

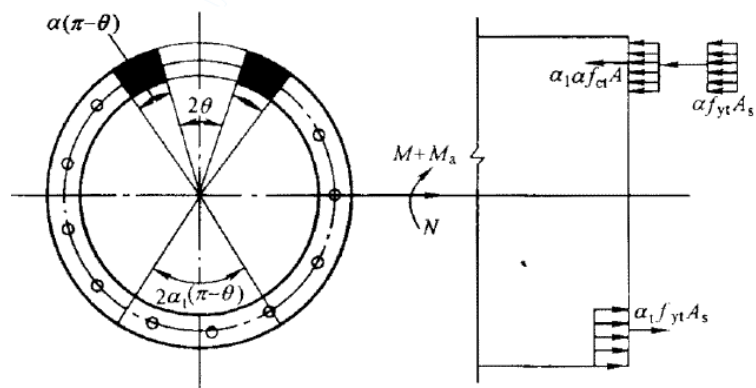
θ_1 ——计算截面有两个孔洞时, 大孔洞的半角 (rad);

θ_2 ——计算截面有两个孔洞时, 小孔洞的半角 (rad);

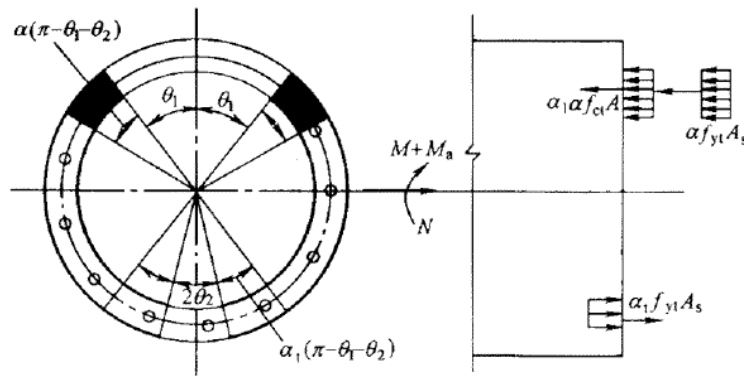
α_0 ——计算截面有两个孔洞时, 两孔洞角平分线的夹角 (rad)。



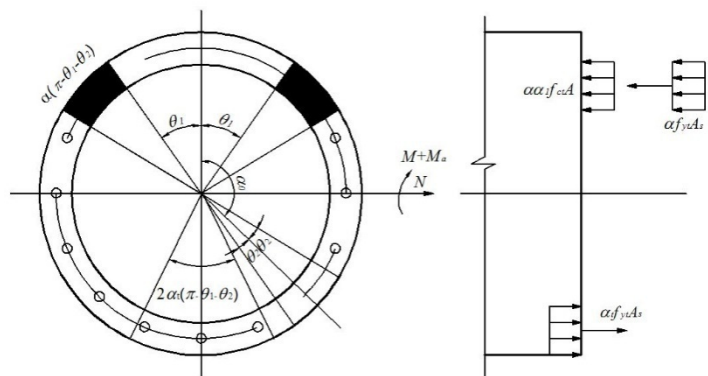
(a) 筒壁没有孔洞



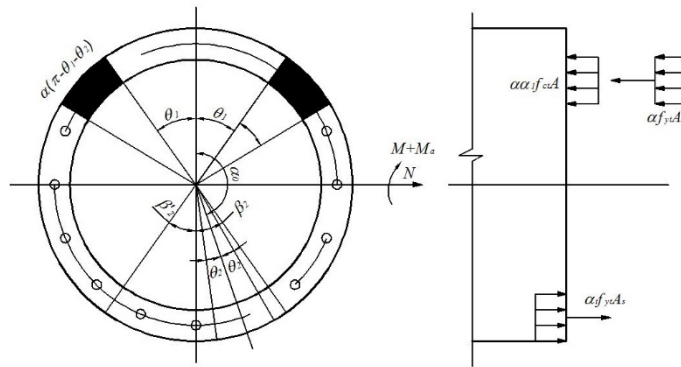
(b) 筒壁有一个孔洞



(c) 筒壁两个孔洞 ($\alpha_0 = \pi$, 大孔位于受压区)



(d) 筒壁两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$, 其中小孔位于拉压区之间)



(e) 筒壁两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$, 其中小孔位于受拉区内)

图 7.3.1 截面极限承载力计算

7.3.2 筒壁竖向截面极限承载力, 可按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB 50010 正截面受弯承载力进行计算。

7.4 烟囱筒壁正常使用极限状态计算

7.4.1 正常使用极限状态计算应包括下列内容:

1 计算在荷载标准值和温度共同作用下混凝土与钢筋应力, 以及温度单独作用下钢筋应力, 并应满足下列公式的要求:

$$\sigma_{cwt} \leq 0.4 f_{ctk} \quad (7.4.1-1)$$

$$\sigma_{swt} \leq 0.5 f_{ytk} \quad (7.4.1-2)$$

$$\sigma_{st} \leq 0.5 f_{ytk} \quad (7.4.1-3)$$

式中: σ_{cwt} ——在荷载标准值和温度共同作用下混凝土的应力值 (N/mm^2);

σ_{swt} ——在荷载标准值和温度共同作用下竖向钢筋的应力值 (N/mm^2);

σ_{st} ——在温度作用下环向和竖向钢筋的应力值 (N/mm^2);

f_{ctk} ——混凝土在温度作用下的强度标准值, 按本标准表 4.2.3 的规定取值 (N/mm^2);

f_{ytk} ——钢筋在温度作用下的强度标准值, 按本标准第 4.3.2 条的规定取值 (N/mm^2);

2 验算筒壁裂缝宽度, 并应符合本标准表 7.5.4 的规定。

I 荷载标准值作用下的水平截面应力计算

7.4.2 钢筋混凝土筒壁水平截面在自重荷载、风荷载和附加弯矩 (均为标准值)

作用下的应力计算，应根据轴向力标准值对筒壁圆心的偏心距 e_k 与截面核心距 r_{co} 的相应关系 ($e_k > r_{co}$ 或 $e_k \leq r_{co}$)，分别采用图 7.4.2 所示的应力计算简图，并应符合下列规定：

1 轴向力标准值对筒壁圆心的偏心距应按下列式计算：

$$e_k = \frac{M_{wk} + M_{ak}}{N_k} \quad (7.4.2-1)$$

式中： M_{wk} ——计算截面由风荷载标准值产生的弯矩（kN·m）；

M_{ak} ——计算截面正常使用极限状态的附加弯矩标准值（kN·m）；

N_k ——计算截面的轴向力标准值（kN）。

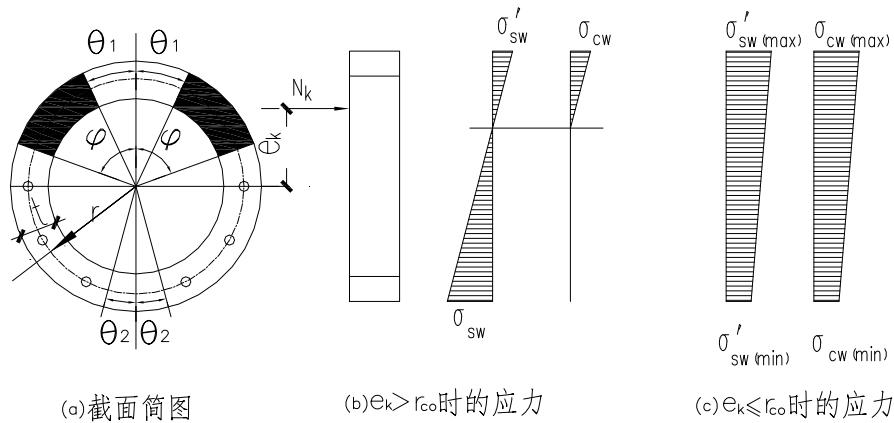


图 7.4.2 在荷载标准值作用下截面应力计算

2 截面核心距 r_{co} 可按下列公式计算：

1) 当筒壁计算截面无孔洞时：

$$r_{co} = 0.5r \quad (7.4.2-2)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞（将孔洞置于受压区）时：

$$r_{co} = \frac{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - 2 \sin \theta}{2(\pi - \theta - \sin \theta)} r \quad (7.4.2-3)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞（ $\alpha_0 = \pi$ ，并将大孔洞置于受压区）时：

$$r_{co} = \frac{\pi - \theta_1 - \theta_2 - 0.5(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2) + 2 \cos \theta_2 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)}{2[\sin \theta_2 - \sin \theta_1 + (\pi - \theta_1 - \theta_2) \cos \theta_2]} r \quad (7.4.2-4)$$

4) 当筒壁计算截面有两个孔洞（ $\alpha_0 \neq \pi$ ，并将大孔洞置于受压区）且 $\alpha_0 \leq \pi - \theta_2$ 时：

$$r_{co} = \{[(\pi - \theta_1 - \theta_2) - 0.5[\sin 2\theta_1 - 0.5 \sin 2(\alpha_0 - \theta_2) + 0.5 \sin 2(\alpha_0 + \theta_2)] + \sin(\alpha_0 - \theta_2) - \sin(\alpha_0 + \theta_2) - 2 \sin \theta_1] / [2(\pi - \theta_1 - \theta_2) + \sin(\alpha_0 - \theta_2) - \sin(\alpha_0 + \theta_2) - 2 \sin \theta_1]\} r \quad (7.4.2-5)$$

5) 当筒壁计算截面有两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$, 并将大孔洞置于受压区) 且 $\alpha_0 > \pi - \theta_2$ 时:

$$(7.4.2-6)$$

7.4.3 当 $e_k > r_{co}$ 时, 筒壁水平截面混凝土及钢筋应力应按下列公式计算:

1 背风侧混凝土压应力 σ_{cw} 应按下列公式计算:

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c1} \quad (7.4.3-1)$$

$$C_{c1} = \frac{\pi(1 + \alpha_{Et} \rho_t)(1 - \cos \varphi)}{\sin \varphi - (\varphi + \pi \alpha_{Et} \rho_t) \cos \varphi} \quad (7.4.3-2)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c2} \quad (7.4.3-3)$$

$$C_{c2} = \frac{(1 + \alpha_{Et} \rho_t)(\pi - \theta)(\cos \theta - \cos \varphi)}{\sin \varphi - (1 + \alpha_{Et} \rho_t) \sin \theta - [\varphi - \theta + (\pi - \theta) \alpha_{Et} \rho_t] \cos \varphi} \quad (7.4.3-4)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞 ($\alpha_0 = \pi$) 时:

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c3} \quad (7.4.3-5)$$

$$C_{c3} = \frac{B_{c3}}{D_{c3}} \quad (7.4.3-6)$$

$$B_{c3} = (\pi - \theta_1 - \theta_2)(1 + \alpha_{Et} \rho_t)(\cos \theta_1 - \cos \varphi) \quad (7.4.3-7)$$

$$D_{c3} = \sin \varphi - (1 + \alpha_{Et} \rho_t) \sin \theta_1 - [\varphi - \theta_1 + \alpha_{Et} \rho_t (\pi - \theta_1 - \theta_2)] \cos \varphi + \alpha_{Et} \rho_t \sin \theta_2 \quad (7.4.3-8)$$

4) 当筒壁计算截面有两个孔洞时 ($\alpha_0 \neq \pi$) 时:

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c4} \quad (7.4.3-9)$$

$$C_{c4} = \frac{B_{c4}}{D_{c4}} \quad (7.4.3-10)$$

$$B_{c4} = (\pi - \theta_1 - \theta_2)(1 + \alpha_{Et}\rho_t)(\cos\theta_1 - \cos\varphi) \quad (7.4.3-11)$$

$$D_{c4} = \sin\varphi - (1 + \alpha_{Et}\rho_t)\sin\theta_1 - [\varphi - \theta_1 + \alpha_{Et}\rho_t(\pi - \theta_1 - \theta_2)]\cos\varphi + \frac{1}{2}\alpha_{Et}\rho_t[\sin(\alpha_0 - \theta_2) - \sin(\alpha_0 + \theta_2)] \quad (7.4.3-12)$$

式中： A_0 ——筒壁计算截面的换算面积，按本标准公式（7.4.5-1）计算；

α_{Et} ——在温度和荷载长期作用下，钢筋的弹性模量与混凝土的弹塑性模量的比值，

按本标准公式（7.4.5-2）计算；

φ ——筒壁计算截面的受压区半角；

ρ_t ——竖向钢筋总配筋率（包括筒壁外侧和内侧配筋）。

2 迎风侧竖向钢筋拉应力 σ_{sw}

1) 当筒壁计算截面无孔洞时：

$$\sigma_{sw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_0} C_{s1} \quad (7.4.3-13)$$

$$C_{s1} = \frac{1 + \cos\varphi}{1 - \cos\varphi} C_{c1} \quad (7.4.3-14)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时：

$$\sigma_{sw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_0} C_{s2} \quad (7.4.3-15)$$

$$C_{s2} = \frac{1 + \cos\varphi}{\cos\theta - \cos\varphi} C_{c2} \quad (7.4.3-16)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞（ $\alpha_0 = \pi$ ）时：

$$\sigma_{sw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_0} C_{s3} \quad (7.4.3-17)$$

$$C_{s3} = \frac{\cos\theta_2 + \cos\varphi}{\cos\theta_1 - \cos\varphi} C_{c3} \quad (7.4.3-18)$$

4) 当筒壁有两个孔洞（ $\alpha_0 \neq \pi$ ，将大孔洞置于受压区）且 $\alpha_0 \leq \pi - \theta_2$ 时：

$$\sigma_{sw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_0} C_{s4} \quad (7.4.3-19)$$

$$C_{s4} = \frac{1 + \cos \varphi}{\cos \theta_1 - \cos \varphi} C_{c4} \quad (7.4.3-20)$$

5) 当筒壁有两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$, 将大孔洞置于受压区) 且 $\alpha_0 > \pi - \theta_2$ 时:

$$\sigma_{sw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_0} C_{s5} \quad (7.4.3-21)$$

$$C_{s5} = \frac{\cos(\alpha_0 + \theta_2) + \cos \varphi}{\cos \theta_1 - \cos \varphi} C_{c4} \quad (7.4.3-22)$$

3 受压区半角 φ , 应按下列公式确定:

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

$$\frac{e_k}{r} = \frac{\varphi - 0.5 \sin 2\varphi + \pi \alpha_{Et} \rho_t}{2[\sin \varphi - (\varphi + \pi \alpha_{Et} \rho_t) \cos \varphi]} \quad (7.4.3-23)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

$$\frac{e_k}{r} = \frac{(1 + \alpha_{Et} \rho_t)(\varphi - \theta - 0.5 \sin 2\theta + 2 \sin \theta \cos \varphi) - 0.5 \sin 2\varphi + \alpha_{Et} \rho_t(\pi - \varphi)}{2\{\sin \varphi - (1 + \alpha_{Et} \rho_t) \sin \theta - [\varphi - \theta + (\pi - \theta) \alpha_{Et} \rho_t] \cos \varphi\}} \quad (7.4.3-24)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞 ($\alpha_0 = \pi$) 时:

$$\frac{e_k}{r} = \frac{B_{ec1}}{D_{ec1}} \quad (7.4.3-25)$$

$$B_{ec1} = (1 + \alpha_{Et} \rho_t)(\varphi - \theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1 + 2 \cos \varphi \sin \theta_1) - 0.5 \sin 2\varphi + \alpha_{Et} \rho_t(\pi - \varphi - \theta_2 - 0.5 \sin 2\theta_2 - 2 \cos \varphi \sin \theta_2) \quad (7.4.3-26)$$

$$D_{ec1} = 2\{\sin \varphi - (1 + \alpha_{Et} \rho_t) \sin \theta_1 - [\varphi - \theta_1 + \alpha_{Et} \rho_t(\pi - \theta_1 - \theta_2)] \cos \varphi + \alpha_{Et} \rho_t \sin \theta_2\} \quad (7.4.3-27)$$

4) 当开两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$, 将大孔洞置于受压区) 时:

$$\frac{e_k}{r} = \frac{B_{ec2}}{D_{ec2}} \quad (7.4.3-28)$$

$$\begin{aligned}
B_{ec2} = & (1 + \alpha_{Et} \rho_t)(\varphi - \theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1 + 2 \cos \varphi \sin \theta_1) - 0.5 \sin 2\varphi \\
& + \alpha_{Et} \rho_t [\pi - \varphi - \theta_2 - 0.25 \sin(2\alpha_0 + 2\theta_2) + 0.25 \sin(2\alpha_0 - 2\theta_2)] \\
& + \cos \varphi \sin(\alpha_0 + \theta_2) - \cos \varphi \sin(\alpha_0 - \theta_2)
\end{aligned} \quad (7.4.3-29)$$

$$\begin{aligned}
D_{ec2} = & 2\{\sin \varphi - (1 + \alpha_{Et} \rho_t) \sin \theta_1 - [\varphi - \theta_1 + \alpha_{Et} \rho_t (\pi - \theta_1 - \theta_2)] \cos \varphi + \\
& \frac{1}{2} \alpha_{Et} \rho_t [\sin(\alpha_0 - \theta_2) - \sin(\alpha_0 + \theta_2)]\}
\end{aligned} \quad (7.4.3-30)$$

7.4.4 当 $e_k \leq r_{co}$ 时，筒壁水平截面混凝土压应力应按下列公式计算：

1 背风侧的混凝土压应力 σ_{cw} ：

1) 当筒壁计算截面无孔洞时：

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c5} \quad (7.4.4-1)$$

$$C_{c5} = 1 + 2 \frac{e_k}{r} \quad (7.4.4-2)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时：

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c6} \quad (7.4.4-3)$$

$$C_{c6} = 1 + \frac{2(\frac{e_k}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}) [(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - 2 \frac{\sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \quad (7.4.4-4)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞 ($\alpha_0 = \pi$) 时：

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c7} \quad (7.4.4-5)$$

$$C_{c7} = 1 + \frac{2(\frac{e_k}{r} + \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}) [(\pi - \theta_1 - \theta_2) \cos \theta_1 - \sin \theta_2 + \sin \theta_1]}{(\pi - \theta_1 - \theta_2) - 0.5(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2) - 2 \frac{(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}} \quad (7.4.4-6)$$

4) 当筒壁计算截面有两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$, 将大孔洞置于受压区) 时：

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c8} \quad (7.4.4-7)$$

$$C_{c8} = 1 + \frac{2\left(\frac{e_k}{r} + \frac{\sin \theta_1 + P_1}{\pi - \theta_1 - \theta_2}\right) [(\pi - \theta_1 - \theta_2) \cos \theta_1 + \sin \theta_1 + P_1]}{(\pi - \theta_1 - \theta_2) - 0.5(\sin 2\theta_1 + P_2) - 2\frac{(\sin \theta_1 + P_1)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}} \quad (7.4.4-8)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} [\sin(\alpha_0 + \theta_2) - \sin(\alpha_0 - \theta_2)] \quad (7.4.4-9)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} [\sin 2(\alpha_0 + \theta_2) - \sin 2(\alpha_0 - \theta_2)] \quad (7.4.4-10)$$

2 迎风侧混凝土压应力 σ'_{cw}

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

$$\sigma'_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c9} \quad (7.4.4-11)$$

$$C_{c9} = 1 - 2\frac{e_k}{r} \quad (7.4.4-12)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

$$\sigma'_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c10} \quad (7.4.4-13)$$

$$C_{c10} = 1 - \frac{2\left(\frac{e_k}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}\right) (\pi - \theta - \sin \theta)}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - 2\frac{\sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \quad (7.4.4-14)$$

3) 当洞壁计算截面有两个孔洞 ($\alpha_0 = \pi$) 时:

$$\sigma'_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c11} \quad (7.4.4-15)$$

$$C_{c11} = 1 - \frac{2\left(\frac{e_k}{r} + \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}\right) [(\pi - \theta_1 - \theta_2) \cos \theta_2 + \sin \theta_2 - \sin \theta_1]}{(\pi - \theta_1 - \theta_2) - 0.5(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2) - 2\frac{(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}} \quad (7.4.4-16)$$

4) 当筒壁有两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$) 且 $\alpha_0 \leq \pi - \theta_2$ 时:

$$\sigma'_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c12} \quad (7.4.4-17)$$

$$C_{c12} = 1 - \frac{2\left(\frac{e_k}{r} + \frac{\sin \theta_1 + P_1}{\pi - \theta_1 - \theta_2}\right)[(\pi - \theta_1 - \theta_2) - \sin \theta_1 - P_1]}{(\pi - \theta_1 - \theta_2) - 0.5(\sin 2\theta_1 + P_2) - 2\frac{(\sin \theta_1 + P_1)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}} \quad (7.4.4-18)$$

5) 当筒壁有两个孔洞 ($\alpha_0 \neq \pi$) 且 $\alpha_0 > \pi - \theta_2$ 时:

$$\sigma'_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c13} \quad (7.4.4-19)$$

(7.4.4-20)

7.4.5 筒壁水平截面的换算截面面积 A_0 和 α_{Et} 按下列公式计算:

$$A_0 = 2rt(\pi - \theta_1 - \theta_2)(1 + \alpha_{Et}\rho_t) \quad (7.4.5-1)$$

$$\alpha_{Et} = 2.5 \frac{E_s}{E_{ct}} \quad (7.4.5-2)$$

式中: E_s ——钢筋弹性模量 (N/mm^2);

E_{ct} ——混凝土在温度作用下的弹性模量 (N/mm^2), 按本标准第 4.2.6 条规定采用。

II 荷载标准值和温度共同作用下的水平截面应力计算

7.4.6 在计算荷载标准值和温度共同作用下的筒壁水平截面应力前, 首先应按下列公式计算应变参数:

1 压应变参数 P_c 值:

当 $e_k > r_{co}$ 时:

$$P_c = \frac{1.8\sigma_{cw}}{\varepsilon_t E_{ct}} \quad (7.4.6-1)$$

$$\varepsilon_t = 1.25(\alpha_c T_c - \alpha_s T_s) \quad (7.4.6-2)$$

当 $e_k \leq r_{co}$ 时:

$$P_c = \frac{2.5\sigma_{cw}}{\varepsilon_t E_{ct}} \quad (7.4.6-3)$$

2 拉应变参数 P_s 值(仅适用于 $e_k > r_{co}$):

$$P_s = \frac{0.7\sigma_{sw}}{\varepsilon_t E_s} \quad (7.4.6-4)$$

式中： ε_t ——筒壁内表面与外侧钢筋的相对自由变形值；

α_c 、 α_s ——分别为混凝土、钢筋的线膨胀系数，按本标准 4.2.7 条及 4.3.8 条的规定采用；

T_c 、 T_s ——分别为筒壁内表面、外侧竖向钢筋的受热温度(°C)，按本标准 5.6 节规定计算；

σ_{cw} 、 σ_{sw} ——分别为在荷载标准值作用下背风侧混凝土压应力、迎风侧竖向钢筋拉应力(N/mm²)，按本标准 7.4.3 条~7.4.5 条规定计算。

7.4.7 背风侧混凝土压应力 σ_{cwt} (图 7.4.7)，应按下列公式计算：

1 当 $P_c \geq 1$ 时：

$$\sigma_{cwt} = \sigma_{cw} \quad (7.4.7-1)$$

2 当 $P_c < 1$ 时：

$$\sigma_{cwt} = \sigma_{cw} + E'_{ct} \varepsilon_t (\xi_{wt} - P_c) \eta_{ct1} \quad (7.4.7-2)$$

当 $e_k > r_{co}$ 时：

$$E'_{ct} = 0.55E_{ct} \quad (7.4.7-3)$$

当 $e_k \leq r_{co}$ 时：

$$E'_{ct} = 0.4E_{ct} \quad (7.4.7-4)$$

当 $1 > P_c > \frac{1 + 2\alpha_{Eta} \rho' (1 - \frac{c'}{t_0})}{2[1 + \alpha_{Eta} (\rho + \rho')]}$ 时：

$$\xi_{wt} = P_c + \frac{1 + 2\alpha_{Eta} (\rho + \rho' \frac{c'}{t_0})}{2[1 + \alpha_{Eta} (\rho + \rho')]} \quad (7.4.7-5)$$

当 $P_c \leq \frac{1 + 2\alpha_{Eta}\rho'(1 - \frac{c'}{t_0})}{2[1 + \alpha_{Eta}(\rho + \rho')]}$ 时:

$$\xi_{wt} = -\alpha_{Eta}(\rho + \rho') + \sqrt{[\alpha_{Eta}(\rho + \rho')]^2 + 2\alpha_{Eta}(\rho + \rho')\frac{c'}{t_0} + 2P_c[1 + \alpha_{Eta}(\rho + \rho')]} \quad (7.4.7-6)$$

$$\alpha_{Eta} = \frac{E_s}{E'_{ct}} \quad (7.4.7-7)$$

当 $P_c \leq 0.2$ 时:

$$\eta_{ct1} = 1 - 2.6P_c \quad (7.4.7-8)$$

当 $P_c > 0.2$ 时:

$$\eta_{ct1} = 0.6(1 - P_c) \quad (7.4.7-9)$$

式中: E'_{ct} ——在温度和荷载长期作用下混凝土的弹塑性模量;

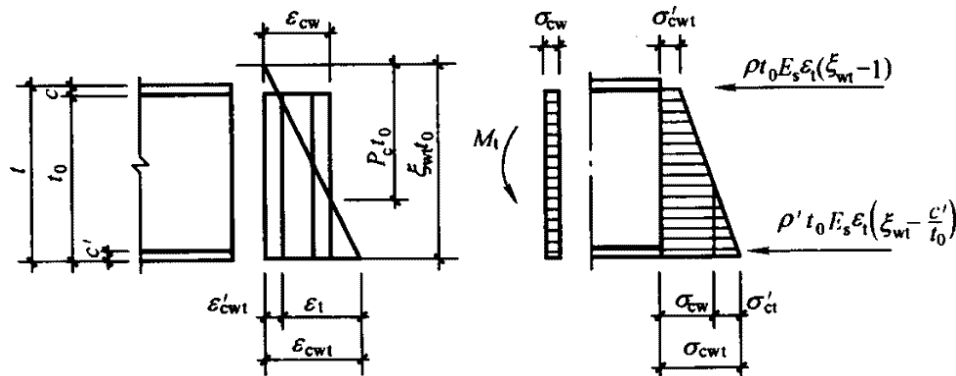
ξ_{wt} ——在荷载标准值和温度共同作用下筒壁厚度内受压区的相对高度系数;

ρ 、 ρ' ——分别为筒壁外侧和内侧竖向钢筋配筋率;

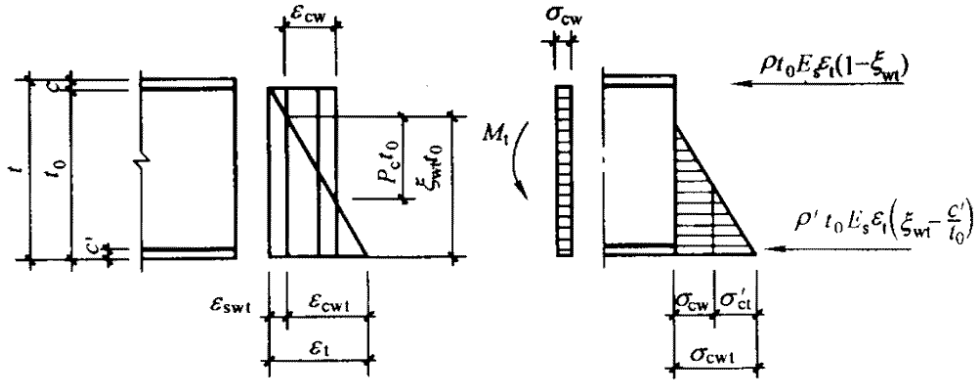
t_0 ——筒壁有效厚度(mm);

c' ——筒壁内侧竖向钢筋保护层厚度(mm);

η_{ct1} ——温度应力衰减系数。



$$(a) \quad 1 > P_c > \frac{1 + 2\alpha_{Eta}\rho'(1 - \frac{c'}{t_0})}{2[1 + \alpha_{Eta}(\rho + \rho')]} \text{ 时}$$



$$(b) P_c \leq \frac{1 + 2\alpha_{Eta} \rho' (1 - \frac{c'}{t_0})}{2[1 + \alpha_{Eta} (\rho + \rho')]} \text{ 时}$$

图 7.4.7 水平截面背风侧混凝土的应变和应力 (宽度为 1)

7.4.8 迎风侧竖向钢筋应力 σ_{swl} (图 7.4.8), 应按下列公式计算:

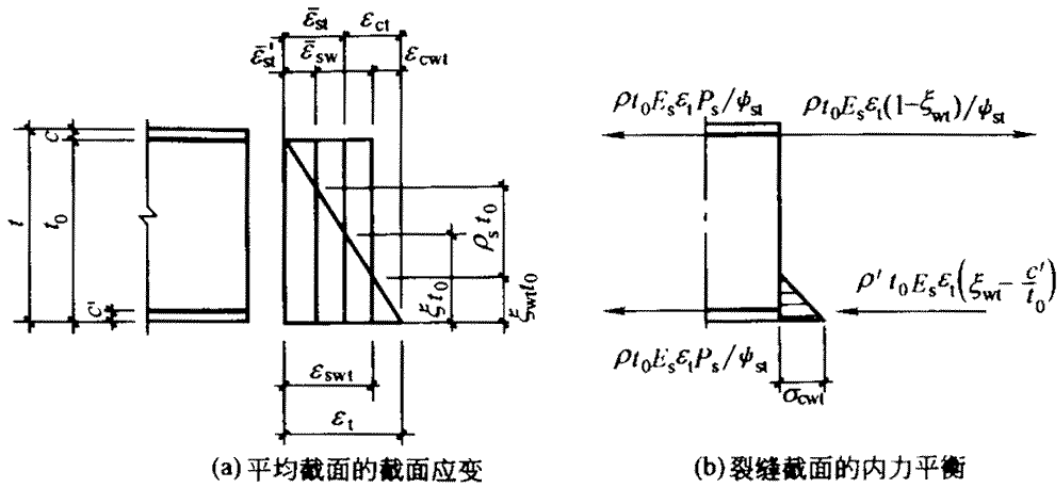


图 7.4.8 水平截面迎风侧钢筋的应变和应力计算 (宽度为 1)

1 当 $e_k > r_{co}$, $P_s \geq \frac{\rho + \rho' \frac{c'}{t_0}}{\rho + \rho'}$ 时:

$$\sigma_{swl} = \sigma_{sw} / \psi_{st} \quad (7.4.8-1)$$

2 当 $e_k > r_{co}$, $P_s < \frac{\rho + \rho' \frac{c'}{t_0}}{\rho + \rho'}$ 时:

$$\sigma_{swl} = \frac{E_s}{\psi_{st}} \epsilon_t (1 - \xi_{wt}) \quad (7.4.8-2)$$

$$\xi_{wt} = -\alpha_{Eta}(\rho + \rho') + \{[\alpha_{Eta}(\rho + \rho')]^2 + 2\alpha_{Eta}(\rho + \rho')\frac{c'}{t_0} - 2P_s\alpha_{Eta}(\rho + \rho')\}^{1/2} \quad (7.4.8-3)$$

式中： ψ_{st} ——受拉钢筋在温度作用下的应变不均匀系数，按本标准公式(7.4.9-5)计算。

$$3 \text{ 当 } e_k \leq r_{co}, P_c \leq \frac{1 + 2\alpha_{Eta}\rho'(1 - \frac{c'}{t_0})}{2[1 + \alpha_{Eta}(\rho + \rho')]} \text{ 时:}$$

$$\sigma_{swt} = \sigma_{st} \quad (7.4.8-4)$$

$$4 \text{ 当 } e_k \leq r_{co}, P_c > \frac{1 + 2\alpha_{Eta}\rho'(1 - \frac{c'}{t_0})}{2[1 + \alpha_{Eta}(\rho + \rho')]} \text{ 时, 截面全部受压, 不应进行计算。钢筋按极限}$$

承载能力计算结果配置。

III 温度作用下水平截面和垂直截面应力计算

7.4.9 裂缝处水平截面和垂直截面在温度单独作用下混凝土压应力 σ_{ct} 和钢筋拉应力 σ_{st}

(图 7.4.9) 应按下列公式计算:

$$\sigma_{ct} = E'_{ct} \varepsilon_t \xi_1 \quad (7.4.9-1)$$

$$\sigma_{st} = \frac{E_s}{\psi_{st}} \varepsilon_t (1 - \xi_1) \quad (7.4.9-2)$$

$$\xi_1 = -\alpha_{Eta}(\rho + \rho') + \sqrt{[\alpha_{Eta}(\rho + \rho')]^2 + 2\alpha_{Eta}(\rho + \rho')\frac{c'}{t_0}} \quad (7.4.9-3)$$

当 $e_k < r_{co}$ 时,

$$\psi_{st} = 1.1 E_s \varepsilon_t (1 - \xi_1) \rho_{te} / [E_s \varepsilon_t (1 - \xi_1) \rho_{te} + 0.65 f_{tk}] \quad (7.4.9-4)$$

当 $e_k > r_{co}$ 时,

$$\psi_{st} = 1.1 \rho_{te} \sigma_{swt} / (\rho_{te} \sigma_{swt} + 0.65 f_{tk}) \quad (7.4.9-5)$$

式中： E'_{ct} ——在温度和荷载长期作用下混凝土的弹塑性模量(N/mm²)，按本标准(7.4.7-3)

式计算;

f_{tk} ——混凝土在温度作用下的抗拉强度标准值 (N/mm²)，按本标准表 4.2.3 采用;

ρ_{te} ——以有效受拉混凝土截面积计算的受拉钢筋配筋率，取 $\rho_{te} = 2\rho$ 。

当计算的 $\psi_{st} < 0.2$ 时取 $\psi_{st} = 0.2$ ； $\psi_{st} > 1$ 时取 $\psi_{st} = 1$ 。

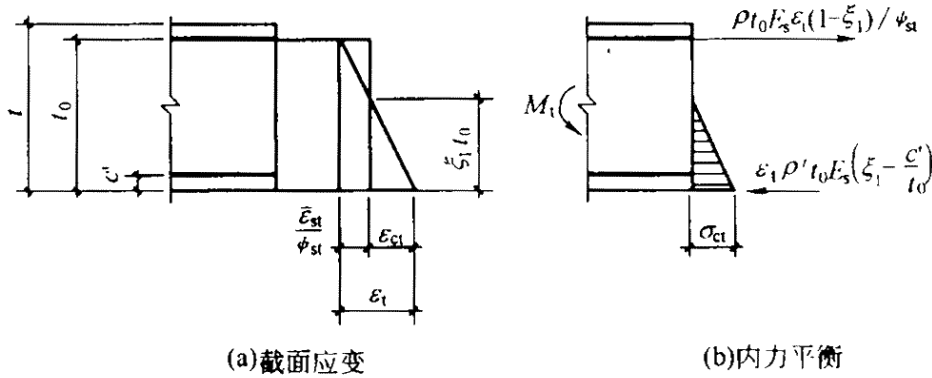


图 7.4.9 裂缝处水平截面和垂直截面应变和应力计算（宽度为 1）

IV 筒壁裂缝宽度计算

7.4.10 钢筋混凝土筒壁应按下列公式计算最大水平裂缝宽度和最大垂直裂缝宽度：

1 最大水平裂缝宽度

$$w_{\max} = k \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{swt}}{E_s} (1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (7.4.10-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{st}} \quad (7.4.10-2)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i \nu_i d_i} \quad (7.4.10-3)$$

式中： σ_{swt} ——荷载标准值和温度共同作用下竖向钢筋在裂缝处的拉应力(N/mm²)；

α_{cr} ——构件受力特征系数，当 $\sigma_{swt} = \sigma_{sw}$ 时，取 $\alpha_{cr} = 2.4$ ，在其他情况时，取

$$\alpha_{cr} = 2.1；$$

k ——烟囱工作条件系数，取 $k = 1.2$ ；

n_i ——第 i 种钢筋根数；

ρ_{te} ——以有效受拉混凝土截面积计算的受拉钢筋配筋率，当 $\sigma_{swt} = \sigma_{sw}$ 时，

$\rho_{te} = \rho + \rho'$ ，当为其它情况时， $\rho_{te} = 2\rho$ ，当 $\rho_{te} < 0.01$ 时，取 $\rho_{te} = 0.01$ ；

d_i 、 d_{eq} ——第 i 种受拉钢筋及等效钢筋的直径 (mm)；

c ——混凝土保护层厚度 (mm)；

ν_i ——纵向受拉钢筋的相对黏结特性系数，光圆钢筋取 0.7，带肋钢筋取 1.0。

2 最大垂直裂缝宽度

最大垂直裂缝宽度应按公式 (7.4.10-1) ~ (7.4.10-3) 进行计算， σ_{swf} 应以 σ_{st} ，并取 $\alpha_{cr} = 2.1$ 。

7.5 设计构造

7.5.1 钢筋混凝土烟囱筒壁的坡度，分节高度和厚度应符合下列规定：

- 1 单筒烟囱筒壁分节高度，宜为移动模板的倍数，且不宜超过 15m。
- 2 筒壁最小厚度可按式 (7.5.1) 计算，且单筒烟囱不宜小于 160mm，套筒式与多管式烟囱不宜小于 250mm。

$$t_{\min} = 100 + 0.01d \quad (7.5.1)$$

式中 d ——烟囱计算截面外部直径 (mm)；

t_{\min} ——烟囱计算截面最小壁厚 (mm)。

- 3 筒壁厚度可随分节高度自下而上阶梯形减薄，但同一节厚度宜相同。

7.5.2 安全等级为一级的单筒式钢筋混凝土烟囱以及套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱的筒壁应采用双侧配筋。其他单筒式钢筋混凝土烟囱筒壁内侧的下列部位应配置钢筋：

- 1 筒壁厚度大于 350mm 时；
- 2 夏季筒壁外表面温度长时间大于内侧温度时。

7.5.3 筒壁最小配筋率应符合表 7.5.3 的规定。

表 7.5.3 筒壁最小配筋率 (%)

配筋方式		双侧配筋	单侧配筋
竖向钢筋	外侧	0.25	0.40
	内侧	0.20	—
环向钢筋	外侧	0.25 (0.20)	0.25
	内侧	0.10 (0.15)	—

注：1、括号内数字为套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱最小配筋率；

2、套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱的外筒筒壁顶部内外环向钢筋，在自上而下 5m 高度范围内，构造钢筋应比表中规定值增加一倍。

7.5.4 筒壁环向钢筋应配在竖向钢筋靠筒壁表面（双侧配筋时指内、外表面）一侧，环向

钢筋的保护层厚度应满足 3.1.29 条的规定。

7.5.5 钢筋最小直径与最大间距应符合表 7.5.5 的规定。当为双侧配筋时,内外侧钢筋应用拉筋拉结,拉筋直径不应小于 6mm,纵横间距不宜大于 500mm,拉筋的构造宜满足图 7.5.5 的规定。

表 7.5.5 筒壁钢筋最小直径和最大间距(mm)

配筋种类	最小直径	最大间距
竖向钢筋	10	外侧 250,内侧 300
环向钢筋	8	200,且不大于壁厚

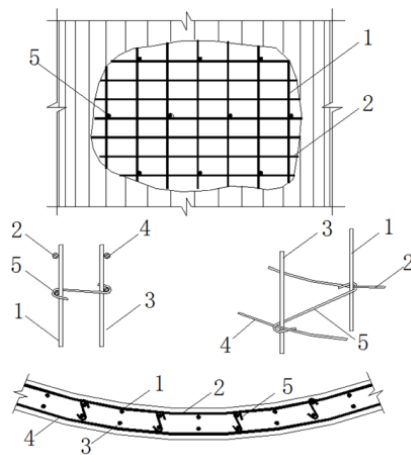


图 7.5.5 拉筋构造

1-筒壁内侧纵向钢筋; 2-筒壁内侧环向钢筋;

3-筒壁外侧纵向钢筋; 4-筒壁外侧环向钢筋; 5-拉筋

7.5.6 竖向钢筋的分段长度,宜取移动模板的倍数,并加搭接长度。

钢筋搭接长度按国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010)的规定采用,接头位置应相互错开,并在任一搭接范围内,不应超过截面内钢筋总面积的 1/4。

当钢筋采用焊接接头时,其焊接类型及质量应符合国家有关标准的规定。

7.5.7 单筒式钢筋混凝土烟囱筒壁环形悬臂和筒壁顶部加厚区段的构造,应符合下列规定(图 7.5.7):

- 1 环形悬臂可按构造配置钢筋。受力较大或挑出较长的悬臂应按牛腿计算配置钢筋。
- 2 在环形悬臂中,应沿悬臂设置垂直楔形缝,缝的宽度为 20~25mm,缝的间距宜为 1m 左右。
- 3 在环形悬臂处和筒壁顶部加厚区段内,筒壁外侧环向钢筋应适当加密,一般宜比非

加厚区段增加一倍配筋。

4 当环形悬臂挑出较长或荷载较大时，宜在悬臂上下各 2m 范围内，对筒壁内外侧竖向钢筋及环向钢筋适当加密，一般宜比非加厚区段增加一倍配筋。

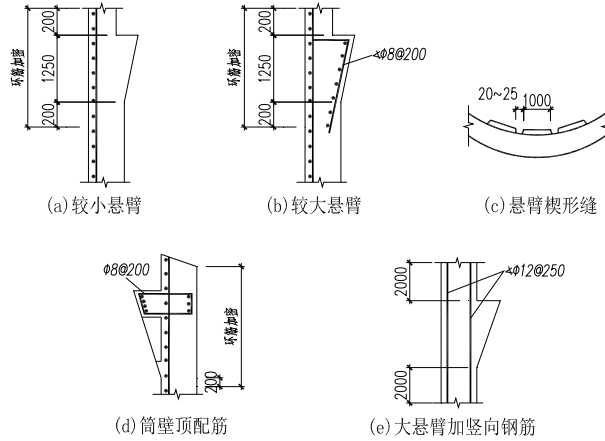


图 7.5.7 悬臂及筒顶配筋(单位: mm)

7.5.8 筒壁上设有孔洞时，应符合下列规定：

- 1 在同一水平截面内有两个孔洞时，宜对称设置；
- 2 孔洞对应的圆心角不应超过 70° 。在同一水平截面内总的开孔圆心角不得超过 140° ；
- 3 同一水平截面内有两个孔洞时，孔洞之间的最小筒壁宽度不应小于筒壁厚度的 3 倍，且不应小于两相邻孔洞宽度之和的 0.25 倍；
- 4 孔洞处截面筒壁最小厚度应满足表 7.5.8 的规定：

表 7.5.8 孔洞处截面筒壁最小厚度

洞口范围筒壁厚度 (mm)	高度范围 (mm)
H/24	洞口及洞口上下各 0.5H 高度范围

注：H 为洞口高度 (mm)。

- 5 孔洞宜设计成圆形。矩形孔洞的转角宜设计成弧形 (图 7.5.8)；
- 6 孔洞周围应配补强钢筋，并宜布置在孔洞边缘 3 倍筒壁厚度范围内，其截面面积一般宜为同方向被切断钢筋截面面积的 1.3 倍。其中环向补强钢筋的一半应贯通整个环形截面。补强钢筋通过 U 型拉结筋固定，并置于在拉结筋内侧。矩形孔洞转角处应配置与水平方向成 45° 角的斜向钢筋，每个转角处的钢筋，按筒壁厚度每 100mm 不应小于 250mm^2 ，且不少于两根。

所有补强钢筋伸过洞口边缘的长度：抗震设防地区的重点设防类烟囱为 47d，标准设防

类烟囱为 45d；非抗震设防地区为 40d（d 为钢筋直径）。

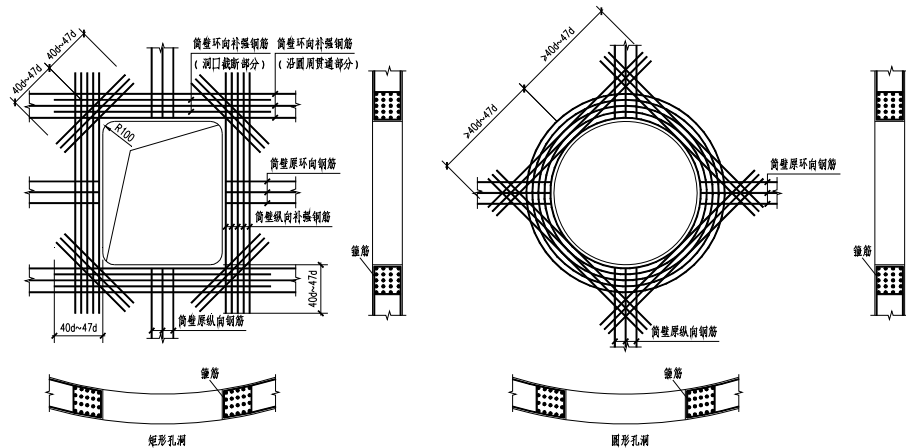


图 7.5.8 洞口加固筋(单位: mm)

7.5.9 套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱承重平台的大梁和吊装平台的大梁, 应支承在外筒筒壁内侧。筒壁预留孔洞的尺寸, 应满足大梁安装就位要求, 此处筒壁厚度应适当增大。大梁对筒壁产生的偏心距应尽量减小, 大梁支承点处应有支承垫板并配置局部承压钢筋网片。施工完毕后, 应将筒壁孔洞用混凝土封闭。

7.5.10 套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱当采用钢内筒时, 外筒底部应预留吊装钢内筒的安装孔。如选择在外筒外部焊接成筒的施工方案时, 安装孔宽度应大于钢内筒外径 0.5m~1.0m, 孔的高度应根据施工方法确定。吊装完成后, 应用砖砌体将安装孔封闭, 并在其中开设一个检修大门。

7.5.11 套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱的外筒应在下部第一层平台上部 1.5m 处, 开设 4~8 个进风口。进风口的总面积约为外筒内表面与内筒外表面所包围的水平面积的 5% 左右。在顶层平台下设 4~8 个出风口, 其面积略小于进风口面积。

7.6 钢筋工程施工

7.6.1 钢筋的端头、接头应符合本标准 6.10.1 条的有关规定。

7.6.2 竖向钢筋应沿筒壁圆周均匀布置, 在施工平台辐射梁分布处, 钢筋间距可适当增大。环向钢筋应配置在竖向钢筋的外侧。

7.6.3 筒壁半径、高度变化时, 竖向钢筋的直径或根数应按设计要求调整, 调整后的钢筋间距不得大于设计要求, 并应在筒壁的全圆周内均匀布置。

7.6.4 高出模板的竖向钢筋应临时固定。每层混凝土浇筑后, 在其上面至少应有一道绑扎好的环向钢筋。

7.6.5 滑动模板支承杆的长度宜为 3m~5m。第一批插入的支承杆应有四种以上的不同长度,

相邻高差不得小于支承杆直径的 20 倍。

7.6.6 滑动模板支承杆的接头应连接牢固，支承杆应与筒壁的环向钢筋间隔点焊。环向钢筋的接头应焊接。

7.6.7 在滑升过程中应检查支承杆是否倾斜。当支承杆有失稳或被千斤顶带起时，应及时进行处理。

7.6.8 穿过较高的烟道口、采光窗及模板滑空时，除应加固支承杆外，还应采取其他的稳定措施。

7.6.9 当采用滑动模板工艺施工时，可利用支承杆等强度代替结构的受力钢筋，接头强度应符合现行国家标准《滑动模板工程技术规范》GB50113 的规定

7.7 模板工程施工

7.7.1 模板及其支撑结构必须满足承载能力、刚度和稳定性的要求。

7.7.2 滑动模板在滑升中出现扭转时，应及时纠正，其环向扭转值，应按筒壁外表面的弧长计算，在任意 10m 高度内不得超过 100mm，全高范围不得超过 500mm。

7.7.3 滑动模板中心偏移时，应及时、逐渐地进行纠正。当利用工作台的倾斜度来纠正中心偏移时，其倾斜度宜控制在 1% 以内。

7.7.4 采用电动（液压）提模工艺安装模板时，内外模板应设置对拉螺杆，对拉螺杆的间距、规格、位置应经计算确定。上下层模板宜采用承插方式连接，模板上口应设置对撑。内外均应设置收分模板，外模板应捆紧，缝隙应堵严，内模板应支顶牢固。

7.7.5 采用电动（液压）提模工艺施工时，平台系统应每提升一次检查一次中心偏移。

7.8 混凝土工程施工

7.8.1 筒壁混凝土宜选用同一生产厂家、同一品种、同一强度等级的普通硅酸盐水泥。每立方米混凝土最大水泥用量不得超过 450kg，水胶比不宜大于 0.5，混凝土宜掺用减水剂。

7.8.2 用于改善混凝土性能所采用的掺和料、外加剂等，应符合国家现行标准《粉煤灰矽应用技术规范》GBJ146 和《混凝土减水剂质量标准和试验方法》JGJ56 的有关规定。同时严禁掺加含氯盐的外加剂。

7.8.3 混凝土粗骨料的粒径，不应超过筒壁厚度的 1/5 和钢筋净距的 3/4，最大粒径不应超过 60mm；泵送混凝土时最大粒径不应超过 40mm。宜选用连续级配的粗骨料。

7.8.4 单筒式烟囱筒壁顶部 10m 高度范围内和采用双滑或内砌外滑方法施工的环形悬臂，不宜采用石灰岩作粗骨料。

7.8.5 采用滑模工艺施工时，浇筑混凝土应沿筒壁圆周均匀地分层进行，每层厚度宜为250mm~300mm；在浇筑上层混凝土时，应对称地变换浇筑方向。

采用电动（液压）提模工艺浇筑混凝土时，可从一点开始沿环向向两个方向连续浇筑至闭合。相邻两节筒壁的混凝土起始浇筑点应错开 1/4 圆周长度。

7.8.6 采用滑模工艺施工时，用于振捣混凝土的振动棒不得触动支承杆、钢筋和模板。振动棒的插入深度不应超过前一层混凝土内 50mm。在提升模板时，不得振捣混凝土。

7.8.7 筒壁施工时应减少施工缝。对施工缝的处理，应先清除松动的石子，冲洗干净并浇水充分润湿，再铺 20mm~30mm 厚的与混凝土内浆体成分相同的水泥砂浆层，然后继续浇筑上层混凝土。当混凝土和钢筋被油污染时，应清理干净。

7.8.8 采用双滑施工方法时，应采取保证筒壁和内衬厚度的措施，并应防止筒壁混凝土与内衬混凝土相互渗透和混淆。

7.8.9 烟囱筒壁的混凝土取样和试件留置应符合国家现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 和《建筑工程冬期施工规程》JGJ104 的有关规定。当需检验其他龄期的强度或当原材料、配合比变更时，则应另留置混凝土试块。混凝土试块的制作、养护和检验应有专人负责。施工时应留置同条件的试块。

7.8.10 筒壁混凝土的养护可采用养护液。

7.9 混凝土筒壁施工质量检验

7.9.1 钢筋混凝土烟囱筒壁应每 10m 划分为一个检验批。

7.9.2 钢筋混凝土烟囱筒壁模板安装质量标准及检验方法应符合表 6.5.2 的规定。一般项目抽查数量均不应少于 10 处。

表 7.9.2 钢筋混凝土烟囱筒壁模板安装质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	模板的外观质量	应四角方正、板面平整，无卷边、翘曲、孔洞及毛刺等	-	观察检查
	2	钢模板几何尺寸	应符合《组合钢模板技术规范》GB50214 的要求	-	尺量检查
	3	烟囱中心引测点与基准点的偏差	5	mm	激光经纬仪或吊线锤
	4	任何截面上的半径	±20		尺量检查
一般项目	1	模板内部清理	干净无杂物	-	观察检查
	2	模板与混凝土接触面	无粘浆、隔离剂涂刷均匀	-	观察检查
	3	内外模板半径差	10	mm	尺量检查
	4	相邻模板高低差	3		直尺和楔形塞尺检查

	5	同层模板上口标高差	20		水准仪和尺量检查	
	6	预留洞口起拱度(L≥4m)	应符合设计要求或全跨长的1%~3%		尺量检查	
	7	围圈安装的水平度	1%		水平直尺	
	8	预留孔洞、烟道口	中心线		10	经纬仪和尺量检查
			标高		±15	水准仪和尺量检查
			截面尺寸		+15 0	尺量检查
	9	预埋铁件中心	10		水准仪和尺量检查	
	10	预埋暗榫中心	20		经纬仪和尺量检查	
	11	预埋螺栓中心	3		经纬仪和尺量检查	
	12	预埋螺栓外露长度	+20 0		尺量检查	

7.9.3 钢筋混凝土烟囱筒壁钢筋安装质量标准及检验方法应符合表 7.9.3 的规定。一般项目检查数量均不应少于 10 处。

表 7.9.3 钢筋混凝土烟囱筒壁钢筋安装质量标准及检验方法

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	钢筋的品种、级别、规格、数量和质量	应符合设计要求和国家现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的规定	-	检查质量合格证明文件、标识及检验报告
	2	竖向受力钢筋的连接方式	应符合设计要求	-	观察
	3	钢筋焊接质量	应符合国家现行标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 的规定	-	检查外观及接头力学性能试验报告
	4	接头试件	应作力学性能检验，其质量应符合国家现行标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ18 和《钢筋机械连接通用技术规程》JGJ107 的规定	-	检查接头力学性能试验报告
一般项目	1	钢筋表面质量	应平直、洁净，不应有损伤、油渍、漆污、片状老锈和麻点，不应有变形	-	观察
	2	钢筋机械连接或焊接接头位置	接头应相互错开；在同一连接区段内接头的根数不应多于钢筋总数的 50%。	-	观察，钢尺检查
	3	钢筋绑扎搭接接头位置	相邻受力钢筋的绑扎搭接接头应相互错开。在同一连接区段内绑扎接头的根数不应多于钢筋总数的 25%，搭接长度应符合设计和国家现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的规定	-	观察，钢尺检查
	4	钢筋间距	±20	mm	尺量检查，抽查数量不少于 10 处
	5	钢筋保护层	+10 -5		

	6	预留插筋	中心位移	10		
			外露长度	+30 0		

7.9.4 钢筋混凝土烟囱筒壁混凝土质量标准及检验方法应符合表 7.9.4 的规定。一般项目检查数量均不应少于 10 处。

表 7.9.4 钢筋混凝土烟囱筒壁混凝土质量标准及检验方法

类别	序号	项 目		质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	混凝土组成材料的品种、规格和质量		应符合设计要求和国家现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的规定	-	检查合格证和检验报告
	2	混凝土配合比及组成材料计量偏差		应符合国家现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的规定	-	检查混凝土搅拌记录
	3	混凝土强度评定和试块组数		应符合国家现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的规定	-	检查试验记录
一般项目	1	混凝土外观质量	露筋、蜂窝、拉裂、明显凹痕	不应有露筋、蜂窝、拉裂和明显凹痕	-	观察
	2	轴线位移		3	mm	经纬仪和尺量检查
	3	表面平整度		5		尺量检查
	4	相邻两板面高低差		3		靠尺和楔形塞尺检查
	5	筒壁厚度偏差		±20		尺量检查
	6	任何截面上的半径		±25		尺量检查
	7	筒壁内外表面局部凹凸不平（沿半径方向）		25		尺量检查
	8	预埋暗樁中心		20		经纬仪和尺量检查
	9	预埋螺栓中心		3		经纬仪和尺量检查
	10	预埋螺栓外露长度		+20 0		尺量检查
	11	筒壁的扭转（滑模）	10m	100		经纬仪和尺量检查，测量筒壁外表面的弧长
			全高程内	500		
	12	预留洞口、烟道口	中心线	15		经纬仪和尺量检查
			标高	±20		水准仪检查
截面尺寸			±20	尺量检查		
13	筒壁高度偏差		±0.1%（筒身全高）	尺量、仪器检查		
14	筒身中心线的垂直度偏差	高度 20m	25	仪器、线锤及尺量检查		
		高度 40m	35			
		高度 60m	45			
		高度 80m	55			
		高度 100m	60			
		高度 120m	65			
		高度 150m	75			

			高度 180m	85		
			高度 210m	95		
			高度 240m	105		
			高度 270m	115		
			高度 300m	125		

注：1 允许偏差值指一座烟囱在不同标高的允许偏差。

2 中间值用插入法计算。

3 烟囱中心线的测定工作，应在风荷和日照温差较小的情况下进行。

8 钢内筒与砖内筒

8.1 一般规定

8.1.1 钢内筒与砖内筒烟囱的钢筋混凝土外筒应符合本标准第7章的规定。

8.1.2 多管式烟囱的排烟筒与外筒壁之间的净间距以及排烟筒之间的净间距不宜小于750mm。其排烟筒高出钢筋混凝土外筒的高度不宜小于排烟筒直径，且不宜小于3m。

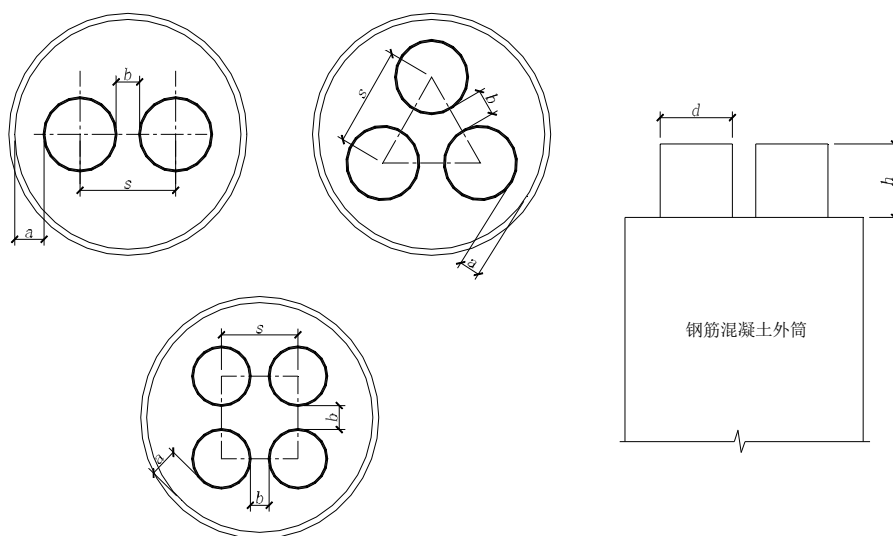


图 8.1.2 多管式烟囱布置图

a—排烟筒与外筒壁之间的净间距；b—排烟筒之间的净间距

8.1.3 套筒式烟囱的排烟筒与外筒壁之间的净间距 a 不宜小于 1000mm。其排烟筒高出钢筋混凝土外筒的高度 h 宜在 2 倍的内外筒净间距 a 至一倍钢内筒直径范围内。

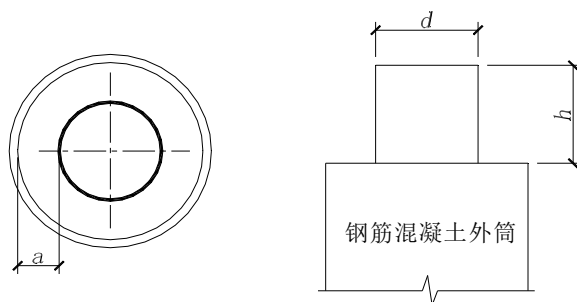


图 8.1.3 套筒式烟囱布置图

8.1.4 排烟筒可依据实际情况，选择砖砌体结构、钢结构或纤维增强塑料结构。

8.1.5 结构平台应根据排烟内筒的结构特性，并宜结合横向止晃装置、施工方案及运行条件设置。

8.1.6 钢梯宜设置在钢筋混凝土外筒内部。当运行维护需要时，可设置电梯。

8.1.7 套筒式和多管式烟囱应进行下列计算或验算：

- 1 承重外筒应进行水平截面承载能力极限状态计算和水平裂缝宽度验算。除不考虑温

度应力及温度对材料强度的影响外，其他均应按本标准第七章有关公式进行计算。

2 排烟筒的计算

- 1) 分段支撑的砖内筒，应进行受热温度和环箍或环筋计算；
- 2) 自立式砖砌内筒，除进行受热温度和环箍或环筋计算外，在抗震设防地区还应进行地震作用下的抗震承载力验算和顶部最大水平位移计算；
- 3) 自立式钢内筒应进行强度、整体稳定、局部稳定和洞口补强计算；
- 4) 悬挂式钢内筒应进行整体强度、局部强度和悬挂结点强度计算。

8.2 计算规定

8.2.1 在风荷载或地震作用下，外筒计算可不考虑内筒抗弯刚度的影响。

8.2.2 钢内筒的极限承载能力计算，除应考虑自重荷载、烟气温度作用外，还应考虑外筒在承受风荷载、地震作用、附加弯矩、烟道水平推力及施工安装和检修荷载对它的影响。腐蚀厚度裕度不计入计算截面的有效截面面积。

8.2.3 内筒外层表面温度应不大于 50℃。

8.2.4 顶部平台以上部分钢内筒的风压脉动系数、风振系数可近似按外筒顶部标高处的数值采用。

8.3 自立式钢内筒

8.3.1 钢内筒和钢筋混凝土外筒的基本自振周期宜满足下式：

$$\left| \frac{(T_c - T_s)}{T_c} \right| \geq 0.2 \quad (8.3.1)$$

式中 T_c ——钢筋混凝土外筒的基本自振周期 (s)；

T_s ——钢内筒的基本自振周期 (s)。

8.3.2 钢内筒长细比应满足下式要求：

$$\frac{l_0}{i} \leq 80 \quad (8.3.2)$$

式中 l_0 ——钢内筒相邻横向支承点间距 (m)；

i ——钢内筒截面回转半径，对圆环形截面，取 $i = 0.707r$ (r 为环形截面的平均半径) (m)。

8.3.3 钢内筒基本自振周期可按下面近似公式计算:

$$T_s = \alpha_t \sqrt{\frac{G_0 \times l_{max}^4}{9.81E \times I}} \quad (8.3.3)$$

式中 T_s ——钢内筒基本自振周期 (s);

α_t ——特征系数, 根据该段钢内筒支承条件按下列情况取值:

当二端铰接支承: $\alpha_t = 0.637$; 当一端固定、一端铰: $\alpha_t = 0.408$; 当二端固定
支承: $\alpha_t = 0.281$; 当一端固定、一端自由: $\alpha_t = 1.786$ 。

I ——截面惯性矩 (m^4)。计算时, 不考虑截面开孔影响。当钢内筒内设有半刚性喷涂保护层时, 其刚度影响不考虑。当钢板预留有腐蚀厚度裕度时, 应对包括腐蚀裕度时钢内筒截面刚度及不计腐蚀裕度时钢内筒截面刚度分别计算;

G_0 ——钢内筒单位长度重量 (N/m), 包括保温、防护层等所有结构的自重;

l_{max} ——钢内筒相邻横向支承点最大间距 (m);

E ——钢材的弹性模量 (N/m²)。

8.3.4 钢内筒可根据止晃装置处位移, 按连续杆件计算钢内筒内力。

8.3.5 钢内筒水平截面抗压强度应符合下列公式要求:

$$\gamma_0 \left(\frac{N_i}{A_{ni}} + \frac{M_i}{W_{ni}} \right) \leq \begin{cases} f_t \\ \sigma_{crt} \end{cases} \quad (8.3.5)$$

式中 M_i ——钢烟囱水平计算截面 i 的最大弯矩设计值(包括风弯矩和水平地震作用弯矩以及温度不均匀分布弯矩)(N·mm);

N_i ——与 M_i 相应轴向压力设计值 (包括结构自重和竖向地震作用) (N);

A_{ni} ——计算截面处的净截面面积 (mm^2);

W_{ni} ——计算截面处的净截面抵抗矩 (mm^3);

f_t ——温度作用下钢材抗拉、抗压强度设计值 (N/mm²), 按本标准 4.3.6 条进行计算;

γ_0 ——烟囱重要性系数, 按本标准 3.1.3 条选取;

σ_{crt} ——钢内筒局部稳定临界应力(N/mm²), 按本标准 (10.3.3-3) 公式计算。

8.3.6 止晃装置计算

1 自立式和悬挂式钢内筒, 内筒与外筒之间的止晃装置承受的力, 应根据内外筒变形协调计算。

2 当钢内筒采用刚性止晃装置, 沿圆周方向 4 点均匀设置时, 钢内筒支承环的弯矩、环向轴力及沿内筒半径方向的剪力, 可按下列公式计算:

$$M_{\max} = F_k (0.015r + 0.25a) \quad (8.3.6-1)$$

$$V_{\max} = F_k (0.12 + 0.32 \frac{a}{r}) \quad (8.3.6-2)$$

当 $a/r \leq 0.656$ 时
$$N_{\max} = \frac{F_k}{4} \quad (8.3.6-3)$$

当 $a/r > 0.656$ 时
$$N_{\max} = F_k (0.04 + 0.32 \frac{a}{r}) \quad (8.3.6-4)$$

式中 M_{\max} —— 支承环的最大弯矩设计值(kN·m);

V_{\max} —— 支承环沿半径方向的最大剪力设计值(kN);

N_{\max} —— 支承环沿圆周方向的最大拉力设计值(kN);

F_k —— 外筒在 k 层止晃装置处, 传给每一个内筒的最大水平力设计值(kN), 可根据变形协调求得;

r —— 钢内筒半径(m);

a —— 支承点的偏心距离(m)。

注: 对需要进行抗震验算的烟囱, 公式(8.3.6-1)还应以 F_{Ek} 代替 F_k 进行验算。

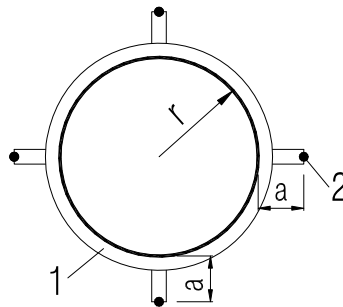


图 8.3.6 支承环受力
1-支承环 2-支撑点

8.3.7 钢内筒环向加强环的截面积和截面惯性矩应按下列公式计算:

1 正常运行情况下:

$$A \geq \frac{2\beta_t l r}{f_t} p_g \quad (8.3.7-1)$$

$$I \geq \frac{2\beta_t l r^3}{3E} p_g \quad (8.3.7-2)$$

2 非正常运行情况下:

$$A \geq \frac{1.5\beta_t l r}{f_t} p_g^{\text{AT}} \quad (8.3.7-3)$$

$$I \geq \frac{1.5\beta_t l r^3}{3E} p_g^{\text{AT}} \quad (8.3.7-4)$$

式中： A ——环向加强环截面积(m^2)；

I ——环向加强环截面惯性矩(m^4)；

l ——钢内筒加劲肋间距(m)；

β_t ——动力系数，取2.0；

p_g ——正常运行情况下的烟气压力 (kN/m^2) (按本标准第5章规定计算)；

p_g^{AT} ——非正常运行情况下的烟气压力 (kN/m^2) (根据非正常烟气温度按本标准第5章规定计算)。

8.3.8 钢内筒环向加强环 (图 8.3.8) 截面特性计算中，应计入钢内筒钢板有效高度 h_e ，并按下式计算：

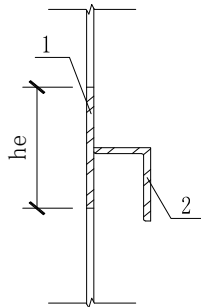


图8.3.8 加强环截面

1-钢内筒钢板有效高度 2-加劲肋

$$h_e = 1.56 \sqrt{rt} \quad (8.3.8)$$

式中 h_e ——钢内筒钢板有效高度 (m)；

r ——钢内筒半径 (m)；

t ——钢内筒钢板厚度 (m)。

计入的筒壁面积不大于加劲肋截面积，且加劲肋最小截面尺寸应满足表 8.6.2 要求。

8.4 悬挂式钢内筒

8.4.1 悬挂式钢内筒可采用整体悬挂和分段悬挂结构方式；也可采用中上部分悬挂、底部自立的组合结构方式。当采用分段悬挂式时，分段数不宜过多；各悬挂筒体的长细比受压段不宜超过 80，受拉段不宜超过 120。

8.4.2 悬挂段钢内筒的水平地震作用，可只考虑在水平地震作用下钢筋混凝土外筒壁传给悬挂段钢内筒的作用效应。悬挂平台和悬挂段钢内筒的竖向地震作用可按本标准第五章的规定计算。

8.4.3 悬挂段钢内筒设计强度应满足下式要求：

$$\gamma_0 \left(\frac{N_i}{A_{ni}} + \frac{M_i}{W_{ni}} \right) \leq \gamma_t (f_t)^\beta \quad (8.4.3)$$

式中 M_i ——钢烟囱水平计算截面 i 的最大弯矩设计值(包括风弯矩和水平地震作用弯矩以及温度不均匀分布弯矩)(N·mm)；

N_i ——与 M_i 相应轴向压力或轴向拉力设计值（包括结构自重和竖向地震作用）(N)；

A_{ni} ——计算截面处的净截面面积 (mm²)；

W_{ni} ——计算截面处的净截面抵抗矩 (mm³)；

f_t ——温度作用下钢材抗拉、抗压强度设计值 (N/mm²)，按本标准 4.3.5 及 4.3.6 条进行计算；

γ_0 ——烟囱重要性系数，按本标准 3.1.3 条选取；

β ——连接节点效率系数。对接焊缝，进行超声波检测时，取 $\beta = 0.85$ ；仅做外观检查时，取 $\beta = 0.7$ ；

γ_t ——悬挂段钢内筒抗拉强度设计值调整系数：对于偶然设计状况， γ_t 可取 1.1；

其他设计状况， γ_t 可取 1.0。

8.5 砖内筒

8.5.1 砖内筒在满足强度、稳定和变形的条件下，宜优先采用整体自承重结构形式。当烟囱高度超过 60m 或采用整体自承重形式不经济时，可采用分段支承形式。

8.5.2 砖内筒的材质选择及防腐蚀设计应符合本标准第 12 章的有关规定。

8.5.3 砖内筒应符合下列规定：

1 砖内筒采用分段支承时，支承平台间距应根据砖内筒的强度和稳定性等综合因素确定。套筒式砖内筒可采用由承重环梁、钢支柱、平台钢梁、平台剪力撑和平台钢格栅板组成的斜撑式支承平台支承。

2 分段支承的砖内筒，其下部的积灰平台可采用钢筋混凝土结构。

3 套筒式砖内筒烟囱的钢筋混凝土外筒和砖内筒在烟囱顶部可采用盖板进行封闭，盖板与外筒壁的连接应安全可靠，同时保证内筒温度变化时自由变形。多管式砖内筒烟囱应设置顶部封闭平台。

8.5.4 采用分段支承的砖内筒，在支承平台处的搭接接头，应满足砖内筒纵向和环向温度变形要求。

8.5.5 烟囱的钢筋混凝土外筒壁与排烟筒之间，应按照检修维护的要求设置检修维护平台及竖向楼梯。套筒式砖内筒烟囱可在钢筋混凝土外筒的上部外侧设置直爬梯通至烟囱筒顶，多管式砖内筒烟囱应在内部设置直爬梯通至烟囱筒顶。

8.6 设计构造

8.6.1 内筒构造

1 烟道与内筒相交处，应在内筒上设置烟气导流板。

2 钢内筒（烟道入口以上区段）应设隔热层。隔热层宜选择无碱超细玻璃棉或泡沫玻璃棉（厚度由计算决定），外包加丝铝箔。

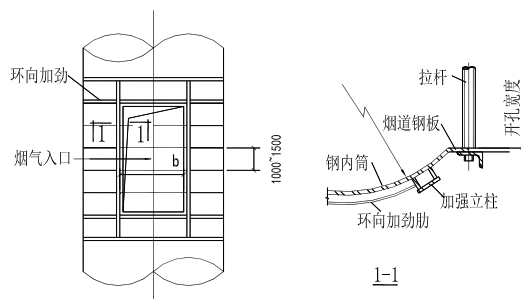


图 8.6.1-1 洞口加劲布置和节点(单位：mm)

b—洞口宽度

3 钢内筒与水平烟道接口处，内筒应增加竖向和环向加劲肋（角钢或槽钢），环向加

劲肋间距以 1.5m 为宜。洞口边缘设加强立柱；必要时可与外筒之间增设支撑（图 8.6.1-1）。

4 钢内筒宜全高设置环向加劲肋。其间距一般可采用一倍钢内筒直径，最大间距为 1.5 倍钢内筒直径，且不大于 7.5m。每个环所要求的最小截面按本标准 8.3.7 条计算确定，并不应小于表 8.6.1 规定数值。

表 8.6.1 钢烟囱加劲肋最小截面尺寸

钢烟囱直径 d (m)	最小加劲角钢
$d \leq 4.50$	$\angle 75 \times 75 \times 6$
$4.50 < d \leq 6.00$	$\angle 100 \times 80 \times 6$
$6.00 < d \leq 7.50$	$\angle 125 \times 80 \times 8$
$7.50 < d \leq 9.00$	$\angle 140 \times 90 \times 10$
$9.00 < d \leq 10.50$	$\angle 160 \times 100 \times 10$

5 环向加劲肋通常采用等肢或不等肢角钢、T 型钢制作，翼板向外，与钢内筒可用连续焊缝或间断焊缝焊接。

6 自立式内筒应在根部设置一个检查人孔。

7 钢内筒的筒壁顶部构造，可按图 8.6.1-2 处理。

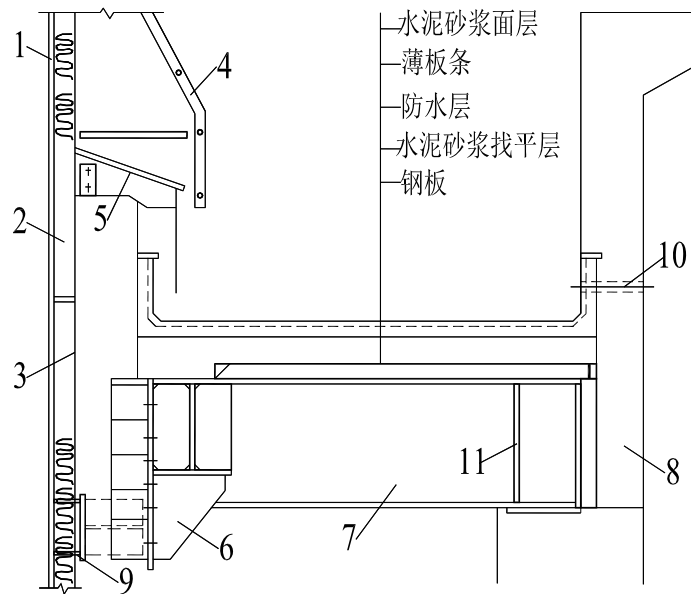


图 8.6.1-2 烟囱顶部构造

- 1-钢内筒 2-隔热层 3-外包不锈钢 4-直梯
 5-防雨通风帽 6-支撑点 7-信号平台梁
 8-外筒 9-加强支承环 10-溢水管 11-加劲肋

8.6.2 钢平台构造应符合下列要求：

1 钢平台的计算与构造均按国家标准《钢结构设计规范》(GB50017) 的规定执行。受到烟气温度的影响时，还应考虑由于温度作用造成钢材强度的降低。

2 钢平台易受到烟气冷凝酸腐蚀的部位，应局部做隔离防腐措施。

3 各层平台应设置吊物孔。吊物孔尺寸及吊物时承受的重力,应根据安装、检修方案确定(平台下是否安装永久性单轨吊,应根据是否需要而定)。

4 各层平台应设置照明和通讯设施。上层照明开关应设在下层平台上。

5 各层平台的通道宽度不应小于 750mm,洞口周圈应设栏杆和踢脚板。与排烟筒相接触的孔洞,应留有一定空隙。

8.6.3 止晃装置应符合下列要求:

1 采用钢内筒时,应设置止晃装置。

2 止晃装置可采用刚性的,也可采用柔性的。当采用刚性止晃装置时,宜利用平台为约束构件。一般每隔一层平台设置一道。止晃装置对内筒仅起水平弹性约束作用,不应约束钢内筒由于烟气温度作用而产生的竖向和水平方向的温度变形。

3 止晃装置处内筒的加强环,可按图 8.6.3 进行加强。

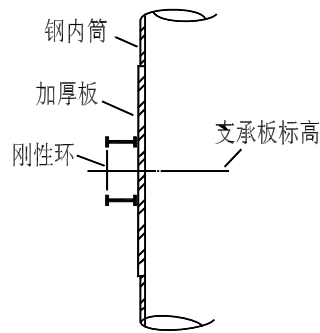


图 8.6.3 内筒加强环

8.6.4 悬挂钢内筒的悬挂平台与下部相邻的横向约束平台间距不宜小于 15m。最下层横向约束平台与膨胀伸缩节间的钢内筒悬壁长度不宜大于 25m。

8.6.5 砖内筒结构砖砌体的厚度不宜小于 200 mm,砖内筒外表面设置的封闭层厚度不宜小于 30 mm,封闭层外表面按照计算设置的隔热层厚度不宜小于 60 mm。

8.6.6 砖内筒的砖砌体内可不配置竖向钢筋,但需按计算和构造要求配制环向钢筋或在外表面设置环向钢箍,环向钢箍的最小尺寸不小于 60mm×6 mm(宽×厚),沿高度方向间距不宜超过 1000 mm。

8.6.7 钢筋混凝土承重环梁宜采用现场浇筑。斜撑式支承平台的钢筋混凝土承重环梁可采用分段预制,环梁分段长度宜在 3m 左右,钢梁最小环向间距宜采用 750 mm~1400 mm,钢支柱最小环向间距宜与环梁分段长度相匹配,宜采用 1500 mm~2800 mm。

8.6.8 多管式砖内筒烟囱分段支承平台的混凝土板厚不宜小于 150 mm。

8.7 制作

- 8.7.1 钢内筒制作宜在工厂内进行，当在现场施工时，应采取防雨和防风措施。
- 8.7.2 钢内筒制作、运输过程中，应采取防止变形的措施，并应保证预拼装或安装质量。
- 8.7.3 钢烟囱加工制作应符合本标准表 8.10.2、表 8.10.4 的要求。尺寸满足运输要求的钢内筒，宜采取分段工厂预制工艺加工制作。
- 8.7.4 钢内筒的基准线、点等标记应清晰准确。
- 8.7.5 钢内筒预拼装应做好标志和记录。

8.8 焊接

- 8.8.1 从事钢内筒焊接作业的焊工必须经考试合格并取得合格证书。持证焊工必须在其考试合格项目及其认可范围内施焊。
- 8.8.2 设计要求全焊透的一、二级焊缝应采用超声波探伤进行内部缺陷的检验，超声波探伤不能对缺陷做出判断时，应采用射线探伤，其内部缺陷分级及探伤方法应符合国家现行标准《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级法》GB11345 或《钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级》GB3323 的有关规定。一、二级焊缝的质量等级及缺陷分级应符合表 8.8.2 的规定。

表 8.8.2 一、二级焊缝的质量等级及缺陷分级

焊缝质量等级		一级	二级
内部缺陷 超声波探伤	评定等级	II	III
	检验等级	B 级	B 级
	探伤比例	100%	20%
内部缺陷 射线探伤	评定等级	II	III
	检验等级	AB 级	AB 级
	探伤比例	100%	20%

8.8.3 探伤比例应按下列原则确定：

1 对工厂焊缝，应按每条焊缝计算百分比，且探伤长度不应小于 200mm，当焊缝长度不足 200mm 时，应对整条焊缝进行探伤；

2 对现场安装焊缝，应按同一类型、同一施焊条件的焊缝条数计算百分比，探伤长度不应小于 200mm，且不应少于 1 条焊缝。

8.8.4 采用钛复合板的钢筒焊接应符合下列规定：

1 钛复合板宜选用定尺材料，坡口形式和尺寸应根据设计图纸选用；

2 钛材焊接前应根据国家现行标准《钛制焊接容器》JB/T4745 的有关规定进行焊接工艺评定；

3 焊丝应符合国家现行标准《钛制焊接容器》JB/T4745 的有关规定；

4 钛钢复合板复层除筒体对接的焊缝外其他部位不得进行焊接工作。复合板基层焊接时，应采取保护复层的措施；

- 5 钛钢复合板基层进行焊接工作应控制层间温度；
- 6 钛钢复合板基层焊缝应采用超声波探伤进行内部缺陷的检验，焊缝质量等级应为二级；
- 7 钛钢复合板复层焊缝应采用液体渗透探伤进行表面缺陷的检验，检验比例应为 100%；
- 8 施焊后的钛焊缝和热影响区表面的颜色应为银白色。

8.9 安装

- 8.9.1 钢内筒安装应在基础轴线、标高、地脚螺栓、构件制作等检验合格后进行。
- 8.9.2 钢内筒采用起重机械吊装法安装时，起重吊装机械应有安全检验合格证件，起重吊装机械基础应符合设计文件规定的承载能力。
- 8.9.3 钢内筒采用液压顶升法或提升法安装时，单台液压顶升或提升设备应在额定压力下工作；多台顶升或提升设备同时工作时，应选用性能相同的设备，最大荷载应符合国家现行标准《重型结构和设备整体提升技术规范》GB51162 的有关规定。顶升或提升前，液压顶升或提升设备应按操作规程进行调试。
- 8.9.4 采用液压顶升法安装顶升时，应在筒体上设置导向止晃装置。
- 8.9.5 钢内筒采用气顶倒装法安装时，应计算逐节顶升时所需压力。气顶前，气顶设备应进行调试。
- 8.9.6 用于提升的钢绞线和钢丝绳应符合国家现行标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T5224 和《钢丝绳》GB8918 的有关规定。

8.10 施工质量验收

- 8.10.1 钢内筒可按结构制作或安装，应每 20m 高划分为一个检验批。
- 8.10.2 钢内筒零部件制作质量标准及检验方法应符合表 8.10.2 的规定。

表 8. 10. 2 钢内筒零部件制作质量标准及检验方法

类别	序号	项 目		质量标准/允许偏差	单位	检验方法	
主	1	钢材的品种、规格、性能等		应符合设计要求和国家现行有关材料标准的规定	-	检查出厂检验报告和标志	
	2	钢材切割面或剪切面		应无裂纹、夹渣、分层和大于 1mm 的缺棱	-	观察或用放大镜	
控 项 目	3	A、B 级	孔壁表面粗糙度	≤ 12.5	μm	用游标卡尺或孔径量规、粗糙度测量仪检查，抽查 10%，且不少于 3 处	
			孔径	10~18	+0.18 0.00		mm
				18~30	+0.21 0.00		
				30~50	+0.25 0.00		
		C 级	孔壁表面粗糙度	≤ 25	μm		
			直径	+1.0 0.0	mm		
圆度	≤ 2.0						
垂直度	不大于 0.03t, 且 $\leq 2.0mm$						
一 般 项 目	1	钢材的规格尺寸及允许偏差		应符合国家现行有关材料标准的规定	-	用游标卡尺检查，每种规格抽查数不少于 10 处	
	2	钢材的外观质量		应符合国家现行有关材料标准的规定	-	观察检查	
	3	气割	零件宽度、长度	± 3.0	mm	观察检查或使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查，抽查 10%，且不少于 3 处	
			切割面平面度	$0.05t$, 且 ≤ 2.0			
			割纹深度	≤ 0.3			
			局部缺口深度	≤ 1.0			
		机械 剪切	零件宽度、长度	± 3.0			
			边缘缺棱	≤ 1.0			
		型钢端部垂直度	≤ 2.0				
	4	矫正	钢板局部平整度	$t \leq 14$ $t > 14$		≤ 1.5 ≤ 1.0	观察检查和实测检查
			型钢弯曲矢高	不大于 $L/1000$, 且 ≤ 5.0			
			角钢肢垂直度	不大于 $b/100$, 且 $\leq 90^\circ$ (双肢栓接)			
		翼缘对腹板垂直度	槽钢	$\leq b/80$			
			工字钢、H 型钢	不大于 $b/100$, 且 ≤ 2.0			
	5	边缘加工	零件宽度、长度	± 1.0		观察检查和实测检查	
			加工边直线度	不大于 $L/3000$, 且 ≤ 2.0			
			相邻两边夹角	$\pm 6'$			-
			加工面垂直度	不大于 $0.025t$, 且 ≤ 0.5			mm
加工面表面粗糙度			50	μm			
6	螺栓孔距	一组内任意两孔间距离	≤ 500 501~1200	± 1.0 ± 1.2		mm	钢尺检查，抽查数不少于 10 处
		相邻两组的端孔间距离	≤ 500	± 1.2			
			501~1200	± 1.5			
			1201~3000	± 2.0			
			> 3000	± 3.0			

注：1、 b 为宽度或板的自由外伸宽度； t 为板的厚度； L 为构件的长度。

2、采用配对钻孔的零部件应做好配对标记，配对钻孔孔距偏差可不按上表要求。

8.10.3 钢内筒制作、安装焊接质量标准及检验方法应符合表 8.10.3 的规定。

表 8.10.3 钢内筒制作、安装焊接质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法	
主控项目	1	焊接材料的品种、规格、性能等	应符合设计要求和国家现行有关材料标准的规定	-	检查质量合格证明文件、中文标记及检验报告	
	2	焊工	必须经考试合格并取得合格证书且在其考试合格项目及其认可范围内施焊	-	检查焊工合格证书及其认可范围、有效期	
	3	设计要求全焊透的一、二级焊缝	探伤检验应符合国家现行有关标准的规定	-	检查探伤报告	
	4	焊缝质量等级及缺陷分级	应符合本标准第 8.10.2 条的规定	-	检查探伤报告	
	5	焊接材料与母材的匹配	应符合设计要求和国家现行标准《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ81 的规定	-	检查质量证明文件	
	6	首次采用的钢材、焊接材料、焊接方法、焊后热处理等	应进行焊接工艺评定，并根据评定报告确定焊接工艺	-	检查焊接工艺评定报告	
	7	焊缝表面质量	不得有裂纹、焊瘤等缺陷。一、二级焊缝不得有表面气孔、夹渣、弧坑裂纹、电弧擦伤等缺陷；且一级焊缝不得有咬边、未焊满、根部收缩等缺陷	-	观察检查或使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查，抽查 10%，且不少于 3 处	
	8	要求焊透的组合焊缝焊脚尺寸	+4 0	mm	观察检查，用焊缝量规测量，抽查数不少于 10 处	
一般项目	1	焊条外观质量	不应有药皮脱落、焊芯生锈等缺陷；焊剂不应受潮结块	-	观察检查	
		对于需要进行焊前预热或焊后热处理的焊缝	应符合国家现行有关标准规定或通过工艺试验确定	-	检查预、后热施工记录和工艺试验报告	
		凹形的角焊缝	焊出凹形的角焊缝应过渡平缓；加工成凹形的角焊缝，不得有切痕	-	观察检查，抽查 10%，且不少于 3 处	
		焊缝感观	外形均匀、成型较好，焊渣和飞溅物基本清除干净	-	观察检查	
	二、三级焊缝外观质量	未焊满	二级	$\leq 0.2+0.02t$ ，且 ≤ 1.0	mm	观察检查或使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查，抽查数不少于 10 处
			三级	$\leq 0.2+0.04t$ ，且 ≤ 2.0		
		根部收缩	二级	$\leq 0.2+0.02t$ ，且 ≤ 1.0		
			三级	$\leq 0.2+0.04t$ ，且 ≤ 2.0		
		咬边	二级	$\leq 0.05t$ ，且 ≤ 0.5 ，连续长度 ≤ 100.0		
			三级	$\leq 0.1t$ ，且 ≤ 1.0		
		弧坑裂纹	三级	允许存在个别长度 ≤ 5.0		
		电弧擦伤	三级	允许个别存在		
		接头不良	二级	缺口深度 $\leq 0.05t$ ，且 ≤ 0.5		
			三级	缺口深度 $\leq 0.1t$ ，且 ≤ 1.0		
	表面夹渣	三级	深度 $\leq 0.2t$ ，长 $\leq 0.5t$ ，且 ≤ 2.0			
表面气孔	三级	每 50.0mm 焊缝长度允许直径 0.4t，且 $\leq 3.0\text{mm}$ ，数量不多于 2 个，孔距 ≥ 6 倍孔径				
2	对接焊缝尺寸	B < 20	一级	+2.0 +0.5	焊缝量规检查，抽查数不少于 10 处	
			二级	+2.5 +0.5		
			三级	+3.5 +0.5		
	余 缝	B \geq 20	一级	+3.0 +0.5		

3	焊透组合焊缝尺寸	二级		+3.5		
			三级		+0.5 +3.5 0.0	
		焊缝错边	一级、二级		$\leq 0.1t$, 且 ≤ 2.0	
			三级		$\leq 0.15t$, 且 ≤ 3.0	
	焊脚尺寸	角焊缝余高	$h_f \leq 6$		+1.5 0.0	
			$h_f > 6$		+3.0 0.0	
		焊脚尺寸	$h_f \leq 6$		+1.5 0.0	
			$h_f > 6$		+3.0 0.0	

注：t 为板的厚度， h_f 为焊脚尺寸。

8.10.4 钢内筒组装质量标准及检验方法应符合表 8.10.4 的规定。

表 8.10.4 钢内筒组装质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法	
主控项目	1	外观表面	表面不应有焊疤、明显凹面，划痕应小于 0.5mm	-	观察检查	
	2	标记	基准线、点、标高及编号应完备、清楚	-	观察检查	
	3	椭圆形	筒直径 $D \leq 5m$	≤ 10	mm	钢尺检查，抽查数不少于 10 处
			筒直径 $D > 5m$	≤ 20		
	4	筒体几何缺陷等级	一级 二级	$W \leq 0.01l$ $W = 0.02l$		钢尺和塞尺检查
5	焊接		应符合本标准表 8.10.3 的规定	-	查看焊接验评表	
一般项目	1	外径周长偏差	+6 0	mm	钢尺检查	抽查数不少于 10 处
	2	对口错边	≤ 1		直尺和塞尺检查	
	3	两端面与轴线的垂直度	≤ 3		吊线和钢尺检查	
	4	相邻两节焊缝错开	≥ 300		钢尺检查	
	5	直线度	≤ 1		1 m 钢尺和塞尺检查	
	6	圆弧度	≤ 2		用 ≥ 1.5 弦长样板和塞尺检查	
	7	表面平整度	≤ 1.5		1 m 钢尺和塞尺检查	
	8	高度偏差	+H/2000, 且 $\leq +50$ -H/2000, 且 ≥ -50		钢尺检查	

注：1、H 为组装段的高度；

2、W 为缺陷值，l 为缺陷测量范围，见图 8.10.4；

3、筒体几何缺陷等级不允许超过二级，即任何情况下均应满足： $W \leq 0.02l$ 。

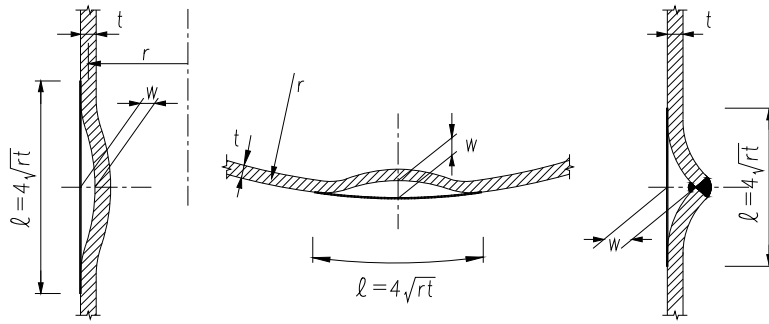


图 8.10.4 钢烟囱筒体几何缺陷示意

8.10.5 钢内筒安装质量标准及检验方法应符合表 8.10.5 的规定。

表 8.10.5 钢内筒安装质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单 位	检验方法	
主控项目	1	钢构件验收	应符合设计要求和国家现行标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 规定,无变形及涂层脱落	-	拉线、钢尺现场实测或观察检查	
	2	焊接	应符合本标准表 8.10.3 的规定	-	查看焊接检验表	
	3	椭圆度	筒直径 $D \leq 5m$ 筒直径 $D > 5m$	≤ 10 ≤ 20	mm	钢尺检查
一般项目	1	与支座环同心度	$D \leq 5m$ $D > 5m$	≤ 10 ≤ 20	mm	抽查数 不少于 10 处
	2	与支座环间隙	≤ 1.5	塞尺检查		
	3	相临两节焊缝错开	≥ 300	钢尺检查		
	4	对口错边	≤ 1	直尺和塞尺检查		
	5	止晃点标高	± 10	钢尺检查		
	6	中心偏差	不大于 $H/1000$, 且 ≤ 100	吊线, 用钢尺或全站仪检查		
	7	总高度	± 100	钢卷尺或测距仪检查		
	8	烟道口中心	≤ 15	经纬仪检查		
	9	烟道口标高	± 20	钢尺检查		
	10	烟道口高和宽	± 20	钢尺检查		

注: H 为钢烟囱和钢内筒的安装高度。

8.10.6 钢内筒施工高强度螺栓连接质量标准及检验方法应符合表 8.10.6 的规定。

表 8.10.6 高强度螺栓连接质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	检验方法
主控项目	1	高强度螺栓连接件的材质、品种、规格、性能	应符合现行国家产品标准和设计要求	检查产品的质量合格证明文件、中文标记及检验报告
	2	摩擦面的抗滑移系数和复验	应符合设计要求	检查摩擦面抗滑移系数试验报告和复验报告
	3	高强度大六角螺栓的连接副扭矩系数或扭剪型高强度螺栓连接副预拉力复验	应符合国家现行标准《钢结构高强度螺栓连接的设计施工及验收规程》JGJ82 的规定	检查复验报告
	4	终拧扭矩	应符合国家现行标准《钢结构高强度螺栓连接的设计施工及验收规程》JGJ82 的规定	扭矩法、转角法或观察检验，按节点数抽查 10%，且不少于 10 个；每个被抽查节点按螺栓数抽查 10%，且不少于 2 个
一般项目	1	螺母、螺栓、垫圈外观表面	应涂油保护，不应出现生锈和沾染脏物等现象，螺纹不应损伤	观察检查，全数检查
	2	高强度螺栓表面硬度试验	高强度螺栓不得有裂纹或损伤，表面硬度试验应符合国家现行标准《钢结构高强度螺栓连接的设计施工及验收规程》JGJ82 的规定	硬度计、10 倍放大镜或磁粉探伤
	3	高强度螺栓连接副的施拧顺序和初拧、复拧扭矩	应符合《钢结构高强度螺栓连接的设计施工及验收规程》JGJ82 的规定	检查扳手标定记录和螺栓施工记录
	4	摩擦面外观	应干燥、整洁，不应有飞边、毛刺、焊接飞溅物、焊疤、氧化铁皮等，且不得涂油漆（设计要求除外）	观察检查，全数检查
	5	连接外观质量	丝扣外露 2~3 扣，允许丝扣外露 1 扣或 4 扣数量不大于 10%	观察检查，按节点数抽查 5%，且不少于 10 个
	6	扩孔孔径	1.2d	观察及卡尺检查，全数检查

8.10.7 钢内筒防腐涂料工程质量标准及检验方法应符合表 8.10.7 的规定。

表 8.10.7 钢内筒防腐涂料工程质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	防腐涂料、稀释剂、固化剂材料品种、规格、性能等	应符合设计要求	-	检查出厂资料、合格证
	2	涂装前钢材表面除锈	应符合设计要求和现行国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB8923 的有关规定	-	铲刀、观察检查
	3	涂料、涂装遍数、厚度	应符合设计要求	-	采用漆膜测厚仪检查
	4	每遍涂层厚度偏差	≥-5	μm	
	5	涂层总厚度偏差 (设计无要求时)	室外 150 μm		
室内 125 μm			≥-25		
一般项目	1	防腐涂料的型号、名称、颜色及有效期	应与其质量证明文件相符	-	观察检查
	2	构件表面	不应漏涂、涂层应均匀，无脱皮、返锈且无明显皱皮、流坠、针眼和气泡等	-	观察检查
	3	涂层附着力测试	应符合国家现行标准《涂层附着力测定法（拉开法）》CB/T5210 的有关规定	-	划格检查
	4	构件的标志、标记、编号	应清晰完整	-	观察检查

9 纤维增强塑料内筒

9.1 一般规定

9.1.1 纤维增强塑料内筒应符合下列规定：

1 长期运行的烟气温度不得超过 100℃。当烟气超出上述运行条件时，可在烟囱前端采取冷却降温措施，或对选用的原材料和制成品的性能经试验验证后确定。

2 异常运行的烟气温度不得超过树脂玻璃化转变温度 T_g ，且持续时间不超过 30min。

9.1.2 纤维增强塑料内筒横向支承点间距（L）与内筒直径（D）的比值不宜大于 10。

9.1.3 纤维增强塑料内筒烟囱可根据设计、制作、安装的技术水平与条件选用悬挂式或自立式的内筒支承型式。

9.1.4 纤维增强塑料内筒的设计，应计入烟气运行的流速、温度、磨损及化学介质腐蚀等因素的影响。当烟气流速超过 30m/s 时，应在转弯以及突变部位的树脂中添加耐磨填料或采取其他技术措施。

9.1.5 平台活荷载与筒壁积灰荷载的取值应符合本标准第 5 章有关规定。

9.1.6 结构强度和承载力计算时，不应计入筒壁防腐蚀内衬层的厚度和外表面层厚度，但应计入其重量影响。

9.1.7 纤维增强塑料内筒设计使用年限宜为 30 年。

9.1.8 塔架式纤维增强塑料内筒挠度不应超过相应支撑跨度的 1/120。

9.1.9 纤维增强塑料内筒烟囱的钢筋混凝土外筒应符合本标准第 7 章的规定。

9.2 材料

9.2.1 纤维增强塑料内筒的基体材料应选用反应型阻燃环氧乙烯基酯树脂、反应型阻燃不饱和聚酯树脂。当有可靠经验和安全措施保证时，可选用其他类型的树脂。

9.2.2 树脂的质量指标应符合下列规定：

1 反应型阻燃环氧乙烯基酯树脂的质量应符合现行国家标准《乙烯基酯树脂防腐蚀工程技术规范》GB/T 50590 的有关规定；

2 反应型阻燃不饱和聚酯树脂的质量应符合现行国家标准《纤维增强用液体不饱和聚酯树脂》GB/T8237 的有关规定；

3 树脂浇铸体的主要性能宜符合表 9.2.2 的规定：

表 9.2.2 树脂浇铸体的主要性能

力学性能	耐蚀层树脂	结构层树脂
拉伸强度(MPa)	≥ 60.0	≥ 60.0
拉伸模量(GPa)	≥ 3.0	≥ 3.0

断裂延伸率 ε_r (%)	≥ 3.0	≥ 2.5
热变形温度 HDT ($^{\circ}\text{C}$, 1.8MPa)	Max[($T_d + 20$), 100]	
耐碱性 (10%NaOH, 100 $^{\circ}\text{C}$)	$\geq 100\text{h}$ 无异状	

注： 1 T_d ——正常烟气最高设计温度。

2 热变形温度 HDT 的测试应按 GB/T1634.2 要求, 试样平放测试。

9.2.3 树脂的许用应变值 ε_{ar} 应按下式计算, 且不应大于表 9.2.3 中的规定值:

$$\varepsilon_{ar} = 0.1 \times \varepsilon_r \quad (9.2.3)$$

式中: ε_{ar} ——树脂的许用应变值(%);

ε_r ——树脂浇铸体的断裂延伸率(%)。

表 9.2.3 不同种类树脂的允许应变值

树脂种类	允许应变值 (%)
乙烯基酯树脂	0.27
不饱和聚酯树脂	0.23

9.2.4 树脂应与选用的引发剂和促进剂匹配。

9.2.5 防腐蚀内层和结构层宜选用同类型的树脂。当选用不同类型的树脂时, 层间不得脱层, 要保证层间性能。

9.2.6 纤维增强塑料内筒的阻燃性能应符合下列规定:

- 1 树脂浇铸体的极限氧指数 (LOI) 不应小于 25
- 2 纤维增强塑料的极限氧指数 (LOI) 不应小于 32, 火焰传播速率不应大于 45。

9.2.7 纤维增强塑料内筒的耐腐蚀性能应满足烟气运行工况, 其评估方法可按现行国家标准《纤维增强塑料设备和管道工程技术规范》GB51160 执行。

9.2.8 纤维增强塑料内筒的增强材料应符合下列规定:

1 内衬层应由内表面层和次内层组成, 内表面层宜选用耐化学型表面毡或有机合成材料, 也可选用中碱玻璃纤维表面毡; 次内层应选用无碱无氟无硼类型的玻璃纤维短切原丝毡或喷射纱。

2 结构层应选用无碱无氟无硼类型的玻璃纤维的缠绕纱、单向布、方格布、短切毡或喷射纱的铺层组合; 在排放潮湿烟气条件下, 可选用无碱玻璃纤维的缠绕纱、单向布、方格布、短切毡或喷射纱的铺层组合。

3 纤维增强塑料内筒筒体之间连接所用的玻璃纤维方格布、短切原丝毡、单向布的类型应与筒体增强材料一致。

4 玻璃纤维表面处理采用的偶联剂应与选用的树脂匹配。

9.2.9 纤维增强材料的质量应符合下列规定:

- 1 玻璃纤维缠绕纱和喷射纱的质量应符合现行国家标准《玻璃纤维无捻粗纱》GB/T18369 的规定；
- 2 玻璃纤维单向布的质量应符合现行国家标准《玻璃纤维机织单向布》GB/T29754 的规定；
- 3 玻璃纤维方格布的质量应符合现行国家标准《玻璃纤维无捻粗纱布》GB/T18370 的规定；
- 4 玻璃纤维短切原丝毡、连续原丝毡的质量应符合现行国家标准《玻璃纤维短切原丝毡和连续原丝毡》GB/T 17470 的规定；
- 5 玻璃纤维表面毡应符合现行国家标准《玻璃纤维湿法毡》GB/T26733 中 6.3 的规定；
- 6 碳纤维及其制品的质量应符合现行国家标准《聚丙烯腈基碳纤维》GB/T26752 和《经编碳纤维增强材料》GB/T30021 的规定；
- 7 有机合成纤维及其制品宜选用聚酯纤维表面毡，其性能应符合现行纺织行业标准《纺粘热轧法非织造布》FZ/T64 033 的规定。

9.3 铺层设计

9.3.1 纤维增强塑料内筒筒壁由内衬层、结构层和外表层组成，并应符合下列规定：

1 内衬层应由内表面层与次内层组成，厚度不应小于 2.5mm，且应符合下列规定：

1) 内表面层应采用表面毡增强，树脂含量重量比不应小于 85%，厚度不应小于 0.3mm；

2) 次内层宜采用短切原丝毡、缝编织物、喷射纱增强，树脂含量重量比不应低于 65%；

3) 内衬层有导静电要求时，其内表层应采用导电碳纤维表面毡增强或在内表面层树脂中添加导电填料，表面电阻率应小于或等于 $1.0 \times 10^6 \Omega$ ，静电释放装置的对地电阻应小于或等于 25 Ω ，碳纤维表面毡层厚度可计入内表面层厚度；

4) 内衬层有耐磨蚀要求时，应在树脂中添加耐磨填料，其厚度宜增加 (0.5~1.0) mm；

5) 当有耐含氟类腐蚀介质要求时，内衬层可选用有机合成纤维或碳纤维材料。

2 结构层可选用缠绕纱、短切原丝毡、缝编织物、喷射纱、纤维布等单一或几种增强材料的组合，可选用缠绕、喷射和手糊工艺成型。

3 外表层的设计应符合下列规定：

1) 外表层的最外层应采用无空气阻聚树脂或胶衣树脂，外表层厚度不宜小于 0.3mm。

2) 当暴露在腐蚀环境时，应采用表面毡增强，树脂质量含量重量比不应低于 85%；

3) 当有防紫外线照射要求时, 所用树脂应添加紫外线吸收剂;

9.3.2 纤维增强塑料力学性能宜通过试验确定, 也可通过铺层设计方法获得, 并由试验检验予以确认。纤维增强塑料力学性能应符合以下规定:

1 纤维增强塑料强度标准值应按其概率分布的 0.05 分位值确定; 弹性模量可按其概率分布的 0.5 分位值确定。

2 纤维增强塑料的重力密度、膨胀系数、泊松比和导热系数等计算指标, 可按表 9.3.2-1 的规定取值。

表 9.3.2-1 玻璃纤维增强塑料主要计算参数

项 目	数 值	项 目	数 值
环纵向泊松比 $\nu_{z\theta}$	0.23	轴向热膨胀系数 α_z	$2.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
		环向热膨胀系数 α_θ	$1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

9.3.3 纤维增强塑料强度设计值应根据下列公式进行计算:

$$f = \frac{\beta_T \cdot f_k}{\gamma_{RF}} \quad (9.3.3-1)$$

$$\gamma_{RF} = \gamma_M \cdot \gamma_d \quad (9.3.3-2)$$

式中: f ——为温度作用下缠绕成型纤维增强塑料力学性能的设计值 (MPa);

f_k ——为常温下缠绕成型纤维增强塑料力学性能的标准值 (MPa);

γ_{RF} ——缠绕成型纤维增强塑料制品材料分项系数;

γ_M ——为常温下缠绕成型纤维增强塑料力学性能材料抗力系数, 按表 9.3.3-1 选取;

γ_d ——为不同设计状况下缠绕成型纤维增强塑料材料抗力调整系数, 按表 9.3.3-2 选取。

β_T ——为温度作用下缠绕成型纤维增强塑料强度折减系数, 可按表 9.3.3-3 选取;

表 9.3.3-1 纤维增强塑料力学性能材料抗力系数

内力状态	受压或压弯	受拉	受弯或拉弯
γ_M	2.50	2.0	2.0

表 9.3.3-2 纤维增强塑料材料抗力调整系数 γ_d

内力状态	设计状况			
	持久设计状况	短暂设计状况	地震设计状况	偶然设计状况
受压或压弯	1.45	1.25	1.25	1.0
受弯或拉弯	1.45	1.25	1.25	1.0
受拉	4.0	1.65	1.65	1.0

表 9.3.3-3 温度作用下缠绕成型纤维增强塑料强度折减系数

设计温度 $T_d(^{\circ}\text{C})$	材料温度折减系数	
	受压、环向受弯	受拉、轴向受弯
20	1.0	1.0
60	0.70	0.90
90	0.60	0.80

注：1 表中温度为中间值时，可采用线性插值确定；2 树脂热变形温度（HDT）不应小于 $(T_d+20)^{\circ}\text{C}$ 。

9.3.5 当采用铺层设计法确定玻璃纤维增强塑料单层板和层合板力学性能时，单层板力学性能应符合下列规定：

- 1 单层板材料的力学性能可按表 9.3.5-1 取值；
- 2 缠绕角度与纤维缠绕层环向和轴向单元拉伸模量宜按表 9.3.5-2 选取；
- 3 单层板的玻璃纤维质量含量应符合下列规定：
 - 1) 短切原丝毡：25%~35%；
 - 2) 纤维布：45%~60%；
 - 3) 纤维缠绕纱：60%~75%。

表 9.3.5-1 玻璃纤维增强塑料单层板材料的力学性能

增强材料 类型	方向	适用条件	单元拉伸强度 U_i [N/(mm·kg/m ²)]	单元拉伸模量 X_i [N/(mm·kg/m ²)]	层间或搭接剪 切强度 τ_{lap} (MPa)
短切原丝毡	各方向		200	14,000	7.0
纤维布	经向	$\xi_1 \geq 1/6$	$500 \times \xi_1$	$4,000 + 24,000 \times \xi_1$	6.0
		$\xi_1 < 1/6$	60	4,000	
	纬向	$\xi_2 \leq 5/6$	$500 \times (1 - \xi_2)$	$4,000 + 24,000 \times (1 - \xi_2)$	
		$\xi_2 > 5/6$	60	4,000	
纤维缠绕纱	纤维方向	$85^\circ < \theta < 90^\circ$	500	28,000	

注：1 表中 ξ_1 、 ξ_2 分别为经向、纬向单位宽度玻璃纤维的质量与单位宽度总纤维质量的比例；

2 表中 θ 为缠绕角，代表纤维缠绕方向与筒体轴向 x 的夹角；

3 表中 U_i 为单元抗拉强度，表示单位宽度的单位重量的力；

4 表中 X_i 为单元拉伸模量，表示单位宽度的单位重量的力与对应的应变的比值。

表 9.3.5-2 缠绕角度与玻璃纤维缠绕层环向和轴向单元拉伸模量

纤维缠绕方向与筒体或管道轴向 x 的夹角 θ (度)	环向单元拉伸模量 [N/(mm·kg/m ²)]	轴向单元拉伸模量 [N/(mm·kg/m ²)]
0	4,600	28,000
5	4,600	27,400
10	4,600	26,000
15	4,600	23,800
20	4,600	19,800
25	4,600	16,000
30	4,600	12,800
35	4,600	9,800
40	5,000	7,500
45	5,800	5,800
50	7,500	5,000
55	9,800	4,600

60	12, 800	4, 600
65	16, 000	4, 600
70	19, 800	4, 600
75	23, 800	4, 600
80	26, 000	4, 600
85	27, 400	4, 600
90	28, 000	4, 600

9.3.6 采用铺层法计算层合板性能时，应符合下列规定：

1 层合板的拉伸模量标准值应按下列公式计算：

$$E_{tk}^c = \frac{\sum_{i=1}^n n_i W_i X_i}{t_0} \quad (9.3.6-1)$$

$$t_0 = \sum_{i=1}^n t_i \quad (9.3.6-2)$$

$$t_i = \left(\frac{1}{\rho_g} + \frac{(100 - m_g)}{m_g \times \rho_r} \right) \times W_i \times 10^3 \quad (9.3.6-3)$$

式中： E_{tk}^c ——层合板的拉伸模量标准值 (MPa)；

n_i ——第 i 单层板的层数；

W_i ——第 i 单层板的纤维单位面积质量 (kg/m^2)；

X_i ——第 i 单层板的单元拉伸模量 [$N/(mm \cdot kg/m^2)$]；

t_0 ——层合板的结构层计算厚度(mm)；

t_i ——第 i 层单层板的结构计算厚度(mm)；

m_g ——第 i 层单层板的纤维质量含量 (%)；

ρ_r ——树脂固化后的密度 (kg/m^3)；

ρ_g ——纤维的密度 (kg/m^3)。

2 层合板的弯曲模量标准值应按下列公式计算：

$$E_{bk}^c = \frac{1}{t_0^3} \sum_{i=1}^n W_i X_i [12(h_i - h_0)^2 + t_i^2] \quad (9.3.6-4)$$

$$h_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i h_i}{\sum_{i=1}^n W_i X_i} \quad (9.3.6-5)$$

式中: E_{bk}^c ——层合板的弯曲模量标准值 (MPa);

h_i ——第 i 层单层板的中心与层合板中心 (图 9.3.6) 的距离(mm);

h_0 ——层合板的中性面与层合板中心的距离(mm)。

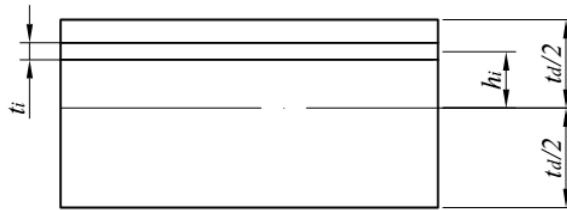


图 9.3.6 第 i 层单层板的中心与层合板中心的距离 h_i 示意图

3 层合板的拉伸强度设计值应可下列公式计算:

$$f_t^c = E_{tk}^c \min\left(\varepsilon_{ar}, \frac{\beta_T U_1}{\gamma_{RF} X_1}, \frac{\beta_T U_2}{\gamma_{RF} X_2}, \dots, \frac{\beta_T U_i}{\gamma_{RF} X_i}\right) \quad (9.3.6-6)$$

式中: f_t^c ——层合板的拉伸强度设计值 (MPa);

U_i ——第 i 单层板的单元拉伸强度 [$N/(mm \cdot kg/m^2)$].

9.3.7 采用设计法时层合板弯曲强度设计值可按下式确定:

$$f_b^c = E_{bk}^c \min\left(\varepsilon_{ar}, \frac{\beta_T U_1}{\gamma_{RF} X_1}, \frac{\beta_T U_2}{\gamma_{RF} X_2}, \dots, \frac{\beta_T U_i}{\gamma_{RF} X_i}\right) \quad (9.3.7)$$

式中: f_b^c ——层合板的弯曲强度设计值 (MPa)。

9.4 自立式纤维增强塑料内筒

9.4.1 自立式纤维增强塑料内筒可采用整体自立式或分段自立式。采用分段自立式时, 宜减少分段数量。

9.4.2 自立式纤维增强塑料内筒受压局部屈曲应力应满足下式要求:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{crt}^z} + \frac{\sigma_M}{\sigma_{crt}^b} + \left(\frac{\sigma_{\theta c}}{\sigma_{crt}^\theta}\right)^2 \leq 1 \quad (9.4.2)$$

式中 σ_{crt}^z 、 σ_{crt}^b 、 σ_{crt}^θ ——分别为筒壁轴向受压、轴向弯曲受压和环向受压临界屈曲应力

设计值 (N/mm^2);

σ_N ——纤维增强塑料内筒在不同设计状况下对应的轴向压应力设计值 (N/mm^2) 按第 9.4.6 条的规定计算;

σ_M ——纤维增强塑料内筒弯曲受压应力设计值 (N/mm^2), 按第 9.4.7 条的规定计算。

σ_{α} ——纤维增强塑料内筒在不同设计状况下对应的环向受压应力设计值 (N/mm^2), 按第 9.4.8 条的规定计算。

9.4.3 自立式纤维增强塑料内筒的轴向受压临界屈曲应力可按下式进行计算:

$$\sigma_{crit}^z = \frac{\beta_{ET}}{\gamma_{RF}} \cdot \sigma_{crit}^{zk} \quad (9.4.3-1)$$

$$\sigma_{crit}^{zk} = k \cdot \sqrt{\frac{E_{zb}^k E_{\alpha}^k}{3(1-\nu_{z\theta}\nu_{\theta z})}} \cdot \frac{t_0}{r} \quad (9.4.3-2)$$

$$k = 1.0 - 0.9(1.0 - e^{-x}) \quad (9.4.3-3)$$

$$x = \frac{1}{16} \sqrt{\frac{r}{t_0}} \quad (9.4.3-4)$$

式中: σ_{crit}^{zk} ——筒壁轴向受压临界屈曲应力标准值 (N/mm^2);

E_{zb}^k ——常温下纤维增强塑料轴向弯曲弹性模量标准值 (N/mm^2);

E_{α}^k ——常温下纤维增强塑料环向压缩弹性模量标准值 (N/mm^2);

β_{ET} ——纤维增强塑料弹性模量折减系数, 取 $\beta_{ET}=0.8$;

t_0 ——烟囱筒壁纤维增强塑料结构层厚度 (mm);

r ——筒壁计算截面结构层几何中面圆半径 (mm);

$\nu_{z\theta}$ ——泊松比, 为 z 方向 (轴向) 应力引起的 θ 方向 (环向) 应变;

$\nu_{\theta z}$ ——泊松比, 为 θ 方向 (环向) 应力引起的 z 方向 (轴向) 应变。

9.4.4 自立式纤维增强塑料内筒的轴向弯曲受压临界屈曲应力可按下式进行计算:

$$\sigma_{crt}^b = \frac{\beta_{ET}}{\gamma_{RF}} \cdot \sigma_{crt}^{bk} \quad (9.4.4-1)$$

$$\sigma_{crt}^{bk} = \frac{4\sqrt{2}k}{9} \cdot \frac{\sqrt{E_{zb}^k E_{\theta c}^k}}{1 - \nu_{z\theta} \nu_{\theta z}} \cdot \frac{t_0}{r} \quad (9.4.4-2)$$

式中： σ_{crt}^{bk} ——筒壁轴向弯曲受压临界屈曲应力标准值（ N/mm^2 ）。

9.4.5 纤维增强塑料内筒的环向受压临界屈曲应力可按下式进行计算：

$$\sigma_{crt}^{\theta} = \frac{\beta_{ET}}{\gamma_{RF}} \cdot \sigma_{crt}^{\theta k} \quad (9.4.5-1)$$

$$\sigma_{crt}^{\theta k} = 0.765 \cdot \sqrt[4]{(E_{\theta b}^k)^3 \cdot E_{zc}^k} \cdot \frac{r}{L_s} \cdot \left(\frac{t_0}{r}\right)^{1.5} \quad (9.4.5-2)$$

式中： $\sigma_{crt}^{\theta k}$ ——筒壁环向受压临界屈曲应力标准值（ N/mm^2 ）；

$E_{\theta b}^k$ ——常温下纤维增强塑料环向弯曲弹性模量标准值（ N/mm^2 ）；

E_{zc}^k ——常温下纤维增强塑料轴向压缩弹性模量标准值（ N/mm^2 ）；

L_s ——筒壁加筋肋间距（mm）。

9.4.6 纤维增强塑料内筒轴心受拉或受压应力设计值应按下列公式计算：

1 持久设计状况

$$\sigma_N = \frac{1.35N_k}{A_n} \quad (9.4.6-1)$$

2 短暂设计状况

$$\sigma_N = \frac{1.2N_k}{A_n} \quad (9.4.6-2)$$

3 地震设计状况

$$\sigma_N = \frac{N \pm F_{Ev}}{A_n} \quad (9.4.6-3)$$

4 偶然设计状况

$$\sigma_N = \frac{N_k}{A_n} \quad (9.4.6-4)$$

式中 A_n ——计算截面处的结构层净截面面积（ mm^2 ）；

N_k ——纤维增强塑料内筒轴向力标准值 (N);

N ——纤维增强塑料内筒轴向力设计值 (N);

F_{Ev} ——纤维增强塑料内筒竖向地震作用设计值 (N)。

9.4.7 纤维增强塑料内筒整体弯曲应力设计值应按以下规定计算:

1 持久设计状况

$$\sigma_M = \gamma_T(\sigma_m^T + \sigma_{set}^T) \quad (9.4.7-1)$$

2 短暂设计状况

$$\sigma_M = \frac{M_W}{W_n} + \gamma_T(\sigma_m^T + \sigma_{set}^T) \quad (9.4.7-2)$$

3 地震设计状况

$$\sigma_M = \frac{M_E + 0.2M_W}{W_n} + \gamma_T(\sigma_m^T + \sigma_{set}^T) \quad (9.4.7-3)$$

4 偶然设计状况

$$\sigma_M = \frac{0.2M_{wk}}{W_n} + \sigma_m^{AT} + \sigma_{set}^{TA} \quad (9.4.7-4)$$

式中 σ_M ——纤维增强塑料筒壁弯曲受拉或弯曲受压应力设计值 (N/mm^2);

σ_m^T 、 σ_m^{AT} ——筒身分别在正常温度与非正常温度作用下截面弯曲温度应力标准值 (N/mm^2), 按本标准第五章的规定进行计算;

σ_{sec}^T 、 σ_{set}^{AT} ——筒身分别在正常温度与非正常温度作用下截面温度次应力标准值 (N/mm^2), 按本标准第5章的规定进行计算;

M_E ——地震作用下纤维增强塑料内筒水平计算截面的弯矩设计值($N \cdot mm$);

M_W ——风荷载作用下纤维增强塑料内筒水平计算截面的弯矩设计值($N \cdot mm$);

M_{wk} ——风荷载作用下纤维增强塑料内筒水平计算截面的弯矩标准值($N \cdot mm$);

W_n ——计算截面处的结构层净截面抵抗矩(mm^3);

γ_T ——温度作用分项系数, 按 1.1 选取。

9.4.8 纤维增强塑料内筒竖向截面应力应满足下列公式要求:

1 负压运行时, 环向压应力

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\gamma_T \cdot p_c \cdot r}{t_0} \leq \sigma_{\alpha}^{\theta} \quad (9.4.8-1)$$

2 正压运行时, 环向拉应力

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\gamma_T \cdot p_t \cdot r}{t_0} \leq f_{\alpha} \quad (9.4.8-2)$$

3 环向弯曲应力

1) 风荷载不直接作用内筒时:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^T \leq f_{\theta} \quad (9.4.8-3)$$

2) 风荷载直接作用内筒时:

$$\sigma_{\theta} = \frac{M_{\theta out}}{W_{\theta}} + \sigma_{\theta}^T \leq f_{\theta} \quad (9.4.8-4)$$

4 环向压应力与环向弯曲应力共同作用:

$$\frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_{\alpha}^z} + \frac{\sigma_{\theta}}{f_{\theta}} \leq 1 \quad (9.4.8-5)$$

式中 σ_{α} ——纤维增强塑料筒壁环向压应力或拉应力设计值 (N/mm^2);

f_{α} ——纤维增强塑料筒壁环向拉应力设计允许值 (N/mm^2);

p_c 、 p_t ——烟气负压或正压压力标准值 (N/mm^2), 按本标准第 5 章的规定进行计算;

σ_{θ} ——筒壁竖向截面环向弯曲压应力设计值 (N/mm^2);

$M_{\theta out}$ ——局部风压产生的环向单位高度风弯矩 $N \cdot mm/m$, 按本标准第 5 章有关规定计算;

W_{θ} ——筒壁厚度沿环向单位高度截面抵抗矩 (mm^3/m);

σ_{θ}^T ——筒壁环向温度应力 (N/mm^2), 按本标准第 5 章规定进行计算。

9.5 悬挂式纤维增强塑料内筒

9.5.1 悬挂式纤维增强塑料内筒可采用整体悬挂式或分段悬挂式。采用分段悬挂形式时,

宜减少分段数量。

9.5.2 悬挂式纤维增强塑料内筒水平截面极限承载能力应满足下式要求：

$$\sigma_{zt} = \sigma_N + \sigma_M \leq f_{zt} \quad (9.5.2-1)$$

$$\sigma_{zb} = \gamma_T \sigma_b^T \leq f_{zb} \quad (9.5.2-2)$$

$$\frac{\sigma_{zt}}{f_{zt}} + \frac{\sigma_{zb}}{f_{zb}} \leq 1 \quad (9.5.2-3)$$

式中 σ_{zt} ——纤维增强塑料筒壁轴向拉应力设计值 (N/mm^2)；

f_{zt} ——纤维增强塑料筒壁轴向抗拉强度设计允许值 (N/mm^2)；

σ_{zb} ——纤维增强塑料筒壁轴向弯曲应力设计值 (N/mm^2)；

σ_b^T ——筒壁纵向温度应力 (N/mm^2)，按本标准第5章规定进行计算；

f_{zb} ——纤维增强塑料筒壁轴向抗弯强度设计允许值 (N/mm^2)。

9.5.3 悬挂式纤维增强塑料内筒竖向截面应力满足本标准9.4.8条的规定。

9.6 连接与加劲

9.6.1 纤维增强塑料筒壁分段可采用平端对接或插接。当采用平端对接时，宜内外双面粘接，粘接宽度、厚度分别满足以下规定。

1 粘接宽度（见图9.6.1）应满足下式要求：

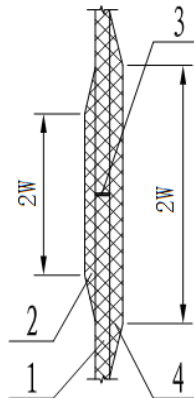


图9.6.1 平端对接粘接宽度示意图

1-主层合板；2-内包覆层；3-树脂胶泥；4-外包覆层

$$W \geq \alpha \cdot \frac{f_{zt} \cdot t_0}{f_\tau} \quad (9.6.1-1)$$

式中： α ——粘接宽度的结构层厚度系数，当采用内外侧双面粘接接口时，外侧接口取 0.9，内侧接口取 0.6；当采用外侧单面粘接接口时，取 1.5。

W ——粘接宽度 (mm)；

t_0 ——对应连接段较厚筒壁的结构层厚度 (mm)；

f_{zt} ——筒壁轴向抗拉强度设计值 (N/mm^2)；

f_τ ——粘接层的层间剪切强度设计值 (N/mm^2)。

2 粘接结构层厚度应按下列式计算：

$$t \geq \alpha \cdot \frac{f_{zt} \cdot t_0}{f_{zt}^h} \quad (9.6.1-2)$$

式中： f_{zt}^h ——粘接结构层的轴向抗拉强度设计值 (N/mm^2)。

9.6.2 纤维增强塑料内筒可采用加劲肋 (见图 9.6.2) 的方法提高纤维增强塑料内筒筒壁刚度，加劲肋影响截面抗弯刚度应满足下列式要求：

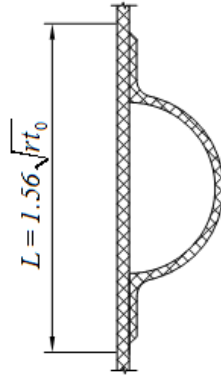


图 9.6.2 筒壁影响截面有效宽度示意图

$$E_s I_s \geq \frac{\gamma_{RF} \cdot P_c \cdot L_s \cdot r^3}{1.15} \quad (9.6.2)$$

式中 E_s ——加劲肋沿环向弯曲模量 (N/mm^2)；

I_s ——加劲肋及筒壁影响截面有效宽度惯性矩 (mm^4)。筒壁影响截面有效宽度可图

9.6.2 计取, 并且计算影响面积不大于加强肋截面面积;

γ_{RF} ——非持久设计状况下的材料分项系数, 对应的 γ_M 应根据加劲肋材料确定。加

劲肋可采用型钢或纤维增强塑料制作。

9.6.3 纤维增强塑料内筒开孔宜采用圆形, 洞孔应力应满足本标准公式(10.3.2-16)的要求。

9.7 设计构造

9.7.1 纤维增强塑料内筒下部烟道接口宜设计成圆形。

9.7.2 支承牛腿和支承环梁应符合下列要求:

1 采用整体悬挂或分段悬挂的纤维增强塑料内筒, 直径大于 3m 时, 承重支座宜采用钢制支承环梁结构。

2 支承牛腿截面尺寸应根据荷载计算确定。牛腿应与筒壁整体缠绕成型。

3 支承牛腿与环梁之间、支承环梁与烟囱筒外壁之间应加垫橡胶垫板。

9.7.3 止晃装置应符合下列要求:

1 悬挂式纤维增强塑料内筒止晃装置宜设置在纤维增强塑料内筒筒段接近端部的位置。

2 止晃装置采用刚性止晃装置时, 宜利用平台为约束构件, 沿圆周方向均匀设置止晃点; 当采用柔性止晃装置时, 可利用烟囱外筒作为约束构件。

9.7.4 纤维增强塑料加劲肋间距不应超过烟囱直径的 1.5 倍, 且不大于 8m。加劲肋截面可采用空心或实心型式。

9.7.5 防雨罩应设置在接近纤维增强塑料内筒顶部的位置。防雨罩可分瓣制作, 与烟囱外壁手糊粘接, 各瓣间可以采用平端对接, 也可以通过螺栓拼接。

9.7.6 每段纤维增强塑料内筒之间连接应符合下列规定:

1 筒体的内外面的粘接连接搭接宽度、厚度应按本标准 9.6.1 条计算确定。

2 悬挂式内筒宜采用平端对接; 自立式内筒可采用承插连接, 承插深度不应小于 100 mm。

3 悬挂式内筒内外面的粘接宽度不应小于粘接厚度的 16 倍, 且内侧不应小于 250mm, 外侧不应小于 400mm;

4 承插连接自立式内筒内外面的粘接宽度不应小于粘接厚度的 16 倍，且内侧不应小于 200mm，外侧不应小于 300mm。当外侧采用非粘接方式进行连接时，外侧可不受此限。

5 粘接宽度端部厚度与筒身表面高差应平滑过渡，内侧连接坡度不应大于 1/6；外侧连接坡度不应大于 1/4。

6 与介质接触面应采用表面毡，次内层应由两层以上的短切纤维组成；

7 结构层应全部采用短切原丝毡，或与纤维布交替进行，第一层和最后一层应为短切原丝毡；

9.7.7 纤维增强塑料内筒膨胀节的连接节点应严密，连接材料的耐腐蚀和耐高温性能应符合烟气工艺要求。

9.7.8 纤维增强塑料内筒可不设置保温层或隔热层。

9.7.9 纤维增强塑料内筒的筒壁结构层最小厚度应符合公式（9.7.10）的要求：

$$t_{0\min} \geq \begin{cases} 6 \\ D/1000 \end{cases} \quad (9.7.10)$$

式中： $t_{0\min}$ ——筒壁结构层最小厚度（mm）；

D ——内筒直径（mm）。

9.8 制作

9.8.1 纤维增强塑料烟囱的制作环境应符合下列规定：

1 制作现场应是通风良好的车间；

2 环境温度宜为 15℃~30℃，所有材料和设备温度应高于露点温度 3℃；当环境温度低于 10℃，应采取加温措施，不应采用明火或蒸汽直接加热；当环境温度高于 35℃，应采取降温措施。

3 原材料使用时的温度，不应低于环境温度。

9.8.2 缠绕设备程序应经过调试，缠绕线型符合设计要求。

9.8.3 模具宜采用金属材料制作，且表面平整、无缺陷，尺寸应经过检查。

9.8.4 表面毡层、短切纤维层的制作应均匀浸透树脂。当采用喷射工艺时应均匀喷射短切纤维，单次喷射面密度不宜大于 380g/m²，且喷射层表面应辊压充分。

- 9.8.5 内衬层制作完成应进行表面检查, 并进行缺陷处理。
- 9.8.6 需要分层制作时, 其间隔应符合下列规定:
- 1 先制作的部分固化后, 应进行丙酮敏感性试验, 发粘时可直接进行下一层制作;
 - 2 丙酮擦拭后表面不发粘, 或表面有污染时, 表面应进行打磨、清理干净后再进行下一层制造。
- 9.8.7 结构层的制作可包括缠绕纱层、单向布层及短切纤维层。
- 9.8.8 缠绕纱层的制作应控制单束缠绕纱的张力, 并使纱束出现断裂得根数不得大于 5%。
- 9.8.9 单向布层的制作应控制铺设方向与母线垂直、搭接宽度宜为 40mm~80mm; 上下两层搭接缝应错开。
- 9.8.10 缠绕出现分次制作时, 已固化表面处理除符合本标准第 9.8.6 条规定外, 宜以短切纤维层作为层间过渡。
- 9.8.11 结构层与内衬层的制造间隔除应符合本标准第 9.8.10 条的规定外, 其制造间隔时间不宜超过 72 小时。
- 9.8.12 外表面的制造应符合下列规定:
- 1 外表面宜采用无空气阻聚的树脂封面;
 - 2 纤维增强塑料烟囱在室外使用的部分, 外表面层应采取防紫外线措施。
- 9.8.13 纤维增强塑料烟囱筒体的制造误差应符合下列规定:
- 1 各分段筒体的直径误差应小于直径的 1%;
 - 2 各分段筒体的高度误差应不超过本段高度的 $\pm 0.5\%$, 且不应超过 13mm;
 - 3 各分段筒体的厚度误差应不超过内衬厚度的 $-10\% \sim +20\%$, 或者重量误差应控制在 $-5\% \sim +10\%$ 之间。
- 9.8.14 加劲肋的制作宜使用整体缠绕成型工艺, 加劲肋与筒节环向对接缝间距应不小于 500mm。
- 9.8.15 法兰宜采用毡和编织织物交替手糊成型, 也可通过纤维缠绕成型, 或采用上述两种工艺组合制作。当采用手糊成型工艺时, 法兰盘与法兰管基部增强应同步成型。
- 9.8.16 纤维增强塑料烟囱的开孔补强施工, 应避开吊装牛腿、支承牛腿和加劲肋等附件。
- 9.8.17 纤维增强塑料烟囱筒节之间对接前应进行工艺评定, 合格后方可进行。
- 9.8.18 纤维增强塑料烟囱筒节在安装之前应固化充分, 常温下的固化时间应不低于 7 天, 巴氏硬度应大于 40HBa。

- 9.8.19 纤维增强塑料烟囱筒节及零部件存放应采取避免发生变形的技术措施。
- 9.8.20 当纤维增强塑料烟囱筒节放置方向发生“水平与竖直”互换时，应采取保护措施。

9.9 安装

- 9.9.1 纤维增强塑料内筒安装应在内筒、吊装平台、提升设备等检验合格后进行。
- 9.9.2 安装人员应经技术和安全培训合格后方可上岗；特殊工种应持证上岗。
- 9.9.3 纤维增强塑料内筒筒节粘接时环境要求应符合本标准 9.8.1 条的有关规定。
- 9.9.4 纤维增强塑料内筒筒节粘接时所用材料性宜选用与内筒相同材料，其性能不应低于筒体所用材料。
- 9.9.5 纤维增强塑料烟囱内筒可采用倒装法或正装法。
- 9.9.6 纤维增强塑料烟囱内筒在安装时，每段纤维增强塑料内筒上的吊环及止晃装置，应满足安装期间所施加的各种载荷。
- 9.9.7 用于提升的钢绞线和钢丝绳应符合国家现行标准《钢丝绳》GB/T8918 的有关规定。
- 9.9.8 纤维增强塑料内筒分段装卸时，应采用柔性吊索。
- 9.9.9 在装卸、存放和安装期间，应计入吊装荷载及变形对纤维增强塑料筒体产生的不利影响。
- 9.9.10 直径超过 3m 的分段纤维增强塑料内筒宜垂直存放和移动。
- 9.9.11 当分段的纤维增强塑料内筒进行水平和垂直位置的相互变换时，应避免底部边缘的损伤，并且防腐层表面不得产生裂纹。

9.10 质量检验

- 9.10.1 纤维增强塑料内筒的质量检验应符合以下规定：
- 1 纤维增强塑料内筒的质量检验应包括原材料检验、制造和安装过程质量检验、制成品的质量检验。
 - 2 检验从业人员应经过培训，并应经考核合格。
 - 3 检测仪器、测试设备应经法定计量单位检定或校准。
 - 4 测试样本的选取应按本标准执行，当没有具体规定时，可按现行国家标准《计数抽样检验程序》GB/T 2828.1 的规定执行。

5 测试和检测记录应存档。

9.10.2 纤维增强塑料内筒原材料检验应符合表 9.10.2 各项要求：

表 9.10.2 原材料检验要求及方法

序号	项目	质量标准/允许偏差	检验方法
1	树脂、纤维	符合设计要求和本标准 9.2 要求	出厂合格证,按批号批次 现场抽检,制作前做树脂 胶凝试样
2	固化剂、促进 剂及填料	型号、规格应符合设计要求	出厂合格证,按批号现场 抽检
3	原材料库存	可燃、易燃、易爆材料和一般材料应分库 贮存,严禁混存;分区存放时,区域间距 不应小于 1m,与墙间距不应小于 0.5m	检查记录

9.10.3 纤维增强塑料内筒制造过程检验应符合表 9.10.3 各项要求：

表 9.10.3 制作过程检验要求及方法

序号	项目	质量标准/允许偏差	检验方法
1	模具准备	符合本标准 9.8.3 要求	目测、钢尺
2	制作内衬	符合本标准 9.8.4~9.8.6 要求	目测、钢尺,制作记录
3	缠绕结构层	符合本标准 9.8.7~9.8.11 要求	目测、钢尺,制作记录
4	外表层	符合本标准 9.8.4~9.8.6 要求	目测、钢尺,制作记录
5	切割修整	无分层、划伤等缺陷;端面垂直度 \leq 8mm;直径、高度、厚度误差符合设计 要求和本标准 9.10.5 要求	目测、钢尺、直角尺,制作 记录

9.10.4 纤维增强塑料内筒安装过程检验应符合表 9.10.4 各项要求：

表 9.10.4 安装过程检验要求及方法

序号	项目	质量标准/允许偏差	检验方法
1	椭圆度	不应大于设计内径的 1%	目测、钢尺
2	中心偏差	不应大于安装高度的 1/1000, 且不应大于 100mm	吊线, 钢尺

9.10.5 纤维增强塑料内筒制成品检验应符合表 9.10.5 各项要求:

表 9.10.5 制成品检验要求及方法

序号	项目	质量标准/允许偏差	检验方法
1	外观质量	内、外表面应平整光滑, 色泽均匀, 无杂质, 无纤维外露, 无对使用性能有影响的龟裂、分层、针孔、干斑和纤维浸润不良现象, 不允许有直径大于 3mm、深或高大于 5mm 的凹凸, 任取 300mm×300mm 面积内最大直径为 4mm 的气泡不得超过 5 个; 端面平齐, 边角无毛刺	目测、钢尺
2	厚度	平均厚度不应小于设计厚度, 最小厚度不应小于设计厚度的 90%, 内衬层厚度符合本标准要求	游标卡尺或超声波测厚仪
3	长度	偏差为设计长度的±0.5%, 且不应超过±13mm	钢卷尺或测距仪
4	内径	偏差为设计内径的±0.5%	钢卷尺或测距仪
5	椭圆度	端部不应大于壁厚的 0.5 倍, 其他部位不应大于设计内径的 1%	钢卷尺或测距仪
6	端面垂直度	不应大于 8mm	直角尺和钢板尺
7	加劲肋间距	不应大于设计间距	钢尺
8	巴氏硬度	不应小于 40	GB/T3854
9	树脂含量	符合本标准 9.3 要求	GB/T2577

10	树脂不可溶份含量	不应小于 88%	GB/T2576
11	阻燃性能	有阻燃要求时，氧指数不应小于 32	GB/T8924
12	导电性能	内表面的表面电阻率不应大于 $1.0 \times 10^6 \Omega$	GB/T1410
13	吸水率	不应大于 0.3%	GB/T1462
14	力学性能	符合设计要求和本标准要求的	轴向拉伸强度、环向拉伸强度:GB/T 1447; 轴向弯曲模量、环向弯曲模量:GB/T 1449; 轴向压缩强度: GB/T 1448

9.10.6 组批：以相同原材料、相同生产工艺、具有相同铺层设计的纤维增强塑料筒节为 1 批。

9.10.7 质量检验抽样应符合下列规定：

- 1 每一根烟囱筒节均应进行外观质量、尺寸和巴氏硬度的检验；
- 2 树脂不可溶份含量、树脂含量、阻燃性能、导电性能、力学性能、吸水率，采用二次取样法，样本数均为 2。

9.10.8 质量检验的判定应符合下列规定：

- 1 外观质量、尺寸、巴氏硬度均达到要求，判定该产品外观质量、尺寸、巴氏硬度合格，否则判该产品为不合格。
- 2 树脂不可溶份含量、树脂含量、阻燃性能、导电性能、力学性能和吸水率检验时，第一次所抽 2 根全部合格，判该批产品合格；若两根均不合格，判该批产品不合格。若第一次所抽 2 根中有 1 根不合格，进行第二次抽样，若第二次所抽的 2 根全部合格，判该批产品合格；否则判该批产品不合格。

10 钢烟囱

10.1 一般规定

10.1.1 钢烟囱可分为塔架式、自立式、拉索式钢烟囱三种形式。外筒为钢筒壁的套筒式和多管式钢烟囱，外筒可按本章第 10.3 节有关钢烟囱的规定进行设计。

10.1.2 钢塔架及拉索计算除按本章节要求计算外，尚应满足国家标准《高耸结构设计规范》GB50135 的有关规定。

10.1.3 对于无隔热层的钢烟囱，当烟囱外壁温度大于 70 度时，应在其底部 2m 高度范围内，采取隔热措施或者设置安全防护栏。

10.1.4 钢烟囱选用的材料应符合国家标准《钢结构设计规范》GB50017 的规定。

10.1.5 烟囱和塔架结构计算时，宜建立烟囱和塔架的空间实体模型。

10.1.6 钢烟囱设计应考虑制作、运输、安装、维护检修等要求。

10.2 钢塔架设计

10.2.1 钢塔架可根据排烟筒的数量，水平截面宜设计成三角形和方形。

10.2.2 钢塔架沿高度可采用单坡度或多坡度形式。塔架底部宽度与高度之比，可取 $1/5 \sim 1/8$ ，且不宜小于 $1/10$ 。

10.2.3 对于高度较高，底部较宽的钢塔架，宜在底部各边增设拉杆。

10.2.4 计算钢塔架结构时，应将结构作为整体，采用三维空间程序进行受力分析，主材与腹杆之间、腹杆与腹杆之间的连接，可按实际情况视为刚接或铰接。

10.2.5 钢塔架的计算应符合下列规定：

1 在风荷载和地震作用下，应根据排烟筒与钢塔架的连接方式，考虑排烟筒对塔架的作用力。

2 当钢塔架截面为三角形时，在风荷载或地震作用下，应考虑三种作用方向（图 10.2.4a）。

3 当钢塔架截面为四边形时，在风荷载或地震作用下，应考虑两种作用方向（图 10.2.4b）。

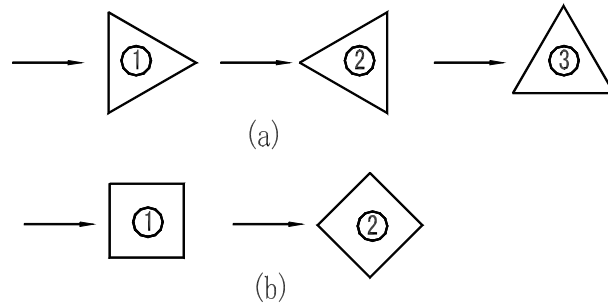


图 10.2.4 塔架外力作用方向

- 4 当钢塔架与排烟筒采用整体吊装时应进行吊装验算。
- 5 钢塔架应考虑由脉动风引起的风振影响，当钢塔架的基本自振周期小于 0.25s 时，可不考虑风振影响。

10.2.6 钢塔架腹杆宜按下列规定确定：

- 1 塔架杆件宜选择钢管、圆管等风阻较小的断面。当选用型钢组合断面时，宜采用封闭式断面；
- 2 塔架顶层和底层宜采用刚性 K 型腹杆；
- 3 塔架中间层宜采用预加拉紧的柔性交叉腹杆；
- 4 塔柱及刚性腹杆宜采用钢管，当为组合截面时宜采用封闭式组合截面；
- 5 交叉柔性腹杆宜采用圆钢。

10.2.7 钢塔架平台与排烟筒连接时，可采用滑道式连接（图 10.2.7）。

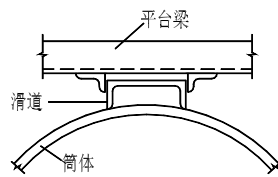


图 10.2.7 滑道式连接

10.2.8 钢塔架应沿塔面变坡处或受力情况复杂且构造薄弱处设置横隔，其余可隔一个节间设置一道，正三角形塔架可 2 个~3 个节间设置一道横隔。塔架应沿高度每隔 20m~30m 设一道休息平台或检修平台。

10.2.9 钢塔架抗震验算时，其构件及连接节点的承载力抗震调整系数可采用下表数值。

表 10.2.9 塔架构件及连接节点承载力抗震调整系数

塔架构件 调整系数	塔 柱	腹杆	支座斜杆	节 点
γ_{RE}	0.85	0.8	0.9	1.0

10.2.10 塔架式钢烟囱的水平弯矩，按排烟筒与塔架变形协调进行计算。

10.2.11 计算风荷载时，可分别计算塔体、排气筒及主要配管挡风面积所引起的风荷载，而不考虑相互挡风的影响。楼梯、栏杆的挡风面积可取其轮廓面积的 0.4 倍确定。计算塔体的挡风面积是应考虑结点板的影响，可按塔体的挡风面积乘以 1.10~1.15 的系数确定。

10.2.12 计算塔架自重时应考虑结点板、法兰盘及焊缝的重量，可按塔架杆件的自重乘以 1.15~1.20 的系数确定。

10.3 自立式钢烟囱

10.3.1 自立式钢烟囱的直径 d 和高度 h 之间的关系应根据强度和变形要求，经计算后确定，并宜满足 $h \leq 30d$ 。当不满足此条件时，烟囱下部直径宜扩大或采用其它减震等措施以满足强度和变形要求。

10.3.2 按本标准第 5 章有关规定判断钢烟囱发生横风向共振时，尚应进行下列计算，并采取相应措施避免烟囱变形过大破坏或疲劳破坏。

$$S_c = \frac{2\xi_s m_e}{\rho_a d_1^2} \quad (10.3.2-1)$$

$$m_e = \frac{\int_0^h m(z) \varphi_1^2(z) dz}{\int_0^h \varphi_1^2(z) dz} \quad (10.3.2-2)$$

式中 S_c —— 斯科诺顿数 (Scruton number)；

ρ_a —— 空气质量密度，取 $\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ；

d_1 —— 烟囱顶部 1/3 高度范围筒身平均外直径 (m)；

$\varphi_1(z)$ —— 第一阶振型；

ξ_s ——烟囱结构阻尼比;

$m(z)$ ——烟囱单位高度质量 (kg/m);

h ——烟囱高度 (m)。

- 1 当 $Sc \leq 5$ 时, 钢烟囱应安装减振装置;
- 2 当 $5 < Sc \leq 15$ 时, 钢烟囱可以安装减振装置, 或者通过疲劳验算设计;
- 3 当 $Sc > 15$ 时, 钢烟囱可不安装减振装置。

10.3.3 自立式钢烟囱应进行下列计算:

- 1 弯矩和轴向力作用下, 钢烟囱强度应按下列式进行计算:

$$\gamma_0 \left(\frac{N_i}{A_{ni}} + \frac{M_i}{W_{ni}} \right) \leq f_t \quad (10.3.3-1)$$

式中 M_i ——钢烟囱水平计算截面 i 的最大弯矩设计值(包括风弯矩和水平地震作用弯矩)($N \cdot mm$);

N_i ——与 M_i 相应轴向压力或轴向拉力设计值 (包括结构自重和竖向地震作用) (N);

A_{ni} ——计算截面处的净截面面积 (mm^2);

W_{ni} ——计算截面处的净截面抵抗矩 (mm^3);

f_t ——温度作用下钢材抗拉、抗压强度设计值 (N/mm^2), 按本标准 4.3.5 及 4.3.6 条进行计算。

γ_0 ——烟囱重要性系数, 按本标准 3.1.3 条选取。

- 2 弯矩和轴向力作用下, 钢烟囱局部稳定性应按下列公式进行验算:

$$\frac{N_i}{A_{ni}} + \frac{M_i}{W_{ni}} \leq \sigma_{crt} / \gamma_m \quad (10.3.3-2)$$

$$\sigma_{crt} = \begin{cases} \frac{0.75}{\beta^2} f_{yt} & \beta > \sqrt{2} \\ (1.0 - 0.412\beta^{1.2}) f_{yt} & \beta \leq \sqrt{2} \end{cases} \quad (10.3.3-3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{f_{yt}}{\alpha \sigma_e}} \quad (10.3.3-4)$$

$$\sigma_e = 1.21E \cdot \frac{t}{D} \quad (10.3.3-5)$$

$$\alpha = \delta \cdot \frac{\alpha_N \sigma_N + \alpha_B \sigma_B}{(\sigma_N + \sigma_B)} \quad (10.3.3-6)$$

$$\sigma_N = \frac{N_i}{A_{ni}} \quad (10.3.3-7)$$

$$\sigma_B = \frac{M_i}{W_{ni}} \quad (10.3.3-8)$$

$$\alpha_N = \begin{cases} \frac{0.83}{\sqrt{1 + D/(200t)}} & \frac{D}{t} \leq 424 \\ \frac{0.7}{\sqrt{0.1 + D/(200t)}} & \frac{D}{t} > 424 \end{cases} \quad (10.3.3-9)$$

$$\alpha_B = 0.189 + 0.811\alpha_N \quad (10.3.3-10)$$

$$f_{yt} = \gamma_s f_y \quad (10.3.3-10)$$

式中 σ_{crit} —— 烟囱筒壁局部稳定临界应力(N/mm²);

f_y —— 钢材屈服强度 (N/mm²);

γ_s —— 钢材在温度作用下强度设计值折减系数, 按本标准 4.3.6 条确定;

γ_m —— 材料分项系数, 为 1.10;

t —— 筒壁厚度(mm);

E_t —— 温度作用下钢材的弹性模量(N/mm²);

D_i —— i 截面钢烟囱外直径 (mm)。

δ —— 烟囱筒体几何缺陷折减系数, 当缺陷等级为一级 (见本标准 8.10.4)

时, 即 $w \leq 0.01l$ 时, 取 $\delta = 1.0$; 当缺陷等级为二级时, 即 $w = 0.02l$

时, 取 $\delta = 0.5$; 当 $0.01l < w < 0.02l$ 时, 采用线性插值。

3 在弯矩和轴向力作用下, 钢烟囱的整体稳定性应按下式进行验算:

$$\frac{N_i}{\varphi A_{bi}} + \frac{M_i}{W_{bi}(1-0.8N_i/N_{Ex})} \leq f_t \quad (10.3.3-12)$$

$$N_{Ex} = \frac{\pi^2 E_t A_{bi}}{\lambda^2} \quad (10.3.3-13)$$

式中 A_{bi} ——计算截面处的毛截面面积(mm²);

W_{bi} ——计算截面处的毛截面抵抗矩(mm³);

N_{Ex} ——欧拉临界力(N);

λ ——烟囱长细比,按悬臂构件计算;

φ ——焊接圆筒截面轴心受压构件稳定系数,按附录B采用。

4 地脚螺栓最大拉力可按下式计算:

$$P_{max} = \frac{4M}{nd} - \frac{N}{n} \quad (10.3.3-14)$$

式中 P_{max} ——地脚螺栓的最大拉力(kN);

M ——烟囱底部最大弯矩设计值(kN·m);

N ——与弯矩相应的轴向压力设计值(kN);

d ——地脚螺栓所在圆直径(m);

n ——地脚螺栓数量。

5 钢烟囱底座处钢筋混凝土基础局部受压应力,可按下式计算:

$$\sigma_{cbt} = \frac{G}{A_t} + \frac{M}{W} \leq \omega \beta_t f_{ct} \quad (10.3.3-15)$$

式中 σ_{cbt} ——钢烟囱(包括钢内筒)荷载设计值作用下,在混凝土底座处产生的局部受压应

力(N/mm²);

A_t ——钢烟囱与混凝土基础的接触面面积(mm²);

W ——钢烟囱与混凝土基础的接触面截面抵抗矩(mm³);

ω ——荷载分布影响系数,可取 $\omega=0.675$;

β_t ——混凝土局部受压时强度提高系数,按国家标准《混凝土结构设计规范》

(GB50010)计算;

f_{ct} ——混凝土在温度作用下的轴心抗压强度设计值。

6 烟道入口宜设计成圆形。矩形孔洞的转角宜设计成圆弧形。孔洞应力应满足：

$$\sigma = \left(\frac{N}{A_o} + \frac{M}{W_o} \right) \alpha_k \leq f_t \quad (10.3.3-16)$$

式中 A_o ——洞口补强后水平截面面积，应不小于无孔洞的相应圆筒壁水平截面面积 (mm^2)；

W_o ——洞口补强后水平截面最小抵抗矩 (mm^3)；

f_t ——温度作用下的钢材抗压强度设计值 (N/mm^2)

N 、 M ——洞口截面处轴向力及弯矩设计值 (N 、 $\text{N} \cdot \text{mm}$)；

α_k ——洞口应力集中系数，孔洞圆角半径 r 与孔洞宽度 b 之比， $r/b=0.1$ 时，可取 $\alpha_k=4$ ， $r/b \geq 0.2$ 时，取 $\alpha_k=3$ ，中间值线性插入。

10.3.4 钢烟囱的筒壁最小厚度与加劲肋最大间距应满足表 10.3.4，加劲肋截面面积和截面惯性矩应符合本标准第 8 章钢内筒的有关规定。

表 10.3.4 钢烟囱的筒壁最小厚度与加劲肋最大间距

钢筒内直径 (m)	最小板厚 (mm)	加劲肋最大间距
$D \leq 1.0$	3+C	5D
$1.0 < D \leq 2.0$	5+C	3D
$2.0 < D \leq 5.5$	5+C	2D
$D > 5.5$	6+C	1.5D

注：表中 C 为烟囱腐蚀余量，可根据烟囱使用环境及防腐措施确定。

10.3.5 破风圈的设置应符合下列规定：

- 1 设置条件，烟囱发生横风向共振，且 $Sc > 5$ 时，可设置破风圈并进行疲劳验算。
- 2 破风圈设置范围，应在距烟囱上端不小于烟囱高度 1/3 的范围内设置。
- 3 破风圈应当采用螺旋板形式，其螺旋板厚度不小于 6mm，宽度为烟囱外径的 1/10。

螺旋板应为三道，沿圆周 120 度均布，螺距为烟囱外部直径的五倍。

- 4 设置破风圈范围的烟囱体型系数按 1.4 采用。

10.4 拉索式钢烟囱

10.4.1 当烟囱高度与直径之比大于 30 ($h/d > 30$) 时, 可采用拉索式钢烟囱。

10.4.2 拉索应对称布置, 当烟囱高度与直径之比小于 35 时, 可设一层拉索。拉索宜为三根或四根, 相应的平面夹角宜为 120° 或 90° 。拉索与烟囱轴向夹角不应小于 25° , 拉索系结位置距烟囱顶部应小于 $h/3$ 处。

10.4.3 烟囱高度与直径之比大于 35 时, 可设两层拉索; 上层拉索系结位置, 宜距烟囱顶部小于 $h/3$ 处; 下层拉索系结位置, 宜设在上层拉索至烟囱底的 $1/2$ 高度处。

10.4.4 拉索式烟囱在风荷载和地震作用下的内力计算, 可按现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定计算, 并应计及横风向风振的影响。

10.4.5 拉索及其连接的最小安全系数 k 应不小于 2.0。

10.4.6 拉索初拉力可取拉索的公称极限抗拉强度的 8%~15%, 通常取 10%, 初拉力超过 15% 时要考虑风振动的影响, 小于 8% 时则要考虑瞬时松弛的影响。初拉力可通过测量索的下垂度, 振动频率, 机械拉力等方法确定。

10.4.7 拉索式烟囱筒身的内力分析可按拉索节点处为弹性支撑的连续压弯杆件计算, 并考虑拉线节点处的偏心弯矩。也可用索杆单元有限元法计算。

10.4.8 拉索烟囱的拉索可按一端连接于筒身的抛物线计算, 拉索上有集中荷载时, 可将集中荷载换算成均布荷载。

拉索的截面强度应按下列式验算:

$$\frac{N}{A} \leq f \quad (10.4.8)$$

式中 N ——拉索拉力设计值 (N);

A ——拉线的截面面积 (mm^2);

f ——拉索的抗拉强度设计值 (MPa)。

10.4.9 拉索式烟囱应进行整体稳定性验算, 按筒身屈曲临界压力计算的整体稳定安全系数不应低于 2.0。

10.5 安装

- 10.5.1 钢烟囱的制作、焊接和验收应符合本标准 8.7 条、8.8 条和 8.10 条的相关要求。
- 10.5.2 套筒式自立式钢烟囱宜采用分段吊装，法兰对接连接。吊装前应根据现场实际情况做预做吊装方案。
- 10.5.3 烟囱吊装使用的吊耳，横杆等吊装辅助工装应通过计算确定。
- 10.5.4 自立式钢烟囱底端基础法兰与混凝土基础之间的二次灌浆层宜在烟囱吊装结束后施工，并应尽早完成。
- 10.5.5 其他安装要求应符合本标准 8.9 条相关要求。

11 砖烟囱

11.1 一般规定

11.1.1 砖烟囱筒壁设计，应进行下列计算和验算：

1 水平截面应进行承载力极限状态计算和荷载偏心距验算，并应符合下列规定：

- 1) 在永久作用和风荷载设计值作用下，按本标准 11.2.1 条的规定进行承载力极限状态计算。
- 2) 抗震设防烈度为 6 度（III、IV 类场地）以上地区的砖烟囱，应按本标准第 11.5 节有关规定进行竖向钢筋计算。
- 3) 在永久作用和风荷载设计值作用下，按本标准第 11.2.2 条验算水平截面抗裂度。

2 在温度作用下，应按正常使用极限状态，进行环向钢箍或环向钢筋计算。计算出的环向钢箍或环向钢筋截面积，小于构造值时，应按构造值配置。

11.2 水平截面计算

11.2.1 筒壁在永久作用和风荷载共同作用下，水平截面极限承载力应按下列公式计算：

$$N \leq \varphi f A \quad (11.2.1-1)$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{e_0}{i} + \beta \sqrt{\alpha}\right)^2} \quad (11.2.1-2)$$

$$\beta = h_d / d \quad (11.2.1-3)$$

式中 N ——永久作用产生的轴向压力设计值(N)；

f ——砖砌体抗压强度设计值，按现行国家标准《砌体结构设计规范》

GB50003 的规定采用；

A ——计算截面面积 (mm^2)；

φ ——高径比 β 及轴向力偏心距 e_0 对承载力的影响系数；

β ——计算截面以上筒壁高径比；

h_d ——计算截面至计算筒壁顶端的高度（m）；

d ——烟囱计算截面直径（m）；

i ——计算截面的回转半径（m）；

e_0 ——在风荷载设计值作用下，轴向力至截面重心的偏心距（m）；

α ——与砂浆强度等级有关的系数，当砂浆等级 \geq M5时， $\alpha = 0.0015$ ；当砂浆强度等级为 M2.5 时， $\alpha = 0.0020$ 。

11.2.2 筒壁的水平截面抗裂度，应符合下列公式的要求：

$$e_k \leq r_{com} \quad (11.2.2-1)$$

$$r_{com} = W / A \quad (11.2.2-2)$$

式中 e_k ——在风荷载标准值作用下，轴向力至截面重心的偏心距（m）；

r_{com} ——计算截面核心距（m）；

W ——计算截面最小弹性抵抗距（ m^3 ）。

11.2.3 在风荷载设计值作用下，轴向力至截面重心的偏心距，应满足以下条件：

$$e_0 \leq 0.6a \quad (11.2.3)$$

式中 a ——计算截面重心至筒壁外边缘的最小距离（m）。

11.2.4 配置竖向钢筋的筒壁截面可不受本标准第 11.2.2 条和第 11.2.3 条限制。

11.3 环向钢箍计算

11.3.1 在筒壁温度差作用下，筒壁每米高度所需的环向钢箍截面面积，可按下列公式计算：

$$A_h = 500 \frac{r_2}{f_{at}} \varepsilon_m E'_{mt} \ln\left(1 + \frac{t\varepsilon_m}{r_1\varepsilon_t}\right) \quad (11.3.1-1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\gamma_t t \alpha_m \Delta T}{r_2 \ln(r_2 / r_1)} \quad (11.3.1-2)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_t - \frac{f_{at}}{E_{sh}} \geq 0 \quad (11.3.1-3)$$

$$E_{sh} = \frac{E}{1 + \frac{n}{6r_2}} \quad (11.3.1-4)$$

式中 A_h ——每米高筒壁所需的环向钢箍截面面积 (mm^2) ;

r_1 ——筒壁内半径 (mm);

r_2 ——筒壁外半径 (mm), 用于式 (11.3.1-4) 时单位为 m ;

ε_m ——筒壁内表面相对压缩变形值;

ε_t ——筒壁外表面在温度差作用下的自由相对伸长值;

α_m ——砖砌体线膨胀系数, 取 $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$;

γ_t ——温度作用分项系数, 取 $\gamma_t = 1.6$;

ΔT ——筒壁内外表面温度差 ($^\circ\text{C}$);

t ——筒壁厚度 (mm);

f_{at} ——环向钢箍抗拉强度设计值, 可取 $f_{at} = 145 \text{ N/mm}^2$;

E'_{mt} ——砖砌体在温度作用下的弹塑性模量, 当筒壁内表面温度 $T \leq 200 ^\circ\text{C}$

时, 取 $E'_{mt} = E_m / 3$; 当 $T \geq 350 ^\circ\text{C}$ 时, 取 $E'_{mt} = E_m / 5$; 中间值线性插

入求得。 E_m 为砖砌体弹性模量, 按国家标准《砌体结构设计规范》

GB50003 的规定采用。

E_{sh} ——环向钢箍折算弹性模量 (N/mm^2);

E ——环向钢箍钢材弹性模量 (N/mm^2);

n ——一圈环向钢箍的接头数量。

11.3.2 筒壁内表面相对压缩变形值 $\varepsilon_m < 0$ 时, 应按构造配环向钢箍。

11.4 环向钢筋计算

11.4.1 当砖烟囱采用配置环向钢筋的方案时, 在筒壁温度差作用下, 每米高筒壁所需的环向钢筋截面面积, 可按下列公式计算:

$$A_{sm} = 500 \frac{r_s \eta}{f_{yt}} \varepsilon_m E'_{st} \ln(1 + \frac{t_0 \varepsilon_m}{r_1 \varepsilon_t}) \quad (11.4.1-1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\gamma_t t_0 \alpha_m \Delta T_s}{r_s \ln(r_s / r_1)} \quad (11.4.1-2)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_t - \frac{\psi_{st} f_{yt}}{E_{st}} \geq 0 \quad (11.4.1-3)$$

$$t_0 = t - a \quad (11.4.1-4)$$

式中 A_{sm} ——每米高筒壁所需的环向钢筋截面面积 (mm^2)

t_0 ——计算截面筒壁有效厚度 (mm);

a ——筒壁外边缘至环向钢筋的距离, 单根环向钢筋取 $a = 30\text{mm}$, 双根筋取 $a = 45\text{mm}$;

r_s ——环向钢筋所在圆 (双根筋为环向钢筋重心处) 半径 (mm);

ΔT_s ——筒壁内表面与环向钢筋处温度差值;

η ——与环向钢筋根数有关的系数, 单根筋 (指每个断面) $\eta = 1.0$, 双根筋时 $\eta = 1.05$;

f_{yt} ——温度作用下, 钢筋抗拉强度设计值 (N/mm^2);

E_{st} ——环向钢筋在温度作用下弹性模量 (N/mm^2);

γ_t ——温度作用分项系数, 取 $\gamma_t = 1.4$;

ψ_{st} ——裂缝间环向钢筋应变不均匀系数, 当筒壁内表面温度 $T \leq 200^\circ\text{C}$ 时,

$\psi_{st} = 0.6$; $T \geq 350^\circ\text{C}$ 时, $\psi_{st} = 1.0$, 中间值线性插入求得。

11.4.2 筒壁内表面相对压缩变形值 $\varepsilon_m < 0$ 时, 应按构造配环向钢筋。

11.5 竖向钢筋计算

11.5.1 抗震设防地区的砖烟囱竖向配筋, 可按下列规定确定:

1 各水平截面所需的竖向钢筋截面面积, 可按下列公式计算:

$$A_s = \frac{\beta M - (\gamma_G G_k - \gamma_{Ev} F_{Evk}) r_p}{r_p f_{yt}} \quad (11.5.1-1)$$

$$M = \gamma_{Eh} M_{Ek} + \psi_{cWE} \gamma_W M_{Wk} \quad (11.5.1-2)$$

$$\beta = \frac{\theta}{\sin \theta} \quad (11.5.1-3)$$

$$\theta = \pi - \frac{\sin \theta}{a_c} \quad (11.5.1-4)$$

式中 A_s ——计算截面所需的竖向钢筋总截面面积(mm^2);

β ——弯矩影响系数 (图 11.5.1);

M_{Ek} ——水平地震作用在计算截面产生的弯矩标准值 ($\text{N}\cdot\text{m}$);

M_{Wk} ——风荷载在计算截面产生的弯矩标准值 ($\text{N}\cdot\text{m}$);

G_k ——计算截面重力标准值 (N);

F_{Evk} ——计算截面竖向地震作用产生轴向力标准值 (N);

r_p ——计算截面筒壁平均半径 (m);

f_{yt} ——考虑温度作用钢筋抗拉强度设计值 (N/mm^2);

γ_{Eh} ——水平地震作用分项系数 $\gamma_{Eh} = 1.3$;

γ_W ——风荷载分项系数 $\gamma_W = 1.4$;

θ ——受压区半角;

γ_G ——重力荷载分项系数, $\gamma_G = 1.0$;

γ_{Ev} ——竖向地震作用分项系数, 按本标准表 3.1.8-1 规定采用;

ψ_{cWE} ——地震作用时风荷载组合系数, 取 $\psi_{cWE} = 0.2$ 。

2 弯矩影响系数 β , 可根据参数 a_c 由图 11.5.1 查得。 a_c 可按下列式计算:

$$a_c = \frac{M}{\varphi_0 r_p A f - (\gamma_G G_k - \gamma_{Ev} F_{Evk}) r_p} \quad (11.5.1-5)$$

式中 φ_0 ——轴心受压纵向挠曲系数, 按本标准公式 (11.2.1-2) 计算时取 $e_0 = 0$;

A ——计算截面筒壁截面面积 (mm^2);

f ——砖砌体抗压强度设计值 (N/mm^2)。

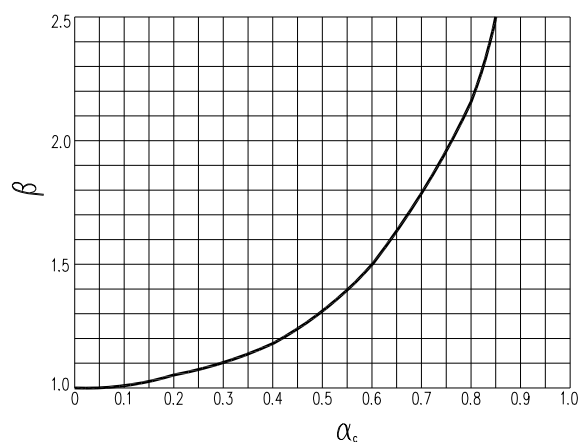


图 11.5.1 弯矩影响系数 β

11.5.2 当计算出的配筋值小于构造配筋时，应按构造配筋。

11.5.3 配置竖向钢筋的砖烟囱应同时配置环向钢筋。

11.6 构造规定

11.6.1 砖烟囱筒壁宜设计成截顶圆锥形，筒壁坡度、分节高度和壁厚应符合下列规定：

- 1 筒壁坡度宜采用 2%~3%。
- 2 分节高度不宜超过 15m。
- 3 筒壁厚度应按下列原则确定：
 - 1) 当筒壁内径小于或等于 3.5m 时，筒壁最小厚度应为 240mm。当内径大于 3.5m 时，最小厚度应为 370mm。
 - 2) 当设有平台时，平台所在节的筒壁厚度宜大于或等于 370mm。
 - 3) 筒壁厚度可按分节高度自下而上减薄，但同一节厚度应相同。
 - 4) 筒壁顶部可向外局部加厚，总加厚厚度宜为 180mm，并应以阶梯向外挑出，每阶挑出不宜超过 60mm。加厚部份的上部以 1:3 水泥砂浆抹成排水坡（图 11.6.1）。

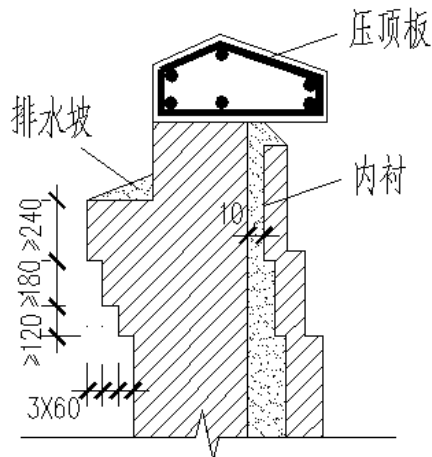


图 11.6.1 筒首构造 (单位: mm)

11.6.2 内衬到顶的烟囱宜设钢筋混凝土压顶板 (图 11.6.1)。

11.6.3 支承内衬的环形悬臂应在筒身分节处以阶梯形向内挑出, 每阶挑出不宜超过 60mm, 挑出总高度应由剪切计算确定, 但最上阶的高度不应小于 240mm。

11.6.4 筒壁上孔洞设置应符合下列规定:

1 在同一平面设置两个孔洞时, 宜对称设置。

2 孔洞对应圆心角不应超过 50° 。孔洞宽度不大于 1.2m 时, 孔顶宜采用半圆拱; 孔洞宽度大于 1.2m 时, 宜在孔顶设置钢筋混凝土圈梁。

3 配置环向钢箍或环向钢筋的砖筒壁, 在孔洞上下砌体中应配置直径为 6mm 环向钢筋, 其截面面积不应小于被切断的环向钢箍或环向钢筋截面积。

4 当孔洞较大时, 宜设砖垛加强。

11.6.5 筒壁与钢筋混凝土基础接触处, 当基础环壁内表面温度大于 100°C 时, 在筒壁根部 1.0m 范围内, 宜将环向配筋或环向钢箍增加 1 倍。

11.6.6 环向钢箍按计算配置时, 间距宜为 0.5~1.5m; 按构造配置时, 间距不宜大于 1.5m。

环向钢箍的宽度不宜小于 60mm, 厚度不宜小于 6mm。每圈环向钢箍接头不应少于 2 个, 每段长度不宜超过 5m。环向钢箍接头的螺栓宜采用 Q235 级钢材, 其净截面面积不应小于环向钢箍截面面积。环向钢箍接头位置应沿筒壁高度互相错开。环向钢箍接头做法见图 11.6.6。

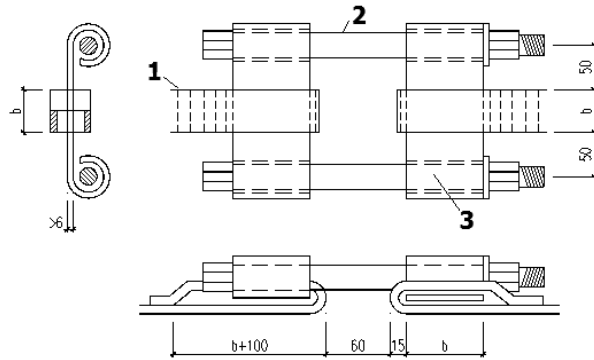


图 11.6.6 环向钢箍接头 (mm)

1-环向钢箍 2-螺栓 3-套环

11.6.7 环向钢箍安装时应施加预应力，预应力可按表 11.6.7 采用。

表 11.6.7 环向钢箍预应力值 (N/mm²)

安装时温度 (°C)	T > 10	10 ≥ T ≥ 0	T < 0
预应力值	30	50	60

11.6.8 环向钢筋按计算配置时，直径宜为 6mm~8mm，间距不应少于三皮砖，且不应大于八皮砖；按构造配置时，直径宜为 6mm，间距不应大于八皮砖。

同一平面内环向钢筋不宜多于 2 根，2 根钢筋的间距为 30mm。

钢筋搭接长度应为钢筋直径的 40 倍，接头位置应互相错开。

钢筋的保护层应为 30mm (图 11.6.8)。

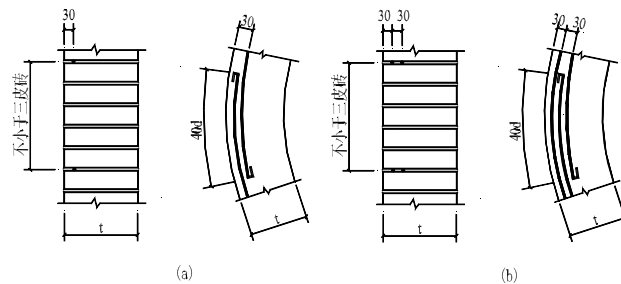


图 11.6.8 环向钢筋配置 (mm)

(a) 单根环向钢筋； (b) 双根环向钢筋

11.6.9 在环形悬臂和筒壁顶部加厚范围内，环向钢筋应适当增加。

11.6.10 抗震设防地区的砖烟囱，其最小配筋不应小于表 11.6.10 的规定。

表 11.6.10 抗震设防地区砖烟囱上部的最小配筋

配筋方式	烈度和场地类别		
	6度III、IV类 场 地	7度 I、II类 场 地	7度III、IV类场地 8度 I、II类场地
配筋范围	0.5H 到顶端	0.5H 到顶端	H≤30m 时全高 H>30m 时由 0.4H 到顶端
竖向配筋	φ10, 间距 500mm~ 700mm, 且不少于 6 根	φ10, 间距 500mm~ 700mm, 且不少于 6 根	φ12, 间距 500mm, 且 不少于 6 根

注: 1 竖向筋接头应搭接钢筋直径的 40 倍, 钢筋在搭接范围内应用铁丝绑牢, 钢筋宜设直角弯钩。

2 烟囱顶部宜设钢筋混凝土压顶圈梁以锚固竖向钢筋。

3 竖向钢筋配置在距筒壁外表面 120mm 处。

11.7 施工

11.7.1 砖烟囱筒壁应采用标准型或异型的一等烧结普通黏土砖砌筑, 其强度等级应符合设计要求。当有抗冻要求时, 砖的抗冻性指标应符合设计要求。砌筑在筒壁外表面的砖应无裂缝且至少有一端棱角完整。

11.7.2 在常温下施工时, 应提前将砖浇水湿润, 其含水率宜为 10%~15%。

11.7.3 砂浆用砂宜采用中砂, 并应过筛, 不得含有草根等杂物。强度等级不小于 M5 的水泥砂浆, 其砂的含泥量不应超过 1%; 强度等级小于 M5 的水泥砂浆, 其砂的含泥量不应超过 3%。

11.7.4 砌筑砂浆的配合比应采用重量比, 其稠度应为 80~100mm。砂浆应随拌随用, 初凝前应使用完毕。

11.7.5 筒壁砌体砖缝的砂浆应饱满, 砂浆饱满度不得低于 80%。不得用水冲浆灌缝。筒壁外部砖缝均应勾缝, 勾缝砂浆宜采用细砂拌制的 1:1.5 水泥砂浆。

11.7.6 埋设环向钢筋的砖缝厚度, 应大于钢筋直径 4mm, 钢筋上下应至少各有 2mm 厚的砂浆层。

11.7.7 筒壁配置钢筋的位置、接头和锚固长度等应符合设计要求。

11.7.8 砌筑筒壁前, 应先检查基础环壁或环梁上表面的平整度, 并应采用 1:2 水泥砂浆找平, 其表面平整度不得超过 20mm, 砂浆找平层的厚度不得超过 30mm。

11.7.9 砌筑筒壁前应设置皮数杆和坡度尺。

11.7.10 筒壁的中心及半径, 应每砌筑 1.25m 高检查一次, 并应纠正检查出的偏差。

- 11.7.11 筒壁应采用顶砖砌筑，当筒壁外径大于 5m 时，也可采用顺砖和顶砖交错砌筑。
- 11.7.12 当筒壁厚度不小于一砖半时，内外砖层可使用 1/2 砖，但小于 1/2 砖的碎块不得使用。
- 11.7.13 砌体上下层环缝应交错 1/2 砖，辐射缝应交错 1/4 砖，异型砖应交错其宽度的 1/2。
- 11.7.14 将普通烧结黏土砖加工成顶砌的异型砖时，应在砖的一个侧面进行，加工后小头的宽度不宜小于原宽度的 2/3。砌筑后的筒壁外表面，砖角错牙不得超过 5mm。
- 11.7.15 砌体砖层可砌成水平，也可砌成向烟囱中心倾斜，其倾斜度应与筒壁外表面的坡度相垂直。砖层的倾斜度应经常检查。
- 11.7.16 砌筑筒壁时，每 5m 高应取一组砂浆试块，在砂浆强度等级或配合比变更时应另取试块。
- 11.7.17 筒壁外安装的环箍应水平，接头的位置应沿筒壁高度互相错开；环箍在安装前应涂刷防锈剂，安装时，应在砌筑砂浆强度达到 40% 后方可拧紧螺栓，并使环箍紧贴筒壁。

11.8 施工质量检验

11.8.1 砖烟囱筒壁应每 10m 划分为一个检验批。

11.8.2 砖烟囱筒壁质量标准及检验方法应符合表 11.8.2 的规定。

表 5.3.2 砖烟囱筒壁质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检 验 方 法	
主控项目	1	砖烟囱筒壁材料质量	应符合设计要求和现行国家标准《砌体结构工程施工质量验收规范》GB50203 的有关规定	-	检查进场合格证和试验报告	
	2	砂浆饱满度	≥80%	-	抽查 3 处，每处掀起 3 块砖，用百格网检查粘结面积，取平均值	
一般项目	1	筒壁中心线垂直度	筒壁高度	20m	35	尺寸、线坠或经纬仪检查
				40m	50	
				60m	65	
	2	筒壁砖缝厚度	+5 -2	mm	在 5 m ² 的表面上抽查 10 处，用塞尺检查。	
	3	筒壁高度	筒壁全高的 0.15%	mm	尺寸检查或水准仪	抽查数量不少于 10 处
	4	筒壁任何截面上的半径	该截面筒壁半径的 1%，且 ≤30	mm	尺寸检查	
	5	筒壁内外表面的局部的凹凸不平（沿半径方向）	该截面筒壁半径的 1%，且 ≤30	mm	尺寸检查	
	6	烟道口中心线	15	mm	尺寸检查	
7	烟道口标高	+30 -20	mm	尺寸检查或水准仪		
8	烟道口高度和宽度	+30 -20	mm	尺寸检查		

注： 1 筒壁中心线垂直度允许偏差值系指一座烟囱在不同标高的允许偏差。
 2 中间值用插入法计算。

12 烟囱的防腐蚀

12.1 一般规定

12.1.1 烟囱设计应按烟气分类和腐蚀等级，采取对应的防腐蚀措施。

12.1.2 对于烟气主要腐蚀介质为二氧化硫的干烟气，当烟气温度低于 150℃，且烟气二氧化硫含量大于 500ppm 时，应考虑烟气的腐蚀性影响，并按以下规定确定其腐蚀等级：

- 1 当烟囱排放烟气的二氧化硫含量为 500ppm~1000ppm 时，为弱腐蚀干烟囱；
- 2 当烟囱排放烟气的二氧化硫含量大于 1000ppm 但小于或等于 1800ppm 时，为中等腐蚀干烟囱；
- 3 当烟囱排放烟气的二氧化硫含量大于 1800ppm 时，为强腐蚀干烟囱。

12.1.3 湿烟囱的烟气流速应符合以下规定：

- 1 确定烟囱出口烟气流速时，应综合考虑建设或改造的经济性、长期运行的安全性以及污染物落地浓度等要求，并宜使烟囱和烟道在负压状态下运行。
- 2 新建湿烟囱，烟气流速宜满足表 12.1.3 要求。

表 12.1.3 烟气流速推荐值

内衬或内筒材料	烟气流速 (m/s)
耐酸砖	≤14
硼硅酸盐玻璃砖	≤18
其他材料	≤17

注：“其他材料”包括纤维增强塑料内筒、金属内衬、涂料等。

- 3 既有烟囱改造，烟气流速可按本标准第 17.2.6 条的有关规定执行。

12.1.4 湿烟囱设计应符合下列规定：

- 1 湿烟囱宜设置冷凝液收集系统装置。
- 2 烟囱顶部钢筋混凝土外筒筒首、避雷针和爬梯等应考虑烟羽造成的腐蚀影响，并采取防腐蚀措施。
- 3 新建排烟筒应设置用于定期检修、维护的平台和竖向通道。
- 4 既有烟囱采用新增内筒防腐改造方案时，可按本标准第 17.2.6 条的有关规定执行。

12.1.5 冷凝液收集系统装置设计应符合下列规定：

- 1 当有吸收塔时，冷凝液收集系统装置设计宜从吸收塔开始，至排烟筒顶部出口。

2 安装湿式静电除尘器的净烟道，冷凝液收集系统装置设计宜从湿式静电除尘器出口烟道开始至排烟筒顶部出口。

3 冷凝液收集系统装置的位置、形状、大小、数量宜采取多相流场仿真分析确定，必要时应结合物理模型试验结果确认。

12.1.6 烟囱设计应考虑周围环境对烟囱外部的腐蚀影响，可根据现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》（GB50046）采取防腐蚀措施。

12.1.7 当烟囱所排烟气的特性发生变化时，应对原烟囱的防腐蚀措施进行重新评估，并按本标准第 17 章有关规定执行。

12.2 防腐材料和烟囱排烟筒型式的选择

12.2.1 烟囱防腐材料的选择应根据烟囱的分类和腐蚀等级确定，可按照表 12.2.1 的要求并结合工程实际情况进行选取。

表 12.2.1 烟囱防腐材料选用表

内衬或防腐材料	湿烟囱	潮湿烟囱	干烟囱			适用的排烟筒型式
			强腐蚀	中腐蚀	弱腐蚀	
缠绕纤维增强塑料	☆	□	—	—	—	套筒或多管式
硼硅酸盐泡沫玻璃砖	☆	□	—	—	—	单筒式,套筒或多管式
镍基或钛基复合金属内衬	☆	□	△	—	—	钢或钢内筒
防腐涂层	△	□	□	□	□	钢或钢内筒
轻质防腐砖内衬	△	□	—	—	—	套筒或多管式
	×	□	—	—	—	单筒式
不锈钢内衬	×	△	☆	☆	—	钢烟囱
普通耐酸砖内衬	×	□	☆	□	—	套筒式
	×	△	□	☆	□	单筒式
普通砖或耐火砖内衬	×	×	△	□	☆	单筒式
	×	×	×	□	☆	砖烟囱

注：1 表中符号表示：“☆”为建议采用；“□”为可采用；“△”为谨慎采用；“×”为不应采用；“—”为可采用但经济性差；

2 选择表中所列防腐材料时，其性能应与排烟筒实际运行工况和使用年限要求相适应，宜选用有工程应用成功业绩的烟囱防腐材料；

3 两台及多台炉共用一个排烟筒时，应按更加可靠的防腐材料选用；

4 在有可靠工程经验或成功工程业绩时，允许选用新型防腐材料。

12.2.2 烟囱结构型式的选择应符合下列规定：

1 烟囱结构型式的选择应根据防腐蚀方案按表 12.2.1 选择单筒烟囱、套筒烟囱或多管烟囱。

2 每个排烟筒接入锅炉台数应结合排烟筒的防腐措施确定，并应满足以下要求：

- 1) 125MW 级及以下机组每个排烟筒接入锅炉台数不宜超过四台；
- 2) 200MW 级、300 MW 级机组每个排烟筒接入锅炉台数不宜超过二台；
- 3) 600MW 级机组每个排烟筒接入锅炉台数宜为一台；
- 4) 1000MW 及其以上机组应为每个排烟筒接入锅炉台数应为一台。

12.3 砖烟囱的防腐蚀

12.3.1 弱腐蚀干烟囱，烟囱内衬宜按烟囱全高设置；中等腐蚀干烟囱，烟囱内衬应按烟囱全高设置。

12.3.2 中等腐蚀干烟囱，烟囱内衬宜采用耐火砖和耐酸胶泥（或耐酸砂浆）砌筑。

12.4 单筒式钢筋混凝土烟囱的防腐蚀

12.4.1 单筒式钢筋混凝土烟囱内衬和隔热层应满足以下规定：

1 干烟囱和潮湿烟囱，内衬可采用以下材料：

- 1) 耐酸砖（砌块）和耐酸胶泥砌筑。排放弱腐蚀烟气时，内衬最小厚度不宜小于 120mm；排放中等腐蚀烟气时，内衬最小厚度不宜小于 150mm；排放强腐蚀烟气时，内衬最小厚度不宜小于 200mm；
- 2) 轻质、耐酸、隔热整体浇筑防腐内衬。内衬厚度不宜小于 150mm，并在混凝土内壁设置防腐隔离层；
- 3) 潮湿烟囱可采用轻质泡沫玻璃砖防腐系统。

- 2 湿烟囱宜采用硼硅酸盐泡沫玻璃砖内衬系统。
- 3 采用耐酸砖（砌块）和耐酸胶泥砌筑内衬时，隔热层应采用耐酸、憎水性的材料制品。

12.4.2 烟囱内衬耐酸砖（砌块）和耐酸砂浆（或耐酸胶泥）砌筑应采用挤压法施工，砌体中的水平灰缝和垂直灰缝应饱满、密实。当采用轻质、耐酸、隔热整体浇注防腐蚀内衬时，应采取内衬防开裂措施。

12.5 套筒式和多管式烟囱的砖内筒防腐蚀

12.5.1 砖内筒的材料选择应符合下列规定：

- 1 中等腐蚀干烟囱，砖内筒宜采用耐酸砖（砌块）和耐酸胶泥（耐酸砂浆）砌筑；砖内筒的保温隔热层宜采用轻质隔热防腐的玻璃棉制品。
- 2 强腐蚀干烟囱或潮湿烟囱，排烟内筒应采用耐酸砖（砌块）和耐酸胶泥（耐酸砂浆）砌筑；砖内筒的保温隔热层应采用轻质隔热防腐的玻璃棉制品。
- 3 在满足砖内筒砌体强度和稳定的条件下，宜采用轻质耐酸材料砌筑。
- 4 排烟内筒耐酸砖（砌块）宜采用异形形状，砌体施工应符合本标准 12.4.4 条有关规定。

12.5.2 砖内筒防腐蚀应符合下列规定：

- 1 内筒中排放的烟气宜处于负压运行状态。当出现正压运行状态时，耐酸砖（砌块）砌体结构的外表面应设置密实型耐酸砂浆封闭层；或在内外筒间的夹层中设置风机加压，使内外筒间夹层中的空气压力超过相应处排烟内筒中的烟气压力值 50Pa。
- 2 内筒外表面应按照计算和构造要求确定设置保温隔热层，并使烟气不在内筒内表面出现结露现象。
- 3 内筒各分段接头处，应采用耐酸防腐蚀材料连接，要求烟气不渗漏，满足温度伸缩要求。
- 4 砖内筒支承结构应进行防腐蚀保护。

12.6 套筒式和多管式烟囱的钢内筒防腐蚀

12.6.1 钢内筒内衬应按本标准表 12.2.1 选用。

12.6.2 钢内筒材料及结构构造应符合下列规定：

- 1 钢内筒的外表面和导流板以下的内表面应采用耐高温防腐蚀涂料防护。
- 2 钢内筒的外保温层应分二层铺设，接缝应错开。钢内筒采用泡沫玻璃砖内衬时，可不设外保温层。
- 3 钢内筒筒首保温层应采用不锈钢包裹，其余部位可采用铝板包裹。

12.7 钢烟囱的防腐蚀

12.7.1 钢烟囱内衬防腐蚀设计可参照本标准 12.6 节设计进行。

12.7.2 钢烟囱外表面应考虑大气环境的腐蚀影响因素，宜采用长效防腐蚀措施。

12.8 施工

12.8.1 普通砖或耐火砖采用水玻璃耐酸胶泥和耐酸砂浆砌筑内衬质量标准及检验方法，应符合表 12.8.1 的规定。

表 12.8.1 普通转或耐火砖采用水玻璃耐酸胶泥和耐酸砂浆砌筑内衬质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质 量 标 准	单 位	检 验 方 法
主控项目	1	水玻璃类材料的品种规格、性能	应符合设计要求和国家现行标准《火力发电厂烟囱(烟道)内衬防腐材料》DL/T901 的有关规定	-	检查产品出厂质量证明文件和现场取样检验
	2	水玻璃类材料的施工配比	应符合设计要求	-	检查材料施工使用指南、现场试验和搅拌记录
一般项目	1	表面平整度	沿半径方向不大于 30	mm	半径方向尺寸检查，检查 10 点
	2	厚度	不小于设计厚度		测针和尺量检查，检查 10 点
	3	外观	填充饱满，表面平整，圆弧均匀。无环形断裂、裂缝和空壳松散现象	-	检查数量 50m ² 一处

12.8.2 耐酸砖采用水玻璃耐酸胶泥砌筑内衬质量标准及检验方法应符合表 12.8.2 的规定。

表 12.8.2 耐酸砖采用水玻璃耐酸胶泥砌筑内衬质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法	
主控项目	1	耐酸砖的品种、规格性能	应符合设计要求和国家现行标准《火力发电厂烟囱(烟道)内衬防腐材料》DL/T901的有关规定	-	检查出厂质量证明文件和现场取样检测	
	2	耐酸砖的外观质量	裂纹	宽度小于 0.2, 长度不限	mm	塞尺量测
				宽度 0.2~0.5, 长度小于 50		
				宽度大于 0.5, 不允许有裂纹		
		釉面(工作面)	不允许有开裂和釉裂	-	目测	
		变形	翘 曲: 大面 1.0	mm	直尺何塞尺量测	
大小头: 大面 2.5						
		条面、顶面: 1.0				
一般项目	1	胶泥饱满度	≥95%	-	用百格网检查, 抽查 3 处, 每处检查 3 块, 取平均值	
		厚度 4 mm	允许增大量为 2	mm	塞尺检查, 在 5m ² 表面抽取 10 点, 允许增大不超过 5 点	

12.8.3 钢或钢内筒烟囱采用防腐蚀涂料内衬质量标准及检验方法应符合表 12.8.3 的规定。

表 12.8.3 钢或钢内筒烟囱采用防腐蚀涂料内衬质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	防腐蚀涂料、稀释剂、固化剂材料品种、规格、性能等	应符合设计要求	-	检查出厂资料、合格证
	2	涂装前钢材表面除锈	应符合设计要求和现行国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB8923 的有关规定	-	铲刀、观察检查
	3	涂装遍数、厚度	应符合设计要求	-	采用漆膜测厚仪检查
	4	涂层厚度偏差	设计值的 (-5, +20) %	μm	
一般项目	1	防腐蚀涂料的型号、名称、颜色及有效期	应与其质量证明文件相符	-	观察检查
	2	表面	不应漏涂、涂层应均匀, 无脱皮、返锈且无明显皱皮、流坠、针眼和气泡等	-	观察检查
	3	涂层附着力测试	应符合设计要求和国家现行标准《涂层附着力测定法(拉开法)》CB/T5210 的有关规定	-	仪器检查

13 烟囱平台

13.1 一般规定

13.1.1 烟囱平台结构应进行承载能力和正常使用极限状态设计。平台设计除应符合本标准外，尚应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB50017 和《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定。受到烟气温度影响时，还应考虑由于温度作用造成材料强度的降低。

13.1.2 钢平台、钢梯、栏杆制作和安装除应符合本标准外，尚应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 和《钢结构工程施工规范》GB50755 的有关规定。

13.1.3 钢平台和钢梯的预埋件材质、型号、尺寸、标高及安装角度应符合设计规定。

13.1.4 混凝土平台施工和质量检验除应符合本章的规定外，还应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的有关规定；钢筋安装和混凝土质量标准及检验方法应符合本标准第 6.13.1 和 6.13.3 条的规定。

13.2 平台设计

13.2.1 永久平台的设计应按本标准 5.3.1 的规定取用活荷载。

13.2.2 施工用平台的荷载取值应符合下列规定：

1 仅在烟囱施工时使用且施工完毕后需拆除的临时平台，其荷载应根据施工方案确定，并应考虑施工过程中的不利工况。

2 当利用永久平台作为施工用平台时，应根据施工方案对永久平台进行施工阶段验算，其荷载应根据施工方案确定，并应考虑施工过程中的不利工况。

3 除非施工方案对所有施工荷载均已明确，施工平台宜另考虑 7kN/m^2 的均布施工活荷载。

4 当悬挂内筒采用提升工艺且利用永久悬挂平台作为提升平台时，应对该平台按提升施工工况进行验算。提升荷载可取筒体总重量的 1.2~1.25 倍；各提升点的荷载分配宜考虑可能发生的提升不同步工况。

13.2.3 平台钢结构构件应根据受力情况进行强度、整体稳定和局部稳定计算。

13.2.4 平台结构构件的变形和挠度应满足有关标准及吊装要求。

13.2.5 平台钢结构构件的连接可采用焊接或高强螺栓连接，连接节点的设计宜考虑施工的可操作性。

13.2.6 各层平台应根据施工和检修需求设置吊物孔。吊物孔尺寸及吊物荷载，应根据施工和检修方案确定。当内筒施工采用提升工艺时，提升平台及其以下平台的吊物孔尺寸不宜小于 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 。平台下可按需设置临时性或永久性起吊设施。

13.2.7 平台的通道宽度不应小于 750mm。临近内筒处，平台梁边与内筒加劲肋外边缘之间的净距离不应小于 100mm。

13.2.8 平台和走道的应能到达包括烟气监测点、航标灯、制晃点等的各巡视和检修地点。

13.2.9 各相邻平台之间应设置垂直交通设施，扶梯角度不宜大于 45° ，各梯段高度不宜大

于 5.0m，直爬梯应设护笼。

13.2.10 平台和扶梯所有临空面均应设置栏杆和护沿，栏杆高度应符合相关规范要求，且不小于 1.2m。

13.2.11 平台和扶梯钢结构应根据环境腐蚀条件、防腐蚀设计年限等因素进行防腐蚀设计。钢平台易受到烟气冷凝酸液腐蚀的部位，应局部做防腐隔离措施。

13.2.12 各层平台应设置照明和必要的通讯设施。上层平台照明开关应设在下层平台上。

13.3 平台制作和安装工程

13.3.1 平台梁翼缘板、腹板拼接接头位置宜设置在距支座 1/3 跨度的范围内，翼缘板和腹板的拼接缝间距不应小于 200mm。

13.3.2 预制的钢平台构件尺寸应根据筒壁预埋件的实际尺寸进行复核调整。

13.3.3 组合平台中的压型钢板施工应在钢平台验收合格后进行，施工时应摆放整齐，并应分散放置。

13.3.4 混凝土平台施工应根据施工工艺，确定与筒壁的施工顺序。

13.3.5 自立式钢烟囱平台面宜采用镀锌钢格板铺设。

13.3.6 自立式钢烟囱上设置的钢直梯宜分段设置，钢直梯每段长度不宜大于 6m，每段钢梯与烟囱筒壁至少设置一个固定连接点，其余可设置活动连接点。

13.3.7 自立式钢烟囱上平台和梯子构件宜在工厂预制完成，可采用预组装方式加工制造，装配连接宜采用螺栓连接。现场安装时宜在地面组装完成后吊装烟囱。

13.4 施工质量检验

13.4.1 焊接钢梁制作质量标准及检验方法除应符合表 10.8.2 的规定外，还应符合表 13.4.1 的规定。一般项目检查数量不应少于 10 处。

表 13.4.1 焊接钢梁制作的质量标准及检验方法

类别	序号	项 目		质量标准/允许偏差	单位	检验方法	
主控项目	1	钢材品种、规格和性能		应符合设计要求和国家现行有关材料标准的规定	-	检查出厂合格证和试验报告	
	2	切割面或剪切面		应无裂纹、夹层和不大于 1mm 缺棱	-	观察和钢尺检查,必要时做超声波检查	
	3	制孔	A、B级	孔壁表面粗糙度	12.5	μm	用游标卡尺或孔径量规、粗糙度测量仪检查,抽查 10%,且不少于 3 处
				孔径	10~18mm	+0.18 0.00	
			18~30mm		+0.21 0.00		
			30~50mm		+0.25 0.00		
		C级	孔壁表面粗糙度	12.5	μm		
			直径	+1.0 0.0	mm		
			圆度	2.0			
	垂直度	0.03t,且≤2.0					
一般项目	1	梁长度	端部凸缘支座板	0 -5	mm	尺量检查	
			其他型式	+L/2500,且≤+10 -L/2500,且≥-10			
	2	端部高度	H≤2m	±2			
			H>2m	±3			
	3	侧向弯曲矢高		L/2000,且≤10		拉线和尺量检查	
	4	扭曲		H/250,且≤10			
	5	腹板局部平面度	t≤14mm	5.0		1m 直尺和尺量检查	
			t>14mm	4.0			
	6	翼缘板对腹板的垂直度		b/100,且≤3.0		直角尺和尺量检查	
	7	腹板中心线偏移		3		拉线和尺量检查	
8	翼缘板宽度偏差		±3	尺量检查			
9	箱型截面对角线差		5.0	尺量检查			
10	箱型截面两腹板至翼缘板中心线距离	连接处	±1.0	尺量检查			
		其他处	±1.5	尺量检查			

注: L 为梁长度, H 为梁高度, t 为钢板厚度, b 为翼缘板宽度。

13.4.2 钢平台和钢梯安装质量标准及检验方法除应符合表 8.10.3 的规定外,尚应符合表 13.4.2 的规定。一般项目检查数量不应少于 10 处。

表 13.4.2 钢平台和钢梯安装质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法		
主控项目	1	基础验收	应符合设计要求和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的规定	-	检查资料复测尺寸		
	2	构件验收	应符合设计要求和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的规定，无变形及涂层脱落	-	拉线，钢尺现场实测或观察检查		
一般项目	1	外观质量	所有构件表面应光滑、无毛刺，不应有歪斜、扭曲、变形及其他缺陷	-	观察检查		
	2	平台梁垂直度	$h/250$ ，且 ≤ 10	mm	尺量检查		
	3	平台梁侧向弯曲	$L/1000$ ，且 ≤ 10				
	4	主体结构的整体平面弯曲	总长度的 $1/1500$ ，且 ≤ 25				
	5	平台	支柱垂直度			支柱高度的 $1/1000$	垂线和尺量检查
			长度、宽度		± 4	尺量检查	
			两对角线差		6		
			支柱长度		± 5		
			平台表面平面度		3	1m 靠尺检查	
	6	格栅板	栅板片间距离		± 3	尺量检查	
			对 角 线 差		板长 $>3m$		6
					板长 $\leq 3m$		3
			栅板平面度		3	2m 靠尺和钢尺检查	
	7	钢梯	梯梁纵向绕曲矢高		梯梁长度的 $1/1000$	拉线和尺量检查	
			梯梁长度		± 5	尺量检查	
			梯安装孔距		± 3		
			梯宽		± 5		
			踏步平面度		$b/100$		
			踏步间距		± 5		
	8	栏杆	栏杆高度		± 5		尺量检查
栏杆立柱间距			± 10				

注：L 为平台梁长度，b 为钢梯宽度，h 为平台梁高度。

13.4.3 压型钢板质量标准及检验方法应符合表 13.4.3 的规定。

表 13.4.3 压型钢板质量标准及检验方法

类别	序号	项 目		质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	压型钢板品种、规格和质量		应符合设计要求和国家现行有关材料标准的规定	-	检查出厂质量证明文件
	2	外观质量		无涂层损伤、变形和颜色不匀	-	观察检查
	3	连接		应符合设计要求和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的规定，连接处应严密、不漏浆	-	观察检查
一般项目	1	铺设缝		相邻两排长边的搭接缝应错开	-	观察检查
	2	孔洞加固		应满足设计要求，位置准确、牢固	-	观察和钢尺检查
	3	压型钢板固定质量		焊钉（栓钉）施工应符合设计要求和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的规定	-	检查焊接工艺评定、现场焊接参数
	4	搭接长度	纵向	应符合设计要求或不小于 20	mm	钢尺检查
横向			应符合设计要求或不小于 1 波	钢尺检查		

13.4.4 混凝土平台模板安装质量标准及检验方法应符合表 13.4.4 的规定。

表 13.4.4 混凝土平台模板安装质量标准及检验方法

类别	序号	项 目		质量标准/允许偏差	单位	检验方法	
主控项目	1	模板及支架材料的技术指标		应符合国家现行有关标准的规定	-	检查质量证明文件，观察，尺量	
	2	模板及支架的安装质量		应符合国家现行有关标准的规定和施工方案要求	-	检查施工方案，观察，尺量	
一般项目	1	预埋件、预埋孔（洞）		应齐全、正确、牢固	-	观察检查	
	2	隔离剂		不得沾污钢筋与混凝土接合处	-	检查质量证明文件，观察检查	
	3	起拱度（长度≥4m）	设计有要求	应符合设计要求	mm	水准仪或钢尺检查	
			设计无要求	应为全跨长的 1/1000~3/1000			
	4	底模上表面标高		±5		水准仪、拉线或钢尺检查	抽查数量不少于 10 处
	5	相邻两模板表面高低差		2		钢尺检查	
	6	表面平整度		5		2m 靠尺和塞尺检查	
	7	预埋件中线位置		3		钢尺检查	
8	预埋孔（洞）	中心线位置	10	钢尺检查			
		尺寸	+10 0				

13.4.5 高强螺栓的连接应符合本标准第 8.10.6 条的规定。

14 单筒烟囱内衬及隔热层施工

14.1 一般规定

14.1.1 内衬和隔热层材料的运输、贮存和施工应采取防雨、防湿和防潮措施。有防冻要求的材料，应采取防冻措施。

14.1.2 钢内筒和钢烟囱内衬采用浇注料、喷涂料时，筒壁应进行基层处理，除锈应符合设计要求。锚固件设置应符合设计要求，焊接应牢固。

14.1.3 施工中不得任意改变不定形材料的配合比。不得在搅拌好的不定形材料内任意加水或其它物料。

14.2 砖内衬（筒）和隔热层

14.2.1 支承砖内衬（筒）的环形悬臂表面应用 1:2 水泥砂浆抹平。有防腐要求时，水泥砂浆找平层施工后，应按设计要求进行防腐处理。

14.2.2 内衬（筒）应分层砌筑，不应留直槎，砌体砖缝灰浆应饱满。内衬内表面和内筒表面均应勾缝。

砌筑用水泥砂浆应每 10m 留置一组试块。

14.2.3 内衬（筒）厚度为 1/2 砖时，应采用顺砖砌筑，并应互相交错半砖；厚度为 1 砖时，应用采用顶砖砌筑，并应互相交错 1/4 砖；异型砖应交错其宽度的 1/2。

14.2.4 采用空气隔热层的单筒烟囱，砌筑内衬应从内衬向烟囱筒壁方向挑出顶砖。顶砖应按梅花形布置，并按竖向间距 1m、环向间距 0.5m 挑出一块顶砖，顶砖与筒壁之间应留设 10mm 膨胀缝。当设计有规定时，应按设计规定留设。

14.2.5 筒壁与内衬之间的空隙内，应防止落入泥浆或砖屑。当设计规定填充隔热材料时，应在内衬每砌好 10 层砖后填充一次，隔热层应填充饱满。当隔热层为松散隔热材料时，应按设计规定留设防沉带。施工时，应经常检查隔热层厚度以及防沉带下部隔热层是否填充饱满。

14.2.6 防沉带在高度方向的间距宜为 1.5~2.5m。防沉带与筒壁之间，应留设 10mm 膨胀缝。当设计有规定时，应按设计规定留设。

14.3 不定型材料内衬

14.3.1 搅拌材料用水，应采取洁净水。沿海地区搅拌用水应经化验，其氯离子浓度不应大于 300mg/L。

14.3.2 用于浇筑的模板应有足够的刚度和强度，支模尺寸应准确，并应防止在施工过程中变形。模板接缝应严密，不应漏浆。模板表面应采取防粘措施。与浇注料接触的隔热衬体表

面，应采取防水措施。

14.3.3 浇注料和喷涂料应采用强制式搅拌机搅拌。配合比、搅拌时间和养护方法应按设计要求或使用说明书执行。浇注料和喷涂料在养护期间，不得受外力及振动。

14.3.4 浇注料的浇筑应连续进行。在前层浇注料凝结前，应将次层浇注料浇筑完毕。间歇超过凝结时间，应按施工缝要求处理。浇注料内衬表面不得有剥落、裂缝或孔洞等缺陷。

14.3.5 非承重模板，应在浇注料强度保证其表面和棱角不因拆模而受损坏或变形时，方可拆除；承重模板应在浇注料达到设计强度 70%后，方可拆除。

14.3.6 现场施工的浇注料，对每一种牌号或配合比，应每 20m³为一批留置试块检验，不足此数应作一批检验。

14.3.7 喷涂料施工前，应按喷涂料牌号规定的施工方法或说明进行试喷，并应确定各项参数。

14.3.8 喷涂前应检查金属支承件的位置、尺寸及焊接质量，焊渣应清理干净。支承架有钢丝网时，网与网之间应搭接一个格。但重叠不得超过 3 层，绑扣应朝向非工作面。

14.3.9 喷涂料应采用半干法喷涂。喷涂时，料和水应均匀连续喷射，喷涂面上不得出现干料和流淌。

14.3.10 喷涂应分段连续进行，并应一次喷到设计厚度。内衬设计较厚需分层喷涂时，应在前层喷涂料凝结前喷完次层。施工中断时，宜将接槎处做成直槎，继续喷涂前应将接槎处用水湿润。附着在支承件上的回弹料和散射料，应及时清除。

14.3.11 喷涂层厚度应及时检查，过厚部份应削平。检查喷涂层可用小锤轻轻敲打，发现空洞或夹层应及时处理。

14.4 施工质量验收

14.4.1 砖内衬（筒）应每 10m 高为一个检验批。

14.4.2 砖内衬（筒）和隔热层质量标准及检验方法应符合表 14.4.2 的规定。

表 14.4.2 砖内衬（筒）和隔热层质量标准及检验方法

类别	序号	检验项目		质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	内衬、隔热层材料品种、牌号、配合比		应符合设计要求和国家现行有关材料标准的规定	-	检查出厂合格证和试验报告
	2	灰浆饱满度	烧结普通黏土砖	≥80%	-	沿环向间隔 20m 抽查 1 处，但不应少于 3 处。每处掀 3 块砖用百格网检查砖底面与砂浆的粘结面积平均值
			黏土质耐火砖、轻质隔热砖	≥90%	-	
3	隔热层的隔热材料填充		应符合设计要求，填充饱满	-	观察检查	

一般 项 目	1	内 衬 (筒) 砖 缝	烧结普通黏土 砖	8 mm	+4 0	合格率≥80	在 5m ² 的表面上抽取 10 点， 与皮数杆比较，用尺量检查	mm	检查 10 处
			黏土质耐火砖、 轻质隔热砖	4 mm	±2	合格率≥90			
			耐火混凝土预 制块	6 mm	+3 -1	合格率≥80			
	2	内衬表面凹凸不平		半径方向≤30		半径方向尺寸，竖 向 2 米靠尺，楔形 塞尺检查			
				竖向≤ 8					
	3	砖 内 筒	半径		±20		尺量和仪器检查		
			高度		±0.1%				
	4	砖内 筒烟 道口	中心线		15		尺量和仪器检查		
			标高		±20				
			截面尺寸		±20				
5	隔热层厚度		±5		尺量检查				
6	支承内衬的环形悬臂上表面平 整度		5		2 米水平尺楔形塞 尺检查				

14.4.3 不定形材料内衬质量标准及检验方法应符合表 14.4.3 的规定。

表 14.4.3 不定形材料内衬质量标准及检验方法

类别	序号	检 验 项 目	质量标准/允许偏差	单 位	检 验 方 法	
主 控 项 目	1	原材料品种、牌号、配合 比	应符合设计要求和国家现行有关材料标准的 规定	-	检查出厂合格证和试验报告	
	2	内衬结构层间	应各层紧贴或填充饱满；表面平整、圆弧 均匀，无环形断裂、裂缝和空洞松散现象。	-	观察检查	
	3	浇注料试块	应符合设计要求	-	检查试块检验报告	
	4	锚固件和支承件	应符合设计要求，焊接应牢固	-	观察检查	
一 般 项 目	1	内 衬 表 面 凹凸不平	半径方向	≤ 20	半径方向尺量检查，竖向 2m 靠尺和楔形塞尺检查	检查 10 处
			竖向	≤ 8		
	2	内衬厚度	+10 -5	测针和尺量检查		
3	不定形材料与结合面基层 处理	应符合设计要求	-	观察检查		

15 烟道

15.1 一般规定

15.1.1 烟道型式划分

- 1 按排放烟气划分可分为干烟气烟道和湿烟气烟道；
- 2 按布置方式可分为地下烟道、地面烟道、架空烟道。

15.1.2 烟道布置、截面型式和尺寸由工艺确定，烟道结构型式和材料选择，宜符合下列规定：

- 1 当排放干烟气时，可采用砖砌烟道、钢筋混凝土框架填充墙、钢筋混凝土板墙或钢烟道；
- 2 当排放潮湿烟气时，宜采用钢烟道，可钢筋混凝土板墙、玻璃钢烟道；
- 3 当排放湿烟气时，应采用钢烟道、玻璃钢烟道；
- 4 下列情况地下烟道应采用钢筋混凝土烟道：
 - 1) 净空尺寸较大；
 - 2) 地面荷载较大或有汽车、火车通过；
 - 3) 有防水要求。
- 5 地下砖烟道的顶部应做成半圆拱；
- 6 钢筋混凝土板墙烟道宜为箱形；地下烟道可为槽型，顶盖为预制板；
- 7 钢烟道宜为圆筒形或矩形；
- 8 玻璃钢烟道应为圆形

15.1.3 烟道除采用玻璃钢结构外，烟道内壁应采取防腐蚀措施，并符合下列规定：

- 1 砖砌烟道、钢筋混凝土框架填充墙、钢筋混凝土板墙宜设置内衬及隔热层；防腐内衬材质应符合烟囱内衬防腐表要求；防腐内衬及隔热层与烟道结构应采取拉结措施；
- 2 当有检修条件且易于检修、更换时，钢烟道防腐宜采用防腐涂料涂层；也可按烟囱内衬防腐表选用。

15.1.4 烟道截面变化应平缓，转角处应做成斜角或圆角。与烟囱连接的钢烟道或玻璃钢烟道烟道应设置减震装置。

15.1.5 烟道应根据结构型式进行结构承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算，结构分析宜采用有限元分析软件整体计算。荷载组合应符合本标准 3.1.5 条规定。

15.1.6 对于排放干烟气、潮湿烟气的烟道，应按 5.6 章计算结构最高受热温度，最高受热温度不应大于材料的允许受热温度。

条文说明：基于整体建模结构分析，能有效的分析支架与烟道的协同工作和反映结构的受扭状态，并考虑目前结构分析软件和计算机的普及，故推荐整体建模结构分析方法。

15.1.7 地下烟道应与厂房柱基础、设备基础、电缆沟等脱开布置，脱开距离宜满足表 15.1.7 规定。

表 15.1.7 地下烟道与地下构筑物边缘最小距离

烟 气 温 度 (°C)	<200	200~400	401~600	601~800
距 离 (m)	≥0.1	≥0.2	≥0.4	≥0.5

15.2 地下烟道

15.2.1 计算地下烟道最高受热温度应考虑周围土壤的热阻作用，计算土层厚度（图 15.2.1）可按下列公式计算：

1 计算烟道侧墙时：

$$h_1 = 0.505H - 0.325 + 0.05bH \quad (15.2.1-1)$$

2 计算烟道底板时：

$$h_2 = 0.3m, \text{ 地温取 } 15^\circ\text{C} \quad (15.2.1-2)$$

3 计算烟道顶板时，取实际土层厚度。

式中 H 、 b ——分别为从内衬内表面算起的烟道埋深和宽度(m)(图 15.2.1)；

h_1 ——烟道侧面计算土层厚度 (m)；

h_2 ——烟道底面计算土层厚度 (m)。

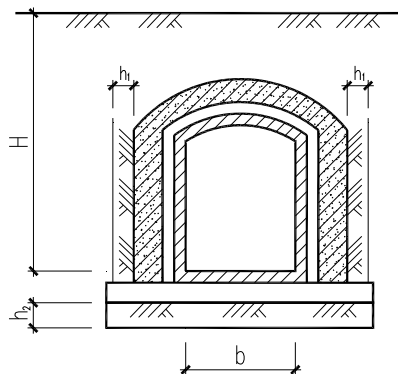


图 15.2.1 计算土层厚度示意

确定计算土层厚度后，可按本标准公式 (5.6.4) 计算烟道受热温度，其计算原则与本标

准 12.4.12 条相同。计算受热温度应满足材料受热温度允许值。

15.2.2 地下烟道地面荷载应根据实际情况确定，但不得小于 10kN/m^2 。对于钢铁厂的炼钢车间、轧钢车间外部的地下烟道，在没有足够依据时，可采用 30kN/m^2 荷载进行计算。

15.2.3 地下烟道侧墙土压力应计算两侧有土、一侧有土、两侧无土等各种极端工况。

15.2.4 地下砖砌烟道（图 15.2.4）的承载能力计算应符合下列规定：

1 烟道侧墙的计算模型可按下列原则采用：

- 1) 当侧墙两侧有土时，侧墙可按上（拱脚处）下端铰结，并仅考虑拱顶范围以外的地面荷载，按偏心受压计算；
- 2) 当侧墙两侧无土时，侧墙可按上端（拱脚处）悬臂，下端固结，验算拱顶推力作用下的承载能力，不考虑内衬对侧墙的推力。

2 砖砌烟道的顶拱按双铰拱计算。其荷载组合应按拱上无土、拱上有土、拱上有地面荷载（并考虑最不利分布）等工况。

当顶拱截面内有弯矩产生时，截面内的合力作用点不应超过截面核心距。

3 砖砌烟道的底板计算可按下列原则考虑：

- 1) 当为钢筋混凝土底板时，地基反力可按平均分布采用。
- 2) 当底板为素混凝土时，地基反力考虑侧壁压力按 45° 角扩散。

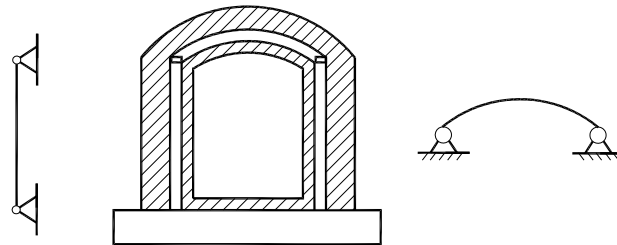


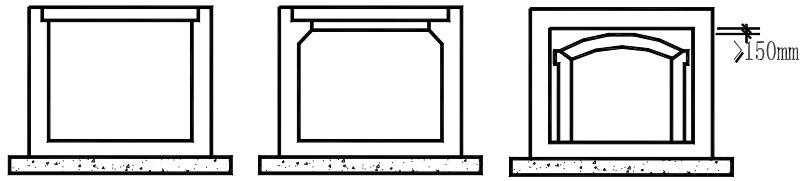
图 15.2.4 砖烟道型式

15.2.5 钢筋混凝土地下烟道应按下列规定进行计算：

1 槽型地下烟道的顶盖、侧墙可按下列规定计算（图 15.2.5a）：

- 1) 预制顶板按两端简支板计算；
- 2) 侧墙按上部有盖板和无盖板两种情况计算。
当上部有盖板时，上支点可按铰接计算。
当上部无盖板时，侧墙按悬臂计算。

2 封闭箱型地下烟道（图 15.2.5b）按封闭框架计算。



(a) 槽型地下烟道 (b) 封闭箱型地下烟道

图 15.2.5 钢筋混凝土烟道

15.2.6 地面砖烟道（图 15.2.6）的承载能力可按下端固接的拱形框架进行计算。

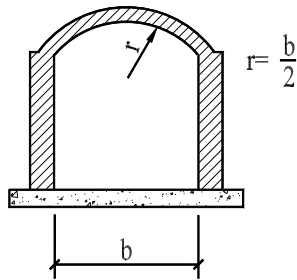


图 15.2.6 地面砖烟道

15.2.7 当计算受热温度不满足材料受热温度允许值时，应设置内衬和隔热层。

15.2.8 地下及地面烟道构造要求

- 1 地下砖烟道的顶拱中心夹角一般为 $60^\circ \sim 90^\circ$ ，顶拱厚度不应小于一砖，侧墙厚度不应小于一砖半；
- 2 砖烟道（包括地下及地面砖烟道）所采用砖的强度等级不应低于 MU10，砂浆强度等级不应低于 M5。当温度较高时应采用耐热砂浆；
- 3 内衬、隔热层应与内壁拉结；
- 4 不设内衬的烟道，应在烟道内表面设置保护层；
- 5 烟道与锅炉基础、与烟囱基础连接处，以及地面荷载变化较大处，应设置沉降缝。
- 6 地面及地下烟道的伸缩缝最大间距不大于 20m。伸缩缝应填塞石棉绳等可压缩的耐高温材料。当有防水要求时，伸缩缝的设置应满足防水要求；

15.3 架空烟道

15.3.1 烟道结构计算应符合下列规定：

- 1 烟道应满足自重荷载包括内衬隔热层、风荷载、雪荷载、底板积灰荷载和烟气压力作用，抗震设防地区尚应计算地震作用；

- 2 烟道内的烟气压力应由工艺专业提供，无资料时，可取 $\pm 2.0\text{kN/m}^2$ ；
- 3 烟道积灰荷载应按实际情况考虑或工艺专业提供。
- 4 脱硫系统烟气的推力由工艺专业提供。

15.3.2 架空烟道除计算最高受热温度并满足材料受热温度允许值外，受热温度高于 20°C 的钢烟道应做保温；钢及钢筋混凝土烟道还应计算烟道内外温度差值，并符合以下要求：

- 1) 砖砌烟道的侧墙，不大于 20°C ；
- 2) 钢筋混凝土板墙及砖砌烟道的钢筋混凝土板，不应大于 40°C 。

15.3.3 钢筋混凝土板墙、钢筋混凝土框架填充墙烟道结构，长度不超过 25m 。伸缩缝宽度宜为 $30\sim 50\text{mm}$ 。抗震设防地区上应满足现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011的要求；

15.3.4 架空烟道应设置人孔门和除灰孔。人孔门应设置在便于出入的烟道侧壁，并设置检修钢梯；除灰孔应设置在烟道底部易积灰处。人孔门、除灰孔应能承受烟气压力；

15.3.5 排放湿烟气时，烟道底部应有坡度，在最低端设置冷凝液收集和排放设施。

15.4 施工质量验收

15.4.1 钢结构烟道零部件制作质量标准及检验方法应符合本规范表 8.10.2 的规定。

15.4.2 钢结构烟道制作、焊接质量标准及检验方法应符合表 15.4.1 的规定。

表 15.4.1 钢结构烟道制作（安装）焊接工程质量标准和检验方法

类别	序号	检验项目	质量标准	单位	检验方法与器具
主控项目	1	焊接材料的品种、规格、性能等	应符合现行国家产品标准和设计要求		检查质量合格证明文件、中文标志及检验报告
	2	焊工	必须经考试合格并取得合格证书,且在其考试合格项目及其认可范围内施焊		检查焊工合格证及其认可范围、有效期
	3	设计要求全焊透的一、二级焊缝	探伤检验应符合现行国家标准的规定		检查超声波或射线探伤记录
主控项目	4	重要钢结构采用的焊接材料	应进行抽样复验,复验结果应符合现行国家产品标准和设计要求		检查复验报告
	5	焊接材料与母材的匹配	应符合设计要求及现行有关标准的规定		检查质量证明书和烘焙记录
	6	首次采用的钢材、焊接材料、焊接方法、焊后热处理等	应进行焊接工艺评定,并应根据评定报告确定焊接工艺		检查焊接工艺评定报告
	7	焊缝表面质量	不得有裂纹、焊瘤等缺陷		观察检查或使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查
			一级 焊缝不得有表面气孔、夹渣、弧坑裂纹、电弧擦伤等;且不得有咬边、未焊满、根部收缩等缺陷		
8	要求熔透的组合焊缝焊脚尺寸允许偏差	4~0 mm		观察检查,用焊缝量规抽查测量	
一般项目	1	焊条外观质量	不应有药皮脱落、焊芯生锈等缺陷;焊剂不应受潮结块		观察检查
	2	对于需要进行焊前预热或焊后热处理的焊缝	应符合国家现行有关标准的规定或通过工艺试验确定		检查预、后热施工记录和工艺试验报告
	3	凹形的角焊缝	焊出凹形的角焊缝应过渡平缓;加工成凹形的角焊缝,不得有切痕		观察检查
	4	焊缝外观	外形均匀、成型较好,焊道与焊道、焊道与基本金属间过渡较平滑,焊渣和飞溅物基本清除干净		观察检查
	5	二级、三级焊缝外观质量	未焊满	二级 不大于0.2+0.02t,且不大于1.0mm	观察检查或使用放大镜、焊缝量规和钢尺检查
	6			三级 不大于0.2+0.04t,且不大于2.0mm	
	6		根部收缩	二级 不大于0.2+0.02t,且不大于1.0mm	
				三级 不大于0.2+0.04t,且不大于2.0mm	
	7		咬边	二级 不大于0.05t,且不大于0.5mm	
				三级 不大于0.1t,且不大于1.0mm	
	8		弧坑裂纹	三级 ≤5.0 mm	
	9		电弧擦伤	三级 允许个别	
10	接头不良		二级 缺口深度不大于0.05t,且不大于0.5mm		
			三级 缺口深度不大于0.1t,且不大于1.0mm		
11	表面夹渣		三级 深不大于0.2t,长不大于0.5t,且不大于20mm		
12	表面气孔		三级 每50.0mm焊缝长度允许直径不大于0.4t,且不大于3.0mm数量不多于2个,孔距不小于6倍孔径		
13	对接焊缝尺寸偏差	<	一级 0~3 mm	用焊缝量规检查	
			二级 0~3 mm		
			三级 0~4 mm		
		≥	一级 0~4 mm		
			二级 0~4 mm		
			三级 0~5 mm		
焊缝错边		一、二级 小于0.15t,且不大于2.0mm			
		三级 小于0.15t,且不大于3.0mm			
14	部分焊透组合焊缝尺寸偏差	焊脚尺寸	$h_f \leq 6\text{mm}$ 1.5~0 mm	用焊缝量规检查	
			$h_f > 6\text{mm}$ 3.0~0 mm		
		角焊缝余高	$h_f \leq 6\text{mm}$ 1.5~0 mm		
			$h_f > 6\text{mm}$ 3.0~0 mm		

注: t为板、壁的厚度, h_f 为焊缝厚度。

15.4.3 钢结构烟道安装质量标准及检验方法应符合表 15.4.3 的规定。

表 15.4.3 钢烟道安装质量标准与检验方法

类别	序号	项 目	质 量 标 准	单 位	检 验 方 法
主控项目	1	钢构件验收	应符合设计和现行国家有关标准规定，无变形及涂层脱落		拉线、钢尺现场实测或观察检查
	2	焊接	应符合表 15.4.1 的规定		查看焊接验评表
	3	烟道安装中心偏差	≤ 15	mm	经纬仪检查
	4	烟道安装标高偏差	± 20		钢尺检查
	5	连接处的截面几何尺寸偏差	≤ 5.0		钢尺检查
一般项目	1	对口错边	不大于 $t/10$ ， ≤ 1	mm	钢尺检查
	2	两端面与轴线的垂直度	≤ 3		吊线和钢尺检查
	3	表面平整度	≤ 1.5		1 m 钢尺和塞尺检查
	4	圆形烟道对接口直径偏差	$\pm D/500$		钢尺检查
	5	矩形烟道内口尺寸偏差	长、宽		
对角线			± 10.0		
注： t 为钢板厚度； D 为圆形烟道内口直径。					

15.4.4 砖混烟道检查验收模板、钢筋、混凝土、耐酸砖砌体施工质量。

15.4.5 模板、钢筋、混凝土施工质量标准及检验方法应符合本标准 7.9 节的规定。

15.4.6 耐酸砖砌体施工质量标准及检验方法应符合本标准表 12.8.2 的规定。

16 航空障碍灯和标志

16.1 一般规定

16.1.1 对于以下影响航空器飞行安全的烟囱应设置航空障碍灯和标志。

- 1 在民用机场净空保护区域内修建的烟囱；
- 2 在民用机场净空保护区域外、但在民用机场进近管制区域内修建高出地表 150 米的烟囱；
- 3 在建有高架直升机停机坪的城市中，修建影响飞行安全的烟囱。

16.1.2 中光强 B 型障碍灯应为红色闪光灯，并应晚间运行。闪光频率应为 20 次/min~60 次/min，闪光的有效光强不应小于 2000 cd±25%。

16.1.3 高光强 A 型障碍灯应为白色闪光灯，并应全天候运行。闪光频率应为 40 次/min~60 次/min，闪光的有效光强随背景亮度变光强闪光，白天应为 200000cd，黄昏或黎明为 20000cd，夜间为 2000cd。

16.1.4 烟囱航空标志漆应采用橙色与白色相间或红色与白色相间的水平油漆带，筒首应为橙色或红色。以下情况可不设置航空标志漆，仅在筒首部位做必要的防腐涂装。

- 1 高度大于等于 150m 烟囱，顶层和中间层安装高光强 A 型障碍灯，其余两层安装中光强 B 型障碍灯。
- 2 高度 45m~150m 烟囱，顶层安装高光强 A 型障碍灯，中间层安装中光强 B 型障碍灯。
 - 1 高度小于 45m 烟囱，顶层安装中光强 B 型障碍灯。

16.2 障碍灯的分布

16.2.1 障碍灯的设置应显示出烟囱的最顶点和最大边缘。

16.2.2 高度小于或等于 45m 的烟囱，可只在烟囱顶部设置一层障碍灯。高度超过 45m 的烟囱应设置多层障碍灯，各层的间距不应大于 45m，并宜相等。

16.2.3 烟囱顶部的障碍灯应设置在烟囱顶端以下 1.5m~3m 范围内，高度超过 150m 的烟囱可设置在烟囱顶部 7.5m 范围内。

16.2.4 每层障碍灯的数量应根据其所在标高烟囱的外径确定。

- 1 外径小于或等于 6m，每层应设 3 个障碍灯；
- 2 外径超过 6m，但不大于 30m 时，每层应设 4 个障碍灯；

3 外径超过 30m，每层应设 6 个障碍灯。

16.2.5 高度超过 150m 的烟囱顶层应采用高光强 A 型障碍灯，其间距应控制在 75m~105m 范围内，在高光强 A 型障碍灯分层之间应设置低、中光强障碍灯。

16.2.6 高度低于 150m 的烟囱，也可采用高光强 A 型障碍灯，采用高光强 A 型障碍灯后，可不必再用色标漆标识烟囱。

16.2.7 每层障碍灯应设置维护平台。

16.3 航空障碍灯设计要求

16.3.1 所有障碍灯应同时闪光，高光强 A 型障碍灯应自动变光强，中光强 B 型障碍灯应自动启闭，所有障碍灯应能自动监控，并应使其保证正常状态。

16.3.2 设置障碍灯时，应避免使周围居民感到不适，从地面应只能看到散逸的光线。

16.4 施工质量验收

16.4.1 烟囱航空色标漆涂刷应符合设计要求和国家现行标准《建筑防腐蚀工程施工及验收规范》GB50212 和《建筑涂饰工程施工及验收规程》JGJ/T29 的规定。

16.4.2 航空标志及航空障碍灯质量标准及检验方法应符合表 16.5.2 的规定。

表 16.4.2 航空标志及航空障碍灯质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质 量 标 准	检验方法
主控项目	1	航空标志的材料和航空灯设备的规格、型号、性能	应符合设计要求和现行国家标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303 的规定	检查出厂证件和试验资料
	2	航空标志漆厚度或道数	应符合设计要求	观察检查
	3	航空障碍灯具和线路的安装	应符合设计要求和现行国家标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303 的规定	观察检查
一般项目	1	基层表面	应平整、清洁、无起砂、起壳、油污等现象，基层含水率应符合规范规定	观察检查
	2	外观质量	均匀、颜色一致，无漏底、脱皮、裂缝、起砂等缺陷	观察检查

17 既有烟囱加固与防腐改造

17.1 一般规定

17.1.1 既有烟囱加固与防腐改造前，应由具有检测能力的单位依据现行国家有关标准对烟囱进行检测与鉴定，并应依据检测与鉴定报告，由具有烟囱设计经验和能力的结构设计单位对烟囱进行可靠性评估和防腐与加固设计。

17.1.2 烟囱加固与防腐改造设计应规定烟囱的后续合理设计使用年限。设计使用年限应由业主和设计单位协商确定，并以此为依据选择加固及防腐设计方案。

17.1.3 未经技术鉴定或设计论证，不得改变原烟囱设计所规定的烟气温度条件或烟气腐蚀环境条件。

17.1.4 烟囱加固与防腐改造时，应根据既有烟囱的实际状况选择以下一种或多种改造方案：

- 1 结构加固；
- 2 耐久性修复；
- 3 防腐蚀功能的维护或防腐蚀方案升级。

17.1.5 烟囱加固或修复方案应符合下列规定：

- 1 砖烟囱可采用钢筋网面层加固或采用纵向扁钢与环箍方式加固；
- 2 无防腐要求的钢筋混凝土烟囱宜采用现浇钢筋混凝土或喷射混凝土加固；
- 3 有防腐蚀要求的钢筋混凝土烟囱宜采用混凝土结构修复用聚合物水泥砂浆进行耐久性修复或加固，材料性能应满足本标准第 17.3.3 条的规定；
- 4 钢筋混凝土烟囱可采用碳纤维进行外侧环向加固及局部裂缝加固，并应对加固后碳纤维采取防护措施，但下列情况不应采用碳纤维加固：
 - 1) 烟囱纵向或烟囱水平截面抗弯承载力加固；
 - 2) 烟囱筒壁表面温度超过 60℃。

17.2 烟囱加固与防腐改造设计原则

17.2.1 既有烟囱加固与防腐改造所采用的结构分析方法及防腐蚀方案应符合本标准的有关规定，并按现行国家有关标准的要求对加固后烟囱进行承载力能力极限状态和正常使用极限状态验算。

17.2.2 烟囱结构分析和承载力验算应采用加固后的实际荷载分布情况及受力特点确定其计算模型，加固后烟囱的承载力计算应考虑新增结构的应变滞后效应和新旧结构协同工作程度的影响。

17.2.3 对于被腐蚀烟囱的加固，应遵循先处理、后加固、再防腐的顺序进行。

17.2.4 烟囱加固可根据烟囱情况进行整体加固、分节局部加固或附属构件加固，当采用局

部置换方法加固时，应预先采取安全措施，避免施工倒塌或局部失稳现象。

17.2.5 烟囱防腐方案的选择应符合本标准第 12 章的有关规定。对于单筒式钢筋混凝土烟囱其防腐方案可采用粘贴硼硅酸盐泡沫玻璃砖或新增内筒防腐方案。单筒烟囱防腐时，应拆除原烟囱内衬和隔热层材料，并按一下规定对烟囱内壁进行处理：

- 1 当采用新增内筒防腐方案时，应对根据烟囱腐蚀情况对筒壁进行加固或耐久性修复；
- 2 当采用粘贴硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐方案时，应按本标准 17.3.3 条的有关要求对筒壁基层进行修复或加固。

17.2.6 单筒式钢筋混凝土烟囱选择新增内筒防腐方案时，应符合以下规定：

- 1 内筒宜采用整体自立式纤维增强塑料内筒或钢内筒方案；
- 2 烟气流速可比既有烟囱有所提高，提高幅度不宜大于 10%；
- 3 改造后对于可能产生烟囱雨的烟气应设置酸液收集系统；
- 4 新增内筒与钢筋混凝土外筒之间至少在烟道口上方设置一层检测平台和通往平台的钢梯。

17.3 加固与修复材料的选用

17.3.1 当烟囱采用与既有烟囱相同材料加固方案时，其材料强度等级不应低于原结构材料的实际强度等级。

17.3.2 钢筋混凝土烟囱采用钢筋混凝土加固时应满足以下规定：

- 1 筒壁外侧用混凝土强度等级除满足 17.3.1 条要求外，尚应不小于 C30；
- 2 筒壁内侧用混凝土强度等级应根据加固后使用情况确定。当加固后仍采用单筒烟囱防腐时，应根据烟气腐蚀等级确定混凝土强度等级，并不应小于 C35；加固后采用套筒式烟囱防腐时，混凝土强度等级除满足 17.3.1 条要求外，尚应不小于 C30；
- 3 采用现浇施工时，混凝土厚度不宜小于 120mm；采用喷射施工时，混凝土厚度不宜小于 80mm。
- 4 新增加固钢筋应由计算确定，并满足表 17.3.2 构造要求。

表 17.3.2 钢筋混凝土烟囱筒壁加固钢筋最小直径和最大间距(mm)

配筋种类	最小直径	最大间距
竖向钢筋	10	外侧 250，内侧 300
环向钢筋	8	外侧 200，内侧 300

- 5 新增加固钢筋保护层厚度不宜小于 30mm。

17.3.3 采用聚合物水泥砂浆进行混凝土结构修复和加固时应符合以下规定：

1 混凝土结构修复用和加固用聚合物水泥砂浆应满足表 17.3.3 要求。

表 17.3.3 混凝土结构修复用聚合物水泥砂浆的物理力学性能

序号	项 目		技术指标		
			混凝土修复用	混凝土加固用	
1	凝结时间	初凝 (min)	≥30	≥30	
		终凝 (h)	≤12	≤12	
2	抗压强度 (MPa)	7d	≥20	≥35	
		28d	≥40	≥50	
3	抗折强度 (MPa)	7d	≥6	≥8	
		28d	≥10	≥12	
4	拉伸粘结强度 (MPa)	界面未处理	28d	≥1.5	≥2.0
		与界面剂配合	28d	≥2.0	≥2.5
		浸水	28d	≥1.0	≥1.5
		25次冻融循环	28d	≥1.0	≥1.5
5	氯离子扩散系数 D_{RCM} ($10^{-12}m^2/s$)	单筒烟囱外侧	28d	≤7	
		单筒烟囱内侧及筒首外侧	28d	≤4	
6	抗冻试验(冻融环境)	严寒地区	28d	F≥300; 抗冻耐久性指标 DF≥0.8	
		寒冷地区	28d	F≥300; 抗冻耐久性指标 DF≥0.7	
		微冻地区	28d	F≥200; 抗冻耐久性指标 DF≥0.6	
7	收缩率 (%)	单筒烟囱外侧	28d	≤0.1	
		单筒烟囱内侧及筒首外侧	28d	≤0.05	

2 采用聚合物水泥砂浆进行混凝土结构耐久性修复时,其厚度不宜小于 8mm;采用聚合物水泥砂浆进行混凝土结构加固时,其厚度不宜小于 35mm,钢筋保护层厚度不宜小于 15mm。

17.3.4 采用钢筋网砂浆面层加固砖烟囱时,应满足以下要求:

- 1 水泥砂浆强度等级宜采用 M10。
- 2 面层厚度与配筋应计算确定,且面层厚度不应小于 40mm;最小配筋应满足表 17.3.4 要求。

表 17.3.4 砖烟囱筒壁加固钢筋最小直径和最大间距(mm)

配筋种类	最小直径	最大间距
竖向钢筋	6	250
环向钢筋	6	300

- 3 竖向钢筋在底部应与基础可靠连接，上部应锚固在新增设的钢筋混凝土圈梁内。
- 4 钢筋保护层厚度不宜小于 15mm。

17.3.5 采用碳纤维加固时应满足以下规定：

- 1 采用碳纤维加固条件应符合本标准 17.1.5 条的有关规定；
- 2 混凝土表面腐蚀程度不应超过中等腐蚀；混凝土钻芯取样不得出现松散和不完整现象；混凝土表面正拉粘结强度不应小于 1.5MPa，混凝土强度等级不得小于 C20；
- 3 对于表面腐蚀的混凝土应剔除所有腐蚀结晶物和酥松混凝土，处理至混凝土结构坚实面。对局部缺陷和处理后不平整表面应采用修复用聚合物水泥砂浆进行修复；对于锈蚀的钢筋应除锈处理；
- 4 碳纤维搭接长度应不小于 200mm，粘贴碳纤维应在需要加固范围以外进行锚固，锚固长度不应小于 600mm；
- 5 纤维布和胶粘剂的材料性能应符合国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB50367 的有关规定。

17.4 纤维增强塑料内筒顶部吊装

17.4.1 既有烟囱改造采用整体自立式纤维增强塑料内筒方案时，可在烟囱顶部对内筒进行分段吊装。

17.4.2 纤维增强塑料内筒顶部吊装结构的安全等级可按二级设计。吊装结构设计可不考虑地震作用；吊装结构风荷载应按本标准第 17.4.8 条规定的吊装工况、非吊装工况以及安装与拆除工况分别确定。

17.4.3 当风速大于或等于 11m/s，以及雷雨、大雪和吊装范围视觉不可及的大雾天气不得进行吊装作业。

17.4.4 纤维增强塑料内筒顶部吊装结构体系可由烟囱顶部塔架、缆风绳、地锚等构成。设计验算时，应按由塔架弹性杆系和柔索构成的复合结构体系用非线性有限元方法进行结构内力和变形分析。

17.4.5 缆风绳的布置应根据场地条件由吊装责任单位确认缆风绳的布置，并结合既有烟

囱出口直径与新增纤维增强塑料内筒直径等综合因素确定塔架生根方案。

17.4.6 采用烟囱顶部吊装纤维增强塑料内筒时，需要对塔架结构体系、缆风绳、起重钢丝绳和地锚等进行专项设计。

17.4.7 作用于吊装结构或被吊装的纤维增强塑料内筒表面单位面积上的水平风荷载标准值应按下式计算：

$$w_k = \beta \mu_s \mu_z w_0^* \quad (17.4.7)$$

式中： w_0^* ——相应施工吊装期间的 10m 高处风压代表值。按第 17.4.8 条计取；

μ_z ——高度 z 处的风压高度变化系数，按现行国家标准取值；

μ_s ——风荷载体型系数，按第 17.4.9 条取值；

β ——吊装塔架风振系数，按计算选取或近似取 2.0。

17.4.8 吊装结构设计风压代表值 w_0^* 应按以下规定选取：

1 吊装工况： $w_0^*=0.1 \text{ kN/m}^2$ ；

2 非吊装工况：按现行国家标准《建筑结构荷载规范》规定的当地 10 年一遇风压且不小于 0.20 kN/m^2 取值；

3 安装与拆除工况： $w_0^*=0.1 \text{ kN/m}^2$ 。

17.4.9 纤维增强塑料内筒顶部吊装主要风荷载的体型系数可按表 17.4.9 确定：

表 17.4.9 整体提升结构常用风荷载体型系数

结构类型		μ_s	
纤维增强塑料内筒		0.65	
缆风绳		1.20	
主材为型钢塔架	$\varphi =$	0.3	2.20
		0.4	2.00
		0.5	1.90
主材为钢管柱塔架	$\varphi =$	0.3	1.62
		0.4	1.50
		0.5	1.44

注：1 对于与表中结构类型差异较大的情况，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 取值；

2 按上述 μ_s 计算风力时，只计算正面迎风面积；

3 挡风系数 $\varphi = \frac{\text{正面迎风面积}}{\text{迎风面轮廓面积}}$ 。

4 当塔架非正方形时，按现行国家标准《高耸结构设计规范》GB50135 的规定计算。

17.4.10 缆风绳设计应符合下列要求：

- 1 各向缆风绳布置和预拉力应在吊装塔架顶部达到水平分力双向平衡；
- 2 缆风绳规格的确定应满足吊装工况与非吊装工况下整体结构的刚度和稳定要求；
- 3 缆风绳初拉应力可取其设计强度的 1/3。

17.4.11 钢丝绳拉力设计值应满足下式：

$$N \leq \frac{\beta F_0}{K} \quad (17.4.11)$$

式中 N ——钢丝绳拉力设计值 (kN)；

β ——钢丝绳绕过轴销或滑轮时弯曲造成的强度折减系数，当滑轮或轴销直径与钢丝绳直径比值不小于 6 时，可按 0.8 选取；

F_0 ——钢丝绳最小破断拉力 (kN)；

K ——钢丝绳安全系数，缆风绳可取 3.0；起重钢丝绳可取 5.0。

17.4.12 钢筋混凝土地锚基础设计应满足以下规定：

1 基础应进行抗拔和抗滑稳定性验算。在抗拔稳定验算时，作用效应应按承载力极限状态下作用的基本组合，但其分项系数可采用 1.0。

2 采用扩展基础时，应按上拔力进行强度和配筋计算，并按计算结果在基础的上表面配置钢筋。

17.4.13 采用重力式钢筋混凝土地锚基础时，其抗拔稳定应按下式计算：

$$P_V \leq \frac{G_e}{\gamma_{R1}} + \frac{G_f}{\gamma_{R2}} \quad (17.4.13)$$

式中 P_V ——钢丝绳传至基础的竖向力代表值 (kN)；

G_e ——基础底板以上、抗拔角 α_0 以内的土体自重代表值 (kN)，当基础位于地下水面以下时，应减去水的浮力；

G_f ——基础自重代表值 (kN)，当基础位于地下水面以下时，应减去水的浮力；

α_0 ——土体自重计算的抗拔角，可参照表 17.4.13 采用；

γ_{R1} ——土体自重的抗拔稳定系数，可采用 2.0；

γ_{R2} ——基础自重的抗拔稳定系数，可采用 1.5。

表 17.4.13 土的计算重力密度 γ_0 和土体计算抗拔角 α_0

基土类别	粘性土			粗砂 中砂	细砂	粉砂
	坚硬、硬 塑	可塑	软塑			
γ_0 (kN/m^3)	17	16	15	17	16	15
α_0	25°	20°	10°	28°	26°	22°

17.4.14 采用重力式钢筋混凝土地锚基础时，其抗滑稳定应按下列式计算：

$$\frac{(G_f - P_v)\mu}{P_h} \geq 1.3 \quad (17.4.14)$$

式中 P_h —— 钢丝绳传至基础的水平力代表值 (kN)；

μ —— 基础底面的摩擦系数，按本标准表 6.4.2 的规定采用。

17.5 施工质量检验

17.5.1 加固改造烟囱的新增或修复工作，除应符合本标准有关新建烟囱验收要求外，尚应满足《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB50550-2012 的要求。

17.5.2 采用增大截面加固混凝土烟囱，新增混凝土的浇筑质量不应有严重缺陷及影响结构性能和使用功能的尺寸偏差。

对已经出现的严重缺陷及影响结构性能和使用功能的尺寸偏差，应由施工单位提出技术处理方案，经监理（业主）和设计单位共同认可后予以实施。对经处理的部位应重新检查、验收。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察、测量或超声法检测，并检查技术处理方案和返修记录。

17.5.3 新旧混凝土结合面粘结质量应良好。锤击或超声波检测判定为结合不良的测点数不应超过总测点数的 10%，且不应集中出现在主要受力部位。

检查数量：每一界面，每隔 100~300mm 布置一个测点。

检验方法：锤击或超声波检测。

注：超声检测应按现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的规定执行。

17.5.4 采用增大截面加固混凝土烟囱，当设计对使用结构界面胶（剂）的新旧混凝土粘结强度有复验要求时，应在新增混凝土 28d 抗压强度达到设计要求的当日，进行新旧混凝土正拉粘结强度（ f_t ）的见证抽样检验。检验结果应符合 $f_t \geq 1.5\text{MPa}$ ，且应为正常破坏。（检查数量和检查方法见《建筑结构加固工程施工质量验收规范》）

17.5.5 采用增大截面加固混凝土烟囱，新增钢筋的保护层厚度抽样检验结果应合格。其抽样数量、检验方法以及验收合格标准应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

17.5.6 植筋的胶粘剂固化时间达到 7d 的当日，应抽样进行现场锚固承载力检验。其检验方法及质量合格评定标准必须符合《建筑结构加固工程施工质量验收规范》的有关规定。

检查数量：按《建筑结构加固工程施工质量验收规范》的规定确定。

检验方法：监理人员应在场监督，并检查现场拉拔检验报告。

17.5.7 对现场拉拔检验不合格的植筋工程，若现场考察认为与胶粘剂质量有关且业主要求追究责任时，应委托当地独立检测机构对胶粘剂安全性能进行系统的试验室检验与评定。其检验项目及安全性能指标应符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的规定。

检查数量：每一检验项目的试件数量应按常规检验加倍。

检验方法：按现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 和《建筑结构加固工程施工质量验收规范》的规定。

17.5.8 采用置换混凝土修复混凝土烟囱表面时，新置换混凝土的浇筑质量不应有严重缺陷及影响结构性能或使用功能的尺寸偏差。

对已经出现的严重缺陷和影响结构性能或使用功能的尺寸偏差，应由施工单位提出技术处理方案，经设计和监理单位认可后进行处理。处理后应重新检查验收。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察、超声法检测、检查技术处理方案及返修记录。

17.5.9 采用置换混凝土修复混凝土烟囱表面时，新旧混凝土结合面粘结质量应良好。

检查数量及检验方法按本标准第 17.5.3 条的规定执行。

17.5.10 采用置换混凝土修复混凝土烟囱表面时，当设计对使用界面胶（剂）的新旧混凝土结合面的粘结强度有复验要求时，应按本标准第 17.5.4 条的规定进行见证抽样检验和合格评定。

检查数量及检验方法也应按本标准第 17.5.4 条的规定执行。

17.5.11 采用置换混凝土修复混凝土烟囱表面时，钢筋保护层厚度的抽样检验结果应合格。其抽样数量、检验方法以及合格评定标准应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204。

17.5.12 混凝土烟囱和砌体烟囱表面缺陷修复工程应按《建筑结构加固工程施工质量验收规范》实施验收。

17.5.13 混凝土烟囱表面裂缝修复后，胶（浆）液固化时间达到 7d 时，应立即采用下列方法之一进行灌注质量检验：

1 超声波法：

当采用超声波探测时，其测定的浆体饱满度不应小于 90%。

检查数量：见证抽测裂缝总数的 10%，且不少于 5 条裂缝。

检验方法：按现行有关《超声法检测混凝土缺陷规程》的规定执行。

2 取芯法：

随机钻取直径 D 不小于 50mm 的芯样进行检测。钻芯前应先通过探测避开钢筋；取芯点宜位于裂缝中部。检查芯样裂缝是否被胶体填充密实、饱满，粘结完整。如有补强要求，还应对芯样做劈拉强度试验；试验结果应符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的要求。

钻芯后留下的孔洞应采用掺有石英砂的结构胶填塞密实。

检查数量：每一检验批同类构件见证抽查 10%，且不少于 3 条裂缝；每条取芯样 1 个。

检验方法：观察、检查修补胶固化 7d 的抗劈拉试验记录。

17.5.14 外粘纤维复合材加固混凝土烟囱，纤维复合材与混凝土之间的粘结质量可用锤击法或其他有效探测法进行检查。根据检查结果确认的总有效粘结面积不应小于总粘结面积的 95%。

探测时，应将粘贴的纤维复合材分区，逐区测定空鼓面积（即无效粘结面积）；若单个空鼓面积不大于 100cm²，允许采用注射法充胶修复；若单个空鼓面积≥100cm²，应割除修补，重新粘贴等量纤维复合材。粘贴时，其受力方向（顺纹方向）每端的搭接长度不应小于 200mm；若粘贴层数超过 3 层，该搭接长度不应小于 300mm；对非受力方向（横纹方向）每边的搭接长度可取为 50mm。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查检测报告及处理记录。

17.5.15 纤维复合材与基材混凝土的正拉粘结强度，必须进行见证抽样检验。其检验结果应符合表 17.5.15 合格指标的要求。若不合格，应揭去重贴，并重新检查验收。

表 17.5.15 现场检验加固材料与混凝土正拉粘结强度的合格指标

检验项目	原构件实测混凝土强度等级	检验合格指标		检验方法
正拉粘结强度及其破坏形式	C15~C20	≥1.5MPa	且为混凝土内聚破坏	《建筑结构加固工程施工质量验收规范》有关规定。
	≥C45	≥2.5MPa		

注：1 加固前应对烟囱混凝土强度等级进行现场检测与推定；

2 若检测结果介于 C20~C45 之间，允许按换算的强度等级以线性插值法确定其合格指标；

3 检查数量：应按《建筑结构加固工程施工质量验收规范》的取样规则确定；

4 本表给出的是单个试件的合格指标。检验批质量的合格评定，应按《建筑结构加固工程施工质量验收规范》的合格评定标准进行。

17.5.16 纤维复合材粘贴位置，与设计要求的位置相比，其中心线偏差不应大于 10mm；长度负偏差不应大于 15mm。

检查数量：全数检查。

检验方法：钢尺测量。

17.5.17 钢丝绳网片外加聚合物砂浆加固砖烟囱或钢筋混凝土烟囱，聚合物砂浆面层的外观质量不应有严重缺陷及影响结构性能和使用功能的尺寸偏差。严重缺陷的检查与评定应按表 17.5.17 进行；尺寸偏差的检查与评定应按设计单位在施工图上对重要尺寸允许偏差所作的规定进行。

对已经出现的严重缺陷及影响结构性能和使用功能的尺寸偏差，应由施工单位提出技术处理方案，经业主（监理）和设计单位共同认可后予以实施。对经处理的部位应重新检查、验收。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，当检查缺陷的深度时应凿开检查或超声探测，并检查技术处理方案及返修记录。

表 17.5.17 聚合物砂浆面层外观质量缺陷

名称	现象	严重缺陷	一般缺陷
露绳(或露筋)	钢丝绳网片(或钢筋网)未被砂浆包裹而外露	受力钢丝绳(或受力钢筋)外露	按构造要求设置的钢丝绳(或钢筋)有少量外露
疏松	砂浆局部不密实	疏松情况普遍	少量疏松
夹杂异物	砂浆中夹有异物	夹有异物情况普遍	少量异物
孔洞	砂浆中存在深度和长度均超过砂浆保护层厚度的孔洞	孔洞较大或数量较多	其他部位有少量孔洞
硬化(或固化)不良	水泥或聚合物失效,致使面层不硬化(或不固化)	任何部位不硬化(或不固化)	(不属一般缺陷)
裂缝	缝隙从砂浆表面延伸至	有影响结构性能或使用功能的裂	仅有表面细裂纹

	内部	缝	
连接部位缺陷	构件端部连接处砂浆层分离或锚固件与砂浆层之间松动、脱落	连接部位有影响结构传力性能的缺陷	连接部位有轻微影响或不影响传力性能的缺陷
外观缺陷	表面不平整、缺棱掉角、翘曲不齐、麻面、掉皮	有影响使用功能的缺陷	仅有影响观感的缺陷

注：复合水泥砂浆及普通水泥砂浆面层的喷抹质量缺陷也可按本表进行检查与评定。

17.5.18 聚合物砂浆面层与混凝土之间有效粘结面积不应小于总粘结面面积 95%。否则应揭去重做，并重新检查验收。

检查数量：全数检查。

检验方法：敲击法、超声法或其他有效的探测法。

17.5.19 聚合物砂浆面层与原构件混凝土间的正拉粘结强度，应符合本标准表 17.5.15 规定的合格指标的要求。若不合格，应揭去重做，并重新检查、验收。

17.5.20 聚合物砂浆面层的保护层厚度检查，宜采用钢筋探测仪测定，且仅允许有不大于 8mm 的正偏差。

18 附属工程施工质量检验

18.0.1 烟囱的爬梯、围栏、避雷设施导线及其他埋设件，应在筒壁施工过程中安装，预埋件应符合设计要求。

18.0.2 爬梯和信号平台等金属零件，应在安装前将外露部分涂刷防锈漆，安装后，连接处应补刷。

18.0.3 烟囱附件中的螺栓均应拧紧，不得遗漏。

18.0.4 电气系统的安装应符合国家现行标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303的有关规定。烟囱避雷器的零件应焊接牢固。避雷器的接地极宜在基坑回填土前安装。

18.0.5 避雷设施安装完成后，应检查接地电阻，接地电阻的数值应符合设计要求。

18.0.6 烟囱航空标志漆涂刷应符合设计要求和国家现行标准《建筑防腐工程施工及验收规范》GB50212和《建筑涂饰工程施工及验收规程》JGJ/T29的规定。

18.0.7 烟囱排水管的安装应符合国家现行标准《建筑给排水及采暖工程施工质量验收规范》GB50242的有关规定。

18.0.8 烟囱工程应按设计要求设置沉降、倾斜观测点、测温孔和烟气检测孔，并应定期进行观测。

18.0.9 避雷设施安装质量标准及检验方法应符合表 18.0.9 的规定。

表 18.0.9 避雷设施安装质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准	检验方法
主控项目	1	避雷设施的材料	应符合设计要求和国家现行标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303的规定	观察并核对技术资料
	2	接地极、接地电阻	应符合设计要求	兆欧表测定，全数检查
一般项目	1	避雷设施的安装	应符合设计要求和国家现行标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303的规定	观察并用兆欧表和尺量检查

18.0.10 航空标志质量标准及检验方法应符合表 18.0.10 的规定。

表 18.0.11 航空标志质量标准及检验方法

类别	序号	项 目	质量标准	检验方法
主控项目	1	航空标志的材料和设备的规格、型号、性能	应符合设计要求和国家现行标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303的规定	检查出厂证明文件和试验资料
	2	色标漆厚度或道数	应符合设计要求和国家现行标准《建筑涂饰工程施工及验收规程》JGJ/T29	观察检查
	3	航空障碍灯具和线路的安装	应符合设计要求和国家现行标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303的规定	观察检查

一般项目	1	基层表面	应平整、清洁，无起砂、起壳和油污等现象，基层含水率应符合国家现行标准《建筑防腐蚀工程施工及验收规范》GB50212的有关规定	观察检查
	2	外观质量	均匀、颜色一致，无漏底、脱皮、裂缝和起砂等缺陷	观察检查

18.0.11 烟囱照明设施安装质量标准应符合国家现行标准《建筑电气工程施工质量验收规范》GB50303的有关规定。

19 冬期施工

19.1 一般规定

- 19.1.1 当室外日平均气温连续 5d 稳定低于 5℃时，应为烟囱工程冬期施工。
- 19.1.2 当烟囱工程冬期施工时，应根据工程结构和气温条件，制定冬期施工方案。
- 19.1.3 冬期施工时，应有施工温度记录。
- 19.1.4 烟囱工程冬期施工时，砖烟囱筒壁应进行强度验算。钢筋混凝土烟囱基础和筒壁应进行热工计算。

19.2 基础

- 19.2.1 冬期进行土方施工前，应具有地质勘察资料及地基土的主要冻土性能资料。
- 19.2.2 当挖好的基坑需越冬后浇筑基础时，基坑应采取防止基土受冻的保温措施。
- 19.2.3 烟囱基础冬期施工时，当环形和圆形板式基础当最低气温高于-10℃时，宜采用综合蓄热法；低于-10℃时，宜采用暖棚法。
- 19.2.4 在基础施工中，施工场地周围应设置排水设施，不得使地基和基础被水浸泡。
- 19.2.5 基础施工完毕，应及时将回填土填至设计标高。在基础底板下的基土遭受冻害前，除应回填好基坑外，尚应在环壁内采取铺设保温材料的防护措施，铺设厚度应由热工计算确定。

19.3 砖烟囱筒壁

19.3.1 砖烟囱筒壁冬期施工时，可采用下列方法：

- 1 活动暖棚法；
- 2 半冻结法；
- 3 冻结法。

注： 1 采用冻结法或半冻结法时，筒壁有洞口的砌体部份，应在暖棚内砌筑，并在温度不低于 15℃的条件下保持 7d 以上。

2 采用半冻结法和外工作台施工时，筒壁内应设置保温盖板，并随砌筑随提升。

19.3.2 采用冻结法砌筑时，筒壁水平截面的计算应力不应超过砌体融解的抗压强度。砌体融解期的抗压强度可按表 19.3.2 采用。

表 19.3.2 冻结法砌体融解期的抗压强度值 (MPa)

砌体种类	砖 的 强 度 等 级		
	MU20	MU15	MU10
烧结普通黏土砖	0.94	0.82	0.67

注： 30m 以下的砖烟囱筒壁，采用冻结法砌筑时，可不核算筒壁水平截面的计算应力。

19.3.3 当筒壁截面的计算应力超过冻结法砌体融解期的抗压强度时，可采用半冻结法砌筑，其砌体的抗压强度可用表 19.3.2 的值乘以表 19.3.3 的砌体加强系数求得。

表 19.3.3 采用半冻结法砌体加强系数

砂浆强度等级	砌体加热时的融解深度		
	20%~40%壁厚	41%~60%壁厚	≥61%壁厚
M2.5	1.15	1.4	1.7
M5	1.2	1.6	1.9

19.3.4 砌体加热时的融解深度可按表 19.3.4 采用。

表 19.3.4 砌体加热时融解深度 (%)

项次	平均气温(℃)		融 解 时 间 (d)											
	筒壁外部	筒壁内部	2 砖				2 1/2 砖				3 砖			
			5	10	15	28	5	10	15	28	5	10	15	28
1	-5	+15	50	60	65	70	40	55	60	70	35	50	55	70
2	-5	+25	65	75	80	80	55	70	75	80	50	65	70	80
3	-15	+15	30	30	35	35	25	30	35	35	25	30	35	35
4	-15	+25	40	45	45	45	35	45	50	50	35	45	50	50
5	-25	+15	10	15	15	15	10	15	20	20	15	20	20	20
6	-25	+25	30	30	30	30	30	30	35	35	30	30	35	35

19.3.5 烧结普通黏土砖在正温度条件下砌筑时，应浇水湿润；在负温度条件下砌筑时，应增大砂浆的稠度，不得浇水。

19.3.6 采用冻结法或半冻结法砌筑时，砖可不加热。砌筑前，应清除表面污物和冰雪等。不得使用水浸受冻的砖。砌筑后的砌体表面应覆盖保温材料。当采用暖棚法砌筑时，砖的预热温度不应低于 5℃。

19.3.7 砌筑时砂浆的最低温度，可按表 19.3.7 采用。

表 19.3.7 砌筑时砂浆的最低温度

项次	外部气温(℃)	砂浆的最低温度(℃)
1	0 ~ -10	10
2	-11 ~ -15	15
3	-15 以下	20

19.3.8 当冬期砌筑筒壁设计无要求，且当日最低气温高于-25℃时，砂浆强度等级应比设

计规定提高一级；当日最低气温低于-25℃时，则应提高二级。

19.3.9 冬期施工时，可在砂浆内添加早强剂。当添加早强剂中含有氯离子时，砌体中配置的钢筋应作防腐处理。

19.3.10 采用半冻结法砌筑时，筒壁内工作台以下的最低温度应符合表 12.3.10 的规定。

表 19.3.10 筒壁内工作台以下的最低温度

项次	外部气温(℃)	筒壁内的最低温度(℃)
1	0 ~ -10	15
2	-11 ~ -20	20
3	-21 以下	25

19.3.11 采用冻结法砌筑结束后，应立即在筒壁内部加热。加热时，应沿全圆周均匀、缓慢地进行。加热时间应持续至砌体达到所需的强度为止，宜为 7 ~14d。

筒壁加热时，应观察其下沉量和垂直度。当出现设计不允许的变形时，应停止加热，并应查明原因，将其消除。

19.3.12 筒壁上的环箍应在加热前安装完毕。

19.4 钢筋混凝土烟囱筒壁

19.4.1 钢筋混凝土烟囱筒壁采用电动（液压）提模工艺和移置模板工艺冬期施工时，可采用活动暖棚法或电热法。

钢筋混凝土烟囱筒壁采用滑动模板工艺施工时，不宜冬期施工。当气温低于 0℃继续施工时，应采取保证安全和质量的措施，否则不得继续施工。

19.4.2 冬期施工时，混凝土的强度等级应比设计规定提高一级。

19.4.3 混凝土的入模温度不应低于 5℃。

19.4.4 筒壁混凝土持续加热养护后的强度，1/2 高度以下部分应达到设计强度 70%以上，1/2 高度以上部分应达到设计强度 50%以上。

19.4.5 采用活动暖棚法施工时，暖棚内的温度不应低于 15℃。

19.5 钢烟囱、钢内筒和钢构件

19.5.1 在工作温度等于或低于-20℃的地区，结构施工应符合下列要求：

- 1 安装连接宜采用螺栓连接；
- 2 受拉构件的钢材边缘宜为轧制边或自动气割边。对厚度大于 10mm 的钢材采用手工气割或剪切边时，应沿全长刨边；
- 3 应采用钻成孔或先冲后扩钻孔；
- 4 对接焊缝的质量等级不得低于二级。

19.5.2 在负温度下安装的测量校正、高强度螺栓安装、施工及焊接工艺等，应在安装前进行工艺试验或评定，并应在此基础上制定相应的施工工艺或方案。

19.5.3 负温度下钢构件焊接选用的焊条和焊丝，在满足设计强度要求的前提下，应选择屈服强度较低，冲击韧性较好的低氢型焊条，重要部位应采用高韧性超低氢型焊条。

19.5.4 在负温度下露天焊接时，宜搭设临时防护棚，雨水或雪花不得飘落在炽热的焊缝上。

19.5.5 钢构件上使用的涂料应符合负温度下涂刷的性能要求，不得使用水基涂料。

19.5.6 在负温度下的钢构件上涂刷防腐涂层前，应进行涂刷工艺试验，并保持构件表面干燥。

19.6 单筒烟囱内衬

19.6.1 砌筑烧结普通黏土砖和其它材质耐火砖内衬时，工作地点及砌体周围的温度均不应低于 5℃。

19.6.2 使用水泥混合砂浆或水泥砂浆砌筑烧结普通黏土砖内衬时，可采用冻结法施工，并按冻结法砌筑规定执行。

19.6.3 采用冻结法或半冻结法砌筑的砖烟囱，其内衬应在筒壁砌筑完成并加热后再进行砌筑。

19.6.4 采用耐火砖砌筑的内衬，应在砌筑前将砖预热至正温度。采用喷涂料或浇注料材料施工的内衬，施工时材料的温度不宜低于 10℃。

19.6.5 调制浇注料的水可加热，硅酸盐水泥浇注料的水温不得超过 60℃，高铝水泥耐火浇注料的水温不得超过 30℃。水泥不得直接加热。

19.6.6 水泥浇注料的养护，可采用蓄热法或加热法。加热硅酸盐水泥浇注料的温度不得超过 80℃，加热高铝水泥耐火浇注料的温度不得超过 30℃。

19.6.7 喷涂施工，应对骨料和水在装入搅拌机前加热，并应对喷涂料管、水管及受喷部位采取保温措施。

20 施工安全

- 20.0.1 烟囱工程施工前，应制定安全操作规程、岗位责任制和安全技术措施。
- 20.0.2 凡高处作业人员，应经医生身体检查合格，并应经安全技术培训和考试合格。
- 20.0.3 烟囱周围应设立施工危险区，100m 以下的烟囱距筒壁不宜少于 10m；100m 以上的烟囱距筒壁不宜少于烟囱高度的 1/10。施工危险区应设立明显标志。在危险区内的通道应搭设保护棚。
- 20.0.4 在烟囱内部距地面 2.5~5m 处应搭设保护棚。采用移置模板连续施工至第一层烟囱平台，继续施工时，可利用该平台作为保护棚。
- 20.0.5 工作台周围应设置围栏和安全网，内外吊梯的外侧和底部以及工作台底部均应设置安全网。钢管竖井架人行出入口的四周应设置金属保护网。
- 20.0.6 提升罐笼的卷扬机应设置防止冒顶和蹶罐的限位开关以及行程高度指示器，电磁抱闸应工作可靠。
- 20.0.7 乘人和上料罐笼应设置断绳安全卡，并应增设保险钢丝绳。使用前应进行安全试验，使用过程中应经常检查。在烟囱底部罐笼停放处应设置缓冲装置。
- 20.0.8 垂直运输系统上下滑轮应设置防止钢丝绳脱槽的装置，并应有专人检查和维护。
- 20.0.9 安装钢管竖井架时，应每 15~20m 高安装一道风缆绳。
- 20.0.10 施工筒壁时，在筒壁与钢管竖井架之间，每 10m 应安装一道柔性连接器，每 20m 高度应搭设一层保护棚。在内保护棚处，可不安装柔性连接器。
- 20.0.11 采用电动（液压）提模或滑动模板工艺施工时，提模或滑升前应做 1.25 倍的满负荷静载试验和 1.1 倍的满负荷滑升试验。
- 20.0.12 采用滑动模板工艺施工时，外爬梯应随筒壁的升高及时安装。
- 20.0.13 无井架滑动模板提升时，应先放松滑道绳后提升工作台，并使滑道绳放松的长度大于工作台一次提升的高度。滑道绳宜设置测力装置，拉紧力应符合施工方案的要求。
- 20.0.14 采用滑动模板工艺施工时，应注意模板和围圈收分受阻、平台倾斜、扭转和漂移、支撑杆失稳和漏焊、局部塌落等异常现象，并及时查明原因进行处理。
- 20.0.15 采用电动（液压）提模或滑动模板工艺施工时，混凝土未达到规定的强度，不得提升或滑升模板。
- 20.0.16 筒壁施工过程中，直径随筒壁的增高而变小时，应缩小工作台。
- 20.0.17 当钢烟囱和钢内筒采用液压提升法施工时，钢绞线切割应采用砂轮切割机，不得采用火焰切割；钢绞线切割后应采取防止油渍、铁屑和泥砂污染的保护措施。
- 钢筒焊接时应采取可靠的接地措施，并采取防止电焊机把线与钢绞线相接的措施。
- 20.0.18 套筒式或多管式烟囱平台上的堆放荷载不得超过允许荷载，荷载应沿平台周围均匀分布。

- 20.0.19 烟囱立体交叉作业时，应采取安全防护措施。
- 20.0.20 在烟囱底部、工作台上与卷扬机房之间，应安装声光信号及通信联络设备。
- 20.0.21 拆除工作台前，应制定拆除方案，并应在统一指挥下作业。
- 20.0.22 工作台上应设置配电箱，开关、漏电保护器及供电线路等的设置应符合国家现行标准《施工现场临时用电安全技术规范》JGJ46 的有关规定；高处作业的照明、信号灯及电铃用电应采用 36V 安全电压。
- 20.0.23 夜间施工时，在工作台、内外吊梯、钢管竖井架、卷扬机房、搅拌站以及各运输通道等处，应设置充足的照明。
- 20.0.24 烟囱施工时，应设置临时避雷接地装置，接地电阻不得大于 10Ω 。
- 20.0.25 烟囱施工时，临时航空障碍灯的设置应符合本标准第 16 章的有关规定。
- 20.0.26 当遇到六级或六级以上大风、沙尘暴、大雾或雷雨等恶劣天气时，禁止露天起重工作，所有高处作业应停止，施工人员应迅速下到地面，并应切断电源。
- 20.0.27 工作台和烟囱底部均应配备灭火器。含有易燃易爆的材料存放处严禁明火。
- 20.0.28 当内筒采用顶部吊装（正装法）施工时，需由具有烟囱设计经验和能力的结构设计单位对吊装结构体系进行验算确认后，方可进行施工，并在吊装之前需进行相关安全试验。

21 烟囱烘干

21.0.1 采用冻结法砌筑的砖烟囱，在砌筑结束后，应立即加热和烘干；通风烟囱可不烘干。

21.0.2 烟囱烘干前，应根据烟囱的结构和施工季节等制订烘干温度曲线和操作规程。烘干温度曲线和操作规程的主要内容应包括烘干期限、升温速度、恒温时间、最高温度、烘干措施和操作要点等。

烘干后不立即投入生产的烟囱，在烘干温度曲线中还应注明降温速度。当降到 100℃时，应将烟道口堵死。

21.0.3 烟囱的烘干温度曲线和烘干时间应按有关要求确定；当无要求时，烟囱的烘干时间可按表 21.0.3 采用。

表 21.0.3 烟囱的烘干时间 (d)

项次	烟囱高度 (米)	砖烟囱				钢筋混凝土烟囱	
		常温施工		冬期施工		常温施工	冬期施工
		无内衬的	有内衬的	无内衬的	有内衬的	有内衬的	
1	40 以下	3	4	5	7		
2	41~60	4	5	6	8	3	4
3	61~80	5	6	8	10	4	5
4	81~100	7	8	10	13	5	6
5	101~150					6	8
6	151~200					8	10
7	200 以上					10	12

注：1 采用冻结法砌筑的砖烟囱，且烘干后不立即投入生产的，其烘干时间应增加 2~3 昼夜。在此时间内，应保持在烘干温度曲线内所规定的最高温度。

2 冬期已烘干过的，但到生产前相隔了两个月以上的烟囱，应在第二次烘干后再投入生产，其烘干时间可减少一半。

21.0.4 烟囱烘干时，应逐渐地升高温度，其最高温度可按表 21.0.4 采用。

表 21.0.4 烘干最高温度

烟 囱 分 类	砖 烟 囱		钢筋混凝土烟囱
	无内衬的	有内衬的	有内衬的
烘干最高温度 (℃)	250	300	200

21.0.5 从工业炉往烟囱内排放烟气时，在最初阶段应系统地检查烟气的成分，并应调整燃烧过程，不得有燃烧不完全的气体通过缝隙和闸板流入烟囱。

21.0.6 当烟囱烘干后出现裂缝时，应进行修理。已烘干的砖烟囱，当筒壁上有环箍时，应在冷却后再次拧紧筒壁上环箍的螺栓。

22 工程质量验收

22.0.1 烟囱工程质量验收记录应包括下列内容：

- 1 施工现场质量管理检查记录（附录 D）；
- 2 检验批质量验收记录（附录 E）；
- 3 分项工程质量验收记录（附录 F）；
- 4 分部（子分部）工程质量验收记录（附录 G）；
- 5 单位（子单位）工程质量预验收记录（附录 H）；
- 6 单位（子单位）工程质量控制资料核查记录（附录 H-1）
- 7 单位（子单位）工程安全和功能检验资料核查及主要功能抽查记录（附录 H-2）；
- 8 单位（子单位）工程观感质量检查记录（附录 H-3）；
- 9 单位（子单位）工程质量竣工验收记录（附录 J）。

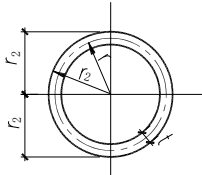
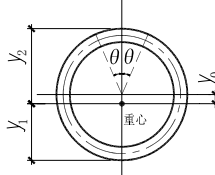
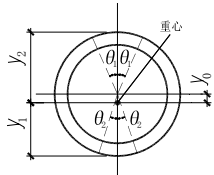
22.0.2 烟囱工程验收时，应提供下列技术资料：

- 1 竣工图、图纸会审记录、设计变更通知单、工程洽商记录及其他相关设计文件；
- 2 材料代用证件；
- 3 原材料、半成品和成品的出厂合格证书及进场检、试验报告；
- 4 地基、基础、筒身、烟道、烟囱平台检验及抽样检测资料；
- 5 混凝土和砂浆试块的性能检验报告；
- 6 钢筋接头试验报告；
- 7 焊缝无损检测报告；
- 8 混凝土及砂浆配合比通知单；
- 9 混凝土工程施工记录；
- 10 防腐蚀工程施工记录；
- 11 接地、绝缘电阻测试记录；
- 12 管道强度试验、严密性试验记录；
- 13 系统功能测定及设备运行调试记录；
- 14 新技术论证、备案及施工记录；
- 15 施工现场质量管理检查记录；
- 16 有关安全及功能的检验和见证检测项目检查记录；
- 17 有关观感质量检验项目的检查记录；
- 18 单位（子单位）工程所含各分部工程质量验收记录；
- 19 分部（子分部）工程所含各分项工程质量验收记录；
- 20 分项工程所含各检验批质量验收记录；
- 21 强制性条文检验项目检查记录及证明文件；

- 22 隐蔽工程检验项目检查验收记录；
- 23 不合格项的处理记录及验收记录；
- 24 工程质量事故及事故调查处理资料；
- 25 重大质量、技术问题实施方案及验收记录；
- 26 工程定位测量、放线记录（包括沉降记录）；
- 27 其他有关文件和记录。

附录A 环形截面几何特性计算公式

表 A.0.1 环形截面几何特性计算公式

计算内容		图		
				
重心至圆心的距离 y_0		0	$r \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}$	$r \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}$
重心至截面边缘的距离	y_1	r_2	$r_2 \cos \theta_2 - r \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}$	$r_2 \cos \theta_2 - r \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}$
	y_2	r_2	$r_2 \cos \theta_1 + r \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}$	$r_2 \cos \theta_1 + r \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}$
截面面积 A		$2\pi r t$	$2rt(\pi - \theta)$	$2rt(\pi - \theta_1 - \theta_2)$
重心轴的截面惯性矩 I		$\pi t r^3$	$r^3 t (\pi - \theta - \cos \theta \sin \theta - 2 \frac{\sin^2 \theta}{\pi - \theta})$	$r^3 t [\pi - \theta_1 - \theta_2 - \cos \theta_1 \sin \theta_1 - \cos \theta_2 \sin \theta_2 - 2 \frac{(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}]$

注： r_2 为外半径； r 为平均半径 ($r = r_2 - t/2$)； t 为壁厚。

附录 B 焊接圆筒截面轴心受压稳定系数 ϕ

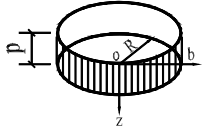
表 B.0.1 焊接圆筒截面轴心受压稳定系数 ϕ

$\lambda\sqrt{\frac{f_y}{235}}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
0	1.000	0.992	0.970	0.936	0.899	0.856	0.807	0.751	0.688	0.621	0.555	0.493	0.437	0.387	0.345	0.308	0.276	0.249	0.225	0.204	0.186	0.170	0.156	0.144	0.133	0.123
1	1.000	0.991	0.967	0.932	0.895	0.852	0.802	0.745	0.681	0.614	0.549	0.487	0.432	0.383	0.341	0.304	0.273	0.246	0.223	0.202	0.184	0.169	0.155	0.143	0.132	
2	1.000	0.989	0.963	0.929	0.891	0.847	0.797	0.739	0.675	0.608	0.542	0.481	0.426	0.378	0.337	0.301	0.270	0.244	0.220	0.200	0.183	0.167	0.154	0.142	0.131	
3	0.999	0.987	0.960	0.925	0.887	0.842	0.791	0.732	0.668	0.601	0.536	0.475	0.421	0.374	0.333	0.298	0.267	0.241	0.218	0.198	0.181	0.166	0.153	0.141	0.130	
4	0.999	0.985	0.957	0.922	0.882	0.838	0.786	0.726	0.661	0.594	0.529	0.470	0.416	0.370	0.329	0.295	0.265	0.239	0.216	0.197	0.180	0.165	0.151	0.140	0.129	
5	0.998	0.983	0.953	0.918	0.878	0.833	0.780	0.720	0.655	0.588	0.523	0.464	0.411	0.355	0.326	0.291	0.262	0.236	0.214	0.195	0.178	0.163	0.150	0.138	0.128	
6	0.997	0.981	0.950	0.914	0.874	0.828	0.774	0.714	0.648	0.581	0.517	0.458	0.406	0.361	0.322	0.288	0.259	0.234	0.212	0.193	0.176	0.162	0.149	0.137	0.127	
7	0.996	0.978	0.946	0.910	0.870	0.823	0.769	0.707	0.641	0.575	0.511	0.453	0.402	0.357	0.318	0.285	0.256	0.232	0.210	0.191	0.175	0.160	0.148	0.136	0.126	
8	0.995	0.976	0.943	0.906	0.865	0.818	0.763	0.701	0.635	0.568	0.505	0.447	0.397	0.353	0.315	0.282	0.254	0.229	0.208	0.190	0.173	0.159	0.146	0.135	0.125	
9	0.994	0.973	0.939	0.903	0.861	0.813	0.757	0.694	0.628	0.561	0.499	0.442	0.392	0.349	0.311	0.279	0.251	0.227	0.206	0.188	0.172	0.158	0.145	0.134	0.124	

注：表中 ϕ 值系按下列公式算得：

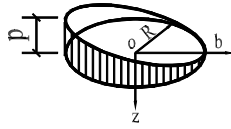
$$\text{当 } \lambda_n = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \leq 0.215 \text{ 时, } \phi = 1 - \alpha_1 \lambda_n^2; \text{ 当 } \lambda_n > 0.215 \text{ 时, } \phi = \frac{1}{2\lambda_n^2} \left[(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2) - \sqrt{(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2)^2 - 4\lambda_n^2} \right]$$

式中, $\alpha_1 = 0.65, \alpha_2 = 0.965, \alpha_3 = 0.300$ 。



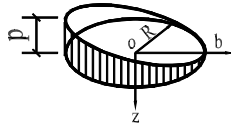
附表 C.0.1 圆形面积上均布荷载作用下土中任意点竖向平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$

Z/R	b/R																				
	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000	2.200	2.400	2.600	2.800	3.000	3.200	3.400	3.600	3.800	4.000
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.20	0.998	0.997	0.996	0.992	0.964	0.482	0.025	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.40	0.986	0.984	0.997	0.955	0.880	0.465	0.079	0.022	0.008	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.60	0.960	0.956	0.941	0.902	0.803	0.447	0.121	0.045	0.019	0.009	0.005	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.80	0.923	0.917	0.895	0.845	0.739	0.430	0.149	0.066	0.032	0.016	0.009	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
1.00	0.878	0.870	0.835	0.790	0.685	0.413	0.167	0.083	0.044	0.024	0.015	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1.20	0.831	0.823	0.795	0.740	0.638	0.396	0.177	0.096	0.054	0.032	0.020	0.013	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
1.40	0.784	0.776	0.747	0.693	0.597	0.380	0.183	0.105	0.063	0.039	0.025	0.019	0.011	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001
1.60	0.739	0.731	0.704	0.649	0.561	0.364	0.186	0.112	0.070	0.045	0.030	0.021	0.014	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
1.80	0.697	0.689	0.662	0.613	0.529	0.350	0.186	0.116	0.076	0.050	0.035	0.024	0.017	0.012	0.009	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
2.00	0.658	0.650	0.625	0.578	0.500	0.336	0.185	0.119	0.080	0.055	0.038	0.027	0.020	0.015	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002
2.20	0.623	0.615	0.591	0.546	0.473	0.322	0.183	0.120	0.083	0.058	0.042	0.030	0.022	0.017	0.012	0.010	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002
2.40	0.590	0.582	0.560	0.518	0.450	0.309	0.180	0.121	0.085	0.061	0.044	0.033	0.024	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.005	0.004	0.003
2.60	0.560	0.553	0.531	0.492	0.428	0.297	0.176	0.121	0.086	0.063	0.046	0.035	0.026	0.020	0.016	0.012	0.010	0.008	0.006	0.004	0.003
2.80	0.532	0.526	0.505	0.468	0.408	0.285	0.173	0.120	0.087	0.064	0.048	0.037	0.028	0.022	0.017	0.013	0.011	0.009	0.007	0.005	0.004
3.00	0.507	0.501	0.483	0.447	0.390	0.274	0.169	0.119	0.087	0.065	0.049	0.038	0.030	0.023	0.018	0.015	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005
3.20	0.484	0.478	0.460	0.427	0.373	0.265	0.165	0.117	0.087	0.066	0.050	0.039	0.032	0.024	0.019	0.016	0.013	0.010	0.008	0.006	0.005
3.40	0.463	0.457	0.440	0.408	0.357	0.255	0.160	0.115	0.086	0.066	0.051	0.040	0.033	0.025	0.020	0.017	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006
3.60	0.443	0.438	0.421	0.392	0.343	0.246	0.156	0.113	0.085	0.066	0.052	0.041	0.034	0.026	0.021	0.017	0.014	0.012	0.010	0.008	0.006
3.80	0.425	0.420	0.404	0.376	0.330	0.238	0.152	0.112	0.085	0.066	0.052	0.041	0.034	0.027	0.022	0.018	0.015	0.012	0.010	0.008	0.007
4.00	0.409	0.404	0.389	0.361	0.318	0.230	0.149	0.109	0.084	0.065	0.052	0.042	0.035	0.028	0.023	0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.007
4.20	0.393	0.388	0.374	0.348	0.306	0.223	0.145	0.107	0.082	0.065	0.052	0.042	0.035	0.028	0.023	0.019	0.016	0.014	0.011	0.009	0.008
4.40	0.379	0.374	0.360	0.336	0.295	0.216	0.141	0.105	0.081	0.064	0.052	0.042	0.035	0.029	0.024	0.020	0.017	0.014	0.012	0.010	0.009
4.60	0.365	0.361	0.348	0.324	0.285	0.209	0.137	0.103	0.080	0.064	0.052	0.042	0.035	0.029	0.024	0.020	0.017	0.015	0.012	0.010	0.009
4.80	0.353	0.349	0.336	0.313	0.276	0.203	0.134	0.101	0.079	0.063	0.051	0.042	0.035	0.029	0.024	0.021	0.018	0.015	0.013	0.011	0.009
5.00	0.341	0.337	0.325	0.303	0.267	0.197	0.131	0.099	0.078	0.062	0.051	0.042	0.035	0.029	0.025	0.021	0.018	0.015	0.013	0.011	0.010



附表 C.0.2-1 圆形面积上三角形分布荷载作用下对称轴下土中任意点竖向平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$

Z/R	b/R																				
	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000	2.200	2.400	2.600	2.800	3.000	3.200	3.400	3.600	3.800	4.000
0.00	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.20	0.499	0.399	0.300	0.200	0.102	0.016	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.40	0.493	0.396	0.298	0.200	0.107	0.030	0.008	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.60	0.480	0.387	0.293	0.200	0.112	0.041	0.016	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.80	0.462	0.377	0.287	0.199	0.117	0.050	0.023	0.007	0.006	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.00	0.439	0.360	0.278	0.196	0.120	0.057	0.030	0.012	0.009	0.006	0.004	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.20	0.416	0.343	0.267	0.192	0.121	0.063	0.036	0.017	0.013	0.008	0.005	0.004	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
1.40	0.392	0.326	0.257	0.187	0.121	0.067	0.040	0.021	0.016	0.010	0.007	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
1.60	0.370	0.310	0.245	0.181	0.120	0.070	0.044	0.025	0.019	0.012	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1.80	0.349	0.294	0.234	0.175	0.119	0.072	0.046	0.028	0.021	0.014	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
2.00	0.329	0.279	0.224	0.169	0.116	0.073	0.048	0.031	0.023	0.016	0.012	0.009	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
2.20	0.312	0.265	0.214	0.163	0.114	0.07	0.049	0.033	0.025	0.018	0.013	0.010	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001
2.40	0.295	0.252	0.205	0.157	0.111	0.073	0.050	0.035	0.026	0.019	0.014	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001
2.60	0.280	0.240	0.196	0.151	0.108	0.072	0.051	0.036	0.027	0.020	0.015	0.012	0.009	0.007	0.006	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
2.80	0.266	0.229	0.187	0.145	0.105	0.071	0.051	0.037	0.028	0.021	0.016	0.013	0.010	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002
3.00	0.254	0.218	0.180	0.140	0.102	0.070	0.051	0.037	0.029	0.022	0.017	0.014	0.010	0.008	0.007	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
3.20	0.242	0.209	0.172	0.135	0.099	0.069	0.050	0.038	0.029	0.023	0.018	0.015	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002
3.40	0.232	0.200	0.166	0.130	0.096	0.067	0.050	0.038	0.029	0.023	0.018	0.015	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002
3.60	0.222	0.192	0.159	0.125	0.094	0.066	0.049	0.038	0.029	0.023	0.019	0.016	0.012	0.010	0.008	0.007	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003
3.80	0.213	0.184	0.152	0.121	0.091	0.065	0.048	0.037	0.029	0.023	0.019	0.016	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
4.00	0.205	0.177	0.148	0.117	0.088	0.063	0.047	0.037	0.030	0.024	0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003
4.20	0.197	0.171	0.142	0.113	0.086	0.062	0.046	0.037	0.029	0.024	0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.008	0.006	0.005	0.005	0.004	0.003
4.40	0.190	0.165	0.138	0.110	0.083	0.061	0.045	0.036	0.029	0.024	0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003
4.60	0.183	0.159	0.133	0.107	0.081	0.059	0.044	0.036	0.029	0.024	0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004
4.80	0.177	0.154	0.129	0.104	0.079	0.058	0.043	0.036	0.029	0.023	0.019	0.016	0.014	0.011	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004
5.00	0.171	0.151	0.125	0.101	0.077	0.057	0.042	0.035	0.028	0.023	0.019	0.016	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.005	0.004



附表 C.0.2-2 圆形面积上三角形分布荷载作用下对称轴下土中任意点竖向平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$

Z/R	b/R																			
	-0.200	-0.400	-0.600	-0.800	-1.000	-1.200	-1.400	-1.600	-1.800	-2.000	-2.200	-2.400	-2.600	-2.800	-3.000	-3.200	-3.400	-3.600	-3.800	-4.000
0.00	0.600	0.700	0.800	0.900	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.20	0.598	0.697	0.791	0.862	0.466	0.024	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.40	0.589	0.679	0.755	0.774	0.435	0.071	0.019	0.007	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.60	0.569	0.647	0.702	0.691	0.406	0.106	0.038	0.015	0.007	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.80	0.541	0.608	0.646	0.622	0.380	0.126	0.054	0.025	0.013	0.007	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.00	0.511	0.567	0.594	0.565	0.356	0.137	0.066	0.034	0.019	0.011	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
1.20	0.479	0.527	0.548	0.517	0.333	0.142	0.075	0.042	0.024	0.015	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
1.40	0.449	0.491	0.506	0.476	0.313	0.143	0.080	0.048	0.029	0.018	0.012	0.008	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000
1.60	0.421	0.457	0.470	0.441	0.294	0.142	0.084	0.052	0.033	0.022	0.014	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001
1.80	0.395	0.428	0.438	0.410	0.278	0.140	0.085	0.055	0.036	0.024	0.017	0.012	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001
2.00	0.372	0.401	0.409	0.383	0.263	0.137	0.087	0.057	0.039	0.026	0.019	0.014	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
2.20	0.350	0.376	0.384	0.360	0.248	0.134	0.087	0.058	0.040	0.028	0.021	0.015	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
2.40	0.331	0.355	0.362	0.339	0.236	0.130	0.085	0.059	0.042	0.030	0.022	0.016	0.012	0.009	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003	0.002
2.60	0.313	0.336	0.341	0.320	0.225	0.126	0.084	0.059	0.042	0.031	0.023	0.017	0.013	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002
2.80	0.297	0.318	0.323	0.303	0.214	0.122	0.082	0.059	0.043	0.032	0.024	0.018	0.014	0.011	0.009	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002
3.00	0.283	0.302	0.307	0.288	0.204	0.118	0.081	0.058	0.043	0.032	0.025	0.019	0.015	0.012	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003
3.20	0.269	0.287	0.292	0.274	0.196	0.114	0.079	0.058	0.043	0.033	0.025	0.020	0.016	0.012	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003
3.40	0.257	0.274	0.278	0.261	0.188	0.110	0.077	0.057	0.043	0.033	0.026	0.020	0.016	0.013	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004
3.60	0.246	0.262	0.266	0.250	0.180	0.107	0.076	0.056	0.043	0.033	0.026	0.021	0.017	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004
3.80	0.236	0.251	0.255	0.239	0.173	0.104	0.074	0.055	0.042	0.033	0.026	0.021	0.017	0.014	0.011	0.009	0.008	0.006	0.006	0.004
4.00	0.224	0.241	0.244	0.229	0.167	0.101	0.072	0.054	0.042	0.033	0.026	0.021	0.017	0.014	0.012	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005
4.20	0.217	0.231	0.234	0.220	0.161	0.098	0.070	0.053	0.041	0.033	0.026	0.021	0.017	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005
4.40	0.209	0.222	0.225	0.212	0.155	0.095	0.069	0.052	0.040	0.033	0.026	0.021	0.018	0.015	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005
4.60	0.202	0.214	0.217	0.204	0.150	0.092	0.067	0.051	0.040	0.032	0.026	0.021	0.018	0.015	0.012	0.010	0.009	0.007	0.006	0.005
4.80	0.195	0.207	0.209	0.197	0.145	0.090	0.065	0.050	0.040	0.032	0.026	0.021	0.018	0.015	0.012	0.010	0.009	0.008	0.006	0.005
5.00	0.188	0.201	0.202	0.190	0.140	0.087	0.064	0.049	0.039	0.031	0.026	0.021	0.018	0.015	0.013	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006

附录 E 检验批质量验收记录

检验批完工后，施工单位应由专业工长会同项目专业质量检查员进行自检，自检合格后向监理单位（建设单位）提交检验批工程报验单，申请检验批工程质量验收；

检验批的质量验收记录应由施工单位专业工长会同项目专业质量检查员按本标准相关章节要求填写，并给出检查结果，专业监理工程师组织施工单位专业工长、项目专业质量检查员等进行验收，按表 E 记录，并给出验收结论。

表 E _____ 检验批质量验收记录 编号：_____

单位（子单位）		分部（子分部）		分项工程名称	
施工单位		项目负责人		检验批容量	
分包单位		分包单位项目		检验批部位	
施工依据			验收依据		
主控	验收项目	设计要求及规范规定	最小	检查记录	检查结果
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
一般	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
施工单位检查结果	专业工长： 项目专业质量检查员： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>				
监理单位（建设单位）验收结论	专业监理工程师： <div style="text-align: right;">年 月 日</div>				

附录 F 分项工程质量验收记录

分项工程完工后，施工单位应组织有关人员进行自检，自检合格后向监理单位（建设单位）提交分项工程报验单，申请分项工程质量验收；

分项工程的质量验收记录应由施工单位项目专业技术负责人按本标准相关章节要求填写，并给出检查结果，专业监理工程师组织施工单位项目专业技术负责人等进行验收，按表 E 记录，并给出验收结论。

表 F _____ 分项工程质量验收记录 编号： _____

单位（子单位） 工程名称				分部（子分部）			
分项工程数量				检验批数量			
施工单位				项目负责人		项目技术负责人	
分包单位				分包单位 项目负责人		分包内容	
序号	检验批 名称	检验批 容量	部位/区段	施工单位检查结果		监理单位（建设单位） 验收结论	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
说明：							
施工单位 检查结果		项目专业技术负责人： 年 月 日					
监理单位 （建设单位） 验收结论		专业监理工程师： 年 月 日					

附录 G 分部（子分部）工程质量验收记录

分部（子分部）工程完工后，施工单位应组织有关人员进行自检，自检合格后向监理单位（建设单位）提交分部（子分部）工程报验单，申请分部（子分部）工程质量验收；

分部（子分部）工程质量验收应由总监理工程师（建设单位项目负责人）组织施工单位项目负责人、项目技术负责人和有关勘察、设计单位项目负责人进行验收，按表 G 记录，并给出综合验收结论。

表 G _____ 分部（子分部）工程质量验收记录

单位（子单位）工程		子分部工程名称		分项工程数量	技术（质量）
施工单位		项目负责人		分包内容	
分包单位		分包单位负责人		分包内容	
序号	子分部工程名	分项工程名	检验批数	施工单位检查结果	监理单位（建设单位）验收结论
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
质量控制资料					
安全和功能检验结果					
观感质量检验结果					
综合 验收 结论					
施工单位 项目负责人： 年 月 日		勘察单位 项目负责人： 年 月 日		设计单位 项目负责人： 年 月 日	
				监理单位（建设单位） 总监理工程师： （建设单位项目负责人）： 年 月 日	

注：1 地基与基础分部工程的验收由总监理工程师（建设单位项目负责人）组织施工单位项目负责人，施工单位项目技术负责人，施工单位技术、质量部门负责人，勘察单位项目负责人、设计单位项目负责人参加验收，由施工单位、勘察单位、设计单位项目负责人和总监理工程师（建设单位项目负责人）签字，并加盖公司公章；

2 筒身、烟囱平台及烟道等分部工程的验收由总监理工程师（建设单位项目负责人）组织施工单位项目负责人，施工单位项目技术负责人，施工单位技术、质量部门负责人，设计单位项目负责人参加，由施工、设计单位项目负责人和总监理工程师（建设单位项目负责人）签字，并加盖公司公章。

附录 H 单位（子单位）工程质量预验收记录

单位（子单位）工程质量预验收记录应由总监理工程师（建设单位项目负责人）组织施工单位项目负责人和有关勘察、设计单位项目负责人进行验收，按表 H 记录，并给出综合验收结论。（为与 GB50300-2013 建筑工程施工质量验收统一标准一致，建议大纲中“附录 H 单位（子单位）工程质量验收记录”取消，保留附录 J 单位（子单位）工程质量竣工验收记录。如附录 H 要保留，建议本表改为：单位（子单位）工程质量预验收记录）

表 H 为单位（子单位）工程质量预验收的汇总表，与表 H-1，表 H-2，表 H-3 配合使用。

表 H _____ 单位（子单位）工程质量验收记录

单位（子单位）工程名称				分部工程数量			分项工程数量		
施工单位				项目负责人			技术（质量）		
分包单位				分包单位负责人			分包内容		
序号	单位（子单位）工程名称	分（子）部工程名称	分项工程名称	检验批数量	施工单位检查结果		监理单位（建设单位）验收结论		
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
质量控制资料									
安全和功能检验结果									
观感质量检验结果									
综合验收结论									
施工单位 项目负责人： 年 月 日		勘察单位 项目负责人： 年 月 日		设计单位 项目负责人： 年 月 日			监理单位（建设单位） （建设单位项目负责人） 总监理工程师： 年 月 日		

注：单位工程验收时，验收签字人员应由相应单位的法人代表书面授权。

附录 J 单位（子单位）工程质量竣工验收记录

单位（子单位）工程质量竣工验收记录应由施工单位填写，验收结论由监理单位（建设单位）填写。综合验收结论经参加验收各方商定，建设单位填写，应对工程质量是否符合设计文件和相关标准的规定及总体质量水平做出评价，按表 J 记录。

表 J 为单位（子单位）工程质量竣工验收的汇总表，与表 H-1，表 H-2，表 H-3 配合使用。

表 J 单位（子单位）工程质量竣工验收记录

工程名称		结构类型		烟囱高度	
施工单位		技术负责人		开工日期	
项目经理		项目技术负责人		竣工日期	
序号	项 目	验收记录		验收结论	
1	分部工程	共 分部，经查符合设计及标准规			
2	质量控制资料核查	共 项，经核查符合规定 项			
3	安全和主要使用功能核	共核查 项，符合规定 项， 共抽查 项，符合规定 项， 经返工处理符合规定 项			
4	观感质量验收	共抽查 项，达到“好”和“			
综合验收结论					
参加验收	建设单位	监理单位（建设单位）	施工单位	设计单位	
	（公章） 单位（项目）负责人 年 月 日	（公章） 单位（项目）负责人 年 月 日	（公章） 单位（项目）负责人 年 月 日	（公章） 单位（项目）负责人 年 月 日	

注：单位工程验收时，验收签字人员应由相应单位的法人代表书面授权。

表 H-2 单位（子单位）工程质量控制资料核查记录

工程名称		施工单位		
序号	资料名称	份数	核查意见	核查人
1	图纸会审记录、设计变更通知单、工程洽商记录			
2	工程定位测量、放线记录（包括沉降记录）			
3	原材料、半成品和成品的出厂合格证书及进场检、			
4	施工试验报告及见证检测报告			
5	隐蔽工程验收记录			
6	施工记录			
7	地基、基础、筒身、烟道、烟囱平台检验及抽样检			
8	分项、分部工程质量验收记录			
9	工程质量事故及事故调查处理资料			
10	重大质量、技术问题实施方案及验收记录			
11	新技术论证、备案及施工记录			
12	材料代用证件			
13	混凝土及砂浆配合比通知单			
14	接地、绝缘电阻测试记录			
15	管道强度试验、严密性试验记录			
16	系统功能测定及设备运行调试记录			
17	强制性条文检验项目检查记录及证明文件			
18	不合格项的处理记录及验收记录			
19	施工现场质量管理检查记录			
20	有关安全及功能的检验和见证检验项目检查记录			
21	有关观感质量检验项目的检查记录			
<p>结论：</p> <p>施工单位项目负责人： _____ 总监理工程师： _____ （建设单位项目负责人）</p> <p>年 月 日 _____ 年 月 日</p>				

表 H-3 单位（子单位）工程安全和功能检验资料核查及主要功能抽查记录

工程名称				施工单位		
序号	安全和功能检查项目	份数	核查意见	抽查结果	核查（抽查）人	
1	地基承载力检验报告					
2	桩基承载力检验报告					
3	混凝土强度试验报告					
4	砂浆强度试验报告					
5	烟囱垂直度、高度测量记录					
6	烟囱顶部内、外直径测量记录					
7	烟道口的位置和尺寸检查记录					
8	保温（隔热）测试记录					
9	烟囱沉降观测记录					
10	障碍灯安装质量检查记录					
11	照明、障碍灯全负荷试验记录					
12	色标涂装质量检查记录					
13	接地、绝缘电阻测试记录					
14	管道强度试验、严密性试验记录					
15	系统功能测定及设备运行调试记录					
<p>结论：</p> <p>施工单位项目经理</p> <p style="text-align: center;">总监理工程师 (建设单位项目负责人)</p> <p style="text-align: center;">年 月 日</p> <p style="text-align: right;">年 月 日</p>						

注：抽查项目由验收组协商确定。

中华人民共和国国家标准

烟 囱 工 程 技 术 标 准

GB50XX—20XX

条文说明

3 基本规定

3.1.5 烟囱设计状况包括持久设计状况、短暂设计状况、偶然设计状况和地震设计状况，设计时应区分不同的设计状况分别进行基本组合、偶然组合和地震组合设计。

3.1.6 烟气温度作用和烟气压力对于烟囱来讲，既有可变荷载特征，同时也具有恒载特征，正常工况下其波动幅度是非常小的，对内筒的作用基本为恒定，其恒载特征更为鲜明。故本次标准修订，正常烟气温度作用及烟气压力按持久设计状况考虑。风荷载作为可变荷载在设计使用年限内变化幅度很大且持久存在，但作为基本风压，其持续时间是短暂的，故将其与施工、维修荷载一并列入短暂设计状况。

3.1.7 本次标准修订明确烟气爆炸和事故温度为偶然作用，并给出偶然设计状况验算要求。一般情况下风荷载的频遇值系数取 0.4，根据烟囱具体特点及工程经验，烟气爆炸和事故温度下风荷载的频遇值系数取 0.2。

3.1.11 近年来，在烟囱前端设备（如脱硫塔、烟道等）的建造与维修期间，屡屡发生火灾事故，对烟囱或内筒造成严重损失，宜将烟囱与烟道按两个防火分区考虑。考虑烟气的腐蚀性及烟道正常运行的可靠性，规定在烟囱前端设备维修期间要采取防火措施。

3.1.29 混凝土结构耐久性设计的内容包括：（1）确定结构所处的环境类别；（2）提出对混凝土材料的耐久性基本要求；（3）确定构件中钢筋的混凝土保护层厚度；（4）不同环境条件下的耐久性技术措施；（5）提出结构使用阶段的检测与维护要求。耐久性设计时，应首先根据烟囱所处的暴露环境条件进行环境类别划分，我国国标《混凝土结构设计规范》GB 50010 将环境类别划分为五类，分别对应不同的环境条件。环境类别划分是开展其他耐久性设计内容的前提条件。应根据不同环境类别确定混凝土的最大水胶比、最低强度等级、最大氯离子含量和最大碱含量，以及最小混凝土保护层厚度等。

3.1.30 CEMS 的设置需要根据设计院的有关专业或政府环保部门的要求进行专业化设置，烟囱设计时应根据相应要求提供检测平台并根据要求设置采样孔。

采样或监测平台易于人员到达，有足够的空间，便于日常维护和比对监测。具体应符合现行标准《固定污染源烟气（SO₂、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75 的要求。

5 荷载与作用

5.2.1 本条规定了顺风向作用在烟囱表面单位面积上的风荷载标准值的计算方法,并针对烟囱特点规定了基本风压最小取值不得小于 0.35kN/m^2 。条文规定“烟囱高度超过 200m 时,其计算风压应按 1.1 倍基本风压考虑”,与原《烟囱设计规范》GB50051-2013 规定的“烟囱安全等级为一级时,其计算风压应按 1.1 倍基本风压考虑”有所不同,原规范规定与结构重要性系数概念容易混淆,本次标准修订规定的“1.1 倍基本风压”是针对较高烟囱设计时的风荷载重要性系数,与我国第一版《烟囱设计规范》GBJ51-83 相一致。美国 Code Requirements for Reinforced Concrete Chimneys (ACI 307-08),规定其所有钢筋混凝土烟囱均取风荷载设计重要性系数为 1.15,二者有相似之处。

本次标准修订对圆形截面烟囱体形系数给出明确规定。对于圆形截面烟囱设计,我国通常取体形系数为 0.6,这一做法延续多年。本次规范修订前,作为规范修订编制任务,河北省电力勘测设计研究院委托石家庄铁道大学对圆形钢烟囱做了风洞试验研究工作。本次试验共对 1 组单管烟囱和 5 组三管钢烟囱在两种风场下进行了刚性模型测压试验,表 C5.2.1 为单管烟囱在 A 类和 B 类地貌下的体型系数。

表 C5.2.1 单管烟囱在 A 类和 B 类地貌下的体型系数

高度 H(m)	208	185	160	135	95	60	25
A 类地貌	0.91	0.63	0.60	0.56	0.52	0.46	0.55
B 类地貌	0.88	0.69	0.67	0.65	0.65	0.60	0.60

CICIN Model Code for Concrete Chimneys, 2001 规定烟囱体形系数如下:

$$C_D = \begin{cases} 0.6 & h/d < 5 \\ 0.1 \frac{\log_{10}(h/d)}{\log_{10}(h/d)} + 0.5 & 5 \leq \frac{h}{d} < 25 \\ 0.7 & h/d \geq 25 \end{cases}$$

结合试验、国外规范及原《烟囱设计规范》取值,最后标准选择“Code Requirements for Reinforced Concrete Chimneys (ACI 307-08)”中烟囱体形系数:

$$\mu_s = \begin{cases} 0.65 & \text{当 } z < H - 1.5d_H \\ 1.0 & \text{当 } z \geq H - 1.5d_H \end{cases}$$

这样取值更符合烟囱实际情况,并有利于与国际先进标准接轨。

对于有破风圈的钢烟囱,其破风圈高度一般为烟囱直径的 0.1 倍,故规定破风圈高度范围钢烟囱筒身体形系数取 1.4。

5.2.2 原规范对横风向共振的判定条件为:

1 当 $R_e < 3 \times 10^5$, 且 $v_H > v_{cr,j}$ 时, 可能发生亚临界横风向共振。自立式钢烟囱和钢筋混凝土烟囱可不计算亚临界横风向共振荷载, 但对于塔架式钢烟囱的塔架杆件, 在构造上应采取防振措施或控制杆件的临界风速不小于 15m/s。

2 当 $R_e \geq 3.5 \times 10^6$, 且 $1.2v_H > v_{cr,j}$ 时, 烟囱可能发生跨临界范围横风向共振, 应验算其共振响应

3 当雷诺数为 $3 \times 10^5 \leq R_e \leq 3.5 \times 10^6$ 时, 则发生超临界范围共振, 可不予考虑。

上述规定有存在缺陷, 实际工程经常在 $R_e < 3.5 \times 10^6$ 时, 仍会发生严重横风向共振, 造成许多钢烟囱共振破坏。另外, 有些风电塔在安装过程时, 且 $R_e < 3.5 \times 10^6$ 时, 横风向共振也时有发生, 甚至倒塌。根据国外有关规定, 对于横风向共振基本都不考虑雷诺数的影响, 只考虑临界风速与烟囱顶部风速关系, 故本次对此进行修订。

原规范规定“当钢筋混凝土烟囱和钢结构烟囱, 当其坡度不大于 2% 时对于烟囱坡度”考虑是否发生横风向共振。这一规定不够详尽, 因为烟囱往往是变坡度的, 特别是钢筋混凝土烟囱, 其底部坡度一般在 5% 左右, 上部一般在 2% 以内, 而横风向共振与烟囱上部直径变化更为敏感, 参考国际有关标准, 对此进行修订, 规定烟囱顶部 1/3 高度范围内的坡度不大于 2% 时考虑横风向共振。

5.2.3 烟囱共振一般发生在第一振型, 当烟囱刚度较小时会发生在第二振型, 本次仅给出前两阶振型计算系数。

5.2.4 烟囱竖向截面最大环向风弯矩属于局部径向风压产生的, 需要考虑局部风压阵风系数的影响, 本标准对原公式进行了修正。

5.2.5 基本设计风压是在设计基准期内可能发生的最大风压值, 实践证明, 横风向最不利共振往往发生在低于基本设计风压工况下, 因此要求进行风速小于基本设计风压时不利共振响应验算。

5.2.6 当发生横风向风振时, 其顺风向与横风向综合风振效应按矢量和计算。一般情况下, 顺风向风振与横风向风振的相关性较小, 当发生横风向强风共振时, 顺风向的风荷载可不考虑脉动风影响, 仅考虑其静力风荷载组合。由于发生横风向共振时未必是设计风压条件, 低于设计风速的所有风速都是可能发生的, 故此时的顺风向风荷载应该为横风向共振条件下的对应风速下的风荷载。

5.3.2 根据排烟筒内壁部分工程实际调研情况, 发现积灰厚度与表面粗糙情况、干湿交替运行等因素有关, 应结合烟囱实际运行情况确定积灰厚度, 如燃烧天然气的烟囱、超净排放烟囱可不考虑积灰。

5.5.5 对于悬挂钢内筒或分段支承的砖内筒，其竖向地震作用主要是由外筒通过悬挂（或支承）平台传递给内筒。因此，在竖向地震作用计算时，可以把悬挂（或支承）平台作为排烟筒根部，自由端作为顶部按规范公式进行计算。

无论是水平地震，还是竖向地震，它们对地面上除刚体外的物体都具有一定的动力放大作用。这种动力放大效应沿结构高度不是固定的，而是变化的，变化规律是自下而上逐渐增大。

美国圣费尔南多地震，在近十座多层及高层建筑上，测得竖向加速度沿建筑高度呈线性增大，最大值为地面加速度的四倍。1995 年日本阪神地震时，在高层建筑上，也测到同样规律。但在高耸构筑物上，还没有地震实测值。原《烟囱设计规范》组进行的烟囱模型竖向地震响应试验，测试了竖向地震作用沿高度的变化规律，烟囱模型顶部地震加速度放大倍数约为 6~8 倍。

烟囱各点竖向地震加速度为：

$$\begin{aligned} a_{vi} &= \frac{F_{Evik}}{m_{iE}} = \frac{F_{Evik} g}{G_{iE}} = 4(1+C)k_v g \left(1 - \frac{G_{iE}}{G_E}\right) \\ &= 4(1+C) \frac{a_{v0}}{g} g \left(1 - \frac{G_{iE}}{G_E}\right) \\ &= 4a_{v0} (1+C) \left(1 - \frac{G_{iE}}{G_E}\right) \end{aligned}$$

式中 a_{vi} 和 a_{v0} 分别表示烟囱各截面和地面竖向加速度值。

由上式可得各截面竖向地震加速度放大系数为：

$$\beta_{vi} = \frac{a_{vi}}{a_{v0}} = 4(1+C) \left(1 - \frac{G_{iE}}{G_E}\right)$$

5.6.6 套筒烟囱由于设有进风口和出风口，属于通风状态，与全封闭状态有较大区别。在通风状态下，内外筒间距应不小于 100mm，并在烟囱高度范围内应设置进气孔和排气孔，进气孔和排气孔的面积在数值上应符合套筒式与多管式烟囱设计构造要求。

5.6.9 原《烟囱设计规范》GB50051-2013对烟道顶部位置处的烟气沿直径方向不均匀分布温差 ΔT_0 规定不够完善，其取值与烟气温度成正比，而且取值系数在多烟道时偏大，造成该项对内筒内力影响比重较高。本次修订在借鉴国外规范及我国工程实际经验，对公式进行了较大修改，考虑因素更全面，计算结果更趋于合理。

5.6.11 温度效应是由烟气在纵向及环向产生的不均匀温度场所引起的，要计算出由温度效应在截面上产生的内力就需要先计算出温差下内筒烟囱产生的变形。由于内筒在止晃平台处变形受到约束，因此内筒的截面上产生了内力。

1 横截面上的温度分布假定

横截面上的温度分布假定如 C5.6-1，其中

$$T_1 = \Delta T_x (1 + \cos \phi) / 2$$

$$T_2 = \Delta T_x (1 - \phi / \pi)$$

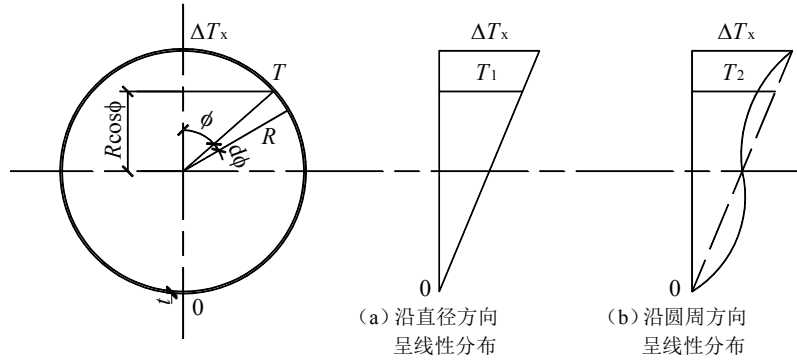


图 C5.6.11-1 横截面上的温度分布假定

2 转角变形计算

从假定的温差分布可以看到，沿直径方向的线性温差分布引起恒定的转角变形为：

$$\theta = \alpha \Delta T_x / d$$

式中 α ——钢材的线性膨胀系数；

ΔT_x ——从钢内筒烟囱烟道入口顶部算起距离 x 处的截面温差(°C)；

d ——钢内筒直径。

同时，由于温度沿钢内筒圆周方向的不均匀分布产生次应力，使截面产生转角变位 θ_s ，在圆周上取微元 dA ，微元面积 $dA = R d\phi t$ 。

从温差分布应力图上可以得到微元上的应力 $f_\phi = \alpha (T_2 - T_1) E$ ，

因此微元上的荷载为 $f_\phi dA = \alpha (T_2 - T_1) ER d\phi t$ ，

荷载对截面中性轴取矩得：

$$M = 2 \int_0^\pi f_\phi R \cos \phi dA = 2 \int_0^\pi \alpha (T_2 - T_1) ER \cos \phi dA = -0.2976 \alpha ER^2 t \Delta T_x$$

M 引起的转角 θ_s 为：

$$\theta_s = \frac{M}{EI} = \frac{-0.2976 \alpha ER^2 t \Delta T_x}{E \pi R^3 t} = -0.1895 \frac{\alpha \Delta T_x}{d}$$

一阶效应与二阶效应两者产生的转角位移之和即为钢内筒的总转角：

$$\theta_x = \theta + \theta_s = 0.811\alpha\Delta T_x / d$$

式中 R ——内筒半径；
 E ——内筒弹性模量；
 t ——为筒壁厚度。

3 钢内筒温差作用下的水平变形组成

钢内筒的温差分布由两部分组成，烟道入口高度范围内截面温差取恒值 ΔT_{x_0} 和从烟道入口顶部以上距离 x 处的截面温差值 ΔT_x 。在不同的温差作用下，钢内筒烟囱的水平变形由两部分组成。

- 1) 第一部分是烟道口区域温差产生的变形，沿高度线性变化；
- 2) 第二部分是由烟道口以上截面温差引起的变形，沿高度呈曲线变化。

4 烟道口范围钢内筒烟囱水平线变形计算

1) 在烟道口范围内，截面转角变位是常数，如图 C5.6.11-2，即：

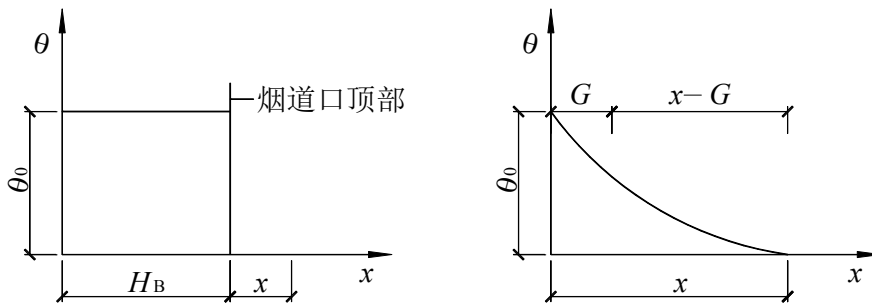
$$\theta_0 = \theta_{x=0} = 0.811\alpha\eta_t\Delta T_x / d$$

转角曲线图的面积为：

$$A_B = \theta_0 H_B$$

距离烟道口顶部上 x 处钢内筒烟囱截面在等值温度作用下的水平线变位为：

$$u_{xT} = \theta_0 H_B (H_B / 2 + x)$$



(a) 烟道口区域温差下的转角变位 (b) 烟道口以上截面的转角变位

图 C5.6.11-3 钢内筒横截面转角曲线

2) 距离烟道口顶部上 x 处钢内筒烟囱截面的转角如图 C5.6.11-3 (b)，计算公式为：

$$\theta = 0.811\alpha\eta_t\Delta T_0 e^{-\zeta_t x/d} / d$$

令 $\theta_0 = 0.811\alpha\eta_t\Delta T_0 / 2R$ ， $V = \zeta_t / d = (B \cdot C \cdot K) / d$

则 $\theta = \theta_0 e^{-Vx}$ ，

转角曲线图的面积为：

$$A = \int_0^x \theta dx = \theta_0 \int_0^x e^{-Vx} dx = -\frac{\theta_0}{V} e^{-Vx} \Big|_0^x = \frac{\theta_0}{V} (1 - e^{-Vx})$$

将转角曲线图对 0 点取矩得：

$$M_0 = \int_0^x \theta x dx = \theta_0 \int_0^x e^{-Vx} x dx = -\frac{\theta_0}{V^2} e^{-Vx} (-Vx - 1) \Big|_0^x = \frac{\theta_0}{V^2} [1 - e^{-Vx} (Vx + 1)]$$

转角曲线的重心为： $G=M_0/A$ ，距离烟道口顶部上 x 处钢内筒烟囱截面在温差作用下的水平线变位为：

$$u'_{xt} = A(x - G) = Ax - M_0 = \frac{\theta_0 x}{V} (1 - e^{-Vx}) - \frac{\theta_0}{V^2} [1 - e^{-Vx} (Vx + 1)] = \frac{\theta_0}{V} \left[x - \frac{1}{V} (1 - e^{-Vx}) \right]$$

$$\theta_0 = 0.811 \alpha \eta_i \Delta T_0 / d$$

5.7.3 排烟筒有效壁厚是指纤维增强塑料内筒的结构层厚度或钢内筒扣除腐蚀余量后结构计算厚度。

6 地基与基础

6.3.4, 6.3.5 计算方法及公式与现行《建筑地基基础设计规范》(GB50007) 相关内容协调一致, 并部分考虑了烟囱基础的特点。

6.6.5~6.6.7 圆形和环形基础的配筋用弯矩是根据弹性薄板理论推导, 并经适当简化得来的。确定板式基础弯矩时, 仍沿用 2013 版规范的做法, 采用外悬挑中点处的底板压力作为均布荷载, 但确定底板下部弯矩的公式考虑了基础底板线性分布荷载的影响, 当 $r_1/r_2=1.2\sim 1.9$ 时, 新公式为规范公式的 1.1013~1.3571 倍。

采用径、环向配筋更符合圆形和环形基础底板的内力分布。根据弹性理论, 笛卡尔坐标系下的底板弯矩 M_x 、 M_y 分别为极坐标系下的 M_R 和 M_θ , 因此当采用方格网配筋时, 弯矩计算与径环向的弯矩公式相同。

根据弹性理论, 相同 r_1 、 r_2 和 r_2 情况下, 当内孔半径接近 0 时, 按圆环计算的孔内缘环向弯矩是按圆板公式计算的板中心弯矩的 2 倍。因此, 当圆环的 r_1/r_2 较大时, 应注意内孔半径 r_1 不宜过小, 以避免导致较大的圆环内缘弯矩。

6.6.8、6.6.9 对原规范条文进行了修正, 要求环壁以内底板上部最小配置构造钢筋。

6.6.12 设置地下烟道的基础, 将直接受到温度作用。由于基础周围为土壤, 温度不易扩散, 所以基础的温度很高。当烟气温度超过 350°C 时, 采用隔热层的措施, 使基础混凝土的受热温度 $\leq 150^\circ\text{C}$, 隔热层已相当厚。当烟气温度更高时, 采用隔热的办法就更难满足混凝土受热的要求, 此时可把烟气入口改在基础顶面以上或采用通风隔热措施以避免基础承受高温。曾考虑过采用耐热混凝土作为基础材料。但由于对耐热混凝土作为在高温 (大于 150°C) 作用下的受力结构, 国内还没有完整的试验结果和成熟的使用经验。因此未列入本标准。

6.6.14 地下基础在温度作用下, 基础内外表面将产生温度差, 即有温度应力产生。温度应力与荷载应力进行组合。由于板式基础在荷载作用下所产生的内力, 是按极限平衡理论计算的。其计算假定: 在极限状态下, 基础已充分开裂, 开裂成几个极限平衡体。在这种充分开裂的情况下, 已无法求解整体基础的温度应力。所以, 对于温度应力与荷载应力, 本标准未给出应力组合计算公式, 仅在配筋数量上适当考虑温度作用的影响。

6.7.3 桩基承台优先考虑采用环形, 桩宜对称布置在环壁中心位置两侧, 可适当偏外侧布置, 并通过反复试算, 逐步调整, 直到符合全部要求为止。

- 6.7.4 对原规范条文进行了修改，调整为桩顶作用效应计算，并增加了水平力计算。
- 6.7.8 桩基沉降量和倾斜，采用实体深基础法或等效作用分层总和法的计算方法，在《工业烟囱设计手册》以及《高耸结构设计手册》中均有相关的叙述和计算实例，可作参考。表 6.7.8 的取值与国家现行标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 中第 5.5 节的相关要求相同。
- 6.7.9、6.7.10 此两条为国家现行标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 中相关计算方法，并结合烟囱承台设计特点得出。
- 6.8.7 考虑到整体弯曲对基础底板作用时的影响，底板下部钢筋构造加强，规定了最小配筋率。当底板厚度大于 2000mm 时，增加双向钢筋网是为了减少大体积混凝土温度收缩的影响，并提高底板的抗剪承载力。鉴于原《烟囱设计规范》(GB50051-2013) 此条对于最小配筋率说法不够明确，本次相关条文改为“板式基础底板下部采用径、环向配筋时，径向与环向钢筋的最小配筋率均不宜小于 0.15%，采用方格网配筋时，纵向与横向钢筋的最小配筋率均不宜小于 0.15%”。
- 6.9.1 根据基坑侧壁安全等级编制相应级别的支护和开挖方案，为保证基坑设计周期和周围环境的安全。
- 6.9.2 基坑挖完后，由施工单位会同设计单位、建设单位、勘察单位和监理单位到现场进行检查。如土质的实际情况与设计资料相符合，便签证验收，进行下道工序施工。如土质与设计资料不符合时，由建设单位、设计单位等相关单位提出处理方案。
- 6.9.4 天然地基是经过长时间的变化形成的比较稳定的地质结构，当基底表面采用填土的方法找平时，这种稳定的结构受到破坏，使基础所受的支撑力不均匀，导致烟囱发生沉降。因此，严禁采用填土的方法找平基坑底面。
- 6.10.3 环壁内的纵向钢筋有时由于环壁过高，导致钢筋下料长度不够，因环壁是将整个烟囱的力传递到基础的关键部位，故受力筋应焊接。套筒挤压连接、直螺纹和锥螺纹套筒连接已普遍应用到建筑工程，某单位在 120m 烟囱基础施工中进行了应用，不但施工方便，而且抗拉性能大于母材的抗拉性能，取得良好效果。
- 6.11.4 预留洞口处的上部荷载比较大，在浇筑混凝土后，易产生变形，同时造成接口处模板拆除困难，因此应对模板进行加固。洞口两侧混凝土对称浇筑也至关重要。
- 6.12.1 环壁混凝土浇筑是烟囱施工中关键的部分，因为整个模板、钢筋一次成型，要求混凝土连续一次浇筑完毕，加之筒壁有预插筋，施工时，有一定难度，容易出现一些混凝土通病，所以分层浇筑，防止混凝土离析，成为至关重要的步骤。根据施工需要，在不影响受力的情况下，征求监理单位同意，环壁可以开口。
- 6.12.2 为了便于施工操作，在底板与环壁的连接处(图 6.12.2 之 a、b) 可留设施工缝。
- 6.13.3 控制好环壁上表面的标高允许偏差，目的是要求环壁顶部一节在浇筑混凝土时，应控制好标高，以便为筒壁施工创造好条件；否则，由于环壁上表面的标高相差较多，不但增加了找平层的厚度，还影响工程质量。

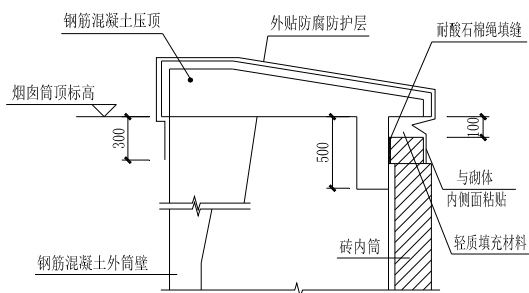
8 钢内筒与砖内筒

8.5.3 分段支承的套筒式砖内筒烟囱内部平台间距一般按 25m 左右考虑，分段支承的多管式砖内筒烟囱内部平台间距一般按 30m 左右考虑。

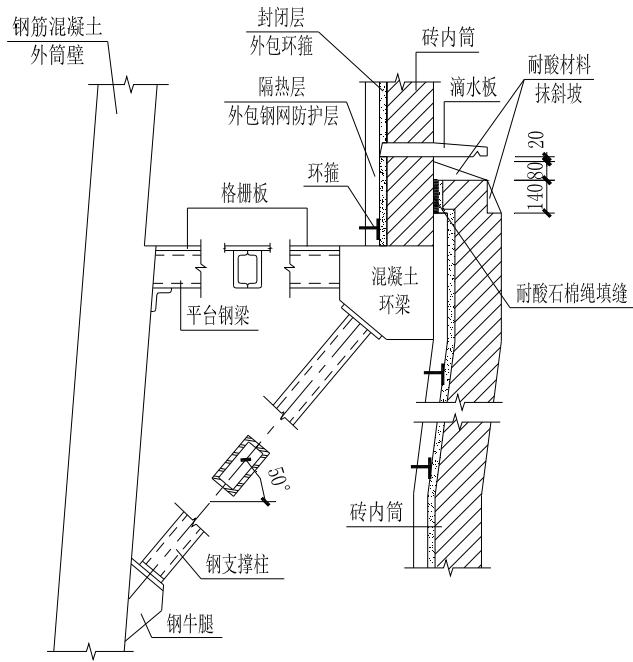
对于分段支承的套筒式砖内筒烟囱，考虑到内部空间紧凑和布置的便利性，本标准给出了较常采用的内部平台结构形式，即采用钢筋混凝土环梁、钢支柱、平台钢梁和平台支撑组成的内部平台体系。

对于分段支承的多管式砖内筒烟囱，由于内部空间较大，建议采用梁板体系的内部平台结构。从施工的角度考虑，平台梁建议采用钢结构。

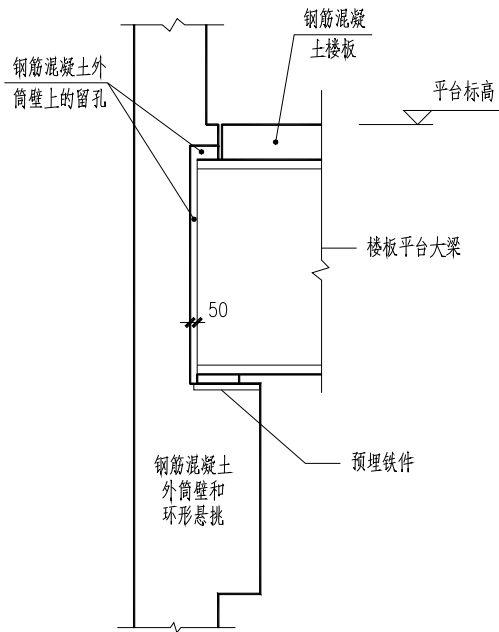
采用分段支承形式的套筒式和多管式砖内筒烟囱，在各分段内部支承平台处的连接示意详见图 8.5.3-1~图 8.5.3-4。



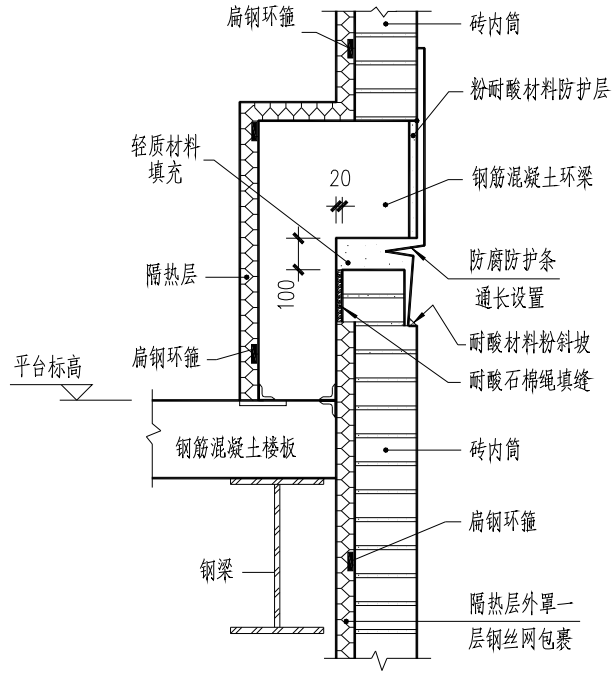
8.5.3-1 套筒式砖内筒烟囱筒首连接示意图



8.5.3-2 套筒式砖内筒烟囱内部平台连接示意图



8.5.3-3 多管式砖内筒烟囱平台梁端部连接示意图



8.5.3-4 多管式砖内筒烟囱平台处砖内筒连接示意图

9 纤维增强塑料内筒

9.1.1 异常运行是相对于长期运行而言，包括了事故状态、停车、开车状态等；树脂的热变形温度较玻璃化转变温度要低，此处采用玻璃化转变温度对应于异常运行工况更为适宜。

9.1.2 本规范中纤维增强塑料内筒仅指外部采用混凝土套筒，内部采用纤维增强塑料内筒的结构型式，其他如自立、拉索、钢框架等型式不包含在本规范中。

9.2.1 目前纤维增强塑料内筒既有采用乙烯基酯树脂也有采用不饱和聚酯树脂制作的，因此将不饱和聚酯树脂纳入基体材料中。

9.2.2 树脂的热变形温度的测试方法分为平放和竖放，因此规范中将测试依据的标准和方法明确。

9.2.8 E-CR 类型玻璃纤维纱是指无碱无氟无硼类型玻璃纤维纱，目前由于 E-CR 为注册专利，市场上纤维厂家同种类型纤维的牌号很多，因此原 E-CR 修改为无碱无氟无硼玻璃纤维纱。同时 E 玻璃纤维改为无碱玻璃纤维，C 玻璃纤维改为中碱玻璃纤维。

9.3.3 本条对影响纤维增强塑料材料性能的因素加以归类和完善。将影响纤维增强塑料材料性能的因素主要归类为三个方面，即常温下材料抗力系数、设计工况调整系数和温度折减系数，符合我国规范体系要求及习惯。在系数取值方面，主要参照美国标准 Standard Guide for Design, Fabrication, and Erection of Fiberglass Reinforced (FRP) Plastic Chimney Liners with Coal-Fired Units (D 5364 - 08)、日本有关设计资料 and 我国设计、试验数据及工程经验。总体上，本标准的可靠度指标比美国标准以及原《烟囱设计规范》GB50051-2013 略有提高，取值更加合理。在温度折减系数方面，原《烟囱设计规范》GB50051-2013 针对乙烯基树脂做了试验，保持与原规范一致。

9.3.4 纤维增强塑料弹性模量应考虑温度折减，当烟气温度不大于 100℃时，折减系数可按 0.8 选取。

9.4.1 由于膨胀节容易损坏，维护与更换困难，且价格较高，因此，设计时宜尽量减少膨胀节数量，当设计、制作及安装技术与水平允许时，宜尽量采用整体自立式形式。

9.4.8 对于外筒为钢筋混凝土结构的纤维增强塑料内筒烟囱，纤维增强塑料内筒除了顶部超过外筒顶部平台部分的内筒外，内筒所受风荷载均为间接作用，属于风荷载不直接作用内筒，超出外筒顶部平台部分则属于风荷载直接作用内筒。直接承受风荷载的内筒需要考虑局部风压作用。

9.7.7 条文中“粘接宽度”是指计算厚度范围的宽度或构造宽度，不包括坡段的厚度。自立式纤维增强塑料内筒采用承插连接时，其外部可采用非粘接连接方式进行连接。

9.7.9 根据国际标准规定及国内应用实践，对原规范进行了修改。

10 钢烟囱

10.2.1 在过去的设计中,常用的塔架截面形式主要有三角形和四边形,并优先选用三角形。因为三角形截面塔架为几何不变形状,整体稳定性好、刚度大、抗扭能力强。

10.2.2 塔架在风荷载作用下,其弯矩图形近似于折线形。一般将塔架立面形式作成与受力情况相符的折线形,为了方便塔架的制作安装,塔面的坡度不宜过多,一般变坡以3~4个为宜。

根据实践经验,塔架底部宽度一般按塔架高度的1/4至1/8范围内选用,多数按塔架高度的1/5至1/6决定其底部尺寸。在此范围内确定的塔架底部宽度,对控制塔架的水平变位,降低结构自振周期,减少基础的内力等都是有利的。

10.2.3 增设拉杆是为了减小塔架底部和节间的变形,并使底部节间有足够的刚度和稳定性。

10.2.4 随着计算技术的进步,现在对塔架的分析很少采用手算,而基本上是采用计算机软件进行精确计算。

10.2.5 排烟筒与塔架平台或横隔相连,在风荷载和地震作用下,排烟筒相当于一根连续梁,将风荷载和地震力通过连接点传给钢塔架。但应注意排烟筒在温度作用下可自由变形。钢塔架与排烟筒采用整体吊装时,顶部吊点的上节间内力往往大于按承载能力极限状态设计时的内力,所以必须进行吊装验算。

10.2.6 由于排烟筒伸出塔顶,对塔顶将产生较大的水平集中力,在塔架底部接近地面两个节间又有较大的剪力,可能有扭矩产生。所以在塔架顶层和底层采用刚性K型腹杆,以保证塔架在这两部分具有可靠的刚度。组合截面作成封闭式,除提高杆件的强度和刚度外,更有利于防腐,提高杆件的防腐能力。

采用预加拉紧的柔性交叉腹杆,使交叉腹杆不受长细比的限制,能消除杆件的残余变形,可加强塔架的整体刚度,减小水平变位和横向变形。由于断面减小,降低了用钢量和投资。

钢管性能优越于其它截面,它各向同性,对受压受扭均有利,并具有良好的空气动力性能,风阻小,防腐涂料省,施工维修方便,对可能受压,也可能受扭的塔柱和K型腹杆选用钢管是合理的。

承受拉力的预加拉紧的柔性交叉腹杆,选用风阻小,抗腐蚀能力强,直径小面积大的圆钢,既经济又合理。

10.2.7 滑道式连接是将排烟筒体用滑道与平台梁相连,在垂直方向可自由变位,能抗水平

力和扭矩。当排烟筒为悬挂式时，排烟筒底部或靠近底部处与平台梁连接可采用承托式，即将筒体支承在平台梁上。承托板须开椭圆螺栓孔，使筒体在水平方向有很小的间隙变位，而在垂直方向能向上自由伸缩。以上部位与平台梁的连接可采用滑道式。

10.3.2 因钢烟囱结构阻尼比较小，当钢烟囱发生横风向共振时，其共振响应一般是顺风向荷载的几倍，其振幅较大，烟囱会发生过大变形破坏或疲劳破坏，必须根据不同情况采取相应的措施。减振措施主要包括空气动力学装置或阻尼器系统等。

10.3.4 原规范规定：烟囱高度不大于 20m 时， $t_{\min} = 4.5 + C$ ；烟囱高度大于 20m 时， $t_{\min} = 6 + C$ ；其中 C 为腐蚀厚度余量，有隔热层时取 C=2mm，无隔热层时取 C=3mm。原规范规定筒壁最小厚度与烟囱高度有关，不尽合理，本次修订，将最小厚度与筒身直径相关联，更科学、合理。同时本次修订增加了烟囱加劲肋最大间距规定。

10.3.5 破风圈可以干扰烟囱表面旋涡的形成，降低共振响应，但没有数据表明破风圈可以全部消除烟囱表面旋涡的形成，故仍需进行疲劳验算。

10.4.2 拉索式钢烟囱的拉索应对称布置以避免初始拉力对烟囱筒身产生扭矩或偏心距。

10.4.6 参考《美国通信塔桅结构设计规范美》Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas 确定。

11 砖烟囱

11.1.1 根据《国务院办公厅关于进一步推进墙体材料革新和推广节能建筑的通知》(国办[2005]33号),为满足绿色环保要求,城镇禁止使用实心粘土砖,优先选用混凝土砌块;对于经济不发达的农村地区,可使用粘土砖,但不推荐。本章内容适用于实心粘土砖烟囱。

普通黏土砖在浇筑前浇水润湿,对砂浆强度的正常增长,增强砖面与砂浆之间的粘结,保证砌体砂浆的饱满度和砌筑效率等都有直接的影响。

根据某建筑公司对普通黏土砖所作的在不同含水率情况下的小砌体抗剪强度对比试验,其结果是:砌体抗剪强度随砖的含水率增加而提高,含水饱和的砖约为含水率为零时的二倍。砌体抗压强度也随含水率增加而提高,含水率为5%~10%和水饱和的砖,其抗压强度比含水率为零的砖,分别提高20%和30%左右。但是,如果将砖浇到饱和或接近饱和状态,除了施工现场难以做到外,同时由于砂浆稠度增大,往往使砌体产生滑动变形,并且因砂浆流淌而使墙面不能保持清洁。因此,含水率的确定应考虑对砌体强度的影响和实际操作的要求。故针对我国普通黏土砖吸水率(即饱和含水率)一般在20%左右的实际情况,规定其含水率宜为10%~15%。经测定,10%~15%的含水率相当于普通黏土砖断面四周的吸水深度为10~20mm。因此,在现场检查时可将整砖打断,断面四周的吸水深度不小于15mm时,即认为合格。

11.7.4 根据试验结果表明:砂浆强度随着使用时间的延长而降低,所有砂浆在初凝前应使用完毕。

11.7.5 关于水平砖缝的砂浆饱满度与砌体抗压强度的关系,某研究所通过试验得出:当水平砖缝砂浆饱满度达到73%时,砌体的抗压强度就能满足设计规范中规定的数值。垂直砖缝的砂浆饱满度对砌体的抗剪强度也有明显的影响,垂直砖缝中无砂浆的砌体,其水平破坏荷载比砂浆饱满的砌体低23%。在实际施工中,砖缝的砂浆饱满度采用挤浆和加浆等砌筑方法来保证。

11.7.6 环向钢筋一般为 $\Phi 6\sim\Phi 8$ 的钢筋,钢筋上下有2mm的砂浆层,这样可以使钢筋和砌体形成一体,起到应有的作用。

11.7.7 施工时对砖烟囱筒壁内配置钢筋的技术要求与钢筋混凝土烟囱筒壁内的钢筋基本相同。如果设计有要求,按设计施工,如果设计无要求,则纵向钢筋的接头数量在任意截面内不应超过总数的1/4,搭接长度为45d。其次,纵向钢筋的锚固,其下端应锚固在基础环壁或环梁混凝土中,锚固长度为35d。环向钢筋的接头应错开,搭接长度为45d,保护层为30mm。

11.7.8 在筒壁砌筑前,为了便于放线和保持砖层的水平,在基础环壁或环梁的上表面,应先用1:2水泥砂浆抹平。其水平偏差,在全圆周内不得大于20mm,砂浆找平层的厚度最大不得超过30mm。

11.7.9 增加坡度尺检查,可随时检查砌体的收分,及时发现偏差,及时纠正。

11.7.10 经调研,各施工单位都是每砌筑完1.25m检查一次,这样对出现的偏差得以及时纠正,有利于保证工程质量。同时砌筑工人每砌筑完3~5层砖,使用坡度尺检查一次筒壁外表面的坡度,如出现偏差也应及时纠正。

—本款条文说明修改

11.7.11 为保持筒壁截面外圆周的弧形和砖缝的适宜宽度，应采用顶砖砌筑。根据计算，当砖缝宽度不能满足规范要求时，便应相间地配置楔形砖。只有在筒壁外径大于 5m 时，才可采用顺砖与顶砖交错砌筑。

11.7.16 砌筑用的砂浆，设计时规定了砂浆强度等级，为检查施工时砌体砂浆的实际强度等级是否符合设计要求，应从施工现场取样制作砂浆试块，用于抗压强度试验，以供复核。关于砂浆试块制作的数量是根据大多数施工单位的意见确定的，而砂浆试块的制作、养护及抗压强度取值应按《砌体结构工程施工及验收规范》GB50203 的有关规定执行。

11.7.17 砖烟囱筒壁上的环箍是承受温度应力的，属于受力构件。环箍的安装质量应以螺栓拧紧到环箍紧贴筒壁并对筒壁产生压力为止。根据施工经验，拧紧螺栓应在砌体砂浆强度达到 40%后才不致把砖挤压进去。

12 烟囱的防腐蚀

12.1.3 控制烟气流速是控制“烟囱雨”和冷凝液收集系统装置有效工作的基本条件。二次夹带是“烟囱雨”液滴的主要来源，而导致二次夹带最主要的原因是烟气流速过高。另外，二次夹带现象还与排烟筒内壁表面粗糙度、连续性、烟囱及烟道的结构有关。烟囱出口最大烟气流速推荐值参考了美国电力研究院（EPRI）《湿烟囱设计导则》-2012 修订版（《Revised Wet Stack Design Guide》-2012）制定。

12.1.5 “烟囱雨”主要来源包括：①烟气夹带液：从吸收塔出来的烟气，夹带有一定数量小颗粒液滴；②冷凝液：烟气在排烟筒内流动过程中通过传热冷凝和绝热冷凝生成数量可观的冷凝液；③二次夹带液：排烟筒内壁的液膜，当烟气流速超过液滴二次夹带气流的临界流速筒壁内表面几何形状突变时，液膜汇聚成液滴并被吹离筒壁表面夹带气流，形成二次夹带现象。

根据美国电力研究院（EPRI）《湿烟囱设计导则》-2012 修订版（《Revised Wet Stack Design Guide》-2012）中的研究结果，300 μm 以下的液滴在落到地面前已经蒸发殆尽，在地面不会感知液滴飘落。因此，抑制“烟囱雨”时，主要抑制与捕集 300 μm 以上的大颗粒液滴。二次夹带液粒径通常大于 300 μm ，是“烟囱雨”的主要来源。

烟气夹带液和筒壁冷凝液会在排烟筒内表面形成液膜，由于排烟筒内部气流不均匀，存在较多紊流区域，局部烟气流速可能会超过液滴二次夹带气流的临界流速，同时烟道也存在凹凸等壁面不连续情况，导致液滴二次夹带气流的现象经常发生，基于此，冷凝液收集系统装置设计范围宜从吸收塔出口烟道开始至排烟筒出口，在发生液滴二次夹带气流之前将排烟筒内壁面液膜收集，前端的收集也可减少后端排烟筒冷凝液收集负荷。如果设置湿式除尘器，则冷凝液收集系统装置宜从湿式除尘器出口开始至排烟筒出口。

排烟筒内部潮湿气流的夹带、冷凝、二次夹带等现象定量分析很困难。冷凝液收集系统装置的设计宜进行完整的研究工作，包括 CFD（计算流体动力学）流体模拟及物理模型模拟研究，并对烟道及排烟筒进行必要的流场优化设计。冷凝液收集系统装置组件的几何形状、尺寸、位置、数量应能利用烟气剪切力和液膜重力，在发生二次夹带之前将液体及时收集并排出。冷凝液收集系统装置的设计和优化应根据每个项目的实际情况而定，取决于烟道、烟囱的几何形状，烟气流速以及气液两相流运动状况。除非是完全相同的项目，每套系统的设计和安装都不同，因此针对每一特定项目，宜由有相关经验的单位进行数值模拟与物理模型试验，并进行冷凝液收集系统装置的设计和优化。

12.2.1 结合排烟筒布置型式，根据烟气的类别和腐蚀等级，选择合适的烟囱防腐材料，并在施工中得以可靠实施，是烟囱能否成功防腐完成排烟功能的关键。

《烟囱设计规范》GB50051—2002 版编制时，燃煤电厂极个别机组投运湿法脱硫系统，烟囱主要排放干烟气，烟气腐蚀等级按燃煤含硫量确定；并根据烟气腐蚀性分级，提出了排

放腐蚀性烟气的烟囱结构型式选择要求。当烟气属强腐蚀性，烟囱高度小于等于 100m 时，宜采用套筒式烟囱，即在承重外筒内，另做独立砖内筒，使外筒受力结构不与强腐蚀性烟气接触；烟囱高度大于 100m 时，宜采用多管或套筒式烟囱。

2013 版结合当时近十年来火力发电厂烟囱及其它行业烟囱，在不同使用条件，特别是烟气湿法脱硫运行条件下，采用不同烟囱结构型式和防腐蚀措施在运行后出现的渗漏腐蚀现象及处理经验，提出了对排放不同腐蚀性等级的干烟气、湿烟气和潮湿烟气的烟囱结构型式选择要求“烟囱结构型式选用表”，选用表细化了针对不同的烟气类别和腐蚀等级选择相适应的烟囱结构型式。

烟囱类型		烟气类型	干烟气			潮湿烟气	湿烟气
			弱腐蚀性	中等腐蚀	强腐蚀		
砖烟囱			○	□	×	×	×
单筒式钢筋混凝土烟囱			○	□	△	△	×
套筒 或多 管式 烟囱	砖内筒		□	○	○	□	×
	钢内筒	防腐金属内衬	△	△	□	□	○
		轻质防腐砖内衬	△	△	□	□	○
		防腐涂层内衬	□	□	□	□	□
		耐酸混凝土内衬	□	□	□	△	×
玻璃钢内筒			△	△	□	□	○

注：“○”建议采用的方案；“□”可采用的方案；“△”不宜采用的方案；“×”不应采用的方案。

近十多年来，燃煤电厂湿法脱硫系统相继投运，烟气未设置加热装置（GGH）的排烟筒由于湿烟气排烟温度降低，酸液结露严重，烟囱的腐蚀问题突出；不同烟囱排烟筒防腐内衬的防腐性能特点及应用效果差异明显。本次修订，结合在烟囱防腐蚀方面若干年来烟囱腐蚀工程案例、处理经验和研究成果，着重根据防腐材料的工程实际使用效果、按烟气类型（干烟气、湿烟气和潮湿烟气）和烟囱排烟筒型式（砖烟囱、钢烟囱、单筒式钢筋混凝土烟囱、砖套筒及钢套筒或多管式烟囱）选择防腐性能相适用的防腐材料，使得既保证烟囱外筒受力结构的安全可靠又要完成排烟筒在规定使用年限内的功能要求，提出本“烟囱防腐材料选用表”。

根据对湿法脱硫烟囱现场调研，湿法脱硫无 GGH 运行工况的湿烟气平均温度为 50℃ 左右，排烟筒内有明显冷凝液积聚流淌；设 GGH 或 M(W)GGH 运行工况的潮湿烟气平均温度为 80℃ 左右，排烟筒内无冷凝液积聚，除保温缺陷形成的冷桥现象等处，烟囱基本处于干燥状态。结合调研烟囱内部状况及冷凝液搜集口冷凝液流量检查情况，可以看出烟气对烟囱的腐蚀在有无 GGH 的情况下，有很大差别。在无 GGH 运行工况下，按《工业建筑防腐蚀设计规范》的规定划分为液态介质型腐蚀；在设 GGH 运行工况下，烟囱内无冷凝液积聚，为气态介质型腐蚀，在烟囱内部潮湿烟气所能达的可能形成冷桥结露部位，才会冷凝产生液态介质腐蚀情况。

据编制组不完全统计的燃煤电厂湿烟气烟囱防腐内衬采用数量，至 2017 年 8 月，套筒或多管式钛板内衬烟囱 426 座，国内尚无镍基合金(C276、C22)内衬的排烟筒烟囱；套筒或多管式及单筒式进口硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐系统烟囱 113 座，玻璃纤维增强塑料(玻璃钢)套筒或多管式烟囱及水平烟道（指脱硫后至冷却塔段）共 86 座。

钛板内衬排烟筒，后石电厂挂贴钛板(进口材料)首台机组(海水脱硫)于 1999 年 11 月投运，常熟电厂复合钛板(国产)于 2005 年 3 月首台机组投运(石灰石石膏湿法脱硫)，后国内 10 座烟囱采用挂贴钛板，其余多为钛钢复合板。使用中挂贴钛板出现了钛板个别部位腐蚀穿孔的现象，有一定数量排烟筒的复合钛板焊缝连接处发生了腐蚀或泄漏，经维护后防腐正常。值得注意的是，采用可再生胺法脱硫的西南和华东各某电厂排烟筒钛板发生较为严重的腐蚀现象，后改用其他防腐内衬材料；美国电力研究院(EPRI)编制的“湿烟囱设计导则(WET STACKS DESIGN GUIDE)”中的“排烟筒结构材料表”中，1996 年版列有“钛复合板”项，2012 年版中未列入。鉴于国内仍有大量钛板内衬排烟筒应用，本次标准修订仍保留了钛基

复合金属内衬，但根据国内外经验，建议当采用该方案时，宜采用更高等级的钛合金内衬或镍基复合金属内衬。

利港电厂采用进口的硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐系统于 2006 年 12 月首台机组投运（石灰石膏湿法脱硫）。国内燃煤电厂机组有钢烟囱和套筒或多管式烟囱 25 座（其中防腐改造 19 座和新建 6 座）、单筒式烟囱 67 座（其中防腐改造 47 座和新建 20 座）、砖套筒烟囱 20 座（防腐改造），砖单筒烟囱 1 座（防腐改造），分别采用进口硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐系统，目前使用状况正常。硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐系统具有良好的防腐性和隔热性（烟道或排烟筒不需另设保温层）、具有利于结露液体积聚流淌的良好表面；其泡沫玻璃砖体强度较低，安装使用时要注意避免物理和机械损伤。

玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）排烟筒近年在国内大中型电厂等工程中有较多湿烟囱应用案例；其有良好的耐腐蚀性和便于增设排烟筒冷凝液收集装置，实际应用中要求注意到所接触最高烟气温度限制因素、材料供货及制造期间质量控制、玻璃钢的阻燃性能等因素可能造成的不利影响。

钢或钢内筒烟囱的防腐涂层工程实际有多种种类。防腐涂层选用中，注意到烟气类别及腐蚀性、检查维修条件、实际使用年限与其防腐性能的协调匹配。目前应用较多的玻璃鳞片涂层等在湿烟气条件下使用期间维护工作量大，其对于实际使用时间少于 10 年的湿烟气烟囱，其经济性或有一定优势；两台及多台炉共用一个排烟筒时注意谨慎采用。烟囱防腐调研显示，在设置加热装置（GGH）的潮湿烟气条件下，在施工中得到可靠实施的优质钢内筒玻璃鳞片防腐涂层使用效果较好。

国产玻璃砖、国产泡沫玻化砖防腐系统的烟囱，在湿法脱硫无 GGH 的湿烟气运行工况条件下，有较多的出现了不同程度防腐失效工程案例，极个别钢内筒甚至发生垮塌事故。实际工程应用中注意甄别其烟气相类似工况下的成功工程业绩。

采用钠水玻璃耐酸胶泥和耐酸砖构成的砖排烟内筒，工程案例证明其防腐和抗渗性能不满足在湿法脱硫无 GGH 的湿烟气运行工况条件。

两台及多台炉共用一个排烟筒时，对烟囱防腐材料的检查相对一台炉用一个排烟筒更加困难，其维修或二次防腐改造对机组的正常运行影响更加大些；湿烟囱防腐失效实际工程案例更多些；单筒式湿烟囱防腐内衬材料失效会直接影响烟囱结构的安全性；故在上述情况下，应更加重视烟囱排烟筒防腐材料的确定。

13 烟囱平台

13.2.2 筒体总重量为提升时实际包括的所有构件重量，包括筒身自重、一同提升的加劲肋、保温材料等。

15 烟道

15.1.4 烟道结构在烟气作用下，会产生振动，尤其是钢结构和玻璃钢结构。因此规定：烟道截面变化应平缓，转角处做成斜角或圆形，避免气流急转弯和烟气流速急剧变化，防止烟道内产生烟气流动死角或烟气涡流；钢烟道或玻璃钢烟道烟道与烟囱连接处应设置膨胀节或补偿器等减震装置。

16 航空障碍灯和标志

16.1.1 烟囱对空中航空飞行器视为障碍物，是造成飞行安全的隐患，因此烟囱应设置障碍标志。我国颁布的《民用航空法》，国务院、中央军委发布的《关于保护机场净空》的文件等一系列行政法规都规定了航空障碍灯必须设置的场所和范围。民用机场净空保护区域是指在民用机场及其周围区域上空，依据现行行业标准《民用机场飞行区技术标准》MH5001—2013规定的障碍物限制面划定的空间范围。在该范围内的烟囱应设置航空障碍灯和标志。

16.1.2~16.1.4 国际民用航空公约《附件十四》，针对烟囱尤其是高烟囱有严格的技术要求和规定。中国民用航空局制定的《民用机场飞行区技术标准》MH5001—2013 和国务院、中央军委国发[2001]29 号《军用机场净空规定》对障碍灯和标志都有明确规定。本节的制定参照了上述标准。在《民用机场飞行区技术标准》MH5001—2013 中将高光强障碍灯划分为 A、B 型，将中光强障碍灯划分为 A、B、C 型。其中适合安装在高耸烟囱的障碍灯形式为高光强 A 型障碍灯及中光强 B 型障碍灯。本次规范修订对障碍灯选用型号做出了规定。

16.2.1~16.2.7 按着《民用机场飞行区技术标准》MH5001-2013 等相关要求规定了航空障碍灯分布，图 16.1 为实际工程案例，供设计参考。

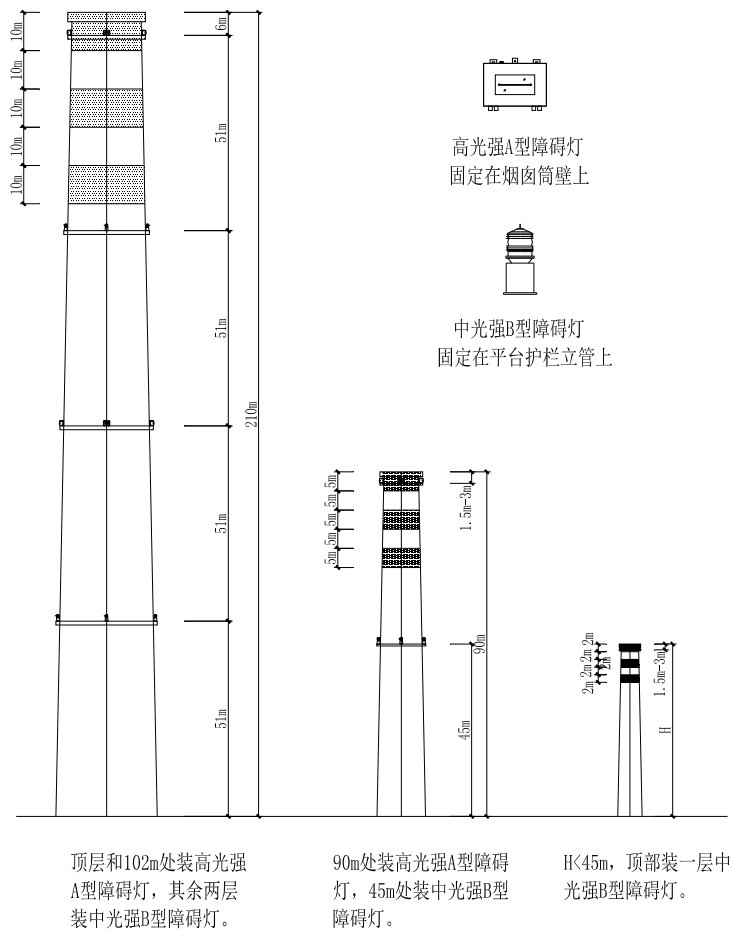


图 16.1 烟囱设置航空障碍灯分布及标志

17 既有烟囱加固与防腐改造

17.1.1 既有烟囱的设计年代不同，所采用的标准也不同。在加固与防腐改造前，应依据现行有关国家标准所规定的风荷载、抗震设防烈度、后续使用年限等，对烟囱进行检测与鉴定。烟囱与普通建筑物相比有其自身独特的结构特点、高温工作特点和腐蚀特点，因此，要求烟囱的可靠性评估、可研报告及设计等应由具有本领域设计经验和能力的结构设计单位来承担。

17.1.3 烟气温度、湿度、介质成分与浓度、烟气腐蚀强度等级的改变均会造成烟气腐蚀环境及强度的改变，对现有烟囱影响较大，未经技术鉴定或设计论证，不得改变。

17.1.4 作为项目工程，烟囱加固与防腐改造应根据既有烟囱的实际状况，选择结构加固、耐久性修复以及防腐蚀功能的维护或防腐蚀方案升级中的某一项或多项。防腐蚀方案升级主要为提高防腐材料性能或改变烟囱型式。

17.1.5 碳纤维主要用于抗拉，不应用于抗压。钢筋混凝土烟囱外侧环向加固及局部裂缝加固可充分利用碳纤维优势。

烟囱属于高温和腐蚀作用的高耸构筑物，当混凝土表面温度较高时会影响碳纤维加固用胶粘剂的工作性能。由于烟气腐蚀影响，采用碳纤维加固后应采取防护处理。

17.2.3 遭遇腐蚀的钢筋混凝土烟囱和砖烟囱其结构层遭到破坏并残留大量腐蚀介质及结晶物，在加固前应采取措施进行治理，防治有害介质或结晶物的继续腐蚀作用。

17.2.5 湿法脱硫单筒烟囱，其内衬和隔热材料渗漏严重，对筒壁造成腐蚀，严重影响烟囱的耐久性，需要拆除原烟囱内衬和隔热层材料，对烟囱内壁进行加固或耐久性修复。

17.2.6 由于单筒式钢筋混凝土烟囱经过湿法脱硫后，其腐蚀均很严重，其筒壁承载力和耐久性均有不同程度下降，不宜采用悬挂式内筒，宜采用整体自立式内筒。既有烟囱采用新增内筒改造方案时，会降低烟囱通烟面积直径，增加烟气流速，要求烟气流速提高幅度不宜大于10%。

由于既有烟囱内部空间限制，新增内筒后，难以沿烟囱高度设置多层检测平台，但考虑烟囱必要的日常检查的需要或在线监测需要，规定在烟道口上方至少设置一层平台。

17.3.3 单筒烟囱内侧及筒首外侧可能由于酸液或烟囱雨下洗对混凝土产生严重腐蚀，同时在寒冷地区，烟囱筒首有冻融可能，因此需要采用收缩率更低、抗渗透性能更强的修复材料，本标准根据烟囱使用特点给出了不同部位的收缩率限值。

17.4.1 根据自立式纤维增强塑料内筒受力特点和自重轻优势，采用在既有烟囱顶部吊装是较为理想的施工方案，目前国内已经有许多工程采用该吊装技术，具有施工速度快、满足烟囱改造工期短等要求的优势。

17.4.2 尽管纤维增强塑料内筒顶部吊装工程为临时结构，但考虑到事故造成的人员伤害、经济损失和社会影响很大，故安全等级定为二级。纤维增强塑料内筒吊装周期一般在2个月以内完成，在短期内发生地震的概率很小，故可不考虑地震作用。除吊装重量外，外部荷载

主要为风荷载，风荷载应按吊装工况、非吊装工况以及安装与拆除工况分别确定。

17.4.3 风速 11m/s 相当于我国风力等级 5 级风（风速范围为 8.0 m/s~10.8m/s）的上限值，超过 5 级风时，规定不得进行吊装作业。

17.4.6 烟囱顶部吊装是一项较为复杂的高空吊装工艺，涉及作业人员、结构和周围设施等重大安全问题，应由有相应资质和经验的结构设计单位进行设计。

17.4.8 $w_0^*=0.1 \text{ kN/m}^2$ 相当于六级风对应风速。根据 17.4.3 条规定超过 5 级风是不允许吊装的，在吊装工况下，其每段内筒空中持续时间一般不超过 1 小时，按 $w_0^*=0.1 \text{ kN/m}^2$ 设计；非吊装工况，塔架一般在烟囱顶部持续时间约 2 个月，按 10 年一遇极限风压考虑是足够安全的，也是比较经济的；安装与拆除工况，结构处于形成或拆解过程中，与塔架结构最终状态不同，受力亦不同，安装与拆除周期一般不超过一周，按 $w_0^*=0.1 \text{ kN/m}^2$ 设计。