

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—2026

太阳能热发电用熔盐碳化硅陶瓷换热器技术条件

Technical specifications for ceramic heat exchangers of silicon carbide for solar thermal power generation

（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 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 产品分类 2

5 使用条件 2

 5.1 介质 2

 5.2 温度 2

 5.3 压力 3

 5.4 环境条件 3

 5.5 特种设备安全管理 3

6 结构设计 3

 6.1 总体结构 3

 6.2 管板与密封结构 3

 6.3 壳体与支座 3

 6.4 热膨胀补偿 3

 6.5 防凝与排净 3

7 要求 4

 7.1 一般要求 4

 7.2 制造 4

 7.3 材料 4

 7.4 金属部件 5

 7.5 密封件及保温材料 5

 7.6 性能要求 5

8 试验方法 5

 8.1 材料性能试验 5

 8.2 抗热震试验 5

 8.3 抗渗透试验 5

 8.4 耐压试验 6

 8.5 气密性试验 错误！未定义书签。

 8.6 熔盐相容性试验 6

 8.7 热循环试验 6

 8.8 换热性能试验 6

 8.9 保温性能试验 6

 8.10 外观、尺寸与表面粗糙度检查 6

9 检验规则 6

 9.1 检验分类 6

 9.2 出厂检验 6

 9.3 型式检验 6

10 标志、包装、运输、贮存和出厂文件 7

 10.1 标志 7

 10.2 包装 7

 10.3 运输与贮存 7

 10.4 出厂文件 7

附 录 A （规范性）熔盐相容性试验方法 8

附 录 B （规范性）热循环试验方法 10

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并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

太阳能热发电用熔盐碳化硅陶瓷换热器技术条件

1 范围

本文件规定了太阳能热发电用熔盐碳化硅陶瓷换热器的产品分类、使用条件、结构设计、要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存和出厂文件等内容。
本文件适用于以常压固相烧结碳化硅陶瓷为换热元件的列管式换热器。

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 150.4 压力容器 第4部分：制造、检验和验收
GB/T 151 热交换器
GB/T 191 包装储运图形符号标志
GB/T 699 优质碳素结构钢
GB/T 713.2 承压设备用钢板和钢带 第2部分：规定温度性能的非合金钢和合金钢
GB/T 713.7 承压设备用钢板和钢带 第7部分：不锈钢和耐热钢
GB/T 2836 陶管水压试验方法
GB/T 3045 普通磨料 碳化硅化学分析方法
GB/T 3280 不锈钢冷轧钢板和钢带
GB/T 4237 不锈钢热轧钢板和钢带
GB/T 4272 设备及管道绝热技术通则
GB/T 4272 设备及管道绝热技术通则
GB/T 6569 精细陶瓷弯曲强度试验方法
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 13296 锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管
GB/T 13306 标牌
GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件
GB/T 14390 精细陶瓷高温弯曲强度试验方法
GB/T 16534 精细陶瓷室温硬度试验方法
GB/T 16535 精细陶瓷线热膨胀系数试验方法 顶杆法
GB/T 17357 设备及管道绝热层表面热损失现场测定 热流计法和表面温度法
GB/T 19675.1 管法兰用柔性石墨复合增强垫片 第1部分：PN系列
GB/T 25995 精细陶瓷密度和显气孔率试验方法
GB/T 36376 太阳能熔盐（硝基型）
GB/T 37246 精细陶瓷抗热震性能试验方法
GB/T 40821 太阳能热发电站换热系统检测规范
GB/T 41087 太阳能热发电站换热系统技术要求
GB/T 51307 塔式太阳能光热发电站设计标准（附条文说明）
HG/T 5633 列管式碳化硅换热器

JB/T 7758.2 柔性石墨板 技术条件
JB/T 8133.10 电炭制品物理化学性能试验方法 第10部分：径向抗压强度
JC/T 2212 常压固相烧结碳化硅陶瓷热交换管
NB/T 47008 承压设备用碳素钢和合金钢锻件
NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件
NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
NB/T 47015 压力容器焊接规程
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
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

熔盐 molten salt

由硝酸盐、氯化物等盐类熔融形成的高温液态介质，具有传热性能好、工作温度宽、储热密度大的特点。

3.2

碳化硅陶瓷换热器 silicon carbide ceramic heat exchanger

以碳化硅陶瓷换热管为核心换热元件，配置管板、壳体、折流板、密封结构等部件组成的管式换热设备，具有耐高温、耐腐蚀、热导率高的特点。

4 产品分类

4.1 按换热工况分为：

- a) 熔盐—熔盐型；
- b) 熔盐—水/蒸汽型；
- c) 熔盐—导热油型；
- d) 熔盐—气体型。

4.2 按安装方式分为：

- a) 卧式；
- b) 立式。

4.3 按管板结构分为：

- a) 单管板型；
- b) 双管板型。

5 使用条件

5.1 介质

5.1.1 熔融盐介质应符合 GB/T 36376 的规定，其组分、杂质含量、熔点（析晶温度）及分解温度应在设计文件中明确。

5.1.2 熔盐中氯离子、水分等杂质含量应符合 GB/T 36376 的要求，以降低对金属部件的腐蚀风险；另一侧介质（水/蒸汽、导热油、气体等）的组分、温度与压力由设计文件规定。

5.2 温度

5.2.1 熔盐侧设计温度宜为 300℃~600℃，常用工作温度范围为 290℃~565℃。

5.2.2 熔盐侧设计温度不应高于所用熔盐的分解温度，并应留有不少于 15℃的安全裕量。

5.2.3 换热器在启动、停运及事故工况下，熔盐侧介质温度不应低于所用熔盐析晶温度以上 15℃，并按 GB/T 41087 的规定采取防凝措施。

5.2.4 换热器金属部件的设计温度应按 GB/T 150.1、GB/T 151 的规定确定。

5.3 压力

5.3.1 熔盐侧设计压力宜不大于 1.6 MPa；

5.3.2 水/蒸汽侧设计压力应按 GB/T 150.1、GB/T 151 及 GB/T 41087 的相关规定；

5.3.3 管程与壳程压力差较大时，应在设计文件中明确压差控制要求，并在结构上采取相应措施。

5.4 环境条件

5.4.1 室外布置时，应考虑环境温度、风沙、雨雪、日照及昼夜温差的影响；

5.4.2 抗震、风载及雪载要求应按工程所在地条件及 GB/T 51307 的有关规定确定。

5.5 特种设备安全管理

换热器介质为熔融盐时，由于其最高工作温度低于熔盐标准沸点，且气相空间容积通常较小，一般不属于特种设备安全技术规范所界定的固定式压力容器范围。当换热任一侧介质同时满足工作压力 ≥ 0.1 MPa、容积 ≥ 0.03 m³且内直径 ≥ 150 mm、介质为气体或液化气体或最高工作温度高于其沸点的液体等条件时，其设计、制造、检验与验收应同时符合特种设备相关安全技术规范相关规定。

6 结构设计

6.1 总体结构

6.1.1 换热器结构优先采用固定管板式，温差应力较大工况宜采用 U 型管式或带膨胀节结构，设计应符合 GB/T 151 的规定。

6.1.2 换热管采用正三角形或正方形排列，管心距应符合换热与流体力学设计要求，管板开管精度应保证换热管装配间隙均匀。

6.1.3 螺旋折流板、弓形折流板间距、开孔率应按流体流速、压降与换热效率优化设计，避免流体偏流与振动。

6.2 管板与密封结构

6.2.1 熔盐侧管板可采用整体碳化硅管板或金属衬碳化硅结构，如果采用金属管板应做耐熔盐腐蚀处理。

6.2.2 换热管与管板的连接应采用可靠的密封结构，具备温度补偿能力，适应冷热循环工况下的热胀冷缩，保证密封零泄漏。

6.2.3 两端管箱宜设置介质进出口、排气口、排净口，位置合理，便于排气与排净。

6.3 壳体与支座

6.3.1 壳体设计应符合 TSG 21 中对应压力等级的强度要求，焊接接头应全焊透。

6.3.2 支座应采用鞍式或耳式支座，符合 NB/T 47065.1、NB/T 47065.3 的要求，保证换热器热膨胀自由位移。

6.3.3 换热器应根据设计需求设置温度、压力测量接口，位置便于安装仪表。

6.4 热膨胀补偿

碳化硅换热管与金属壳体、管板的线热膨胀系数差异较大，结构设计应满足下列要求：

- 换热管不应采用焊接或胀接方式刚性固定，应采用允许轴向自由伸缩的柔性密封、浮动管板或弹性压紧结构；
- 密封结构在冷热循环后应保持足够的残余压紧力，补偿量应按设计温度范围计算确定；
- 必要时可设置膨胀节，其设计应按 GB/T 151 的规定执行。

6.5 防凝与排净

- 6.5.1 换热器及接管宜设置排净口，布置坡度宜不小于 3° 。
- 6.5.2 熔盐侧接管、阀门及设备壳体应设置电伴热与保温，伴热设计应符合 GB/T 4272 及 GB/T 41087 的相关规定。

7 要求

7.1 一般要求

- 7.1.1 换热器应按规定程序批准的设计文件和工艺文件制造。
- 7.1.2 制造单位应具备碳化硅换热管的稳定供货渠道或自主生产能力，并具备对换热管逐根进行外观、尺寸及致密性检验的能力。
- 7.1.3 受压元件的材料代用应经原设计单位书面确认，并在竣工文件中记录。

7.2 制造

7.2.1 换热管入厂检验

- 7.2.1.1 换热管应逐根进行外观质量与外形尺寸检验，并逐根进行抗渗透（水压）检验。
- 7.2.1.2 换热管应具有可追溯标识，标识内容应包括供方名称、规格、批号及检验状态。
- 7.2.1.3 同批换热管的室温弯曲强度、体积密度、热导率等性能应按批抽样复验，抽样方案按 GB/T 2828.1 或订货合同的规定执行。

7.2.2 管板与零件加工

- 7.2.2.1 管板孔的尺寸公差与表面粗糙度应按 GB/T 10610 的规定评定，孔壁不应有影响密封的缺陷。
- 7.2.2.2 密封面不应有划痕、凹坑等影响密封性能的缺陷。

7.2.3 装配

- 7.2.3.1 换热管两端应预留满足热伸长需要的轴向间隙，不得强行装配。
- 7.2.3.2 密封件压紧力应均匀，压紧装置应按设计规定力矩或位移量控制。
- 7.2.3.3 装配后管束应无卡阻，换热管无可见损伤。

7.2.4 焊接与热处理

钢制受压元件的焊接工艺评定应按 NB/T 47014 执行，焊接施工应按 NB/T 47015 执行。
焊后热处理要求应按 GB/T 150.4 及设计文件的规定执行。

7.3 材料

- 7.3.1 换热管应采用常压固相烧结（无压烧结）碳化硅陶瓷管，也可按供需双方约定采用其他工艺制造的碳化硅管，其性能应符合表 1 的规定。

表 1 碳化硅换热管性能要求

项目	要求
体积密度 / (g/cm^3)	≥ 3.0
维氏硬度 / GPa	≥ 15
断裂韧性 / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	≥ 3.5
室温弯曲强度 / MPa	≥ 200
高温弯曲强度 (1300°C) / MPa	≥ 200
径向抗压强度 (室温) / MPa	≥ 300
平均线热膨胀系数 (室温~ 1300°C) / ($10^{-6}/\text{K}$)	4.5 ± 0.5
热导率 (室温) / [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	≥ 100
抗渗透性 (2.0 MPa, 30 min)	不发生破裂或表面渗漏
耐酸腐蚀速率 (98% H_2SO_4 , 100°C) / [$\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{y})$]	≤ 2.0

7.4 金属部件

- 7.4.1 壳体、管箱、封头用钢板和钢带应符合 GB/T 713.2、GB/T 713.7 的规定，也可选用符合 GB/T 4237、GB/T 3280 的不锈钢钢板和钢带。
- 7.4.2 接管用无缝钢管应符合 GB/T 13296、GB/T 699 的规定。
- 7.4.3 锻件应符合 NB/T 47008、NB/T 47010 的规定。
- 7.4.4 与熔盐接触的金属部件应评估其在设计温度下的耐熔盐腐蚀性能，金属材料的熔盐腐蚀试验可按 GB/T 42912 的规定进行。
- 7.4.5 高温下使用的金属部件应按 GB/T 150.2 的规定考虑高温力学性能的降低。

7.5 密封件及保温材料

- 7.5.1 熔盐侧及高温部位的密封件宜采用柔性石墨或柔性石墨复合增强垫片，其性能应符合 GB/T 19675.1、JB/T 7758.2 的规定，熔盐侧密封材料最高使用温度应不低于 700 ℃。
- 7.5.2 保温材料及外护材料应符合 GB/T 4272 的规定，并应满足防水、防火及耐候要求。

7.6 性能要求

换热器的性能指标应符合表2的规定。

表 2 换热器的性能指标

项目	指标要求	试验方法
整机耐压	试验压力不低于1.3倍设计压力，保压不少于30 min，无渗漏、无可见异常变形	8.4
气密性	在设计压力（或设计文件规定的压力）下保压30min，压力降不应大于试验压力的1%；设计另有规定时按设计文件	8.5
管程与壳程隔离密封性	双管板泄漏检测腔在设计压力下无渗漏	8.5
抗热震性	试验温差 ΔT 不应小于300 K；热震后弯曲强度衰减率不应大于20%，无可见裂纹，抗渗透复验合格	8.2
熔盐相容性	565℃（或设计温度）、500h静态熔盐浸泡后，单位面积质量变化不应大于2.0 mg/cm ² ，弯曲强度保持率不应小于90%，不应出现贯穿性裂纹、剥落或渗透失效	8.5、附录A
热循环	循环次数不应少于100次；循环后无渗漏，换热管无破损，换热性能衰减不应大于5%	8.6、附录B
换热性能	在额定工况下，实测换热量不应小于设计换热量的95%	8.7
保温性能	外表面温度不应高于环境温度25 K；设计文件另有规定时按设计文件	8.8
设计使用寿命	在规定的使用条件下，设计使用寿命宜不少于20年，并应与电站工艺系统设计寿命相协调	—

8 试验方法

8.1 材料性能试验

碳化硅换热管的体积密度按GB/T 25995测定，室温弯曲强度按GB/T 6569测定，高温弯曲强度按GB/T 14390测定，维氏硬度按GB/T 16534测定，平均线热膨胀系数按GB/T 16535测定，室温径向抗压强度按JB/T 8133.10测定，热导率及化学成分分别按JC/T 2212和GB/T 3045的规定测定。

8.2 抗热震试验

抗热震试验按GB/T 37246的规定进行。试验温差取设计温度（或熔盐侧设计温度）与冷却介质温度之差，且不应小于300 K；试验后测定试样的剩余弯曲强度并计算强度衰减率，同时检查是否出现可见裂纹，并对换热管进行抗渗透复验。

8.3 抗渗透试验

换热管抗渗透试验按GB/T 2836的规定进行，试验压力为 $2.0\text{ MPa} \pm 0.2\text{ MPa}$ ，保压 $30\text{ min} \pm 3\text{ min}$ ，试样不应发生破裂或表面渗漏。

8.4 耐压试验、气密性试验

应按照GB/T 150.1的相关规定进行试验。

8.5 熔盐相容性试验

熔盐相容性试验按附录A的规定进行。

8.6 热循环试验

热循环试验按附录B的规定进行。

8.7 换热性能试验

换热性能试验按GB/T 40821的规定进行；在额定工况（设计流量、设计进出口温度）下测定换热量、总传热系数及压降，并按热平衡法校核测量误差。

8.8 保温性能试验

外表面温度及散热损失的现场测定按GB/T 17357的规定进行，绝热效果评价按GB/T 4272的规定进行。

8.9 外观、尺寸与表面粗糙度检查

外观质量采用目视检查；外径、壁厚及长度测量采用符合游标卡尺、千分尺规定的量具；表面粗糙度按GB/T 10610的规定评定。

9 检验规则

9.1 检验分类

产品检验分为出厂检验和型式检验，检验项目见表3。

表3 检验项目

检验项目	出厂检验	型式检验
材料性能试验	√	√
抗热震试验	—	√
抗渗透试验	√	√
耐压试验	√	√
气密性试验	√	√
熔盐相容性试验	—	√
热循环试验	—	√
换热性能试验	—	√
保温性能试验	—	√
外观、尺寸与表面粗糙度检查	√	√
注：“√”表示需进行检验的项目，“—”表示不需进行检验的项目。		

9.2 出厂检验

每台换热器均应进行出厂检验，检验项目按表3的规定执行，全部项目合格后方可出厂，如有不合格项，允许返修后重新提交检验。

9.3 型式检验

9.3.1 有下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品或首台产品试制完成时；

- b) 材料牌号、烧结工艺或密封结构有重大变更，可能影响产品性能时；
- c) 正常生产时，每年进行一次；
- d) 停产1年及以上恢复生产；
- e) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时。

9.3.2 型式检验项目全部合格时，判型式检验合格；如有不合格项，应就不合格项对备份试样进行复检，复检合格时判型式检验合格，复检仍不合格时判型式检验不合格。

10 标志、包装、运输、贮存和出厂文件

10.1 标志

10.1.1 产品设置金属铭牌，铭牌应符合 GB/T 13306 的相关要求。

10.1.2 铭牌应包含以下内容：

- a) 产品名称与型号；
- b) 管程/壳程设计压力与设计温度；
- c) 公称换热面积与换热管规格；
- d) 设备净重与外形尺寸；
- e) 出厂编号；
- f) 制造日期；
- g) 制造单位名称地址。

10.2 包装

10.2.1 包装应符合 GB/T 13384 的规定，包装储运图示标志应符合 GB/T 191 的规定

10.2.2 碳化硅换热管及管束属脆性材料，包装应采取防震、防碎措施，并标明“易碎”“轻放”标志，管口应封堵，防止异物进入；法兰密封面应采取保护措施。

10.3 运输与贮存

10.3.1 装卸、运输过程中应轻吊轻放，避免磕碰、挤压和剧烈振动。

10.3.2 换热器应贮存在清洁、干燥、通风的场所，不宜露天存放；长期存放时应采取防潮、防尘措施。

10.4 出厂文件

出厂文件至少应包括：

- a) 产品合格证；
- b) 质量证明书（含材料质量证明、换热管检验报告、无损检测报告、耐压与气密性试验报告）；
- c) 型式检验报告（适用时）；
- d) 安装、使用与维护说明书（含防凝、启停及热循环注意事项）；
- e) 竣工图样及主要尺寸记录。

附 录 A
(规范性)
熔盐相容性试验方法

A.1 原理

将碳化硅试样在设计温度（或565℃）的熔融盐中静态浸泡规定时间，通过测定试验前后试样的单位面积质量变化和室温弯曲强度保持率，评价碳化硅材料与熔融盐的相容性。

A.2 试样

A.2.1 试样应与产品相同工艺和原料制备的换热管或随炉试样上截取，加工成弯曲强度试样，试样尺寸与数量按GB/T 6569的规定执行，每种条件不少于5件。

A.2.2 试样表面应无裂纹、缺棱等缺陷，并按要求进行清洗、烘干。

A.3 试验用熔盐

试验用熔融盐宜采用工程实际用盐；当采用代用盐时，应为符合GB/T 36376规定的Ⅰ类产品（硝酸钾—硝酸钠二元体系），并在报告中注明盐的组分、批号及杂质含量。

A.4 试验装置与条件

A.4.1 加热装置：控温精度不低于±5℃的电阻炉。

A.4.2 盛盐容器：在高温熔盐条件下化学稳定且不与试样发生反应的容器（如高纯氧化铝、石英或耐蚀合金容器）。

A.4.3 试验温度：设计温度；设计未规定时取565℃。

A.4.4 试验时间：不少于500h。

A.5 试验步骤

试验步骤如下：

- a) 将试样用丙酮、乙醇和去离子水依次清洗，烘干至恒重，冷却后称重，精确至0.1 mg，并测量试样表面积，计算总表面积S；
- b) 按GB/T 6569测定同批试样（不少于5件）的初始室温弯曲强度平均值 σ_0 ；
- c) 将熔盐加入容器并加热至试验温度，保温至熔盐完全熔化并稳定后，将试样完全浸没于熔盐中；
- d) 在试验温度下保持500 h，期间应补加熔盐以维持液面，并记录温度波动；
- e) 取出试样，冷却后用去离子水及适当溶剂清洗去除表面残盐，烘干至恒重，冷却后称重；
- f) 按GB/T 6569测定试验后试样的室温弯曲强度平均值 σ_1 ，并观察试样表面是否出现裂纹、剥落或渗透失效。

A.6 结果计算

A.6.1 单位面积质量变化按式（A.1）计算：

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_0}{S} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

Δm ——单位面积质量变化量，单位为mg/cm²；
 m_0 ——试验前试样质量，单位为mg；
 m_1 ——试验后试样质量，单位为mg；
 S ——试样总表面积，单位为cm²。

A.6.2 弯曲强度保持率按式（A.2）计算：

$$R = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \times 100\% \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

R——强度保持率，%。

附 录 B
（规范性）
热循环试验方法

B.1 试验对象

热循环试验应在整机或具有代表性的管束组件（含换热管、管板及密封结构）上进行。

B.2 试验条件

试验条件如下：

- a) 高温端温度：熔盐侧设计温度；低温端温度：不低于所用熔盐析晶温度以上 30℃；
- b) 升降温速率：由设计文件规定；设计未规定时，宜不大于 5℃/min，以避免引入超出实际工况的热冲击；
- c) 循环次数：不应少于 100 次。

B.3 监测与检查

- B.3.1 每个循环应记录高、低温端温度、压力及保压时间。
- B.3.2 每20次循环应检查一次密封部位是否渗漏、紧固件是否松动、换热管是否破损。
- B.3.3 试验过程中出现渗漏、管束破损或紧固件失效时，应终止试验并记录循环次数。

B.4 试验后检验

- B.4.1 按本文件8.3对换热管进行抗渗透复验。
- B.4.2 按本文件8.4进行耐压试验。
- B.4.3 按本文件8.5进行气密性试验。
- B.4.4 按本文件8.7测定换热性能，计算性能衰减率。

B.5 合格判定

完成规定循环次数后，密封部位无渗漏，换热管无破损且抗渗透复验合格，换热性能衰减率不大于 5%时，判热循环试验合格。