

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—2026

烟气余热回收与冶炼烟气制酸系统用碳化 硅陶瓷换热器技术规范

Technical specifications for silicon carbide ceramic heat exchangers for waste heat
recovery from flue gas and acid production system in smelting process

（征求意见稿）

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 型式、主要尺寸及基本参数 2

 4.1 结构型式 2

 4.2 型号标记 2

 4.3 主要尺寸与参数系列 2

5 原材料 2

 5.1 碳化硅换热管 2

 5.2 壳体与金属部件材料 2

 5.3 密封材料 3

6 设计 3

 6.1 一般规定 3

 6.2 结构设计 3

 6.3 耐压试验 3

 6.4 泄漏试验 3

 6.5 余热回收性能要求 3

7 制造、检验和验收 3

 7.1 零部件制造与检验 4

 7.2 组装 4

8 出厂检验 4

 8.1 外观检验 4

 8.2 耐压试验 4

 8.3 泄漏试验 4

 8.4 尺寸检验 4

9 包装、运输和贮存 4

10 出厂文件 5

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

烟气余热回收与冶炼烟气制酸系统用碳化硅陶瓷换热器技术规范

1 范围

本文件规定了烟气余热回收与冶炼烟气制酸系统用碳化硅陶瓷换热器（以下简称“换热器”）的术语和定义、型式与基本参数、原材料、设计、制造、检验与验收、出厂检验、包装、运输和贮存及出厂文件等内容。

本文件适用于公称直径不大于2000mm，以常压固相烧结碳化硅陶瓷管为换热元件，用于冶金、化工行业烟气余热回收、冶炼烟气制酸系统的碳化硅陶瓷换热器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 150.1 压力容器 第1部分：通用要求
- GB/T 150.2 压力容器 第2部分：材料
- GB/T 150.3 压力容器 第3部分：设计
- GB/T 150.4 压力容器 第4部分：制造、检验和验收
- GB/T 151 热交换器
- GB/T 3045 普通磨料 碳化硅化学分析方法
- GB/T 10610 产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法
- GB/T 25025 搪玻璃设备技术条件
- GB/T 35974.1 塑料及其衬里制压力容器 第1部分：通用要求
- GB/T 35974.2 塑料及其衬里制压力容器 第2部分：材料
- GB/T 35974.5 塑料及其衬里制压力容器 第5部分：塑料衬里制压力容器的制造、检查与检验
- HG/T 20592 钢制管法兰 (PN系列)
- HG/T 20677 橡胶衬里化工设备设计规范
- HG/T 5633 列管式碳化硅换热器
- NB/T 47003.1 常压容器 第1部分：钢制焊接常压容器
- NB/T 47065.1 容器支座 第1部分：鞍式支座
- NB/T 47065.3 容器支座 第3部分：耳式支座
- JB/T 4711 压力容器涂敷与运输包装
- JB/T 4732 钢制压力容器 分析设计标准
- JC/T 2212 常压固相烧结碳化硅陶瓷热交换管
- TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冶炼烟气制酸系统 smelting flue gas acid making system

以有色金属冶炼、钢铁冶炼等过程产生的含SO₂烟气为原料，通过净化、转化、吸收工序生产硫酸的工艺系统。

3.2

烟气余热回收 flue gas waste heat recovery

通过换热设备回收烟气中的显热，用于预热介质、产生蒸汽或发电的能量回收过程。

3.3

双管板结构 double tube sheet structure

由两块管板串联组成，中间设置隔离腔与泄漏检测孔的管板密封结构，用于防止管程强腐蚀、有毒介质向壳程泄漏。

4 型式、主要尺寸及基本参数

4.1 结构型式

4.1.1 换热器按前端结构、壳体结构、后端结构型式分类，结构型式及代号依据 GB/T 151 的规定，优先采用固定管板式、可拆封头管箱结构；管壳程设计温差大于 100 °C 的工况，宜采用带膨胀节的固定管板结构或浮头式结构。

4.1.2 管程数、壳程数根据工艺需求设置，单壳程时仅标注壳程数，多管程时标注管程数。

4.2 型号标记

设备型号由结构型式、公称直径、设计压力、公称换热面积、公称长度、换热管外径、管 / 壳程数、管束等级等字母代号组合表示，标记规则宜参考 HG/T 5633 中 4.2 的要求。

4.3 主要尺寸与参数系列

4.3.1 换热管优先选用外径 $\phi 19\text{ mm}$ 、 $\phi 25\text{ mm}$ 两种规格；含尘浓度大于 100 mg/Nm^3 的烟气工况，优先选用 $\phi 25\text{ mm}$ 管径，降低堵塞与磨损风险。

5 原材料

5.1 碳化硅换热管

5.1.1 换热管采用常压固相烧结碳化硅陶瓷材质，外表面应光滑、致密，无裂纹、变形、划伤、起皮等缺陷；含尘烟气工况下，换热管内表面粗糙度 $R_a \leq 0.8\text{ }\mu\text{m}$ ，降低积尘附着倾向。

5.1.2 换热管密封段圆度、外径偏差、直线度、长度偏差应符合 JC/T 2212 的规定；密封段外径尺寸偏差应为 $\pm 0.3\text{ mm}$ ，采用准确度为 0.02 mm 的游标卡尺测量。

5.1.3 换热管物理性能与耐腐蚀性能应符合表 1 的规定，抗热震性能、耐硫酸腐蚀性能满足冶炼烟气制酸工况的交变温度与强腐蚀要求。

表 1 碳化硅换热管专项性能要求

项目	性能指标	指标说明
体积密度 / (g/cm^3)	≥ 3.10	高于 JC/T 2212 通用要求
室温热导率 / [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	≥ 120	高于 JC/T 2212 通用要求，保障余热回收效率
室温弯曲强度 / MPa	≥ 220	高于 JC/T 2212 通用要求
平均线热膨胀系数 (室温~ 1300°C)/($10^{-6}/\text{K}$)	4.5 ± 0.5	与 JC/T 2212 保持一致
游离硅含量	$\leq 0.08\%$	严于 HG/T 5633 的 0.1% 要求，提升耐硫酸腐蚀性能
抗热震性 (500 °C→室温，水淬)	≥ 10 次无裂纹	新增专项要求，适配烟气温度波动工况
98% 硫酸腐蚀速率 (100 °C)/[$\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{a})$]	≤ 1.5	严于 JC/T 2212 的 $2.0\text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{a})$ 要求

5.1.4 换热管抗渗透性应符合 JC/T 2212 的规定，在 $(2.0 \pm 0.2)\text{ MPa}$ 水压下保持 $(30 \pm 3)\text{ min}$ ，不发生破裂或表面渗漏。

5.2 壳体与金属部件材料

5.2.1 钢制承压部件材料应符合 GB/T 150.2 和 TSG 21 的规定；与硫酸、烟气接触的金属部件应采用 316L 不锈钢或设置衬里防腐结构。

5.2.2 搪玻璃壳体材料应符合 GB/T 25025 的要求；聚四氟乙烯衬里壳体材料应符合 GB/T 35974.1 的要求；橡胶衬里壳体应符合 HG/T 20677 的要求。

5.3 密封材料

5.3.1 垫片、密封填料应选用聚四氟乙烯、聚四氟乙烯包覆件、氟橡胶等耐硫酸腐蚀、耐高温性能适配的材料；管程烟气侧密封材料应耐受 450℃ 高温与 SO₂、SO₃ 腐蚀。

5.3.2 密封材料的设计使用寿命应不低于 2 年，设计文件中应明确更换周期。

6 设计

6.1 一般规定

6.1.1 换热器管板形状、管孔分布、折流板形式与分布、换热管布置应依据 GB/T 151 的规定进行设计，并应满足烟气防堵塞、低阻力、高换热效率的要求。

6.1.2 设计单位应确认原材料在烟气、硫酸等腐蚀性工况下使用的可靠性，必要时进行试验验证；设计图纸中应规定衬里材料、密封材料的使用年限与更换要求。

6.1.3 设计图纸中应注明换热器适用的烟气成分、含尘浓度、硫酸浓度范围、适用温度范围与最高工作压力，明确余热回收效率设计值。

6.1.4 设计温度应低于材料最高允许使用温度；管程设计温度应按烟气最高进口温度预留 20℃ 裕量。

6.1.5 换热面积计算以换热管外径为基准；余热回收效率计算应按 GB/T 151 相关热工计算方法执行。

6.2 结构设计

6.2.1 钢制部件设计应符合 GB/T 151、GB/T 150.3 的要求；常压烟气侧还应符合 NB/T 47003.1 的规定；搪玻璃、衬里部件设计应分别符合对应产品标准的要求。

6.2.2 换热管与管板间应采用可靠的密封连接结构；管程介质为硫酸、高度危害烟气时，宜采用整体式双管板或连接式双管板结构，两管板之间的隔离腔应设置密封泄漏检测孔，实时监测密封失效情况。

6.2.3 管程宜设计为烟气或硫酸等强腐蚀性介质侧；含尘烟气入口应设置气流分布与预除尘结构，降低换热管磨损与堵塞风险。

6.2.4 折流板间距与开孔率应根据壳程介质特性优化设计；管程烟气流道应避免死区与积尘死角。

6.2.5 管壳程设计温差大于 100℃ 时，应设置膨胀节或采用浮头结构补偿热变形；膨胀节设计应符合 GB/T 150.3 的要求。

6.3 耐压试验

6.3.1 耐压试验的压力、方法应符合下列要求：

- a) 钢制壳体换热器应符合 GB/T 151 的要求；
- b) 搪玻璃壳体换热器应符合 GB/T 25025 的要求；
- c) 氟塑料衬里壳体换热器应符合 GB/T 35974.5 的要求；
- d) 橡胶衬里壳体换热器应符合 HG/T 20677 的要求。

6.3.2 耐压试验顺序：换热管组装结束后，先进行壳程耐压试验，合格后组装封头，再进行管程耐压试验。壳程耐压试验后应检查管板有无变形、衬里层脱落、鼓包等现象。

6.4 泄漏试验

6.4.1 盛装硫酸和毒性危害程度为高度危害烟气的换热器应进行泄漏试验；泄漏试验应在耐压试验合格后进行。

6.4.2 泄漏试验压力、方法应符合对应壳体标准的要求；管程泄漏试验应符合 GB 150 的要求。

6.5 余热回收性能要求

6.5.1 在额定工况下，换热器余热回收效率应不低于设计值的 95%。

6.5.2 管程烟气阻力损失应不大于设计值的 110%。

7 制造、检验和验收

7.1 零部件制造与检验

7.1.1 钢制承压部件、衬里设备的金属部件应依据 GB/T 150.4、GB/T 151 和设计图纸制造、检验和验收。

7.1.2 搪玻璃承压部件、聚四氟乙烯衬里部件、橡胶衬里部件的制造检验应分别符合对应产品标准的要求。

7.1.3 管板、折流板、定距件、密封垫的制造检验应符合 GB/T 151 和设计图纸的规定，可以使用螺旋折流板结构；双管板的管孔同轴度偏差应不大于 0.5 mm。

7.1.4 零部件制造企业应提供产品质量证明文件；压力容器部件质量证明文件应符合 TSG 21 的要求。

7.2 组装

7.2.1 组装前应进行下列检验：

- a) 换热管的表面质量、密封段圆度与外径偏差、直线度、长度偏差、表面粗糙度应符合 5.1.1~5.1.3 和 JC/T 2212 的规定；
- b) 碳化硅换热管组装前应逐根进行水压试验，试验压力不低于设计压力的 2.0 倍；常压烟气侧试验压力不低于 0.25 MPa；
- c) 检查确认部件尺寸偏差符合图纸要求；
- d) 搪玻璃件、衬里部件外观质量应符合对应标准要求；
- e) 部件密封部位应规整光滑，无影响密封可靠性的缺陷；
- f) 密封垫应规整平整，无影响密封的缺陷，检验合格后置于密闭容器存放。

7.2.2 组装前各部件表面应清理干净，金属件边缘无毛刺、尖角；碳化硅换热管应用软质材料擦拭干净，放置在组装架上，不得落地。

7.2.3 组装时不得碰撞冲击换热管、搪玻璃层、衬里层；换热管不得强行组装，不得存在组装应力。

7.2.4 换热管组装应遵守从里到外的原则，确认每根安装合格后再进行下一根安装。

7.2.5 组装紧固件应按对称顺序依次逐渐拧紧，单次紧固力不得过大，防止衬里层或陶瓷管破损。

8 出厂检验

8.1 外观检验

换热器外观应无明显变形、损伤，衬里层无脱落、鼓包，管口密封面平整，铭牌清晰牢固。

8.2 耐压试验

耐压试验应按 6.3 和设计图纸的要求进行，无渗漏、无可见变形、无异响为合格。

8.3 泄漏试验

泄漏试验应按 6.4 和设计图纸的要求进行，泄漏率满足指标要求为合格。

8.4 尺寸检验

主要外形尺寸、管口方位应符合设计图纸要求，偏差应在 GB/T 151 规定的允许范围内。

9 包装、运输和贮存

9.1 组装检验合格后，应喷涂防护漆，安装铭牌，管口用盲板封口；有衬里的管口封堵应采用软质材料，防止损伤衬里层。

9.2 出厂时换热器应固定在专用托架上，托架与换热器间应有足够接触面，运输过程中应采取防震、防碰撞措施。

9.3 严禁用管口作为吊环吊装、移动换热器。

9.4 涂敷与运输包装应符合 JB/T 4711 和设计图纸的要求。

9.5 产品应贮存在清洁、干燥、无腐蚀性气体的库房内，避免磕碰与重物挤压。

10 出厂文件

10.1 换热器为压力容器时，出厂文件应符合 GB/T 150.1 和 TSG 21 的规定；为常压容器时，出厂文件应符合 NB/T 47003.1 的规定。

10.2 出厂文件除通用要求外，还应包括：

- a) 热工性能计算书，包含余热回收效率、阻力损失计算值；
 - b) 易损件清单与更换周期说明；
 - c) 烟气侧运行维护与清灰操作指南。
-