

中华人民共和国国家标准

GB/T 30811—2014

燃煤电厂用玻璃纤维增强塑料烟囱内筒

Glass fiber reinforced plastic chimney liners for coal-fired units

2014-06-24 发布

2015-02-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国建筑材料联合会提出。

本标准由全国纤维增强塑料标准化技术委员会(SAC/TC 39)归口。

本标准起草单位:武汉理工大学。

本标准参加起草单位:中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司、中冶集团建筑研究总院、北京玻璃钢院复合材料有限公司、河北可耐特玻璃钢有限公司、冀州中意复合材料有限公司、中复连众复合材料集团有限公司、昊华中意玻璃钢有限公司。

本标准主要起草人:王继辉、丁安心、倪爱清、冀运东、张凌伟、张大厚。

燃煤电厂用玻璃纤维增强塑料烟囱内筒

1 范围

本标准规定了燃煤电厂用玻璃纤维增强塑料烟囱内筒(以下简称 FRP 烟囱内筒)的术语和定义、分类、一般要求、要求、试验方法、检验规则、标志、运输、起吊移位及贮存等。

本标准适用于以混凝土外筒支撑、运行烟气温度不超过 93 ℃、短时(不超过 30 min)烟气温度不超过 121 ℃、直径为 4.0 m~10.0 m 的燃煤电厂用 FRP 烟囱内筒。其他 FRP 烟囱可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 1410 固体绝缘材料 体积电阻率和表面电阻率试验方法
- GB/T 1447 纤维增强塑料 拉伸性能试验方法
- GB/T 1448 纤维增强塑料 压缩性能试验方法
- GB/T 1449 纤维增强塑料 弯曲性能试验方法
- GB/T 1462 纤维增强塑料 吸水性试验方法
- GB/T 1634.2—2004 塑料 负荷变形温度的测定 第 2 部分:塑料、硬橡胶和长纤维增强复合材料
- GB/T 2576 纤维增强塑料树脂不可溶分含量试验方法
- GB/T 2577 玻璃纤维增强塑料树脂含量试验方法
- GB/T 3854 增强塑料巴柯尔硬度试验方法
- GB/T 3857—2005 玻璃纤维增强热固性塑料耐化学介质性能试验方法
- GB/T 3961 纤维增强塑料术语
- GB/T 8924 纤维增强塑料燃烧性能试验方法 氧指数法
- GB/T 17470 玻璃纤维短切原丝毡和连续原丝毡
- GB/T 18369 玻璃纤维无捻粗纱
- GB/T 18370 玻璃纤维无捻粗纱布
- GB 50051—2002 烟囱设计规范
- GB 50011—2010 建筑抗震设计规范
- GB 50009—2012 建筑结构荷载规范

3 术语和定义

GB/T 3961 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

玻璃纤维增强塑料烟囱内筒段 **glass fiber reinforced plastic chimney liners can**

以耐酸玻璃纤维及其制品为增强材料、以乙烯基酯树脂为基体材料,采用缠绕成型,具有一定长度的,位于混凝土烟囱内部的圆筒状单元。

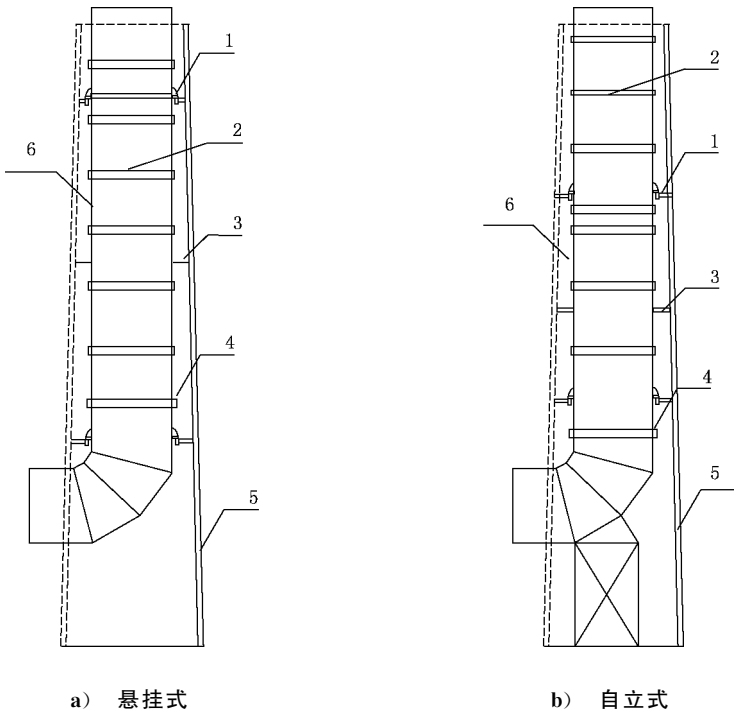
3.2

玻璃纤维增强塑料烟囱内筒 glass fiber reinforced plastic chimneyl iners

位于混凝土烟囱内部,由若干玻璃纤维增强塑料烟囱内筒段通过适当的形式连接而成,用于输送烟气的圆筒状制品。

4 分类

FRP 烟囱内筒可分为悬挂式 FRP 烟囱内筒和自立式 FRP 烟囱内筒,悬挂式 FRP 烟囱内筒如图 1a)所示,自立式 FRP 烟囱内筒如图 1b)所示。



说明:
1——支撑点;
2——加强筋;
3——横向制晃装置;
4——膨胀节;
5——混凝土外筒;
6——FRP 烟囱内筒。
对悬挂式 FRP 烟囱内筒,支撑点又称为悬挂点。

图 1 FRP 烟囱内筒

5 一般要求

5.1 原材料

5.1.1 树脂

5.1.1.1 除非另有规定,应采用阻燃型乙烯基酯树脂,所用的树脂应耐烟气的温度和腐蚀,其树脂浇铸体的性能应达到下列要求:

- a) 拉伸强度 ≥ 60 MPa;
- b) 拉伸弹性模量 ≥ 3.0 GPa;
- c) 断裂伸长率 $\geq 3.0\%$;
- d) 热变形温度 ≥ 100 °C。

热变形温度按 GB/T 1634.2—2004 中 A 法进行测试。

5.1.1.2 层合板按 GB/T 3857—2005 附录 B 制备,层合板在 82 °C、25%的硫酸溶液中浸泡 1 年,其弯曲强度保留率应不低于 50%。

5.1.1.3 除非另有规定,树脂不应含有颜料、染料、着色剂或填料。

5.1.2 增强材料

5.1.2.1 采用的玻璃纤维毡应符合 GB/T 17470 的规定,玻璃纤维无捻粗纱应符合 GB/T 18369 的规定,玻璃纤维无捻粗纱布应符合 GB/T 18370 的规定。其他纤维及制品应符合相应的国家标准或行业标准。

5.1.2.2 防腐蚀层中的富树脂层应采用耐酸玻璃纤维表面毡和导电碳纤维表面毡,防腐蚀层中的次内层应采用耐酸玻璃纤维短切毡或喷射纱;结构层应采用耐酸玻璃纤维及其制品。耐酸玻璃纤维在 96 °C、10%的硫酸溶液中浸泡 24 h,其质量损失率应不大于 10%。

5.1.2.3 如供需双方协商一致,防腐蚀层进行防静电处理时,可采用导电碳填料代替导电碳纤维表面毡。

5.2 设计与制造

5.2.1 FRP 烟囱内筒的厚度由积灰载荷、支撑方式、外部载荷计算确定,厚度设计参见附录 A。结构层厚度应不小于 10 mm 和 $D/1\ 000$ 中的较大者。对于 FRP 烟囱内筒,应合理布置支撑点、横向支撑及悬挂(或自立)长度。

注: D 为 FRP 烟囱内筒内径。

5.2.2 FRP 烟囱内筒应设置环向加强筋,加强筋间距应不大于内筒 $1.5D$ 或者 8 m 中的较小者,每根 FRP 烟囱内筒段应至少设置一个加强筋,加强筋的设计参见附录 B。

5.2.3 FRP 烟囱内筒横向支撑间距与 FRP 烟囱内筒直径的比值应不大于 10。

5.2.4 悬挂式 FRP 烟囱内筒悬挂点宜位于 FRP 烟囱内筒上部的 $1/4$ 区域内。

5.2.5 自立式 FRP 烟囱内筒的高度不宜超过 50 m,且其高径比不宜大于 20。

5.2.6 FRP 烟囱内筒段之间采用平端对接形式,对接处用树脂腻子封堵,内、外表面双面补强,内接口防腐蚀层的要求和内筒防腐蚀层的要求相同,接口厚度及宽度应满足下列要求,接口设计参见附录 C:

- a) 接口宽度应不小于 400 mm;
- b) 接口厚度应不小于接口处 FRP 烟囱内筒段的筒壁厚度。

注: FRP 烟囱内筒段的长度根据设备生产能力和混凝土开孔大小确定,其长度尽量长,以减少 FRP 烟囱内筒的接头数量。

5.2.7 制造 FRP 烟囱内筒的环境温度宜为 15 °C ~ 30 °C,相对湿度应不大于 80%;当环境温度低于 10 °C 时,应采取加热保温措施。

5.2.8 FRP 烟囱内筒段在安装之前应充分固化,每根 FRP 烟囱内筒段制作完毕后在常温下的固化时间应不低于 15 d。

6 要求

6.1 FRP 烟囱内筒段外观质量

6.1.1 FRP 烟囱内筒段内、外表面应光滑平整,色泽均匀,无杂质、无纤维外露,无对使用性能有影响的

龟裂、分层、针孔、贫胶区和纤维浸润不良现象。

6.1.2 FRP 烟囱内筒段内、外表面不允许有直径大于 3 mm、深或高大于 5 mm 的凹凸,任意 1 m² 范围内直径大于 4 mm 的气泡不应超过 3 个。

6.1.3 FRP 烟囱内筒段端面应平齐,边角无毛刺。

6.1.4 加强筋外形应符合设计要求,分段制作的加强筋拼接处无明显凹凸。

6.2 FRP 烟囱内筒段尺寸

6.2.1 总厚度

筒壁通常由防腐层、结构层和外表层组成,其总厚度为结构层厚度、防腐层厚度和外表层厚度之和,任一截面的筒壁平均厚度不应小于设计厚度,最小厚度不应小于设计厚度的 90%。

6.2.2 结构层厚度

- a) 悬挂式 FRP 烟囱内筒,悬挂点以下的结构层厚度应不小于表 1 的规定,悬挂点以上的 FRP 烟囱内筒结构层厚度根据工程设计确定;
- b) 自立式 FRP 烟囱内筒的结构层厚度根据工程设计确定。

表 1 悬挂式 FRP 烟囱内筒结构层厚度

内径 m	最大设计负压 Pa	结构层最小厚度/mm					
		加强筋间距 3 m	加强筋间距 4 m	加强筋间距 5 m	加强筋间距 6 m	加强筋间距 7 m	加强筋间距 8 m
4.0	≤1 000	10.0	10.0	10.0	10.0	—	—
	1 500	10.0	10.0	10.0	10.4	—	—
	2 000	10.0	10.0	11.0	11.8	—	—
4.4	≤1 000	10.0	10.0	10.0	10.0	—	—
	1 500	10.0	10.0	10.4	11.0	—	—
	2 000	10.0	10.6	11.6	12.4	—	—
4.8	≤1 000	10.0	10.0	10.0	10.0	10.6	—
	1 500	10.0	10.0	10.8	11.6	12.4	—
	2 000	10.0	11.2	12.2	13.0	13.8	—
5.2	≤1 000	10.0	10.0	10.0	10.4	11.0	11.6
	1 500	10.0	10.4	11.4	12.2	13.0	13.6
	2 000	10.4	11.6	12.8	13.6	14.6	15.4
5.6	≤1 000	10.0	10.0	10.0	10.8	11.6	12.2
	1 500	10.0	10.8	11.8	12.8	13.6	14.2
	2 000	10.8	12.2	13.2	14.2	15.2	16.0
6.0	≤1 000	10.0	10.0	10.6	11.4	12.0	12.6
	1 500	10.0	11.4	12.4	13.2	14.2	14.8
	2 000	11.4	12.6	13.8	14.8	15.8	16.6

表 1 (续)

内径 m	最大设计负压 Pa	结构层最小厚度/mm					
		加强筋间距 3 m	加强筋间距 4 m	加强筋间距 5 m	加强筋间距 6 m	加强筋间距 7 m	加强筋间距 8 m
6.4	≤1 000	10.0	10.0	11.0	11.8	12.6	13.2
	1 500	10.6	11.8	12.8	13.8	14.6	15.4
	2 000	11.8	13.2	14.4	15.4	16.4	17.2
6.8	≤1 000	10.0	10.4	11.4	12.2	13.0	13.6
	1 500	11.0	12.2	13.4	14.4	15.2	16.0
	2 000	12.2	13.6	15.0	16.0	17.0	18.0
7.2	≤1 000	10.0	10.8	11.8	12.6	13.4	14.2
	1 500	11.2	12.6	13.8	14.8	15.8	16.6
	2 000	12.6	14.2	15.4	16.6	17.6	18.6
7.6	≤1 000	10.0	11.2	12.2	13.0	13.8	14.6
	1 500	11.6	13.0	14.2	15.2	16.2	17.0
	2 000	13.0	14.6	16.0	17.0	18.2	19.2
8.0	≤1 000	10.0	11.4	12.6	13.4	14.2	15.0
	1 500	12.0	13.4	14.6	15.8	16.8	17.6
	2 000	13.4	15.0	16.4	17.6	18.8	19.8
8.4	≤1 000	10.6	11.8	12.8	13.8	14.6	15.4
	1 500	12.4	13.8	15.0	16.2	17.2	18.2
	2 000	13.8	15.4	16.8	18.2	19.2	20.4
8.8	≤1 000	10.8	12.2	13.2	14.2	15.0	15.8
	1 500	12.6	14.2	15.4	16.6	17.6	18.6
	2 000	14.2	15.8	17.4	18.6	19.8	20.8
9.2	≤1 000	11.2	12.4	13.6	14.6	15.4	16.4
	1 500	13.0	14.6	16.0	17.0	18.2	19.2
	2 000	14.6	16.4	17.8	19.2	20.4	21.4
9.6	≤1 000	11.4	12.8	14.0	15.0	15.8	16.8
	1 500	13.4	15.0	16.4	17.6	18.6	19.6
	2 000	15.0	16.8	18.2	19.6	20.8	22.0
10.0	≤1 000	11.6	13.0	14.2	15.4	16.2	17.2
	1 500	13.6	15.4	16.8	18.0	19.0	20.0
	2 000	15.4	17.2	18.8	20.0	21.4	22.6
注 1: FRP 烟囱内筒内径介于本表内径之间时,结构层厚度按线性插值法计算; 注 2: FRP 烟囱内筒内径超出本表范围时,结构层厚度设计参见附录 A。							

6.2.3 防腐层、外表层厚度

防腐层中的富树脂层厚度应不小于 0.5 mm,防腐层中的次内层厚度应不小于 2.0 mm,外表层的厚度应不小于 0.5 mm。外表层有防腐性能要求时,外表层的厚度应不小于 1.5 mm。

6.2.4 长度

长度偏差为设计长度的 $\pm 0.5\%$,且不超过 ± 13 mm。

6.2.5 内径

内径偏差为设计内径的 $\pm 0.5\%$ 。

6.2.6 椭圆度

端部的椭圆度应不大于壁厚的 $\frac{1}{2}$,其他部位的椭圆度应不大于设计内径的 1%。

6.2.7 端面垂直度

端面垂直度应不大于 8 mm。

6.2.8 加强筋间距

两加强筋间的距离应不大于设计间距,加强筋距 FRP 烟囱内筒段端面的距离应符合设计规定。

6.3 FRP 烟囱内筒段物理性能

6.3.1 巴柯尔硬度

内、外表面的巴柯尔硬度应不小于 40。

6.3.2 树脂含量

防腐层中的富树脂层树脂含量应不小于 90%,防腐层中的次内层树脂含量应为 70%~80%;结构层树脂含量应为 35% $\pm$ 5%。

6.3.3 树脂不可溶分含量

树脂不可溶分含量应不小于 88%。

6.3.4 阻燃性能

FRP 烟囱内筒有阻燃要求时,其氧指数应不小于 32。

6.3.5 导电性能

内表面的表面电阻率应不大于 $1.0 \times 10^6 \Omega$ 。

6.3.6 吸水率

吸水率应不大于 0.3%。

6.3.7 重量

重量应不小于设计值的 95%,且不大于设计值的 110%。

6.4 FRP 烟囱内筒段力学性能

- a) 悬挂式 FRP 烟囱内筒段的力学性能根据工程设计来确定,但结构层力学性能应不低于表 2 规定。
- b) 自立式 FRP 烟囱内筒段的力学性能根据工程设计来确定,但结构层力学性能应不低于表 3 规定。

表 2 悬挂式 FRP 烟囱内筒段力学性能

性 能	指 标		
	$L \leq 100$ m	$L \leq 150$ m	$L \leq 200$ m
轴向拉伸强度/MPa	100	120	140
环向拉伸强度/MPa	280	280	280
轴向弯曲模量/GPa	10	12	14
环向弯曲模量/GPa	20	18	16
注: L 为悬挂长度,悬挂长度为悬挂点到该悬挂段底部的长度。			

表 3 自立式 FRP 烟囱内筒段力学性能

性 能	指 标
轴向压缩强度/MPa	100
轴向拉伸强度/MPa	120
环向拉伸强度/MPa	280
轴向弯曲模量/GPa	12
环向弯曲模量/GPa	18

6.5 FRP 烟囱内筒

6.5.1 椭圆度

组装完毕的 FRP 烟囱内筒的椭圆度应符合下列要求:

- a) FRP 烟囱内筒的椭圆度不大于设计内径的 1%;
- b) 位于 FRP 烟囱内筒开孔中心一倍开孔内径范围内的横截面,其椭圆度应不大于该横截面设计内径的 1%与开孔内径的 2%之和。

6.5.2 中心偏差

组装完毕的 FRP 烟囱内筒的中心偏差应不大于 FRP 烟囱内筒安装高度的 1/1 000,且不大于 100 mm。

7 试验方法

7.1 FRP 烟囱内筒段外观质量

用精度为 0.02 mm 游标卡尺、精度为 1 mm 钢卷尺检验,目测 FRP 烟囱内筒段的内、外表面和两端面。

7.2 FRP 烟囱内筒段尺寸

7.2.1 筒壁厚度

7.2.1.1 总厚度

垂直切割 FRP 烟囱内筒段端部,用精度为 0.02 mm 的游标卡尺,沿圆周均布测量至少 7 次,取最小值和所有测量结果的算术平均值。

7.2.1.2 防腐层厚度和外表层厚度

垂直切割 FRP 烟囱内筒段端部,用砂度为 0.074 mm(或更细)的砂纸把端口打磨光滑,用水除去粉尘,将打磨处完全洗净后,用精度 0.02 mm 的游标卡尺测量防腐层厚度和外表层厚度,至少测量 4 次,测量点均布,取所有测量结果的算术平均值。

7.2.1.3 结构层厚度

总厚度减去防腐层厚度和外表层厚度计算得到。

7.2.2 长度

将 FRP 烟囱内筒段放在平面上,用精度为 1 mm 的钢卷尺沿 FRP 烟囱内筒段的母线测量其长度,测量 4 次,测点均布,取 4 次测量结果的算术平均值。

7.2.3 内径

在 FRP 烟囱内筒段两个端面 and 中心部位,用精度为 0.1 mm 内径测量尺测量内径,测量 4 次,测点均布,取 4 次测量结果的算术平均值。

7.2.4 椭圆度

在 FRP 烟囱内筒段两个端面,用精度为 0.1 mm 内径测量尺测量 4 个内径,测点均布,以最大值和最小值的差值作为椭圆度。

7.2.5 端面垂直度

用直角尺和精度为 1 mm 的钢板尺测量 FRP 烟囱内筒段的端面垂直度。

7.2.6 加强筋间距

用精度为 1 mm 的钢卷尺沿 FRP 烟囱内筒段的母线,测量两相邻加强筋间的距离以及加强筋距 FRP 烟囱内筒段端面的距离,测量 4 次,测量点均布,取 4 次测量结果的算术平均值。

7.3 FRP 烟囱内筒段物理性能

7.3.1 巴柯尔硬度

在 FRP 烟囱内筒段端部取样,按 GB/T 3854 的规定进行。

7.3.2 树脂含量

按 GB/T 2577 的规定进行。

7.3.3 树脂不可溶分含量

按 GB/T 2576 的规定进行。

7.3.4 阻燃性能

按 GB/T 8924 的规定进行。

7.3.5 导电性能

按 GB/T 1410 的规定进行。

7.3.6 吸水率

按 GB/T 1462 的规定进行。

7.3.7 重量

用汽车衡或其他合适衡器测量。

7.4 FRP 烟囱内筒段力学性能

7.4.1 适当延长 FRP 烟囱内筒段的制作长度,力学性能测试所需的试样在 FRP 烟囱内筒段端部或在 FRP 烟囱内筒段开孔处切取。

7.4.2 轴向拉伸强度、环向拉伸强度按 GB/T 1447 的规定进行。

7.4.3 轴向弯曲模量、环向弯曲模量按 GB/T 1449 的规定进行。

7.4.4 轴向压缩强度按 GB/T 1448 的规定进行。

7.5 FRP 烟囱内筒

7.5.1 椭圆度

在位于 FRP 烟囱内筒开孔处和其他任意二个部位,用精度为 0.1 mm 内径测量尺测量 4 个内径,测点均布,以最大值和最小值的差值作为椭圆度。

7.5.2 中心偏差

自 FRP 烟囱内筒顶部中心部位向下悬挂吊锤,在 FRP 烟囱内筒底部,用精度为 1 mm 的钢板尺测量 FRP 烟囱内筒中心点与吊锤间的距离。

8 检验规则

8.1 检验项目

8.1.1 FRP 烟囱内筒段

外观质量、尺寸、物理性能和力学性能。

8.1.2 FRP 烟囱内筒

椭圆度、中心偏差。

8.2 组批

8.2.1 FRP 烟囱内筒段

以相同材料、相同工艺生产的一座 FRP 烟囱内筒所需的 FRP 烟囱内筒段为一批。

8.2.2 FRP 烟囱内筒

以组装后的一座 FRP 烟囱内筒为一批。

8.3 抽样

8.3.1 FRP 烟囱内筒段

8.3.1.1 每一根 FRP 烟囱内筒段均应进行外观质量、尺寸和巴柯尔硬度检验。

8.3.1.2 树脂含量、树脂不可溶分含量、阻燃性能、导电性能、吸水率、FRP 烟囱内筒段重量和力学性能,采取两次取样法,样本数均为 2。

8.3.2 FRP 烟囱内筒

组装后的 FRP 烟囱内筒应进行椭圆度和中心偏差检验。

8.4 判定规则

8.4.1 FRP 烟囱内筒段

8.4.1.1 外观质量、尺寸、巴柯尔硬度分别达到 6.1、6.2、6.3.1 的要求,判该产品外观质量、尺寸、巴柯尔硬度合格,否则判该产品不合格。

8.4.1.2 树脂含量、树脂不可溶分含量、阻燃性能、导电性能、吸水率、FRP 烟囱内筒段重量和力学性能检验时,第一次所抽 2 根全部合格,判该批产品合格;若 2 根均不合格,判该批产品不合格。若第一次所抽 2 根中有 1 根不合格,进行第二次抽样,若第二次所抽的 2 根全部合格,判该批产品合格;否则判该批产品不合格。

8.4.2 FRP 烟囱内筒

椭圆度、中心偏差分别达到 6.5.1、6.5.2 的要求,判该产品合格,否则判该产品不合格。

9 标志、支撑、运输、起吊移位和贮存

9.1 标志

每根 FRP 烟囱内筒段上至少应在一处做上耐久标志。标志不应损伤筒壁,在正常的装卸和安装中字迹仍应保持清楚。标志最少包括以下内容:

- a) 产品名称;
- b) 生产企业名称、商标和地址;
- c) 生产日期。

9.2 支撑

每根 FRP 烟囱内筒段应设不少于 3 处的内部支撑,其中,离端部 500 mm 处至少设一个,以确保内筒段在贮存、运输、吊装时的椭圆度。这些临时支撑应当在 FRP 烟囱吊装完成后拆除。

9.3 运输

FRP 烟囱内筒段与支撑之间用软质材料隔开,FRP 烟囱内筒段在运输及装卸过程中不应受到剧烈撞击、碰撞。

9.4 起吊及移位

FRP 烟囱内筒段的起吊宜用柔性绳索,或用软质绳索包裹的钢丝绳。起吊时应系牵引绳,以防止 FRP 烟囱内筒段摆动失位。FRP 烟囱内筒段不应在粗糙的地面上滚动或滑动。

9.5 贮存

FRP 烟囱内筒段应在平整处竖立放置,远离火源。如应采用卧式存放时,应采取措施,防止 FRP 烟囱内筒段因风力或地面倾斜而滚动。FRP 烟囱内筒段不应堆放。

附录 A
(资料性附录)
内筒结构层厚度设计

A.1 一般规定

A.1.1 FRP 烟囱内筒结构设计中应考虑静载荷、风载荷、地震作用、温度作用及烟气压力的影响。

A.1.2 FRP 烟囱内筒采用容许应力设计方法,以分项系数的设计表达式进行结构计算。

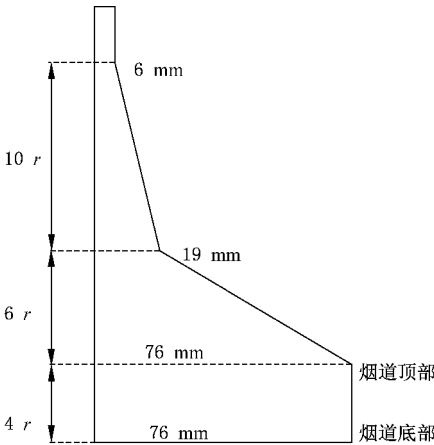
A.2 载荷

A.2.1 静载荷

静载荷包括 FRP 烟囱内筒的自重、内筒积灰、加强筋及其附属物重量,考虑 FRP 烟囱内筒自重时可用 $2\,243\text{ kg/m}^3$ 作为 FRP 烟囱内筒密度。

积灰载荷没有数据的情况可按下列情况考虑:

- a) 湿式洗涤塔运行时,积灰沉积物附着到内筒的内部,沿着内筒高度的变化应如图 A.1 所示,湿积灰的极限载荷的密度为 $1\,281\text{ kg/m}^3$;
- b) 湿式洗涤塔不运行和冷却系统很少或不运行时,在内筒全高度内部周圈积灰面载荷可按 2.5 kg/m^2 考虑;
- c) 湿式洗涤塔不运行和冷却系统经常运行时,在内筒全高度内部周圈积灰面载荷可按 7.0 kg/m^2 考虑。



说明:

r ——内筒计算截面结构层中心半径。

图 A.1 积灰载荷

A.2.2 风载荷

内筒在动态风荷载作用下的分析应符合 GB 50051—2002 和 GB 50009—2012 有关规定。在计算

FRP 烟囱内筒受风载荷作用时,可采用单独模型,将外筒的位移作为荷载施加到内筒模型上,计算由于外筒变形而导致的内筒反应(位移、力或应力)。

A.2.3 地震作用

内筒在地震作用下的分析应符合 GB 50051—2002 和 GB 50011—2010 有关规定。分析 FRP 烟囱内筒在地震作用下的反应(位移、力或应力)时可选择下列两种计算方法:

- a) 联合模型:建立包括混凝土外筒和 FRP 烟囱内筒的整体模型,采用振型分解反应谱法计算 FRP 内筒结构在地震载荷下的反应。
- b) 单独模型:
 - 1) 采用振型分解反应谱法或等效静力法计算地震作用下外筒模型的反应,然后将外筒的位移作为荷载施加到内筒模型上,计算由于外筒变形而导致的内筒反应;
 - 2) 采用振型分解反应谱法或等效静力法计算地震作用下内筒的惯性力反应;
 - 3) 组合计算内筒总地震反应按式(A.1)计算:

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

S ——内筒总地震反应;

S_1 ——外筒变形而导致的内筒反应;

S_2 ——地震作用下内筒的惯性力反应。

A.2.4 温度作用

FRP 烟囱内筒的温度应力主要由三部分组成:

- a) 筒身温度弯曲应力 σ_z^m (属于薄膜应力)。
- b) 烟气温度差引起的轴向次应力 σ_z^{ct} ,按式(A.2)和式(A.3)计算:

$$\sigma_z^{ct} = 0.1 E_z \alpha_z (\Delta T_g) \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\Delta T_g = (\Delta T_{gb}) e^{-0.2z/r} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

σ_z^{ct} ——轴向次应力,单位为兆帕(MPa);

E_z ——轴向弹性模量,单位为兆帕(MPa);

α_z ——轴向热膨胀系数,单位为每摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

ΔT_g ——烟气沿烟内筒直径的温度差,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

ΔT_{gb} —— ΔT_g 在烟道入口处位置的温度差,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

Z ——计算截面距烟道入口处的高度,单位为毫米(mm);

r ——FRP 烟囱内筒计算截面结构层中心半径,单位为毫米(mm)。

- c) 由 FRP 烟囱内筒筒壁温度差 ΔT_w 引起的面弯曲应力,按式(A.4)和式(A.5)计算:

$$\sigma_z^{bT} = 0.5 E_z^b \alpha_z \Delta T_w \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\sigma_{\theta}^{bT} = 0.5 E_{\theta}^b \alpha_{\theta} \Delta T_w \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

σ_z^{bT} ——轴向温度弯曲应力,单位为兆帕(MPa);

E_z^b ——轴向弯曲弹性模量,单位为兆帕(MPa);

α_z ——轴向热膨胀系数,单位为每摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

ΔT_w ——内筒筒壁温度差,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

- σ_{θ}^{bT} ——环向温度弯曲应力,单位为兆帕(MPa);
 E_{θ}^b ——环向弯曲弹性模量,单位为兆帕(MPa);
 α_{θ} ——环向热膨胀系数,单位为每摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

A.2.5 烟气压力

烟气压力为 FRP 烟囱内筒运行过程中可能出现的环向压力范围值。

A.3 载荷组合

A.3.1 长期组合工况按式(A.6)计算;当重力载荷作用效应对承载有利时,长期组合工况按式(A.7)计算:

$$\begin{aligned} 1.2G + 1.1T + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.6) \\ 0.9G + 1.1T + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.7) \end{aligned}$$

式中:

- G ——静载荷;
 T ——正常烟气温度作用;
 CP ——烟气环向压力。

A.3.2 短期组合工况按式(A.8)、式(A.9)和式(A.10)计算;当重力载荷作用效应对承载有利时,短期组合工况按式(A.11)、式(A.12)和式(A.13)计算:

$$\begin{aligned} 1.2G + 1.1T + 1.4W + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.8) \\ 1.2G + 1.1T + 1.3EQ + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.9) \\ 1.2G + 1.1AT + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.10) \\ 0.9G + 1.1T + 1.4W + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.11) \\ 0.9G + 1.1T + 1.3EQ + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.12) \\ 0.9G + 1.1AT + 1.1CP & \dots\dots\dots (A.13) \end{aligned}$$

式中:

- G ——静载荷;
 T ——正常烟气温度作用;
 W ——风载荷;
 CP ——烟气环向压力;
 EQ ——地震作用;
 AT ——非正常烟气温度作用。

A.4 安全系数

FRP 烟囱内筒结构安全系数取值如表 A.1 所示。

表 A.1 FRP 烟囱内筒的安全系数

载荷组合	拉伸应力安全系数	压缩应力安全系数	弯曲应力安全系数
长期组合工况	8.0	3.6	2.5
短期组合工况	2.6	3.2	2.0

A.5 容许应力

A.5.1 轴向强度设计值

a) 轴向拉伸强度设计值按式(A.14)计算:

$$f_z^t = \frac{f_z^{tk}}{\gamma_z^t} \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

f_z^t ——轴向拉伸强度设计值,单位为兆帕(MPa);

f_z^{tk} ——轴向拉伸强度标准值,单位为兆帕(MPa);

γ_z^t ——轴向拉伸应力安全系数。

b) 轴向临界屈服强度设计值按式(A.15)、式(A.16)和式(A.17)计算:

$$f_z^{cr} = \frac{f_z^{crk}}{\gamma_z^c} \dots\dots\dots (A.15)$$

$$f_z^{crk} = k_n \frac{t}{r} \sqrt{\frac{E_z^b E_\theta^c}{3(1 - \mu_\theta^z \mu_z^\theta)}} \dots\dots\dots (A.16)$$

$$k_n = 1.0 - 0.9(1.0 - e^{-0.06\sqrt{\frac{r}{t}}}) \dots\dots\dots (A.17)$$

式中:

f_z^{cr} ——轴向临界屈服强度设计值,单位为兆帕(MPa);

f_z^{crk} ——轴向临界屈服强度标准值,单位为兆帕(MPa);

γ_z^c ——轴向压缩应力安全系数;

K_n ——撞击系数;

t ——FRP 烟囱内筒筒壁结构层厚度,单位为毫米(mm);

r ——FRP 烟囱内筒计算截面结构层中心半径,单位为毫米(mm);

E_z^b ——轴向弯曲弹性模量,单位为兆帕(MPa);

E_θ^c ——FRP 烟囱内筒环向压缩弹性模量,单位为兆帕(MPa);

μ_θ^z ——环纵泊松比;

μ_z^θ ——纵环泊松比。

c) 轴向弯曲强度设计值按式(A.18)计算:

$$f_z^b = \frac{f_z^{bk}}{\gamma_z^b} \dots\dots\dots (A.18)$$

式中:

f_z^b ——轴向弯曲强度设计值,单位为兆帕(MPa);

f_z^{bk} ——轴向弯曲强度标准值,单位为兆帕(MPa);

γ_z^b ——轴向弯曲应力安全系数。

A.5.2 环向强度设计值

a) 环向拉伸强度设计值按式(A.19)计算:

$$f_\theta^t = \frac{f_\theta^{tk}}{\gamma_\theta^t} \dots\dots\dots (A.19)$$

式中:

f_θ^t ——环向拉伸强度设计值,单位为兆帕(MPa);

f_{θ}^{tk} ——环向拉伸强度标准值,单位为兆帕(MPa);

$\gamma_{\theta}^{\text{t}}$ ——环向拉伸应力安全系数。

b) 环向临界屈服强度设计值按式(A.20)和式(A.21)计算:

$$f_{\theta}^{\text{cr}} = \frac{f_{\theta}^{\text{crk}}}{\gamma_{\theta}^{\text{c}}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.20})$$

$$f_{\theta}^{\text{crk}} = 0.765(E_{\theta}^{\text{b}})^{\frac{3}{4}}(E_z^{\text{c}})^{\frac{1}{4}} \frac{r}{L_1} \left(\frac{t}{r}\right)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (\text{A.21})$$

式中:

f_{θ}^{cr} ——环向临界屈服强度设计值,单位为兆帕(MPa);

f_{θ}^{crk} ——环向临界屈服强度标准值,单位为兆帕(MPa);

$\gamma_{\theta}^{\text{c}}$ ——环向压缩应力安全系数;

E_{θ}^{b} ——环向弯曲弹性模量,单位为兆帕(MPa);

E_z^{c} ——轴向压缩弹性模量,单位为兆帕(MPa);

L_1 ——加强筋间距,单位为毫米(mm);

r ——FRP 烟囱内筒计算截面结构层中心半径,单位为毫米(mm);

t ——FRP 烟囱内筒筒壁结构层厚度,单位为毫米(mm)。

c) 环向弯曲强度设计值按式(A.22)计算:

$$f_{\theta}^{\text{b}} = \frac{f_{\theta}^{\text{bk}}}{\gamma_{\theta}^{\text{b}}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.22})$$

式中:

f_{θ}^{b} ——环向弯曲强度设计值,单位为兆帕(MPa);

f_{θ}^{bk} ——环向弯曲强度标准值,单位为兆帕(MPa);

$\gamma_{\theta}^{\text{b}}$ ——环向弯曲应力安全系数。

A.6 内筒承载力验算

a) FRP 烟囱内筒的轴向应力应满足式(A.23)和式(A.24)要求:

$$\frac{\sigma_z^{\text{t}}}{f_z^{\text{t}}} + \frac{\sigma_z^{\text{b}}}{f_z^{\text{b}}} \leqslant 1 \quad \dots\dots\dots (\text{A.23})$$

$$\frac{\sigma_z^{\text{c}}}{f_z^{\text{cr}}} \leqslant 1 \quad \dots\dots\dots (\text{A.24})$$

式中:

σ_z^{t} ——轴向拉伸应力,单位为兆帕(MPa);

f_z^{t} ——轴向拉伸强度设计值,单位为兆帕(MPa);

σ_z^{b} ——轴向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);

f_z^{b} ——轴向弯曲强度设计值,单位为兆帕(MPa);

σ_z^{c} ——轴向压缩应力,单位为兆帕(MPa);

f_z^{cr} ——轴向临界屈服强度设计值,单位为兆帕(MPa)。

b) FRP 烟囱内筒的环向应力应满足式(A.25)和式(A.26)要求:

$$\frac{\sigma_{\theta}^{\text{t}}}{f_{\theta}^{\text{t}}} + \frac{\sigma_{\theta}^{\text{b}}}{f_{\theta}^{\text{b}}} \leqslant 1 \quad \dots\dots\dots (\text{A.25})$$

$$\frac{\sigma_{\theta}^{\text{c}}}{f_{\theta}^{\text{cr}}} \leqslant 1 \quad \dots\dots\dots (\text{A.26})$$

式中：

σ_{θ}^t ——环向拉伸应力，单位为兆帕(MPa)；

f_{θ}^t ——环向拉伸强度设计值，单位为兆帕(MPa)；

σ_{θ}^b ——环向弯曲应力，单位为兆帕(MPa)；

f_{θ}^b ——环向弯曲强度设计值，单位为兆帕(MPa)；

σ_{θ}^c ——环向压缩应力，单位为兆帕(MPa)；

f_{θ}^{cr} ——环向临界屈服强度设计值，单位为兆帕(MPa)。

c) 当轴向应力和环向应力均为压缩应力时应满足式(A.27)要求：

$$\frac{\sigma_z^c}{f_z^{cr}} + \left(\frac{\sigma_{\theta}^c}{f_{\theta}^{cr}} \right)^2 \leq 1 \quad \dots\dots\dots (A.27)$$

式中：

σ_z^c ——轴向压缩应力，单位为兆帕(MPa)；

f_z^{cr} ——轴向临界屈服强度设计值，单位为兆帕(MPa)；

σ_{θ}^c ——环向压缩应力，单位为兆帕(MPa)；

f_{θ}^{cr} ——环向临界屈服强度设计值，单位为兆帕(MPa)。

附录 B

(资料性附录)

加 强 筋

B.1 范围

本附录适用于以玻璃纤维及其制品为增强材料,以不饱和聚酯树脂、乙烯基树脂等为基体材料,采用缠绕或手糊工艺制作的加强筋。

B.2 加强筋设计

B.2.1 加强筋截面可以为矩形、圆形、半圆形、三角形等,被包覆材料可用玻璃钢纤维木材、泡沫塑料等。具体的加强筋间距、横截面形式和尺寸应根据计算确定。

B.2.2 筒壁加强筋影响截面抗弯刚度应满足式(B.1)要求:

$$(E_s I_s) \geq \frac{p L_1 r^3 F}{3} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

E_s ——加强筋环向模量,单位为兆帕(MPa);

I_s ——筒壁起加强作用的有效段与加强筋的组合截面对通过与筒壁轴线平行的该截面形心轴的惯性矩(mm^4);

p ——烟气压力,单位为兆帕(MPa);

L_1 ——加强筋间距,单位为毫米(mm);

r ——FRP 烟囱内筒计算截面结构层中心半径,单位为毫米(mm);

F ——加强筋的屈曲安全系数,取 $F=5$ 。

B.2.3 筒壁影响截面有效段宽度可采用 $L_s = 1.56 \sqrt{rt}$,同时应满足下列条件:

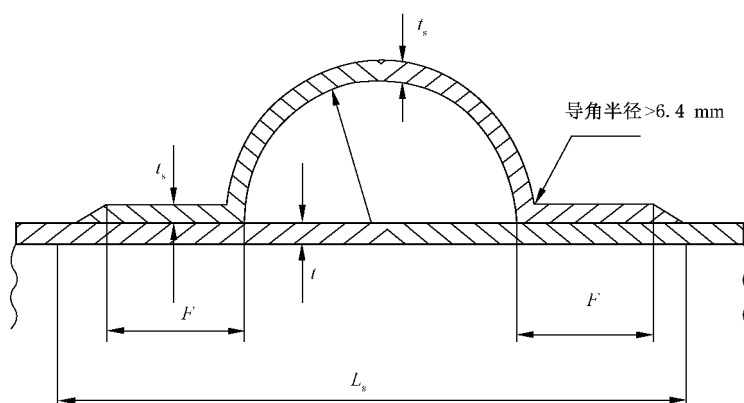
a) 计算影响面积不大于加强筋截面面积;

b) 若加强筋中心两侧筒壁有效宽度与相邻加强筋的筒壁有效宽度相重叠,则该筒壁的有效宽度中相叠加部分每侧按一半计算。

注 1: r 同式(B.1)。

注 2: t 为 FRP 烟囱内筒筒壁结构层厚度(mm)。

B.2.4 FRP 烟囱内筒常见的加强筋有半圆形和梯形,见图 B.1 和图 B.2,对于采用梯形加强筋,筒壁影响截面有效宽度可采用图 B.2 所示的方法。



说明：

R ——加强筋内半径；

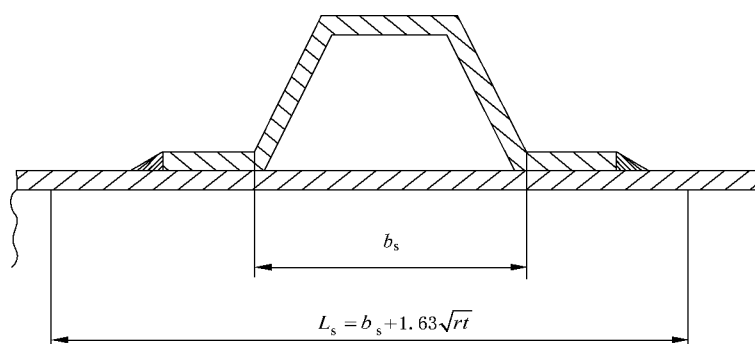
F ——加强筋侧边宽度, $F=R$ ；

t_s ——加强筋厚度；

t ——FRP 烟囱内筒筒壁结构层厚度；

L_s ——筒壁影响截面有效段宽度。

图 B.1 半圆形加强筋



说明：

b_s ——梯形加强筋下边宽度；

L_s ——筒壁影响截面有效段宽度。

图 B.2 梯形加强筋

附录 C (资料性附录) 接口设计

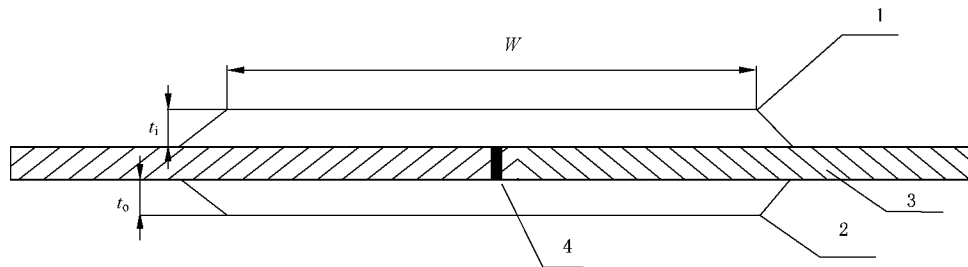
C.1 范围

本附录适用于 FRP 烟囱内筒段平端对接,内、外表面双面补强的连接方式。

C.2 接口设计

C.2.1 接口

接口的示意图见图 C.1。



说明:

- 1 —— 外接口;
- 2 —— 内接口;
- 3 —— 结构层;
- 4 —— 树脂腻子;
- W —— 接口宽度;
- t_i —— 内接口厚度;
- t_o —— 外接口厚度。

图 C.1 接口

C.2.2 接口宽度

接口宽度(W)应满足式(C.1)要求:

$$W \geq \left(\frac{N_i}{2\pi r} + \frac{M_i}{\pi r^2} \right) \times \frac{\gamma_\tau}{f_\tau} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

- W —— 接口宽度,单位为毫米(mm);
- N_i —— 接口处轴向拉力或轴向应力设计值,单位为牛顿(N);
- M_i —— 接口处弯矩设计值,单位为牛顿·毫米(N·mm);
- f_τ —— 层间剪切强度,单位为兆帕(MPa),如无实测数据,取 $f_\tau = 7$;
- γ_τ —— 层间剪切强度分项系数,取 $\gamma_\tau = 10$;
- r —— FRP 烟囱内筒计算截面结构层中心半径,单位为毫米(mm)。

C.2.3 接口厚度

接口结构层厚度 t 应满足式(C.2)要求:

$$t \geq \left(\frac{N_i}{2\pi r} + \frac{M_i}{\pi r^2} \right) \frac{\gamma_z}{f_z} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

t ——接口结构层厚度,单位为毫米(mm);

f_z ——接口轴向拉伸强度或压缩强度,应不低于接口两端内筒的轴向拉伸强度或压缩强度,单位为兆帕(MPa);

γ_z ——接口轴向拉伸强度或压缩强度分项系数,取 $\gamma_z = 10$;

N_i 、 M_i 、 r 同公式(C.1)。