

中华人民共和国国家标准

烟囱设计规范

Code for desing of chinmeys

GB 50051—2002

主编部门：中华人民共和国建设部

批准部门：中华人民共和国建设部

施行日期：2003年5月1日

中华人民共和国建设部公告

第101号

建设部关于发布国家标准

《烟囱设计规范》的公告

## 1 总 则

1.0.1 为了在烟囱设计中贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量，制定本规范。

1.0.2 本规范用于砖烟囱、钢筋混凝土烟囱、钢烟囱、套筒式烟囱、多管式烟囱、烟囱基础和烟道设计。

1.0.3 本规范是按照国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068)和国家标准《建筑结构设计术语和符号标准》(GB/T 50083)规定的原则制定的。

1.0.4 烟囱设计除应符合本规范规定外，尚应符合国家现行的有关强制性标准的规定。

1.0.5 本规范采用的设计基准期为 50 年。

## 2 术语、符号

### 2.1 术 语

2.1.1 烟囱 chimney

用于排放工业与民用炉窑高温烟气的高耸构筑物。

2.1.2 筒身 shafi

烟囱基础以上部分，包括筒壁、隔热层和内衬等部分。

### 2.1.3 筒壁 shell

烟囱筒身的最外层结构，用于保证筒身稳定。

### 2.1.4 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。

### 2.1.5 内衬 lining

分段支承在筒壁牛腿之上的自承重砌体结构，对隔热层起到保护作用。

### 2.1.6 钢烟囱 steel chimney

筒壁材质为钢材的烟囱。

### 2.1.7 钢筋混凝土烟囱 reinforced concrete chimney

筒壁材质为钢筋混凝土的烟囱。

### 2.1.8 砖烟囱 brick chimney

筒壁材质为砖砌体的烟囱。

### 2.1.9 自立式钢烟囱 selfsupporting steel chimney

筒身在不加任何附加受力支撑条件下，与基础一起构成一个稳定结构的钢烟囱。

### 2.1.10 拉索式钢烟囱 guyed steel chimney

筒身与拉索共同组成稳定体系的钢烟囱。

#### 2.1.11 塔架式钢烟囱 framed steel chimney

筒身与塔架共同组成稳定体系的钢烟囱。

#### 2.1.12 单筒式烟囱 single tube chimney

内衬分段支承在筒壁上的普通烟囱。

#### 2.1.13 套筒式烟囱 tube-in-tube chimney

筒壁内设置一个排烟筒的烟囱。

#### 2.1.14 多管式烟囱 multi-flue chimney

两个或多个排烟筒共用一个筒壁或塔架组成的烟囱。

#### 2.1.15 烟道 flue

排烟系统的一部分，用以将烟气从炉窑导入烟囱。

#### 2.1.16 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。

#### 2.1.17 临界风速 critical wind speed

结构产生横风向共振时的风速。

#### 2.1.18 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。

#### 2.1.19 破风圈 strake (vane)

用于破坏风的旋涡脱落规律的稳定装置。

#### 2.1.20 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。

#### 2.1.21 传热系数 heat transfer coefficient

结构两侧空气温差为 1K，在单位时间内通过结构单位面积的传热量，单位： $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

#### 2.1.22 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： $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

#### 2.1.23 附加弯矩 additional bending moment

因结构侧向变形，结构自重荷载在结构各水平截面产生的弯矩。

#### 2.1.24 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。

#### 2.1.25 板式基础 mat foundation

支承整个建筑或构筑物的大面积钢筋混凝土板基础。

### 2.1.26 圆形基础 circular foundation

平面外形为圆形的板式基础。

### 2.1.27 环形基础 ring-like foundation

平面外形为环形的板式基础。

### 2.1.28 壳体基础 shell foundation

以壳体结构形成的空间薄壁基础。

## 2.2 符号

### 2.2.1 作用、作用效应和有关系数

$M$ 、 $M_k$ ——按荷载效应基本组合、标准组合计算的弯矩值；

$M_a$ 、 $M_{ak}$ ——附加弯矩设计值、标准值；

$M_W$ 、 $M_{Wk}$ ——风荷载弯矩设计值、标准值；

$M_E$ 、 $M_{Ek}$ ——地震弯矩设计值、标准值；

$M_{Ea}$ ——地震附加弯矩设计值；

$N$ 、 $N_k$ ——按荷载效应基本组合、标准组合计算的轴向力值；

$G$ 、 $G_k$ ——永久荷载或结构重力荷载设计值、标准值；

$Q_{1k}$ ——第一个可变荷载标准值；

$Q_{ik}$ ——除第一个可变荷载外其他第*i*个可变荷载标准值；

$F_{Ehk}$ ——水平地震作用标准值；

$F_{Evk}$ ——竖向地震作用标准值；

$S_{Gk}$ ——永久荷载标准值的效应；

$S_{Q1k}$ ——在基本组合中起控制作用的第一个可变荷载标准值的效应；

$S_{Qik}$ ——第  $i$  个可变荷载标准值的效应；

$S_{wk}$ ——风荷载标准值的效应；

$S_{Ma}$ ——由风荷载、日照和基础倾斜引起的附加弯矩效应；

$S_{MaE}$ ——由地震作用、风荷载、日照和基础倾斜引起的附加弯矩效应；

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

$S_{dk}$ ——荷载效应和温度作用效应的标准组合；

$S_{dq}$ ——荷载效应的准永久组合；

$\gamma_o$ ——烟囱的重要性系数；

$\gamma_G$ ——永久荷载的分项系数；

$\gamma_{Q1}$ ——第一个可变荷载的分项系数；

$\gamma_{Ehk}$ 、 $\gamma_{Ev}$ ——水平地震作用、竖向地震作用的分项系数；

$\gamma_w$ ——风荷载的分项系数；

$\gamma_L$ ——平台活荷载的分项系数；

$\gamma_A$ ——安装检修荷载的分项系数；

$\gamma_I$ ——裹冰荷载的分项系数；

$\psi_{ci}$ ——第  $i$  个可变荷载的组合值系数；

$\psi_{cW}$ 、 $\psi_{cMa}$ ——不含地震作用效应的基本组合中，风荷载和附加弯矩的组合值系数；

$\psi_{cWE}$ 、 $\psi_{cMaE}$ ——含地震作用效应的基本组合中，风荷载和附加弯矩的组合值系数；

$\psi_{cL}$ ——平台活荷载的组合值系数；

$\psi_{qi}$ ——第*i*个可变荷载的准永久值系数；

$\sigma_{cW}$ 、 $\sigma_{sW}$ ——混凝土、钢筋在荷载效应的标准组合作用下的应力值；

$\sigma_{cT}$ 、 $\sigma_{sT}$ ——混凝土、钢筋在温度效应作用下的应力值；

$\sigma_{cWT}$ 、 $\sigma_{sWT}$ ——混凝土、钢筋在荷载效应和温度效应的标准组合作用下的应力值；

$\omega_{\max}$ ——考虑裂缝宽度分布不均匀性和长期作用影响的混凝土最大裂缝宽度；

$T_g$ ——烟气温度；

$T_a$ ——空气温度；

$\Delta T$ ——温度差；

$p_{\max}$ ——基础底面边缘最大压力设计值；

$p_{\min}$ ——基础底面边缘最小压力设计值。

## 2.2.2 材料性能和有系数

$E_c$ 、 $E_{ct}$ ——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；

$\beta_c$ ——混凝土在温度作用下的弹性模量折减系数；

$E_s$ ——钢筋的弹性模量；

$a_{Et}$ 、 $a_{Eta}$ ——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；

$E$ 、 $E_t$ ——钢材在常温和温度作用下的弹性模量；

$\beta_d$ ——钢材在温度作用下的弹性模量折减系数；

$E_m$ ——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；

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

$f_{tk}$ 、 $f_t$ ——混凝土轴心抗拉强度的标准值、设计值；

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

$\gamma_{ct}$ ——混凝土在温度作用下轴心抗压强度的分项系数；

$\gamma_u$ ——混凝土在温度作用下轴心抗拉强度的分项系数；

$f_{yk}$ 、 $f_y$ ——钢筋抗拉强度的标准值、设计值；

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

$f'_k$ 、 $f'_y$ ——钢筋抗压强度的标准值、设计值；

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

$\gamma_{yt}$ ——钢筋在温度作用下抗拉和抗压强度的分项系数；

$f$ ——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；

$f_v$ 、 $f_{ce}$ ——分别为钢材的抗剪和端面承压强度设计值；

$f_c^w$ 、 $f_t^w$ 、 $f_v^w$ ——分别为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；

$f_t$ ——钢材在温度作用下的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

$f_{vt}$ ——钢材在温度作用下的抗剪强度设计值；

$f_{ct}^w$ 、 $f_{ct}^w$ 、 $f_{vt}^w$ ——分别为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；

$\gamma_s$ ——钢材在温度作用下抗拉及抗压强度的折减系数；

$R(\bullet)$ ——结构构件的抗力函数；

$\gamma_{RE}$ ——承载力的抗震调整系数；

$\alpha_c$ ——混凝土的线膨胀系数；

$\alpha_s$ ——钢筋及钢材的线膨胀系数；

$\alpha_m$ ——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；

$\lambda_i$ ——第  $i$  层的导热系数；

$\alpha_{in}$ ——内衬内表面的传热系数；

$\alpha_{ex}$ ——筒壁外表面的传热系数；

$\varepsilon_t$ ——筒壁内表面与外侧钢筋的相对自由变形值。

### 2.2.3 几何参数

$A$ ——构件的截面面积、基础的底面面积；

$A_0$ ——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面积；

$t$ ——筒壁厚度；

$t_0$ ——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；

$\theta$ ——钢筋混凝土筒壁计算截面有一个孔洞时的孔洞半角；

$\theta_1$ ——钢筋混凝土筒壁计算截面有两个孔洞时大孔洞的半角；

$\theta_2$ ——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；

$e_c$ ——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；

$e_0$ ——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  $i$  计算截面的高度。

#### 2.2.4 其他

$\alpha_{cr}$ ——钢筋混凝土构件的受力特征系数；

$\xi_{wt}$ ——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；

$\eta_{ct1}$ ——混凝土温度应力的衰减系数；

$\rho_t$ ——钢筋混凝土筒壁竖向钢筋的总配筋率；

$\rho$ 、 $\rho'$ ——钢筋混凝土筒壁外侧竖向钢筋、内侧竖向钢筋的配筋率；

$\rho_{te}$ ——以有效受拉混凝土截面积计算的受拉钢筋配筋率；

$\xi_1$ ——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；

$\psi_{st}$ ——受拉钢筋在温度效应作用下裂缝间的应变不均匀系数；

$\psi_{st1}$ ——受拉钢筋在荷载效应和温度效应的标准组合作用下裂缝间的应变不均匀系数；

$\lambda$ ——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；

$\varphi$ ——砖砌筒壁的长细比 $\lambda$ 及轴向力偏心距 $e_0$ 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。

## 3 材料

### 3.1 砖石

#### 3.1.1 砖烟囱筒壁的材料应按下列规定采用：

烧结普通粘土砖强度等级不应低于MU10，水泥石灰混合砂浆强度等级不应低于M5。

3.1.2 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 M2.5 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。

3.1.3 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。

3.1.4 砖砌体在温度作用下的抗压强度设计值和弹性模量，可不考虑温度的影响，按国家标准《砌体结构设计规范》（GB 50003）的规定采用。

3.1.5 砖砌体在温度作用下的线膨胀系数  $\alpha_m$  可按下列规定采用：

- 1 当砌体受热温度  $T$  为 20 ~ 200℃ 时， $\alpha_m$  可采用  $5 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ；
- 2 当砌体受热温度  $T > 200\text{℃}$ ，但  $T \leq 400\text{℃}$  时， $\alpha_m$  可按下列公式确定：

$$\alpha_m = \left(5 + \frac{T - 200}{200}\right) \times 10^{-6} \quad (3.1.5)$$

## 3.2 混凝土

3.2.1 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，强度等级不应低于 C25；
- 2 混凝土的水灰比不宜大于 0.5，每立方米混凝土水泥用量不应超过 450kg；
- 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、石灰岩等破碎的碎石或河卵石。细骨料宜采用天然砂，也可采用上述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。

3.2.2 基础及烟道的混凝土强度等级按下列规定采用：

- 1 刚性基础不应低于 C15；
- 2 板式基础不应低于 C20；
- 3 壳体基础不宜低于 C30；
- 4 烟道不应低于 C20。

3.2.3 混凝土在温度作用下的强度标准值应按表 3.2.3 的规定采用。

表 3.2.3 混凝土在温度作用下的强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>)

受力状态	符号	温度 (°C)	混凝土强度等级					
			C15	C20	C25	C30	C35	C40
轴心抗压	$f_{ck}$	20	10.00	13.40	16.70	20.10	23.40	26.80
		60	8.40	11.30	14.20	16.60	19.40	22.20
轴心抗压	$f_{ck}$	100	8.00	10.70	13.40	15.60	18.30	20.90
		150	7.50	10.10	12.70	14.80	17.30	19.80
		200	7.20	9.70	12.10	14.10	16.50	18.80
轴心抗拉	$f_{tk}$	20	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39
		60	1.02	1.24	1.41	1.57	1.74	1.86
		100	0.89	1.08	1.23	1.37	1.52	1.63
		150	0.78	0.93	1.06	1.18	1.31	1.40

		200	0.65	0.79	0.89	0.99	1.10	1.18
--	--	-----	------	------	------	------	------	------

注：温度为中间值时，为采用线性插入法计算。

3.2.4 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。

3.2.5 混凝土在温度作用下的强度设计值应按下列公式计算：

$$f_{ct} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{ct}} \quad (3.2.5-1)$$

$$f_{tt} = \frac{f_{tk}}{\gamma_{tt}} \quad (3.2.5-2)$$

式中  $f_{ct}$ 、 $f_{tt}$ ——混凝土在温度作用下的轴心抗压、轴心抗拉强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)；  
 $f_{ctk}$ 、 $f_{tk}$ ——混凝土在温度作用下的轴心抗压、轴心抗拉强度标准值，按本规范表 3.2.3 的规定采用 (N/mm<sup>2</sup>)；  
 $\gamma_{ct}$ 、 $\gamma_{tt}$ ——混凝土在温度作用下的轴心抗压强度、轴心抗拉强度分项系数，按表 3.2.5 的规定采用。

表 3.2.5 混凝土在温度作用下的材料分项系数

序号	构件名称	$\gamma_{ct}$	$\gamma_{tt}$
1	筒壁	1.85	1.50
2	壳体基础	1.60	1.40
3	其他构件	1.40	1.40

3.2.6 混凝土在温度作用下的弹性模量应考虑温度折减，按下式计算。

$$E_{ct} = \beta_c E_c \quad (3.2.6)$$

式中  $E_{ct}$ ——混凝土在温度作用下的弹性模量 (N/mm<sup>2</sup>)；  
 $\beta_c$ ——混凝土在温度作用下的弹性模量折减系数，按表 3.2.6 的规定采用；  
 $E_c$ ——混凝土弹性模量 (N/mm<sup>2</sup>)，按国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010) 的规定采用。

表 3.2.6 混凝土弹性模量折减系数  $\beta_c$

系数	受热温度 (°C)					受热温度的取值
	20	60	100	150	200	
$\beta_c$	1.00	0.85	0.75	0.62	0.55	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。						

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

### 3.3 钢筋和钢材

3.3.1 钢筋混凝土筒壁的配筋宜采用 HRB335 级钢筋。砖筒壁的环向钢筋可采用 HPB235 级钢筋。其质量应分别符合国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB1499) 和《钢筋混凝土用热轧光圆钢筋》(GB13013) 的规定。

3.3.2 HPB235 和 HRB335 钢筋的强度标准值应按表 3.3.2 的规定采用。

表 3.3.2 钢筋在温度作用下的强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>)

钢筋种类	温度 (°C)	$f_{yt}$ 、 $f'_{yt}$
HPB 235 (Q235)	≤100	235
	150	210
	200	200
HRB 335 (20MnSi)	≤100	335
	150	300
	200	285

注：温度为中间值时，应采用线性插入法计算。

3.3.3 HPB235 和 HRB335 级钢筋的强度设计值应按下列公式计算：

$$f_{yt} = \frac{f_{yt_k}}{\gamma_{yt}} \quad (3.3.3-1)$$

$$f'_{yt} = \frac{f'_{yt_k}}{\gamma_{yt}} \quad (3.3.3-2)$$

式中  $\gamma_{yt}$ 、 $f'_{yt}$ ——HPB 235 和 HRB 335 级钢筋在温度作用下的抗拉、抗压强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)；

$f_{yt_k}$ 、 $f'_{yt_k}$ ——HPB 235 和 HRB 335 级钢筋在温度作用下的抗拉、抗压强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>)，按本规范表 3.3.2 的规定采用；

$\gamma_{yt}$ ——HPB 235 和 HRB 335 级钢筋在温度作用下的抗拉、抗压强度分项系数，按表 3.3.3 的规定采用。

表 3.3.3 钢筋在温度作用下的材料分项系数

序号	构件名称	$\gamma_{yt}$
1	钢筋混凝土筒壁	0.6

2	壳体基础	1.2
3	砖筒壁竖筋	1.9
4	砖筒壁环筋	1.6
5	其他构件、	1.1

3.3.4 钢烟囱的钢材、钢筋混凝土烟囱及砖烟囱附件的钢材除满足下列规定外，还应符合国家标准《钢结构设计规范》（GB 50017）的规定。

1 钢烟囱塔架和筒壁可采用 Q235、Q345、Q390、Q420 钢。其质量应分别符合国家标准《碳素结构钢》（GB 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 Q235NH、Q295NH 或 Q355NH 可焊接低合金耐候钢。其质量应符合国家标准《焊接结构用耐候钢》（GB/T 4172）。腐蚀性烟气分级按本规范第 10 章的规定执行。

3 烟囱的平台、爬梯和砖烟囱的环箍宜采用 Q235 钢。

3.3.5 当作用温度小于或等于 100℃时，钢材和焊缝的强度设计值应按国家标准《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 3.3.5-1 和表 3.3.5-2 的规定采用。

表 3.3.5-1 耐候钢的强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)

钢材		抗拉、抗拉和抗弯 $f$	抗剪 $f_v$	端面承压 (刨平顶紧) $f_{ce}$
牌号	厚度 (mm)			
Q234NH	$\leq 16$	210	120	275
	$> 16 \sim 40$	200	115	275
	$> 40 \sim 60$	190	110	275
	$> 60 \sim 100$	190	110	275
Q295NH	$\leq 16$	265	150	320
	$> 16 \sim 40$	255	145	320
	$> 40 \sim 60$	245	140	320
	$> 60 \sim 100$	225	130	320
Q355NH	$\leq 16$	315	185	370
	$> 16 \sim 40$	310	180	370
	$> 40 \sim 60$	300	170	370
	$> 60 \sim 100$	290	165	370

表 3.3.5-2 耐候钢的焊缝强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)

焊接方法和焊条型号	构件钢材		对接焊缝			角焊缝	
	牌号	厚度(mm)	抗压 $f_c^w$	焊接质量为下列等级时, 抗拉 $f_t^w$			抗剪 $f_v^w$
				一级、二级	三级		
自动焊、半自动焊和 E43 型焊条的手工焊	Q235NH	≤16	210	210	175	120	140
		>16~40	200	200	170	115	140
		>40~60	190	190	160	110	140
		>60~100	190	190	160	110	140
自动焊、半自动焊和 E43 型焊条的手工焊	Q295NH	≤16	265	265	225	150	140
		>16~40	255	265	215	145	140
		>40~60	245	245	210	140	140
		>60~100	225	225	195	130	140
自动焊、半自动焊和 E50 型焊条的手工焊	Q355NH	≤16	315	315	270	185	165
		>16~40	310	310	260	180	165
		>40~60	300	300	255	170	165
		>60~100	290	290	245	165	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国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205) 的规定。  
 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  $f_t^w$ 。

3.3.6 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：

$$f_t = \gamma_s f \quad (3.3.6-1)$$

$$f_{vt} = \gamma_s f_v \quad (3.3.6-2)$$

$$f_{xt}^w = \gamma_s f_x^w \quad (3.3.6-3)$$

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/mm<sup>2</sup>)；

$f_{vt}$ ——钢材在温度作用下的抗剪强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)；

$f_{xt}^w$ ——焊缝在温度作用下各种受力状态的强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)，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；

$\gamma_s$ ——钢材及焊缝在温度作用下强度设计值的折减系数，按表 3.3.6 的规定

采用；

$f$ 、 $f_v$ 、 $f_x^w$ ——分别为钢材和焊缝在作用温度小于或等于，100℃时的强度设

计值 (N/mm<sup>2</sup>)，按国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017) 的规定采用。

表 3.3.6 钢材及焊缝强度设计值的温度折减系数

系数	钢材牌号	作用温度 (°C)						
		≤100	150	200	250	300	350	400
$\gamma_s$	Q235、Q345、Q390、Q420	1.00	0.92	0.88	0.83	0.78	0.72	0.65

注：温度为中间值时，应采用线性插入法计算。

耐候钢在温度作用下钢材和焊缝的强度设计值的温度折减系数宜要求供货厂商提供或通过试验确定。

3.3.7 钢筋在温度作用下的弹性模量可不考虑温度折减，应按国家标准《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考虑折减，按下式计算：

$$E_t = \beta_d E \quad (3.3.7)$$

式中  $E_t$ ——钢材在温度作用下的弹性模量 (N/mm<sup>2</sup>)；

$\beta_d$ ——钢材在温度作用下弹性模量的折减系数，按表 3.3.7 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/mm<sup>2</sup>)，按国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017) 的规定采用。

表 3.3.7 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
$\beta_d$	1.00	0.98	0.96	0.94	0.82	0.88	0.83
注：温度为中间值时，应采用线性插入法计算。							

3.3.8 钢筋和钢材的线膨胀系数  $\alpha_s$  可采用  $1.2 \times 10^{-5}/\text{℃}$ 。

### 3.4 材料热工计算指标

3.4.1 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<sup>3</sup>。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。

3.4.2 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 3.4.2 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 3.4.2 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 <sup>3</sup> )	导热系数[W/(m·K)]
烧结普通粘土砖砌体	500	18	$0.81+0.0006T$
粘土耐火砖砌体	1400	19	$0.93+0.0006T$
陶土砖砌体	11500	18~20	$(0.35\sim 1.10)+0.0005T$
漂珠轻质耐火砖	900	6~11	$0.20\sim 0.40T$
硅藻土砖砌体	900	5	$0.12+0.0023T$
		6'	0.14+
		7	0.17+
普通钢筋混凝土	200	24	$1.74+0.0005T$
普通混凝土	200	23	$0.51+0.0005T$
耐热混凝土	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	$(0.052\sim 0.076)+0.0001T$
水泥珍珠岩制品	600	3.5	$(0.058\sim 0.16)+0.0001T$
高炉水渣	800	5.0	$(0.1\sim .016)+0.0003T$
岩棉	500	1~2	$(0.036\sim 0.05)+0.0002T$
矿渣棉	600	1.2~1.5	$(0.031\sim 0.044)+0.0002T$
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
注: 1 选用陶土砖及漂珠轻质耐火砖宜按厂家提供的性能数据设计。			
2 表中 $T$ ——温度(°C)。			

## 4 设计基本规定

### 4.1 设计原则

4.1.1 本规范采用以概率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，以荷载、材料性能等代表值、结构重要性系数、分项系数、组合值系数的设计表达式进行计算。

4.1.2 整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求，此特定状态称为该功能的极限状态。

极限状态对应于烟囱可分为下列两类：

- 1 承载能力极限状态：这种极限状态对应于烟囱结构的内力达到其最大承载力；
- 2 正常使用极限状态：这种极限状态对应于烟囱的应力和裂缝分别达到正常使用和耐久性能的规定限值，并满足本规范各章有关规定。

4.1.3 对于承载能力极限状态，烟囱应按荷载效应和地震作用效应的基本组合进行设计。对于正常使用极限状态，应按荷载效应标准组合进行设计。

4.1.4 烟囱应根据其高度按表 4.1.4 划分为两个安全等级。

表 4.1.4 烟囱的安全等级

安全等级	烟囱高度 (m)
一级	$\geq 200$

二级	< 200
注：对于电厂烟囱的安全等级还应同量按照电厂单机容量进行划分。当单机容量大于或等于 200 兆瓦（MW）时为一级，否则为二级。	

4.1.5 烟囱承载能力极限状态设计应按下列荷载效应基本组合中的最不利值确定：

$$\gamma_o(\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik}) \leq R(\bullet) \quad (4.1.5-1)$$

$$\gamma_o(\gamma_G S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik}) \leq R(\bullet) \quad (4.1.5-2)$$

式中  $\gamma_o$ ——烟囱重要性系数，按本规范第 4.1.6 条的规定采用；

$\gamma_G$ ——永久荷载分项系数，按本规范第 4.1.7 条的规定采用；

$\gamma_{Q1}$ ——第一个可变荷载的分项系数，按本规范第 4.1.7 条的规定采用；

$\gamma_{Qi}$ ——第  $i$  个可变荷载的分项系数，按本规范第 4.1.7 条的规定采用；

$G_k$ ——永久荷载的标准值，在式中作为下角标出现；

$Q_{1k}$ ——第一个可变荷载的标准值，该可变荷载的效应大于其他任何第  $i$  个可变荷载效应，在式中作为下角标出现；

$Q_{ik}$ ——第  $i$  个可变荷载的标准值，在式中作为下角标出现；

$S_{Gk}$ ——永久荷载标准值的效应；

$S_{Q1k}$ ——在基本组合中起控制作用的第一个可变荷载标准值的效应；

$S_{Qik}$ ——第  $i$  个可变荷载标准值的效应；

$\psi_{ci}$ ——第  $i$  个可变荷载的组合值系数，按本规范第 4.1.8 条的规定采用；

$R(\bullet)$ ——由设计计算公式确定的结构或构件的抗力函数。

4.1.6 对安全等级为一级或设计工作寿命为 100 年以上的烟囱，烟囱的重要性系数  $\gamma_o$  不应小于 1.1，其他情况不应小于 1.0。烟囱的设计工作寿命应同其配套使用的建（构）筑物的设计工作寿命相同。

4.1.7 承载能力极限状态计算时，荷载效应基本组合的分项系数应按表 4.1.7 的规定采用。

表 4.1.7 荷载分项系数

荷载名称	分项系数		注	
	符号	数值		
永久荷载	$\gamma_G$	1.20	用于式(4.1.5-1)	其效应对承载能力不利时
		1.35	用于式(4.1.5-2)	
		$\leq 1.00$	其效应对承载能力有利时	
风荷载	$\gamma_W$	1.40		
平台上活荷载	$\gamma_L$	1.40		
由风荷载、日照及基础倾斜引起的筒身自重对任意截面产生的附加弯矩	—	—	附加弯矩的标准值和设计值按 7.2 节计算	
安装检修荷载	$\gamma_A$	1.30		
裹冰荷载	$\gamma_I$	1.40		

4.1.8 承载能力极限状态计算时，应按表 4.1.8 的规定考虑可能发生的荷载效应基本组合情况，采用相应的组合值系数。

表 4.1.8 荷载效应的基本组合情况及组合值系数

荷载效应的基本组合				组合值系数		
情况	永久荷载	第一个可变荷载	其他 $i$ 个可变荷载	$\psi_{cW}$	$\psi_{cM_a}$	$\psi_{cL}$
I	$G$	$W$	$M_a + L$	1.00	1.00	0.70
II	$G$	$A$	$W + M_a$	0.45	1.00	—
III	$G$	$I$	$W + M_a + L$	0.60	1.00	0.70

注：1  $G$  表示烟囱各部分的自重， $W$  为风荷载， $M_a$  为附加弯矩， $A$  为安装检修荷载（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， $L$  为平台活荷载。

2 附加弯矩  $M_a$  仅在计算钢筋混凝土筒壁时考虑。

4.1.9 地震区的烟囱尚应采用地震作用效应与其他荷载效应的基本组合，按下列承载能力极限状态设计表达式进行截面抗震验算：

$$\gamma_{GE}S_{GE} + \gamma_{hE}S_{Ehk} + \gamma_{Ev}S_{Evk} + \psi_{cWE}\gamma_W S_{Wk} + \psi_{cMaE}S_{MaE} \leq R(\bullet)/\gamma_{RE} \quad (4.1.9)$$

式中  $\gamma_{RE}$ ——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；

$\gamma_{hE}$ ——水平地震作用分项系数，按表 4.1.9-1 的规定采用；

$\gamma_{Ev}$ ——竖向地震作用分项系数，按表 4.1.9-1 的规定采用；

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

$S_{Evk}$ ——竖向地震作用标准值的效应；

$S_{MaE}$ ——由地震作用、风荷载、日照和基础倾斜引起的附加弯矩效应，按本规范第 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 4.1.9-2 的规定采用；

$\gamma_W$ ——风荷载分项系数，按本规范表 4.1.7 的规定采用；

$\psi_{cWE}$ ——含地震作用效应的基本组合中风荷载的组合值系数，取 0.20；

$\psi_{cMaE}$ ——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；

$\gamma_{GE}$ ——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。

表 4.1.91 地震作用分项系数

地震作用		$\gamma_{Eh}$	$\gamma_{Ev}$
仅按水平地震作用计算		1.3	0
仅按竖向地震作用计算		0	1.3
同时按水平和 竖向地震作用 计算	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 4.1.9-2 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
筒壁顶部平台积灰荷载		0.5
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	0.5

4.1.10 烟囱的正常使用极限状态应根据不同目的分别按荷载效应和温度作用效应的标准组合或准永久组合进行设计，并应满足本规范规定的各项限值。

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、钢筋拉应力及裂缝宽度，应按下式确定：

$$S_{\hat{a}n} = S_{Gk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Qik} \quad (4.1.10-1)$$

式中  $S_{\hat{a}n}$ ——荷载效应和温度作用效应的标准组合；

$\psi_{ci}$ ——第  $i$  个可变荷载的组合值系数，按本规范表 4.1.11 的规定采用。

2 准永久组合用于地基变形的计算，应按下列式确定：

$$S_{dq} = S_{GK} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (4.1.10-2)$$

式中  $S_{dq}$ ——荷载效应的准永久组合；

$\psi_{qi}$ ——任何第  $i$  个可变荷载效应的准永久值系数，平台活荷载取 0.6，地震作用和安装检修荷载不应考虑；一般情况下不宜考虑风荷载，但对于风玫瑰图呈严重偏心的地区，可采用频遇值系数 0.4 进行计算。

4.1.11 荷载效应及温度作用效应的标准组合应考虑表 4.1.11 的两种情况，并采用相应的组合值系数。

表 4.1.11 荷载效应和温度作用效应的标准组合值系数

荷载和温度作用的效应组合				组合值系数		注
情况	永久荷载	第一个可变系数	其他可变系数	$\psi_{cW}$	$\psi_{cMa}$	
I	G	T	W+Ma	1.0	1.0	用于计算水平截面
II	-	T	-	-	-	用于计算垂直截面
注：T 表示温度作用						

## 4.2 一般规定

4.2.1 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、钢筋混凝土烟囱或钢烟囱。下列情况不宜采用砖烟囱：

- 1 重要的或高度大于 60m 的烟囱；
- 2 地震设防烈度为 9 度地区的烟囱；
- 3 地震设防烈度为 8 度时，Ⅲ、Ⅱ类场地的烟囱。

4.2.2 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) 烟气温度小于或等于 400℃时，内衬可在筒壁下部局部设置并应符合构造要求。

2 钢筋混凝土烟囱的内衬应沿筒壁全高设置。

4.2.3 烟囱基础一般宜采用板式基础。板式基础可以是环形或圆形的。在条件允许时，可采用壳体基础。对于高度较小且为地上烟道入口的砖烟囱，亦可采用毛石砌体或毛石混凝土刚性基础。

4.2.4 筒壁的计算截面位置应按下列规定采用：

- 1 水平截面应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。

### 4.3 烟自受热温度允许值

4.3.1 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 钢烟囱筒壁的最高受热温度应符合表 4.3.1 的规定。

表 4.3.1 钢烟囱筒壁的最高受热温度

钢材	最高受热温度 (℃)	注
炭素结构钢	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	

#### 4.4 钢筋混凝土烟囱筒壁的规定限值

4.4.1 对正常使用极限状态,按荷载效应和温度作用效应的标准组合计算钢筋混凝土烟囱筒壁的混凝土压应力和门筋拉力时,计算所得的应力值应符合本规范第 7.4.1 条第 1 款的规定。

4.4.2 对正常使用极限状态,按荷载效应和温度作用效应的标准组合并考虑裂缝宽度分布不均匀性和长期作用影响时,计算所得的最

大水平裂缝宽度和最大垂直裂缝宽度不应大于表 4.4.2 规定的最大裂缝宽度限值。

部位	环境类别	最大裂缝宽度限值
筒壁顶部 20m 范围内	一、二、三	0.15
其余部位	一、二	0.30
	三	0.20

注：环境类别按国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010）的规定确定

## 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三类：

- 1 永久性荷载与作用：结构自重、土重、土压力、拉线的拉力；
- 2 可变荷载与作用：风荷载、烟气温度作用、雪荷载、安装检修荷载、平台活荷载、裹冰荷载、大气温度作用、常遇地震作用、烟气压力及地基沉陷等；
- 3 偶然荷载：罕遇地震作用、拉线断线、撞击、爆炸等。

5.1.2 本规范仅列出风荷载、地震作用、烟气温度作用等需加明确的内容。凡本规范未予强调的荷载与作用，均按国家标准《建筑结构荷载规范》（GB 50009）和《建筑抗震设计规范》（GB 50011）的规定采用。

## 5.2 风 荷 载

5.2.1 基本风压按国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009)规定的50年一遇的风压采用,但基本风压不得小于 $0.35\text{kN/m}^2$ 。对于安全等级为一级的烟囱,基本风压应按100年一遇的风压采用。

5.2.2 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。

5.2.3 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。

5.2.4 当烟囱坡度 $\leq 2\%$ 时,对于钢筋混凝土烟囱、钢烟囱(不含塔架式钢烟囱)应按国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009)的规定验算横风向风振影响。当按国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009)判断烟囱可能出现跨临界强风共振时,对于第1振型横风向风振,当烟囱顶端设计风压值 $\omega h$ ,满足(5.2.4-1)式时,烟囱承载能力极限状态仍由顺风向设计风压控制。

$$\omega_h \geq \omega_{cr1} \sqrt{\frac{0.04}{\xi_1^2} + \beta_h^2} \quad (5.2.4-1)$$

$$\omega_{cr1} = \frac{u_{cr1}^2}{1600} \quad (5.2.4-2)$$

式中  $\omega_h$ ——烟囱顶端风压设计值 (kN/m<sup>2</sup>)；

$u_{cr1}$ ——第 1 振型对应的临界风速 (m/s)，按国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009) 的规定计算；

$\xi_1$ ——风振计算时，第 1 振型结构阻尼比，钢筋混凝土烟囱取 0.05，钢烟囱取 0.01；

$\beta_h$ ——烟囱顶端风振系数，按国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009) 的规定计算。

5.2.5 当不满足 (5.2.4-1) 式时，第 1 振型横风向风振可能起控制作用，应计算横风向风振效应 (弯矩和剪力)。

1 横风向风振锁住区，最不利起点高度 H1 按下列公式计算：

1) 当  $1.3v_{cr1} \leq v_h$  时:

$$H_1 = \frac{H}{(1.3)^{1/\alpha}} \quad (5.2.5-1)$$

2) 当  $1.3v_{cr1} > v_h$  时:

$$H_1 = H \times \left(\frac{v_{cr1}}{v_h}\right)^{1/\alpha} \quad (5.2.5-2)$$

2 临界风速时, 在 10m 标高处对应的顺风向基本风压  $w_{cr10}$ , 可按下列公式计算:

2) 当  $1.3v_{cr1} \leq v_h$  时: 直接取 10m 高度处的基本风压值。

$$w_{cr10} = \frac{(1.3v_{cr1})^2}{1600} \left(\frac{10}{H}\right)^{2\alpha} \quad (5.2.5-3)$$

式中  $H$ ——烟囱高度 (m);

$\alpha$ ——地面粗糙度系数, 按国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009) 的规定取值;

$v_h$ ——烟囱顶端风速设计值 (m/s)。

### 5.3 安装检修荷载

5.3.1 套筒式或多管式钢筋混凝土烟囱, 应根据内筒的结构形式与施工方法, 考虑吊装和检修荷载。

5.3.2 塔架式钢烟囱应考虑施工及检修荷载。

### 5.4 裹冰荷载

5.4.1 拉索式钢烟囱的拉索, 塔架式钢烟囱的塔架, 如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, 可按国家标准《高耸结构设计规范》(GB 50135) 的有关规定进行计算。

## 5.5 地震作用

5.5.1 本节的规定适用于地震设防烈度为 6 度到 9 度地震区的烟囱抗震设计。

1 本规范未作规定的均按国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011) 的规定执行。在进行水平抗震验算时,钢筋混凝土烟囱和砖烟囱的结构阻尼比可取 0.05,钢烟囱可取 0.01;

2 6 度和 7 度地震区可不考虑竖向地震作用,8 度和 9 度地震区应考虑竖向地震作用。

5.5.2 设防烈度为 6 度时, I、II 类场地的砖烟囱,可以仅配置环箍或环筋,否则应按本规范第 6.5 节的规定配置竖向钢筋。

5.5.3 下列烟囱可不进行截面抗震验算,但应满足抗震构造要求:

1 设防烈度为 7 度时, I、II 类场地,且基本风压  $\omega_0 \geq 0.5\text{kN/m}^2$  的钢筋混凝土烟囱;

2 设防烈度为 7 度时, I、II 类场地和 8 度时, I、II 类场地,且高度不超过 45m 的砖烟囱。

5.5.4 烟囱的水平地震作用计算可采用下列计算方法:

1 烟囱高度不超过 100m,可采用本规范 5.5.5 条的简化计算方法;

2 除第一款以外的烟囱宜采用振型分解反应谱法计算。

采用振型分解反应谱法时,高度不超过 150m 时,宜考虑前 3 个振

型组合；高度超过 150m 时，宜考虑前 3~5 个振型组合；高度超过 210m 时，考虑的振型数量不应少于 5 个。

5.5.5 独立烟囱采用简化法进行抗震计算时，应按下列规定计算水平地震作用标准值产生的作用效应：

1 烟囱底部地震弯矩及剪力，应按下列公式计算：

$$M_0 = \alpha_1 G_E H_0 \quad (5.5.5-1)$$

$$V_0 = \eta_c \alpha_1 G_E \quad (5.5.5-2)$$

式中  $M_0$ ——烟囱底部由水平地震作用标准值产生的弯矩（kN·m）；

$\alpha_1$ ——相应于烟囱基本自振周期的水平地震影响系数，按国家标准《建筑抗震设计规范》（GB 50011）采用；

$G_E$ ——烟囱总重力荷载代表值（kN），取烟囱总自重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规范表 4.1.9-2 的规定采用；

$H_0$ ——基础顶至烟囱重心处高度（m）；

$V_0$ ——烟囱底部由水平地震作用标准值产生的剪力（kN）；

$\eta_c$ ——烟囱底部的剪力修正系数，可按表 5.5.5 采用。

表 5.5.5 烟囱底部的剪力修正系数  $\eta_c$

特征周期 $T_g(s)$	基本自振周期 $T_1(s)$					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0.25	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0.25	0.75	1.00	1.10	1.02	0.95	0.85
0.30	0.65	0.90	1.10	1.10	1.00	0.95

0.40	0.60	0.80	1.00	1.10	1.15	1.05
0.55	0.55	0.70	0.85	1.00	1.10	1.10
0.65	0.55	0.65	0.75	0.90	1.05	1.10
0.90	0.55	0.60	0.65	0.75	0.85	0.95

2 烟囱基本自振周期  $T_1$  可分别按下列公式确定:

高度不超过 60m 的砖烟囱

$$T_1 = 0.26 + 0.0024 H^2 / d \quad (5.5.5-3)$$

高度不超过 150m 的钢筋混凝土烟囱

$$T_1 = 0.45 + 0.0011 H^2 / d \quad (5.5.5-4)$$

式中  $H$ ——烟囱高度 (m) ;

$d$ ——烟囱 1/2 高度处的水平截面外径 (m) ;

$T_1$ ——烟囱的基本自振周期 (s) 。

3 烟囱各截面的弯矩和剪力, 可按图 5.5.5 确定:

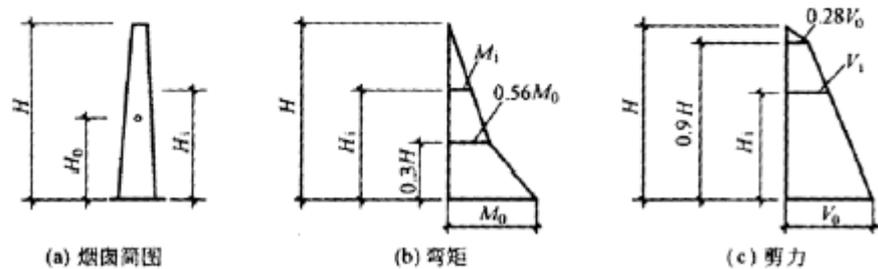


图 5.5.5 烟囱水平地震作用效应分布

5.5.6 在竖向地震作用下, 烟囱的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力取：

$$F_{E_{v0}} = \pm \alpha_v G_E \quad (5.5.6-1)$$

2 其余各截面取：

$$F_{E_{vik}} = \pm \eta (G_{iE} - \frac{G_{iE}^2}{G_E}) \quad (5.5.6-2)$$

$$\eta = 4(1+C)k_v \quad (5.5.6-3)$$

式中  $F_{E_{vik}}$  ——任意水平截面的竖向地震作用标准值 (kN)，对于烟囱下部截面，  
当

$$F_{E_{vik}} < F_{E_{v0}} \text{ 时，取 } F_{E_{vik}} = F_{E_{v0}}；$$

$G_{iE}$  ——计算截面 以上的烟囱重力荷载代表值 (kN)，取截面 以上的自重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规范表 4.1.9-2 的规定采用；

$G_E$  ——基础顶面以上的烟囱总重力荷载代表值 (kN)，取烟囱总自重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规范表 4.1.9-2 的规定采用；

$C$  ——结构材料的弹性恢复系数，砖烟囱  $C=0.6$ ；钢筋混凝土烟囱  $C=0.7$ ；钢烟囱  $C=0.8$ ；

$k_v$  ——竖向地震系数，按国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011) 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  $k_v=0.065$  (0.1)；8 度取  $k_v=0.13$  (0.2)；9 度取  $k_v=0.26$ ；

$\alpha_v$  ——竖向地震影响系数，按国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011) 的规定取水平地震影响系数最大值的 65%。

注：1 套筒式或多筒式烟囱，当采用自承重式排烟筒时，上式中的  $G_{iE}$  及  $G_E$  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  $G_{iE}$  及  $G_E$  中应计入平台及排烟

筒重量，但应按(5.5.7)式对平台及排烟筒重量进行振动效应折减。

2 构架式钢烟囱，可仅计算构架的竖向地震作用。

3  $k_v = 0.1$  和  $k_v = 0.2$  分别用于设计基本地震加速度为  $0.15g$  和  $0.30g$  的地区。

5.5.7 套筒式或多管式烟囱，当采用平台承受排烟筒重力荷载时，排烟筒及平台自重荷载，应乘以平台及排烟筒重力荷载振动效应折减系数  $\beta$ ：

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{G_M L^3}{47 E I T_g^2}} \quad (5.5.7)$$

式中  $G_M$ ——一根主梁所承受的总重力荷载（包括主梁自重荷载）标准值（kN）；

$L$ ——主梁跨度（m）；

$E$ ——主梁材料的弹性模量（kN/m<sup>2</sup>）；

$I$ ——主梁截面惯性矩（m<sup>4</sup>）；

$T_g$ ——竖向地震特征周期（s），可采用水平特征周期的 65%。

注：当为多层支承平台时，可取中间一层平台的一根主梁为代表，不需每层分别计算  $\beta$  值。

## 5.6 温度作用

5.6.1 烟囱内部的烟气温度，应按烟囱使用时的最高温度采用。

注：如因除尘和余热利用等原因，进入烟囱的烟气温度远低于炉内温度时，应注意考虑由于降温设备故障而出现的事故性高温。

5.6.2 烟囱外部的空气温度，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，应采用极端最高温度；
- 2 计算筒壁温度差时，应采用极端最低温度。

5.6.3 筒身计算出的各点受热温度，均不应大于本规范 4.3.1 条及表 3.4.2 规定的相应材料最高使用温度允许值。

5.6.4 烟囱筒壁及基础环壁外半径（ $r_2$ ）与内半径（ $r_1$ ）的比值小于 1.1 时（ $r_2 / r_1 < 1.1$ ），可采用平壁法计算受热温度。否则，应采用环壁法计算受热温度。

5.6.5 采用平壁法或环壁法计算内衬、隔热层、筒壁或基础环壁、烟道壁各点的受热温度（图 5.6.5）可按下列式计算：

$$T_{qj} = T_g - \frac{T_g - T_a}{R_{tot}} \sum_{i=0}^j R_i \quad (5.6.5)$$

式中  $T_{qj}$ ——计算点受热温度（℃）；

$T_g$ ——烟气温度（℃）；

$T_a$ ——空气温度（℃）；

$R_{tot}$ ——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

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

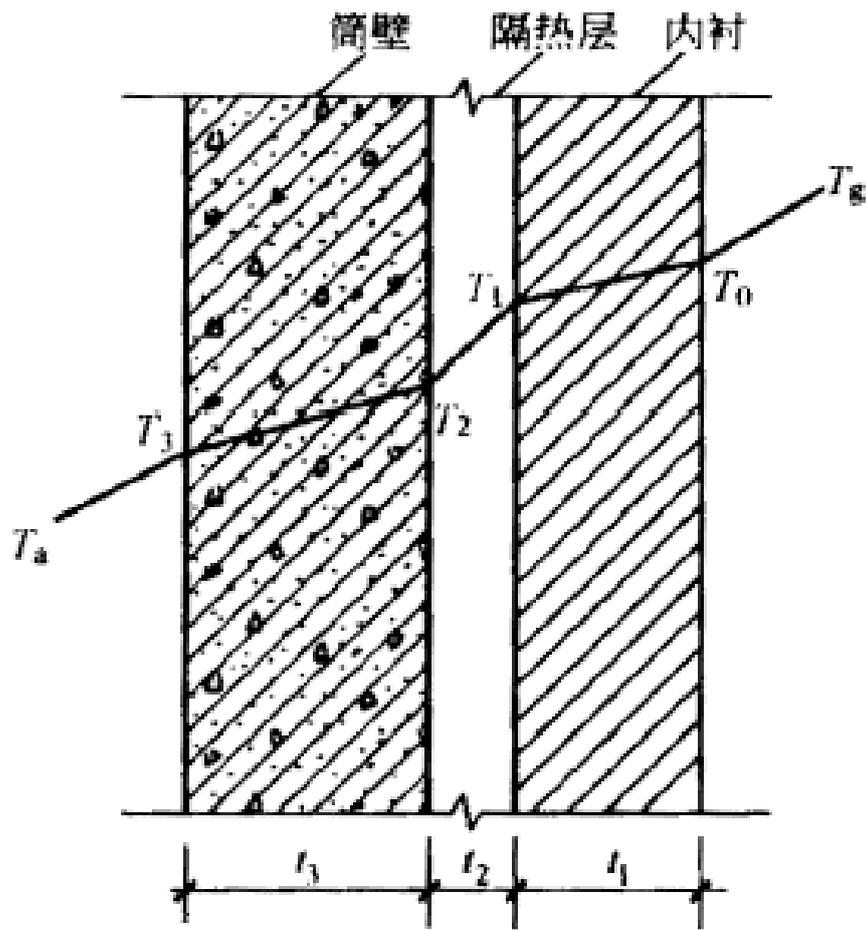


图 5.6.5 传热简图

5.6.6 按平壁法计算时，内衬、隔热层和筒壁等的总热阻按下式计算：

$$R_{tot} = R_{in} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{ex} \quad (5.6.6)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}}$$

$$R_1 = \frac{t_1}{\lambda_1}$$

$$R_2 = \frac{t_2}{\lambda_2}$$

$$R_n = \frac{t_n}{\lambda_n}$$

$$R_{ex} = \frac{1}{\alpha_{ex}}$$

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

$\lambda_1$ ——内衬的导热系数 [ $\text{w}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] ;

$\lambda_2$ ——隔热层的导热系数 [ $\text{w}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] ;

$\lambda_n$ ——筒壁或计算土层的导热系数 [ $\text{w}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] ;

$t_1$ ——内衬厚度 (m) ;

$t_2$ ——隔热层厚度 (m) ;

$t_n$ ——筒壁或计算土层厚度 (m) ;

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

$\alpha_{ex}$ ——筒壁或计算土层外表面传热系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] ;

$R_{ex}$ ——筒壁或计算土层外表面的热阻 ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) 。

5.6.7 按环壁法计算内衬、隔热层和筒壁等各点受热温度时 (图

5.6.7) , 内衬、隔热层和筒壁等的总热阻按下式计算:

$$R_{tot} = R_{in} + R_1 + R_2 + \cdots + R_n + R_{ex} \quad (5.6.7)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in} d_0}$$

$$R_1 = \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_0}$$

$$R_2 = \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

$$R_n = \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_n}{d_{n-1}}$$

$$R_{ex} = \frac{1}{\alpha_{ex} d_n}$$

式中  $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  分别为内衬、隔热层和筒壁内直径及筒壁或计算土层的外直径 (m)，其余符号含义同本规范第 5.6.6 条。

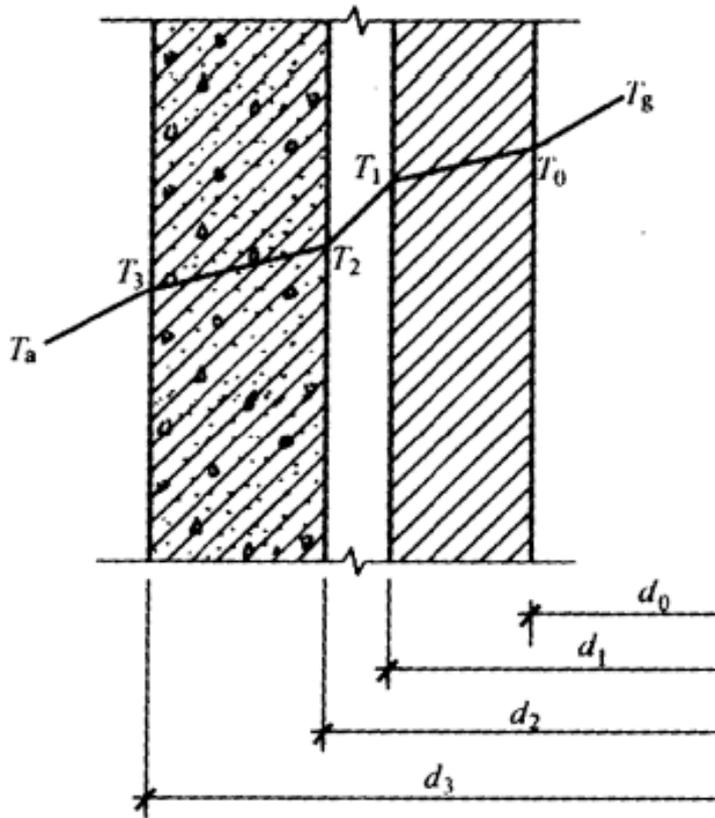


图 5.6.7 传热计算简图

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  $\alpha_m$  内衬内表面的传热系数

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

表 5.6.8-2  $\alpha_{ex}$  筒壁或计算土层外表面的传热系数

季 节	传热系数 [W/ (m <sup>2</sup> · K) ]
夏 季	12
冬 季	23

## 6 砖 烟 囱

### 6.1 一 般 规 定

6.1.1 砖烟囱筒壁设计，应进行下列计算和验算：

1 水平截面承载力极限状态计算和荷载偏心距验算：

1) 在永久荷载(自重荷载)和风荷载设计值作用下，按本规范 6.2.1 条的规定进行承载力极限状态计算；

2) 地震区的砖烟囱，应符合本规范第 5.5.2 条的规定；

3) 在自重荷载和风荷载标准值作用下，按本规范 6.2.2 条验算水平截面荷载偏心距。

2 在温度作用下，按正常使用极限状态，进行环箍或环筋计算。计算出的环箍或环筋截面积，如小于构造值，应按构造值配置

### 6.2 水 平 截 面 计 算

6.2.1 筒壁在永久荷载(自重荷载)和风荷载共同作用下，水平截面极限承载力按下式计算：

$$N \leq \varphi f A \quad (6.2.1-1)$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left( \frac{e_0}{i} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha}{12}} \right)^2} \quad (6.2.1-2)$$

式中  $N$ ——永久荷载（自重荷载）产生的轴向压力设计值（N）；

$f$ ——砖砌体抗压强度设计值，按国家标准《砌体结构设计规范》（GB 50003）的规定采用；

$A$ ——计算截面面积（ $\text{mm}^2$ ）；

$\varphi$ ——长细比（ $\lambda$ ）及轴向力偏心距（ $e_0$ ）对承载力的影响系数；

$\lambda$ ——计算截面以上筒壁长细比，可取  $\lambda = 1.2 h_d / i$ ，其中  $h_d$  为计算截面至筒壁顶端的高度（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）；

$\alpha$ ——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， $\alpha = 0.0020$ 。

6.2.2 在自重及风荷载标准值作用下，轴向力至截面重心的偏心距，应满足以下条件：

$$\frac{M_k}{N_k} \leq \gamma_{com} \quad (6.2.2)$$

式中  $\gamma_{com}$ ——计算截面核心距（m）， $\gamma_{com} = W / A = W/A$ ；

$W$ ——计算截面最小弹性抵抗距（ $\text{m}^3$ ）。

注：配置竖向钢筋的截面，可不受此项限制。

6.2.3 在风荷载设计值作用下，轴向力至截面重心的偏心距  $e_0$ ，应满足以下条件：

$$e_0 \leq 0.6\alpha \quad (6.2.3)$$

式中  $\alpha$ ——计算截面重心至筒壁外边缘的最小距离 (m)。

注：配置竖向钢筋的截面，可不受此项限制。

### 6.3 环箍计算

6.3.1 在筒壁温度差作用下，筒壁每米高度所需的环箍截面面积，可按下列公式计算：

$$A_h = 500 \frac{r_2}{f_{at}} \varepsilon_m E'_{mt} 1n(1 + \frac{t\varepsilon_m}{r_1\varepsilon_t}) \quad (6.3.1-1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\gamma_t t \alpha_m \Delta T}{r_2 1n(r_2/r_1)} \quad (6.3.1-2)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_t - \frac{f_{at}}{E_{sh}} \geq 0 \quad (6.3.1-3)$$

$$E_{sh} = \frac{E}{1 + \frac{n}{6r_2}} \quad (6.3.1-4)$$

当  $\varepsilon_m < 0$  时，应按构造配箍。

式中  $A_h$ ——每米高筒壁所需的环箍截面面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$r_1$ ——筒壁内半径 ( $\text{mm}$ )；

$r_2$ ——筒壁外半径 ( $\text{mm}$ )，用于式 (6.3.1-4) 时单位为  $\text{m}$ ；

$\varepsilon_m$ ——筒壁内表面相对压缩变形值；

$\varepsilon_t$ ——筒壁外表面在温度差作用下的自由相对伸长值；

$\alpha_m$ ——砖砌体线膨胀系数 ( $\alpha_m = 5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )；

$\gamma_t$ ——温度作用分项系数，取  $\gamma_t = 1.6$ ；

$\Delta T$ ——筒壁内外表面温度差 ( $^\circ\text{C}$ )；

$t$ ——筒壁厚度 ( $\text{mm}$ )；

$f_{at}$ ——环箍抗拉强度设计值，可取  $f_{at} = 145 \text{N}/\text{mm}^2$ ；

$E'_{mt}$ ——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  $E'_{mt} = E_{mt}/3$ ；当  $T \geq 350^\circ\text{C}$  时，取  $E'_{mt} = E_{mt}/5$ ；中间值线性插入求得。 $E_{mt}$  为砖砌体弹性模量，按国家标准《砌体结构设计规范》(GB 50003) 的规定采用；

$E_{sh}$ ——环箍折算弹性模量 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$E$ ——环箍钢材弹性模量 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$n$ ——圈环箍的接头数量。

## 6.4 环筋计算

6.4.1 当砖烟囱采用配置环筋的方案时，在筒壁温度差作用下，每米高筒壁所需的环筋截面面积，可按下列公式计算：

$$A_{sm} = 500 \frac{r_2 \eta}{f_{yt}} \varepsilon_m E'_{mt} 1n \left( 1 + \frac{t_0 \varepsilon_m}{r_1 \varepsilon_t} \right) \quad (6.4.1-1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\gamma_t t_0 \alpha_m \Delta T_s}{r_2 1n(r_2 / r_1)} \quad (6.4.1-2)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_t - \frac{\psi_{st} f_{yt}}{E_{st}} \geq 0 \quad (6.4.1-3)$$

当  $\varepsilon_m < 0$  时按构造配筋。

式中  $A_{sm}$ ——每米高筒壁所需的环向钢筋截面面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$t_0$ ——计算截面筒壁有效厚度 ( $\text{mm}$ )，取  $t_0 = t - a$ ， $a$  为筒壁外边缘至环筋的距离，单根环筋取  $a = 30\text{mm}$ ，双根筋取  $a = 45\text{mm}$ ；

$r_2$ ——环筋所在圆（双根筋为环筋重心处）半径 ( $\text{mm}$ )；

$\Delta T_s$ ——筒壁内表面与环筋处温度差值；

$\eta$ ——与环筋根数有关的系数，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 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$E'_{mt}$ ——环筋的弹性模量 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$\gamma_t$ ——温度作用分项系数，取  $\gamma_t = 1.4$ ；

$\psi_{st}$ ——裂缝间环筋应变不均匀系数，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。

## 6.5 竖向钢筋计算

6.5.1 地震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，可按下列下式计算：

$$A_s = \frac{\beta M - (\gamma_G G_k - \gamma_{Ev} F_{Evk}) r_p}{r_p f_{yt}} \quad (6.5.1-1)$$

$$M = \gamma_{Eh} M_{Ek} + \psi_{cEK} \gamma_w M_{wk} S \quad (6.5.1-2)$$

$$\beta = \frac{\theta}{\sin \theta} \quad (6.5.1-)$$

式中  $A_s$ ——计算截面所需的竖向钢筋总截面面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$\beta$ ——弯矩影响系数 (查图 6.5.1)；

$M_{Ek}$ ——水平地震作用在计算截面产生的弯矩标准值 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )；

$G_k$ ——计算截面重力标准值 ( $\text{N}$ )；

$F_{Evk}$ ——计算截面竖向地震作用产生轴向力标准值 ( $\text{N}$ )；

$r_p$ ——计算截面筒壁平均半径 ( $\text{m}$ )；

$f_{yt}$ ——考虑温度作用钢筋抗拉强度设计值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$\gamma_{Eh}$ ——水平地震作用分项系数  $\gamma_{Eh}=1.3$ ；

$\theta$ ——受压区半角；

$\gamma_G$ ——重力荷载分项系数， $\gamma_G=1.0$ ；

$\gamma_{Ev}$ ——竖向地震作用分项系数，按本规范表 4.1.9-1 规定采用；

$\psi_{cWE}$ ——地震作用时风荷载组合系数，取  $\psi_{cWE}=0.2$ 。

2 弯矩影响系数  $\beta$ ，可根据参数  $\alpha_c$  由图 6.5.1 查得。 $\alpha_c$  按下式计算：

$$\alpha_c = \frac{M}{\varphi_0 r_p A f - (\gamma_G G_k - \gamma_{Ev} F_{Evk}) r_p} \quad (6.5.1-4)$$

式中  $\varphi_0$ ——轴心受压承载力影响系数，按本规范 (6.2.1-2) 式计算时取  $e_0=0$ ；

$A$ ——计算截面筒壁截面面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$f$ ——砖砌体抗压强度设计值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )。

注： $\theta = \pi - \frac{\sin \theta}{\alpha_c}$ 。

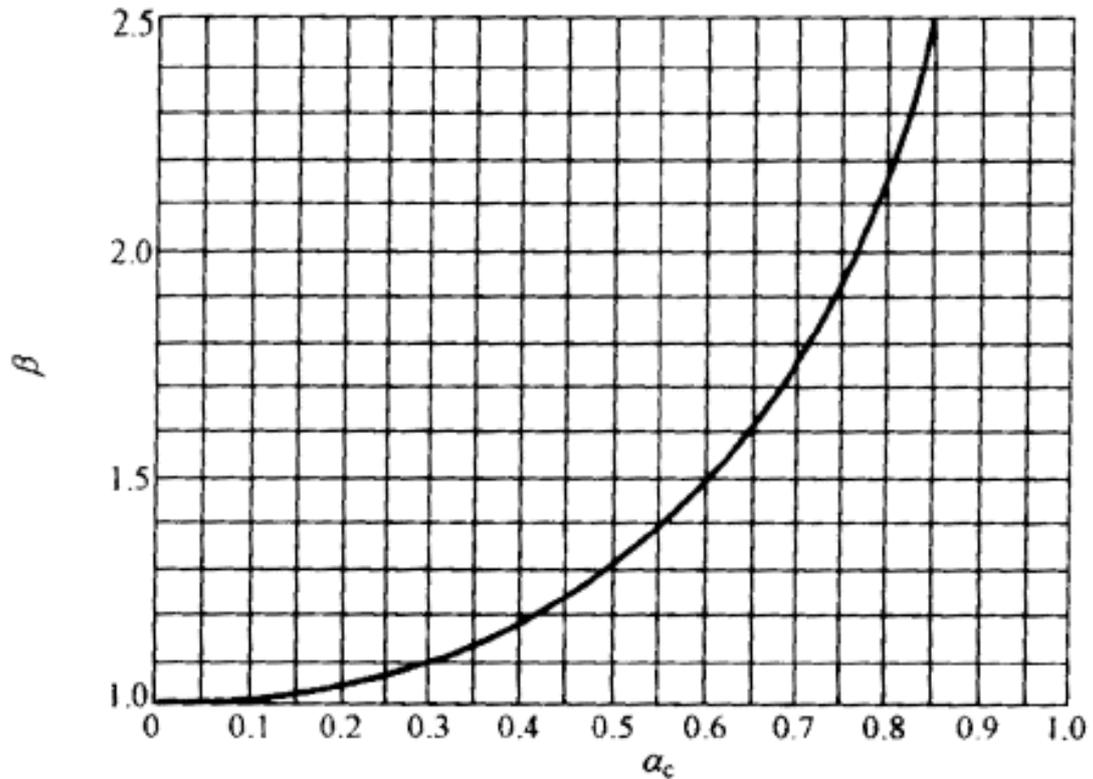


图 6.5.1 弯矩影响系数  $\beta$

6.5.2 当计算出的配筋值小于构造配筋时，应按构造配筋。

## 6.6 构造规定

6.6.1 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，平台处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) 筒壁顶部应向外局部加厚，总加厚厚度以 180mm 为宜，并应以阶梯形向外挑出，每阶挑出不宜超过 60mm。加厚部分的上部以 1:3 水泥砂浆抹成排水坡（图 6.6.1）。

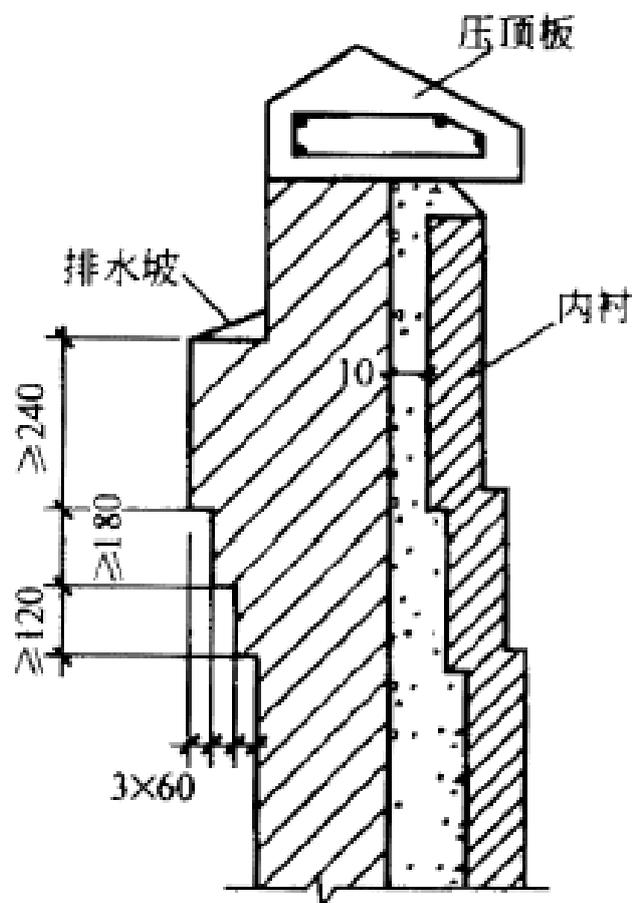


图 6.6.1 筒首构造(单位:mm)

6.6.2 内衬到顶的烟囱宜设钢筋混凝土压顶板（图 6.6.1）。

6.6.3 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。

6.6.4 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  $50^{\circ}$ 。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 配置环箍或环筋的砖筒壁，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箍或环筋截面面积；
- 4 当孔洞较大时，宜设砖垛加强。

6.6.5 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  $100^{\circ}\text{C}$  时，在筒壁根部 1.0m 范围内，宜将环向配筋或环箍增加 1 倍。

6.6.6 按计算配置的环向钢箍，间距宜为 0.5 ~ 1.5m。按构造配置环箍，间距不宜大于 1.5m。环箍的宽度不宜小于 60mm，厚度不宜小于 6mm。每圈环箍接头不应少于两个，每段长度不宜超过 5m。环箍接头的螺栓宜采用 Q235 材料，其净截面面积不应小于环箍截面面积。环箍接头位置应沿筒壁高度互相错开。环箍接头做法见图 6.6.6。

6.6.7 环箍安装时应施加预应力，预应力可按表 6.6.7 采用。

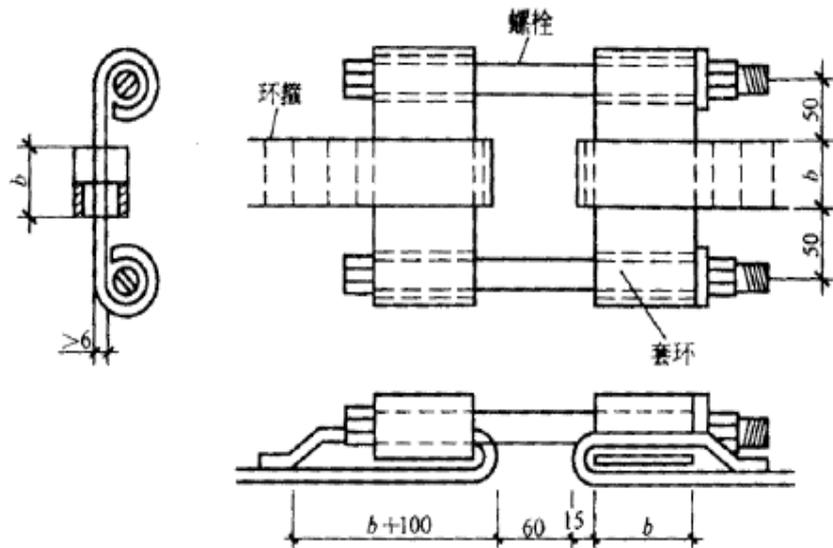


图 6.6.6 环箍接头(单位:mm)

表 6.6.7 环箍预应力值 (N/mm<sup>2</sup>)

安装时温度 (°C)	$T > 10$	$10 \geq T \geq 0$	$T < 0$
预应力值	30	50	60

6.6.8 按计算配置的环向钢筋，直径宜为 6~8mm，间距不少于 3 皮砖，且不大于 8 皮砖，按构造配置的环向钢筋，直径宜为 6mm，间距不应大于 8 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 40d (d 为钢筋直径)，接头位置应互相错开。

钢筋的保护层为 30mm (图 6.6.8)。

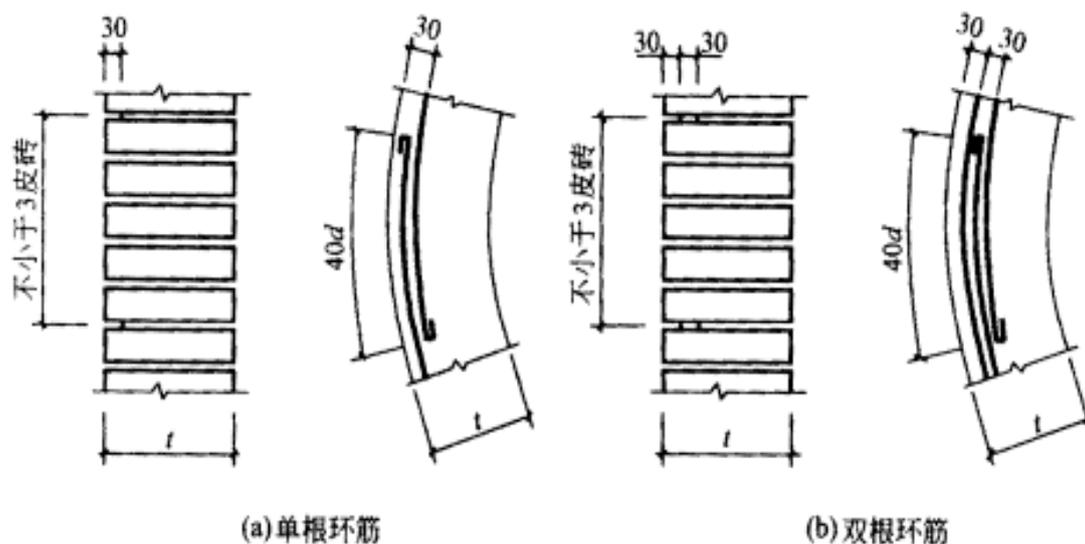


图 6.6.8 环向钢筋配置(单位:mm)

6.6.9 在环形悬臂和筒壁顶部加厚范围内，环向钢筋应适当增加。

6.6.10 地震区的砖烟囱，其最小配筋不应小于表 6.6.10 的规定。

表 6.6.10 地震区砖烟自上部的最小配筋

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	φ8, 间距 500~700mm, 且不少于 6 根	φ10, 间距 500~ 700mm, 且不少于 6 根	φ10, 间距 500mm, 且不少于 6 根
注：1 竖向钢筋接头接 40 倍钢筋直径，钢筋在搭接范围内用铅丝绑实，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。			

6.6.11 内衬的设置，应符合下列要求：

- 1 当砖烟囱下部局部设置内衬时，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 内衬厚度应由温度计算确定，但烟道进口处 1 节的厚度（或基础）不应小于 200mm 或 1 砖。其他各节不应小于 100mm 或半砖。内衬各节的搭接长度不应小于 300mm 或 6 皮砖（图 6.6.11）。

6.6.12 隔热层的构造应符合下列规定：

- 1 如采用空气隔热层时，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 80~200mm，同时应在内衬上设置间距为 1.5~2.5m 整圈防沉带，防沉带与筒壁之间留出 10mm 的温度缝（图 6.6.12）。

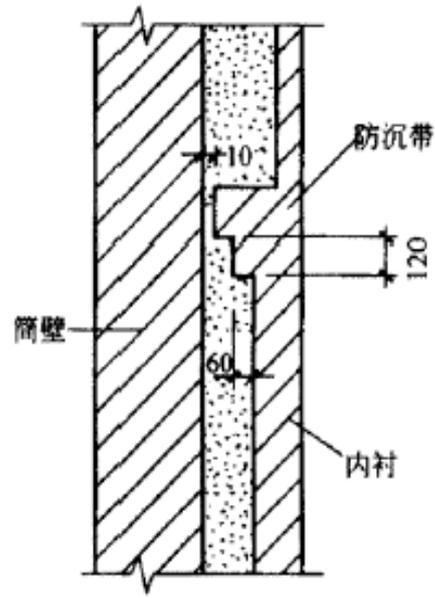
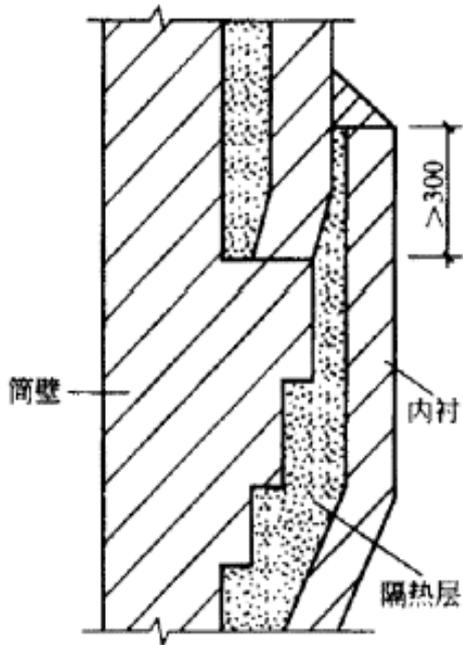


图 6.6.11 内衬搭接(单位:mm) 图 6.6.12 防沉带构造(单位:mm)

6.6.13 烟囱在同一平面内，有两个烟道口时，宜设置隔烟墙，其高度应超过烟道口顶，超出高度不小于  $1/2$  孔高。隔烟墙厚度应根据烟气压力（地震区应考虑地震作用）进行计算确定。

6.6.14 烟囱外表面的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 爬梯的围栏应按下列规定设置：
  - 1) 烟囱高度小于 40m 时，可不设置；
  - 2) 烟囱高度大于 40m 时，从 15m 处开始设置。
- 4 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。

6.6.15 无特殊要求时，砖烟囱一般不设置检修平台和信号灯平台。

6.6.16 爬梯等金属构件，应采取防腐措施。

6.6.17 爬梯与筒壁连接应牢固可靠。

6.6.18 烟囱应设置清灰孔及防雷设施。

## 7 单筒式钢筋混凝土烟囱

### 7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于高度小于等于 210m 的钢筋混凝土烟囱设计。

7.1.2 钢筋混凝土烟囱筒壁设计，应进行下列几项计算或验算：

1 附加弯矩计算：

1) 计算筒壁水平截面承载能力极限状态的附加弯矩。当在地震区时，尚应计算地震作用下的附加弯矩。

2) 计算正常使用极限状态下的附加弯矩。此时不应考虑地震作用。

2 水平截面承载能力极限状态计算。地震区的烟囱应分别按无地震作用和有地震作用两种情况进行计算。

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。

## 7.2 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,由于风荷载、日照和基础倾斜等原因,筒身重力荷载对筒壁任意水平截面产生的附加弯矩  $M_{ai}$  (图 7.2.1),可按下列式计算:

$$M_{ai} = \frac{q_i(h-h_i)^2}{2} \left[ \frac{h+2h_i}{3} \left( \frac{1}{\rho_c} + \frac{\alpha_c \Delta T}{d} \right) + \text{tg}\theta \right] \quad (7.2.1)$$

式中  $q_i$ ——距筒壁顶  $(h-h_i)/3$  处的折算线分布重力荷载,可按本规范 (7.2.3-1)

式计算;

$h$ ——筒身高度 (m);

$h_i$ ——计算截面  $i$  的高度 (m);

$1/\rho_c$ ——筒身代表截面处的弯曲变形曲率,可按本规范公式 (7.2.5-1)、

(7.2.5-2)、(7.2.5-4) 和 (7.2.5-5) 计算;

$\alpha_c$ ——混凝土的线膨胀系数;

$\Delta T$ ——由日照产生的筒身阳面与阴面的温度差,应按当地实测数据采用。当无实测数据时,可按 20℃ 采用;

$d$ ——高度为 0.4h 处的筒身外直径 (m);

$\text{tg}\theta$ ——基础倾斜值,按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007) 规定的地基允许倾斜值采用。

7.2.2 地震区的钢筋混凝土烟囱,由于地震作用、风荷载、日照和基础倾斜等原因,筒身重力荷载对筒壁任意水平截面产生的附加弯矩  $M_{Eai}$ ,可按下列式计算:

$$M_{Eai} = \frac{q_i(h-h_i)^2 \pm \gamma_{Ev} F_{Evik}(h-h_i)}{2} \left[ \frac{h+2h_i}{3} \left( \frac{1}{\rho_{Ec}} + \frac{\alpha_c \Delta T}{d} \right) + tg\theta \right] \quad (7.2.2)$$

式中  $1/\rho_{Ec}$ ——考虑地震作用时，筒身代表截面处的变形曲率，按本规范(7.2.5-3)

式计算；

$F_{Evik}$ ——任意水平截面*i*的竖向地震作用标准值。

7.2.3 计算任意截面*i*的附加弯矩，其折算线分布重力荷载 $q_i$ 值，可按下列式进行计算：

$$q_i = \frac{2(h-h_i)}{3h}(q_0 - q_1) + q_1 \quad (7.2.3-1)$$

承载能力极限状态时：

$$q_0 = \frac{G}{h} \quad (7.2.3-2)$$

$$q_1 = \frac{G_1}{h_1} \quad (7.2.3-3)$$

正常使用极限状态时：

$$q_0 = \frac{G_k}{h} \quad (7.2.3-4)$$

$$q_1 = \frac{G_{1k}}{h_1} \quad (7.2.3-5)$$

式中  $q_0$ ——整个筒身的平均线分布重力荷载 (kN/m)；

$q_1$ ——筒身顶部第一节平均线分布重力荷载 (kN/m)；

$G$ 、 $G_k$ ——分别为筒身(内衬、隔热层、筒壁)全部自重荷载设计值和标准值 (kN)；

$G_1$ 、 $G_{1k}$ ——分别为筒身顶部第一节全部自重荷载设计值和标准值 (kN)；

$h_1$ ——筒身顶部第一节高度 (m)。

7.2.4 筒身代表截面处，轴向力对筒壁水平截面中心的相对偏心距，应按下列公式计算：

1 承载力极限状态:

$$\frac{e}{r} = \frac{M_W + M_a}{N_r} \quad (7.2.4-1)$$

2 正常使用极限状态:

$$\frac{e_c}{r} = \frac{M_{Wk} + M_{ak}}{N_k r} \quad (7.2.4-2)$$

式中  $N$ ——筒身代表截面处的轴向力设计值 (kN) ;

$N_k$ ——筒身代表截面处的轴向力标准值 (kN) ;

$M_W$ ——筒身代表截面处的风弯矩设计值 (kN·m) ;

$M_{Wk}$ ——筒身代表截面处的风弯矩标准值 (kN·m) ;

$M_a$ ——筒身代表截面处承载力极限状态附加弯矩设计值 (kN·m) ;

$M_{ak}$ ——筒身代表截面处正常使用极限状态附加弯矩标准值 (kN·m) ;

$r$ ——筒壁代表截面处的筒壁平均半径 (m) 。

7.2.5 筒身代表截面处的变形曲率 $1/\rho_c$ 和 $1/\rho_{Ec}$ , 可按下列公式计算:

1 承载力极限状态:

1) 当 $\frac{e}{r} \leq 0.5$ 时

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1.6(M_W + M_a)}{0.33E_{cl}I} \quad (7.2.5-1)$$

2) 当 $\frac{e}{r} > 0.5$ 时

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1.6(M_W + M_a)}{0.25E_{cl}I} \quad (7.2.5-2)$$

3) 当考虑地震作用时

$$\frac{1}{\rho_{Ec}} = \frac{M_E + \psi_{cWE}M_W + M_{Ea}}{0.25E_{cl}I} \quad (7.2.5-3)$$

2 正常使用极限状态:

1) 当  $\frac{e_c}{r} \leq 0.5$  时

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{M_{wk} + M_{ak}}{0.65E_{ct}I} \quad (7.2.5-4)$$

2) 当  $\frac{e_c}{r} > 0.5$  时

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{M_{wk} + M_{ak}}{0.4E_{ct}I} \quad (7.2.5-5)$$

式中  $M_E$ ——筒身代表截面处的地震弯矩设计值 (kN·m)；

$M_{Ea}$ ——筒身代表截面处的地震附加弯矩设计值 (kN·m)；

$E_{ct}$ ——筒身代表截面处的筒壁混凝土在温度作用下的弹性模量 (kN/m<sup>2</sup>)；

$\psi_{cWE}$ ——风荷载组合系数，取 0.2；

$I$ ——筒身代表截面惯性矩。

注：1 计算  $1/\rho_c$  或  $1/\rho_{Ec}$  值时，可先假定附加弯矩值，（承载力极限状态计算时假定

$M_a = 0.35M_w$ ，考虑地震时  $M_{Ea} = 0.35M_E$ ，正常使用极限状态时  $M_{ak} = 0.2M_w$ ），代

入有关公式求得附加弯矩值与假定值相差不超过 5%时，可不再计算，否则应进行循环迭代，直到前后两次的附加弯矩不超过 5%为止。其最后值为所求的附加弯矩值。

2 筒身代表截面处的附加弯矩，也可按 7.2.6 条的公式一次求出，不需迭代。

7.2.6 筒身代表截面处的附加弯矩，也可按下列公式不需迭代一次求出：

1 承载力极限状态时：

$$M_a = \frac{\frac{1}{2}q_i(h-h_i)^2\left[\frac{h+2h_i}{3}\left(\frac{1.6M_w}{CE_{ct}I} + \frac{\alpha_c\Delta T}{d}\right) + tg\theta\right]}{1 - \frac{q_i(h-h_i)^2}{2} \cdot \frac{(h+2h_i)}{3} \cdot \frac{1.6}{CE_{ct}I}} \quad (7.2.6-1)$$

2 承载力极限状态下，考虑地震作用时：

$$M_{Ea} = \frac{1\left[\frac{h+2h_i}{3}\left(\frac{M_E + \psi_{c\overline{wE}}M_w}{CE_{ct}I} + \frac{\alpha_c\Delta T}{d}\right) + tg\theta\right]}{1 - A\frac{(h-h_i)}{3} \cdot \frac{1}{CE_{ct}I}} \quad (7.2.6-2)$$

$$A = \frac{q_i(h-h_i)^2 \pm \gamma_{Ev}F_{Evik}(h-h_i)}{2} \quad (7.2.6-3)$$

3 正常使用极限状态时：

$$M_{ak} = \frac{\frac{1}{2}q_i(h-h_i)^2\left[\frac{h+2h_i}{3}\left(\frac{M_{wk}}{CE_{ct}I} + \frac{\alpha_c\Delta T}{d}\right) + tg\theta\right]}{1 - \frac{q_i(h-h_i)^2}{2} \cdot \frac{h+2h_i}{3} \cdot \frac{1}{CE_{ct}I}} \quad (7.2.6-4)$$

式中  $C$ ——刚度折减系数，承载力极限状态时：当  $\frac{e}{r} \leq 0.5$ ， $C=0.33$ ；当  $\frac{e}{r} > 0.5$ ， $C=0.25$ ；当考虑地震时， $C=0.25$ 。正常使用极限状态时：当  $\frac{e_c}{r} \leq 0.5$ ， $C=0.65$ ；当  $\frac{e_c}{r} > 0.5$ ， $C=0.4$ 。

注：确定  $\frac{e}{r}$  或  $\frac{e_c}{r}$  时按 7.2.5 条注 1 假定附加弯矩，然后确定 (7.2.6-1)、(7.2.6-2) 或

(7.2.6-4) 式中的  $C$  值。再用计算出的附加弯矩复核  $\frac{e}{r}$  或  $\frac{e_c}{r}$  值是否符合所采用的  $C$

值条件。否则应另确定  $C$  值。

7.2.7 筒身代表截面可按下列规定确定：

1 当筒身各段坡度均小于或等于 3% 时：

- 1) 筒身无烟道孔时，取筒身最下节的筒壁底截面；
- 2) 筒身有烟道孔时，取洞口上一节的筒壁底截面。

2 当筒身下部  $h/4$  范围内有大于 3% 的坡度时：

- 1) 在坡度小于 3% 的区段内无烟道孔时，取该区段的筒壁底截面；
- 2) 在坡度小于 3% 的区段内有烟道孔时，取洞口上一节筒壁底截面。

7.2.8 当筒身坡度不满足本规范 7.2.7 条的条件时，筒身附加弯矩可根据附加弯矩定义按下式进行计算（图 7.2.8）。

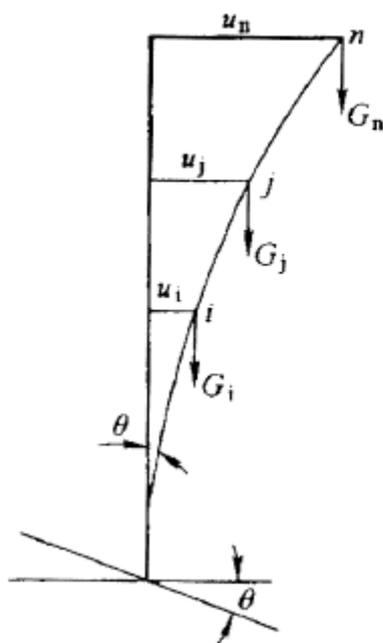


图 7.2.8 附加弯矩计算

$$M_{ai} = \sum_{j=i+1}^n G_j (u_j - u_i) \quad (7.2.8)$$

式中  $G_j$ ——筒身  $j$  质点的重力荷载（考虑地震影响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。

### 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 7.3.1a）：

$$N \leq \alpha_1 \alpha f_{ct} A + (\alpha - \alpha_1) f_{yt} A_s \quad (7.3.1-1)$$

$$M + M_a \leq \alpha_1 f_{ct} A r \frac{\sin \alpha \pi}{\pi} + f_{yt} A_s r \frac{\sin \alpha \pi + \sin \alpha_1 \pi}{\pi} \quad (7.3.1-2)$$

$$\alpha = \frac{N + f_{yt} A_s}{\alpha_1 f_{ct} A + 2.5 f_{yt} A_s} \quad (7.3.1-3)$$

当  $\alpha \geq \frac{2}{3}$  时：

$$\alpha = \frac{N + f_{yt} A_s}{\alpha_1 f_{ct} A + 2.5 f_{yt} A_s} \quad (7.3.1-4)$$

2 当筒壁计算截面有孔洞时：

1) 当计算截面有一个孔洞时（图 7.3.1b）：

$$N \leq \alpha_1 \alpha f_{ct} A + (\alpha - \alpha_1) f_{yt} A_s \quad (7.3.1-5)$$

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

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

2) 当计算截面有两个孔洞时 (图 7.3.1c)

$$N \leq \alpha_1 \alpha f_{ct} A + (\alpha - \alpha_1) f_{yt} A_s \quad (7.3.1-8)$$

$$M + M_a \leq \frac{r}{\pi - \theta_1 - \theta_2} \{ (\alpha_1 f_{ct} A + f_{yt} A_s) \times [\sin(\alpha\pi - \alpha\theta_1 - \alpha\theta_2 + \theta_1) - \sin\theta_1] + f_{yt} A_s [\sin(\alpha_1\pi - \alpha_1\theta_1 - \alpha_1\theta_2 + \theta_2) - \sin\theta_2] \} \quad (7.3.1-9)$$

$$A = 2(\pi - \theta_1 - \theta_2)rt \quad (7.3.1-10)$$

式中  $N$ ——计算截面轴向力的设计值 (kN)；

$\alpha$ ——受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值；

$\alpha_t$ ——受拉纵向钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值  $\alpha_t = 1 - 1.5\alpha$ ，

当  $\alpha \geq 1$  时， $\alpha_t = 0$ ；

$A$ ——计算截面的筒壁截面面积 ( $\text{m}^2$ )；

$f_{ct}$ ——混凝土在温度作用下轴心抗压强度设计值 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )；

$\alpha_1$ ——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；

$A_s$ ——计算截面钢筋总面积 ( $\text{m}^2$ )；

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

$M$ ——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 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ) ;

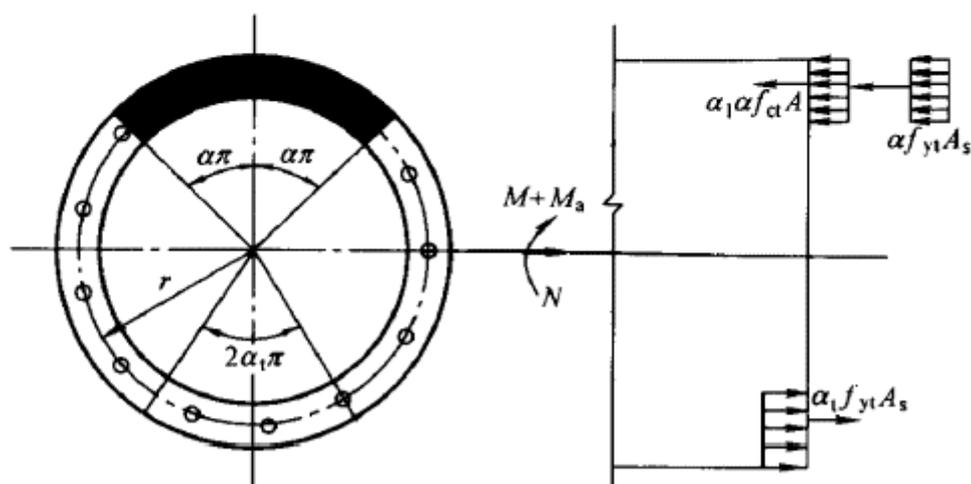
$r$ ——计算截面筒壁平均半径 ( $\text{m}$ ) ;

$t$ ——筒壁厚度 ( $\text{m}$ ) ;

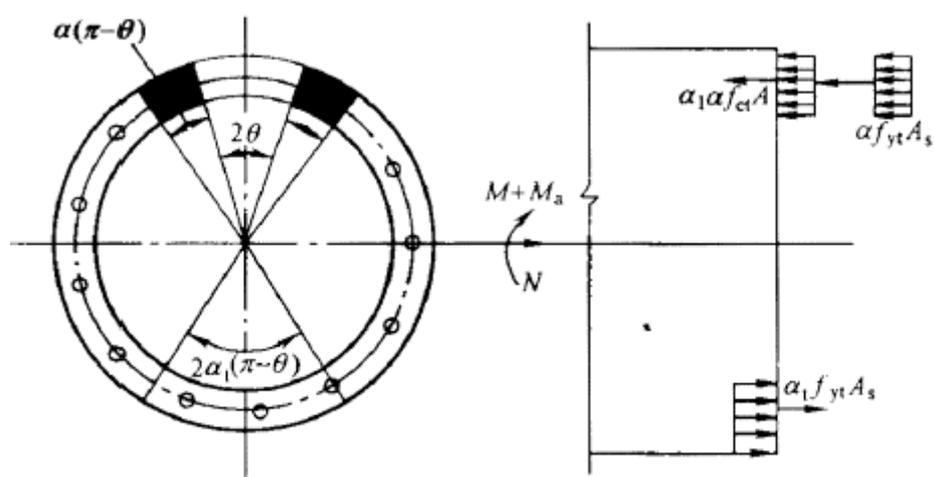
$\theta$ ——计算截面有一个孔洞时的孔洞半角 (弧度) ;

$\theta_1$ ——计算截面有两个孔洞时, 大孔洞的半角 (弧度) ;

$\theta_2$ ——计算截面有两个孔洞时, 小孔洞的半角 (弧度) 。



(a) 筒壁没有孔洞



(b) 筒壁有一个孔洞

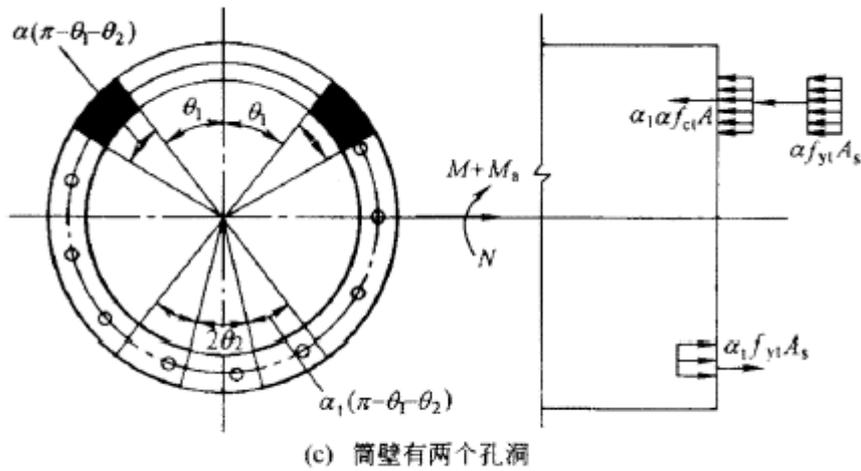


图 7.3.1 截面计算

### 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包括以下内容:

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, 并应满足下列条件:

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

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

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

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

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

$\sigma_{st}$ ——在温度作用下环向和竖向钢筋的应力值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

$f_{ctk}$ ——混凝土在温度作用下的强度标准值, 按本规范表 3.2.3 的规定取值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

$f_{ytk}$ ——钢筋在温度作用下的强度标准值, 按本规范表 3.3.2 的规定取值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )。

2 验算筒壁裂缝宽度，并应符合本规范表 4.4.2 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  $e_c$  与截面核心距  $r_{co}$  的相应关系(  $e_c > r_{co}$  或  $e_c \leq r_{co}$  )，分别采用图 7.4.2 所示的应力计算简图。

1 轴向力标准值对筒壁圆心的偏心距应按下列式计算：

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

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)。

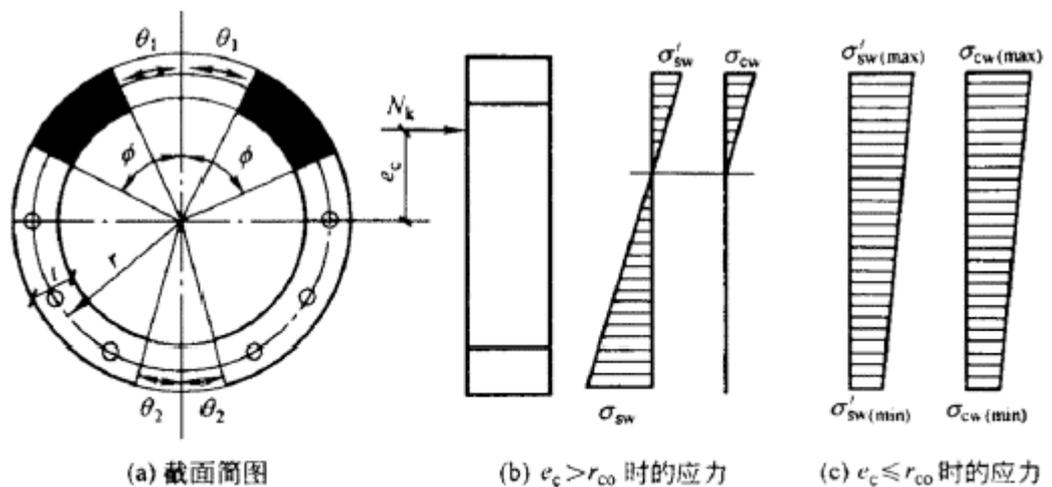


图 7.4.2 在荷载标准值作用下的应力计算

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 (将大孔洞置于受压区) 时:

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

7.4.3 当  $e_c > r_{co}$  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  $\sigma_{cw}$  :

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

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

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

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

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

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

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞时:

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

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

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

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

式中  $A_0$ ——筒壁计算截面的换算面积, 按本规范 (7.4.5-1) 式计算;

$\alpha_{Et}$ ——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, 按本规范 (7.4.5-2) 式计算;

$\varphi$ ——筒壁计算截面的受压区半角;

$\rho_t$ ——竖向钢筋总配筋率 (包括筒壁外侧和内侧配筋)。

2 迎风侧纵向钢筋拉应力  $\sigma_{cw}$  :

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

$$\sigma_{cw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_o} C_{s1} \quad (7.4.3-9)$$

$$C_{s1} = \frac{1 + \cos \varphi}{1 - \cos \varphi} C_{c1} \quad (7.4.3-10)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

$$\sigma_{sw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_o} C_{s2} \quad (7.4.3-11)$$

$$C_{s2} = \frac{1 + \cos \varphi}{\cos \theta - \cos \varphi} C_{c2} \quad (7.4.3-12)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞时:

$$\sigma_{sw} = \alpha_{Et} \frac{N_k}{A_o} C_{s3} \quad (7.4.3-13)$$

$$C_{s3} = \frac{\cos \theta_2 + \cos \varphi}{\cos \theta_1 - \cos \varphi} C_{c3} \quad (7.4.3-14)$$

3 受压区半角  $\varphi$ , 应按下列公式确定:

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

$$\frac{e_c}{r} = \frac{\varphi - 0.5 \sin 2\varphi + \pi \alpha_{Et} \rho_t}{2[\sin \varphi - (\varphi + \pi \alpha_{Et} \rho_t) \cos \varphi]} \quad (7.4.3-15)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

$$\frac{e_c}{r} = \frac{(1 + \alpha_{Et} \rho_t)(\varphi - \theta - 0.5 \sin 2\theta + 2 \sin \theta \cos \varphi) - 0.5 \sin 2\varphi + \alpha_{Et} \rho(\pi - \varphi)}{2\{\sin \varphi - (1 + \alpha_{Et} \rho_t) \sin \theta - [\varphi - \theta + (\pi - \theta) \alpha_{Et} \rho_t] \cos \varphi\}} \quad (7.4.3-16)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞时:

$$\frac{e_c}{r} = \frac{B_{ec}}{D_{ec}} \quad (7.4.3-17)$$

$$B_{ec} = (1 + \alpha_{Et} \rho_t)(\varphi - \theta_1 - 0.5 \sin 2\theta_1 + 2 \cos \varphi \sin \theta_1) - 0.5 \sin 2\varphi + \alpha_{Et} \rho_t (\pi - \varphi - \theta_2 - 0.5 \sin 2\theta_2 - 2 \cos \varphi \sin \theta_2) \quad (7.4.3-18)$$

$$D_{ec} = 2\{\sin \varphi - (1 - \alpha_{Et} \rho_t) \sin \theta_1 - [\varphi - \theta_1 + \alpha_{Et} \rho_t (\pi - \theta_1 - \theta_2)] \cos \varphi + \alpha_{Et} \rho_t \sin \theta_2\} \quad (7.4.3-19)$$

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

1 背风侧的混凝土压应力  $\sigma_{cw}$  :

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c4} \quad (7.4.4-1)$$

$$C_{c4} = 1 + 2 \frac{e_c}{r} \quad (7.4.4-2)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c5} \quad (7.4.4-3)$$

$$C_{c5} = 1 + \frac{2(\frac{e_c}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta})[(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - 2 \frac{\sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \quad (7.4.4-4)$$

3) 当筒壁计算截面有两个孔洞时:

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c6} \quad (7.4.6-5)$$

$$\sigma_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c6} = 1 + \frac{2(\frac{e_c}{r} + \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2})[(\pi - \theta_1 - \theta_2) \cos \theta_1 - \sin \theta_2 + \sin \theta_1]}{(\pi - \theta_1 - \theta_2) - 0.5(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2) - 2 \frac{(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}}$$

(7.4.4-6)

2 迎风侧混凝土压应力  $\sigma'_{cw}$ :

1) 当筒壁计算截面无孔洞时:

$$\sigma'_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c7} \quad (7.4.4-7)$$

$$C_{c7} = 1 - 2 \frac{e_c}{r} \quad (7.4.4-8)$$

2) 当筒壁计算截面有一个孔洞时:

$$\sigma'_{cw} = \frac{N_k}{A_0} C_{c8} \quad (7.4.4-9)$$

$$C_{c8} = 1 - \frac{2\left(\frac{e_c}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}\right)(\pi - \theta - \sin \theta)}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - 2 \frac{\sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \quad (7.4.4-10)$$

3) 当洞壁计算截面有两个孔洞时:

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

$$C_{c9} = 1 - \frac{2\left(\frac{e_c}{r} + \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}\right)[(\pi - \theta_1 - \theta_2) \cos \theta_2 + \sin \theta_2 - \sin \theta_1]}{(\pi - \theta_1 - \theta_2) - 0.5(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2) - 2 \frac{(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}} \quad (7.4.4-12)$$

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

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

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

式中  $E_s$ ——钢筋的弹性模量 (N/mm<sup>2</sup>) ;

$E_{ct}$ ——混凝土在温度作用下的弹性模量 (N/mm<sup>2</sup>) , 按本规范第 3.2.6 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  $e_c > r_{co}$  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  $e_c \leq r_{co}$  时:

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

2 拉应变参数  $P_c$  值 (仅适用于  $e_c > r_{co}$ ) :

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

式中  $\varepsilon_t$  ——筒壁内表面与外侧钢筋的相对自由变形值;

$\alpha_c$ 、 $\alpha_s$  ——分别为混凝土、钢筋的线膨胀系数,按本规范 3.2.7 条及 3.3.8 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 ( $^{\circ}\text{C}$ ),按本规范 5.6 节规定计算;

$\sigma_{cw}$ 、 $\sigma_{sw}$  ——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 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),按本规范 7.4.3 条、7.4.4 条规定计算。

7.4.7 背风侧混凝土压应力  $\sigma_{cwt}$  (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:

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

式中各变量按下列各公式计算:

$E'_{ct}$  为在温度和荷载长期作用下混凝土的弹塑性模量:

当  $e_c \geq r_{co}$  时:

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

当  $e_c \leq r_{co}$  时:

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

$\xi_{wt}$  为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:

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

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

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

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

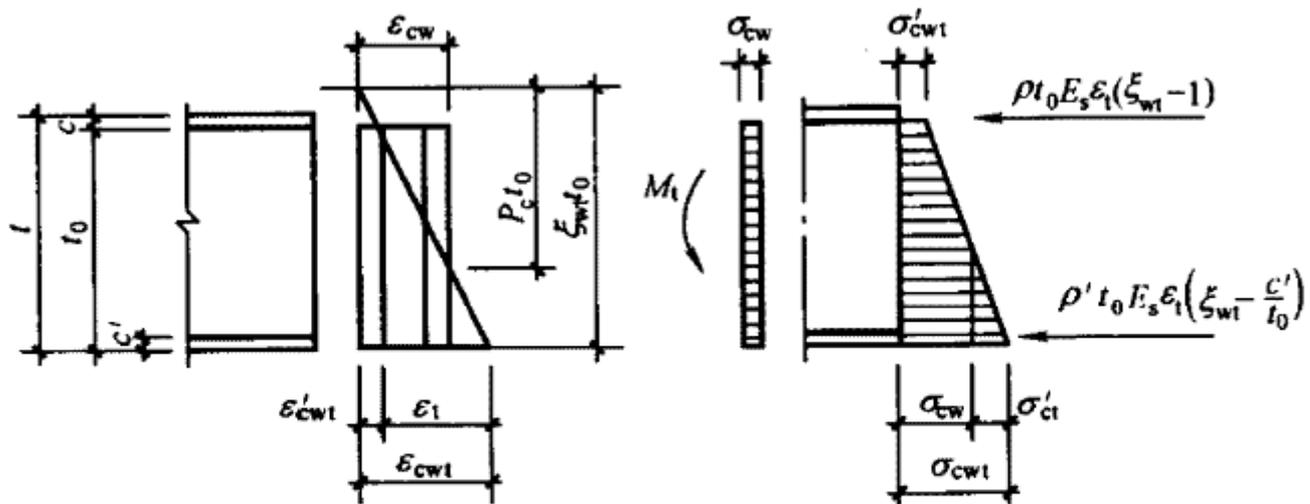
$$\alpha_{E_{ta}} = \frac{E_s}{E'_{ct}} \quad (7.4.7-7)$$

式中  $\rho$ 、 $\rho'$ ——分别为筒壁外侧和内侧竖向钢筋配筋率;

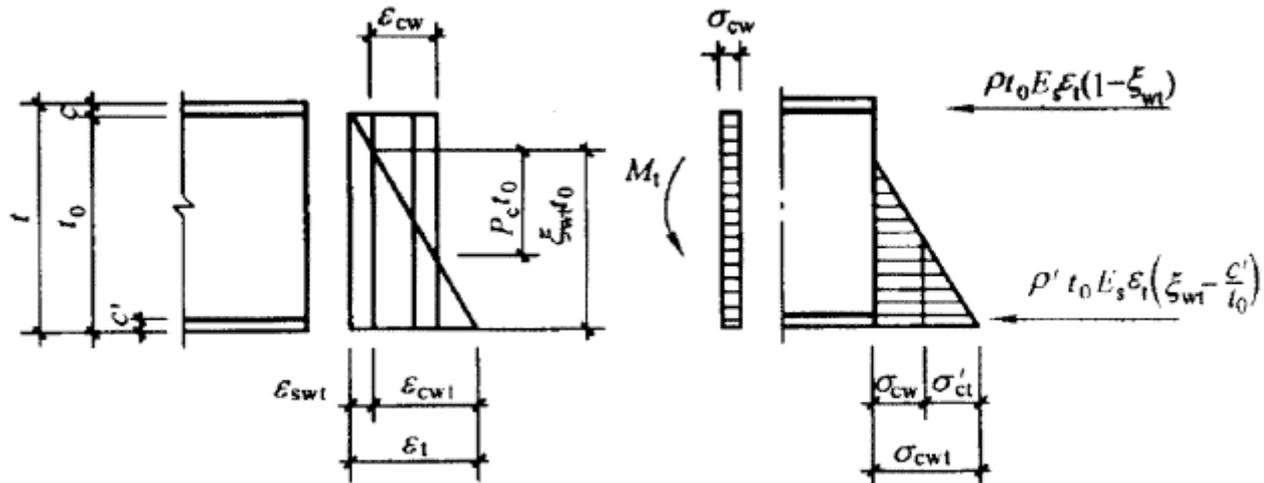
$t_0$ ——筒壁有效厚度 (mm);

$c'$ ——筒壁内侧竖向钢筋保护层 (mm);

$\eta_{ct1}$ ——为温度应力衰减系数。



$$(a) \quad l > P_c > \frac{1 + 2\alpha_{Esa} \rho' (1 - \frac{c'}{l_0})}{2[1 + \alpha_{Esa} (\rho + \rho')]}$$



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

图 7.4.7 水平截面背风侧混凝土上的应变和应力（宽度为 1）

当  $P_c \leq 0.2$  时：

$$\eta_{c1} = 1 - 2.6P_c \quad (7.4.7-8)$$

当  $P_c > 0.2$  时：

$$\eta_{c1} = 0.6(1 - P_c) \quad (7.4.7-9)$$

7.4.8 迎风侧竖向钢筋应力  $\sigma_{swt}$  (图 7.4.8)，应按下列公式计算：

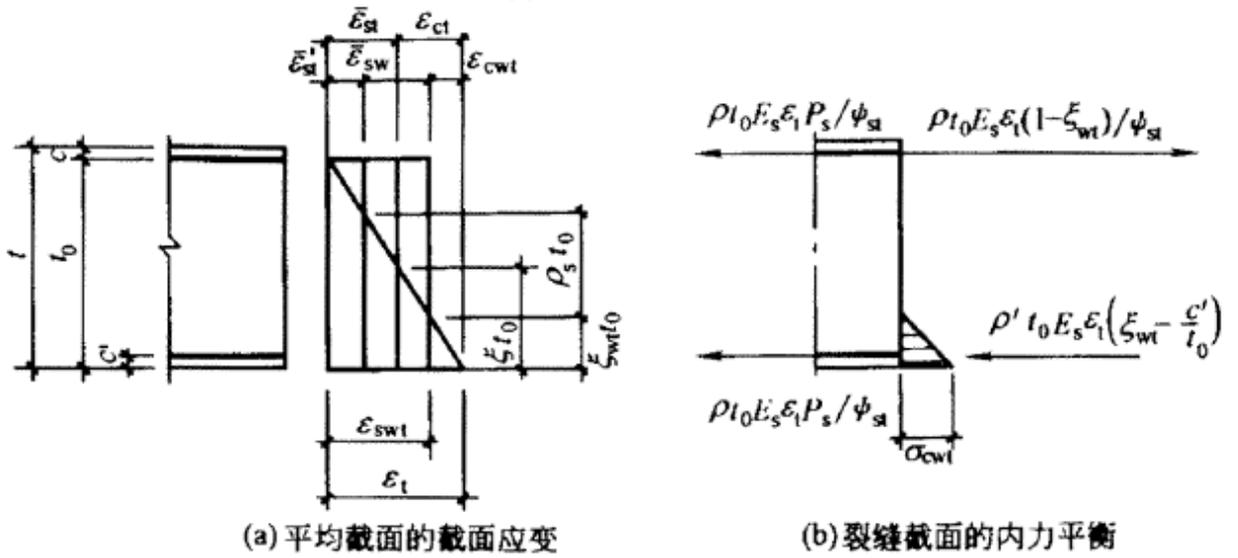


图 7.4.8 水平截面迎风侧钢筋的应变和应力计算(宽度为 1)

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

$$\sigma_{swt} = \sigma_{sw} \quad (7.4.8-1)$$

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

$$\sigma_{swt} = \frac{E_s}{\psi_{st}} \epsilon_1 (1 - \xi_{wt}) \quad (7.4.8-2)$$

式中各变量按下列公式计算:

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

$\xi_{wt}$  为:

$$\begin{aligned} \xi_{swf} = & -\alpha_{Eta} \left( \frac{\rho}{\psi_{st}} + \rho' \right) \\ & + \sqrt{\left[ \alpha_{Eta} \left( \frac{\rho}{\psi_{st}} + \rho' \right) \right]^2 + 2\alpha_{Eta} \left( \frac{\rho}{\psi_{st}} + \rho' \frac{c'}{t_0} \right) - 2\alpha_{Eta} (\rho + \rho') \frac{P_s}{\psi_{st}}} \end{aligned} \quad (7.4.8-3)$$

式中  $\alpha_{Eta}$ ——按本规范公式 (7.4.7-7) 计算;

$P_s$ ——按本规范公式 (7.4.6-4) 计算;

$\psi_{st}$ ——受拉钢筋在温度作用下的应变不均匀系数。按本规范公式 (7.4.9-4) 计算。

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

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

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

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

$\sigma_{ct}$  和钢筋拉应力  $\sigma_{st}$  (图 7.4.9) 应按下列各式计算。

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

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

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

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

式中  $E'_{ct}$ ——混凝土弹塑性模量 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )，按本规范 (7.4.7-3) 式计算；

$\varepsilon_t$ ——按本规范 (7.4.6-2) 式计算；

$f_{tk}$ ——混凝土在温度作用下的抗拉强度标准值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )，按本规范表 3.2.3 采用；

$\rho_{te}$ ——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  $\psi_{st} = 1$ 。

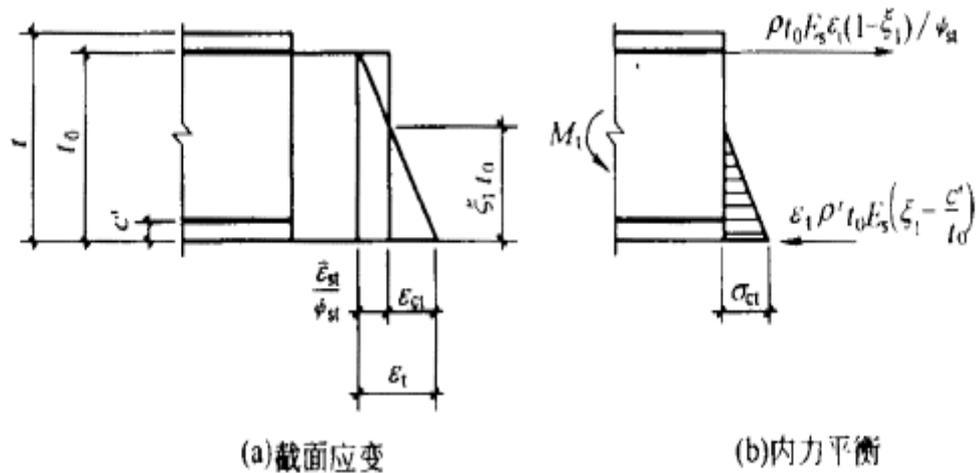


图 7.4.9 裂缝处水平截面和垂直截面应变和应力计算(宽度为 1)

#### (IV) 筒壁裂缝宽度验算

7.4.10 钢筋混凝土筒壁应按下列公式验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:

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

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

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

式中  $\sigma_{swt}$ ——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/mm<sup>2</sup>)；

$\alpha_{cr}$ ——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，取足  $k = 1.2$ ；

$n_i$ ——第  $n_i$  种钢筋根数；

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

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

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

$c$ ——混凝土保护层厚度 (mm)；

$v_i$ ——纵向受拉钢筋的相对粘结特性系数，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) 至 (7.4.10-3) 进行计算，

此时应以  $\sigma_{st}$  代替公式中的  $\sigma_{swt}$ ，并取  $\alpha_{cr} = 2.1$ 。

## 7.5 构造规定

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 筒壁坡度宜采用 2%，对高烟囱亦可采用几种不同的坡度；
- 2 筒壁分节高度，应为移动模板的倍数，且不宜超过 15m；
- 3 筒壁最小厚度应符合本规范表 7.5.1 的有关规定；
- 4 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。

表 7.5.1 筒壁最小厚度

筒壁顶口内径 D (m)	最小厚度 (mm)
$D \leq 4$	140
$4 < D \leq 6$	160
$6 < D \leq 8$	180
$D > 8$	$180 + (D - 8) \times 10$

注:采用滑动模板施工时,最小厚度不宜小于 160mm。

7.5.2 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 7.5.2）：

- 1 环形悬臂一般可不配置钢筋。受力较大或挑出较长的悬臂应按剪切计算配置钢筋。
- 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，一般宜增加 1 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，对筒壁内外侧竖向钢筋及环向钢筋适当加密，可增加 1 倍。

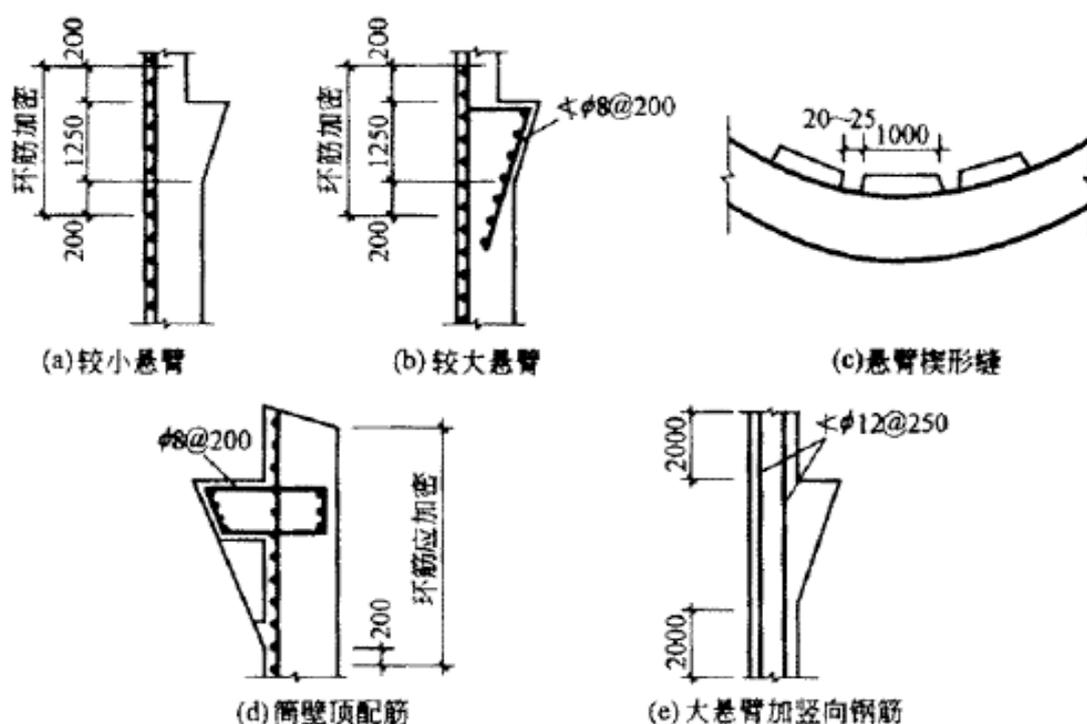


图 7.5.2 悬臂及筒顶配筋(单位:mm)

7.5.3 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  $70^\circ$ 。在同一水平截面内总的开孔圆

心角不得超过  $140^\circ$  ；

3 孔洞宜设计成圆形。矩形孔洞的转角宜设计成弧形（图 7.5.3）；

4 孔洞周围应配补强钢筋，并尽量配在孔洞边缘和筒壁外侧，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。矩形孔洞转角处应配置与水平方向成  $45^\circ$  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  $250\text{mm}^2$ ，且不少于两根。

所有补强钢筋伸过洞口边缘的最小长度：地震区的烟囱为  $45d$ ，非地震区为  $40d$ 。

特大烟道孔，配筋宜适当增加。

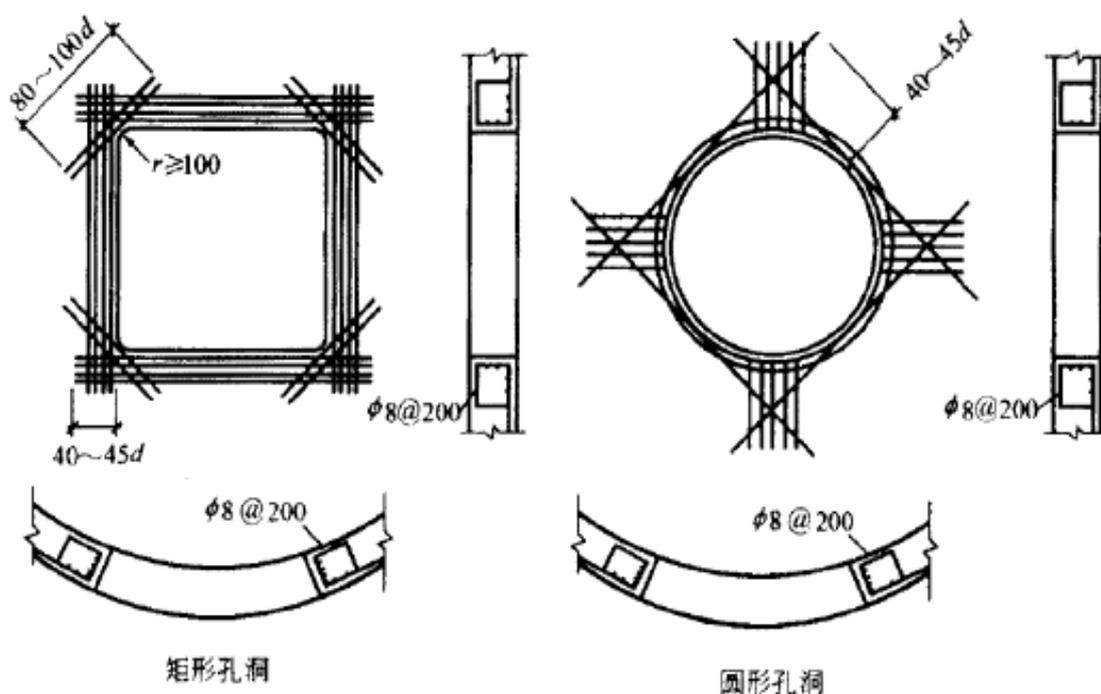


图 7.5.3 洞口加固筋(单位:mm)

7.5.4 筒壁环向钢筋的保护层厚度不应小于 30mm。

7.5.5 筒壁最小配筋率应符合表 7.5.5 的规定。

表 7.5.5 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	0.25
	内侧	0.10	—
注：安全等级为一级的钢筋混凝土烟囱应采用双侧配筋。			

7.5.6 筒壁采用单侧配筋时，筒壁内侧的下列部位应配筋：

- 1 筒壁厚度大于 350mm。
- 2 筒壁长期处于外侧温度大于内侧温度的部位。

7.5.7 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。

7.5.8 钢筋最小直径与最大间距应符合表 7.5.8 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，纵横间距为 500mm。

表 7.5.8 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
------	---	-------------

7.5.9 纵向钢筋的分段长度, 应取移动模板的倍数, 并加搭接长度。搭接长度按国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010) 规定采用。接头位置应相互错开, 在任一搭接范围内, 不应超过截面内全部钢筋根数的 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或规范的规定。

7.5.10 筒身应设测温孔、沉降观测点和倾斜观测点。

7.5.11 内衬及隔热层构造见本规范 6.6.11、6.6.12 条的有关规定。

7.5.12 爬梯的设置应按本规范 6.6.14 条的有关规定执行。

7.5.13 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 60~100m 时, 可仅在顶部设置;
- 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, 而不再单独设置检修平台。

7.5.14 爬梯和平台各杆件长度不宜超过 2.5m, 杆件之间应以螺栓连接。

7.5.15 爬梯和平台等金属构件, 应采取防腐措施。

7.5.16 爬梯、平台与筒壁的连接应牢固可靠。

7.5.17 烟囱应设清灰孔和防雷设施。

## 8 套筒式和多管式烟囱

### 8.1 一般规定

8.1.1 当采用多台烟气发生炉排烟时，每台烟气发生炉宜单独采用一个排烟筒，此种情况可设计成多管式烟囱。

8.1.2 套筒式和多管式烟囱，应使承重外筒与排烟筒分开，使外筒受力结构不与腐蚀性烟气接触。外筒与排烟筒之间的净距离  $a$  不宜小于 750mm。当为多管时，各排烟筒之间的距离  $b$  (图 8.1.2) 也不宜小于 750mm。

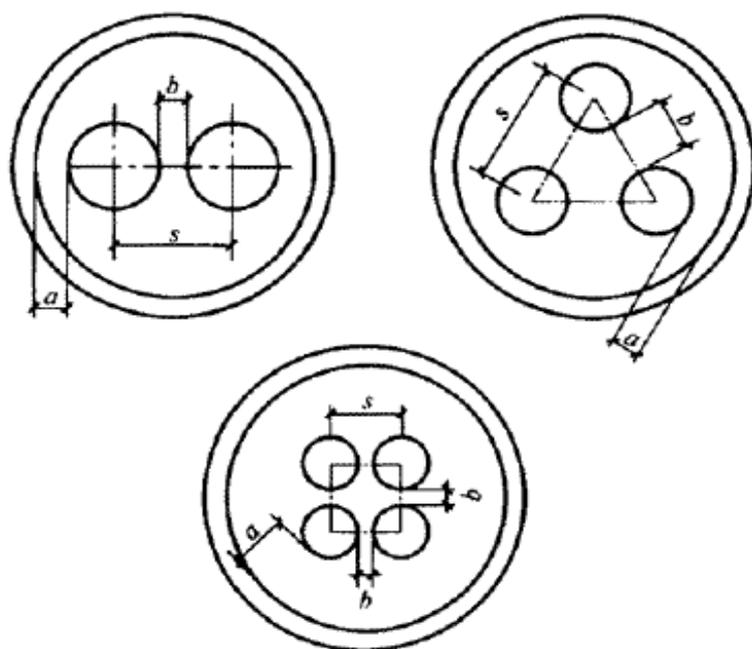


图 8.1.2 排烟筒布置

8.1.3 承重外筒宜选择钢筋混凝土结构。排烟内筒可根据实际情况，选择砖砌体结构（也可分为自立式和分段支承式）、自立式钢内筒、整体悬挂式或分段悬挂式钢内筒结构。

8.1.4 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，均按本规范第7章有关公式进行计算。

2 排烟内筒的计算：

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。在地震区还应进行地震作用下的承载能力极限状态计算及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、洞口补强及顶部最大水平位移计算；

4) 悬挂式钢内筒应进行悬挂结点强度计算及悬挂下端最大水平位移计算。

3 验算水平位移最大值，应保证内外筒不相碰撞。

8.1.5 平台活荷载取值应符合下列规定：

1 筒壁顶部平台的荷载应考虑积灰荷载及检修荷载。筒壁顶部平台活荷载（含积灰荷载）标准值可取  $7\text{kN/m}^2$ 。

2 承重平台。分段式砖砌内筒和悬挂式钢内筒的承重平台除考虑承受内筒自重荷载外，还应考虑施工检修活荷载，可取  $7 \sim 11\text{kN/m}^2$ 。

各构件应按上述两种荷载单独出现分别计算，取二者中的不利情况。

3 对自立式和悬挂式钢内筒的非承重检修平台，活荷载标准值可取  $3\text{kN/m}^2$ 。

4 吊装平台。用于自立式或悬挂式钢内筒的吊装平台，应根据施工吊装方案，确定荷载设计值。但平台各构件应考虑  $7 \sim 11\text{kN/m}^2$  的活荷载标准值。

## 8.2 计算规定

### 8.2.1 钢筋混凝土外筒：

1 计算钢筋混凝土外筒时，除考虑自重荷载（包括分段支承的内筒和平台及悬挂式钢内筒自重荷载）、风荷载、地震作用及附加弯矩外，还应根据实际情况，考虑平台活荷载、施工吊装荷载及安装检修荷载（在计算地震作用时，可不考虑施工吊装及安装检修荷载）。

2 在风荷载或地震作用下，外筒计算时，可不考虑内筒抗弯刚度的影响。

### 8.2.2 钢内筒：

1 自立式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。计算钢内筒自重时，应计入本规范第 10.6.3 条规定的腐蚀厚度裕度。腐蚀厚度裕度不计

入计算截面的有效截面面积。

2 自立式钢内筒应按本规范 9.3.2、9.3.3 条的规定进行计算。

8.2.3 内筒的受热温度计算：

1 砖砌内筒和钢内筒，均应根据筒壁具体构造，进行最高受热温度及温度差计算。计算出的最高受热温度，应符合本规范第 4.3.1 条的规定。

2 砖砌内筒和钢内筒受热温度计算：

1) 当烟气正常运行温度高于酸露点温度但低于 150℃ 时，采用大气极端最低温度计算出的内筒最里层内表面温度，应高于酸露点温度，外表面的温度不大于 50℃。

2) 当烟气正常运行温度低于酸露点温度，且按照本规范 10.5.1 条的规定需要设置封闭层或保温层时，各层厚度的确定，还应满足最外层外表面的温度不大于 50℃。

8.2.4 制晃装置计算：

1 自立式和悬挂式钢内筒，内筒与外筒之间的制晃拉紧索（钢板带或钢绳索）承受的拉力，应根据内外筒变形协调计算。

2 钢内筒与拉紧索相连的加强支承环的弯矩、环向拉力及沿内筒半径方向的剪力，可按下列公式计算：

$$M_{\max} = 0.25Fr \quad (8.2.4-1)$$

$$N_t = 0.56F \quad (8.2.4-2)$$

$$V_{\max} = 0.50F \quad (8.2.4-3)$$

$$F = H_k / 3 \quad (8.2.4-4)$$

式中  $M_{\max}$ ——支承环的最大弯矩 (kN·m)；

$N_t$ ——支承环沿圆周方向的拉力 (kN)；

$V_{\max}$ ——支承环沿半径方向的最大剪力 (kN)；

$r$ ——钢内筒半径 (m)；

$H_k$ ——外筒在  $k$  层制晃拉紧装置处，传给每一个内筒的最大水平力 (kN)，

可根据变形协调求得；

$F$ ——支承环每个节点处的拉力设计值 (kN) (图 8.2.4)。

注：对需要进行抗震验算的烟囱，公式 (8.2.4-4) 还应以  $H_{Ek}$  代替  $H_k$  进行验算。

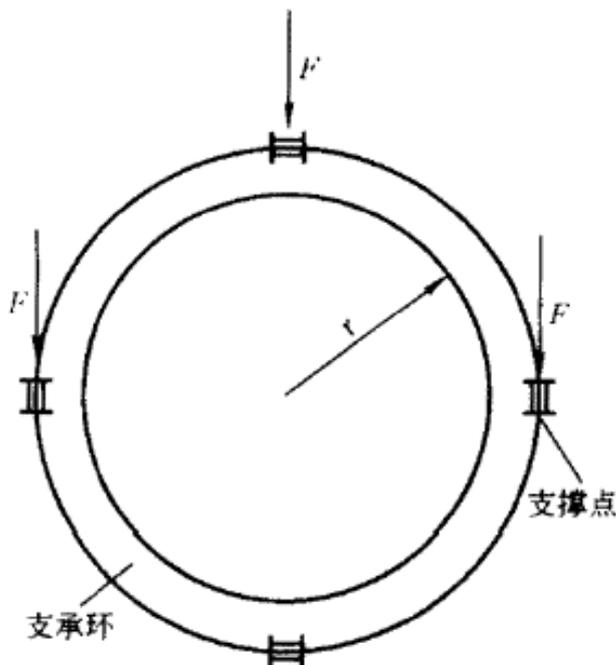


图 8.2.4 支承环受力

### 8.3 构造规定

8.3.1 钢筋混凝土外筒除符合本规范 7.5 节的有关规定外，尚应满足：

- 1 钢筋混凝土外筒上部宜设计成等直径圆筒结构。筒的下部可根据需要放坡；
- 2 外筒的最小厚度不宜小于 250mm。筒壁应采用双侧配筋；
- 3 筒壁最小配筋率应满足表 8.3.1 的规定。

表 8.3.1 筒壁最小配筋率 (%)

竖向钢筋	外侧	0.25
	内侧	0.20
环向钢筋	外侧	0.20
	内侧	0.15

4 外筒筒壁顶部内外环向钢筋，在自上而下 5m 高度范围内，应比计算值增加 1 倍。

5 承重平台的大梁和吊装平台的大梁，应支承在筒壁内侧。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。

6 外筒壁仅有 1~2 个烟道口时，筒壁洞口的设置和配筋应遵守第 7.5.3 条规定。

当烟道口为 3~4 个时，除遵守本规范 7.5.3 条的有关规定外，在洞口上下的环向加固筋应有 50%钢筋沿整个周圈布置。另 50%加固筋应伸过洞口边缘 1 倍钢筋锚固长度。

7 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 0.5~1.0m（如钢内筒选择在外筒内部焊接成筒的施工方案时，安装孔的宽度可不受此限），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。

8 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包围的水平截面面积（扣除排烟筒包围的水平面积）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。

9 外筒的附件宜镀锌防腐，并采用镀锌自锚螺栓固定。

### 8.3.2 内筒构造：

1 砖内筒和钢内筒的防腐蚀措施，均应符合本规范第 10 章的有关规定；

2 烟道与内筒相交处，应在内筒上设置烟气导流平台。

3 钢内筒（包括烟道入口以下至地面区段）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。

4 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 8.3.2-1）。

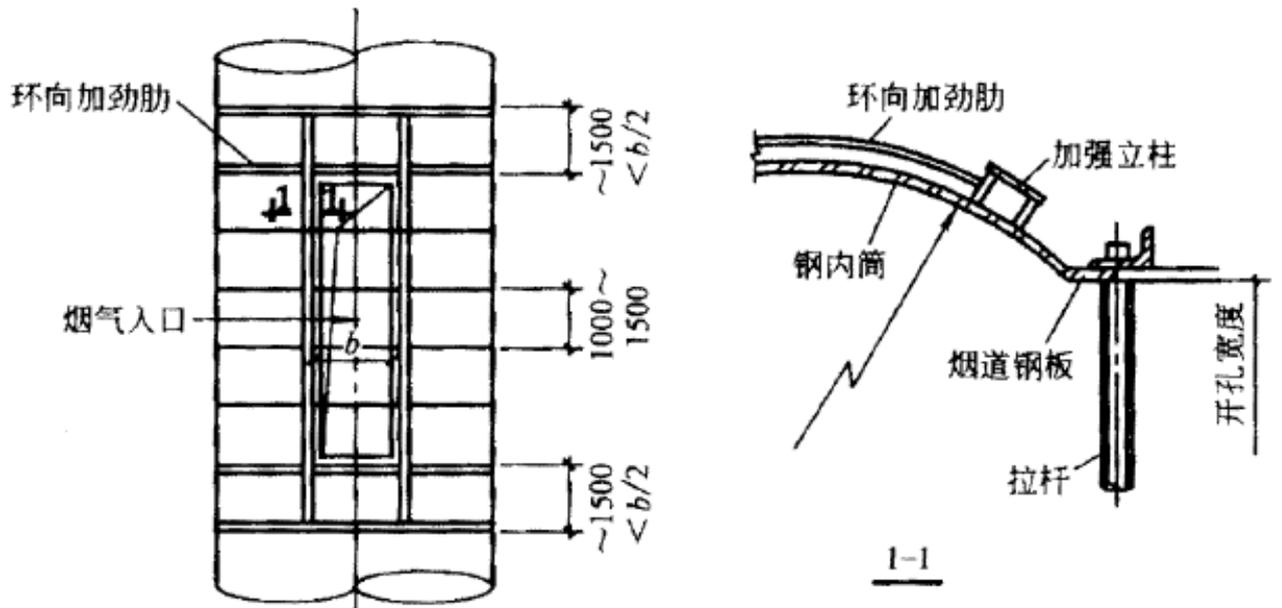


图 8.3.2-1 洞口加劲布置和节点(单位: mm)

- 5 内筒应在中部和下部，各设置一个检测入孔。
- 6 钢内筒的筒壁顶部构造，可按图 8.3.2-2 处理。

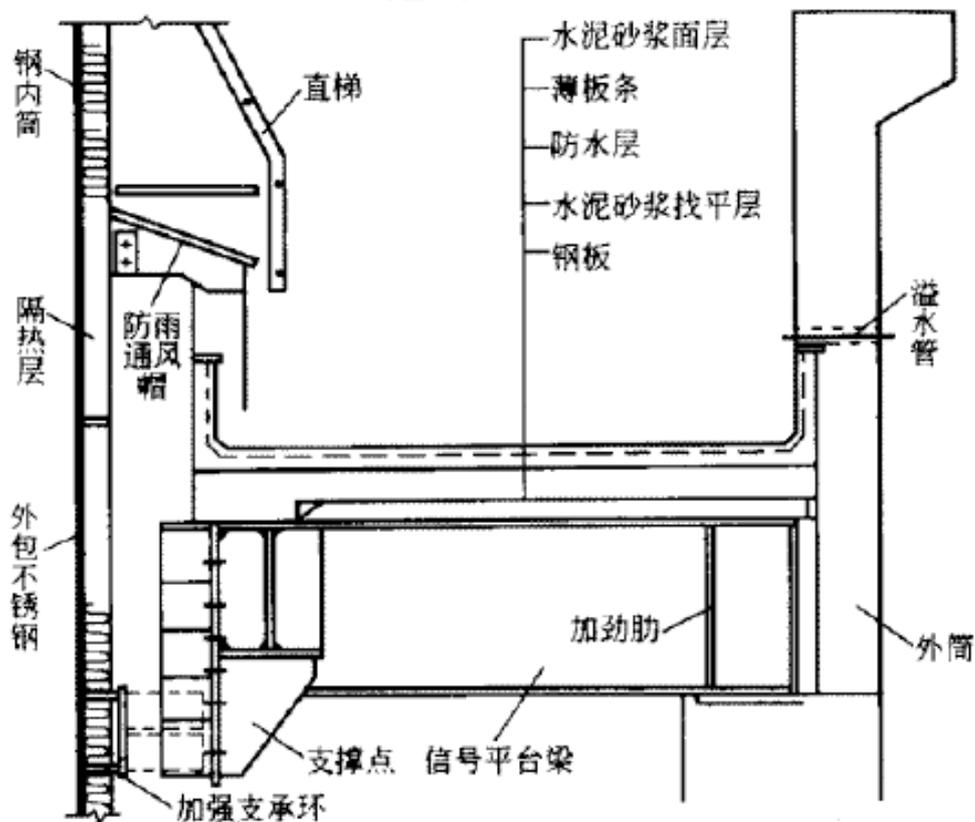


图 8.3.2-2 烟囱顶部构造

8.3.3 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》(GB 50017)的规定执行。受到烟气温度影响时，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，应根据需要确定）。
- 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宜小于 750mm，洞口周围应设栏杆和踢脚板。与排烟筒相接触的孔洞，应留有一定空隙。

8.3.4 制晃装置应符合下列要求：

1 采用钢内筒时，应设置制晃装置。

2 制晃装置可采用刚性的，也可采用柔性的。当采用刚性制晃装置时，宜利用平台为约束构件。一般每隔一层平台设置一道。制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的作用而产生的竖向和水平方向的温度变形。

3 柔性制晃装置以扁钢或拉紧索为制晃受力构件。一般设置在平台上方 2.0m 左右处。

4 柔性制晃装置与外筒或内筒的连接均采用铰接。拉紧节点宜采用花篮螺栓，以调整松紧度。松紧度的调整宜在烟囱开始运行时进行，并不宜使装置产生过大的拉紧初应力。

5 柔性拉紧制晃装置，宜根据钢内筒的数量，采用图 8.3.4-1 的布置方案。

6 制晃装置处内筒的加强环，可按图 8.3.4-2 进行加强。

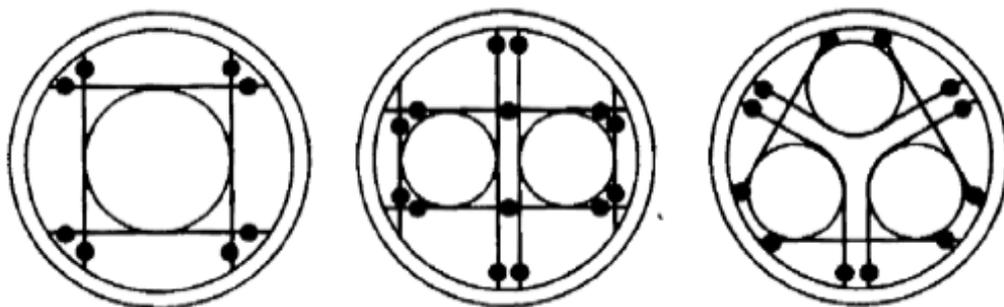


图 8.3.4-1 制晃装置布置

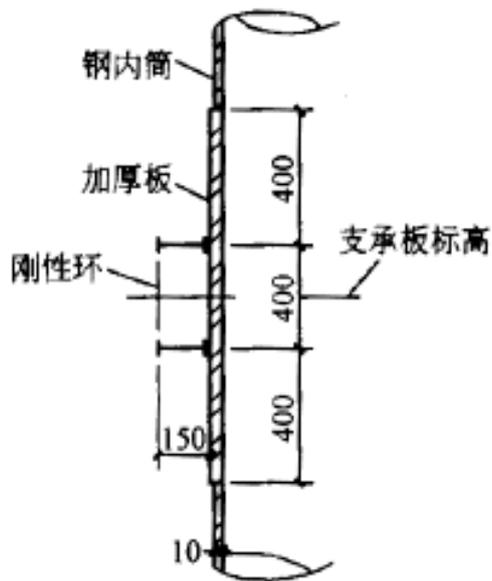


图 8.3.4-2 内筒加强环(单位:mm)

## 9 钢 烟 囱

### 9.1 一 般 规 定

9.1.1 钢烟囱包括塔架式、自立式和拉索式三种形式。高大的钢烟囱可采用塔架式，低矮的钢烟囱可采用自立式，细高的钢烟囱可采用拉索式。

9.1.2 钢塔架及拉索计算可按国家标准《高耸结构设计规范》(GB 50135)的有关规定进行。

9.1.3 钢烟囱选用的材料应符合国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017)的规定。

### 9.2 塔架式钢烟囱

9.2.1 钢塔架可根据排烟筒的数量，水平截面设计成三角形和方形。

9.2.2 钢塔架沿高度可采用单坡度或多坡度型式。塔架底部宽度与高度之比，不宜小于 1/8。

9.2.3 对于高度较高，底部较宽的钢塔架，宜在底部各边增设拉杆。

9.2.4 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 9.2.4a）。

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 9.2.4b）。

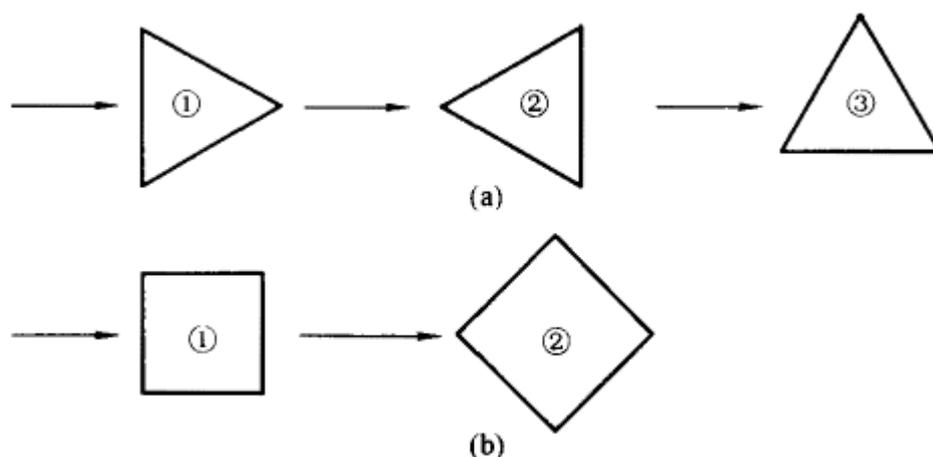


图 9.2.4 塔架外力作用方向

4 当钢塔架与排烟筒采用整体吊装时应对钢塔架进行吊装验算。

5 在风荷载（标准值）作用下，钢塔架任意点的水平位移不得大于

该点离地面高度的 1/100。

6 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。

7 为减少风振的发生，钢塔架杆件的自振频率应与塔架的自振频率相互错开。

8 对承受上拔力和横向力的钢塔架基础，除地基进行强度计算和变形验算外，尚应进行抗拔和抗滑稳定性验算。

9.2.5 钢塔架腹杆宜按下列规定确定：

- 1 塔架顶层和底层应采用刚性 K 型腹杆；
- 2 塔架中间层可采用预加拉紧的柔性交叉腹杆；
- 3 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；
- 4 交叉柔性腹杆宜采用圆钢。

9.2.6 钢塔架平台与排烟筒连接时，宜采用滑道式连接(图 9.2.6)。

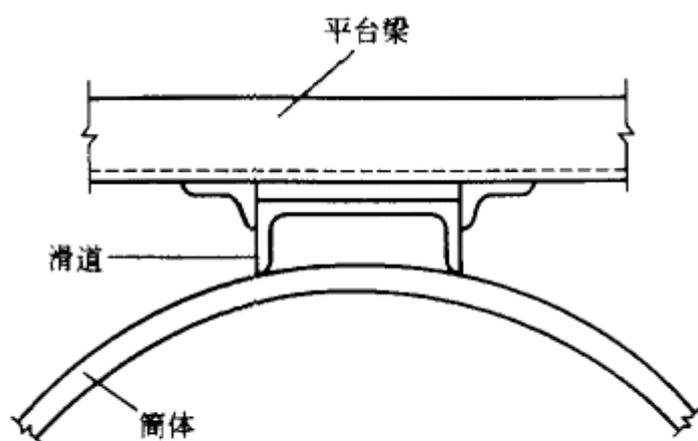


图 9.2.6 滑道式连接

9.2.7 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，其余可沿塔架高度每隔 2~3 个节间设置一道横隔。塔架还应沿高度每隔 14~20m 设一道休息平台或检修平台。

9.2.8 塔架式烟囱的水平弯矩，按排烟筒与塔架变形协调进行计算。

9.2.9 排烟筒的构造要求与自立式钢烟囱相同。

### 9.3 自立式钢烟囱

9.3.1 自立式钢烟囱的直径  $d$  和高度  $h$  之间的关系宜满足  $h \leq 20d$ 。当不满足此条件时，烟囱下部直径宜扩大或采用其他结构型式。

9.3.2 自立式钢烟囱应进行下列计算：

1 弯矩和轴力作用下，钢烟囱强度应按下列规定进行计算：

$$\frac{N_i}{A_{ni}} \pm \frac{M_i}{W_{ni}} \leq f_t \text{ 及 } \sigma_{crit} \quad (9.3.2-1)$$

$$\sigma_{crit} = 0.4 \frac{E_t}{k} \cdot \frac{t}{d_i} \quad (9.3.2-2)$$

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）（ $\text{N} \cdot \text{mm}$ ）；

$N_i$ ——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）（ $\text{N}$ ）；

$A_{ni}$ ——计算截面处的净截面面积（ $\text{mm}^2$ ）；

$t$ ——筒壁厚度（ $\text{mm}$ ）；

$W_{ni}$ ——计算截面处的净截面抵抗矩（ $\text{mm}^3$ ）；

$f_t$ ——温度作用下钢材抗拉、抗压和拉弯强度设计值（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ），按本规范 3.3.5 及 3.3.6 条进行计算；

$k$ ——局部抗压强度调整系数，对应于风荷载时，取  $k=1.50$ ；对应于地震作用时，取  $k=1.20$ ；

$E_t$ ——温度作用下钢材的弹性模量（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ）；

$d_i$ —— $i$  截面钢烟囱外直径（ $\text{mm}$ ）；

$\sigma_{crit}$ ——筒壁局部稳定的临界应力值（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ）。

2 在弯矩和轴向力作用下，钢烟囱的稳定性应按下式进行验算：

$$\frac{N_i}{\varphi A_{bi}} + \frac{M_i}{W_{bi}(1-0.8N_i/N_{Ex})} \leq f_i \quad (9.3.2-3)$$

$$N_{Ex} = \frac{\pi^2 E_t A_{bi}}{1.1\lambda^2} \quad (9.3.2-4)$$

式中  $A_{bi}$ ——计算截面处的毛截面面积 ( $\text{mm}^2$ ) ;

$W_{bi}$ ——计算截面处的毛截面抵抗矩 ( $\text{mm}^3$ ) ;

$\lambda$ ——烟囱长细比, 按悬臂构件计算;

$\varphi$ ——焊接圆筒截面轴心受压构件稳定系数, 按附录 B 采用。

3 地脚螺栓最大拉力可按下式计算:

$$P_{\max} = \frac{4M}{nd_0} - \frac{N}{n}$$

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 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ) ;

$N$ ——与弯矩相应的轴向压力设计值 (kN) ;

$d_0$ ——地脚螺栓所在圆直径 (m) ;

$n$ ——地脚螺栓数量。

4 钢烟囱底座基础局部受压应力, 可按下式计算:

$$\sigma_{cbr} = \frac{G}{A_t} + \frac{M}{W} \leq \omega \beta_t f_{ct} \quad (9.3.2-6)$$

式中  $\sigma_{cbr}$ ——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压应力（N/mm<sup>2</sup>）；

$A_t$ ——钢烟囱与混凝土基础的接触面面积（mm<sup>2</sup>）；

$W$ ——钢烟囱与混凝土基础的接触面截面抵抗矩（mm<sup>3</sup>）；

$\omega$ ——荷载分布影响系数，可取  $\omega=0.675$ ；

$\beta_t$ ——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》

（GB 50010）计算；

$f_{ct}$ ——混凝土在温度作用下的轴心抗压强度设计值。

5 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：

$$\sigma = \left( \frac{N}{A_o} + \frac{M}{W_o} \right) \alpha_k \leq f_t \quad (9.3.2-7)$$

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<sup>2</sup>）；

$W_o$ ——洞口补强后水平截面最小抵抗矩（mm<sup>3</sup>）；

$f_t$ ——温度作用下的钢材抗压强度设计值（N/mm<sup>2</sup>）；

$N$ 、 $M$ ——洞口截面处轴向力及弯矩设计值（N、N·mm）；

$\alpha_k$ ——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。

9.3.3 自立式钢烟囱的筒壁最小厚度应满足下列条件：

当烟囱高度  $h \leq 20m$ ， $t = 4.5 + C$  （9.3.3-1）

当烟囱高度 $h > 20\text{m}$ ，  $t = 6 + C$  (9.3.3-2)

式中  $C$ ——腐蚀厚度裕度，有隔热层时取 $C=2\text{mm}$ ，无隔热层时取 $C=3\text{mm}$ 。

9.3.4 隔热层的设置应符合以下规定：

- 1 当烟气温度高于本规范表 4.3.1 规定的最高受热温度时应设置隔热层。
- 2 烟气温度低于  $150^{\circ}\text{C}$ ，且按本规范第 10 章规定，烟气有可能对烟囱产生腐蚀时，应设置隔热层。
- 3 隔热层厚度由温度计算决定，但最小厚度不宜小于  $50\text{mm}$ 。对于全辐射炉型的烟囱，隔热层厚度不宜小于  $75\text{mm}$ 。
- 4 隔热层应与烟囱筒壁牢固连接，当用块状材料或不定型现场浇注材料时，可采用锚固钉或金属网固定。烟囱顶部可设置钢板圈保护隔热层边缘。钢板圈厚度不小于  $6\text{mm}$ 。
- 5 为支承隔热层重量，可在钢烟囱内表面，沿烟囱高度方向，每隔  $1\text{m}$  至  $1.5\text{m}$  设置一个角钢加固圈。
- 6 当烟气温度高于  $560^{\circ}\text{C}$  时，隔热层的锚固件可采用不锈钢 ( $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ ) 制造。烟气温度低于  $560^{\circ}\text{C}$  时，可采用一般碳素钢制造。
- 7 对于无隔热层的烟囱，在其底部  $2\text{m}$  高度范围内，应对烟囱采取外隔热措施或者设置防护栏，防止烫伤事故。

9.3.5 破风圈的设置应符合下列规定:

1 设置条件:

当烟囱的临界风速小于  $6 \sim 7\text{m/s}$  时, 应设置破风圈。

当烟囱的临界风速为  $7 \sim 13.4\text{m/s}$ , 且小于设计风速时, 而用改变烟囱高度、直径和增加厚度等措施不经济时, 也可设置破风圈。

2 设置破风圈范围的烟囱体型系数应按表面粗糙情况选取。

3 设置位置: 需设置破风圈时, 应在距烟囱上端不小于烟囱高度  $1/3$  的范围内设置。

4 破风圈型式与尺寸:

1) 交错排列直立板型: 直立板厚度不小于  $6\text{mm}$ , 长度不大于  $1.5\text{m}$ , 宽度为烟囱外径的  $1/10$ ; 每圈立板数量为 4 块, 沿烟囱圆周均布, 相邻圈立板相互错开  $45^\circ$ 。

2) 螺旋板型: 螺旋板厚度不小于  $6\text{mm}$ , 板宽为烟囱外径的  $1/10$ 。螺旋板为 3 道, 沿圆周均布, 螺旋节距可为烟囱外直径的 5 倍。

9.3.6 可根据需要在烟囱顶部设置用于涂刷油漆的导轨滑车及滑车钢丝绳。

## 9.4 拉索式钢烟囱

9.4.1 当烟囱高度与直径之比大于 20 ( $h/d > 20$ ) 时, 可采用拉索式钢烟囱。

9.4.2 当烟囱高度与直径之比小于 35 时, 可设 1 层拉索。拉索一般

为 3 根，平面夹角为  $120^\circ$ ，拉索与烟囱轴向夹角不小于  $25^\circ$ 。拉索系结位置距烟囱顶部小于  $h/3$  处。

9.4.3 烟囱高度与直径之比大于 35 时，可设 2 层拉索，下层拉索系结位置，宜设在上层拉索系结位置至烟囱底的  $1/2$  高度处。

9.4.4 拉索式烟囱在风荷载和地震作用下的内力计算，可按国家标准《高耸结构设计规范》（GB 50135）的规定计算。并考虑横风向风振的影响。

9.4.5 拉索式钢烟囱筒身的构造措施，与自立式钢烟囱相同。

## 10 烟囱的防腐蚀

### 10.1 一般规定

10.1.1 烟囱内的烟气温度低于  $150^\circ\text{C}$ ，且燃煤的含硫量大于 0.75% 时，烟囱的防腐蚀设计应符合本章的有关规定。

10.1.2 烟气对烟囱和烟道结构腐蚀等级分类如下：

- 1 当燃煤含硫量为 0.75%~1.5% 时，烟气属弱腐蚀性；
- 2 当燃煤含硫量为大于 1.5% 但小于或等于 2.5% 时，烟气属中等腐蚀性；
- 3 当燃煤含硫量大于 2.5% 时，烟气属强腐蚀性。

### 10.2 排放腐蚀性烟气的烟囱结构型式选择

10.2.1 烟囱高度小于或等于 100m 时，一般采用单筒式烟囱。但当烟气属强腐蚀性时，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。

10.2.2 烟囱高度大于 100m 时，烟囱型式可根据烟气腐蚀等级按下列规定采用：

- 1 当排放强腐蚀性烟气时，宜采用套筒式或多管式烟囱。
- 2 当排放中等腐蚀性烟气时，可根据烟囱的重要性既可采用套筒式或多管式烟囱，也可以采用防腐型单筒式烟囱。
- 3 当排放弱腐蚀性烟气时，可采用普通单筒式烟囱，但应采取有效防腐措施。

### 10.3 砖烟囱的防腐蚀设计

10.3.1 当排放弱腐蚀性烟气时，烟囱内衬宜按烟囱全高设置；当排放中等腐蚀性或强腐蚀性烟气时，烟囱内衬应按烟囱全高设置。

10.3.2 当排放中等腐蚀性烟气时，烟囱内衬宜采用耐酸胶泥或耐酸砂浆砌筑。

10.3.3 当排放强腐蚀性烟气时，内衬应采用耐酸胶泥（或砂浆）和耐酸砌块砌筑，如采用普通单筒式烟囱时，烟囱筒壁和内衬之间应设防腐隔离层。

### 10.4 单筒式钢筋混凝土烟囱的防腐蚀设计

10.4.1 当排放弱腐蚀性烟气时，筒壁内表面宜涂防腐耐酸涂料。对于高度大于 100m 的烟囱，内衬宜采用耐酸砖和耐酸砂浆（或耐酸胶泥）砌筑。

10.4.2 当排放中等腐蚀性烟气时，筒壁内表面应涂防腐耐酸涂料，内衬应采用耐酸砂浆或耐酸胶泥砌筑，筒壁宜增加 30mm 的腐蚀裕度。对于高度大于 100m 的烟囱，尚需在筒壁与内衬之间做防腐隔离层，并采用耐酸砖内衬。

10.4.3 当排放强腐蚀性烟气时，筒壁的防腐蚀措施应严格掌握，并将筒壁的腐蚀裕度增至 50mm。

10.4.4 单筒式钢筋混凝土烟囱，烟囱内的烟气压力宜符合下列规定：

- 1 烟囱高度小于或等于 100m 时，烟囱内部烟气压力可不予限制。
- 2 烟囱高度大于 100m 时，当排放弱腐蚀性烟气时，其最大烟气压力不宜超过 10mm 水柱；当排放中等腐蚀性烟气时，其最大烟气压力不宜超过 5mm 水柱。
- 3 当烟囱内部烟气压力超过上述规定时，可采取下列降低烟气压力的措施：
  - 1) 增大烟囱出口直径，降低烟气流速；
  - 2) 减小烟囱外表面坡度，减小内衬表面粗糙度；
  - 3) 在烟囱顶部做烟气扩散装置。

## 10.5 砖内筒的套筒式和多管式烟囱的防腐蚀设计

### 10.5.1 砖内筒自承重结构应符合下列规定:

- 1 在内筒满足强度、稳定和位移等条件下,套筒式和多管式烟囱宜优先采用独立自承重内筒结构,内筒与外筒之间可设置横向支撑。
- 2 内筒应采用耐酸砖(或其他耐酸砌块)和耐酸砂浆(或胶泥)砌筑。
- 3 砖内筒应配置环向钢筋,或在内筒外表面设置环向钢箍,以承受温度应力。当采用普通碳素钢环箍时,环箍表面应采取防腐保护。
- 4 砖内筒的烟气一般应处于负压状态运行。如出现正压情况,应在内筒内表面或外表面做封闭层,或在外筒和内筒之间,采用风机加压,使内筒外部的空气压力超过相应处烟气压力约 5mm 水柱左右。
- 5 必要时可在砖筒外表面做保温层,使烟气不在内筒内表面出现结露现象。

### 10.5.2 砖内筒分段支撑结构应符合下列规定:

- 1 当烟囱高度大于 100m,或采用砖内筒自承重结构,在技术上和经济上不合理时,可采用砖内筒分段支承结构。
- 2 砖内筒的防腐蚀要求,除按本规范 10.5.1 条 2~5 款的规定外,还应满足下列要求:
  - 1) 各分段接头处,应采用耐酸防腐材料连接,要求烟气不渗漏,有温度伸缩性(图 10.5.2)。
  - 2) 在满足砌体强度、稳定等情况下,尽可能采用轻质砌块。

3) 砖内筒支撑结构应进行防腐保护。

3 砖内筒采用分段支撑结构时, 砖内筒的烟气, 在运行过程中应处于负压状态。

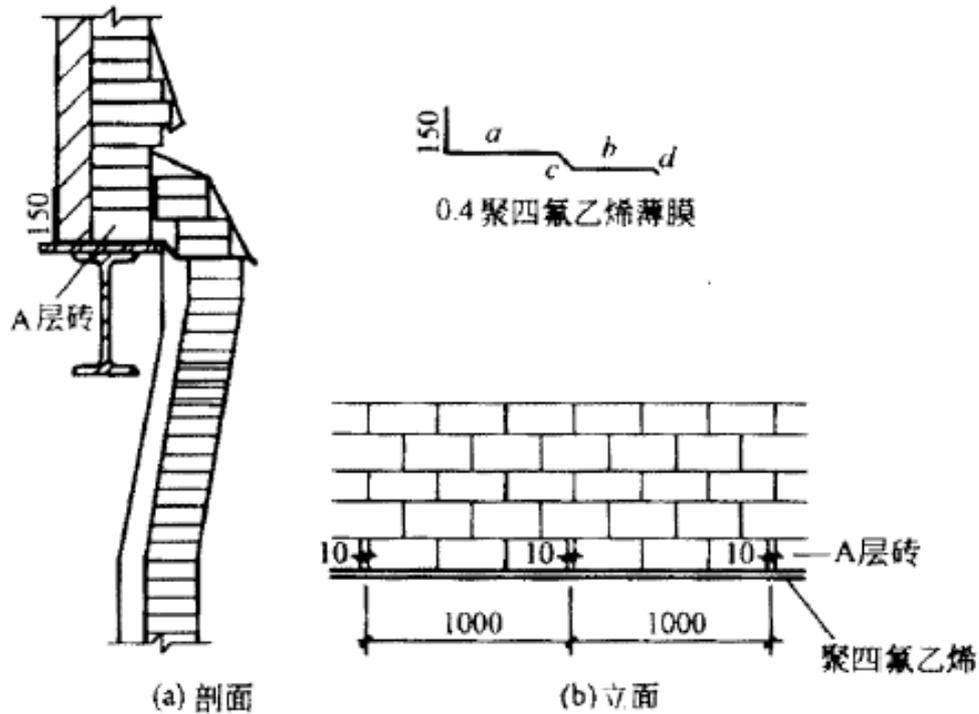


图 10.5.2 内筒接头构造(单位:mm)

## 10.6 钢内筒的套筒式和多管式烟囱的防腐蚀设计

10.6.1 钢内筒套筒式和多管式烟囱的防腐蚀设计, 应考虑下列因素:

- 1 烟囱内烟气的腐蚀性等级;
- 2 结构重要性;
- 3 烟囱运行方式(经常性或间隙性运行方式);
- 4 钢内筒钢板是否有烟气结露现象;
- 5 技术经济比较;

6 检修条件。

10.6.2 钢内筒的套筒式和多管式烟囱的防腐蚀结构型式（从外到内）有以下几种：

- 1 保温层 → 钢内筒 → 防腐涂料。
- 2 保温层 → 钢内筒 → 防腐厚涂料（厚 1~3mm）。
- 3 保温层 → 钢内筒 → 挂贴 1~2mm 厚防腐薄钢板。
- 4 保温层 → 钢内筒 → 防腐涂料 → 40~60mm 厚轻质耐酸混凝土。
- 5 保温层 → 钢内筒 → 防腐涂料 → 40~60mm 厚轻质耐酸混凝土 → 挂贴耐酸陶瓷板。

10.6.3 材料及结构构造应符合下列规定：

- 1 钢内筒一般采用普通钢板或耐硫酸露点腐蚀钢板。
- 2 钢内筒的筒首部分，一般采用不锈钢。
- 3 如采用普通钢板或耐硫酸露点腐蚀钢板做钢内筒，在钢内筒设计计算时，应留有 2~3mm 厚腐蚀厚度裕度。
- 4 钢内筒的外表面也应涂刷防护油漆。
- 5 钢内筒的外保温层一般应做两层，接缝应错开。
- 6 排放湿烟气的钢内筒，下部应设置用以汇集酸液的漏斗，并采取措施处理后进行排放。

## 10.7 钢烟囱的防腐蚀设计

10.7.1 高度不超过 100m 的钢烟囱可按下列要求进行防腐蚀设计：

- 1 当排放弱腐蚀性烟气时，筒壁材料可采用普通钢板。当排放中等

腐蚀性烟气和强腐蚀性烟气时，宜采用耐硫酸露点腐蚀钢板。

2 烟囱筒首部分，宜采用不锈钢板（高度为 1.5 倍左右烟囱出口直径）。

3 钢烟囱的内外表面应涂刷防护油漆。但当排放强腐蚀性烟气时，钢烟囱内表面宜改用厚 1~3mm 的防腐厚涂料。

4 钢烟囱宜做外保温层，并用铝皮包裹。

5 设计计算时，钢板厚度应留有 2~3mm 腐蚀厚度裕度。

10.7.2 高度超过 100m 的钢烟囱可参照本规范 10.6 节的有关规定，进行防腐蚀设计。

## 10.8 烟道结构的防腐蚀设计

10.8.1 烟道结构的防腐蚀设计可参照本章有关规定，进行防腐蚀设计。

## 11 烟囱基础

### 11.1 一般规定

11.1.1 烟囱地基基础的计算，除满足本规范的规定外，尚应符合国家标准《建筑地基基础设计规范》（GB 50007）的规定。在地震区还应符合国家标准《建筑抗震设计规范》（GB 50011）的规定。

11.1.2 本章仅给出基础的内力（ $M$ 、 $N$ 、 $V$ ）的计算公式，基础截面极限承载力计算和正常使用极限状态验算，应符合国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010）的有关规定。

11.1.3 对于有烟气通过的基础，材料强度应考虑温度作用的影响。

## 11.2 地基计算

11.2.1 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：

$$P_k = \frac{N_k + G_k}{a} \leq f_a \quad (11.2.1-1)$$

2 偏心荷载作用时除满足式（11.2.1-1）外，尚应符合下列要求：

1) 地基最大压力：

$$P_{k\max} = \frac{N_k + G_k}{a} + \frac{M_k}{W} \leq f_a \quad (11.2.1-2)$$

2) 地基最小压力:

板式基础

$$P_{k\min} = \frac{N_k + G_k}{a} - \frac{M_k}{W} \geq 0 \quad (11.2.1-3)$$

壳体基础

$$P_{k\min} = \frac{N_k}{A} - \frac{M_k}{W} \geq 0 \quad (11.2.1-4)$$

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的竖向力值 (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)；

$M_k$ ——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 (m<sup>3</sup>)；

$A$ ——基础底面面积 (m<sup>2</sup>)。

11.2.2 地基的沉降和基础倾斜，应按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007) 和本规范第 4.1.10 条的规定进行计算。

11.2.3 环形或圆形基础下的地基平均附加应力系数，可按本规范附录 C 采用。

### 11.3 刚性基础计算

11.3.1 刚性基础的外形尺寸 (图 11.3.1)，应按下列条件确定：

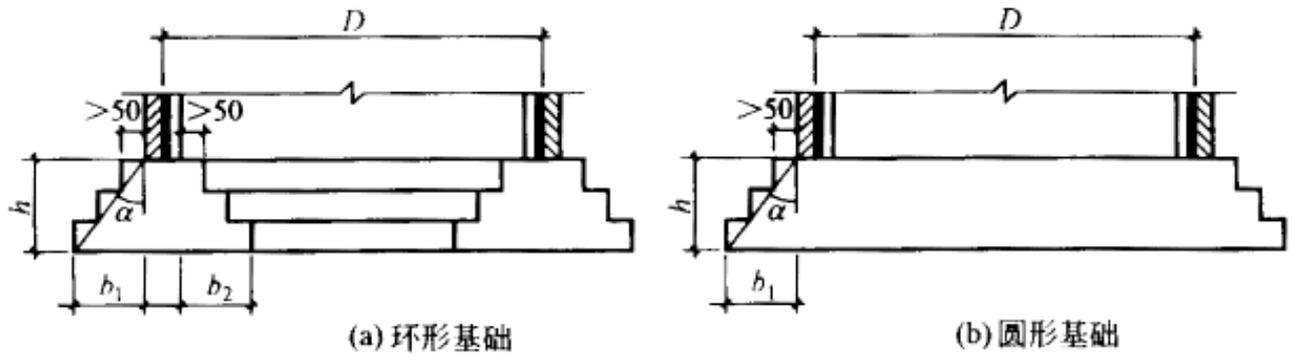


图 11.3.1 刚性基础(单位: mm)

1 当为环形基础时:

$$b_1 \leq 0.8 h t g \alpha \quad (11.3.1)$$

$$b_2 \leq h t g \alpha \quad (11.3.2)$$

2 当为圆形基础时:

$$b_1 \leq 0.8 h t g \alpha \quad (11.3.3)$$

$$h \geq \frac{D}{3 t g \alpha} \quad (11.3.4)$$

式中  $b_1$ 、 $b_2$ ——基础台阶悬挑尺寸 (m) ;

$h$ ——基础高度 (m) ;

$t g \alpha$ ——基础台阶宽高比, 按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007) 的规定采用;

$D$ ——基础顶面筒壁内直径 (m) 。

## 11.4 板式基础计算

11.4.1 板式基础外形尺寸 (图 11.4.1) 的确定, 宜符合下列规定:

1 当为环形基础时:

$$r_4 \approx \beta r_2 \quad (11.4.1-1)$$

$$h \geq \frac{r_1 - r_2}{2.2} \quad (11.4.1-2)$$

$$h \geq \frac{r_3 - r_4}{3.0} \quad (11.4.1-3)$$

$$h_1 \geq \frac{h}{2} \quad (11.4.1-4)$$

$$h_2 \geq \frac{h}{2} \quad (11.4.1-5)$$

2 当为圆形基础时:

$$\frac{r_1}{r_2} \approx 1.5 \quad (11.4.1-6)$$

$$h \geq \frac{r_1 - r_2}{2.2} \quad (11.4.1-7)$$

$$h \geq \frac{r_3}{4.0} \quad (11.4.1-8)$$

$$h_1 \geq \frac{h}{2} \quad (11.4.1-9)$$

式中  $\beta$ ——基础底板平面外形系数, 根据  $r_1$  与  $r_2$  的比值, 由图 11.4.11-2 查得;

$r_2$ ——环壁底截面中心处半径。  $r_2 = \frac{r_2 + r_3}{2}$ , 其余符号见图 11.4.1。

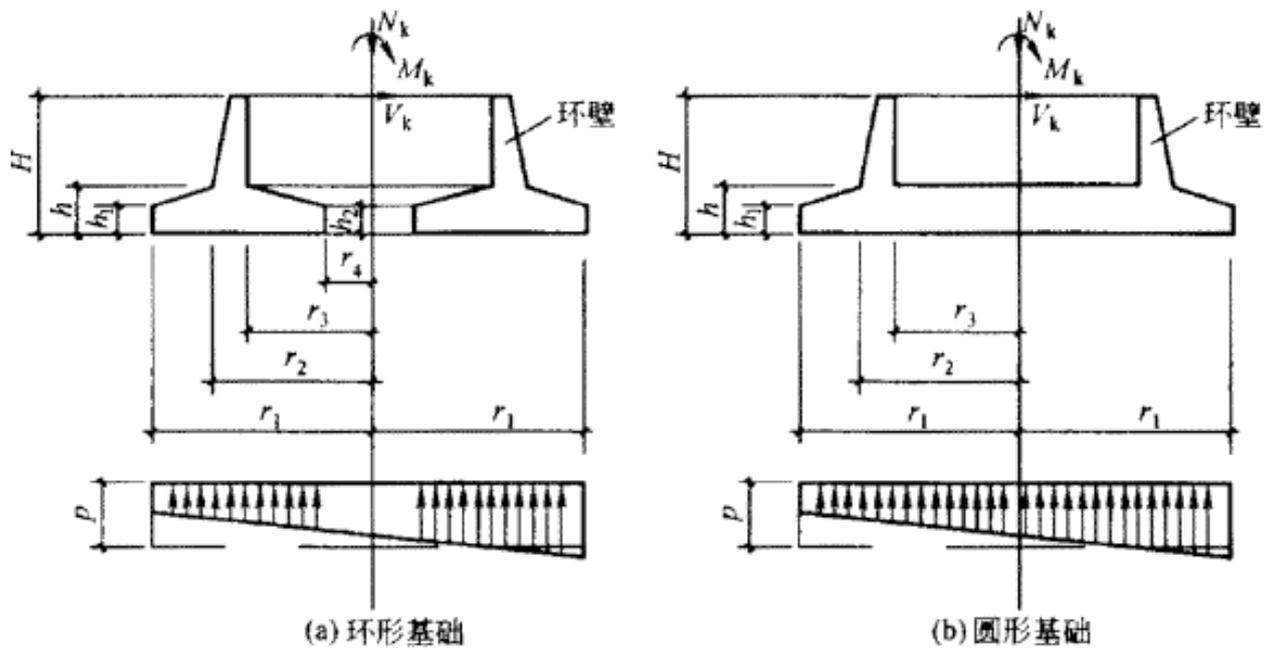


图 11.4.1 基础尺寸与底面压力计算

11.4.2 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 11.4.1），其值应按下列式计算。

$$P = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I} \times \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (11.4.2)$$

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（m<sup>2</sup>）；

$I$ ——基础底面惯性矩（m<sup>4</sup>）。

11.4.3 在环壁与底板交接处的冲切强度可按下列式计算（图 11.4.4）：

$$F_l \leq \beta_h f_t (b_t + b_b) h_0 \quad (11.4.3)$$

式中  $F_l$ ——冲切破坏体以外的荷载设计值 (kN)，按本规范 11.4.4 条计算；

$f_t$ ——混凝土在温度作用下的抗拉强度设计值 (kN/m<sup>2</sup>)；

$b_b$ ——冲切破坏锥体斜截面的下边圆周长 (m)，

验算环壁外边缘时， $b_b = 2\pi(r_2 + h_0)$ ；

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)；

验算环壁外边缘时， $b_t = 2\pi r_2$

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)；

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

$h$  大于等于 2000mm 时， $\beta_h$  取 0.9，其间按线性内插法取用。

11.4.4 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：

$$F_l = p\pi[r_1^2 - (r_2 + h_0)^2] \quad (11.4.4-1)$$

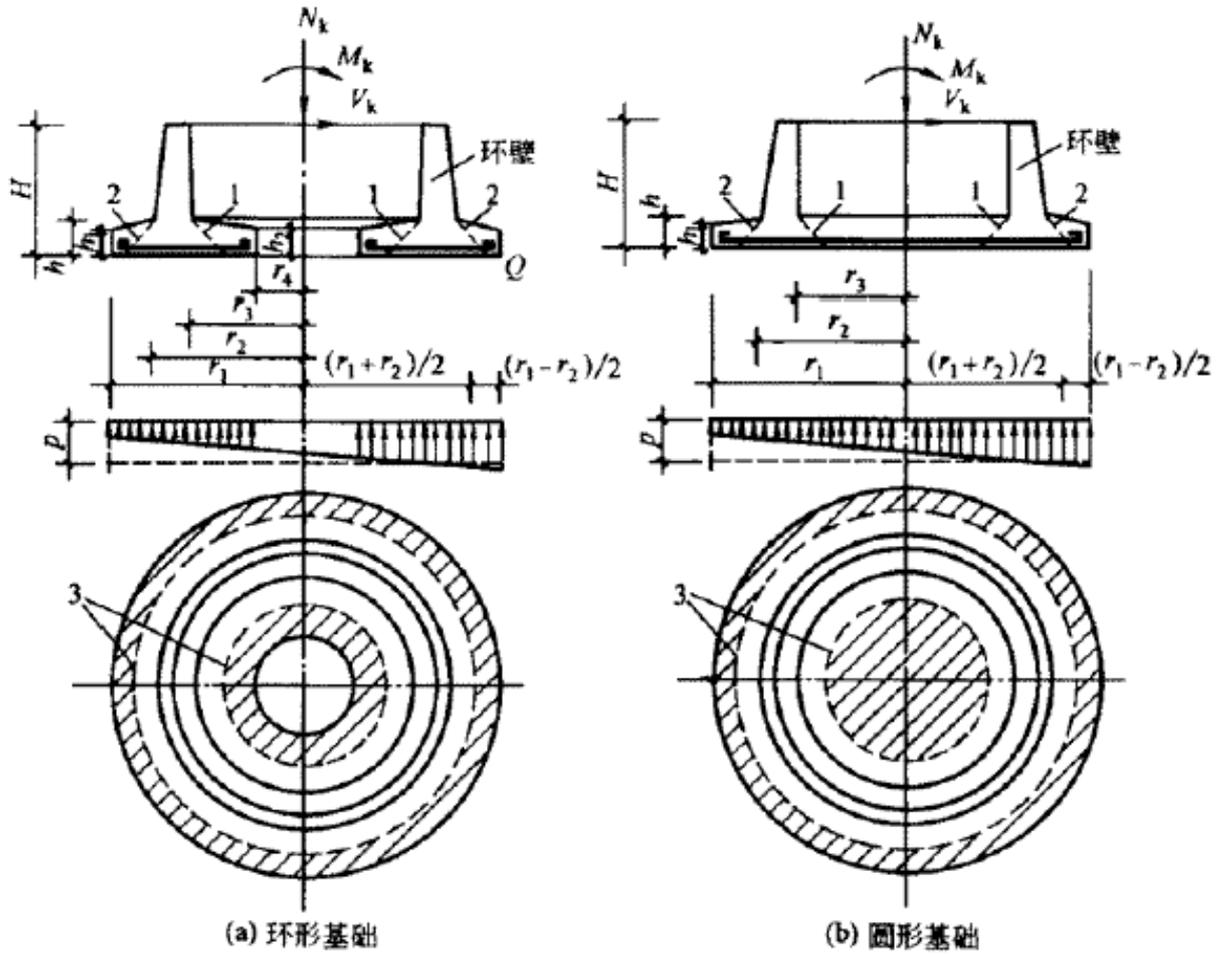
2 计算环壁内边缘时：

1) 环形基础

$$F_l = p\pi[(r_2 - h_0)^2 - r_4^2] \quad (11.4.4-2)$$

2) 圆形基础

$$F_l = p\pi(r_3 - h_0)^2 \quad (11.4.4-3)$$



(a) 环形基础

(b) 圆形基础

图 11.4.4 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

11.4.5 环形基础底板下部和底板内悬挑上部均采用径、环向配筋时，确定底板配筋用的弯矩设计值可按下列公式计算：

1 底板下部半径  $r_2$  处单位弧长的径向弯矩设计值：

$$M_R = \frac{P}{3(r_1 + r_2)}(2r_1^2 r_2 + r_2^3) \quad (11.4.5-1)$$

2 底板下部单位宽度的环向弯矩设计值:

$$M_\theta = \frac{M_R}{2} \quad (11.4.5-2)$$

3 底板内悬挑上部单位宽度的环向弯矩设计值:

$$M_{\theta T} = \frac{Pr_2}{6(r_2 - r_4)} \left( \frac{2r_4^3 - 3r_4^2 r_2 + r_2^3}{r_2} - \frac{4r_1^3 - 6r_1^2 r_2 + 2r_2^3}{r_1 + r_2} \right) \quad (11.4.5-3)$$

式中几何尺寸意义见图 11.4.4。

11.4.6 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 当  $r_1/r_2 \leq 1.8$  时，底板下部径向弯矩和环向弯矩设计值，分别按本规范式 (11.4.5-1) 和式 (11.4.5-2) 进行计算。

2 当  $r_1/r_2 > 1.8$  时，底板下部的径向和环向弯矩设计值，分别按下列公式计算:

$$M_R = \frac{P}{12r_2} (2r_2^3 + 3r_1^2 r_3 + r_1^2 r_2 - 3r_1 r_2^2 - 3r_1 r_2 r_3) \quad (11.4.6-1)$$

$$M_\theta = \frac{P}{12} (4r_1^2 - 3r_1 r_2 - 3r_1 r_3) \quad (11.4.6-2)$$

3 环壁以内底板上部两个正交方向单位宽度的弯矩设计值均为:

$$M_T = \frac{P}{6} \left( r_2^2 - \frac{4r_1^3 - 6r_1^2 r_2 + 2r_2^3}{r_1 + r_2} \right) \quad (11.4.6-3)$$

式中几何尺寸意义见图 11.4.4。

注：当  $r_1/r_2 > 1.8$  时，基础外形不合理，一般不采用。

11.4.7 圆形基础底板下部和环壁以内底板上部均采用等面积方格网配筋时，确定底板配筋用的弯矩设计值，可按下列公式计算：

1 底板下部在两个正交方向单位宽度的弯矩为：

$$M_B = \frac{P}{6r_1} (2r_1^3 - 3r_1^2 r_2 + r_2^3) \quad (11.4.7-1)$$

2 环壁以内底板上部在两个正交方向单位宽度的弯矩均为：

$$M_T = \frac{P}{6} \left( r_2^2 - 2r_1^2 + 3r_1 r_2 - \frac{r_2^3}{r_1} \right) \quad (11.4.7-2)$$

11.4.8 当按本规范公式 (11.4.5-3)、(11.4.6-3) 或 (11.4.7-2) 计算所得的弯矩 ( $M_{sr}$  或  $M_T$ ) 不大于 0 时，环壁以内底板上部一般不配置钢筋。但当  $p_{k\min} - \frac{G_k}{A} \leq 0$ ，或基础有烟气通过且烟气温度较高时，应按构造配筋。

11.4.9 环形和圆形基础底板外悬挑上部一般不配置钢筋，但当地基

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，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。

$$q = \frac{M_s r_1}{I} - \frac{N}{A} \quad (11.4.9)$$

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

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。

11.4.11 圆形基础底板下部不需配筋范围半径  $r_d$  (图 11.4.11-1)，应按下列公式计算。

径、环向配筋时：

$$r_d \leq \beta_0 r_z - 35d \quad (11.4.11-1)$$

等面积方格网配置时:

$$r_d \leq r_3 + r_2 - r_1 - 35d \quad (11.4.11-2)$$

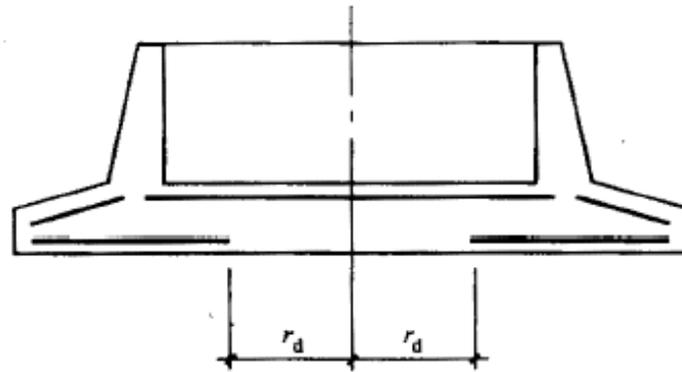


图 11.4.11-1 不需配筋范围  $r_d$

式中  $\beta_0$ ——底板下部钢筋理论切断系数, 按  $r_1/r_z$  由图 11.4.11-2 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)。

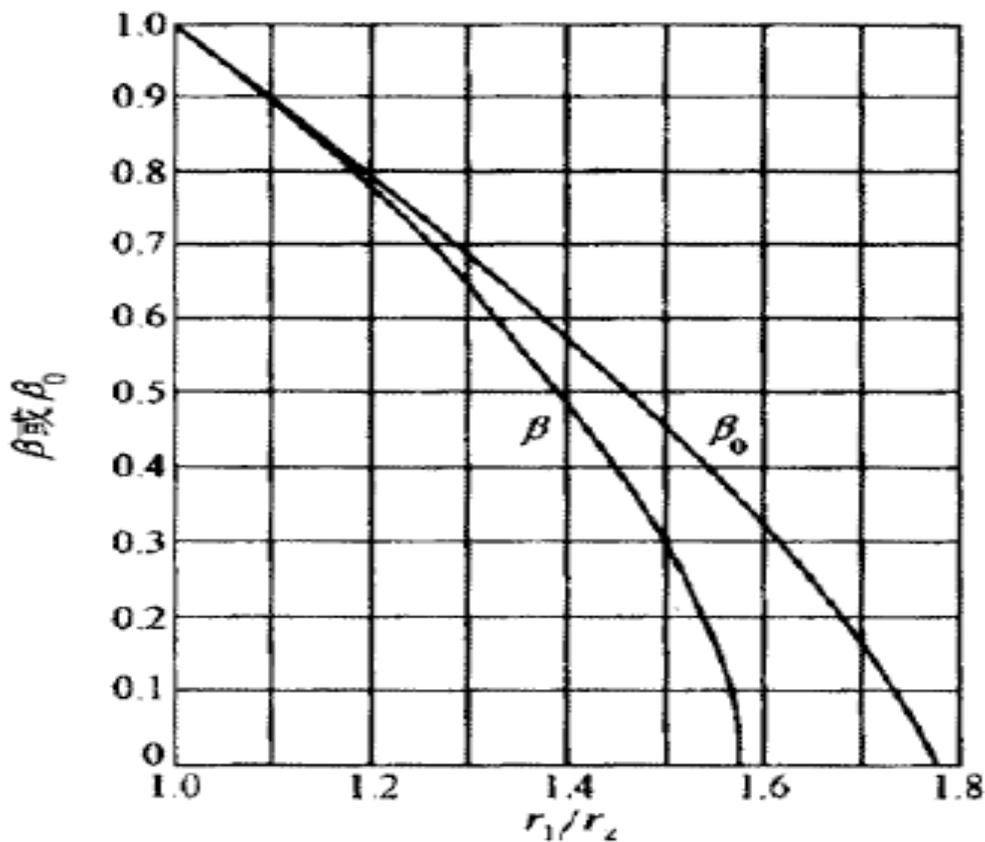


图 11.4.11-2  $\beta$  与  $\beta_0$  系数

11.4.12 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，按本规范公式（5.6.5）进行计算。计算时环壁外侧的计算土层厚度（图 11.4.12）可按下列式计算：

$$H_1 = 0.505H - 0.325 + 0.050DH \quad (11.4.12)$$

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 11.4.12 所示。

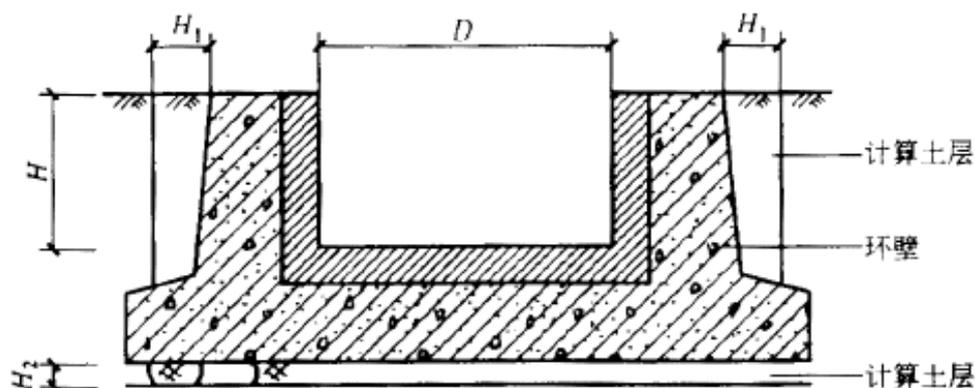


图 11.4.12 计算土层厚度示意

2 基础底板的受热温度，可采用地温代替本规范公式（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 11.4.12）和地温可按下列规定采用：

1) 计算底板最高受热温度时  $H_2 = 0.3\text{m}$ ，地温取  $15^\circ\text{C}$ ；

2) 计算底板温度差时  $H_2 = 0.2\text{m}$ ，地温取  $10^\circ\text{C}$ 。

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。

11.4.13 计算基础底板配筋时，应根据最高受热温度，采用本规范第 3.2 节及第 3.3 节规定的混凝土和钢筋在温度作用下的强度设计值。

11.4.14 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，宜增加 15% 的配筋。

### 11.5 壳体基础计算

11.5.1 壳体基础的外形尺寸（图 11.5.1）应按下列规定确定：

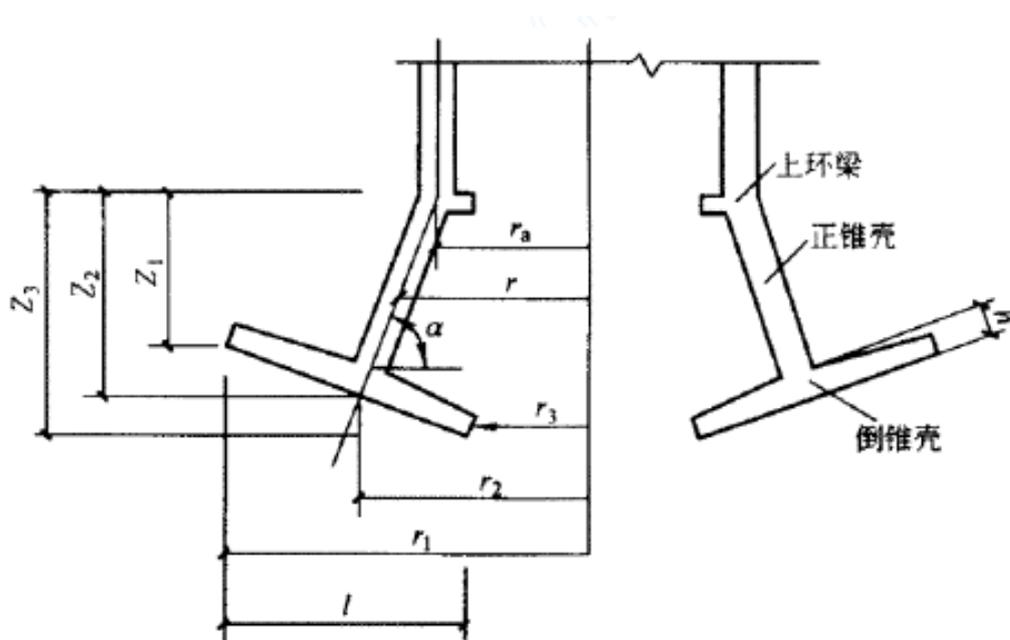


图 11.5.1 正倒锥组合壳基础

1 倒锥壳（下壳）的控制尺寸  $r_2$  应按下列公式确定：

$$p_{k \max} / p_{k \min} = \frac{N_k + G_k}{2r_2} \pm \frac{M_k}{\pi r_2^2} \quad (11.5.1-1)$$

$$\frac{p_{k \max}}{p_{k \min}} \leq 3 \quad (11.5.1-2)$$

式中  $G_k$ ——基础自重标准值和至埋深  $Z_2$  处的土重标准值之和 (kN)；

$\frac{p_{k \max}}{p_{k \min}}$ ——分别为下壳经向长度内，沿环向 ( $r_2$  处) 单位长度范围内，在水平

投影面上的最大和最小地基反力标准值 (kN/m)。

2 下壳经向水平投影宽度之可按下列公式确定：

$$l = \frac{p_k}{f_a} \quad (11.5.1-3)$$

$$p_k = \frac{(N_k + G_k)(1 + \cos \theta_0)}{2r_2(\pi + \theta_0 \cos \theta_0 - \sin \theta_0)} \quad (11.5.1-4)$$

式中  $p_k$ ——在荷载标准值作用下，下壳经向水平投影宽度  $l$  和沿半径为  $r_2$  的环向单位弧长范围内产生的总地基反力标准值 (kN/m)；

$\theta_0$ ——地基塑性区对应的方位角，可根据  $e/r_2$  查表 11.5.1， $e = M_k / (N_k + G_k)$

表 11.5.1

 $\theta_0$  与  $e/r_2$  的对应值

$e/r_2$	$\theta_0$	$e/r_2$	$\theta_0$	$e/r_2$	$\theta_0$
0	3.1416	0.13	2.5813	0.26	2.0528
0.01	3.0934	0.14	2.5407	0.27	2.0109
0.02	3.0488	0.15	2.5002	0.28	1.9685
0.03	3.0039	0.16	2.4598	0.29	1.9256
0.04	2.9596	0.17	2.4195	0.30	1.8821
0.05	2.9159	0.18	2.3792	0.31	1.8380
0.06	2.8727	0.191	2.3389	0.32	1.7932
0.07	2.8299	0.20	2.2985	0.33	1.7476
0.08	2.7877	0.21	2.2581	0.34	1.7010
0.09	2.7458	0.22	2.2175	0.35	1.6534
0.10	2.7043	0.23	2.1767	0.36	1.6045
0.11	2.6630	0.24	2.1357	0.37	1.5542
0.12	2.6620	0.25	2.0944	0.38	1.5024
0.39	1.4486	0.43	1.2067	0.47	0.8746
0.40	1.3927	0.44	1.1361	0.48	0.7545

0.41	1.3341	0.45	1.0591	0.49	0.5898
0.42	1.2723	0.46	0.9733	0.50	0

3 下壳内、外半径  $r_3$ 、 $r_1$  可按下列公式确定：

$$r_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{3} r_2 - l \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( l - \frac{2}{3} r_2 \right)^2 + \frac{1}{3} (r_2^2 + r_2 l - l^2)} \quad (11.5.1-5)$$

$$r_1 = r_3 + l \quad (11.5.1-6)$$

4 下壳与上壳（正锥壳）相交边缘处的下壳有效厚度  $h$  可按下列公式确定：

$$h \geq \frac{2.2 Q_c}{0.75 f_t} \quad (11.5.1-7)$$

$$Q_c = \frac{1}{2} p_k \frac{1}{\sin \alpha} \quad (11.5.1-8)$$

式中  $Q_c$ ——下壳最大剪力 (N)，计算时不计下壳自重；

$f$ ——混凝土的抗拉强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)。

11.5.2 正倒锥组合壳体基础的计算可按下列原则进行：

- 1 正锥壳（上壳）可按无矩理论计算。
- 2 倒锥壳（下壳）可按极限平衡理论计算。

11.5.3 正锥壳的经、环向薄膜内力，可按下列公式计算：

$$N_a = -\frac{N_l}{2\pi \sin \alpha} - \frac{M_l + H_l(r - r_a) \operatorname{tg} \alpha}{\pi \cdot^2 \sin \alpha} \quad (11.5.3-1)$$

$$N_\theta = 0 \quad (11.5.3-2)$$

式中  $N_l$ 、 $M_l$ ——分别为壳上边缘处总的垂直力 (kN) 和弯矩设计值 (kN·m)；  
 $N_a$ 、 $N_\theta$ ——分别为壳体计算截面处单位长度的经向、环向薄膜力 (kN)；  
 $H_l$ ——作用于壳体上边缘的水平剪力设计值 (kN)；  
 $r_a$ 、 $r$ ——分别为壳体上边缘及计算截面的水平半径 (m) (图 11.5.1)；  
 $\alpha$ ——壳面与水平面的夹角 (度) (图 11.5.1)。

11.5.4 倒锥壳的计算，可按下列步骤进行：

1 倒锥壳水平投影面上的最大土反力  $q_{\max}$ ，可按下列公式进行计算 (图 11.5.4-1)：

$$q_{y\max} = \frac{2(p_k - Q_0 \frac{r_1}{r_2})}{r_1 - r_3} \quad (11.5.4-1)$$

$$Q_0 = H_0 \tan \varphi_0 + c_0 (z_3 - z_1) \quad (11.5.4-2)$$

$$H_0 = 0.25 \gamma_0 (z_3^2 - z_1^2) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{1}{2} \varphi_0 + 45^\circ \right) \quad (11.5.4-3)$$

式中  $q_{y\max}$  ——倒锥壳水平投影面上的最大土反力 ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )；

$\varphi_0$  ——土的计算内摩擦角 (度)；可取  $\varphi_0 = \frac{1}{2} \varphi$ ， $\varphi$  为土的实际内摩擦角；

$c_0$  ——土的计算粘聚力  $c_0 = \frac{1}{2} c$ ， $c$  为土的实际粘聚力；

$\gamma_0$  ——土的重力密度 ( $\text{kN}/\text{mm}^3$ )；

$H_0$  ——作用在  $bc$  面上总的被动土压力 ( $\text{kN}$ )；

$Q_0$  ——作用在  $bc$  面上总的剪切力 ( $\text{kN}$ )。

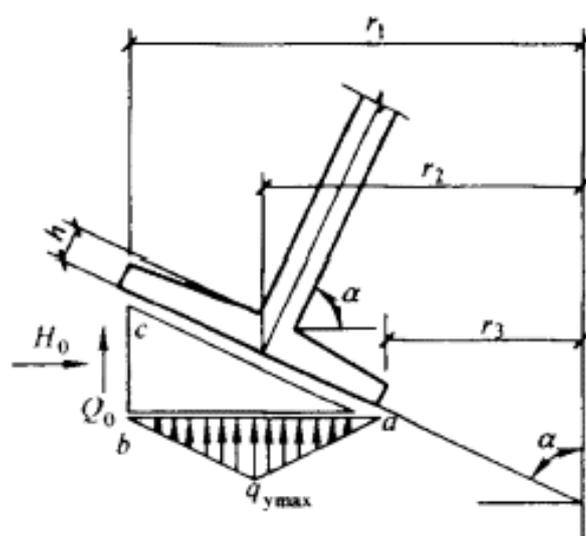


图 11.5.4-1 倒锥壳土反力

2 计算壳体特征系数  $C_s$ ：

$$C_s = \frac{r_1 - r_3}{2h \sin \alpha} \quad (11.5.4-4)$$

式中  $h$  ——为倒锥壳与正锥壳相交处倒锥壳的厚度 (m)。

当  $C_s < 2$  时为短壳，否则为长壳。

3 倒锥壳内力（图 11.5.4-2）可按下列公式计算：

1) 当为短壳时：

环向拉力  $N_{\theta}$

$$N_{\theta} = \frac{1}{6}(B_2 q_{y\max} + B_3 H + B_5)(x_1 - x_3)(x_1 + x_2 + x_3)$$

其中：

$$H = 0.5\gamma_0 z_2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{1}{2}\varphi_0 + 45^\circ\right)$$

经向弯矩：

$$M_{a1} = \frac{1}{x_2' W_1}(B_0 q_{y\max} + B_1 H + B_4)$$

$$M_{a2} = \frac{1}{x_2'' W_2}(B_0 q_{y\max} + B_1 H + B_4)$$

采用  $M_{a1}$  与  $M_{a2}$  中较大者进行配筋计算。

其中：

$$W_1 = \frac{12(x_1 - x_2)}{(x_1^2 - x_2'^2)(x_1 - x_2')^2} \quad (11.5.4-9)$$

$$W_2 = \frac{12(x_2 - x_3)}{(x_2''^2 - x_3^2)(x_2'' - x_3)^2} \quad (11.5.4-10)$$

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \sin^2 \alpha + \operatorname{tg} \varphi_0 \sin \alpha \cos \alpha \\ B_1 &= \cos^2 \alpha + \operatorname{tg} \varphi_0 \sin \alpha \cos \alpha \\ B_2 &= \sin \alpha \cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi_0 \sin^2 \alpha \\ B_3 &= \operatorname{tg} \varphi_0 \cos^2 \alpha - \sin \alpha \cos \alpha \\ B_4 &= c_0 \sin 2\alpha \\ B_5 &= c_0 \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (11.5.4-11)$$

式中有关符号见图 11.5.4-2

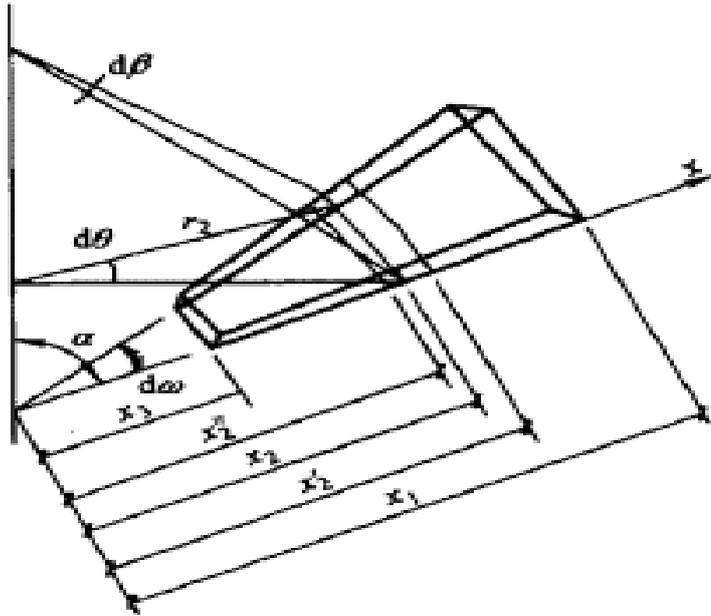


图 11.5.4-2 几何尺寸

2) 当为长壳时:

环向拉力:

$$N_{\theta 1} = N_{\theta} (C_s - 1) \quad (11.5.4-12)$$

其中  $N_{\theta}$  按公式 (11.5.4-5) 计算。

经向弯矩:

$$M_{a1} = \frac{1}{x_2'} \left\{ \frac{1}{W_1} [q_{y \max} (B_0 + W_1 W_3 B_2) + HB_1 + B_4 + W_1 W_3 (HB_3 + B_5)] - \frac{1}{2} N_{\theta} (C_s - 1) k_0 (x_1 - x_2') \operatorname{ctg} \alpha \right\} \quad (11.5.4-13)$$

$$M_{a2} = \frac{1}{x_2''} \left\{ \frac{1}{W_2} [q_{y \max} (B_0 + W_2 W_4 B_2) + HB_1 + B_4 + W_2 W_4 (HB_3 + B_5)] - \frac{1}{2} N_{\theta} (C_s - 1) k_0 (x_2'' - x_3) \operatorname{ctg} \alpha \right\} \quad (11.5.4-14)$$

采用  $M_{a1}$  与  $M_{a2}$  中较大者进行配筋计算。

其中:

$$W_3 = \frac{1}{6} (x_1^2 + x_1 x_2 - 2x_2^2) k_0 (x_1 - x_2') \operatorname{ctg} \alpha \quad (11.5.4-15)$$

$$W_4 = \frac{1}{6} (x_2^2 - x_2 x_3 - x_3^2) k_1 (x_2'' - x_3) \operatorname{ctg} \alpha \quad (11.5.4-16)$$

式中  $k_0$  与  $k_1$  按式 (11.5.4-17)、(11.5.4-18) 确定 (图 11.5.4-3)。

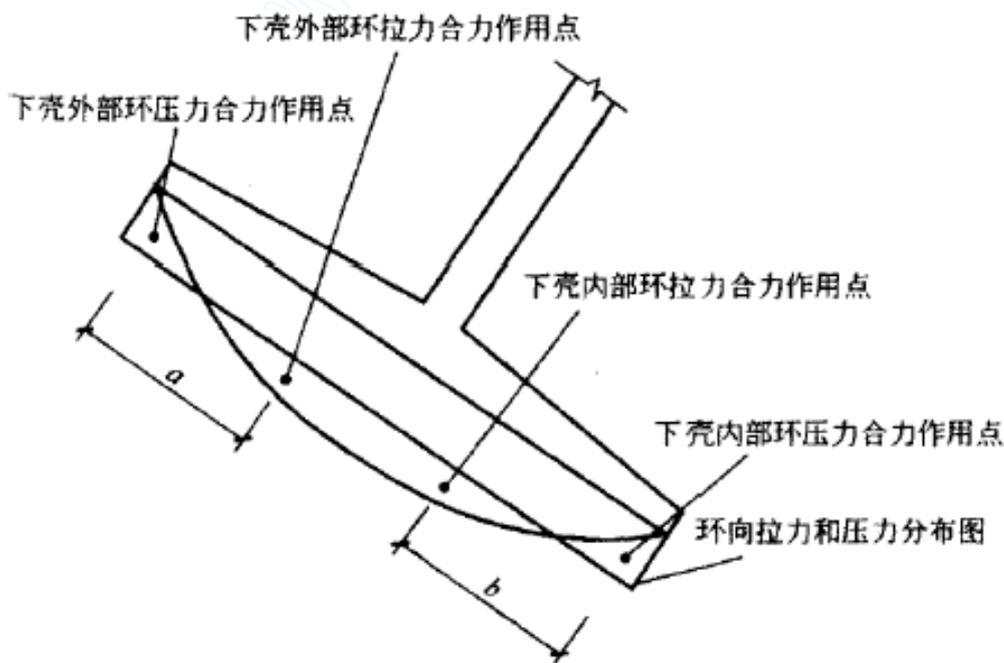


图 11.5.4-3 长壳环向压、拉力分布

$$k_0 = \frac{a}{x_1 - x'_2} \quad (11.5.4-17)$$

$$k_1 = \frac{b}{x''_2 - x_3} \quad (11.5.4-18)$$

式中  $a$ 、 $b$ ——分别为下壳外部和内部环向拉、压合力作用点间的距离。

11.5.5 组合壳上环梁的内力可按下式计算（图 11.5.5）：

$$N_{\theta M} = r_e N_{aa3} \cos \alpha \quad (11.5.5-1)$$

$$M_a = -N_{ab1} e_1 - N_{aa3} e_3 \quad (11.5.5-2)$$

$$M_\theta = M_a r_e \quad (11.5.5-3)$$

式中  $N_{\theta M}$ ——环梁的环向力 (kN) (以受拉为正)；

$M_a$ ——环梁单位长度上的扭矩 (kN·m) (围绕环梁截面重心以顺时针方向转动为正)；

$M_\theta$ ——环梁的环向弯矩 (kN·m) (以下表面受拉为正)；

$N_{aa1}$ 、 $N_{ab1}$ ——分别为第  $i$  个 ( $i=1$  代表烟囱筒壁； $i=3$  代表基础的正锥壳) 壳体小径边缘和大径边缘处单位长度上的薄膜经向力 (kN) (以受拉为正)；

$r_e$ ——环梁截面重心处的半径 (m)；

$e_1$ 、 $e_3$ ——分别为壳体 ( $i=1, 3$ ) 的薄膜经向力至环梁截面重心的距离 (m)

(图 11.5.5)。

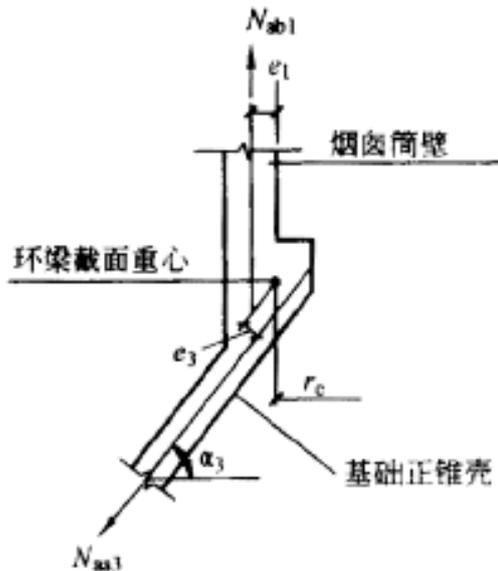


图 11.5.5 上环梁受力

11.5.6 组合壳体基础底部构件的冲切强度，可按本规范第 11.4.2 至第 11.4.4 条的有关规定计算。此时，冲切破坏锥体斜截面的下边

圆周长  $S_x$  和冲切破坏锥体以外的荷载  $Q_c$  (图 11.5.6), 应按下列公式计算:

1 验算外边缘时:

$$S_x = 2\pi[r_2 + h_0(\sin\alpha + \cos\alpha)] \quad (11.5.6-1)$$

$$Q_c = p\pi\{r_1^2 - [r_2 + h_0(\sin\alpha + \cos\alpha)]^2\} \quad (11.5.6-2)$$

2 验算内边缘时:

$$S_x = 2\pi[r_3 - h_0(\sin\alpha - \cos\alpha)] \quad (11.5.6-3)$$

$$Q_c = p\pi\{[r_3 - h_0(\sin\alpha - \cos\alpha)]^2 - r_4^2\} \quad (11.5.6-4)$$

式中  $h_0$ ——计算截面的有效高度 (m)。

其他符号见图 11.5.6。

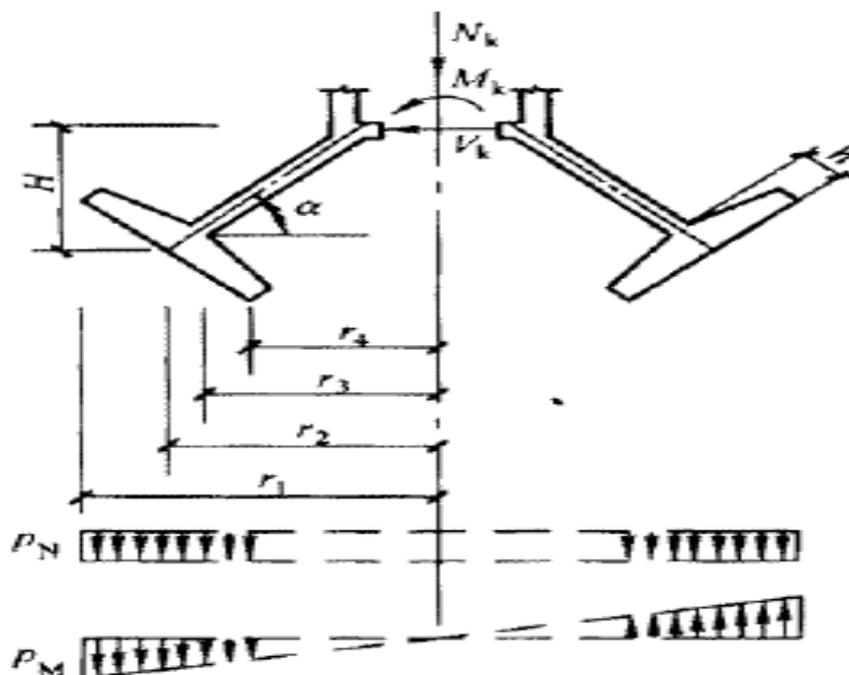


图 11.5.6 正倒锥组合壳

注: 本图所示半径  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$  与 11.4.4 条符号相对应

## 11.6 基础构造

11.6.1 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。

注：当为壳基础时，宜采用地面烟道或架空烟道。

11.6.2 基础的底面应设混凝土垫层，厚度宜采用 100mm。

11.6.3 设置地下烟道入口的基础，宜设贮灰槽，槽底面应较烟道底面低 250 ~ 500mm。

11.6.4 设置地下烟道入口的基础，当烟气温度较高，采用普通混凝土不能满足本规范第 4.3.1 条规定时，宜将烟气入口提高至基础顶面以上。

11.6.5 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。

11.6.6 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。环壁高出地面不宜小于 400mm。

11.6.7 板式基础的配筋最小直径和最大间距应符合表 11.6.7 的规定。

表 11.6.7 板式基础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		10	200
底板下部	径环向配筋	径向	10	$r_2$ 处 250, 外边缘 400
		环向	10	
	方格网配筋		10	

11.6.8 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 11.6.8 的规定。

表 11.6.8 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	10	径向 250 环 250
圆形基础	方格网配筋	10	250

11.6.9 基础环壁设有孔洞时, 应符合本规范第 7.5.3 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。

11.6.10 壳体基础可按图 11.6.10 及表 11.6.10 所示外形尺寸进行设计。壳体厚度不应小于 300mm。壳体基础与筒壁相接处, 应设置环梁。

表 11.6.10 壳体基础外形尺寸

基础形式	t	b	c
正倒锥组合壳	$(0.035 \sim 0.06) r$	$(0.35 \sim 0.55) r$	$(0.05 \sim 0.065) r$

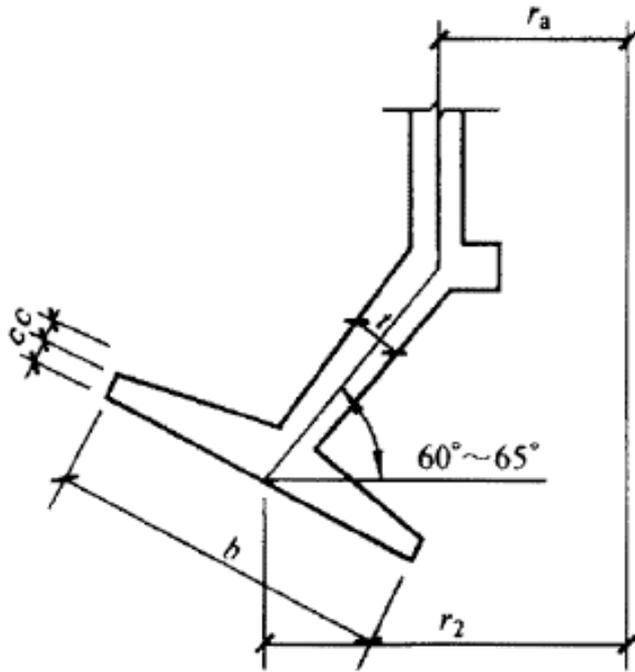


图 11.6.10 壳体基础外形

11.6.11 壳体上不宜设孔洞，如需设置孔洞时，孔洞边缘距壳体上下边距离不宜小于 1m，孔洞周围应按本规范第 7.5.3 条规定配置补强钢筋。

11.6.12 壳体基础应配双层钢筋，其直径不小于 12mm，间距不大于 200mm。受力钢筋接头应采用焊接。当钢筋直径小于 14mm 时，亦可采用搭接，搭接长度不应小于 40d，接头位置应相互错开。壳体最小配筋率（径向和环向）均不应小于 0.4%。上壳上下边缘附近构造环向钢筋应适当加强。

11.6.13 基础钢筋保护层应不小于 40mm；当无垫层时，不应小于 70mm。

11.6.14 壳体基础不宜留施工缝，如施工有困难时，应注意对施工缝的处理。

## 12 烟道

### 12.1 一般规定

12.1.1 烟道可分为以下三种类型：

- 1 地下烟道；
- 2 地面烟道；
- 3 架空烟道。

12.1.2 烟道的材料选择，宜符合下列规定：

1 下列情况地下烟道宜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。

2 除上述情况外，地下烟道及地面烟道可采用砖砌烟道。

3 架空烟道宜采用钢筋混凝土结构，也可采用钢烟道。

12.1.3 烟道的结构型式宜按下列规定采用：

1 砖砌烟道的顶部宜做成半圆拱。

2 钢筋混凝土烟道宜做成箱形封闭框架，也可做成槽形，顶盖为预制板。

3 钢烟道宜设计成圆筒形或矩形。

12.1.4 烟道应进行下列计算：

- 1 最高受热温度计算。计算出的最高受热温度，应小于或等于材料的允许受热温度。
- 2 结构承载能力极限状态计算。对钢筋混凝土架空烟道还应验算烟道沿纵向弯曲产生的挠度和裂缝宽度。

12.1.5 当为地下烟道时，烟道应与厂房柱基础、设备基础、电缆沟等保持一定距离，一般可按表 12.1.5 确定。

表 12.1.5 地下烟道与地下构筑物边缘最小距离

烟气温度 (℃)	< 200	200-400	401-600	601-800
距离 (m)	≥ 0.1	≥ 0.2	≥ 0.4	≥ 0.5

## 12.2 烟道的计算和构造

12.2.1 地下烟道的最高受热温度计算，应考虑周围土壤的热阻作用，计算土层厚度（图 12.2.1）可按下列公式计算：

1 计算烟道侧墙时：

$$h_1 = 0.505H - 0.325 + 0.050bH \quad (12.2.1-1)$$

2 计算烟道底板时：

$$h_2 = 0.3\text{m}, \text{地温取 } 15^\circ\text{C} \quad (12.2.1-2)$$

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 12.2.1)；

$h_1$ ——烟道侧面计算土层厚度 (m)；

$h_2$ ——烟道底面计算土层厚度 (m)。

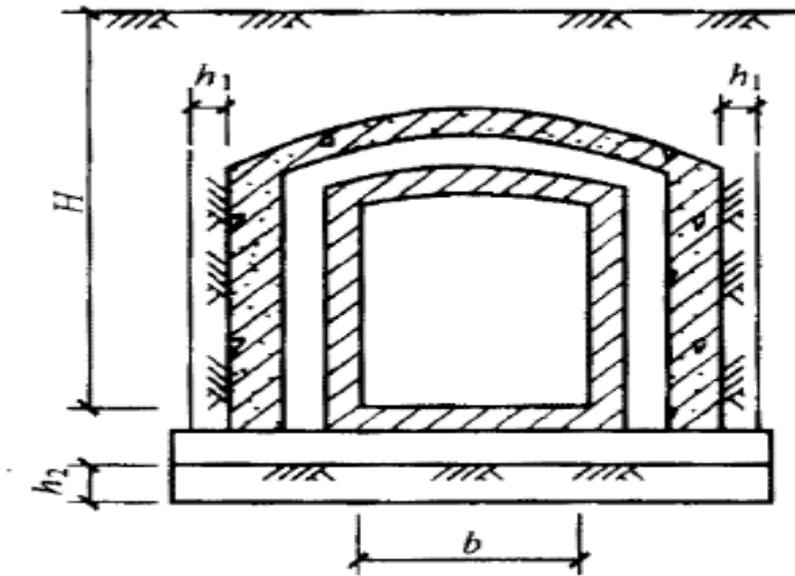


图 12.2.1 计算土层厚度示意

确定计算上层厚度后，可按本规范公式 (5.6.5)，采用平壁法计算烟道受热温度，其计算原则与本规范 11.4.12 条相同。计算受热温度应满足材料受热温度允许值。对材料强度应考虑温度作用的影响。

12.2.2 地面荷载应根据实际情况确定，但不得小于  $10\text{kN/m}^2$ 。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  $30\text{kN/m}^2$  荷载进行计算。

12.2.3 地下烟道在计算时应考虑侧墙两侧无土、一侧无土和两侧有土等各种荷载情况。

12.2.4 地下砖砌烟道(图 12.2.4)的承载能力计算应符合下列规定:

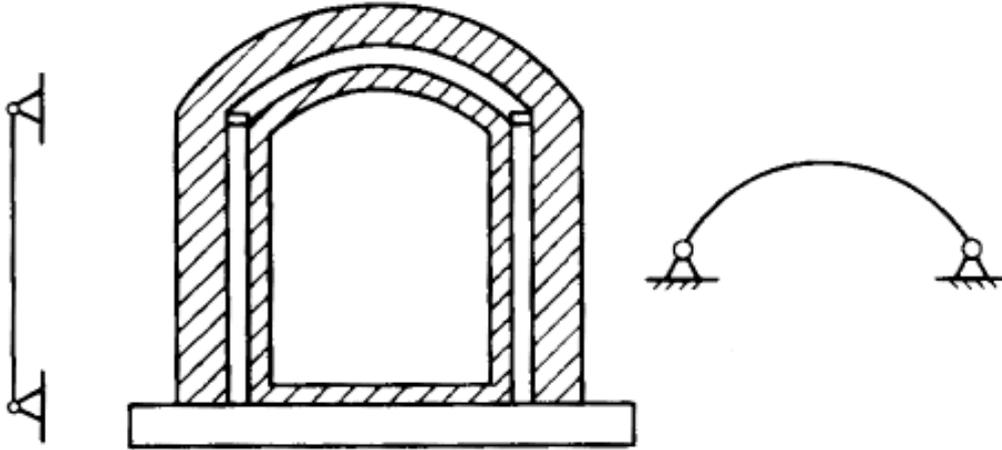


图 12.2.4 砖烟道型式

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)下端铰接,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,下端固接,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。

3) 砖砌地下烟道不允许出现一侧有土另一侧无土的情况。

2 砖砌烟道的顶拱按双铰拱计算。其荷载组合应考虑拱上无土、拱上有土、拱上有地面荷载(并考虑最不利分布)等几种情况。

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  $45^\circ$  角扩散。

12.2.5 钢筋混凝土地下烟道应按下列规定进行计算:

1 槽形地下烟道的顶盖、侧墙和底板可按下列规定计算(图

12.2.5a):

1) 预制顶板按两端简支板计算;

2) 侧墙和底板按上部有盖板和无盖板两种情况计算。

当上部有盖板时,上支点可按铰接考虑。

当上部无盖板时,侧墙按悬臂计算。

2 封闭箱形地下烟道(图 12.2.5b)按封闭框架计算。

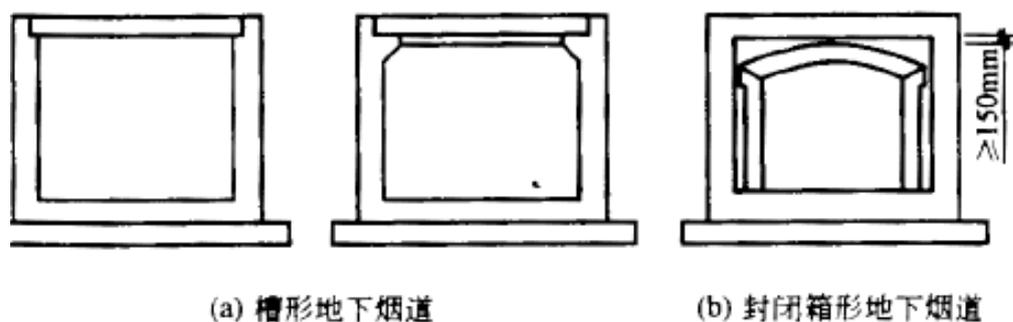


图 12.2.5 钢筋混凝土烟道

12.2.6 地面砖烟道(图 12.2.6)的承载能力可按下端固接的拱形框架进行计算。

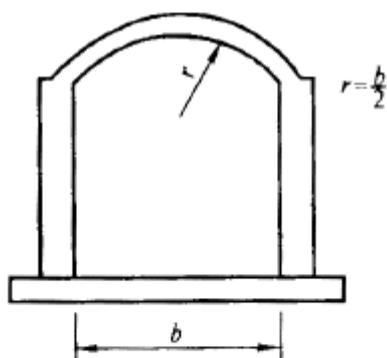


图 12.2.6 地面砖烟道

12.2.7 架空烟道计算应符合下列规定:

- 1 架空烟道应考虑以下几种荷载: 自重荷载、风荷载、底板积灰荷载和烟气压力。在地震区尚应考虑地震作用。
- 2 发电厂的架空烟道底板积灰荷载, 可按表 12.2.7 采用。

表 12.2.7 烟道底板积灰荷载

单机容量	$\geq 200$		$\leq 125$	
	干式	湿式	干式	湿式
积灰荷载	10	15	15	20

3 烟道内的烟气压力, 一般按  $\pm 2.5\text{kN/m}^2$  考虑。

4 架空烟道在进行温度计算时, 除计算出的最高受热温度要满足材料受热温度允许值外, 还应使温度差值符合以下要求:

- 1) 砖砌烟道的侧墙, 不大于  $20^\circ\text{C}$ ;
- 2) 钢筋混凝土烟道及砖砌烟道的钢筋混凝土的底板和顶板, 不应大于  $40^\circ\text{C}$ 。

12.2.8 烟道的构造:

- 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, 砂浆的强度等级不应低于 M2.5。当温度较高时应采用耐热砂浆。

- 3 地下及地面烟道均宜设内衬和隔热层。砖内衬的顶应做成拱形，其拱脚应向烟道侧壁伸出，并与烟道侧壁留 10mm 空隙。
- 4 不设内衬的烟道，应在烟道内表面抹粘土保护层。
- 5 当为封闭式箱形钢筋混凝土烟道时，拱型砖内衬的拱顶，至烟道顶板底表面，应留有不小于 150mm 的空隙。
- 6 烟道与炉子基础及烟囱基础连接处，应设置沉降缝。对于地下烟道，在地面荷载变化较大处，也应设置沉降缝。
- 7 较长的烟道应设置伸缩缝。地面及地下烟道的伸缩缝最大的间距为 20m，架空烟道一般不超过 25m，缝宽 20~30mm。缝中应填塞石棉绳等可压缩的耐高温材料。当有防水要求时，应按防水温度缝处理。地震区的架空烟道与烟囱之间防震缝的宽度不应小于 70mm。
- 8 连接引风机和烟囱之间的钢烟道，应设置补偿器。

## 13 航空障碍灯和标志

### 13.1 一般规定

13.1.1 对于以下可能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（即以民用机场基准点（跑道中心点）为中心，以 50km 为半径划定的区域），修建高出地表 150m 的烟囱；

3 在建有高架直升机停机坪的城市中，修建有可能影响飞行安全的烟囱。

## 13.2 障碍灯和标志

13.2.1 中光强障碍灯：应为红色闪光灯晚间运行。闪光频率应在每分钟 20~60 次之间，闪光的有效光强不小于  $2000\text{cd} + 25\%$ 。

13.2.2 高光强障碍灯：应为白色闪光全天候运行。闪光频率应为每分钟 40~60 次，闪光的有效光强随背景亮度自动改变光强闪光，白天应为  $200000\text{cd}$ ，黄昏或黎明为  $20000\text{cd}$ ，夜间为  $2000\text{cd}$ 。

13.2.3 烟囱标志：应采用橙色与白色相间或红色与白色相间的水平色标漆。

## 13.3 障碍灯的分布

13.3.1 障碍灯的设置应显示出烟囱的最顶点和最大边缘（即视高和视宽）。

13.3.2 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，并尽可能相等。

13.3.3 烟囱顶部的障碍灯应设置在烟囱顶端以下 1.5~3m 范围内，高度超过 150m 的烟囱可设置在烟囱顶端以下 7.5m 范围内。

13.3.4 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 时, 每层设 3 个障碍灯;
- 2 外径超过 6m, 但不大于 30m 时, 每层设 4 个障碍灯;
- 3 外部直径超过 30m, 每层设 6 个障碍灯。

13.3.5 高度超过 150m 的烟囱顶层应采用高光强闪光障碍灯, 其间距控制在 75~105m 范围内, 在高光强闪光障碍灯分层之间设置低、中光强障碍灯。

13.3.6 高度低于 150m 的烟囱, 也可采用高光强白色障碍灯, 采用高光强白色闪光障碍灯后, 可不必再用色标漆标志烟囱。

13.3.7 每层障碍灯应设置维护平台。

#### 13.4 障碍灯的工作要求

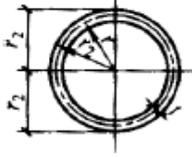
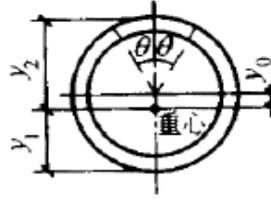
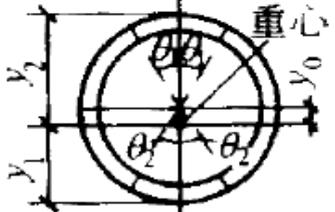
13.4.1 所有障碍灯应同时闪光, 高光强障碍灯应自动变光强, 中光强障碍灯应自动启闭, 所有障碍灯应能自动监控, 使其保证正常状态。

13.4.2 设置障碍灯时, 应考虑避免使居民感到不快, 从地面只能看到散逸的光线。

#### 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		简 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	$y_1$	$r_2$	$r_2 - r \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}$	$r_2 \cos \theta_2 - r \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}$
	$y_2$	$r_2$	$r_2 \cos \theta + r \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}$	$r_2 \cos \theta_1 + r \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}$
截面面积 $A$		$2 \pi r t$	$2 r t (\pi - \theta)$	$2 r t (\pi - \theta_1 - \theta_2)$
重心轴的截面惯性矩 $I$		$\pi r^3$	$r^3 t (\pi - \theta - \cos \theta \sin \theta - 2 \frac{\sin^2 \theta}{\pi - \theta})$	$r^3 t [\pi - \theta_1 - \theta_2 - \cos \theta_1 \sin \theta_1 - \cos \theta_2 \sin \theta_2 - 2 \frac{(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)^2}{\pi - \theta_1 - \theta_2}]$
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  $\psi$

表 B. 0. 1 焊接圆筒截面轴心受压稳定系数  $\psi$

$\lambda \sqrt{\frac{f_y}{235}}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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

注：表中  $\varphi$  值系按下列公式算得：

$$\text{当 } \lambda_n = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \leq 0.125 \text{ 时, } \varphi = 1 - \alpha_1 \lambda_n^2; \text{ 当 } \lambda_n > 0.215 \text{ 时, } \varphi = \frac{1}{2\lambda_n^2} [\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n]$$

式中,  $\alpha_1 = 0.65$ ,  $\alpha_2 = 0.965$ ,  $\alpha_3 = 0.300$ 。

130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
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
0.383	0.341	0.304	0.273	0.246	0.223	0.202	0.184	0.169	0.155	0.143	0.132	
0.378	0.337	0.301	0.270	0.244	0.220	0.200	0.183	0.167	0.154	0.142	0.131	
0.374	0.333	0.298	0.267	0.241	0.218	0.198	0.181	0.166	0.153	0.141	0.130	
0.370	0.329	0.295	0.265	0.239	0.216	0.197	0.180	0.165	0.151	0.140	0.129	
0.365	0.326	0.291	0.262	0.236	0.214	0.195	0.178	0.163	0.150	0.138	0.128	
0.361	0.322	0.288	0.259	0.234	0.212	0.193	0.176	0.162	0.149	0.137	0.127	
0.357	0.318	0.285	0.256	0.232	0.210	0.191	0.175	0.160	0.148	0.136	0.126	
0.353	0.315	0.282	0.254	0.229	0.208	0.190	0.173	0.159	0.146	0.135	0.125	
0.349	0.311	0.279	0.251	0.227	0.206	0.188	0.172	0.158	0.145	0.134	0.124	

$$+ \lambda_2^2) - \sqrt{(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_2^2)^2 - 4\lambda_2^2}]$$

### 附录 C 环形和圆形基础的最终沉降量和倾斜的计算

C.0.1 基础最终沉降量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 C.0.1a）的沉降；圆形基础应计算圆心 O 点（图 C.0.1b）的沉降。

计算应按《建筑地基基础设计规范》进行。平均附加应力系数  $a$ ，可按本附录中的表 C. 0.1 采用。

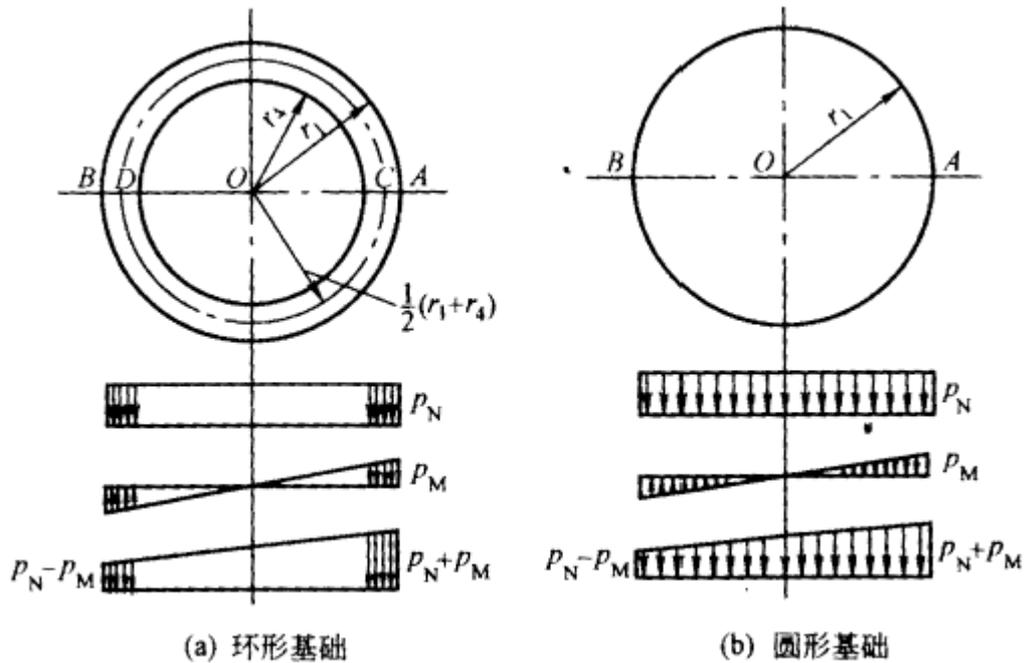


图 C. 0.1 板式基础底板下压力

2 计算环形基础沉降量时，其环宽中点的平均附加应力系数  $\bar{a}$  值，应分别按大圆与小圆由表 C. 0.1 中相应的  $Z/R$  和  $b/R$  栏查得的数值相减后采用。

C. 0.2 基础倾斜可按下列规定进行计算：

1 分别计算与基础最大压力  $p_{max}$  及最小压力  $p_{min}$  相对应的基础外边缘 A、B 两点的沉降量  $S_A$  和  $S_B$ ，基础的倾斜值  $m_\theta$ ，可按下列式计算：

$$m_{\sigma} = \frac{S_A - S_B}{2r_1} \quad (\text{C. 0. 2})$$

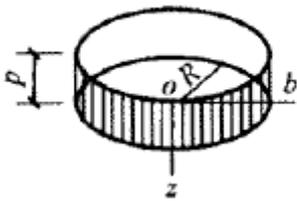
式中  $r_1$ ——圆形基础的半径或圆形基础的外圆半径。

平均附加应力系数  $\bar{\sigma}$ ，可按本附录中的表 C. 0. 2-1、表 C. 0. 2-2 采用。

2 计算在梯形荷载作用下酌基础沉降量  $S_A$  和  $S_B$  时，可将荷载分为均布荷载和三角形荷载两部分，分另（计算其相应的沉降量再进行叠加。

3 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，算得的 A、B 两点沉降值，减去半径为  $r_4$  的圆板在相应的梯形荷载作用下，算得的 A、B 两点沉降值。

C. 0. 3 正倒锥组合壳体基础，其最终沉降量和倾斜值，可按壳水平投影的环板基础进行计算。



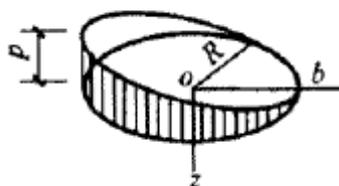
表c. 0. 1 圆形面积上均布荷载作用下土中任意点竖向平均附加应力系数  $\bar{\sigma}$

Z/R	b/R									
	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500	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
0.40	0.986	0.984	0.977	0.955	0.880	0.465	0.079	0.022	0.008	0.003
0.60	0.960	0.956	0.941	0.902	0.803	0.447	0.121	0.045	0.019	0.009
0.80	0.923	0.917	0.895	0.845	0.739	0.430	0.149	0.066	0.032	0.016
1.00	0.878	0.870	0.835	0.790	0.685	0.413	0.167	0.083	0.044	0.024
1.20	0.831	0.823	0.795	0.740	0.638	0.396	0.177	0.096	0.054	0.032
1.40	0.784	0.776	0.747	0.693	0.597	0.380	0.183	0.105	0.063	0.039
1.60	0.739	0.731	0.704	0.649	0.561	0.364	0.186	0.112	0.070	0.045
1.80	0.697	0.689	0.662	0.613	0.529	0.350	0.186	0.116	0.076	0.050
2.00	0.658	0.650	0.625	0.578	0.500	0.336	0.185	0.119	0.080	0.055
2.20	0.623	0.615	0.591	0.546	0.473	0.322	0.183	0.120	0.083	0.058
2.40	0.590	0.582	0.560	0.518	0.450	0.309	0.180	0.121	0.085	0.061
2.60	0.560	0.553	0.531	0.492	0.428	0.297	0.176	0.121	0.086	0.063
2.80	0.532	0.526	0.505	0.468	0.408	0.285	0.173	0.120	0.087	0.064
3.00	0.507	0.501	0.483	0.447	0.390	0.274	0.169	0.119	0.087	0.065
3.20	0.484	0.478	0.460	0.427	0.373	0.265	0.165	0.117	0.087	0.066
3.40	0.463	0.457	0.440	0.408	0.357	0.255	0.160	0.115	0.086	0.066
3.60	0.443	0.438	0.421	0.392	0.343	0.246	0.156	0.113	0.085	0.066
3.80	0.425	0.420	0.404	0.376	0.330	0.238	0.152	0.112	0.085	0.066
4.00	0.409	0.404	0.389	0.361	0.318	0.230	0.149	0.109	0.084	0.065
4.20	0.393	0.388	0.374	0.348	0.306	0.223	0.145	0.107	0.082	0.065
4.40	0.379	0.374	0.360	0.336	0.295	0.216	0.141	0.105	0.081	0.064
4.60	0.365	0.361	0.348	0.324	0.285	0.209	0.137	0.103	0.080	0.064
4.80	0.353	0.349	0.336	0.313	0.276	0.203	0.134	0.101	0.079	0.063
5.00	0.341	0.337	0.325	0.303	0.267	0.197	0.131	0.099	0.078	0.062

2.000	2.200	2.400	2.600	2.800	3.000	3.200	3.400	3.600	3.800	4.000
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	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.005	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.009	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
0.015	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
0.020	0.013	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
0.025	0.019	0.011	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001
0.030	0.021	0.014	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
0.035	0.024	0.017	0.012	0.009	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002
0.038	0.027	0.020	0.015	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002
0.042	0.030	0.022	0.017	0.012	0.010	0.007	0.006	0.005	0.003	0.003
0.044	0.033	0.024	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.005	0.004	0.003
0.046	0.035	0.026	0.020	0.016	0.012	0.010	0.008	0.006	0.004	0.004
0.048	0.037	0.028	0.022	0.017	0.013	0.011	0.009	0.007	0.005	0.005
0.049	0.038	0.030	0.023	0.018	0.015	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005
0.050	0.039	0.031	0.024	0.019	0.016	0.013	0.010	0.008	0.006	0.006
0.051	0.040	0.032	0.025	0.020	0.017	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006
0.052	0.041	0.033	0.026	0.021	0.017	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007
0.052	0.041	0.033	0.027	0.022	0.018	0.015	0.012	0.010	0.008	0.007
0.052	0.042	0.034	0.028	0.023	0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.008
0.052	0.042	0.034	0.028	0.023	0.019	0.016	0.014	0.011	0.009	0.008
0.052	0.042	0.035	0.029	0.024	0.020	0.017	0.014	0.012	0.010	0.009
0.052	0.042	0.035	0.029	0.024	0.020	0.017	0.015	0.012	0.010	0.009
0.051	0.042	0.035	0.029	0.024	0.021	0.018	0.015	0.013	0.011	0.009
0.051	0.042	0.035	0.029	0.025	0.021	0.018	0.015	0.013	0.011	0.010

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  $\bar{\alpha}$

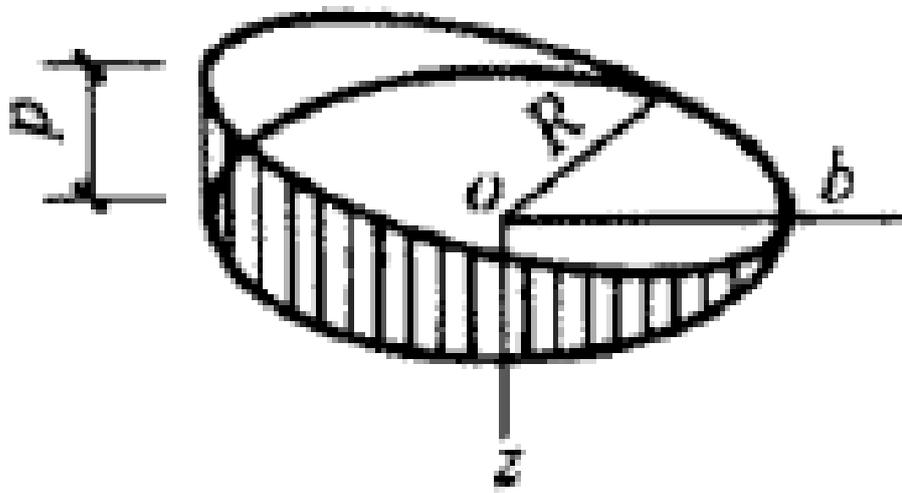


Z/R	b/R									
	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800
0.00	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.20	0.499	0.399	0.300	0.200	0.102	0.016	0.002	0.000	0.000	0.000
0.40	0.493	0.396	0.298	0.200	0.107	0.030	0.008	0.003	0.001	0.001
0.60	0.480	0.387	0.293	0.200	0.112	0.041	0.016	0.007	0.003	0.002
0.80	0.462	0.377	0.287	0.199	0.117	0.050	0.023	0.012	0.006	0.004
1.00	0.439	0.360	0.278	0.196	0.120	0.057	0.030	0.017	0.009	0.006
1.20	0.416	0.343	0.267	0.192	0.121	0.063	0.036	0.021	0.013	0.008
1.40	0.392	0.326	0.257	0.187	0.121	0.067	0.040	0.025	0.016	0.010
1.60	0.370	0.310	0.245	0.181	0.120	0.070	0.044	0.028	0.019	0.012
1.80	0.349	0.294	0.234	0.175	0.119	0.072	0.046	0.031	0.021	0.014
2.00	0.329	0.279	0.224	0.169	0.116	0.073	0.048	0.033	0.023	0.016
2.20	0.312	0.265	0.214	0.163	0.114	0.073	0.049	0.035	0.025	0.018
2.40	0.295	0.252	0.205	0.157	0.111	0.073	0.050	0.036	0.026	0.019
2.60	0.280	0.240	0.196	0.151	0.108	0.072	0.051	0.037	0.027	0.020
2.80	0.266	0.229	0.187	0.145	0.105	0.071	0.051	0.037	0.028	0.021
3.00	0.254	0.218	0.180	0.140	0.102	0.070	0.051	0.038	0.029	0.022
3.20	0.242	0.209	0.172	0.135	0.099	0.069	0.050	0.038	0.029	0.023
3.40	0.232	0.200	0.166	0.130	0.096	0.067	0.050	0.038	0.029	0.023
3.60	0.222	0.192	0.159	0.125	0.094	0.066	0.049	0.038	0.029	0.023
3.80	0.213	0.184	0.152	0.121	0.091	0.065	0.048	0.037	0.029	0.023
4.00	0.205	0.177	0.148	0.117	0.088	0.063	0.047	0.037	0.030	0.024
4.20	0.197	0.171	0.142	0.113	0.086	0.062	0.046	0.037	0.029	0.024
4.40	0.190	0.165	0.138	0.110	0.083	0.061	0.045	0.036	0.029	0.024
4.60	0.183	0.159	0.133	0.107	0.081	0.059	0.044	0.036	0.029	0.024
4.80	0.177	0.154	0.129	0.104	0.079	0.058	0.043	0.036	0.029	0.023
5.00	0.171	0.151	0.125	0.101	0.077	0.057	0.042	0.035	0.028	0.023

2.000	2.200	2.400	2.600	2.800	3.000	3.200	3.400	3.600	3.800	4.000
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	0.000	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	0.000	0.000
0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.004	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.005	0.004	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.007	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
0.012	0.009	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
0.013	0.010	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001
0.014	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001
0.015	0.012	0.009	0.007	0.006	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
0.016	0.012	0.010	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002
0.017	0.013	0.010	0.008	0.007	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
0.018	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002
0.018	0.014	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002
0.019	0.015	0.012	0.010	0.008	0.007	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003
0.019	0.015	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003
0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.008	0.006	0.005	0.005	0.004	0.003
0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003
0.019	0.016	0.013	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004
0.019	0.016	0.014	0.011	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004
0.019	0.016	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.005	0.004

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
0.00	0.600	0.700	0.800	0.900	0.500	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
0.40	0.589	0.679	0.755	0.774	0.435	0.071	0.019	0.007	0.003
0.60	0.569	0.647	0.702	0.691	0.406	0.106	0.038	0.015	0.007
0.80	0.541	0.608	0.646	0.622	0.380	0.126	0.054	0.025	0.013
1.00	0.511	0.567	0.594	0.565	0.356	0.137	0.066	0.034	0.019
1.20	0.479	0.527	0.548	0.517	0.333	0.142	0.075	0.042	0.024
1.40	0.449	0.491	0.506	0.476	0.313	0.143	0.080	0.048	0.029
1.60	0.421	0.457	0.470	0.441	0.294	0.142	0.084	0.052	0.033
1.80	0.395	0.428	0.438	0.410	0.278	0.140	0.085	0.055	0.036
2.00	0.372	0.401	0.409	0.383	0.263	0.137	0.087	0.057	0.039
2.20	0.350	0.376	0.384	0.360	0.248	0.134	0.087	0.058	0.040
2.40	0.331	0.355	0.362	0.339	0.236	0.130	0.085	0.059	0.042
2.60	0.313	0.336	0.341	0.320	0.225	0.126	0.084	0.059	0.042
2.80	0.297	0.318	0.323	0.303	0.214	0.122	0.082	0.059	0.043
3.00	0.283	0.302	0.307	0.288	0.204	0.118	0.081	0.058	0.043
3.20	0.269	0.287	0.292	0.274	0.196	0.114	0.079	0.058	0.043
3.40	0.257	0.274	0.278	0.261	0.188	0.110	0.077	0.057	0.043
3.60	0.246	0.262	0.266	0.250	0.180	0.107	0.076	0.056	0.043
3.80	0.236	0.251	0.255	0.239	0.173	0.104	0.074	0.055	0.042
4.00	0.224	0.241	0.244	0.229	0.167	0.101	0.072	0.054	0.042
4.20	0.217	0.231	0.234	0.220	0.161	0.098	0.070	0.053	0.041
4.40	0.209	0.222	0.225	0.212	0.155	0.095	0.069	0.052	0.040
4.60	0.202	0.214	0.217	0.204	0.150	0.092	0.067	0.051	0.040
4.80	0.195	0.207	0.209	0.197	0.145	0.090	0.065	0.050	0.040
5.00	0.188	0.201	0.202	0.190	0.140	0.087	0.064	0.049	0.039

-2.000	-2.200	-2.400	-2.600	-2.800	-3.000	-3.200	-3.400	-3.600	-3.800	-4.000
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	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.007	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.011	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
0.015	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
0.018	0.012	0.008	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
0.022	0.014	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001
0.024	0.017	0.012	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001
0.026	0.019	0.014	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
0.028	0.021	0.015	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002
0.030	0.022	0.016	0.012	0.009	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003	0.002
0.031	0.023	0.017	0.013	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002
0.032	0.024	0.018	0.014	0.011	0.009	0.007	0.005	0.004	0.003	0.003
0.032	0.025	0.019	0.015	0.012	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003
0.033	0.025	0.020	0.016	0.012	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003
0.033	0.026	0.020	0.016	0.013	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004
0.033	0.026	0.021	0.017	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004
0.033	0.026	0.021	0.017	0.014	0.011	0.009	0.008	0.006	0.005	0.004
0.033	0.026	0.021	0.017	0.014	0.012	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005
0.033	0.026	0.021	0.017	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005
0.033	0.026	0.021	0.018	0.015	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005
0.032	0.026	0.021	0.018	0.015	0.012	0.010	0.009	0.007	0.006	0.005
0.032	0.026	0.021	0.018	0.015	0.012	0.010	0.009	0.008	0.006	0.006
0.031	0.026	0.021	0.018	0.015	0.013	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文说明时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时，首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”；反面词采用“不宜”或“不可”。

2 条文中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。非必须按所指定的标准、规范或其他规定执行时，写法为“可参照……”。