



中国工程建设标准化协会标准

钢 烟 囱 设 计 标 准

Standard for Design of Steel Chimneys

(征求意见稿)

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

钢 烟 囱 设 计 标 准

Standard for Design of Steel Chimneys

(征求意见稿)

主编单位：上海必立结构设计事务所有限公司

归口单位：中国工程建设标准化协会高耸构筑物专业委员会

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202×年××月××日

××××出版社

202× 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会关于印发《2023 年第一批协会标准制订、修订计划》的通知（建标协字[2023]10 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准包括总则、术语、基本规定、材料、荷载与作用、钢烟囱防腐、自立式钢烟囱、烟囱内筒设计、塔架式钢烟囱、钢烟囱减振设计、烟囱维护与加固设计等内容。

本标准由中国工程建设标准化协会高耸构筑物专业委员会归口管理，由上海必立结构设计事务所有限公司负责技术内容的解释。执行本标准过程中如有意见或建议，请寄送上海必立结构设计事务所有限公司《钢烟囱设计标准》管理组（地址：上海市闵行区园文路 28 号 1901 室，邮政编码：201199，邮箱：niu.chunliang@shbilee.com）。

主编单位：上海必立结构设计事务所有限公司

参编单位：

本标准主要起草人：

本标准主要审查人：

目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	基本规定	5
4	材料	13
4.1	钢材	13
4.2	不锈钢	14
4.3	低合金钢	15
4.4	纤维增强塑料	15
4.5	硼硅酸盐泡沫玻璃砖	16
4.6	涂料	17
5	荷载与作用	20
5.1	一般规定	20
5.2	风荷载	21
5.3	地震作用	34
5.5	温度作用	36
6	钢烟囱防腐	40
6.1	一般规定	40
6.2	烟气类别的划分	40
6.3	钢烟囱防腐设计	41
7	自立式钢烟囱	49
7.1	一般规定	49
7.2	筒壁极限承载力计算	49
7.3	钢烟囱疲劳验算	53
7.4	法兰连接	58
7.5	基础法兰设计	61
7.6	自立式钢烟囱构造设计	64
8	烟囱内筒设计	66
9	塔架式钢烟囱	70

9.1	一般规定	70
9.2	塔架内力计算	72
9.3	钢塔架构造设计	76
10	钢烟囱减振设计	77
11	钢烟囱维护与加固设计	80
11.1	钢烟囱维护与检测	80
11.2	钢烟囱加固设计	82
附录 A	常温钢结构常用涂料	83
附录 B	钢铁基层常用涂层配套	85
附录 C	高温结构常用耐热涂料特性与用途	87

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms	2
3	Basic Requirement	5
4	Materials	13
4.1	Steels	13
4.2	Stainless steel	14
4.3	Low alloy steel	15
4.4	Fiber reinforced plastic	15
4.5	Borosilicate foam glass brick	16
4.6	Coating	17
5	Loads and Action	20
5.1	General	20
5.2	Wind Load	21
5.3	Earthquake Action	34
5.5	Temperature Action	36
6	Steel chimney anti-corrosion	40
6.1	General	40
6.2	Classification of smoke categories	40
6.3	Anti corrosion design of steel chimney	41
7	Self standing steel chimney	49
7.1	General	49
7.2	Calculation of ultimate bearing capacity of cylinder wall	49
7.3	Fatigue Calculation of Steel Chimney	53
7.4	Flange connection	58
7.5	Basic flange design	61
7.6	Design of self-supporting steel chimney structure	64
8	Design of chimney inner tube	66

9	Framed steel chimney	70
9.1	General	70
9.2	Tower internal force calculation	72
9.3	Design of Steel Tower	76
10	Design of steel chimney dampers	77
11	Maintenance and Reinforcement Design of Steel Chimney	80
11.1	Maintenance and Inspection of Steel chimneys	80
11.2	Reinforcement design of steel chimney	82
	Appendix A Common Coatings for Steel Structures at Room Temperature	83
	Appendix B Common Matching Coatings for Steel Substrates	85
	Appendix C Characteristics and Applications of Common Heat Resistant Coatings under High Temperature	87

1 总 则

1.0.1 为规范和指导钢烟囱的设计，保障钢烟囱结构与防腐的安全性、适用性和耐久性，满足钢烟囱工程建设项目的正常使用和绿色发展需要，依据有关法律、法规，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于排烟筒截面为圆环形的自立式钢烟囱、套筒式与多管式钢烟囱、塔架式烟囱和集束式钢烟囱的结构设计、防腐设计及其维护与加固设计等。

1.0.3 本标准依据现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001、《钢结构通用规范》GB 55006和《建筑结构可靠性设计统一标准》GB50068规定的原则进行制定。

1.0.4 工程中采用的材料、设计方法、技术措施、质量控制等与本标准不一致处，但经合规性评估符合本标准相关规定时，应允许使用。

【条文说明】1.0.4 钢烟囱的发展和应用越来越广泛，在防腐材料的选用、去工业化设计的个性化需求等方面呈现多样化发展。为鼓励创新和技术进步，同时确保工程的安全、质量和功能性，在使用不同于本标准规定的方法、材料或技术时，如果经过合规性评估能够证明其满足标准的基本要求和目的，那么这些非标准做法应允许使用。如本标准在防腐材料的选用上，对具有成熟使用实践经验的材料给出了选用规定，但由于腐蚀条件的不断变化以及新型材料不断创新，同时给出：“在有可靠试验数据及成功工程案例时，允许选用其他新型防腐材料”的规定。

1.0.5 钢烟囱的设计除应符合本标准规定外，尚应遵循现行国家有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 钢烟囱 steel chimney

排烟筒的结构外壳采用钢材制作的烟囱。

2.0.2 钢塔架 steel tower

自立构架式高耸钢结构,用于限制排烟筒水平位移,并可支承部分或全部排烟筒的重量。

2.0.3 塔架式钢烟囱 steel tower chimney

外部荷载(如风荷载)不能全部由排烟筒结构外壳承担,需要附加钢塔架来保证排烟筒稳定的一种钢烟囱。

2.0.4 自立式钢烟囱 self-supporting steel chimney

外部荷载(如风荷载)仅由钢烟囱外壳承担,并与基础一起,在没有附加支撑的情况下,能够保持所有设计条件下结构稳定的一种钢烟囱。自立式钢烟囱包括单筒自立式和套筒自立式钢烟囱。

2.0.5 集束式钢烟囱 Cluster-type Steel Chimney

集束式钢烟囱由多根自立式钢烟囱通过桁架结构或其他支撑系统连接形成的结构稳定体系。相较于单筒自立式钢烟囱其整体刚度和稳定性得到显著增强。

2.0.6 斯柯顿数 Scruton number (Sc)

是一换算无因次阻尼系数,用于衡量横风向共振敏感性,取决于结构阻尼比以及单位高度结构质量与空气质量的比值。

2.0.7 阻尼比 Damping ratio

表示阻尼振动的实际阻力与产生临界阻尼所需阻力的比值。阻尼比分别表达为“结构阻尼比”和“对数衰减率阻尼比”,二者为 2π 关系。

【条文说明】2.0.7 阻尼比定义参考了《预应力混凝土结构抗震设计规程》JGJ140 的术语。阻尼比分别表达为“结构阻尼比”和“以对数衰减率表达的结构阻尼比”,二者为 2π 关系。国内设计标准通常以“以对数衰减率结构阻尼比”来表达,而国际标准通常以“结构阻尼比”来表达,但国内技术人员应用时会经常混为一谈,造成错误。由于阻尼比对横风向振动的影响远大于对顺风向振动的影响,当发生阻尼比概念性错误时,对横风向振动计算结果会产生较大影响。为了说明二者关系,以下对有关基本概念进行介绍。

阻尼代表运动的阻力,它限制运动的振幅。胶结材料有三类主要的阻尼机理:固体的(滞后作用的)、粘滞性的和摩擦性的。第一类为滞后阻尼,代表能量被材料内部应力——应变

效应组成的阻力所吸收，在周期荷载作用下该效应形成封闭环（滞回曲线 hysteretic curve），阻尼力与位移成正例，并与材料内部摩擦力和弹性模量有关；第二类为粘滞阻尼，阻尼力与运动的速度成正例，在振动体系中为位移和频率的函数，如圆柱体运动使周围空气位移是粘滞阻尼的一个来源；最后一类为摩擦阻尼，源于物体表面相对滑动，这类阻尼力接近常数。

阻尼可以认为是自由振动的衰减，或将振动保持一定振幅所需要的能量。如自由振动各相振动波的波峰的连线代表该类阻尼的特性。对于滞后阻尼和粘滞阻尼，该连线为一指数曲线；而摩擦阻尼，其振幅随时间而线性降低。在大振幅振动中，滞后阻尼和粘滞阻尼是主要的，而摩擦阻尼在自由振动衰减的后期才显得重要。

粘滞阻尼自由振动运动方程：

$$y(t) = A \cdot e^{-kt} \cdot \sin(\omega t)$$

式中 k ——为阻尼常数；

A —— 最大振幅；

ω ——为角速度（弧度/s）。

阻尼有两种确定方法：“对数衰减率” ζ 和“临界阻尼的百分比” ζ_s 。对数衰减率 ζ 为前后波振幅的比值的自然对数，即：

令某一波的振幅为： $y_n = e^{-kt}$ ，则接着后一波的振幅为： $y_{n+1} = e^{-k(t+\frac{2\pi}{\omega})}$ （见图 1）。两个振幅的比值为： $e^{2\pi k/\omega}$ ，其自然对数为 $2\pi k/\omega$ ，故 $\zeta = 2\pi k/\omega$ 。这是中国标准所采用的阻尼比。

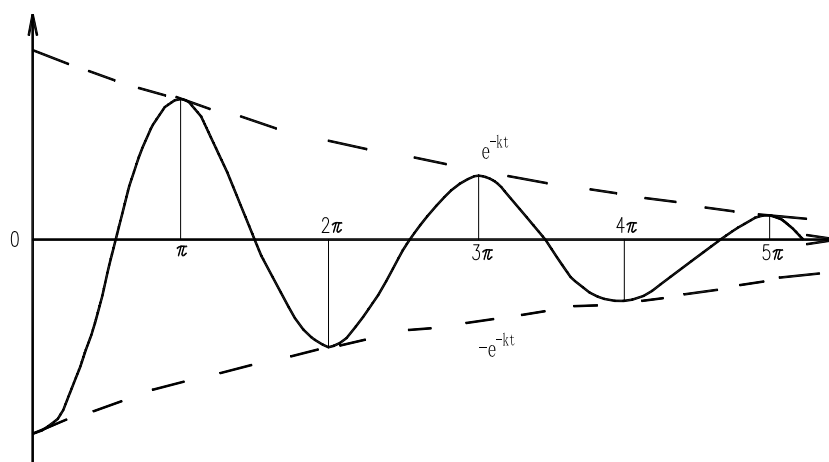


图 1 变位与时间关系

临界阻尼的百分数 ζ_s 表示在 ωt 角中衰减 1 弧度振幅的比值的自然对数，即：

令某一波的振幅为： $y(t) = e^{-kt}$ ，则接着衰减 1 弧度的振幅为： $y(t + \frac{1}{\omega}) = e^{-k(t + \frac{1}{\omega})}$ 。两

个振幅的比值为： $e^{k/\omega}$ ，其自然对数为 k / ω ，故 $\zeta_s = k / \omega$ 。这是大多数国外标准所采用的阻尼比。故：

$$\zeta = 2\pi \cdot \zeta_s$$

ζ_s 通常称为“结构阻尼比”（structural damping ratio）， ζ 为“用对数衰减率表达的结构阻尼比”（the structural damping expressed by the logarithmic decrement），本标准简称为“对数衰减率阻尼比”。

3 基本规定

3.0.1 本标准除疲劳计算和抗震设计外，应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用分项系数的设计表达式进行结构计算。

3.0.2 除疲劳计算外，钢烟囱及其附属构件的极限状态设计应包括：

1 承载能力极限状态：烟囱结构或附属构件达到最大承载力，如发生钢材屈服破坏、局部或整体屈曲失稳破坏以及因过度变形而不适于继续承载等。

2 正常使用极限状态：烟囱结构或附属构件达到正常使用规定的限值，如达到变形、腐蚀和最高受热温度等规定限值等。

【条文说明】3.0.1、3.0.2 钢烟囱主要作用为永久荷载和风荷载，顺风向设计是通过荷载和材料分项系数的设计表达式进行结构极限承载力计算。应力分布和截面强度的计算可以根据弹性理论来进行，并可保证烟囱不会由低周循环疲劳而造成破坏。在横风向涡激共振情况下，烟囱的安全需通过减振控制或疲劳验算控制。

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

3.0.4 本标准采用的设计基准期为 50 年。

3.0.5 钢烟囱的设计工作年限不宜低于 30 年。

3.0.6 钢烟囱结构设计时，应根据结构破坏可能产生的后果（危及人的生命、造成的经济损失、产生的社会 and 环境影响等）的严重性，采用不同的安全等级。钢烟囱的安全等级的划分及结构重要性系数 γ_0 应分别按表 3.0.6-1 和表 3.0.6-2 确定。

表 3.0.6-1 钢烟囱的安全等级的划分

安全等级	破坏后果	烟囱破坏可能造成的经济和社会后果
一级	很严重	建造在重要地区的烟囱：如核电站或人口密集的大城市市区；工业区内的、烟囱破坏将引起经济或社会后果的重要烟囱；高度不小于 80m 的自立式钢烟囱和高度不小于 100m 的塔架式钢烟囱。
二级	严重	所有工业区或其它地区的一般烟囱：如工业区内、电厂内或市区垮塌半径范围内无民用住宅的。

表 3.0.6-2 钢烟囱的结构重要性系数 γ_o

结构重要性系数	对持久设计状况和短暂设计状况		对偶然设计状况和地震设计状况
	安 全 等 级		
	一级	二级	
γ_o	1.1	1.0	1.0

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

1 钢烟囱的内筒的荷载效应设计值，应符合下式要求：

$$\gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_T S_T + \gamma_{CP} S_{CP} + \gamma_w S_{wk} \right) \leq R_d \quad (3.0.7-1)$$

2 钢烟囱外筒及塔架，以及由风荷载、平台活荷载等可变荷载控制的荷载效应设计值，应符合下式要求：

$$\gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_{Q_1} \gamma_{L1} S_{Q_{1k}} + \sum_{j=2}^n \gamma_{Q_j} \psi_{cj} \gamma_{Lj} S_{Q_{jk}} \right) \leq R_d \quad (3.0.7-2)$$

式中 γ_o ——烟囱重要性系数，按本标准第 3.0.6 条的规定采用；

γ_{G_i} ——第 i 永久作用分项系数，按本标准第 3.0.10 条的规定采用；

γ_{PL} ——烟囱平台活荷载分项系数，按本标准第 3.0.10 条的规定采用；

γ_{Q_1} ——第 1 个可变作用(主导可变作用)的分项系数，按本标准第 3.0.10 条的规定采用；

γ_{Q_j} ——第 j 个可变作用的分项系数，按本标准第 3.0.10 条的规定采用；

G_{ik} ——第 i 个永久作用的标准值；

Q_{1k} ——第 1 个可变作用(主导可变作用)的标准值；

Q_{jk} ——第 j 个可变作用的标准值；

$S_{G_{ik}}$ ——第 i 个永久作用标准值的效应；

S_{wk} ——风荷载标准值的效应；

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

$S_{Q_{jk}}$ ——第 j 个可变作用标准值的效应;

S_{PLk} ——烟囱平台活荷载标准值的效应;

ψ_{cj} ——第 j 个可变作用的组合值系数, 按本标准第 3.0.10 条的规定采用;

ψ_{CPL} ——烟囱平台活荷载组合系数, 按本标准第 3.0.10 条的规定采用;

γ_{L1} 、 γ_{Lj} ——第 1 个和第 j 个考虑烟囱设计工作年限的可变作用调整系数, 当设计工作年限为不大于 5 年时, 取调整系数为 0.9; 30 年时, 取调整系数为 1.0; 100 年时, 取调整系数为 1.1, 其余可线性插值获得;

γ_T ——正常烟气温度作用分项系数, 按本标准第 3.0.10 条的规定采用;

S_T ——正常烟气温度作用标准值的效应;

γ_{CP} ——正常烟气温度作用工况下, 烟气负压分项系数, 按本标准第 3.0.10 条的规定采用;

S_{CP} ——正常烟气温度作用工况下, 烟气负压标准值的效应;

γ_w ——风荷载分项系数, 按本标准表 3.0.10 的规定采用;

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

3.0.8 事故温度等偶然设计状况, 钢烟囱承载能力极限状态设计应符合下式要求:

$$\sum_{i=1}^m S_{G_{ik}} + S_{Ad} + \psi_{f1} S_{Q_{1k}} + \sum_{j=2}^n \psi_{qj} S_{Q_{jk}} \leq R_d \quad (3.0.8)$$

式中 S_{Ad} ——按偶然荷载标准值 A_d 计算的荷载效应值;

ψ_{f1} ——第一个可变荷载的频遇值系数;

ψ_{qj} ——第 i 个可变荷载的准永久值系数。

注: 烟气爆炸和事故温度下风荷载的频遇值系数取 0.2。

3.0.9 对于需要抗震设防的烟囱除按本标准第 3.0.7 和 3.0.8 条极限承载能力计算外, 尚应按下列地震设计状况进行抗震验算:

1 钢烟囱的外筒及钢塔架

$$\gamma_{GE}S_{GE} + \gamma_{Eh}S_{Ehk} + \gamma_{Ev}S_{Evk} + \psi_{wE}\gamma_w S_{wk} + \psi_{MaE}S_{MaE} \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.0.8-1)$$

2 钢烟囱的内筒

$$\gamma_{GE}S_{GE} + \gamma_T S_T + \gamma_{Eh}S_{Ehk} + \gamma_{Ev}S_{Evk} + \psi_{wE}\gamma_w S_{wk} + \psi_{MaE}S_{MaE} \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.0.8-2)$$

式中 γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，钢烟囱取 0.8；钢塔架应按塔柱、腹杆支座斜

杆和塔柱节点分别取 0.85、0.8、0.90 和 1.00；

γ_{Eh} ——水平地震作用分项系数，按表 3.0.10 的规定采用；

γ_{Ev} ——竖向地震作用分项系数，按表 3.0.10 的规定采用；

S_{Ehk} ——水平地震作用标准值的效应；

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；

S_{GE} ——重力荷载代表值的效应，重力荷载代表值取烟囱及其构配件自重标准值和
各层平台活荷载组合值之和。活荷载的组合值系数，应按表 3.0.10 的规定
采用；

S_T ——烟气温度作用效应；

ψ_{wE} ——风荷载的组合值系数，取 0.20；

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

γ_T ——烟气温度作用分项系数；

γ_{GE} ——重力荷载分项系数，一般情况应取 1.3，当重力荷载对烟囱承载能力有利
时，不应大于 1.0。

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

1 对于持久设计状况和短暂设计状况，作用效应基本组合的分项系数应按表 3.0.10-1
的规定采用。

表 3.0.10-1 荷 载 分 项 系 数

作用名称	分项系数		备 注	
	符 号	数 值		
永久作用	γ_G	1.30	作用效应对承载能力不利时	
		0.90	作用效应对承载能力有利时	
风荷载	γ_w	1.60	顺风向风荷载单独验算时	
		1.50	顺风向与涡激共振风荷载组合验算时	
平台上活荷载	γ_{PL}	1.50	当平台活荷载标准值不大于 4.0kN/m ² 时	当对结构承载力有 利时取 0.0
		1.40	当平台活荷载标准值大于 4.0kN/m ² 时	
安装检修荷载	γ_A	1.40	当对结构承载力有利时取 0.0	
烟气负压	γ_{CP}	1.10	—	
温度作用	γ_T	1.10	正常烟气温度，套筒式与多管式烟囱的内筒	
		1.00	极端环境温度、烟气事故温度	

2 对于持久设计状况和短暂设计状况，应按表 3.0.10-2 的规定确定相应的组合值系数。

表 3.0.10-2 作用效应的组合情况及组合值系数

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

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

3 对于地震设计状况，地震作用的分项系数及计算重力荷载代表值时活荷载组合值系数应分别按表 3.0.10-3 和表 3.0.10-4 的规定采用。

表 3.0.10-3 地震作用分项系数

地 震 作 用		γ_{Eh}	γ_{Ev}
仅计算水平地震作用		1.4	0.0
仅计算竖向地震作用		0.0	1.4
同时计算水平和竖向地震作用	水平地震作用为主时	1.4	0.5
	竖向地震作用为主时	0.5	1.4

表 3.0.10-4 计算重力荷载代表值时活荷载组合值系数

活荷载种类	组合值系数
积灰荷载	0.9
筒壁顶部平台活荷载	不计入

其余各层平台	按实际情况计算的平台活荷载	1.0
	按等效均布荷载计算的平台活荷载	0.2

3.0.11 对于正常使用极限状态,应根据不同设计要求,采用作用效应的标准组合或准永久组合进行设计,并符合下列规定:

1 验算地基承载力和结构变形时,应按标准组合计算:

$$\sum_{i=1}^m S_{G_{ik}} + S_{Q_{1k}} + \sum_{j=2}^n \psi_{cj} S_{Q_{jk}} \leq C \quad (3.0.11-1)$$

式中 C——烟囱或结构构件达到正常使用要求的规定限值,具体限值见本标准及相关标准的有关规定。

2 验算地基变形的时,应按准永久组合确定:

$$\sum_{i=1}^m S_{G_{ik}} + \sum_{j=1}^n \psi_{qj} S_{Q_{jk}} \leq C \quad (3.0.11-2)$$

式中 ψ_{qj} ——第 j 个可变作用效应的准永久值系数,平台活荷载取 0.6;积灰荷载取 0.8;

一般情况下不计入风荷载,但对于风玫瑰图呈严重偏心的地区,可采用风荷载频遇值系数 0.4 进行计算。

3.0.12 验算天然地基承载力时,基础零应力区应符合以下规定:

- 1 高径比不小于 20 的自立式钢烟囱,不允许出现零应力区;
- 2 高径比不大于 10 的自立式钢烟囱,零应力区的面积不应大于基础底面积的 15%;
- 3 高径比不大于 5 的自立式钢烟囱,零应力区的面积不应大于基础底面积的 25%;
- 4 高径比大于 10 但小于 20 的自立式钢烟囱,零应力区的面积可按线性插值计算;
- 5 出现零应力区的烟囱基础的设计和计算应符合现行国家标准《高耸结构设计标准》

GB50135 的有关规定。

【条文说明】3.0.12 通常对于钢筋混凝土烟囱和砖烟囱的基础不允许出现零应力区。由于钢烟囱自重轻,在风荷载特别是横风共振作用下,一般基础均由倾覆控制,故本标准根据钢烟囱的高径比,不同程度地允许了基础零应力区面积。

3.0.13 钢烟囱平台和钢梯的设置应符合下列规定:

- 1 平台的通道宽度不宜小于 750mm,平台周边应设高度不小于 100mm 的踢脚板。
- 2 平台和走道应能到达包括烟气监测点、航标灯等的各巡视和检修地点。
- 3 采样平台、钢梯及升降梯的设置应符合现行行业标准《固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范》HJ 75 的规定。
- 4 各层内部平台应设置照明和必要的通讯设施,上层平台的照明开关应设在下层平台

上；平台临空面均应设置栏杆和护沿，栏杆高度应符合现行国家标准《固定式钢梯及平台安全要求》的有关规定，且不小于 1.2m。

5 直爬梯应设在常年主导风向的上风向。

3.0.14 钢烟囱应根据《民用机场飞行区技术标准》MH5001 的有关规定设置航空障碍灯以及航空标志。

3.0.15 烟囱高度应满足环保或工艺要求。当烟气温度不低于 90℃时，在距离烟囱 8m 的范围内，烟囱高度应不低于周围建筑屋面标高以上 3m。

【条文说明】3.0.15 烟囱高度一般由工艺专业或环保专业确定，但与建筑较近的钢烟囱，当温度较高时，应考虑防火要求，其高度不应低于周围建筑屋面 3m。

3.0.16 钢烟囱通常烟气流速宜控制在 12m/s~18 m/s 范围内，饱和湿烟气流速宜控制在 9m/s~12 m/s 范围内，且最大值不宜超过表 3.0.16 规定值。

表 3.0.16 饱和湿烟气流速最大值

内衬或内筒材料	烟气流速 (m/s)
硼硅酸盐泡沫玻璃砖内衬	≤18
纤维增强塑料内筒和金属内筒	≤17
防腐涂层	≤17

【条文说明】3.0.16 为了减少烟囱出口冷凝水分夹带，降低烟囱雨的产生，规定饱和湿烟气流速一般值和最大值。

3.0.17 当烟囱顶部出口烟气垂直烟羽动量与水平风动量之比小于 2.0 时，应考虑烟羽下洗影响，并采取防护措施。

3.0.18 钢烟囱筒壁最高允许受热温度应符合表 3.0.18 要求。

表 3.0.18 钢烟囱筒壁最高允许受热温度

材 料		最高受热温度 (℃)	备 注
碳素结构钢		250	用于沸腾钢
		350	用于镇静钢
低合金结构钢和耐候钢		400	—
不锈钢	304	750	—
	316	800	
玻璃钢内筒		100	不大于热变形温度 TD+20 (度)

3.0.19 钢烟囱变形应考虑地基变形和筒身 P- Δ 效应，最大水平位移不宜大于其相应离地高度的 1/100。自立式钢烟囱涡激共振所产生的横风向振幅应控制在以下范围：

- 1 安全等级为一级的钢烟囱：0.05 d_0 ；
- 2 安全等级为二级的钢烟囱：0.10 d_0 ， d_0 为钢烟囱顶口外部直径。

【条文说明】3.0.19 钢烟囱在风荷载下会产生较大变形，故结构设计时，应计入变形所产生的二阶应力效应。一般情况下，钢烟囱的变形可放宽控制条件（如 $h/50$ ），但较大变形会对内衬或内筒的正常使用功能产生不利影响，故对钢烟囱最大位移限值限制为离地高度的 1/100，同时增加了横风向涡激共振的振幅控制。涡激共振的振幅应控制在允许范围内，以减少疲劳破坏及人们的不安全感。

3.0.20 钢烟囱或塔架柱脚底板宜高出室外地面不小于 300mm。

3.0.21 钢烟囱应根据具体情况，设置以下附属设施：

- 1 钢烟囱应在底部设置检查人孔。
- 2 冷凝液收集平台或漏斗，并设排液管。
- 3 烟道与钢烟囱相交处，应在钢烟囱内设置烟气导流板；当双烟道时，宜设置隔烟墙。隔烟墙高度宜采用烟道孔高度的（0.5~1.5）倍。隔烟墙厚度应根据烟气压力、抗震设防要求等计算确定。
- 4 防雷接地装置。
- 5 套筒与多管钢烟囱顶部的内外筒之间应设置防雨帽。

3.0.22 钢烟囱外壁温度超过 70℃时，在距地面或工作平台 2.1m 高度以下，应设置防烫伤保温设施或设置安全防护栏。

【条文说明】3.0.22 钢烟囱外壁温度一般不宜超过 70℃。当外壁温度超过 70℃时，对需要操作维护又无法采取其他措施的部位，为防止人身烫伤，在距地面或工作平台 2.1m 高度以下，应设置防烫伤保温设施或设置安全防护栏。

4 材料

4.1 钢材

4.1.1 钢烟囱选用的钢材应符合现行国家标准《钢结构通用规范》GB 55006 和《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

4.1.2 钢烟囱塔架、筒壁、平台、爬梯可采用 Q235、Q355、Q390、Q420 钢，质量等级不应低于 B 级。其质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 和《建筑结构用钢板》GB/T 19879 的规定。

4.1.3 当作用温度不大于 100℃时，钢材和焊缝的强度设计值应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定采用。当作用温度超过 100℃时，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：

$$f_t = \beta_{yt} f \quad (4.1.3-1)$$

$$f_{vt} = \beta_{yt} f_v \quad (4.1.3-2)$$

$$f_{xt}^w = \beta_{yt} f_x^w \quad (4.1.3-3)$$

$$\beta_{yt} = 1.0 + \frac{T}{767 \times \ln \frac{T}{1750}} \quad (4.1.3-4)$$

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

f_{vt} ——钢材在温度作用下的抗剪强度设计值 (N/mm²)；

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

c（抗压）、t（抗拉）、v（抗剪）和 f（角焊缝强度）的代表；

β_{yt} ——钢材及焊缝在温度作用下强度设计值的折减系数，当 $T \leq 100$ 时，取

$$\beta_{yt} = 1.0 ;$$

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

f_v ——钢材在温度不大于 100℃时的抗剪强度设计值 (N/mm²)；

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

为字母 c（抗压）、t（抗拉）、v（抗剪）和 f（角焊缝强度）的代表；

T——钢材或焊缝计算处温度（℃）。

4.2 不锈钢

4.2.1 不锈钢内筒应根据烟囱的安全等级、设计工作年限、工作环境、耐腐蚀要求等因素选用。当烟囱筒壁温度超过 400℃时，应采用不锈钢或者其他耐高温合金钢。

4.2.2 对于湿法脱硫烟气，316L 不锈钢可用于烟囱的顶部外表面烟羽下洗部位的防护，其厚度不应小于 3mm。

【条文说明】4.2.2 不锈钢可分为普通不锈钢和高性能不锈钢。普通不锈钢通常含有相对较低或中等水平的合金元素，如铬、镍、钼等。典型代表如奥氏体不锈钢 304 和 316、铁素体不锈钢 430 和 409、马氏体不锈钢 410 等。普通不锈钢能抵抗一般的氧化、还原、酸碱腐蚀，以及大气、淡水、温和的有机酸、食品介质等环境。对于特定的腐蚀介质，如强氧化酸、氯离子、高温环境下的腐蚀等，其耐蚀性可能较为有限，但 316L 不锈钢可用于烟囱的顶部外表面烟羽下洗部位的防护，且其厚度不应小于 3mm。高性能不锈钢含有更高含量的合金元素，如铬、镍、钼、氮、铜等，并可能添加其他特定元素以增强特定性能。例如，超级奥氏体不锈钢（如 254 SM0、904L）、双相不锈钢（如 2205、2507）、超马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢等。这些合金设计使得它们在特定腐蚀环境或极端工况下具有卓越的耐蚀性、强度、高温性能等。高性能不锈钢具有极高的耐点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂、高温氧化等能力，尤其在含氯离子、硫酸、盐酸、硝酸等强腐蚀介质中表现出色。它们能在严苛的化工、海洋、能源、环保、航空航天等环境中长期服役。

4.2.3 当烟气冷凝物中有氯化物或氯离子时，不宜采用不锈钢内衬防腐。

【条文说明】4.2.3 在烟气冷凝物中有氯化物或氯离子存在时，将大大提高不锈钢的腐蚀程度，会造成不锈钢的不适用。

4.2.4 不锈钢的强度设计值可按其屈服强度除以 1.1 材料分项系数后获得。常用不锈钢在不同温度下的屈服强度和弹性模量见表 4.2.4。

表 4.2.4 常用不锈钢力学性能指标

温度 (℃)	不锈钢牌号							
	304		304L		316		316L	
	f_{ymin} (MPa)	E (GPa)	f_{ymin} (MPa)	E (GPa)	f_{ymin} (MPa)	E (GPa)	f_{ymin} (MPa)	E (GPa)

20	206.7	193.7	172.3	193.7	206.7	193.7	172.3	193.7
50	197.0	192.8	165.5	192.8	199.0	192.8	165.5	192.8
80	177.9	190.5	151.7	190.5	183.5	190.5	151.4	190.5
110	166.4	188.5	142.4	188.5	173.0	188.5	141.8	188.5
140	157.0	186.6	134.5	186.6	163.9	186.6	133.3	186.6
170	149.8	184.4	127.8	184.4	155.9	184.4	127.0	184.4
200	143.5	182.2	121.5	182.2	148.4	182.2	121.3	182.2
250	135.3	179.1	114.4	179.1	139.5	179.1	114.4	179.1
300	128.8	175.5	108.6	175.5	132.4	175.5	109.1	175.5
350	123.3	172.2	104.4	172.2	127.0	172.2	104.9	172.2
400	118.4	168.4	101.3	168.4	123.3	168.4	101.2	168.4
450	113.8	164.1	98.6	164.0	120.7	164.0	97.2	164.0
500	110.6	160.7	93.0	160.7	118.6	160.7	94.0	160.7
550	105.6	156.1	90.4	156.1	116.8	156.1	90.0	156.1

注：表中 f_{ymin} 为不锈钢最小屈服强度； E 为不锈钢弹性模量；中间值线性插值获取。

4.3 低合金钢

4.3.1 耐候钢可用于海洋环境或氯化物存在的大气环境，与烟气接触的耐候钢其烟气温度应高于露点温度，且高出值不小于 10℃。

【条文说明】4.3.1 当耐候钢表面温度大于露点温度 10℃ 以上时，耐候钢的耐腐蚀性能要好于碳钢，但温度低于酸的露点时，接触烟气的耐候钢或低铜合金钢的耐腐蚀性能与碳钢相似。

4.3.2 钛合金可用于海水、氯离子、氧化性酸、有机酸和碱性环境，不宜用于较纯的还原性酸腐蚀环境。

【条文说明】4.3.2 钛可分为工业纯钛和钛钎合金。钛是耐氧化性酸或氯离子优异的材料。一般不用于硫酸、盐酸、磷酸等非氧化性酸的环境。

4.4 纤维增强塑料

4.4.1 除本节规定外，纤维增强塑料应符合《烟囱工程技术标准》GB/T 50051 的有关规定。

4.4.2 纤维增强塑料排烟筒的设计温度范围应与所选用树脂的耐温度性能相匹配。

1 持久温度设计状况：烟气温度不得超过 100℃，且树脂浇铸体热变形温度 HDT 应高出烟气正常运行工况最高设计温度 20℃以上；

2 短暂温度设计状况：树脂浇铸体热变形温 HDT 应不小于短暂最高设计温度，且状况持续时间不得超过 2h；

3 偶然温度设计状况：烟气温度不得超过树脂玻璃化转变温度 T_g ，且状况持续时间不得超过 30min。

【条文说明】4.4.2 针对玻璃钢特点，条文给出了温度的不同设计状况，其中短暂温度设计状况是指烟气温度短期波动超过正常运行最高设计温度状况；偶然温度设计状况是指事故温度状况。

4.4.3 排烟筒筒壁从里到外，应由功能内衬层、结构层和外表面保护层组成，各层材料组成、厚度和铺层方式应由设计确定，并满足《烟囱工程技术标准》GB/T 50051 的有关规定。

4.5 硼硅酸盐泡沫玻璃砖

4.5.1 硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐内衬应包括硼硅酸盐泡沫玻璃砖、胶黏剂和界面剂三种材料共同组成，其中硼硅酸盐泡沫玻璃砖应由中性硼硅酸盐玻璃发泡而成，材料性能应符合表 4.5.1-1 和表 4.5.1-2 的要求。

表 4.5.1-1 硼硅酸盐泡沫玻璃砖材料性能

项 目		指 标
玻璃类型		硼硅酸盐玻璃
玻璃等级		HGB1
玻 璃 关 键 化 学 成 分 (质量比)	硼 (B_2O_3) 含量	>8%
	碱金属氧化物 R_2O 和碱土金属氧化物 RO 含量	$R_2O + RO \leq 10\%$ ($R_2O \leq 8.5\%$, $RO < 2\%$)
	硼 (B_2O_3) 铝 (Al_2O_3) 硅 (SiO_2) 总含量	$\geq 87.5\%$
平均线膨胀系数 (25 至 275℃)		$\leq 6.0 \times 10^{-6} / ^\circ C$
导热系数 [平均温度 (38±2℃)]		$\leq 0.09 W / (m \cdot K)$
闭孔率		$\geq 99\%$
密度		(190-210) kg/m^3
抗压强度		$\geq 1.2 MPa$

抗折强度	$\geq 0.6MPa$
燃烧性	不燃，A1 级
体积吸水率	$\leq 0.5\%$ （仅表面附水）

表 4.5.1-2 硼硅酸盐泡沫玻璃砖胶黏剂材料性能

项 目	指 标
化学成分	聚氨酯沥青（不含硅酮胶成分）
密度	$(1.0 \pm 0.1)kg / L$
拉伸强度	$\geq 0.5MPa$
延伸率	$\geq 100\%$

【条文说明】4.5.1 条文规定了本标准所指硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐内衬的主要材料性能。

4.5.2 硼硅酸盐泡沫玻璃砖防腐内衬应采用双重涂胶技术进行施工：

1 粘贴泡沫玻璃砖前，筒壁和每块砖的侧面及背面均应涂约 1.6mm 湿膜厚度的胶黏剂。泡沫玻璃砖背胶及砖缝胶厚度应不小 3mm。

2 粘贴泡沫玻璃砖时，砖缝挤压出来的胶黏剂应刮平。

【条文说明】4.5.2 双重涂胶施工技术可确保胶黏剂厚度的均匀性及厚度要求，确保砖与筒壁及砖与砖之间有足够的粘结力及抗渗能力。砖缝挤压出来的胶黏剂应刮平，以避免或减少冷凝液的二次夹带。

4.6 涂 料

4.6.1 钢烟囱涂料的选择，应满足以下条件：

1 所选涂料的适用范围应与烟囱工作条件一致。应根据烟气腐蚀介质的种类、浓度、湿度和温度等烟气条件确定烟囱内部防腐涂料种类；同时根据筒壁温度、大气潮湿或是干燥等环境条件选择烟囱外部防腐涂料种类。

2 涂料应满足底漆、中间漆和面漆有良好的配套性能。

3 在钢烟囱基层表面上，应按现行国家标准《漆膜划圈试验》GB/T1720 测定附着力为 1 级的底漆进行选用。

4 与烟气接触的涂层应具有良好的耐磨性和耐久性，对于湿烟气尚应具有有良好的抗渗性能。

5 涂料的选择除应考虑烟囱的工作条件、环境条件、经济性和耐久性外，尚应考虑施工过程中的稳定性、干燥速度、毒性及固化条件等因素。

【条文说明】4.6.1 所选涂料的适用范围应与烟囱工作条件一致，如对酸性介质可采用耐酸性能良好的醇酸耐酸涂料；而对碱性介质，则不能选用醇酸耐酸涂料，应选用耐碱性较好的云母氧化铁底漆及环氧树脂面漆。

涂料应满足底漆、中间漆和面漆有良好的配套性能，如过氯乙烯面漆可与磷化底漆或铁红醇酸底漆配套使用，才能发挥良好的防腐蚀效果。氯乙烯面漆不能与油性底漆（如油性红丹漆）配套使用，过氯乙烯漆中含有强溶剂，会破坏底漆膜产生咬底现象。

与烟气接触的涂层应具有良好的耐磨性和耐久性,对于湿烟气尚应具有有良好的抗渗性能。如对涂层的耐磨、耐久性和抗渗性能有较高要求时,可选用玻璃鳞片涂料。

4.6.2 常温钢结构常用涂料可参考本标准附录 A 选用;防腐涂料的底漆、中间漆、面漆和清漆等,应选用相互间结合良好的涂层配套。涂层的配套可参考本标准附录 B 选用。

4.6.3 常用耐热涂料可参考表 4.6.3-1、表 4.6.3-2 选用,常用的耐热涂料性能及用途见本标准附录 C。

表 4.6.3-1 常用耐热涂料选用表

温 度	底 漆	面 漆
$T < 100^{\circ}\text{C}$	环氧铁红或环氧富锌底漆	聚氨酯丙烯酸磁漆
$100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$	环氧富锌底漆	有机硅磁漆
$150^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$	无机富锌底漆或有机硅富锌底漆	有机硅磁漆

表 4.6.3-2 常用耐热底漆最高使用温度

面 漆 名 称	环氧富锌涂料	无机富锌涂料	有机硅富锌涂料
最高使用温度	250°C	500°C	$500^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$

【条文说明】4.6.3 耐热涂料一般可分成三大类,即有机系耐热树脂涂料、无机系耐热涂料和有机——无机系耐热涂料。在高温条件下(一般为 100°C 以上),一般涂料的有机成分会发生分解、老化、聚合、氧化等化学反应,使涂膜性能变坏,失去保护能力,因而需要采用耐热涂料,以提高涂层的使用寿命。建筑钢结构受高温辐射的使用温度不宜超过 150°C 。当烟囱内衬被侵蚀破坏后,局部温度可能达 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 甚至更高(出现烧红情况),由于烟囱是壳体结构,局部高温尚不致造成整个结构的倒塌,但当高温时若一般涂料过早失效而加速锈蚀将影响使用寿命,为此,对受较高温度($T < 150^{\circ}\text{C}$)作用以及虽局部受高温($T > 150^{\circ}\text{C}$),应根据温度的高低采用相应的耐热涂料进行防腐。

有机硅富锌涂料作底漆时,它除有极好的耐热性能(可耐 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$)外,施工性能亦良好,但干燥时间长,防腐蚀能力较低,它与无机富锌涂料的耐热与防腐性能的比较见表 1。

表 1 两种耐热涂装系统性能比较

项 目		无机富锌涂料系统	有机硅富锌涂料系统
耐热性	常用	400°C	500°C
	最高	500°C	600°C
防腐性能	喷砂: Sa2.5	优	中
	手工: St-3	良	差
涂装工程及涂刷道数	下涂	无机富锌一道 50μ	纯有机硅或有机硅醇酸富锌漆二道 50μ
	上涂	有机硅面漆二道 40μ	有机硅面漆二道 40μ
上涂、下涂间隔时间 (20°C)	最大	12 月	1 个月
	最小	48h	16h
刷涂性能	下涂	中	优
	上涂	优	优

由表 1 可以看出,从防锈性能出发,选用无机富锌涂料作底漆优于有机硅富锌底漆,前

者 12 个月内不会生锈，可不用全面处理即可覆盖面漆。后者防锈能力差，在 1 月以内必需覆盖面漆。所以，许多国家都选用无机富锌底漆—有机硅面漆涂装体系（如日本、法国、加拿大等国）。但是，也有选用有机硅富锌底漆，它是单组分涂料，使用方便，施工性能好，还可避免无机富锌涂料作底漆时，加热初期（升温太快）易发泡及上涂光洁度差的缺点，特别是使用温度超过 400℃时，使用有机硅富锌底漆更为适合。因此，有些国家习惯使用有机硅富锌底漆—有机硅面漆的涂装体系（如前西德）。

5 荷载与作用

5.1 一般规定

5.1.1 除本标准规定外，钢烟囱其他荷载与作用计算应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 以及《高耸结构设计标准》GB50135 的有关规定。

5.1.2 在计算温度作用时，烟囱外部的环境温度应按下列规定采用：

- 1 计算烟囱最高受热温度和最大变形时，应采用当地气象资料极端最高温度。
- 2 计算筒壁温度差时，应采用当地气象资料极端最低温度。

5.1.3 烟囱抗震验算及抗风计算时，钢烟囱的阻尼比可按表 5.1.3 选取。

表 5.1.3 钢烟囱的阻尼比

烟囱结构类型		阻尼比 ζ	备 注
无内衬钢烟囱	无外保温	0.01	包括有黏贴类泡沫玻璃砖内衬的钢烟囱。
	有外保温	0.015	—
砖内衬钢烟囱		0.05	厚度不小于 120mm 的耐火砖或耐酸砖等砌筑类内衬。
浇注料内衬钢烟囱		0.02	厚度不小于 50mm、容重不小于 16kN/m ³ 。
有保温单内筒 钢烟囱	$h/d < 18$	0.02	中间数值采用线性插值； h/d 为内筒高径比。
	$20 \leq h/d < 24$	0.04	
	$h/d \geq 26$	0.014	
有保温两个或 多个内筒钢烟 囱	$h/d < 18$	0.02	
	$20 \leq h/d < 24$	0.04	
	$h/d \geq 26$	0.025	
塔架式钢烟囱		0.02	—
三管自立式钢烟囱		0.015	其它多管式钢烟囱的阻尼比可参考三管式钢烟囱或通过试验等方法获得。

注：当有可靠依据或试验数据时，允许采用与表中规定不同的数值。

【条文说明】5.1.3 烟囱阻尼比通常有两种表达方式：即结构阻尼比和以对数衰减率表达的结构阻尼比。在结构振动或抗震计算时，我国通常采用以对数衰减率表达的结构阻尼比，本标准与国家其它标准一致，也采用以对数衰减率表达的结构阻尼比。

5.1.4 集束式钢烟囱设计应考虑排烟筒之间不同温度工况的组合，并应在结构设计上采取措施，降低温差所带来的不利影响。

【条文说明】5.1.4 集束式钢烟囱设计应考虑排烟筒之间不同温度工况的组合，如单个或多个排烟筒同时排放烟气，而其它排烟筒处于非排烟状态，以及排烟筒本身烟气温度差异等不利组合。集束式钢烟囱设计上除满足排烟筒之间温差影响因素以外，重要的是需要在结构设计上采取有利措施，降低温差所带来的不利影响。

5.2 风荷载

5.2.1 烟囱表面上的顺风向风荷载标准值，应按下式计算：

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

$$\mu_z = \kappa \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{2\alpha} \quad z_{\min} \leq z \leq H_a \quad (5.2.1-2)$$

$$\mu_z = \kappa \cdot \left(\frac{z_{\min}}{10} \right)^{2\alpha} \quad z \leq z_{\min} \quad (5.2.1-3)$$

式中 w_k —— 作用烟囱 z 高度处风荷载标准值 (kN/m^2)；

w_0 —— 基本风压 (kN/m^2)，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 规定的 50 年重现期的风压采用，且不得小于 0.35kN/m^2 ，烟囱高度超过 200m 时，其基本风压可按 100 年一遇考虑；

C_d —— 风向影响系数，取 $C_d = 1.0$ ；

C_t —— 地形修正系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 的规定选取；

μ_z —— z 高度处的风压高度变化系数；

μ_s —— 风荷载体型系数，自立式钢烟囱按本标准第 5.2.2 条计算确定；钢塔架等结构体型系数按本标准第 5.2.4 条确定；

β_z —— 风振系数，自立式钢烟囱按本标准第 5.2.5 条计算确定；钢塔架和集束式钢烟囱的风振系数按本标准第 5.2.6 条计算确定；风振系数计算值不应小于 1.2；

α —— 地面粗糙度类别指数，按表 5.2.5 选取；

κ —— 风压地面粗糙度修正系数，按表 5.2.5 选取；

$z_{\min}$ —— 风压高度变化截断高度 (m)，按表 5.2.5 选取；

H_a —— 梯度风高度 (m)，按表 5.2.5 选取。

【条文说明】5.2.1 根据《工程结构通用规范》GB55001 的风振系数最小值规定，条文限制了风振系数最小值为 1.2。

5.2.2 自立式钢烟囱体型系数应根据烟囱基本体型系数、并考虑相邻烟囱及其高径比的影响按下列公式计算确定。

$$\mu_s = K_i \cdot K_a \cdot \mu_{s0} \quad (5.2.2-1)$$

$$\mu_{s0} = \begin{cases} 1.2 & \text{Re} < 2.5 \cdot 10^5 \\ 1.2 - 3.42 [\log(\text{Re}) - 5.40] & 2.5 \cdot 10^5 \leq \text{Re} \leq 3.5 \cdot 10^5 \\ 0.7 & \text{Re} > 3.5 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (5.2.2-2)$$

$$K_a = \begin{cases} 0.60 + 0.129 \cdot \log\left(\frac{h}{d_{third}}\right) & 1 \leq \frac{h}{d_{third}} < 6 \\ 0.70 + 0.574 \cdot \left\{ \log\left(\frac{h}{d_{third}}\right) - 0.778 \right\} & 6 \leq \frac{h}{d_{third}} < 20 \\ 1.0 & \frac{h}{d_{third}} \geq 20 \end{cases} \quad (5.2.2-3)$$

$$\text{Re} = 69000 \cdot V_h \cdot d_{third} \quad (5.2.2-4)$$

式中 μ_{s0} —— 圆形截面烟囱风荷载基本体型系数，当烟囱设置破风圈时，破风圈范围内

筒身取 $\mu_{s0} = 1.4$ ；

K_i —— 相邻烟囱干扰系数，按第 5.2.3 条确定；

K_a —— 烟囱高径比影响系数；

h —— 烟囱高度 (m)；

d_{third} —— 烟囱上部 1/3 高度范围筒壁加权平均外直径 (m)；

Re —— 雷诺数；

V_h —— 烟囱顶部设计风速 (m/s)。

【条文说明】5.2.2 根据《工程结构通用规范》GB55001 的规定：体型系数应根据建筑外形、周边干扰情况等因素确定。本标准依据烟囱设计经验和国外标准，对现行《建筑结构荷载规范》GB50009 的圆截面构筑物体型系数进行了完善和修正，更加符合钢烟囱的风荷载响应规律。

烟囱的雷诺数通常在 $1.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^8$ 范围，有关研究资料表明，雷诺数在此范围的烟囱体型系数近乎为常数，一般采用 0.6~0.8。我国原《建筑结构荷载规范》GBJ9-87 取值为 0.7，自 2001 版以后的《建筑结构荷载规范》则采用了 0.6，该数值相较于试验数据及国际标准偏低，烟囱等高耸构筑物的内力主要是风荷载控制，为了便于国际工程和国际技术交流以及安全起见，本标准采用 0.7，即恢复至 GBJ9-87 水平。

5.2.3 自立式钢烟囱相邻烟囱干扰系数可按下列情况选用。

1 两个并列布置钢烟囱（见图 5.2.3-1），干扰系数可按表 5.2.3-1 选取。

表 5.2.3-1 并列布置钢烟囱干扰系数 K_i

s/d	≤ 0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	≥ 3.0
K_i	2.00	1.50	1.26	1.17	1.09	1.04	1.00
注： 1 当 $s/d \geq 3.0$ 时，不考虑并列烟囱的顺风向干扰影响； 2 中间数值采用线性插值获取； 3 非等直径烟囱，取 $d = d_{third}$ 。							

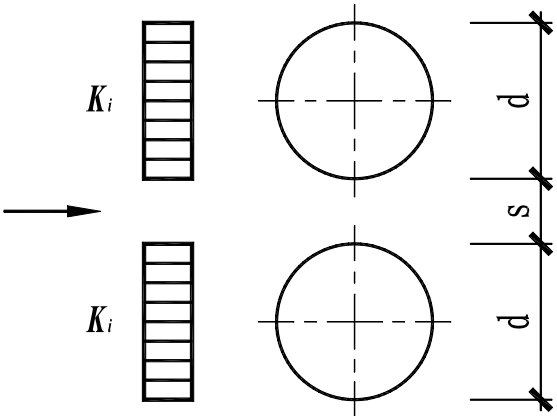


图 5.2.3-1 并列布置钢烟囱干扰系数
 d —钢烟囱直径； s —并列烟囱间距

2 两个前后串列布置钢烟囱（见图 5.2.3-2），干扰系数可按表 5.2.3-2 选取。

表 5.2.3-2 串列布置钢烟囱干扰系数 K_i

s/d	≤ 0.25	0.5	1.5	3.0	4.0	6.0	8.0	≥ 10.0
K_i	1.13	1.43	1.57	1.64	1.80	1.86	1.90	2.00
注： 1 K_i 为前后两个钢烟囱干扰系数之和，其中前者为 1.0，后者为表中数值与 1.0 的差值； 2 中间数值采用线性插值获取。								

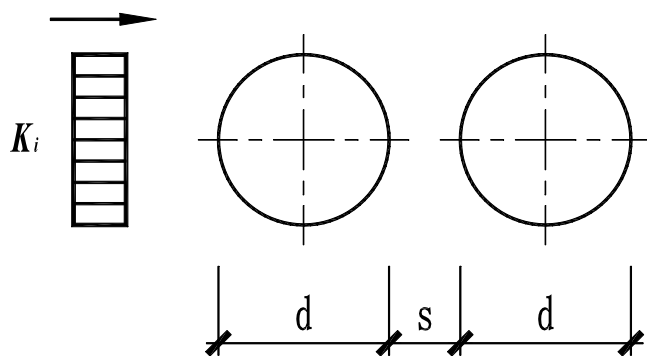


图 5.2.3-2 串列布置钢烟囱干扰系数

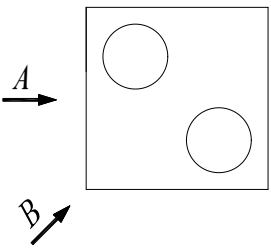
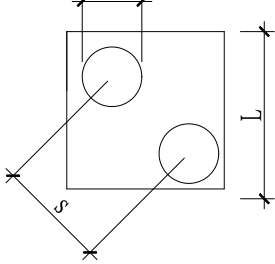
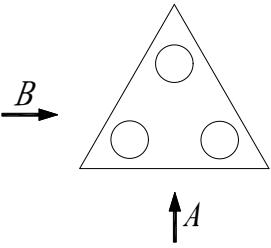
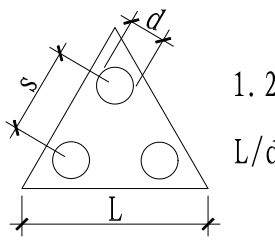
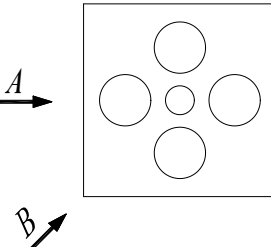
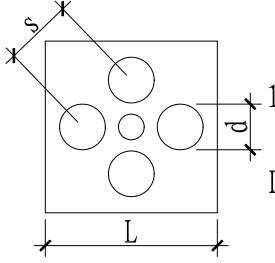
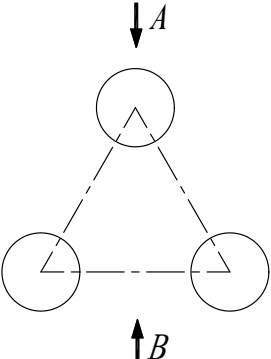
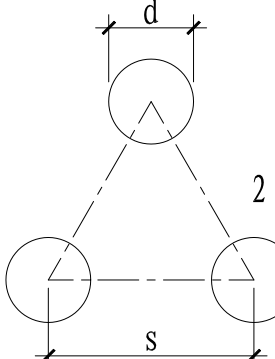
d —钢烟囱直径； s —串列烟囱间距

【条文说明】5.2.3 钢烟囱并列布置与串列布置是相对于风向而言。如条文图 5.2.3-1 和图 5.2.3-2 所示，当两个钢烟囱中心连线方向与风向平行时，为串列布置，垂直时为并列布置。对于串列烟囱，下风侧烟囱的体型系数小于单独烟囱系数，甚至可能变为负值，迎风侧烟囱的体型系数接近或略超过单独烟囱体型系数。

5.2.4 塔架式钢烟囱及集束式钢烟囱的体型系数应根据风洞试验确定。当无条件试验时，可按表 5.2.4 近似选取。

表 5.2.4 塔架式及三管自立式钢烟囱体型系数

截面形状	风向	体形系数			备 注
		排烟筒		塔架	
		C_s	C_L	C_R	
	A	0.7	—	1.6	 $L \geq d + 1.4m$
	B	0.7	—	1.6	
	A	0.7	—	1.9	 $L \geq d + 1.4m$
	B	0.7	—	2.4	

	A	0.5	0.7	2.4	
	B	0.75	—	2.2	
	A	0.7	—	1.9	
	B	0.7	—	1.9	
	A	0.55	—	2.0	
	B	0.55	—	2.3	
	A	0.7	—	—	
	B	0.7	—	—	

注：1 表中体型系数方向如图 5.2.4；

2 表中排烟筒体型系数为每个排烟筒体型系数的平均值。

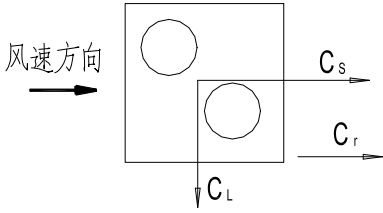
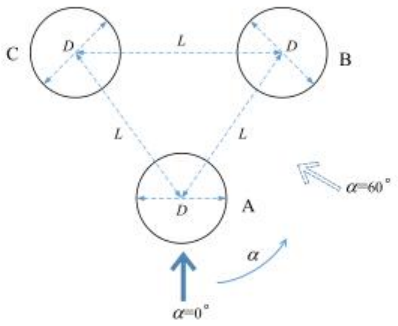


图 5.2.4 塔架式钢烟囱风力风向

【条文说明】5.2.4 三管集束式钢烟囱是参照河北省电力勘测设计研究院/石家庄铁道大学

《多管钢烟囱风荷载研究报告》及实际经验给出的。表 1 为试验建议值，本标准平均按 0.7 考虑。

表 1 三管自立式钢烟囱体型系数取值建议表

								
管间距 L	管编号	风向角 α						
		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
$2.4D$	A	0.55	0.54	0.61	0.67	0.73	0.64	0.68
	B	0.60	0.54	0.60	0.61	0.68	0.65	0.69
	C	0.60	0.58	0.33	0.42	0.48	0.39	0.43
	平均	0.57	0.54	0.51	0.49	0.56	0.55	0.60
$3.0D$	A	0.56	0.56	0.59	0.64	0.65	0.68	0.63
	B	0.63	0.63	0.62	0.63	0.64	0.69	0.63
	C	0.67	0.63	0.39	0.37	0.46	0.49	0.46
	平均	0.62	0.60	0.53	0.53	0.55	0.61	0.57
$3.6D$	A	0.57	0.60	0.65	0.69	0.69	0.72	0.66
	B	0.66	0.70	0.69	0.67	0.65	0.69	0.66
	C	0.70	0.64	0.44	0.37	0.47	0.53	0.49
	平均	0.63	0.63	0.58	0.56	0.57	0.62	0.59
$4.2D$	A	0.62	0.61	0.65	0.68	0.71	0.71	0.70
	B	0.71	0.67	0.65	0.63	0.65	0.67	0.70
	C	0.77	0.70	0.49	0.40	0.52	0.58	0.56
	平均	0.69	0.65	0.59	0.56	0.61	0.63	0.64
$4.8D$	A	0.61	0.62	0.65	0.68	0.70	0.71	0.69
	B	0.71	0.71	0.69	0.67	0.68	0.69	0.70
	C	0.73	0.69	0.50	0.39	0.51	0.57	0.55
	平均	0.67	0.67	0.60	0.58	0.61	0.64	0.63

5.2.5 自立式钢烟囱的风振系数可按下列公式计算确定。

$$\beta_z = 1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2} \quad (5.2.5-1)$$

$$I_v(z) = c \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha} \quad (5.2.5-2)$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{d_s + h}{L(z_s)} \right)^{0.63}} \quad (5.2.5-3)$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \zeta} \cdot S_L \cdot R_h \cdot R_d \quad (5.2.5-4)$$

$$S_L = \frac{6.8 \cdot f_L}{(1 + 10.2 \cdot f_L)^{5/3}} \quad (5.2.5-5)$$

$$f_L = \frac{f_1 \cdot L(z_s)}{V(z_s)} \quad (5.2.5-6)$$

$$L(z) = H_a \cdot \left(\frac{z}{H_a}\right)^\beta \quad z_{\min} \leq z \leq H_a \quad (5.2.5-7)$$

$$L(z) = H_a \cdot \left(\frac{Z_{\min}}{H_a}\right)^\beta \quad z < z_{\min} \quad (5.2.5-8)$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot \{1 - \exp(-2 \cdot \eta_h)\} \quad (5.2.5-9)$$

$$R_d = \frac{1}{\eta_d} - \frac{1}{2 \cdot \eta_d^2} \cdot \{1 - \exp(-2 \cdot \eta_d)\} \quad (5.2.5-10)$$

$$\eta_d = \frac{4.6 \cdot f_z}{L(z_s)} \cdot d_s \quad (5.2.5-11)$$

$$\eta_h = \frac{4.6 \cdot f_L}{L(z_s)} \cdot h \quad (5.2.5-12)$$

$$V(z) = 40 \sqrt{\mu_z w_0} \quad (5.2.5-13)$$

式中 $I_v(z)$ ——高度 z 处的湍流强度；

z_s ——烟囱特征高度， $z_s = 0.6h$ ；

c —— 10m 高度湍流强度，按表 5.2.4 选取；

g —— 峰值因子，取 $g = 2.5$ ；

B —— 脉动风荷载背景分量因子；

R —— 脉动风荷载共振响应系数；

S_L —— 脉动风荷载功率谱密度；

$L(z)$ —— 高度 z 处湍流长度尺度；

α —— 地面粗糙度类别指数，按表 5.2.5 选取；

β —— 风速剖面指数，按表 5.2.5 选取；

ζ ——烟囱阻尼比，按本标准 5.1.3 条选用；当钢烟囱设置阻尼器时，应附加阻尼器阻尼；

f_1 ——烟囱第一振型固有频率（Hz）；

$V(z)$ ——高度 z 处基本风压对应的设计风速（m/s）；

d_s ——高度 $z_s = 0.6h$ 处烟囱外直径（m）。

表 5.2.5 风荷载计算参数

地面粗糙度类别	α	β	κ	c	$z_{\min}$ （m）	H_a （m）
A	0.12	0.13	1.284	0.14	5	300
B	0.15	0.26	1.000	0.19	10	350
C	0.22	0.37	0.544	0.28	15	450

【条文说明】5.2.5 条文风振系数表达形式与《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 一致，但各参数取值和计算方式有所不同。《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 按 10m 高度名义湍流强度，本标准按 $z_s = 0.6h$ 计算确定实际湍流强度。条文所给风振系数计算公式相较于建筑结构，更适合沿高度质量和刚度变化较均匀的自立式钢烟囱类高耸结构。

5.2.6 塔架式与集束式钢烟囱在 z 高度处的风振系数 β_z 按下式确定：

$$\beta_z = 1 + \xi \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (5.2.6)$$

式中 ξ ——脉动增大系数，按本规范表 5.2.6-1 采用，其中 T 取结构的基本自振周期；

ε_1 ——风压脉动和风压高度变化等的影响系数，按本规范表 5.2.6-2 采用；

ε_2 ——振型、结构外形的影响系数，按本规范表 5.2.6-3 采用。

注：计算时，对地面粗糙度 B 类地区可直接带入基本风压，而对 A 类、C 类地区应按当地的基本风压分别乘以 1.28、0.54。

表 5.2.6-1 脉动增大系数 ξ

$W_0 T^2$ （ $kN \cdot s^2 / m^2$ ）	阻尼比	
	0.015	0.02
0.01	1.37	1.26
0.02	1.45	1.32
0.04	1.54	1.39
0.06	1.61	1.44
0.08	1.65	1.47
0.10	1.69	1.50
0.20	1.83	1.61
0.40	1.99	1.73
0.60	2.09	1.81

0.80	2.17	1.88
1.00	2.23	1.93
2.00	2.45	2.10
4.00	2.67	2.30
6.00	2.86	2.43
8.00	2.97	2.52
10.00	3.07	2.60
20.00	3.38	2.85
30.00	3.58	3.01

表 5.2.6-2 考虑风压脉动和风压高度变化的影响系数 ε_1

总高度 H (m) 地面粗糙度类别	10	20	40	60	80	100	150	200	250
A	0.81	0.76	0.70	0.65	0.61	0.58	0.51	0.46	0.43
B	0.93	0.86	0.77	0.71	0.66	0.62	0.55	0.49	0.45
C	1.48	1.30	1.12	1.00	0.92	0.85	0.73	0.64	0.57

表 5.2.6-3 考虑振型和结构外形的影响系数 ε_2

相对高度 z/H	结构顶部和底部的宽度比 $l_x(H) / l_x(0)$				
	1.0	0.5	0.3	0.2	0.1
1.0	1.00	0.88	0.76	0.66	0.56
0.9	0.92	0.86	0.81	0.79	0.84
0.8	0.83	0.82	0.81	0.83	0.94
0.7	0.73	0.75	0.77	0.81	0.91
0.6	0.63	0.66	0.69	0.73	0.81
0.5	0.51	0.55	0.58	0.62	0.65
0.4	0.40	0.42	0.45	0.49	0.48
0.3	0.28	0.28	0.32	0.35	0.31
0.2	0.17	0.18	0.19	0.21	0.29
0.1	0.07	0.07	0.07	0.08	0.12

【条文说明】5.2.6 条文的制定参考了国家标准《高耸结构设计标准》GB50135 相关内容。

5.2.7 当自立式钢烟囱临界风速小于 1.25 倍烟囱顶部设计风速，即满足式 (5.2.7-1) 条件时，应验算由涡激共振引起的烟囱横风向振动响应。

$$V_{cr,i} \leq 1.25 \cdot V(h) \quad (5.2.7-1)$$

$$V_{cr,i} = \frac{f_i \cdot d_{third}}{S_i} \quad (5.2.7-2)$$

$$V(h) = 40\sqrt{\mu_h \cdot w_0} \quad (5.2.7-3)$$

式中 $V_{cr,i}$ —— 烟囱第 i 阶临界风速 (m/s);

f_i —— 烟囱第 i 阶自振频率 (Hz);

S_i —— 斯托罗哈数, 取 $S_i = 0.2$;

$V(h)$ —— 烟囱顶部设计风速 (m/s);

μ_h —— 烟囱顶部风压高度变化系数;

d_{third} —— 烟囱顶部 1/3 高范围加权平均外直径 (m)。

【条文说明】5.2.7 条文与我国《建筑结构荷载规范》GB50009 不同, 当自立式钢烟囱临界风速小于 1.25 倍烟囱顶部设计风速, 验算涡激共振引起的烟囱横风向振动响应, 该判断方式与国际标准一致。我国《建筑结构荷载规范》GB50009 是根据不同雷诺数情况, 按亚临界、跨临界和超临界来判断是否进行共振响应验算, 并规定超临界范围共振可不作处理。《建筑结构荷载规范》的判断方法及处理结果与实际工程经常不符, 造成不安全, 乃至钢烟囱破坏事故的发生。经实际破坏案例计算分析, 许多共振破坏发生在超临界范围。

5.2.8 自立式钢烟囱涡激共振响应可采用下列等效风荷载进行简化计算:

$$w_{Lk,i}(z) = |\lambda_i| \cdot \frac{V_{cr,i}^2 \cdot \varphi_i(z)}{12800\zeta_i} \quad (5.2.8-1)$$

$$\lambda_i = \lambda_i\left(\frac{h_1}{h}\right) \quad (5.2.8-2)$$

$$h_1 = h \left(\frac{V_{cr,i}}{1.25 \cdot V(h)} \right)^{1/\alpha} \quad (5.2.8-3)$$

式中 $w_{Lk,i}(z)$ —— z 高度处第 i 阶振型横风向涡激共振等效风压标准值 (kN/m^2);

ζ_i ——第 i 阶振型阻尼比, 对于第一振型按本标准 5.1.3 条选用。对于高振型的阻尼

比宜通过实测确定, 如无实测资料, 可按第一振型选用;

h_1 ——涡激共振荷载范围起点高度 (m);

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

$\varphi_i(z)$ ——在 z 高度处结构的第 i 阶振型系数;

$\lambda_i\left(\frac{h_1}{h}\right)$ —— i 振型计算系数, 根据“锁住区”起点高度 h_1 与烟囱总高度 h 的比值, 按表 5.2.8

选用。

表 5.2.8 $\lambda_i(\frac{h_1}{h})$ 计算系数

振型 序号	h_1 / h										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	1.56	1.55	1.54	1.49	1.42	1.31	1.15	0.94	0.68	0.37	0
2	0.83	0.82	0.76	0.60	0.37	0.09	-0.16	-0.33	-0.38	-0.27	0

注：中间值可采用线性插值计算。

5.2.9 当串列布置的两个自立式钢烟囱（见图 5.2.3-2）的间距与烟囱直径之比小于 15 时，应按以下规定考虑上风向烟囱对下风向烟囱造成的横风向响应增大系数 K_L ：

- 1 当 $\frac{s}{d} \geq 15$ 时，取 $K_L=1.0$ ；
- 2 当 $\frac{s}{d} = 10$ 时，取 $K_L=1.5$ ；
- 3 当 $10 < \frac{s}{d} < 15$ 时，取 $K_L=2.5-0.1 \cdot \frac{s}{d}$ ；
- 4 当 $\frac{s}{d} < 10$ 时，应设置阻尼器，且斯柯顿数 Sc 不宜小于 25。

注：当两个钢烟囱直径不等时，上述计算公式的 d 为上风向烟囱直径或较小烟囱直径。

【条文说明】5.2.9 当两个自立式钢烟囱串列布置时，处于上风向且在高度相似或更小的烟囱，其“尾流干扰”效应会显著增加下风向烟囱的横风响应，故应验算这一不利影响效应。

5.2.10 对于封闭式塔架钢烟囱，其横风向风振计算可按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 的规定原则进行验算，并宜通过风洞试验或可靠资料确定有关计算系数，当无试验值时，可按下列规定取值：

- 1 斯托罗哈数取 $St = 0.15$ ；
- 2 方形截面以及长宽比 $1 \leq D/B \leq 2$ 的矩形截面，其横风向升力系数取 $C_L=0.6$ 。

【条文说明】5.2.10 由于建筑立面的需要，许多塔架式钢烟要进行装饰性围护设计，形成封闭式的正方形或矩形塔，此时应进行横风向共振验算，条文给出验算时的主要参数取值。

5.2.11 当发生横风向共振时，烟囱顺风向与横风向组合计算风压应按以下规定进行计算。

- 1 当横风向风荷载占主导时：

$$w(z) = \sqrt{[0.75 \cdot \mu_s \cdot \mu(z) \cdot w_{10}]^2 + w_{Lk,i}(z)^2} \quad (5.2.11-1)$$

- 2 当顺风向风荷载占主导时：

$$w(z) = \sqrt{[\mu_s \cdot \mu(z) \cdot w_{10}]^2 + w_{Lk,i}(z)^2} \quad (5.2.11-2)$$

式中 $w(z)$ —— 烟囱顺风向与横风向组合计算风压标准值 (kN/m^2)。

w_{10} —— 横风向共振时所对应的 10m 高度处顺风向计算风压标准值 (kN/m^2)。

【条文说明】5.2.11 在横风荷载与对应的顺风荷载组合时，由于顺风向荷载的脉动分量峰值和横风向荷载峰值不会同时出现，因此在计算风荷载合力时，忽略了顺风向荷载的脉动分量峰值影响，按 0.75 倍顺风荷载折减近似选取。但当横风荷载小于顺风荷载时，其组合值可能会小于单独顺风荷载值，因此，组合分别给出了顺风荷载主导与横风荷载主导两种情况。

5.2.12 钢烟囱涡激共振所产生的横风向最大振幅可按以下公式进行估算，并满足本标准第 3.0.19 条规定限值。

$$y_i(z) = k_{pi} \cdot \sigma_{yi} \cdot \varphi_i(z) \quad (5.2.12-1)$$

$$\sigma_{yi} = d_{third} \cdot \sqrt{c_{i1} + \sqrt{c_{i1}^2 + c_{i2}}} \quad (5.2.12-2)$$

$$k_{pi} = \sqrt{2} \cdot \left\{ 1 + 1.2 \cdot \arctan \left[0.75 \cdot \left(\frac{Sc_i}{4 \cdot \pi \cdot K_{ai}} \right)^4 \right] \right\} \quad (5.2.12-3)$$

$$c_{i1} = 0.5 \cdot \alpha_{Li}^2 \cdot \left(1 - \frac{Sc_i}{4 \cdot \pi \cdot K_{ai}} \right) \quad (5.2.12-4)$$

$$c_{i2} = \frac{\alpha_{Li}^2 \cdot C_{ai}}{K_{ai}} \quad (5.2.12-5)$$

$$\alpha_{Li} = \frac{0.4 \cdot f_1}{f_i} \quad (5.2.12-6)$$

$$K_{ai} = \begin{cases} K_{a,\max,i} \cdot (1 - 3 \cdot I_v) & 0 \leq I_v \leq 0.25 \\ 0.25 \cdot K_{a,\max,i} & I_v > 0.25 \end{cases} \quad (5.2.12-7)$$

$$K_{a,\max,i} = \begin{cases} 2.8 & Re_i \leq 2 \cdot 10^5 \\ 0.9 & Re_i > 5 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (5.2.12-8)$$

$$C_{ai} = \frac{1.42 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_a \cdot \lambda \cdot d_{third} \cdot C_{Li}^2}{St^4 \cdot m_{e,i} \cdot B \cdot \int_0^h \varphi_i^2(z) \cdot dz} \quad (5.2.12-9)$$

$$C_{Li} = \begin{cases} 0.7 & Re_i \leq 2 \cdot 10^5 \\ 0.2 & Re_i > 5 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (5.2.12-10)$$

$$B = 0.1 + I_v \quad B \leq 0.35 \quad (5.2.12-11)$$

$$Sc_i = \frac{2 \cdot \zeta \cdot m_{e,i}}{\rho_a \cdot d_{third}} \quad (5.2.12-12)$$

$$m_{e,i} = \frac{\int_0^h m(z) \cdot \varphi_i^2(z) \cdot dz}{\int_0^h \varphi_i^2(z) \cdot dz} \quad (5.2.12-13)$$

$$Re_i = 69000 \cdot V_{cr,i} \cdot d_{third} \quad (5.2.12-14)$$

注：(5.2.12-8)和(5.2.12-10)雷诺数中间值所对应数值可通过线性对数内插法获得。

式中 $y_i(z)$ —— 烟囱第 i 阶振型高度 z 处单值振幅 (m)；

σ_{yi} —— 第 i 阶振型位移标准差；

k_{pi} —— 峰值系数；

K_{ai} —— 第 i 阶振型气动阻尼参数；

B —— 升力谱宽度；

I_v —— 烟囱顶部湍流强度，按公式 (5.2.5-2) 计算；

λ —— 荷载关联长度系数，取 1.0；

f_i —— 烟囱第 i 阶自振频率 (Hz)；

$V_{cr,i}$ —— 烟囱第 i 阶临界风速 (m/s)；

Sc_i —— 第 i 阶斯柯顿数；

ζ —— 烟囱阻尼比，按本标准 5.1.3 条选用；当钢烟囱设置阻尼器时，应附加阻尼器阻尼；

ρ_a —— 空气质量密度，取 $\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ 。

$m(z)$ —— 高度 z 处烟囱单位高度质量 (kg/m)；

$m_{e,i}$ —— 烟囱单位高度等效质量 (kg/m)；

$\varphi_i(z)$ —— 钢烟囱第 i 阶振型系数。

【条文说明】5.2.12 为减少疲劳破坏和不安全感，由于横风向效应或空气动力造成的最大允许振幅应满足规定限值或业主要求。

5.2.13 钢烟囱发生横风向涡激共振时，烟囱单位高度惯性力可按式计算：

$$F_i(z) = \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_i} \right)^2 \cdot m(z) \cdot y_i(z) \quad (5.2.13)$$

式中 $F_i(z)$ ——第 i 阶振型烟囱高度 z 处单位高度惯性力 (N/m)；

T_i ——第 i 阶振型烟囱自振周期 (s)；

$m(z)$ ——烟囱高度 z 处单位高度质量 (kg/m)；

$y_i(z)$ ——烟囱高度 z 处振幅 (m)，按本标准公式(5.2.12-1)计算。

5.2.14 烟囱周围不均匀的风压分布所产生的垂直截面上的环向弯矩可按式计算：

$$M_\theta = 0.08 \cdot \beta_g \mu_z w_0 d(z)^2 \quad (5.2.14)$$

式中 M_θ ——垂直截面上的环向弯矩 (kN·m/m)；

β_g ——时距为 5 秒阵风对应的阵风系数，取 $\beta_g = 1.96$ 。

5.2.15 钢烟囱环向椭圆共振临界风速可按下列公式计算：

$$V_{\theta cr} = \frac{f \cdot d_{third}}{2 \cdot St} \quad (5.2.15-1)$$

$$f = \frac{0.5t}{d_{third}^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} \quad (5.2.15-2)$$

式中 $V_{\theta cr}$ ——烟囱环向椭圆共振临界风速 (m/s)；

f ——无加劲钢烟囱环向椭圆自振频率 (Hz)；

E ——烟囱筒壁钢材弹性模量 (Pa)；

t ——烟囱上部 1/3 高度筒壁平均厚度 (m)；

ρ_s ——烟囱筒壁钢材密度 (kg/m^3)。

5.3 地震作用

5.3.1 本节的规定适用于抗震设防烈度为 6 度到 9 度地区的烟囱地震作用计算。本节未做规定的均按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 的规定执行。钢烟囱的阻尼比按本标准 5.1.3 条执行。

5.3.2 水平地震作用可按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 规定的振型分解反应谱法计算。高度不超过 150m 时，可采用前 5 个振型组合；高度超过 150m 时，可采用前 10 个振型组合。

5.3.3 烟囱竖向地震作用标准值可按下列方法确定。

1 烟囱根部的竖向地震作用按下式计算：

$$F_{Ev0} = \pm 0.75 \alpha_{v\max} G_E \quad (5.3.3-1)$$

2 其余各截面按下列公式计算：

$$F_{Evik} = \pm \eta \left(G_{iE} - \frac{G_{iE}^2}{G_E} \right) \quad (5.3.3-2)$$

$$\eta = 4(1+C)\kappa_v \quad (5.3.3-3)$$

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

时，取 $F_{Evik} = F_{Ev0}$ ；

G_{iE} ——计算截面 i 以上的烟囱重力荷载代表值 (kN)，取截面 i 以上的重力荷载标准值与平台活荷载组合值之和，活荷载组合值系数按本标准表 3.0.10 条的规定采用；套筒或多筒式烟囱，当采用自承重式内筒时， G_{iE} 不包括内筒重量；当采用平台支承内筒时，则平台及内筒重量通过平台传给外承重筒，在 G_{iE} 中应计入平台及内筒重量；

G_E ——基础顶面以上的烟囱总重力荷载代表值 (kN)，取烟囱总重力荷载标准值与各层平台活荷载组合值之和，活荷载组合值系数按本标准表 3.0.10 条的规定采用；套筒或多筒式烟囱，当采用自承重式内筒时， G_E 不包括内筒重量；当采用平台支承内筒时，则平台及内筒重量通过平台传给外承重筒，在 G_E 中应计入平台及内筒重量；

C ——结构材料的弹性恢复系数，取 $C = 0.8$ ；

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

$\alpha_{v\max}$ ——竖向地震影响系数最大值，按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011

的规定，取水平地震影响系数最大值的 65%。

5.4 温度作用

5.4.1 钢烟囱筒身各点的受热温度（图 5.4.1-1 或图 5.4.1-2）可按下式计算：

$$T_{cj} = T_g - \frac{T_g - T_a}{R_{tot}} (R_{in} + \sum_{i=1}^j R_i) \quad (5.4.1)$$

式中 T_{cj} ——计算点 j 的受热温度（℃）；

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（ $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ ）；

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

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

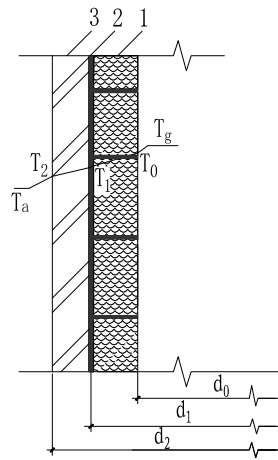


图 5.4.1-1 单筒式钢烟囱传热计算

1—硼硅酸盐泡沫玻璃砖或浇注料内衬；1—粘结剂或防腐隔离层；3—钢筒壁

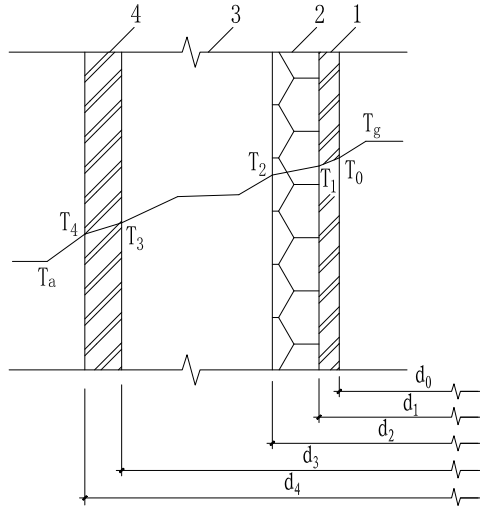


图 5.4.1-2 套筒式钢烟囱传热计算

1—内筒； 2—保温层； 3—空气层； 4—钢筒壁

5.4.2 单筒式钢烟囱内衬、筒壁热阻以及总热阻可分别按下列公式计算：

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_{i=1}^2 R_i + R_{ex} \quad (5.4.2-1)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in} d_0} \quad (5.4.2-2)$$

$$R_i = \frac{l}{2\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_{i-1}} \quad (5.4.2-3)$$

$$R_{ex} = \frac{l}{\alpha_{ex} d_3} \quad (5.4.2-4)$$

式中： R_i ——钢烟囱筒身第 i 层结构热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)；

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

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

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

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

d_0 、 d_1 、 d_2 ——分别为内衬、钢筒壁内直径及筒壁外直径 (m) (图 5.4.1-1)；

d_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 ——分别为内筒、保温层、空气层、钢筒壁内直径及筒壁外直径 (m)

(见图 5.4.1-2)。

5.4.3 套筒式钢烟囱内筒、保温层、筒壁热阻以及总热阻可分别按下列公式进行计算：

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_{i=1}^4 R_i + R_{ex} \quad (5.4.3-1)$$

$$R_{in} = \frac{l}{\beta \alpha_{in} d_0} \quad (5.4.3-2)$$

$$R_1 = \frac{l}{2\beta\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (5.4.3-3)$$

$$R_2 = \frac{l}{2\beta\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (5.4.3-4)$$

$$R_3 = \frac{l}{\alpha_s d_2} \quad (5.4.3-5)$$

$$R_4 = \frac{l}{2\lambda_4} \ln \frac{d_4}{d_3} \quad (5.4.3-6)$$

$$R_{ex} = \frac{l}{\alpha_{ex} d_4} \quad (5.4.3-7)$$

$$\alpha_s = 1.211 + 0.0681T_g \quad (5.4.3-8)$$

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

$$\beta = 0.5;$$

α_s ——有通风条件时，外筒内表面与内筒外表面的传热系数。

5.4.4 内衬内表面的传热系数和筒壁外表面的传热系数，可分别按表 5.4.4-1 及表 5.4.4-2 采用。

表 5.4.8-1 内衬内表面的传热系数 α_{in}

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

表 5.4.8-2 钢筒壁外表面的传热系数 α_{ex}

季 节	传热系数[W / (m ² ·K)]
夏 季	12
冬 季	23

6 钢烟囱防腐

6.1 一般规定

6.1.1 在设计文件中,应明确钢烟囱的设计使用条件以及使用过程中对烟囱的腐蚀进行定期检查和维护要求。

【条文说明】6.1.1 防腐是钢烟囱设计的一项重要内容,直接关系到烟囱的承载能力及耐久性能,故在设计文件中,应明确烟囱设计使用条件,如烟气温、湿度以及烟气腐蚀等级等。

6.1.2 钢烟囱防腐设计应考虑烟囱全寿命周期内的检查、维修和更换的需要。其内筒或内衬应根据烟囱重要性、烟气腐蚀等级以及维修条件等因素确定防腐设计工作年限,并依据设计工作年限合理选择内筒或内衬材料。当内筒的设计工作年限与主体钢结构设计工作年限不同时,内筒的设计应遵循便于更换的基本设计原则。

【条文说明】6.1.2 钢烟囱内筒或内衬的使用寿命基本决定了整个钢烟囱的设计工作年限,其内筒或内衬应根据烟囱重要性、烟气腐蚀等级以及维修条件等合理确定防腐设计工作年限,并依据设计工作年限合理选择内筒或内衬材料。经调研与检查发现,既有钢烟囱内筒腐蚀破坏情况严重,但由于内外筒间距狭小及构造特点,内筒损坏后,难以修复或更换,造成整个烟囱报废,因此,要求当内筒的设计工作年限与主体结构设计工作年限不同时,内筒的设计应遵循便于更换的基本设计原则。烟囱主体结构主要是指钢烟囱筒壁结构或钢塔架等与烟气不直接接触的主体承重结构。

6.1.3 确定烟气露点温度和防腐措施时,烟气温度应按其工作温度波动范围的下限值采用。

6.2 烟气类别的划分

6.2.1 烟气类别应根据烟气温度和湿度按下列规定划分:

- 1 相对湿度小于 60%、温度不小于 90℃的烟气为干烟气;
- 2 相对湿度大于 60%、温度大于 60℃但小于 90℃的烟气为潮湿烟气;
- 3 相对湿度为饱和状态、温度不大于 60℃的烟气为湿烟气。

【条文说明】6.2.1 为了确定烟气腐蚀等级和防腐措施,本标准对烟气类别的划分进行了定

义。

6.2.2 各种烟气腐蚀等级的确定应符合以下规定：

1 烟气温度高于酸露点温度 10℃ 以上，且烟气主要腐蚀介质为 SO₂ 的干烟气，其腐蚀等级可按以下规定划分：

(1) 当烟气的 SO₂ 含量小于 750ppm 或 SO₃ 含量小于 15ppm 时，为弱腐蚀性干烟气；

(2) 当烟气的 SO₂ 含量大于 750ppm 但不大于 1500ppm，或 SO₃ 含量为 15ppm~30ppm 时，为中等腐蚀性干烟气；

(3) 当烟气的 SO₂ 含量大于 1500ppm 或 SO₃ 含量大于 30ppm 时，为强腐蚀性干烟气。

2 含氯化物或氟化物烟气腐蚀等级可按以下方法划分：

(1) 浓度超过以下限制时，烟气为相应烟气类别的强腐蚀性烟气：

氟化氢 (HF)： 300mg/Nm³

氯元素 (Cl₂)： 1300mg/Nm³

氯化氢 (HCl)： 1300mg/Nm³

(2) 氯化氢的浓度小于 30mg/Nm³，或氟化氢的浓度小于 5mg/Nm³，烟气为相应烟气类别的弱腐蚀性烟气；

(3) 处于中间浓度时，烟气为相应烟气类别的中等腐蚀性烟气。

3 潮湿烟气的腐蚀等级：湿法脱硫烟气经过再加热后烟气、垃圾焚烧或垃圾发电烟气应为强腐蚀性潮湿烟气。

4 湿烟气腐蚀等级：湿法脱硫烟气为强腐蚀性湿烟气。

5 当烟气温度低于烟气的露点温度，且烟气腐蚀介质浓度满足下列之一者，均为相应烟气类别的强腐蚀等级烟气：

(1) SO₃ 含量大于 10ppm；

(2) 氯化氢或氯元素的浓度大于 30 mg/Nm³；

(3) 氟化氢的浓度大于 5 mg/Nm³。

【条文说明】6.2.2 相较于《烟囱工程技术标准》GB/T 50051-2021，条文对干烟气腐蚀等级进行了调整，并考虑了露点温度的影响，划分更科学和准确。氯化物或氟化物存在于烟气冷凝液中时，可能会大幅增加腐蚀速率。卤素浓度一旦超越强腐蚀性烟气限制，即使在非酸露点温度条件下，卤素化合物（尤其是氟化物和氯化物）即便在相对较高的温度下也能引发严重的金属腐蚀，在这种情况下，烟囱材料选择、防腐设计及维护措施应相应加强，以应对更高的腐蚀风险，故条文增加了氯化物或氟化物烟气腐蚀等级的划分，为烟囱防腐材料的确定提供判断依据。

6.3 钢烟囱防腐设计

6.3.1 钢烟囱内衬材料的选择应根据烟气类别和腐蚀等级按表 6.3.1-1~表 6.3.1-3 的规定确定，同时应符合以下规定：

1 当两台及多台炉共用一个排烟筒时，内衬材料的选择应按表 6.3.1~1 表 6.3.1-3 的要求提高一个等级选用。

2 烟气采用氨法脱硫工艺不得采用钛板内衬；存在干湿交替或混合烟气（如脱硫烟气切换旁路烟道运行）等工况不宜采用钛板内衬。

3 内衬材料性能应与烟囱实际运行工况和设计工作年限相适应。

表 6.3.1-1 脱硫烟气防腐材料选用总表

内衬或内筒材料	湿 烟 囱	潮湿烟气			干烟囱			优 点	缺 点	备 注
		强 腐 蚀	中 腐 蚀	弱 腐 蚀	强 腐 蚀	中 腐 蚀	弱 腐 蚀			
缠绕纤维增强塑料内筒	○	○	△	□	■	■	■	良好的耐腐蚀性能；容易安装收酸装置。	耐高温性能差，最高温度不宜大于 100℃；抗压性能较差；缠绕质量控制要求高；需要设膨胀节。	适合湿法脱硫玻璃钢内筒烟囱。
硼硅酸盐泡沫玻璃砖内衬	○	○	△	□	□	□	□	良好的耐腐蚀性能；良好保温性能；良好的表面性能。	安装中不能造成物理或机械损伤；耐磨性能低。	适合较高的湿烟气流速；适合单筒式或内筒式烟囱。
C276 合金	○	○	△	□	□	□	□	优异的耐腐蚀性能。	焊缝控制严格；需要酸洗处理；造价高；有腐蚀凝缩富集现象。	适合套筒或多管式烟囱，可参照表 6.3.1-2 选用。
钛板内衬	○	○	△	□	■	■	■	优异的耐腐蚀性能。	焊缝控制严格；氢氟酸有强烈腐蚀；氟化物（如氟化铵）会促使钛在 HNO ₃ 、HCl、醋酸中腐蚀加速。	适合套筒或多管式烟囱。需按表 6.3.1-3 选用不同级别钛板。
防腐涂层	▲	▲	△	△	△	○	○	防腐性能良好；适合钢烟囱内外防腐。	基层处理要求严格；耐久性能差，需要经常维修；可供选择空间有限。	适合空气或烟气湿度较低的地区或环境。
不锈钢	×	×	▲	△	△	○	○	耐大气腐蚀性能优异；耐高温。	对于盐酸及含氯离子介质的烟气不耐腐蚀；不适合	适合套筒或多管式干烟气烟囱。需

									排放垃圾焚烧及医疗废弃物燃烧烟气；普通不锈钢不适合烟气含碱情况。	按表 6.3.1-2 选用不同级别不锈钢。
轻质防腐砖	×	×	△	○	△	△	△	在相对湿度较低的烟气环境中有良好的耐腐蚀性。	安装中不能造成物理或机械损伤；在湿烟气环境轻质防腐砖具有吸水性；粘结剂非沥青基，耐腐蚀性略低。	适用单筒或套筒烟囱。
轻质、耐酸浇筑料	×	×	▲	△	△	△	△	防腐性能好。	浇注料开裂现象严重，会发生烟气渗漏腐蚀。	适合单筒式烟囱。

注：1 表中符号表示：“○”为建议采用；“×”为不应采用；“△”为可采用；“▲”为谨慎采用；“□”为可采用但经济性

较差；“■”可采用但除了经济性差外，尚应注意较高温度时，材料的适用性。

2 在有可靠试验数据及成功工程案例时，允许选用其他新型防腐材料。

表 6.3.1-2 含氯化物或氟化物脱硫烟气防腐材料选用表

腐蚀介质		浓 度 (ppm)											
氯化物		<1,000		<5,000		<10,000		<50,000		<100,000		<200,000	
氟化物		<400	<1,000	<400	<1,000	<400	<1,000	<400	<1,000	<400	<1,000	<400	<1,000
PH	6	316L	317LMN 或双相		317LMN 或超级双相			超级奥氏体		—			
	4	317LMN 或双相		超级双相					镍合金 625				
	2	超级奥氏体 或超级双相		超级奥氏体				C276 等					
	1	超级奥氏 体	镍合金 (C276 等)										

注：1、“超级奥氏体”表示超级奥氏体不锈钢；“双相”为双相不锈钢；“超级双相”为超级双相不锈钢；
2、脱硫烟气温度 50℃-65℃。

表 6.3.1-3 钛合金在含氯化物脱硫气条件下的选用表

氯化物	浓度（ppm）														
	<5, 000			<10, 000			<50, 000			<100, 000			<200, 000		
温度℃	<80	80 ~ 120	120 ~ 160	<80	80 ~ 120	120 ~ 160	<80	80 ~ 120	120 ~ 160	<80	80 ~ 120	120 ~ 160	<80	80 ~ 120	120 ~ 160
pH3.0	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
pH2.5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
pH 2.0	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B
pH1.5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B
pH 1.0	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C
pH0.5	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C
pH 0.0	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C

注：A——1 级或 2 级工业级纯钛；

B——钛钼合金（0.05%） ASTM16 或 17；

C——钛钼合金（0.15%） ASTM7 或 11。

【条文说明】6.3.1 烟囱腐蚀破坏主要与烟气类别及其腐蚀性有关，钢烟囱腐蚀破坏的后果要比钢筋混凝土类烟囱更为严重，故内衬材料的选择应更加严格。条文在《烟囱工程技术标准》 GB/T 50051-2021 的基础上，根据钢烟囱的特点及实践经验进行了细化和调整。表中“玻璃钢内筒”是指机械缠绕式玻璃钢内筒，喷涂类树脂纤维内衬应按表中“防腐涂层”适用条件选用，表中“内筒式”包含套筒式或多管式内筒。当两台及多台炉共用一个排烟筒时，内衬材料的选择应按表 3.0.4 的要求提高一个等级选用，是指选用同类烟气的较高腐蚀等级或按腐蚀性更强的一类烟气选用。

美国电力研究院（EPRI）编制的“湿烟囱设计导则（WET STACKS DESIGN GUIDE）”中的“排烟筒结构材料表”中，1996年版列有“钛在碳钢上Titanium Grade 2 on Carbon Steel”项，2012年版中未列入。2004年国际工业烟囱协会（CICIND）《金属材料手册》规定对于湿法脱硫下游有烟气温度达到90℃工况时不应采用纯工业钛，宜采用钛钎合金。鉴于国内仍有大量钛板内衬排烟筒应用，本次标准修订仍保留了钛板内衬，但根据国内外经验，建议当采用该方案时，注意确保钛钢复合板的钛板焊缝质量，并在特殊情况下加以限制，如氨法脱硫烟气不得采用、干湿交替烟气不宜采用。条文中轻质防腐砖通常指国产泡沫玻璃砖防腐系统。

6.3.2 钢烟囱非直接接触烟气的主体结构以及附属构件的防腐蚀设计应遵循现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046的有关规定。附属构件宜采用热浸镀锌长效防腐措施。当主体结构采用涂层防腐蚀时，其设计工作年限应不低于10年，涂层设计应包括：涂料名称和型号、涂层配套要求、涂层厚度、颜色和基层除锈等级等，且明确规定涂装工艺。涂层厚度应不小于表6.3.2的规定值。

表 6.3.2 钢烟囱防腐涂层最小厚度(μm)

钢烟囱所处环境	工业大气	一般化工大气	严重化工大气
腐蚀等级	中等腐蚀	中等腐蚀	强腐蚀
钢烟囱筒壁外侧及塔架主体	200	240	280
塔架辅助结构	160	200	240
采用热镀锌构件	镀层厚度不宜小于 85 μ m		
采用热喷锌（铝）复合涂层构件	金属复合涂层厚度不宜小于 120 μ m		
注：1、涂层厚度包括涂料层的厚度或金属层与涂料层复合的厚度。 2、热镀锌构件应符合现行国家标准《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法》GB/T 13912 的有关规定。			

6.3.3 钢材表面原始锈蚀等级和钢材除锈等级标准应符合现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定》GB/T 8923的规定。钢烟囱主体结构和附属结构的材料不应采用原始锈蚀等级为D级的钢材制作。钢烟囱主体结构的基层处理宜采用喷砂除锈，除锈等级不宜低于Sa2.5，塔架辅助构件基层处理可采用手工和动力工具除锈，除锈等级不宜低于St2。

6.3.4 不锈钢或合金钢构件与碳钢连接时，宜采用螺栓连接，并设绝缘垫圈。当考虑焊接过

程、电极选用等特殊焊接控制技术时，允许采用焊缝连接。

【条文说明】6.3.4 为了避免由于电位差造成的集中腐蚀，螺栓连接应设绝缘垫圈。

6.3.5 大气环境下，筒壁外侧腐蚀裕量 C 不宜小于表 6.3.5 的规定值。涂漆碳钢，其涂层质量及厚度应满足烟囱使用环境和正常维护要求。

表 6.3.5 钢烟囱的腐蚀裕量 C 允许值（mm）

结构类别	钢材及防护类型	腐蚀裕量 C	备 注
钢烟囱筒壁	涂漆碳钢	0	涂装适合环境的油漆
	保温涂漆碳钢	1	外部有保温的涂漆碳钢内筒
	无防护碳钢	3	无防护涂层等保护
	无防护耐候钢	1	无防护涂层等保护
	无防护不锈钢	0	无防护涂层等保护
钢塔架	热浸镀锌碳钢	1	塔架顶部烟羽影响范围
		0	其余部分

【条文说明】6.3.5 条文中所给防腐裕量是指正常大气环境下规定值，当烟囱位于海洋气候环境或高湿等腐蚀环境，应适当增加 C 值。对于有保温的涂漆碳钢内筒，由于保温的存在，碳钢内筒外表面的维护和检查较为困难，其腐蚀裕量比无保温涂漆碳钢增加 1mm。

6.3.6 当钢烟囱的筒壁或内筒采用钛-钢复合板时，复合后钛板厚度不宜小于 1.6mm。

【条文说明】6.3.6 对于钛-钢复合钢板，国内钛板厚度通常采用 1.2mm，对焊接质量要求较高，质量保证率较难控制。相较于通常采用钢筋混凝土外筒的钛-钢复合板内筒，钢烟囱一旦出现问题，其危害性更大。为保证钢烟囱安全，并参考美国湿烟囱导则《Revised Wet Stack Design Guide》（2012）的规定，本标准将钛板厚度提高到 1.6mm。

6.3.7 钢结构防腐设计应符合以下规定：

- 1 当采用型钢组合构件时，型钢间的空隙宽度宜满足防腐层施工、检修和维修的要求；
- 2 不同金属材料接触会加速腐蚀时，应在接触部位采用隔离措施；
- 3 焊条、螺栓、垫圈、节点板等连接构件的耐腐蚀性能，不应低于主材材料。螺栓直径不应低于 12mm。垫圈不应采用弹簧垫圈。螺栓、螺母和垫圈应采用镀锌等防腐方法防护；
- 4 避免出现难于检查、清理、积留湿气和烟灰的死角或凹槽；闭口截面构件应沿全长和端部焊接封闭；热镀锌杆件内外防腐处理时，管端不应封闭；
- 5 钢柱脚底面应高出室外地面不宜小于 300mm。

6.3.8 钢烟囱保温材料的防腐、防火性能应与钢烟囱防腐、防火措施相匹配，并应具有相应环境下的耐久性。

6.3.9 非直接接触烟气的钢结构选材应符合以下规定：

- 1 处于大气干燥地区和一般地区的钢烟囱，其钢材可选用碳素结构钢或低合金高强度结构钢。

- 2 处在大气潮湿地区的钢烟囱，筒壁可采用焊接结构耐候钢。
- 3 烟囱筒首外部 1.5 烟囱直径范围宜采用防腐等级不低于 316L 的不锈钢。

6.3.10 钢烟囱防腐涂装同一配套中的底漆、中间漆和面漆应有良好的相容性。在有机富锌或无机富锌底涂上，宜选用环氧云铁或环氧铁红的涂料；对于锌、铝和含锌、铝的金属层钢材，其表面应采用环氧底涂封闭，底涂料的颜料应采用锌黄类。

【条文说明】6.3.10 锌黄的化学成分为铬酸锌，由它配置而成的锌黄底涂料适合钢铁表面。

6.3.11 湿烟囱顶部平台和爬梯应考虑烟羽下洗造成的腐蚀影响，采取防腐蚀隔离措施。

7 自立式钢烟囱

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于单筒式、套筒式以及多管式钢烟囱设计。钢烟囱除应分别进行强度和变形计算外，尚需根据振动情况进行疲劳验算。当采用套筒式以及多管式钢烟囱时，内筒和外筒之间的间距应满足本标准第 8.0.4 条的有关规定。

7.1.2 钢烟囱可采用以下减振措施减少横风向共振响应：

- 1 当斯柯顿数 $Sc_i \leq 5$ 时，应设置 TMD 或 TLD 减振装置。
- 2 当 $5 < Sc_i \leq 10$ 时，宜设置 TMD 或 TLD 减振装置。
- 3 当 $10 < Sc_i \leq 15$ 时，可采用破风圈装置进行减振。
- 4 当 $Sc_i > 15$ 时，可不采取专门减振措施。

【条文说明】7.1.2 为避免钢烟囱在横风向共振情况下发生疲劳破坏，通常需要一个较大的斯柯顿数 Sc_i ，如 $Sc_i > 15$ 。然而，在没有阻尼装置来显著降低横风振动的情况下，这可能需要较大的壁厚，使得设计不经济，因此，设置阻尼装置可以使得钢烟囱设计更加经济和安全。

7.2 筒壁承载力计算

7.2.1 在弯矩和轴向力作用下，钢烟囱强度应满足下式要求：

$$\gamma_0 \cdot \sigma_i \leq f_t \quad (7.2.1-1)$$

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_{ni}} + \frac{M_i}{\gamma_n \cdot W_{ni}} \quad (7.2.1)$$

式中 σ_i ——钢烟囱水平计算截面 i 的竖向应力设计值 (N/mm^2)；

M_i ——钢烟囱水平计算截面 i 的弯矩设计值 ($N \cdot mm$)；

N_i ——钢烟囱水平计算截面 i 的轴力设计值 (N)；

A_{ni} ——计算截面 i 的净截面面积 (mm^2)；

W_{ni} ——计算截面 i 的净截面抵抗矩 (mm^3)；

f_t ——温度作用下钢材抗拉或抗压强度的设计值 (N/mm^2)；

γ_0 ——烟囱重要性系数，按本标准 3.0.6 条选取；

γ_n ——烟囱截面塑性发展系数，取 $\gamma_n = 1.0$ 。

7.2.2 在竖向与环向应力作用下，钢烟囱强度应满足下式要求：

$$\gamma_0 \cdot \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_{\theta w}^2 - \sigma_i \cdot \sigma_{\theta w} + 3 \cdot \tau^2} \leq f_t \quad (7.2.2-1)$$

$$\sigma_{\theta w} = \frac{M_{\theta}}{W_{\theta i}} \quad (7.2.2-2)$$

$$\tau = \frac{2 \cdot V_i}{A_{ni}} \quad (7.2.2-3)$$

式中 M_{θ} ——环向风弯矩设计值 (N.mm/m)，见公式 (5.2.1)；

$W_{\theta i}$ ——筒壁竖向截面单位高度抵抗矩 (mm³/m)；

$\sigma_{\theta w}$ ——环向风压在筒壁竖向截面所产生的应力 (N/mm²)，取与 σ_i 相反符号；

V_i ——计算截面 i 的剪力 (N)；

τ ——计算截面 i 的剪应力设计值 (N/mm²)。

7.2.3 在弯矩和轴向力作用下，钢烟囱稳定验算应符合下列计算公式：

$$\sigma_N + \sigma_M \leq \frac{\sigma_k}{\gamma_N} \quad (7.2.3-1)$$

$$\sigma_N = \frac{N_i}{A_{ni}} \quad (7.2.3-2)$$

$$\sigma_M \leq \frac{M_i}{W_{ni}} \quad (7.2.3-3)$$

$$\sigma_k = \begin{cases} 0.75 f_t / \beta^2 & \beta > \sqrt{2} \\ (1.0 - 0.412 \beta^{1.2}) f_t & \beta \leq \sqrt{2} \end{cases} \quad (7.2.3-4)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{f_t}{\alpha \sigma_{crt}}} \quad (7.2.3-5)$$

$$\sigma_{crt} = 0.605 \cdot \frac{E_t \cdot t}{r} \quad (7.2.3-6)$$

$$\alpha = \left(1.5 - \frac{w}{0.02l} \right) \cdot \frac{\alpha_N \cdot \sigma_N + \alpha_M \cdot \sigma_M}{\sigma_N + \sigma_M} \quad (7.2.3-7)$$

$$\alpha_N = \begin{cases} \frac{0.83}{\sqrt{1 + \frac{r}{100t}}} & \frac{r}{t} \leq 212 \\ \frac{0.7}{\sqrt{0.1 + \frac{r}{100t}}} & \frac{r}{t} > 212 \end{cases} \quad (7.2.3-8)$$

$$\alpha_M = 0.189 + 0.811\alpha_N \quad (7.2.3-9)$$

$$w \leq 0.02 \cdot l \quad (7.2.3-10)$$

式中 σ_k ——烟囱筒壁局部稳定临界应力标准值 (N/mm^2);

E_t ——温度作用下钢材的弹性模量 (N/mm^2);

γ_N ——材料分项系数, 取 $\gamma_N = 1.10$;

t ——筒壁厚度(mm);

r ——钢烟囱外半径 (mm);

w, l ——烟囱筒体几何缺陷尺寸 (见图 7.2.3), 当 $w \leq 0.01 \cdot l$ 时, 取 $w = 0.01 \cdot l$ 。

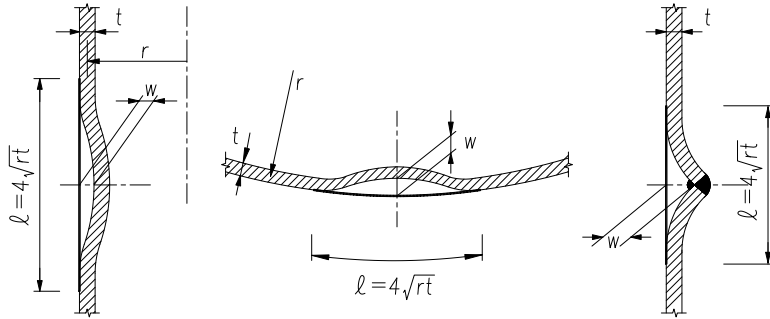


图 7.2.3 钢烟囱筒体几何缺陷示意

7.2.4 在环向风弯矩或烟气负压作用下, 钢烟囱的稳定验算应符合下列计算公式:

$$\sigma_{\theta w} \leq \frac{\sigma_{\theta crt}}{\gamma_{\theta}} \quad (7.2.4-1)$$

$$\sigma_{\theta a} = \frac{\gamma_a \cdot p_g \cdot d}{2 \cdot t} \leq \frac{\sigma_{\theta crt}}{\gamma_{\theta}} \quad (7.2.4-2)$$

$$\sigma_{\theta crt} = 1.3 E_t \cdot K \cdot \frac{d}{L_s} \cdot \left(\frac{t}{d} \right)^{1.5} \quad (7.2.4-3)$$

$$K = \begin{cases} 1.0 & \frac{t}{d} \leq \frac{2.8 \cdot f_{yt}}{E_t} \\ \frac{1.68 \cdot f_{yt}}{E_t \cdot t} + 0.465 - \frac{0.0232 \cdot E_t \cdot t}{f_{yt} \cdot d} & \frac{2.8 \cdot f_{yt}}{E_t} < \frac{t}{d} \leq \frac{10 \cdot f_{yt}}{E_t} \end{cases} \quad (7.2.4-4)$$

式中 $\sigma_{\theta crt}$ —— 烟囱筒壁环向局部稳定临界应力标准值 (N/mm^2);

$\sigma_{\theta a}$ —— 烟气负压在筒壁竖向截面所产生的压应力设计值 (N/mm^2);

γ_{θ} —— 分项系数, 取 $\gamma_{\theta} = 1.5$;

γ_a —— 烟气压力分项系数, 取 $\gamma_a = 1.5$;

f_{yt} —— 钢材在温度作用下屈服强度 (N/mm^2);

L_s —— 加劲肋间距 (mm);

p_g —— 烟气非正常运行或烟气爆炸所产生的烟气负压, 按实际情况选取, 并不宜

小于 $2 \times 10^{-3} MPa$;

d —— 筒壁外直径(mm)。

7.2.5 筒壁在环向与竖向荷载共同作用下, 钢烟囱的局部稳定验算应符合下式要求:

$$\frac{\sigma_N + \sigma_M}{\sigma_k / \gamma_N} + \frac{\sigma_{\theta w}}{\sigma_{\theta crt} / \gamma_M} + \frac{\sigma_{\theta a}}{\sigma_{\theta crt} / \gamma_M} \leq 1.0 \quad (7.2.5)$$

【条文说明】7.2.5 $\sigma_{\theta w}$ 、 $\sigma_{\theta a}$ 分别为环向风压及烟气负压在筒壁竖向截面所产生的正压力, 二者可同时出现 (如单筒烟囱), 或单独出现 (如套筒烟囱) 等, 应根据烟囱型式进行判断。

7.2.6 钢烟囱可通过设置环向加劲肋减小环向椭圆振动作用, 且环形加劲肋应满足以下条件:

$$\frac{L_s}{d} < \begin{cases} 0.56\sqrt{d/t} \\ 10.9/z^{0.06} \end{cases} \quad (7.2.6-1)$$

$$I_s \geq \frac{0.06 \cdot w(z) \cdot d^4 \cdot [d + 6 \cdot b_r]}{E_t \cdot t} \quad (7.2.6-2)$$

式中 $w(z)$ —— 高度 z 处设计风压 (N/mm^2);

b_r —— 加劲肋径向宽度 (mm);

I_s —— 包含筒壁参与计算长度在内的加劲截面惯性矩 (mm^4), 筒壁参与计算长度

取 $\sqrt{d \cdot t}$, 并且其面积不大于加劲肋截面面积。

7.3 钢烟囱疲劳验算

7.3.1 钢烟囱发生横风向涡激共振, 且斯柯顿数及临界风速同时满足以下计算条件时, 应根据本标准 7.3.3 条和 7.3.4 条进行疲劳验算。

$$Sc_i \leq 15 \quad (7.3.1-1)$$

$$V_{cr,i} \leq 1.25 \cdot V(h) \quad (7.3.1-2)$$

7.3.2 对于需要进行抗疲劳设计的钢烟囱, 其钢材应具有冲击韧性合格保证, 钢材质量等级的选用应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的材料选用规定。在低温下工作或制作安装的钢烟囱应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关要求进行防脆断设计。

7.3.3 当钢烟囱横风向共振应力变化的循环次数不小于 5×10^4 次时, 应进行疲劳验算。第 i 阶横风向共振荷载循环次数可按下式计算。

$$N_i = 3.15 \cdot 10^7 \cdot T \cdot f_i \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{V_1^2}{V_0^2}\right) - \exp\left(-\frac{V_2^2}{V_0^2}\right) \right\} \quad (7.3.3)$$

式中 N_i —— 第 i 阶横风向共振荷载循环次数;

T —— 烟囱设计工作年限 (年), 可取 30 年;

V_0 —— 风荷载分布函数的标准偏差 (m/s), 取 $V_0 = 0.2 \cdot V_h$, V_h 为烟囱顶部设计风速;

V_1 、 V_2 —— 横风共振风速范围的下限值和上限值 (m/s), 该范围应根据斯柯顿数 Sc 、空

气动力学阻尼参数和湍流强度计算确定, 当烟囱顶部湍流强度 I_v 不大于 0.2 时,

可近似取 $V_1 = 0.85 \cdot V_{cr}$, $V_2 = 1.5 \cdot V_{cr}$; 当 I_v 不小于 0.4 时, 可近似取 $V_1 = 1.0 V_{cr}$,

$V_2 = 1.25 V_{cr}$; 其余 I_v 值, 可采用线性插值获得;

f_i —— 第 i 阶振型自振频率 (Hz)。

7.3.4 在烟囱使用寿命期间, 烟囱共振引起的最大正应力幅应符合下列公式要求。

$$\Delta\sigma \leq \gamma_t \cdot [\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8} \quad (7.3.4-1)$$

1 钢烟囱焊接部位

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (7.3.4-2)$$

2 钢烟囱非焊接部位

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - 0.7\sigma_{\min} \quad (7.3.4-3)$$

3 当板厚 $t \leq 25\text{mm}$ 或螺栓直径 $d \leq 30\text{mm}$ 时，取修正系数 $\gamma_t = 1.0$ ，否则应按下列规定采用：

$$\gamma_t = \left(\frac{25}{t} \right)^{0.25} \quad (7.3.4-4)$$

$$\gamma_t = \left(\frac{30}{d} \right)^{0.25} \quad (7.3.4-5)$$

式中

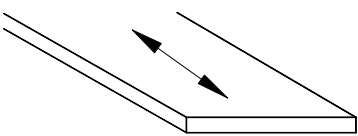
$\Delta\sigma$ ——计算部位钢板或螺栓的正应力幅（ N/mm^2 ）；

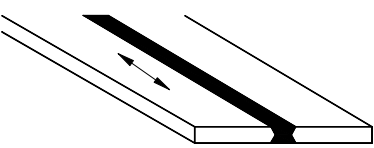
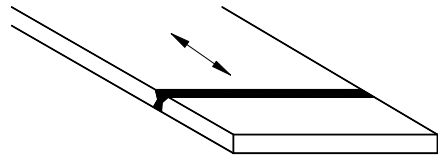
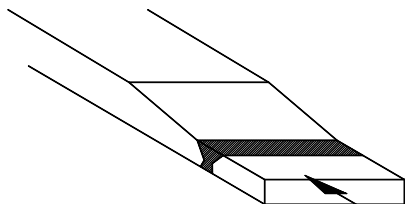
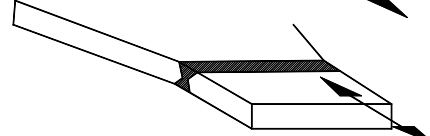
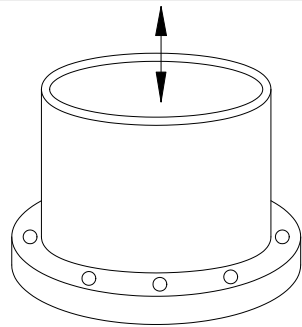
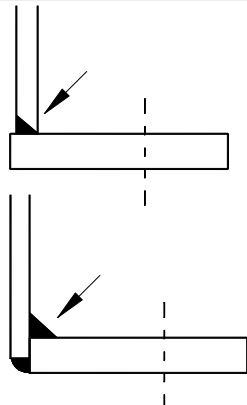
$\sigma_{\max}$ ——计算部位最大拉应力（ N/mm^2 ），取正值；

$\sigma_{\min}$ ——计算部位最小拉应力或压应力（ N/mm^2 ），拉应力取正值，压应力取负值；

$[\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8}$ ——正应力幅疲劳截止限（ N/mm^2 ），根据表 7.3.4-1 构件与连接类别和对应表 7.3.4-2 正应力幅的疲劳计算参数采用。

表 7.3.4-1 构件与连接类别

项次	构造细节	说 明	类别
1		● 无连接处的母材钢板 (1) 两边为轧制边或刨边 (2) 两侧为自动、半自动切割边（切割质量标准应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205）	Z1 Z2

2		无垫板的纵向对接焊缝附近的母材 焊缝符合二级焊缝标准	Z2
3		- 横向对接焊缝附近的母材, 轧制梁对接焊缝附近的母材 (1) 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50202 的一级焊缝, 且经加工、磨平。 (2) 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50202 的一级焊缝。	Z2 Z4
4	 坡度$\leq 1/4$  	- 不同厚度 (或宽度) 横向对接焊缝附近的母材 (1) 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50202 的一级焊缝, 且经加工、磨平。 (2) 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50202 的一级焊缝。	Z2 Z4
5	 	- 法兰焊缝连接附近的母材 (1) 采用对接焊缝, 焊缝为一级 (2) 采用角焊缝	Z8 Z13

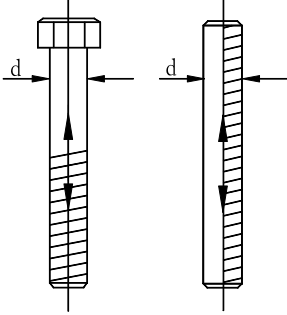
6		● 受拉螺栓的螺纹处母材 连接板件应有足够的刚度, 保证不产生撬力。否则受拉正应力应考虑撬力及其他因素产生的全部附加应力。 对于直径大于 30mm 螺栓, 需要考虑尺寸效应对容许应力幅进行修正, 修正系数为 $\gamma_t = \sqrt[4]{30/d}$, d 为螺栓直径 (mm)。	Z11
---	---	---	-----

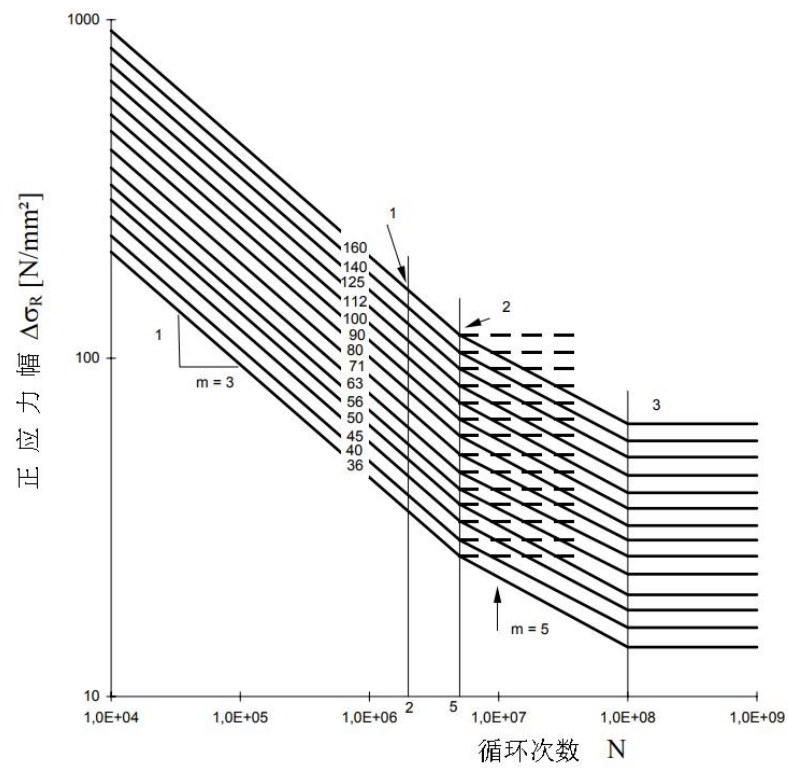
表 7.3.4-2 正应力幅的疲劳计算参数

构件与 连接类 别	循环次数 n 为 2×10^6 次的 容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ (N/mm^2)	循环次数 n 为 5×10^6 次的 容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{5 \times 10^6}$ (N/mm^2)	疲劳截止限 $[\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8}$ (N/mm^2)
Z1	176	140	85
Z2	144	115	70
Z4	112	83	46
Z8	71	52	29
Z11	50	35	20
Z13	40	29	16

【条文说明】7.3.4 金属疲劳累积损伤的假说多达数十种, 但其中最简单、适用的是迈因纳 (Palmgren—Miner) 理论, 习惯称之为线性累积损伤理论。迈因纳理论认为材料的疲劳破坏是由于循环载荷的不断作用而产生损伤并不断积累造成的, 材料在各个应力幅下的疲劳损伤是独立的, 总损伤可以线性累加; 疲劳损伤累积达到破坏时吸收的净功 W 与疲劳载荷的历史无关, 并且材料的疲劳损伤程度与应力循环次数成正比。横风共振风速范围的下限值和上限值需要根据斯柯顿数 Sc 、空气动力学阻尼参数 $\langle K_{a,0} \rangle$ 和湍流强度 I_v 计算确定。

钢烟囱的高细比较大, 其临界风速较低, 通常在低风速下发生共振, 其横风向共振荷载循环次数一般都较大。条文制定参考了欧洲钢结构标准 Eurocode 3: Desing of steel

structures 以及国家标准《钢结构设计标准》GB 50017。



1—循环次数 n 为 2×10^6 次的容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ ；

2—循环次数 n 为 5×10^6 次的容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{5 \times 10^6}$ ；3—疲劳截止限 $[\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8}$

图 7.3.4-1 正应力幅的疲劳强度 S-N 曲线（Eurocode 3）

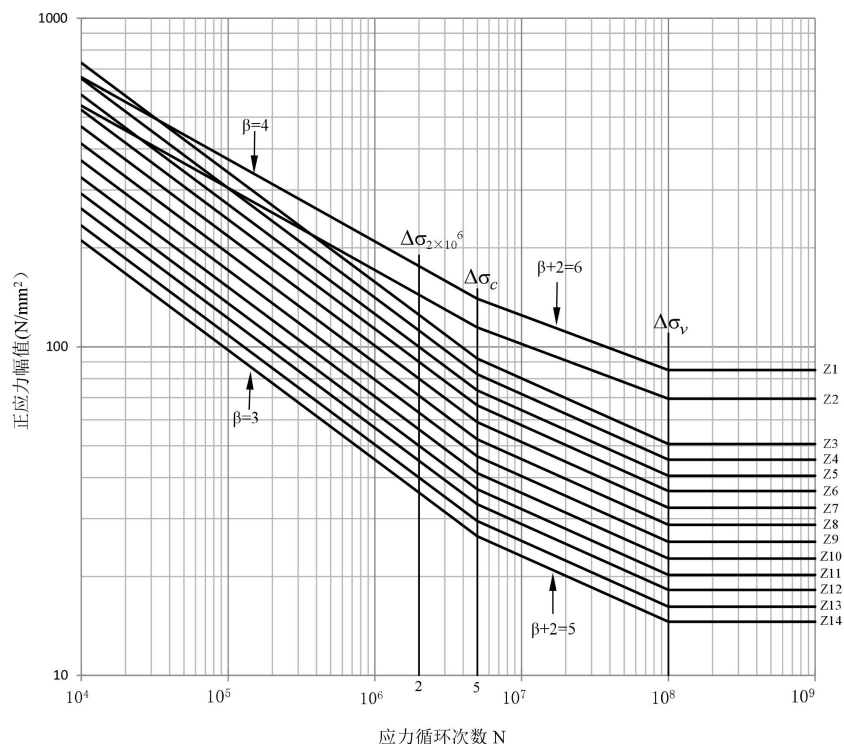


图 7.3.4-2 正应力幅的疲劳强度 S-N 曲线 (GB 50017)

7.3.5 当预计由于涡流脱落而产生疲劳时，宜对法兰连接螺栓和地脚螺栓施加预应力。

7.4 法兰连接

7.4.1 钢塔架法兰以及不需要进行抗疲劳设计的钢烟囱筒壁法兰可采用高强度普通螺栓连接，并采用双螺帽或其他防止螺帽松动的有效措施；需要进行抗疲劳设计的钢烟囱筒壁法兰宜采用高强螺栓连接，法兰接触面可不进行抗滑移处理。高强螺栓在螺杆轴力方向受拉的承载力设计值应按下式计算，并按表 7.4.1 对高强螺栓施加预应力。

$$N_t^b = 0.8P \quad (7.4.1)$$

式中 N_t^b ——每个高强螺栓按普通螺栓计算时的受拉承载力设计值 (N)；

P ——每个高强螺栓预拉力设计值 (N)，按表 7.4.1 选取。

表 7.4.1 每个高强螺栓预拉力设计值 P ($\times 10^3 \text{N}$)

螺栓的承载性能等级	螺栓的公称直径 (mm)					
	M16	M20	M22	M24	M27	M30
8.8 级	80	125	150	175	230	280
10.9 级	100	155	190	225	290	355

【条文说明】7.4.1 自立式钢烟囱普遍都存在横风向涡激共振现象，需在连接等方面预防疲劳破坏，需要进行抗疲劳设计的钢烟囱筒壁法兰宜采用高强螺栓连接。钢烟囱筒壁法兰连接的高强螺栓以承受拉力为主，法兰接触面可不进行抗滑移处理。

7.4.2 在设计风压或地震作用下，钢烟囱筒壁法兰连接每个螺栓拉力应按下列公式计算：

1 半刚性法兰连接每个螺栓拉力：

$$N_t = T_b \cdot \frac{a}{w} \leq N_t^b \quad (7.4.2-1)$$

$$T_b = \frac{4 \cdot M}{n \cdot d_0} - \frac{0.9 \cdot G_k}{n} \quad (7.4.2-2)$$

2 刚性法兰连接每个螺栓拉力（图 7.4.2）：

$$N_t = \frac{4 \cdot M}{n \cdot d_b} - \frac{0.9 \cdot G_k}{n} \leq N_t^b \quad (7.4.2-3)$$

式中 T_b —— 每个螺栓对应的筒壁拉力（N）；

M —— 计算法兰截面筒壁弯矩设计值（N·m）；

G_k —— 计算法兰截面上部钢烟囱筒壁承受的重力荷载标准值（N）；

n —— 法兰一周螺栓数量；

d_0 、 d_b —— 分别为钢烟囱筒壁中心直径和法兰螺栓所在圆直径（m）；

a 、 w —— 分别为法兰盘宽度和螺栓中心到法兰边缘距离（m）。

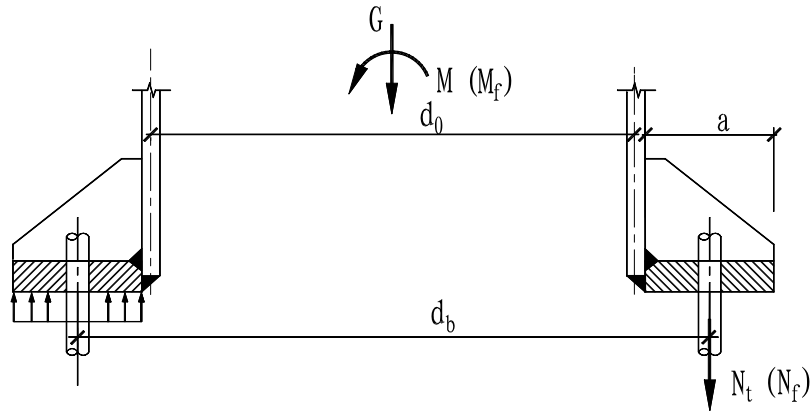


图 7.4.2 刚性法兰受力简图

【条文说明】7.4.2 根据钢烟囱疲劳作用及烟气密闭特点，法兰用高强螺栓连接。在荷载作用下，法兰按不开缝模型考虑。在设计风压或地震作用下，螺栓按极限承载能力验算。

7.4.3 在低风速涡激共振疲劳荷载作用下，钢烟囱筒壁法兰连接每个螺栓拉力应按下列公式计算：

1 半刚性法兰连接每个螺栓拉力：

$$N_f = T_f \cdot \frac{a}{w} \leq \frac{\sigma_R \cdot A_n}{1.1} \quad (7.4.3-1)$$

$$T_f = \frac{4 \cdot M_f}{n \cdot d_0} - \frac{0.9 \cdot G_k}{n} \quad (7.4.3-2)$$

2 刚性法兰连接每个螺栓拉力（图 7.4.2）:

$$N_f = \frac{4 \cdot M_f}{n \cdot d_b} - \frac{0.9 \cdot G_k}{n} \leq \frac{\sigma_R \cdot A_n}{1.1} \quad (7.4.3-3)$$

式中 N_f ——一个螺栓对应疲劳荷载拉力（N）;

T_f ——在涡激共振疲劳荷载作用下，一个螺栓对应的筒壁拉力（N）;

M_f ——计算法兰截面筒壁疲劳弯矩设计值（N·m），根据本标准公式

（7.3.4）计算截面弯矩;

σ_R ——螺栓抗疲劳强度，取 $\sigma_R = 35\text{MPa}$;

A_n ——螺栓截面面积（ mm^2 ）。

【条文说明】7.4.3 条文适用于自立式钢烟囱在低风速下的疲劳验算。通常应力变化的循环次数 $n \geq 5 \times 10^4$ 时，才需要进行疲劳计算。当发生设计风压或接近设计风压的强风共振时，由于设计风压发生概率为 50 年一遇，不会经常发生，可直接按本标准 7.4.2 条极限承载能力验算。

7.4.4 刚性法兰板厚度应按下式计算:

$$t_b \geq \sqrt{\frac{\beta_1 \cdot N_t}{f}} \quad (7.4.4)$$

式中 t_b ——法兰板厚度（mm）;

f ——法兰板抗拉强度设计值（MPa）;

β_1 ——法兰板厚度计算参数，见表 7.4.4;

a ——法兰板宽度（mm）（参见图 7.5.1）;

b ——螺栓间距（mm）。

表 7.4.4 法兰板厚度计算参数 β_1

a/b	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5
β_1	2.38	2.28	2.07	1.87	1.65	1.33	1.06	0.81	0.62

7.4.5 刚性法兰加劲肋焊缝验算应符合以下规定:

1 竖向对接焊缝验算:

$$\tau_f = \frac{\beta_2 \cdot N_t}{t \cdot (h - S_1 - 2t)} \leq f_v^w \quad (7.4.5-1)$$

$$\sigma_f = \frac{6 \cdot \beta_2 \cdot N_t \cdot e}{t \cdot (h - S_1 - 2t)^2} \leq f_t^w \quad (7.4.5-2)$$

$$\sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau_f^2} \leq 1.1f_t^w \quad (7.4.5-3)$$

2 水平对接焊缝验算：

$$\sigma_f = \frac{\beta_2 \cdot N_t}{t \cdot (a - S_2 - 2t)} \leq f_t^w \quad (7.4.5-4)$$

式中 σ_f ——垂直于焊缝长度方向的拉应力 (N)；

τ_f ——平行焊缝长度方向的剪应力 (N)；

t ——肋板的厚度 (mm)；

e —— N_t 偏心距，取螺栓中心到烟囱外壁的距离 (mm)；

β_2 ——加劲板承担反力的比例系数，按表 7.4.5 取值，加劲板受力为： $F = \alpha N_t$ ；

h ——肋板的高度 (mm)；

S_1 ——肋板下端切角高度 (mm)；

S_2 ——加劲板横向切角尺寸 (mm)；

f_t^w 、 f_v^w ——对接焊缝抗拉、抗剪强度设计值 (MPa)。

表 7.4.5 加劲板承担反力的比例系数 β_2

a/b	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85
β_2	0.67	0.71	0.73	0.74	0.76	0.79	0.80	0.80	0.81	0.82	0.83
a/b	0.9	0.95	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.75	2	2
β_2	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	1.0

7.5 基础法兰设计

7.5.1 刚性法兰板厚度 (图 7.5.1) t_b 应按下列各式计算：

1 受压侧法兰板厚度 t_1

$$t_1 \geq \sqrt{\frac{\beta_3 \cdot \sigma_c \cdot a^2}{f}} \quad (7.5.1-1)$$

$$\sigma_c = \frac{N_c}{a \cdot b} \quad (7.5.1-2)$$

$$N_c = \frac{4 \cdot M}{n \cdot d_b} + \frac{G}{n} \quad (7.5.1-3)$$

2 受拉侧法兰板厚度 t_2 按公式(7.4.4) t_b 计算

3 法兰板厚度 t_b 取受压侧法兰板厚度 t_1 和受拉侧法兰板厚度 t_2 较大值:

$$t_b = \max(t_1, t_2) \quad (7.5.1-4)$$

式中 σ_c ——受压侧法兰板压应力 (MPa);

G ——计算法兰截面上部钢烟囱筒壁承受的重力荷载设计值 (N);

β_3 ——法兰板厚度计算参数, 见表 7.5.1。

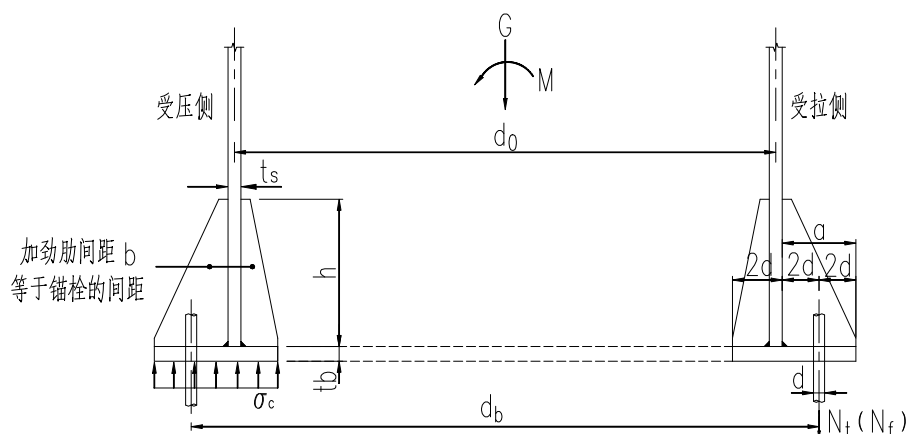


图 7.5.1 刚性基础法兰受力简图

表 7.5.1 法兰板厚度计算参数 β_3

a/b	0	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5
β_3	3.00	2.68	2.30	1.85	1.25	0.83	0.51	0.30	0.22

【条文说明】7.5.1 受拉侧法兰板宽度假定为 $a = 4d$ ， d 为螺栓直径。

7.5.2 刚性法兰加劲肋高度应满足烟囱筒壁在加劲肋顶部处的应力限值:

$$F_R \cdot \left[\frac{\alpha}{t_s} + \frac{\beta_4 \cdot R_s}{t_s^2} \right] \leq f \quad (7.5.2-1)$$

$$F_R = \frac{3 \cdot M_b}{h^2} \quad (7.5.2-2)$$

$$M_b = \begin{cases} 2 \cdot N_t \cdot d & \text{受拉侧} \\ 6 \cdot \sigma_c \cdot d^2 \cdot b & \text{受压侧} \end{cases} \quad (7.5.2-3)$$

式中 R_s ——钢烟囱筒壁半径 (mm);

F_R ——加劲肋顶部单位高度径向力 (N);

M_b ——每个加劲板底部由于底板下方不平衡力导致的弯矩 ($N \cdot mm$);

d ——螺栓直径 (mm);

t_s ——筒壁厚度 (mm);

h ——加劲肋高度 (mm);

α 、 β_4 ——加劲肋高度计算参数, 见表 7.5.2。

表 7.5.2 加劲肋高度计算参数

加劲肋数量 (等距)	6	12	16	20	24	28	32	40	60	80	100
α	1.00	1.93	2.50	3.20	3.83	4.47	5.10	6.37	9.55	12.74	15.92
β_4	0.53	0.26	0.20	0.16	0.13	0.11	0.098	0.079	0.052	0.039	0.031

注: 中间数值按线性插值获取。

7.5.3 刚性双层法兰 (见图 7.5.3) 设计应满足以下规定:

- 1 靴梁底板厚度应按本标准式 (7.5.1-1) 计算公式确定;
- 2 靴梁顶板厚度除按本标准式 (7.4.4) 计算外, 尚应满足下式要求:

$$\sigma_{cir} = \frac{\beta_1 \cdot N_t}{t_c^2} + \frac{n \cdot N_t}{30 \cdot \pi \cdot d \cdot t_c} \leq f \quad (7.5.3)$$

式中 t_c ——靴梁顶板厚度 (mm) (图 7.5.3);

σ_{cir} ——锚栓偏心力引起的不平衡弯矩所产生的环向应力 (N/mm^2)。

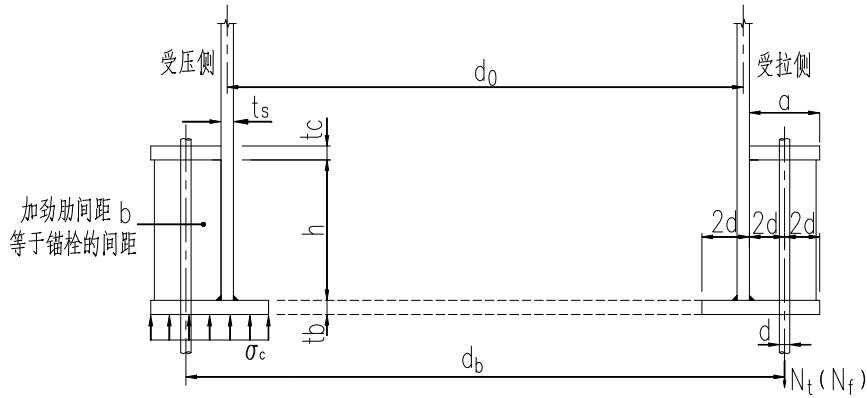


图 7.5.3 刚性双层基础法兰示意图

7.5.4 钢烟囱底座处钢筋混凝土基础局部受压应力可按式计算：

$$\frac{G+n \cdot P}{A_c} + \frac{M}{W} \leq \omega \cdot \beta \cdot f_c \quad (7.5.4)$$

式中 A_c ——烟囱与混凝土基础的接触面面积 (mm^2)；

W ——烟囱与混凝土基础的接触面截面抵抗矩 (mm^3)；

ω ——荷载分布影响系数，可取 $\omega = 0.675$ ；

β ——混凝土局部受压时强度提高系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》

GB50010 的规定计算；

P ——施加到每个地脚螺栓预应力 (N)，当无预应力时取 $P=0$ ；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa)。

7.6 自立式钢烟囱构造设计

7.6.1 自立式钢烟囱的高径比不宜大于 30，径厚比不宜大于 1/600，且最小壁厚不宜小于 6mm。

7.6.2 烟道开孔宜采用圆形，矩形孔洞时转角宜采用圆弧形。烟道开孔宽度不应大于烟囱直径的 2/3 倍。当开孔宽度不超过烟囱直径的 0.4 倍时，洞口两侧竖向加劲肋高度应延伸至洞口上下边缘以外，且延伸长度应不小于洞口宽度的 0.5 倍；当开孔宽度大于烟囱直径的 0.4 倍时，除在洞口两侧设置竖向加劲肋外，尚应沿洞口上下边缘设置整圈环向加劲肋。

7.6.3 钢烟囱宜采用高强螺栓连接，法兰盘最小厚度和连接螺栓最小直径均不宜小于 16mm。螺栓中心距宜为螺栓直径的 4~10 倍。

7.6.4 钢烟囱破风圈的设置应符合下列规定：

- 1 破风圈应在距烟囱上端不小于烟囱高度 1/3 的范围内设置；

2 破风圈应当采用螺旋板形式，螺旋板厚度不小于 6mm，宽度为烟囱外径的（0.1～0.12）倍。螺旋板应为 3 道，沿圆周 120° 均匀布置，螺距为烟囱外部直径的 5 倍。

7.6.5 隔热层的设置应符合下列规定：

1 当烟气温度高于钢筒壁最高受热温度时，应设置隔热层；

2 隔热层应与烟囱筒壁牢固连接；当烟气温度高于 560℃ 时，隔热层的锚固件可采用不锈钢耐热钢制造，如 1Cr18Ni9Ti，质量应符合 GB/T1221 的规定。当烟气温度低于 560℃ 时，可采用一般碳素结构钢 Q235 制造。

3 隔热层厚度由温度计算决定，最小厚度不宜小于 50mm。

【条文说明】7.6.5 碳素钢的抗氧化温度上限为 560℃，金属锚固件一旦超过抗氧化界限出现氧化现象，将造成连接松动，影响正常使用。

7.6.6 钢烟囱分段连接可采用对接焊接连接或高强螺栓连接，连接处应采取专项防腐蚀措施及封闭处理。

7.6.7 钢烟囱筒首的设计应符合下列规定：

1 钢烟囱隔热及内衬顶部应做端部封闭处理；

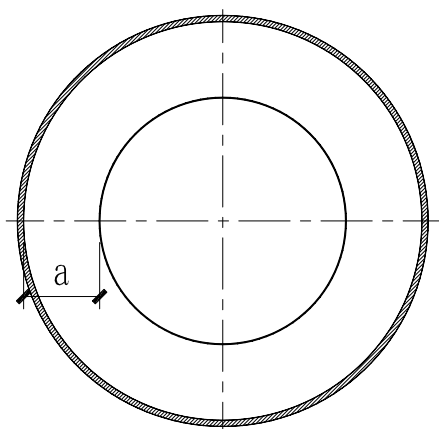
2 钢烟囱顶部封闭部分应采取防腐蚀措施。

8 烟囱内筒设计

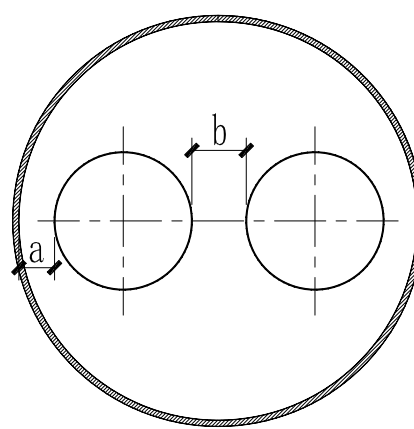
8.0.1 套筒式和多管式钢烟囱的内外筒间距应根据烟气类别和腐蚀等级确定，烟气类别的划分应符合本标准 6.2 节的有关规定，内外筒间距应不小于表 8.0.1 的规定值。

表 8.0.1 套筒式和多管式钢烟囱的内外筒间距最小限值 (mm)

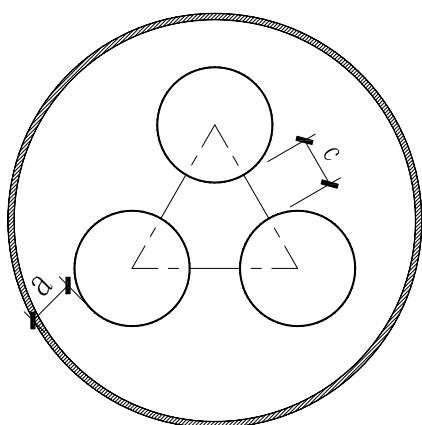
内外筒间距	烟囱类型	烟气类别及腐蚀等级						
		湿烟气	潮湿烟气			干烟气		
		强腐蚀	强腐蚀	中等腐蚀	弱腐蚀	强腐蚀	中等腐蚀	弱腐蚀
a	套筒式	1000	1000	1000	150	1000	150	150
	多管式	750	750	750	150	750	150	150
b	多管式	750	750	750	200	750	200	200
c		750	750	750	450	750	450	450



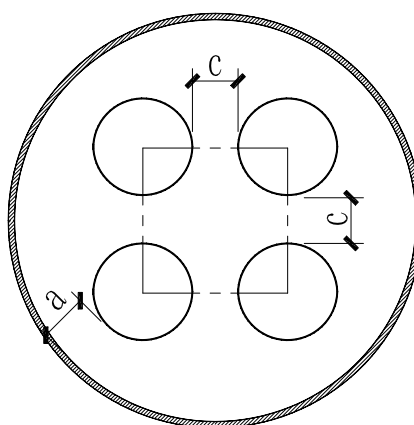
(a) 套筒式钢烟囱



(b) 2 个内筒钢烟囱



(c) 3 个内筒钢烟囱



(d) 4 个内筒钢烟囱

图 8.0.1 套筒式与多管式钢烟囱布置图

a—内筒与外筒间距；b、c—内筒间距

【条文说明】8.0.1 钢烟囱因腐蚀破坏极其严重，套筒式或多管式烟囱应留有内筒维修、更换空间，条文根据不同烟气腐蚀等级给出内外筒间距要求。

8.0.2 内筒的极限承载能力计算，除应计入自重荷载、烟气温度作用外，尚应计入外筒风荷载、地震作用、附加弯矩等荷载的影响。

8.0.3 在风荷载或地震作用下，内筒应根据内外筒在止晃位置水平位移一致的原则计算内筒内力，并根据该内力对内筒进行强度、稳定性和刚度验算。内筒的稳定承载力应按有效截面计算，稳定系数应按毛截面计算。自立式钢内筒的强度和稳定验算应符合本标准第7章的有关规定；自立式玻璃钢内筒的强度和稳定验算应符合现行国家标准《烟囱工程技术标准》GB/T 50051的有关规定。

8.0.4 内筒应计算烟气沿水平截面直径方向和竖向高度方向的不均匀分布以及筒壁温差等因素对内筒造成的内应力，并根据现行国家标准《烟囱工程技术标准》GB/T 50051的有关规定进行计算。

【条文说明】8.0.3、8.0.4 在风荷载或地震作用下，内外筒在止晃位置水平位移一致，内筒因外筒施加水平位移产生内力，同时烟气沿水平截面直径方向以及竖向的不均匀分布也会对内筒产生温度应力，这些是确定内筒是否满足承载能力的基本内力，需要进行计算并满足要求。

8.0.5 内筒最小椭圆振动频率应符合以下规定。

1 不设置加劲肋的内筒

$$f_o = \frac{t}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E_\theta^b}{5 \cdot \rho_s \cdot (1 - \mu^2)}} \geq 2.0 \quad (8.0.5-1)$$

2 设置加劲肋的内筒

$$f_o = \frac{0.428}{\pi \cdot R_c^2} \cdot \sqrt{\frac{E_\theta^b \cdot I_s}{L_L \cdot \rho_s \cdot t_e \cdot (1 - \mu^2)}} \geq 2.0 \quad (8.0.5-2)$$

式中 f_o ——内筒第1阶椭圆振型频率 (Hz)；

E_θ^b ——环向弯曲弹性模量 (Pa)，玻璃钢按《烟囱工程技术标准》GB/T 50051的

有关规定选取，钢材取 $E_\theta^b = E_t$ ；

μ ——泊松比，玻璃钢取 $\mu = 0.166$ ；钢材取 $\mu = 0.30$ ；

ρ_s ——内筒材料密度 (kg/m³)；

R_c ——加劲肋质心的半径 (m)；

t_e ——基于质量相等原则的等效筒壁厚度(m)，按包括加劲肋的钢筒壁总重量与等效

筒壁厚度的钢筒重量相等原则确定的筒壁厚度；

t 、 r ——筒壁厚度和筒壁半径(m)；

I_s ——包含筒壁参与计算长度在内的加劲截面惯性矩(m^4)，筒壁参与计算长度取

$\sqrt{d \cdot t}$ ，并且其面积不大于加劲肋截面面积；

L_s ——加劲肋间距(m)。

【条文说明】8.0.5 在烟气通过内筒时或外部风荷载激励作用时，可能诱发内筒振动，条文给出内筒椭圆振动频率控制条件。

8.0.6 内筒筒壁最小厚度应根据不同材质和腐蚀条件等综合因素确定，并应符合以下要求。

1 玻璃钢内筒

$$t_{0\min} \geq \begin{cases} 6 \\ d/1000 \end{cases} \quad (8.0.6-1)$$

2 钢内筒

$$t_{0\min} \geq \begin{cases} 2 \\ d/1000 \end{cases} \quad (8.0.6-2)$$

式中 $t_{0\min}$ ——扣除筒壁腐蚀裕量后的最小厚度，玻璃钢内筒取结构层厚度(mm)；

d ——筒壁直径(mm)。

8.0.7 内筒筒壁加劲肋的设置应满足本标准 7.2.6 条的规定。钢烟囱的筒壁最小厚度与加劲肋最大间距宜符合表 8.0.7 的要求。

表 8.0.7 钢烟囱的筒壁最小厚度与加劲肋最大间距

钢筒内直径 (m)	最小板厚 (mm)	加劲肋最大间距
$d \leq 1.0$	3+C	$5d$
$1.0 < d \leq 2.0$	5+C	$3d$
$2.0 < d \leq 5.5$	5+C	$2d$
$d > 5.5$	6+C	$1.5d$

注： d 为钢烟囱外直径；大气环境下，筒壁外侧腐蚀裕量 C 按本标准第 6 章有关规定选取。

8.0.8 钢烟囱环向加劲肋宜采用等肢或不等肢角钢、T 型钢制作，也可通过连接法兰代替加劲肋。加劲肋截面大小应根据烟气压力情况计算确定，最小截面不应小于表 8.0.8 的规定。

表 8.0.8 钢内筒加劲肋最小截面尺寸

钢烟囱直径 d (m)	最小加劲角钢
$d \leq 4.50$	$\angle 75 \times 75 \times 6$
$4.50 < d \leq 6.00$	$\angle 100 \times 80 \times 6$
$6.00 < d \leq 7.50$	$\angle 125 \times 80 \times 8$
$7.50 < d \leq 9.00$	$\angle 140 \times 90 \times 10$
$9.00 < d \leq 10.50$	$\angle 160 \times 100 \times 10$

8.0.9 钢内筒法兰盘连接螺栓直径及法兰盘厚度应由计算确定,但最小直径或厚度不宜小于 12mm。

8.0.10 具有内部检修平台的套筒式或多管式钢烟囱,其外筒应下部第一层平台上部开设 4~8 个进风口。进风口的总面积为内外筒之间水平净截面面积的 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 塔架式钢烟囱

9.1 一般规定

9.1.1 塔架式钢烟囱结构设计应进行强度、稳定和变形验算。对于共振应力变化的循环次数不小于 5×10^4 次时，钢塔架构件及其连接应进行抗疲劳设计。

9.1.2 塔架高度应低于烟羽下洗影响范围，且排烟筒高出塔架顶部不宜小于 3m 及排烟筒直径二者的较大值。

9.1.3 钢塔架沿高度可采用单坡度或多坡度形式。塔架底部宽度可取塔架高度 $1/4 \sim 1/8$ ，且不宜小于 $1/10$ 。

【条文说明】9.1.3 钢塔架沿高度可采用单坡度或多坡度形式。塔架底部宽度与高度之比，不宜小于 $1/10$ ，常取底盘宽度为整个塔高的 $1/4 \sim 1/8$ 。塔架底部宽度对塔架本身的钢材量影响并不显著，但它对塔架在风荷载作用下的水平位移、塔架的自振周期、塔架基础受力的影响较大。

9.1.4 钢塔架水平截面形式可根据排烟筒数量确定，宜采用三角形或四边形。

9.1.5 沿塔架高度应设置水平横膈，四边形塔及六边形塔可每隔 1~2 个节间设置一道横膈；在塔柱坡度变化处和塔身平截面发生突变处，均应设置横膈。

【条文说明】9.1.4、9.1.5 塔架的平截面形式，对于经济效果和造型美观都有关系。塔架的边数愈多，它所耗用的钢材也愈多，耗钢量最少的是三角形塔架。主要原因如下：

1) 塔架所受荷载，主要是风荷载。在风荷载作用下，塔架受力与悬臂梁很相似。所以，在多边形塔架中，离开塔身平截面形心愈近的塔柱，愈不能发挥材料的作用；

2) 虽然杆件数量增多，可以减少杆件的截面尺寸，但杆件数量的增加，要增加一些连接材料和挡风面积。因而塔架的边数愈多，其荷载愈大；

3) 塔架的边数愈多，用于维持平面几何稳定的横膈材料亦越多，三角形塔架不需要横膈材料；

4) 塔架的边数愈多，连接节点愈多，用于节点板的材料也较多。

但从结构安全角度上讲，边数较多的塔架比边数较少的塔架具有更大的安全度。

9.1.6 钢塔架的抗震设防类别划分应符合现行国家标准《烟囱工程技术标准》GB/T 50051 的有关规定，并不应低于标准设防类。

9.1.7 塔架应沿高度每隔一定距离设一道休息平台或检修平台，并提供满足 CEMS 或检修等要求的垂直与水平交通；平台和走道宜到达包括烟气监测点、航标灯、止晃点等的各巡视和

检修地点；扶梯角度不宜大于 45° ，各梯段高度不宜大于 5.0m，直爬梯应设护笼；平台和扶梯临空面均应设置栏杆和护沿，栏杆高度应符合现行国家标准《固定式钢梯及平台安全要求》GB4053 的有关规定，且不小于 1.2m。

9.1.8 塔架应沿高度利用横膈设置排烟筒止晃平台。钢排烟筒止晃平台间距不宜大于排烟筒直径的 15 倍；玻璃钢排烟筒止晃平台间距不宜大于排烟筒直径的 10 倍。

9.1.9 塔架杆件宜选择钢管、圆管等风阻较小的断面。当选用型钢组合断面时，宜采用封闭式断面。

9.1.10 钢塔架腹杆宜按下列规定确定：

1 塔架腹杆体系可采用交叉斜杆、K 形或 V 字形斜杆；

2 塔架顶层和底层宜采用刚性腹杆；

3 塔架中间层可采用预加拉紧的交叉柔性腹杆，并可按预应力和非结构性预应力两种方式设置。当采用预应力交叉腹杆时，预拉力值不应小于按线弹性理论计算时交叉腹杆的压力设计值；当非结构性预应力交叉腹杆时，其非结构性预应力值一般可取腹杆材料强度设计值的 15%~20%，且不小于塔架在永久荷载作用下对腹杆所产生的压应力设计值。塔架同一节间中的腹杆预应力值应相等，且计算整体塔架时应考虑预应力对塔柱和横杆产生的压力；

4 交叉柔性腹杆宜采用圆钢；

5 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。

【条文说明】9.1.10 刚性腹杆适用于斜腹杆受力较大的塔架和扭矩较大的塔架。在一般塔架中，特别是在塔柱的坡度选择比较合理的塔架中，腹杆的受力较小。当斜腹杆受力较小时，斜腹杆按柔性杆件设计是合理而经济的。当斜腹杆受力较小时，即使按柔性杆件设计，斜腹杆也不能充分发挥材料的强度，而往往由长细比控制。为了使斜腹杆充分发挥其强度作用，可采用预加拉力斜腹杆。这种预加拉力斜腹杆仍属于柔性斜腹杆的性质。它主要是在结构安装时，将斜腹杆预受张拉内力使之拉紧。这样，斜腹杆的断面就不受长细比限制。一般情况下，预加拉力斜腹杆的塔架，较柔性斜腹杆的塔架节约钢材约 25%左右，同时，结构具有轻巧、主次分明、线条清晰等特点。

柔性交叉斜杆分预应力和非预应力两种，非预应力柔性斜杆一旦受压则退出工作，拉杆仍有长细比限制。

塔架中柔性预应力交叉斜杆的预拉力值规定不应小于按线弹性理论计算时交叉斜杆的压力设计值。这样预应力柔性斜杆在施加预应力后使柔性斜杆在各种工况中始终处在受拉状态。

K 形腹杆的主要特点是减少节间高度和斜腹杆长度，属刚性腹杆体系，用于剪力和扭矩较大的塔架。

9.1.11 对于高度较高，底部较宽的钢塔架，宜在底部各边增设拉杆。

9.1.12 钢塔架构件和连接等承载能力计算应符合现行国家标准《高耸结构设计标准》GB50135 的有关规定。

9.2 塔架内力计算

9.2.1 塔架结构宜按整体空间桁架做静力分析，宜建立烟囱和塔架结构的整体计算模型。

【条文说明】9.2.1 空间桁架法的基本假定是根据塔架的构造和受力特点，考虑各杆件变形间的关系而得到的。这个方法建立在下列基本假定的基础上：

- ① 假定塔架为空间铰接桁架，所有各杆件的交会点，均为理想的铰接点；
- ② 假定塔架各杆件的工作，完全处于弹性阶段；
- ③ 假定在水平荷载、扭矩荷载及重力荷载的作用下，塔架的变形符合平截面假定，其平截面亦保持几何不变。即塔架的任意平截面，在塔架变形后仍保持平面，并仍保持原来的几何形状；
- ④ 假定横杆为一不可拉伸、不可压缩的刚性杆件。

9.2.2 计算钢塔架结构时，应将结构作为整体，采用三维空间程序进行受力分析。主材与腹杆之间、腹杆与腹杆之间的连接可按实际情况视为刚接或铰接。

9.2.3 计算塔架自重时应考虑节点板、法兰盘及焊缝的重量，可按塔架杆件的自重乘以系数 1.15~1.20 确定。

9.2.4 计算风荷载时，可分别计算塔体、排烟筒及主要配管挡风面积所引起的风荷载，排烟筒及塔架体型系数可按本标准第 5.2.4 条确定。楼梯、栏杆的挡风面积可取其轮廓面积的 40% 确定。计算塔体的挡风面积时应考虑节点板的影响，可按塔体的挡风面积乘以系数 1.10~1.15 确定。

9.2.5 钢塔架结构的风荷载计算应符合下列规定：

- 1 当钢塔架截面为三角形时，应按图 9.2.5 (a) 所示考虑三种作用方向；
- 2 当钢塔架截面为四边形时，应按图 9.2.5 (b) 所示考虑两种作用方向；
- 3 钢塔架应考虑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。

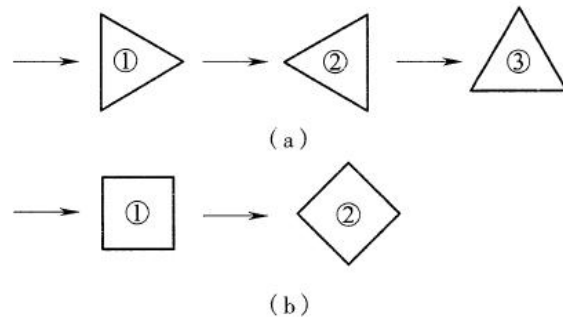


图 9.2.5 塔架风荷载作用方向

9.2.6 钢塔架结构的抗震验算应采用反应谱分析；安全等级为一级的钢塔架结构，宜进行时程分析。

9.2.7 钢塔架结构抗震验算时，构件及连接节点承载力抗震调整系数可按表 9.2.7 确定。

表 9.2.7 塔架构件及连接节点承载力抗震调整系数

塔架构件 调整系数	塔 柱	腹杆	支座斜杆	节 点
γ_{RE}	0.85	0.80	0.90	1.0

9.2.8 在竖向荷载作用下塔柱轴力 N 和腹杆轴力 S 可按下列公式计算：

刚性交叉腹杆塔架：

$$N = -\frac{\sum G}{n \sin \beta (1 + 2\eta \frac{l_k}{l_s})} \quad (9.2.8-1)$$

$$S = -\frac{\eta \sum G}{n \sin \beta (1 + 2\eta \frac{l_k}{l_s})} \quad (9.2.8-2)$$

$$\eta = \left(\frac{l_k}{l_s}\right)^2 \left(\frac{A_s}{A_K}\right) \quad (9.2.8-3)$$

柔性交叉腹杆和 K 型腹杆塔架：

$$N = -\frac{\sum G}{n \sin \beta} \quad (9.2.8-4)$$

$$S = 0 \quad (9.2.8-5)$$

式中 N ——塔柱轴力设计值（kN），负号表示受压；

S ——腹杆轴力设计值（kN），负号表示受压；

$\sum G$ ——计算节间以上竖向荷载设计值的总和（kN）；

n ——塔架的平截面边数；

A_S 、 A_K ——刚性交叉腹杆和塔柱截面面积 (m^2);

l_k ——节间塔柱长度 (m);

l_s ——节间斜腹杆长度 (m)。

【条文说明】9.2.8 塔架在竖向力作用下,根据荷载和结构的对称性以及不同腹杆形式的特点知:对于刚性交叉腹杆塔架,任意平面的所有塔柱轴力均相等,所有腹杆轴力均相等;对于柔性交叉腹杆塔架,任意平面的所有塔柱轴力均相等,所有腹杆轴力均为零;对于K型交叉腹杆塔架,任意平面的所有塔柱轴力均相等,所有腹杆轴力均为零。

9.2.9 在水平荷载作用下塔柱轴力 N 和腹杆轴力 S 可按下列公式计算:

$$N = C \frac{M_y}{D \sin \beta} + C \frac{\sin \alpha \sin \beta_n}{\sin \beta} S \quad (9.2.9-1)$$

$$S = \frac{V_x - \frac{M_y}{D} \operatorname{ctg} \beta}{C \cos \alpha + C \sin \alpha \sin \beta_n \operatorname{ctg} \beta + C \sin \alpha \cos \beta_n} \quad (9.2.9-2)$$

式中 M_y ——在塔段底部绕 y-y 轴作用的弯矩设计值 ($\text{kN}\cdot\text{m}$);

V_x ——在塔段底部沿 x-x 轴作用的剪力设计值 (kN);

α ——腹杆同横杆的夹角 (度);

β ——塔柱同水平面的夹角 (度);

β_n ——塔面同水平面的夹角 (度);

D ——塔段底部外接圆直径 (m);

C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 ——系数,按表 9.2.9 采用。

表 9.2.9 空间桁架法计算塔架柱和腹杆的内力系数

边数	风向	刚性交叉腹杆					柔性交叉腹杆				
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
四边	正塔面	0.707	-1.000	4.000	-2.328	0	0.707	0	2.000	-1.414	0
	对角线	1.000	-2.000	5.656	-4.000	0	1.000	1.000	2.828	-2.000	0
三角	正塔面	1.333	-2.000	3.464	-3.000	0	1.333	0	1.732	-1.000	-1.000
	对角线	1.333	-2.000	3.464	-3.000	0	1.333	-2.000	1.732	-2.000	1.000

	平行面	1.155	1.500	3.000	-2.598	0	1.155	0.250	1.500	-1.299	0
--	-----	-------	-------	-------	--------	---	-------	-------	-------	--------	---

9.2.10 在扭矩作用下，塔柱轴力 N 和腹杆轴力 S 按下列公式计算：

刚性交叉腹杆和 K 形腹杆塔架：

$$S = \frac{M_Z}{nd \cos \alpha \cos \frac{\pi}{n}} \quad (9.2.10-1)$$

$$N = 0 \quad (9.2.10-2)$$

柔性交叉腹杆塔架：

$$S = \frac{2M_Z}{nd \cos \alpha \cos \frac{\pi}{n}} \quad (9.2.10-3)$$

$$N = -\frac{2M_Z}{nd \cos \alpha \cos \frac{\pi}{n}} \quad (9.2.10-4)$$

式中 M_Z ——节间 i 上端作用扭矩设计值 (kN.m)；

d ——节间 i 上端的塔架外接圆直径 (m)。

【条文说明】9.2.10 在扭矩 M_Z 作用下，由结构的对称性，不论那种腹杆形式的塔架，同截面的所有塔柱轴力均应相等；刚性交叉腹杆和 K 形腹杆的塔架，腹杆轴力为等值而符号相反的两组；柔性交叉腹杆塔架，则有一半腹杆受拉而另一半腹杆轴力为零。这样，所有塔柱和腹杆轴力，只需用静力平衡条件求得。

9.2.11 当计算所得四边形钢塔腹杆承担的剪力与同层塔柱

承担的剪力之比 $\Delta = \left| \frac{Vb}{\sqrt{2}Mtg\theta} - 1 \right| \leq 0.4$ 时，腹杆最小轴力应

取塔柱内力乘系数 α ，系数 α 按下式计算：

$$\alpha = \mu(0.228 + 0.649\Delta) \frac{b}{h} \quad (9.2.11)$$

式中 M ——整个塔身在节间 i 以上所有水平荷载对节间 i 上端所产生的弯矩设计值 (kN.m)；

V ——整个塔身在节间 i 以上所有水平荷载对节间 i 上端所产生的剪力设计值 (kN)；

b ——节间 i 上端的塔架宽度 (m)；

θ ——为塔柱与铅垂线之夹角 (度)；

h ——为计算截面以上塔体高度 (m)；

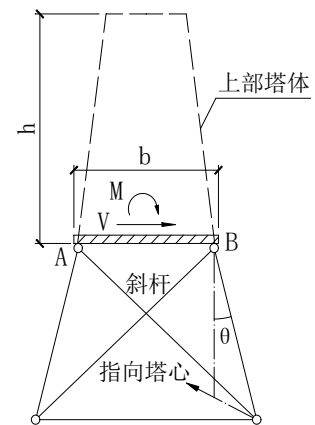


图 9.2.11 斜杆最小轴力限值计算

μ —— 刚性腹杆取 1，柔性腹杆取 2。

【条文说明】9.2.11 对于四边形钢塔，由于其下部塔柱斜度较大，有较强的抗剪能力，从而使得相应层的腹杆所承受的剪力减小。而实际当风的分布状况发生变化时，腹杆的内力会大大超过这一数值。这一现象称为“埃菲尔效应”。因此，应控制腹杆“最小内力”值。

9.2.12 塔架中的构造支撑以及不受力或受力很小的横膈、再分式腹杆等的设计内力不应小于被它所支撑的杆件的内力值的 1/50。

9.2.13 当钢塔架与排烟筒采用整体整体吊装时应应对钢塔架进行吊装验算。

9.3 钢塔架构造设计

9.3.1 塔架构造除应符合本标准规定外，尚应符合现行国家标准《高耸结构设计标准》GB50135 的有关规定。塔架构件的长细比 λ 应满足表 9.3.1 要求。

表 9.3.1 塔架构件容许长细比最大值

塔柱		受压杆件		受拉杆件	
非强度控制	强度控制	横腹杆及斜腹杆	辅助杆件	一般受拉杆件	预应力杆件
$120\sqrt{235/f_y}$	$80\sqrt{235/f_y}$	$150\sqrt{235/f_y}$	$200\sqrt{235/f_y}$	$350\sqrt{235/f_y}$	不限
注： f_y —— 杆件钢材屈服强度（ N/mm^2 ）。					

9.3.2 斜腹杆与水平腹杆的夹角宜控制在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 范围。

9.3.3 塔架构件连接法兰盘最小厚度不宜小于 16mm，法兰盘的局部构造尺寸应符合图 9.3.3 的要求。

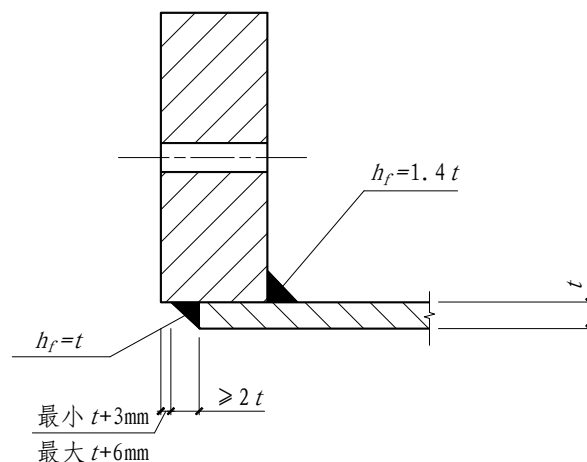


图 9.3.3 法兰构造示意

9.3.4 塔架平台梁边与排烟筒加劲肋外边缘之间的净距离不应小于 100mm。

9.3.5 塔架构件中，圆管构件的最小壁厚不宜小于 6mm，连接板的最小厚度不宜小于 6mm。

10 钢烟囱减振设计

10.0.1 钢烟囱横风向振幅超过本标准第 3.0.19 条的规定限值或共振应力变化的循环次数不小于 5×10^4 次时, 宜采用调谐阻尼器进行风振控制。当采用调谐阻尼器时, 宜优先选择调谐液体阻尼器。

【条文说明】10.0.1 调谐阻尼器主要有调谐质量阻尼器和调谐液体阻尼器, 钢烟囱具有高而柔的特点, 更适合调谐液体阻尼器, 且调谐液体阻尼器具有简单、经济、适用以及易于维护等优点, 故建议优先选择调谐液体阻尼器。

10.0.2 调谐阻尼器宜布置在钢烟囱顶部或所控制振型的峰值处。

10.0.3 调谐阻尼器设计参数取值宜符合下述规定:

1 调谐阻尼器的有效质量与结构预期控制振型广义质量的比值宜取 0.5%~5%, 且宜取较大值:

$$\mu_T = \frac{\tau_T \cdot m_T}{\varphi_1^T \cdot M \cdot \varphi_1} \quad (10.0.3-1)$$

式中 μ_T —— 调谐阻尼器的有效质量与被控结构预期控制振型广义质量的比值;

m_T —— 等效调谐质量 (kg): 对于调谐质量阻尼器取质量块质量, 对调谐液体阻尼器取液体质量;

τ_T —— 调谐阻尼器质量参与系数: 调谐质量阻尼器取为 1; 调谐液体阻尼器根据阻尼液与阻尼液箱体的环形宽度等参数计算确定;

M —— 被控结构质量矩阵 (kg);

φ_1 —— 被控结构风振第一阶振型, 振型向量在调谐阻尼器安装位置取为 1。

2 调谐阻尼器的最优自振圆频率和最优阻尼比宜由下式确定:

$$\omega_T = \sqrt{\sigma_n \cdot \frac{g}{r} \cdot \tanh(\sigma_n \cdot \frac{h_0}{r})} \quad (10.0.3-2)$$

$$\omega_{\text{opt}} = \omega_1 \frac{(1 - \mu_T/2)^{1/2}}{1 + \mu_T} \quad (10.0.3-3)$$

$$\xi_T = \sqrt{\frac{\mu_T(1 - \mu_T/4)}{4(1 + \mu_T)(1 - \mu_T/2)}} \quad (10.0.3-4)$$

式中 ω_T —— 环形调谐液体阻尼器的自振圆频率 (rad/s);

σ_n —— 与环形箱体内外环半径之比 k 有关的计算参数, 见表 10.0.3;

r —— 环形箱体外环半径 (m);

h_0 —— 阻尼液高度 (m);

ω_{opt} —— 调谐阻尼器的最优自振圆频率 (rad/s);

ω_1 —— 被控结构风振第一阶自振圆频率 (rad/s);

ξ_T —— 调谐阻尼器最优阻尼比。

表 10.0.3 环形调谐液体阻尼器的自振圆频率计算参数

k	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4
σ_n	1.8400	1.8036	1.7053	1.5820	1.46178

10.0.4 调谐阻尼器参数设计宜按下列规定确定:

1 调谐质量阻尼器的刚度和阻尼系数宜按下式确定:

$$k_T = m_T \omega_T^2 \quad (10.0.4-1)$$

$$c_T = 2m_T \xi_T \omega_T \quad (10.0.4-2)$$

式中: k_T —— 调谐质量阻尼器的刚度 (N/m);

c_T —— 调谐质量阻尼器的阻尼系数 ($N \cdot s/m$)。

2 调谐液体阻尼器的自振圆频率与公式(10.0.3-3)给出最优频率之间的相对误差不宜大于 5%。

10.0.5 阻尼器惯性质量的最大行程宜满足下列规定:

1 当调谐质量阻尼器的刚度和阻尼系数采用第 10.0.3 条规定给出的最优值时,阻尼器惯性质量最大设计行程可按下式计算

$$y_{Dm} = \gamma \cdot \eta \cdot x_{Dm}(z_c) \quad (10.0.5)$$

式中: y_{Dm} —— 调谐质量阻尼器惯性质量最大设计行程 (m);

z_c —— 调谐质量阻尼器安装位置高度;

$x_{Dm}(z_c)$ —— 调谐质量阻尼器安装位置处的主体结构最大动位移 (m), 按本标准第

5.2.10 条的规定确定;

η —— 调谐质量阻尼器行程与安装位置处结构最大位移的比值, 可由表 10.0.5 确定;

γ —— 安全系数, 取 1.4。

2 调谐质量阻尼器惯性质量的行程允许值应不大于其设计值的 1.2 倍。

表 10.0.5 调谐质量阻尼器最大行程与安装位置处被控结构最大动位移比值 η

钢烟囱 阻尼比	模态质量比 μ_T					
	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
0.01	8.935	6.374	4.519	3.689	3.195	2.858
0.02	8.304	6.018	4.320	3.549	3.085	2.767
0.035	5.021	3.505	2.384	1.883	1.587	1.388
0.05	6.890	5.165	3.819	3.184	2.796	2.526

注：中间数值可采用线性插值确定。

10.0.6 当结构风振响应包含多振型成分时，宜采用时程分析法进行调谐质量阻尼器结构风振控制设计。

10.0.7 设计文件中应注明调谐阻尼器的关键设计参数，或提供产品安装使用说明书。

10.0.8 调谐液体阻尼器应与主体结构紧密连接，保证阻尼器与主体结构共同运动，不发生相对滑移。

11 钢烟囱维护与加固设计

11.1 钢烟囱维护与检测

11.1.1 钢烟囱应根据其安全性等级、烟气腐蚀等级及使用环境，建立全寿命周期内的烟囱使用、维护管理制度，制定相应的烟囱安全检查项目和检查程序，并制定日常巡查、定期检查、应急检查和专业检测实施细则与管理规定。

11.1.2 日常巡查方法一般可采用目测或其他监测手段，发现筒壁掉漆或腐蚀以及螺栓松动时，应及时采取处理措施。

11.1.3 湿烟囱或潮湿烟囱每年或机组大修期间，应进行一次定期检查。定期检查以目测观察为主，必要时辅助仪器检查，发现重要构件有严重破损或明显变形时，应委托有资质的单位进行检测鉴定。定期检查内容主要包括：

- 1 湿烟囱防腐涂层的完整性，检查有无粉化、起泡、龟裂、起皮、剥落等；
- 2 内筒或内衬是否有渗漏现象；
- 3 烟囱变形和倾斜情况；
- 4 螺栓有无松动、生锈、腐蚀等情况；
- 5 地基基础是否有渗漏冷凝液的侵蚀现象。

11.1.4 出现下列情况时，应立即进行应急检查：

- 1 在遭遇重现期超过 50 年一遇的大风、暴雪等极端天气后；
- 2 受撞击、火灾、爆炸、地震或其他外力因素等情况影响造成烟囱损伤时；
- 3 其他需要进行应急检查的事件发生后。

11.1.5 专业检测与鉴定宜委托有钢结构工程质量检测鉴定能力等级一级及以上的单位承担，当遇到下列情况之一时，应对烟囱的缺陷和损伤、承载力、变形等结构质量或性能进行专业检测鉴定：

- 1 拟进行改造、改变使用功能、使用条件或使用环境；
- 2 达到设计工作年限拟继续使用；
- 2 因遭受灾害、事故而造成损伤或损坏；
- 3 需要安全或抗震鉴定；
- 4 需要修复与加固；
- 5 存在严重的质量缺陷或出现严重的腐蚀、损伤、变形等。

【条文说明】11.1.5 钢烟囱与普通建筑结构相比有其自身独特的结构特点和专业性，因此要求由钢结构工程质量检测鉴定能力等级不低于一级的单位承担检测、鉴定工作。

11.1.6 在以下情况下，钢烟囱需继续使用时，应进行加固：

- 1 通过检测，认为结构已无法满足预期使用要求；
- 2 风振致使钢烟囱筒壁或法兰连接螺栓发生疲劳破坏；
- 3 在火灾、地震等灾害后，结构产生严重损伤；
- 6 烟囱腐蚀，已对结构产生严重损伤。

11.1.7 既有钢烟囱的检测和鉴定应符合下列原则：

1 检测应符合以下原则：

- 1) 当设计和验收资料齐全时，可进行符合性验证；
- 2) 当设计和验收资料缺失时，应通过现场取样或现场测试进行检测；
- 3) 当存在腐蚀、火灾等情况时，应通过现场取样检测。

2 鉴定应符合以下原则：

- 1) 钢烟囱的可靠性应根据安全性、适用性和耐久性评定结果进行鉴定；
- 2) 适用性和耐久性鉴定，应在钢烟囱安全性满足要求的基础上进行；
- 3) 需要按现行设计标准鉴定的钢烟囱，应按钢烟囱设计要求及现行国家有关标准进行符合性鉴定。

11.1.8 应根据检测鉴定评定等级，对钢烟囱采取不同的维护、维修或加固措施。钢烟囱各分项检测评定等级指标分 *a*、*b*、*c*、*d* 四个等级，分别对应状态为：

1 *a*—检测指标满足建造时或最后一次改造时的规范和设计要求，结构工作正常，无需采取任何措施即可继续使用；

2 *b*—检测指标轻微不满足建造时或最后一次改造时的规范和设计要求，性能下降不超过 5%，可认为对结构性能无影响，可不采取措施继续使用；

3 *c*—检测指标不满足建造时或最后一次改造时的规范和设计要求，性能下降 5%~30%，且满足荷载标准组合下的性能要求，应采取措施后方可继续使用；

4 *d*—检测指标严重不满足建造时或最后一次改造时的规范和设计要求，性能下降超过 30%，或不满足荷载标准组合下的性能要求，应立即采取措施或结构拆除。

具体检测鉴定评定等级细则应符合现行国家有关检测鉴定标准。

【条文说明】11.1.8 *a*、*b* 级指结构在荷载作用设计值下仍保证安全，*c* 级指结构在荷载

作用标准值作用下能保证结构安全，*d* 级指结构已无法满足荷载作用标准值下的承载力要求。结构拆除是指由分项控制的相关结构拆除。

11.2 钢烟囱的加固设计

11.2.1 钢烟囱应由具有钢烟囱设计经验和能力的结构设计单位进行加固设计。

【条文说明】11.2.1 钢烟囱与普通建筑结构相比有其自身独特的结构特点和专业性，钢烟囱设计、制作和安装与普通建筑结构相比难度较高，尤其涉及腐蚀破坏、风振破坏的钢烟囱，其专业性很强。因此对于钢烟囱的加固设计工作，应当由具有钢烟囱设计经验和设计能力的结构设计单位承担。

11.2.2 钢烟囱加固设计应采取有效措施，保证新增截面、构件或结构与原结构可靠连接、协调工作。在加固设计和施工时，应充分考虑对未加固结构区域或构件造成的不利影响。

【条文说明】11.2.2 施工方法和施工顺序对结构的加固设计效果有直接影响，因此在加固设计过程中应充分考虑现场条件对施工方法、加固效果和施工工期的影响，保证加固件与原结构协调工作。

11.2.3 根据不同的加固内容可采用改变结构体系、替换构件、增大构件截面和增强连接等加固方法。

11.2.4 改变结构体系的加固设计，应对改变后的结构体系按结构承载能力极限状态和正常使用极限状态进行计算，并应考虑施工过程中对相关结构构件承载能力和使用功能的影响。

【条文说明】11.2.4 改变结构体系的实质是通过改变结构的传力体系、增加结构空间刚度、改变构件刚度比和支承情况等改变结构计算体系，调整原结构内力，使结构按设计要求进行内力重分配，从而达到加固的目的。

11.2.5 采用替换构件法进行加固施工时，应对拆除原构件后、置换新构件前的结构体系按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行验算。

11.2.6 采用增大构件截面法加固钢烟囱时，应考虑构件的受力情况及存在的缺陷，在施工方便、连接可靠的前提下，选取最有效的增大截面形式。采用增大构件截面法进行加固时，按增大后的截面进行承载力计算。钢材强度设计值应考虑折减系数 *k*，可取 *k*=0.8。

11.2.7 增强连接的加固方法可以采用焊接、普通螺栓连接或高强度螺栓连接。

11.2.8 加固采用的所有钢材，包括型钢、板材、螺栓等，均须采取防腐措施。

附录 A 常温钢结构常用涂料

表 A. 0. 1 常温钢结构常用底漆和防锈漆

名 称	性 能	适 用 范 围	配 套 面 漆
红丹油性防锈漆 红丹醇酸防锈漆	防锈能力强，耐候性好，附着力较好，但因含铅有毒	适用于涂刷大型钢结构表面作防锈打底用	与油性磁漆、醇酸磁漆和酚醛磁漆配套使用
云母氧化铁底漆	具有良好的热稳定性，耐碱性和防锈能力	适于热带气候，湿热条件下使用	与各种磁漆配套使用，是目前代替红丹的最好底漆
乙烯磷化底漆	附着力强，因含磷酸盐可使金属表面形成钝化层，延长涂层使用寿命	可作有色及黑色金属的防锈涂料，能起到一定磷化作用，增强涂层附着力，但不能代替底漆	不能与碱性涂料配套使用
铁红醇酸底漆	附着力强，有弹性，耐冲击，耐蚀性较差，在湿热地区耐久性差	适用于钢材表面打底防锈	与各种调合漆和磁漆配套使用
厚浆型云铁醇酸防锈漆	具有良好附着力、防潮性和耐候性，特点是耐大气侵蚀	用作大型钢结构，桥梁等钢材表面防锈打底或中间漆	与各种磁漆配套使用
铁红环氧底漆 铁红过氯乙烯底漆	附着力强，防锈、防潮性能较佳，能耐海洋性及湿热气候	适用于涂覆沿海地区及湿热气候条件下的钢材表面作底漆	与磷化底漆和环氧磁漆等配套
铁红油性防锈漆 铁红酚醛防锈漆	附着力强，防锈性能次于红丹油性防锈漆（Y53-31）耐磨性差	适用于锈蚀情况不太严重的室内外钢结构表面打底用	与酚醛磁漆配套使用
环氧沥青底漆	具有良好的耐化学、耐潮湿性能，干燥快，附着力强	主要用于地下建筑设施及管道防腐涂漆	主要是与环氧沥青磁漆，也可与云铁环氧漆配套

表 A. 0-2 常温钢结构常用面漆

名 称	性 能	适 用 范 围	配 套 底 漆
各色过氯乙烯防腐漆 过氯乙烯防腐漆	具有优良的防锈性能和耐酸、耐碱、防霉、防潮性，但附着力较差	主要用于化工建筑、机械、管道等防腐蚀涂装工程	与铁红过氯乙烯底漆配套使用
各色醇酸磁漆	具有较好光泽和机械强度，能常温干燥，耐候性较好，但耐水性差	主要用于设备、仪表等表面涂装	可与油性、酚醛醇酸等底漆配套使用
	具有良好的耐候性和较好的附着力，但表干时间较长	主要用于户外钢结构、管道等建筑设施的涂装	可与油性酚醛醇酸等底漆配套使用
灰醇酸磁漆	干燥迅速，漆膜坚韧光亮，有较好的保光保色性能，不易起皱	适用于室内外钢结构作面漆	
各色环氧硝基磁漆	耐候、耐磨性良好，有较高机械强度，耐油性良好	适用于潮湿海洋和湿热带气候，及室内外防止工业大气腐蚀的环境	
环氧沥青磁漆	具有耐化学、耐水、耐潮等性能	主要用于地下设施、管道等防腐	可与环氧沥青底漆配套使用
铝粉漆	耐高温、耐候性能良好	用于高温管道、设备外壁防腐蚀，及其它野外钢结构	
“66”面漆	透水性低，耐候性是一般醇酸磁漆的 1~2 倍	专供桥梁、高压线塔及大型室外钢结构面漆用	
各色酚醛磁漆	有良好附着力，光泽好，但耐候性比醇酸磁漆较差	用于建筑、交通工具及机械设备等一般金属作面漆	
各色酚醛防火漆	光泽柔和，有延迟着火制止火势蔓延的作用	适用于船舶客轮及有防火要求的场所的金属面漆	
氯磺化聚乙烯磁漆	具有优良的耐酸、耐碱、耐盐，耐老化和防水性能	主要用于化工建筑，设备和管道的涂装	与氯磺化聚乙烯底漆配套使用

附录 B 钢铁基层常用涂层配套

表 B.0.1 常用涂层配套

涂料品种	涂 层 配 套	每遍厚度 (μm)
过氯乙 烯涂料	喷砂除锈时：乙烯磷化底漆 1 遍	5~8
	手工除锈时：铁红环氧酯底漆 1 遍	20~25
	铁红过氯乙烯底漆 1~2 遍	15~20
	过渡漆（底漆：防腐漆=1：1）1 遍	
	各色过氯乙烯防腐漆 3~7 遍	
环氧涂料	铁红环氧酯底漆 1 遍	20~25
	环氧防腐漆 2~4 遍	20~40
	环氧清漆 1~2 遍	
环氧沥 青涂料	环氧沥青底漆 1~2 遍	40~70
	环氧沥青防腐漆 2~3 遍	
沥青涂料	铁红醇酸底漆 1 遍	15~20
	沥青漆 3~4 遍	30~40
聚氨 酯涂料	聚氨酯底漆 1 遍	20~30
	聚氨酯磁漆 2~3 遍	
	聚氨酯清漆 1~3 遍	15~20
聚氨酯 沥青涂料	聚氨酯沥青底漆 1~2 遍	20~40
	聚氨酯沥青面漆 2~3 遍	
氯磺化聚 乙烯涂料	氯磺化聚乙烯底漆 2 遍	20~30
	氯磺化聚乙烯中间漆 1~2 遍	35~40
	氯磺化聚乙烯面漆 2~3 遍	15~20
氯化橡 胶涂料	氯化橡胶底漆 1 层	30~50
	氯化橡胶防腐漆 2~4 遍	
聚氯乙烯 含氟涂料	聚氯乙烯底漆 2~3 遍	15~20
	聚氯乙烯防腐漆 4~7 遍	
	聚氯乙烯防腐漆 3~5 遍	15~20
	聚氯乙烯清漆 1 遍	
聚苯乙 烯涂料	铁红聚苯乙烯底漆 1 遍	20~30
	聚苯乙烯防腐漆 2~3 遍	
	聚苯乙烯清漆 1 遍	
氯乙烯醋酸乙 烯共聚涂料	氯乙烯醋酸乙烯共聚底漆 1 遍	20~25
	氯乙烯醋酸乙烯共聚面漆 3~6 遍	
醇酸耐 酸涂料	醇酸底漆 1 遍	15~25
	醇酸耐酸漆 3~6 遍	
氯化橡 胶涂料	铁红环氧酯底漆 1 遍	20~25
	氯化橡胶底漆 1 遍	30~50

涂料品种	涂 层 配 套	每遍厚度 (μm)
(厚浆型)	氯化橡胶(厚浆型)防腐漆 1~2 遍	60~80
环氧涂料 (厚浆型)	铁红环氧酯底漆 1 遍	20~25
	环氧(厚浆型)防腐漆 1~2 遍	70~100
	环氧清漆 1 遍	15~20
环氧沥 青涂料 (厚浆型)	铁红环氧酯底漆 1 遍	20~25
	环氧沥青底漆 1 遍	40~70
	环氧沥青(厚浆型)面漆 1~2 遍	80~120
聚氨酯涂料 (厚浆型)	铁红环氧酯底漆 1 遍	20~25
	聚氨酯(厚浆型)面漆 1~2 遍	70~100
	聚氨酯清漆 1 遍	15~20
环氧玻璃 鳞片涂料	环氧富锌底漆 1 遍	40~75
	环氧玻璃鳞片涂料 1~2 遍	100~200
	环氧清漆 1~2 遍	15~20
环氧沥青玻璃 鳞片涂料	环氧富锌底漆 1 遍	40~75
	环氧沥青底漆 1 遍	40~70
	环氧沥青玻璃鳞片涂料 1~2 遍	100~200
聚氨酯 玻璃鳞 片涂料	环氧富锌底漆 1 遍	40~75
	聚氨酯玻璃鳞片涂料 1~2 遍	100~200
	聚氨酯清漆 1 遍	15~20
不饱和聚酯玻 璃鳞片涂料	环氧富锌底漆 1 遍	40~75
	不饱和聚酯玻璃鳞片涂料 1~2 遍	100~200
	聚酯清漆 1 遍	15~20

附录 C 高温结构常用耐热涂料特性与用途

表 C.0.1 高温结构常用耐热涂料

名 称	组 成	特 性	用 途
红有机硅 烘干绝缘漆	由改性醇酸树脂，有机硅树脂，少量氨基树脂、颜料、体质颜料及二甲苯调制而成	该涂料附着力好，具有良好的耐热，防潮及耐温变性	主要用于涂覆非线性绕电阻及其它金属零件表面
草绿色有 机耐热漆	由有机硅树脂，乙基纤维，耐高温颜料及体质颜料以及混合有机溶剂调制而成	具有良好的耐热性，耐油性和耐盐水性	用于各种耐高温又要求常温干燥的钢铁设备与零件的涂覆
铝粉有机硅 烘干耐热漆	由清漆和铝粉浆组成，清漆是聚酯改性有机硅树脂的甲苯溶液，同时清漆与铝粉浆，以 10：1 均匀混合	该涂料可以在 150℃烘干，能耐 500℃高温	主要用于涂覆高温设备的钢铁零件。如发动机外壳、烟囱、排气管、烘箱、火炉等
有机硅富锌 底漆（分装）	由有机硅树脂、超细锌粉、添加剂、固化剂等所组成	具有良好的耐热性、温变性、防锈性和阴极保护作用，可长期在 400℃高温下作用	用于有机硅高炉与热风炉高温防腐漆配套使用
有机硅高 炉、热风炉 高温防腐漆	由有机硅树脂，耐高温颜料，漆添加剂和固化剂等所组成	具有优异的耐热性，耐温差骤变性，可长期在 400℃高温条件下使用。耐化工大气、耐水、耐潮和电绝缘性优良，可在常温条件下固化	专用于高炉、热风炉外壳高温防腐，也适用于烟囱、排气管、高温管道、加热炉，热交换器等表面的高温防腐
环保型耐 高温云铁 防锈底漆		耐热 500℃，在火焰中不燃、不开裂、不脱落、不起皮、附着力 1~2 级，PH 值 9，抗冲击 50kg·cm 不裂	钢烟囱及管道、钢结构建筑防锈底漆