

ICS 27.010

CCS F 10

T



团 体 标 准

T/CSPSTC XXX—202X

陶粒型熔融盐储热罐基础建造技术及验收规程

Code of practice for construction technology and acceptance of
ceramsite molten salt heat storage tank foundation

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国科技产业化促进会 发布

中国标准出版社 出版

目 次

| | |
|------------------------|-----|
| 前言 | III |
| 引言 | IV |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和定义 | 1 |
| 4 基本规定 | 2 |
| 5 主要技术要求 | 2 |
| 5.1 材料要求 | 2 |
| 5.2 结构要求 | 3 |
| 6 级配砂层回填（含通风管安装） | 3 |
| 6.1 材料验收 | 3 |
| 6.2 施工要点 | 3 |
| 6.3 质量验收 | 4 |
| 7 约束环墙安装 | 4 |
| 7.1 环墙种类 | 4 |
| 7.2 材料验收 | 4 |
| 7.3 施工要点 | 4 |
| 7.4 质量验收 | 6 |
| 8 隔热环墙施工 | 6 |
| 8.1 材料验收 | 6 |
| 8.2 施工要点 | 6 |
| 8.3 质量验收 | 7 |
| 9 隔热层施工（含热电偶安装） | 8 |
| 9.1 材料验收 | 8 |
| 9.2 施工要点 | 8 |
| 9.3 质量验收 | 9 |
| 10 耐热混凝土施工 | 10 |
| 10.1 材料验收 | 10 |
| 10.2 施工要点 | 10 |
| 10.3 质量验收 | 11 |
| 11 罐体充水与沉降观测 | 12 |
| 12 安全措施 | 12 |
| 12.1 综合安全保证措施 | 12 |

| | | |
|------|------------------|----|
| 12.2 | 施工区域围护措施 | 12 |
| 12.3 | 机械运行安全保证措施 | 13 |
| 12.4 | 吊装作业安全保证措施 | 13 |
| 12.5 | 成品安全防护措施 | 13 |
| 12.6 | 焊接安全保证措施 | 13 |
| 13 | 环保措施 | 13 |
| 13.1 | 现场环保监督检测 | 13 |
| 13.2 | 材料、工器具堆放 | 13 |
| 13.3 | 混凝土浇筑 | 13 |
| 13.4 | 施工场地修复 | 13 |
| 13.5 | 生产垃圾处理 | 13 |
| 附录 A | (资料性) 静态平板荷载控制方法 | 14 |
| 附录 B | (资料性) 动态平板荷载控制方法 | 16 |
| 参考文献 | | 18 |

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。

本文件由中建三局第二建设工程有限责任公司提出。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：XXXXXX。

本文件主要起草人：XXXXXX。

引 言

为提高陶粒型熔融盐储热罐基础的建造水平，统一基础施工质量验收标准，保证基础工程质量，制定本文件。

本文件主要对熔融盐储热罐基础的建造与质量验收做出规定，可以指导熔融盐储热罐基础的施工与质量验收，保证熔融盐储热罐基础的建造质量。

陶粒型熔融盐储热罐基础建造技术及验收规程

1 范围

本文件给出了陶粒型熔融盐储热罐基础建造的基本规定，规定了级配砂层回填（含通风管安装）、约束环墙施工、隔热环墙施工、隔热层施工（含热电偶安装）、耐热混凝土施工、罐体充水与沉降观测、安全、环保等要求。

本文件适用于罐体运行温度在 290 ℃～565 ℃之间陶粒型熔融盐储热罐基础建造与质量验收。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。凡是不标注日期的引用文件，其最新版本适用于本文件。

- GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
- GB/T 14684 建设用砂
- GB/T 26538 烧结保温砖和保温砌块
- GB/T 34188 粘土质耐火砖
- GB 50026 工程测量标准
- GB/T 50046 工业建筑防腐蚀设计标准
- GB 50128 立式圆筒形钢制焊接储罐施工规范
- GB 50202 建筑地基基础工程施工质量验收标准
- GB 50203 砌体结构工程施工质量验收规范
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- GB 50209 建筑地面工程施工质量验收规范
- GB 50473 钢制储罐地基基础设计规范
- GB/T 50484 石油化工建设工程施工安全技术标准
- GB 50661 钢结构焊接规范
- JGJ/T 104 建筑工程冬期施工规程
- NB/T 47013.9 承压设备无损检测 第9部分：声发射检测
- YB/T 4352 耐热混凝土

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

熔融盐储热罐 molten salt tank

一种用于储存高温熔融盐的钢制罐体。

3.2

约束环墙 restraining ring wall

由混凝土、钢材等材料制作而成，对其中的隔热材料起约束作用的环状墙体。

3.3

隔热环墙 insulation ring wall

熔融盐储热罐基础中，由保温砖或耐火砖等砌体砌筑而成，用于阻止基础侧面由内向外散热的环状墙体。

3.4

陶粒 ceramsite

表面呈陶质或釉质，具有轻质高强、良好保温隔热性能，内部有封闭型微孔，呈现细密蜂窝状的人造轻集料。

3.5

隔热层 insulation

熔融盐储热罐基础中，用防止热量扩散的材料按一定的压实系数压实而成，具有基础保温及承载等性能的构造层。

注：本文件适用于采用陶粒的情况，其他采用泡沫玻璃、陶瓷玻璃等，不是本文件的关注对象。

4 基本规定

- 4.1 基础设计应进行抗震验算。
- 4.2 地震作用下基础底面不应出现脱离区。
- 4.3 基础设计应进行基础强度、刚度以及地基承载力、变形和稳定设计，基础耐久性应满足要求，分析时需考虑温度作用和影响。
- 4.4 基础防腐设计应遵守 GB/T 50046 的规定。
- 4.5 施工前应编制工程施工组织设计并完成审批，组织技术交底和安全技术交底。
- 4.6 选择地基与基础施工方案时，应重视施工产生的噪声、振动、挤土、泥浆等对环境的影响，采用的方案应满足国家、地方的环保要求。地基处理应通过现场试验确定地基适用性和处理效果。
- 4.7 地基和基础冬期施工应遵守 JGJ/T 104 的规定。地基和基础施工的安全技术和劳动保护应遵守 GB/T 50484 的规定。地基与基础施工中原材料的质量、检验项目、批量及检验方法应符合相应产品标准规定。
- 4.8 在子分部施工过程中，各施工工序应按照施工技术标准进行质量控制。工序完成以后应由各交叉工程单位检验合格，并形成记录。合格后方可进行下道工序施工。
- 4.9 基础施工完成后，应根据 GB 50026 及设计要求，进行沉降变形监测，直至沉降变形达到稳定为止。
- 4.10 施工现场的临时设施应布局合理、功能分区明确、结合现场实际情况合理规划，节约用地，减少二次搬运、交叉作业，规避安全风险。

5 主要技术要求

5.1 材料要求

- 5.1.1 陶粒宜级配良好，宜在 0 mm~20 mm，堆积密度不宜大于 450 kg/m³；设计温度下导热系数不宜大于 0.35 W/(M·K)；线膨胀系数不宜高于普通混凝土；玻璃化转变温度不应低于熔融盐储热罐设计温度，陶粒层压实系数不宜小于 96%。24 h 浸泡吸水量小于或等于 25% 的干重。
- 5.1.2 耐热混凝土应符合 YB/T 4352 的规定。
- 5.1.3 钢丝网参数应满足设计施工要求，当无设计要求时按表 1 确定。

表 1 钢丝网参数要求

| 序号 | 检验项目 | 要求 |
|----|--------|--------------------|
| 1 | 材质 | 推荐选用 SS304 |
| 2 | 钢丝直径 | ≥ 0.4 mm |
| 3 | 平均孔径尺寸 | ≤ 2 mm |
| 4 | 最大孔尺寸 | $\leq 50\%$ 平均孔径尺寸 |
| 5 | 大孔数量 | $\leq 5\%$ 总网孔数 |

5.2 结构要求

5.2.1 罐内熔融盐温度宜在 290 °C~565 °C，普通混凝土温度不宜大于 100 °C。熔融盐储热罐基础应进行温度场—应力耦合分析。设计时需考虑环境温度、空气对流、地基土热力学和含水率的影响。

5.2.2 基础设计应采用基础和周边土体协同分析的方法。

5.2.3 钢环墙有效截面应力、钢筋混凝土环墙钢筋应力不高于相应温度许用应力，最大裂缝宽度不宜大于 0.2 mm。

5.2.4 地基变形应符合 GB 50473 的相关规定。

5.2.5 设计应分析水文情况，确定防止水进入基础、排水以及与罐体结构的交界面的起坡线等措施细节。

5.2.6 约束环墙宜高出设计地面 300 mm 以上，且高出砂层 100 mm 以上；钢筋混凝土环墙厚度不宜小于 250 mm，钢环墙有效厚度不宜小于 16 mm，且需考虑腐蚀余量。

6 级配砂层回填（含通风管安装）

6.1 材料验收

6.1.1 级配砂层材料应满足设计文件中关于级配砂层的设计材料要求，级配砂的粒径、含泥量、坚固性等指标应满足设计级配要求，施工前需要对级配砂取样进行检测，检测方法应符合 GB/T 14684 的规定。

6.1.2 通风管材料应按相关标准及设计要求验收。

6.2 施工要点

6.2.1 通风管安装

6.2.1.1 通风管道施工前应对管道进行预处理。通风管就位后，应及时定位，并采取加固措施，保证约束环墙底部环形钢筋混凝土基础施工完成前通风管位置不变。

6.2.1.2 焊接过程应遵守 GB 50661 中相关的焊接程序，焊接完成并经过焊缝检测后，需要清除焊接区域的油脂，并在刷洗之后对通风管的焊缝进行补漆。

6.2.2 级配砂层施工

6.2.2.1 级配砂层回填施工应在通风管安装完毕以后进行。

6.2.2.2 施工准备应遵守下列规定：

- 施工前应对基坑施工条件进行检验，基坑应保持干燥；
- 应检查设置控制铺设厚度的标尺；

c) 施工开始前, 应验收轴线尺寸、水平标高等施工准备情况。

6.2.2.3 级配砂层施工遵守下列要求。

- a) 处理地基表面杂物或浮土, 地基地面应平整干净。
- b) 级配砂石应搅拌均匀, 质量应满足设计文件规定。
- c) 级配砂层分层压实, 宜选用平碾结合振动压实机, 相应分层厚度宜在 150 mm~200 mm, 压实遍数宜为 3 遍~4 遍; 捣实方向应与中线平行, 直线段由边到中依次进行碾压, 成型后的底基层应表面平整, 无轮迹; 靠近边缘区域宜辅以小型振动机进行局部振动。

6.3 质量验收

级配砂层标高与平整度偏差应符合 GB 50209、GB 50202 的规定, 具体数值如表 2 所示。

表 2 级配砂层表面允许偏差

| 序号 | 检验项目 | 允许偏差 mm |
|----|-------|------------|
| 1 | 表面平整度 | 15 |
| 2 | 标高 | ±20 |

7 约束环墙安装

7.1 环墙种类

7.1.1 混凝土材质环墙宜参照 GB-50666 施工。

7.1.2 钢质环墙施工遵守 7.2、7.3、7.4 的规定。

7.2 材料验收

7.2.1 钢板力学性能及材料牌号等参数应满足设计文件要求。厚度大于 30 mm 的钢板, 进场后应进行 5% 的抽检。

7.2.2 钢板表面应无裂纹, 打磨处理应记录备案。

7.2.3 表面麻点深度不应超过钢板负公差要求。

7.2.4 钢板修磨的面积应在钢板面积的 2% 以内。

7.2.5 钢板厚度偏差应符合 GB/T 709 的要求, 钢板边缘厚度不应小于设计厚度或最小厚度, 厚度负公差不宜大于 0.3 mm。

7.3 施工要点

7.3.1 钢环墙底板平整度应符合设计要求。

7.3.2 应根据钢环墙设计要求, 对钢环墙进行合理分片, 减少焊接应力, 分片弧度应满足设计质量要求。

7.3.3 钢环墙板预制前应绘制排版图, 并对每块钢环墙板进行编号, 上下两圈钢环墙板的相邻纵向焊缝间距不应小于 500 mm, 钢环墙板高度不应小于 1000 mm, 长度不应小于 2000 mm。

7.3.4 应在钢底板上面标记中心线和钢环墙位置; 钢环墙安装前, 应先用底板限位块点焊固定在钢底板两侧, 防止钢底板在钢环墙安装过程中向外侧滑移, 满足安装精度要求。

7.3.5 钢环墙板宜采用带弧度钢板拼接方式，在每块钢环墙板就位并采用槽钢点焊支撑固定后，进行下一块钢环墙板吊装。

7.3.6 钢环墙板吊装完成后，应复测钢环墙各处的垂直度，在满足设计要求后，开始钢环墙焊接工序。

7.3.7 钢环墙焊接应防止焊接层状撕裂，遵守下列要求。

- a) 板材火焰切割面宜用机械方法去除淬硬层。
- b) 按照控制层间裂纹的焊接工艺，选择合适的焊材和焊接方法，采用合理的焊接顺序，控制焊接热输入，采用多层多道焊，减小板厚方向的拘束度和焊接残余应力。
- c) 严格执行焊接工艺的预热、层间温度、后热等措施，降低拘束应力和氢含量，防止由冷裂纹诱发的层状撕裂。
- d) 严格控制焊接接头的坡口间隙，可通过堆焊将坡口间隙控制在合理范围内。
- e) 采用锤击、打渣等道间消除应力方法。锤击时温度应维持在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，避免在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行。多层焊时，除第一层和最后一层焊缝外，每层都应锤击。

注1：不在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时锤击，是因为金属处于蓝脆阶段，锤击焊缝容易断裂。

注2：第一层和最后一层焊缝不锤击，是因为第一层不锤击是为了避免根部裂纹，最后一层不锤击，是为了防止由于锤击而引起的冷作硬化。

7.3.8 钢环墙焊接遵守下列规定。

- a) 纵向焊缝焊接应全部完成并校正完成后，再进行环向焊缝焊接。
- b) 应控制未施焊的相邻钢环墙板的弧度保持不变。在每个未施焊的纵向焊缝内侧焊接3块钢板固定，钢板弧度与钢环墙弧度一致；已经变形但未开始焊接的焊缝先调整好弧度再在焊缝内侧焊接钢板。
- c) 纵向焊缝焊接应从上往下分段焊接（向上焊）。焊缝宜采用分段退焊方法。采用多层多道焊，焊丝宽度不少于 15 mm ，每层焊接厚度小于 5 mm 。焊缝的焊接顺序如图1所示，先在外侧坡口焊接2层；对内侧坡口进行清根处理，做渗透试验；然后在内侧坡口焊接2层，同时切除横向措施卡板；在外侧坡口焊接填满；内侧坡口焊接填满。

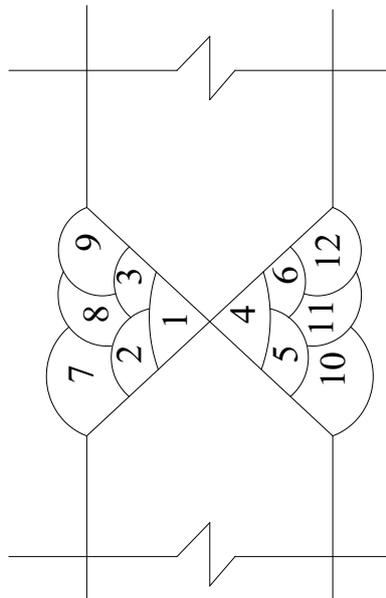


图1 焊缝的焊接顺序

- d) 整条垂直焊缝完成后, 应做 100% 超声检测、硬度检测 (包括母材热影响区), 角焊缝应做 100% 磁粉检测。
- e) 纵向焊缝焊接完成后, 应割除临时吊耳及支撑材料, 焊缝打磨干净并按照要求涂防腐漆, 补漆方案应与钢板加工涂漆一致。
- f) 环向焊缝焊接时, 焊机 (焊工) 应均匀分布, 并沿同一方向施焊。可在焊缝一侧设置交错布置的限位板, 避免产生焊接应力。
- g) 需安排焊接人员分别从东西南北 4 个位置作为起始点同时开始焊接, 每处焊接区域完成后, 各组人员同时移动到相邻的下一个焊接位置, 焊接变形均匀布置, 便于调节和校正, 减少焊接应力对钢环墙产生偏移和变形。

7.4 质量验收

7.4.1 焊接外观质量检测应遵守 GB 50205 的要求, 对焊缝缺陷检验和尺寸偏差进行验收。

7.4.2 钢环墙各处接缝处平齐, 钢环墙安装误差可按照表 3 执行。

表 3 钢环墙安装误差

| 序号 | 检验项目 | 允许偏差 |
|----|----------------|--------|
| 1 | 钢环墙表面相邻两点高差 | ≤6 mm |
| 2 | 10 m 范围内任意两点高差 | ≤10 mm |
| 3 | 钢环墙的内外位移 | ≤10 mm |

7.4.3 在施工过程中产生的焊接缺陷与修补, 应按 GB 50128 中的要求执行。焊接后参照 NB/T 47013.9, 进行 RT (射线) 探伤实验, 检查焊口焊接质量, 不应有气泡、夹渣、空隙等质量问题。

8 隔热环墙施工

8.1 材料验收

施工前应对砖的密度、导热系数、抗压强度、尺寸等参数进行复验, 复验结果应满足相关标准及施工设计要求。

8.2 施工要点

8.2.1 保温砖和耐火砖在隔热环墙中的使用部位与尺寸应按照设计文件执行。砌筑过程应遵守 GB 50203、GB/T 26538、GB/T 34188 的相关规定。

8.2.2 保温砖施工遵守下列规定。

- a) 配套保温砖使用的保温砂浆应由普通水泥、黏结剂和配套保温骨料和水拌和组成, 应现场搅拌, 搅拌配合比应根据保温砂浆产品说明书要求严格控制; 不同厂家的砂浆材料不能混合使用; 保温砂浆使用前应进行强度、导热系数检验, 检验结果应满足施工设计要求; 现场搅拌完后应预留保温砂浆试块, 同一类型、同一批次的砂浆试块不应少于 3 组, 检验强度应符合表 4 的规定。

表4 保温砂浆试块强度检验要求

| 序号 | 检验项目 | 要求 |
|----|------------------|-------------------|
| 1 | 同一验收批次砂浆试块强度平均值 | ≥ 1.1 倍设计强度值 |
| 2 | 同一验收批次砂浆抗压强度最小的组 | ≥ 0.9 倍设计强度值 |

- b) 使用高速旋转混合器或手动搅拌器搅拌砂浆，时间不应少于 3 min，施工前砂浆静置时间不应少于 5 min；拌制的保温砂浆应在 3 h 内或按厂家规定要求时间使用完毕。
- c) 保温砖应靠近其预定位置使用橡胶锤铺设，可使用水平仪检查保温砖层的对齐情况，保温砖水平度和垂直度应满足要求；
- d) 采用湿麻袋覆盖养护，养护时间不应少于 24 h。
- 8.2.3 耐火砖施工遵守下列规定。
- a) 耐火砖砌筑前，应在保温砖顶层铺撒一层厚度为 20 mm 的水泥或浇注料，作为耐火砖的找平层。
- b) 耐火砖依次紧密排列一周，每层耐火砖砌体需要预留膨胀缝，消除环向误差。留缝宽度应由耐火砖材质决定，耐火砖膨胀缝预留宽度宜采用表 5 所列数据。

表5 不同材质耐火砖膨胀缝预留宽度推荐值

| 序号 | 材质 | 膨胀缝预留宽度 mm/m |
|----|-------|-----------------|
| 1 | 耐热黏土砖 | 5 |
| 2 | 高铝耐火砖 | 8 |
| 3 | 镁质耐火砖 | 10 |
| 4 | 硅质耐火砖 | 12 |

- c) 耐火砖砌体膨胀缝还需满足下列要求：
- 1) 各条膨胀缝相隔应不宜大于 2.5 m；
 - 2) 不同层膨胀缝应错开设置，错开距离不宜小于 250 mm。
- d) 耐火砖安装时应紧贴钢环墙，与钢环墙之间的间隙用火泥或者浇注料填充。
- e) 安装完成后，用塑料薄膜覆盖隔热砖，避免其与水接触。
- 8.3 质量验收
- 8.3.1 保温砖和耐火砖砌筑墙体应 3 m~5 m 进行一次质量检测，其尺寸、位置、允许偏差应满足表 6 的要求。

表 6 砌体尺寸、位置、允许偏差验收要求

| 序号 | 检验项目 | | 允许偏差 mm | 抽检次数 |
|----|---------|----|------------|---------|
| 1 | 轴线位移 | | 10 | 全数检验 |
| 2 | 标高 | | ±15 | 不少于 5 处 |
| 3 | 墙面垂直度 | 每层 | 5 | 不少于 5 处 |
| | | 全高 | 10 | |
| 4 | 表面平整度 | | 5 | 不少于 5 处 |
| 5 | 水平灰缝平直度 | | 8 | 不少于 5 处 |

8.3.2 保温砖砌筑层的质量验收应遵守下列要求：

- a) 保温砖砌筑层应横平竖直，错缝搭接，接搓可靠，灰缝应横平竖直，厚薄均匀；
- b) 保温砖砌筑层的质量验收要求应满足表 7 的要求。

表 7 保温砖砌筑层的质量验收要求

| 序号 | 检验项目 | 允许偏差 |
|----|------------|------------|
| 1 | 水平灰缝饱满度 | ≥70% |
| 2 | 水平灰缝厚度 | 8 mm~12 mm |
| 3 | 竖向灰缝厚度 | 8 mm~12 mm |
| 4 | 保温砖层轴线位置偏移 | ≤10 mm |
| 5 | 保温砖层水平位置偏移 | ≤5 mm |

8.3.3 耐火砖砌筑层的质量验收遵守下列规定：

- a) 耐火砖砌筑层应横平竖直，错缝搭接，接搓可靠；
- b) 每个熔融盐储热罐基础耐热混凝土浇筑施工中单独取块，试模尺寸不应小于 51 mm×51 mm×51 mm，数量不应少于 20 个，导热试验试模尺寸不应小于 456 mm×342 mm×64 mm，数量不应少于 9 个，耐火砖砌筑层的质量验收要求应满足表 8 的要求。

表 8 耐火砖砌筑层的质量验收要求

| 序号 | 检验项目 | 允许偏差 |
|----|--------------|--------|
| 1 | 耐火砖砌筑层轴线位置偏移 | ≤10 mm |
| 2 | 耐火砖砌筑层水平位置偏移 | ≤5 mm |

9 隔热层施工（含热电偶安装）

9.1 材料验收

陶粒的各项参数，应满足 5.1 的设计容许偏差要求。

9.2 施工要点

9.2.1 钢环墙和隔热环墙完成后，先在熔融盐储热罐基础内部敷设钢丝网，再进行陶粒回填。

9.2.2 陶粒转运及摊铺遵守下列规定。

- a) 熔融盐储热罐基础内部的陶粒回填和外部的回填土回填需同步进行，内外回填高差不宜超过 20 cm，外部回填应 20 cm 分层回填，压实系数不应低于 96%。
- b) 每层陶粒吊装撒布过程中，应确保完成基础范围全部摊铺。
- c) 当陶粒吊装撒布至熔融盐储热罐基础面积的四分之一左右时，作业人员应开始在基础内部对陶粒进行摊铺整平。
- d) 作业人员可采用木耙、铁锹等轻质工具，根据回填标高就近摊铺均匀，局部堆积较多的陶粒可用小推车在基础内部进行转运。
- e) 当撒布量达到一层的虚铺体积时，应停止撒布。在吊车摊铺陶粒过程中，每层宜间隔 2 m~3 m 布置一根长度与摊铺厚度一致的小木桩作为标高参照物，该层陶粒完全摊铺整平完成后，复测标高，人工找平调整，无误后开始压实。
- f) 应根据施工设计文件，陶粒层底部、顶部及回填至一定高度后铺设不锈钢丝网。
- g) 在铺设钢丝网过程中，施工人员应减少对陶粒完成层的踩踏，可采用在陶粒上铺设木跳板或者钢板的方式，减小对陶粒层压实质量的破坏。

9.2.3 陶粒压实遵守下列规定：

- a) 陶粒压实后每层厚度不宜大于 200 mm；
- b) 陶粒压缩率应控制在 13%~17%，且不应超压，实际摊铺时应根据压缩率计算出每层虚铺厚度；
- c) 陶粒的最大接触应力应小于设计要求，压实机械的选型应满足陶粒最大接触应力要求。

9.2.4 陶粒压实方法可参考下列规定。

- a) 陶粒压实前，首先在摊铺整平好的陶粒表面铺满光面钢板，钢板规格应以方便人工搬运和压实过程中钢板本身不会被压变形为原则，钢板尺寸宜为 1220 mm×2440 mm×5 mm。
- b) 钢板铺设完成以后，根据回填压实设备与陶粒最大接触应力的质量要求，选择小型压路机、滚动式振动机和手持式压路机反复振动碾压，靠近钢环墙边或钢板无法覆盖的区域，采用平板夯机或小型振动机进行局部振动夯实；碾压同时监测陶粒顶标高，此层厚度达 200 mm 时，应停止碾压，开始压实质量检测工作。
- c) 按照设计文件分层压实，并进行静态、动态平板载荷试验。

9.2.5 热电偶安装遵守下列规定。

- a) 热电偶的规格及连接线应满足设计文件的要求。
- b) 应根据设计文件中热电偶的具体安装位置，在陶粒回填过程中进行热电偶的定位与安装。
- c) 应根据设计文件中的热电偶连接线的出口位置，成射线向罐体中心扩张。
- d) 环墙内部热电偶水平保护管应根据图纸布置汇聚到最近的连接点，在环墙内侧某确定处进行连接。
- e) 热电偶保护管应采用不锈钢材质；穿管完成后，热电偶测温端头应位于图纸上的测点位置，且测点略伸入套管端头。

9.3 质量验收

9.3.1 陶粒回填质量验收应满足表 9 的要求。

表 9 陶粒回填要求

| 序号 | 检验项目 | 规范值 |
|----|-----------------------------|---|
| 1 | 陶粒层厚度 | 每层厚度 ≤ 200 mm |
| 2 | 回填压实设备与陶粒最大接触应力 | < 50 kN/m ² |
| 3 | 静态平板载荷测试最大加载应力 | ≤ 300 kN/m ² |
| 4 | 陶粒层动态变形模量 E'_{vd} | ≥ 14 MPa |
| 5 | 陶粒层变形模量 E_{v1} 与 E_{v2} | $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.2$, 且 $E_{v1} \geq 40$ MPa |

9.3.2 陶粒回填验收可结合动态平板载荷试验和静态平板载荷试验进行，通过动态平板载荷试验对每层回填质量进行检测，静态平板载荷试验在选定层进行加载—卸载—再加载循环检测。

9.3.3 动态平板载荷试验，抽验数量宜每 500 m² 不少于 1 个点，对于直径 20 m 以上的大型熔融盐储热罐，每 500 m² 不宜少于 2 个点，且检测点从中心沿直径向两端对称且均匀分布，覆盖整个储罐基础；静态平板载荷试验取点数量应根据代表性，在陶粒回填层从下至上的第二层和顶层陶粒层面上做静载试验，宜每层选取有代表性的 2 个测点，分别位于熔融盐储热罐基础的中心和边缘位置。

9.3.4 采用光轮压路机或者振动压路机压实，压缩率应在 13%~17%，每层虚铺厚度应根据试验得到的压缩率计算，回填压实设备与陶粒最大接触应力应小于 50 kN/m²，以防破坏陶粒。

9.3.5 静态平板载荷测试为加载—卸载—再加载，循环测试的第一次加载和第二加载的变形模量值 E_{v1} 与 E_{v2} 。由静载试验过程中记录下的荷载和沉陷值，拟合成应力—沉陷二次曲线，并得出各项系数，再根据公式得出变形模量的值。分别在陶粒回填层从下至上的第二层和顶层陶粒层面上做静载试验，可参考附录 A。

9.3.6 可采用动态变形模量测试仪进行动态平板载荷试验和沉降相对稳定法（慢速法）进行浅层静态平板载荷试验，检测回填后的陶粒层质量。每层压实完成后选取测点做动态平板载荷试验测试。若实测数据相对同组数据的偏离值较大，则人工排除奇异点，就近选取其他测点，重新测试，可参考附录 B。

10 耐热混凝土施工

10.1 材料验收

混凝土应满足 YB/T 4352 的规定和工程设计要求，同时需要按照耐热混凝土的产品说明书的加水要求控制配合比。拌制好的耐热混凝土存放时间不宜超过 30 min。

10.2 施工要点

10.2.1 耐热混凝土的浇筑温度不应高于 32 ℃，若气温较高，需在搅拌时采取降温措施，满足温度要求。

10.2.2 耐热混凝土在浇筑完后宜用湿麻袋覆盖养护，养护时间不宜少于 7 d。

10.2.3 在耐热混凝土施工前，应进行全面检查工程施工部位，不应有杂物，模板外形尺寸应满足设计要求，钢筋绑扎质量以及膨胀缝预留宽度满足相关要求，浇筑时应注意满足设计尺寸要求。

10.2.4 耐热混凝土浇筑前，应使用防水层将耐热混凝土与耐火砖墙、陶粒基础接触表面覆

盖。

- 10.2.5 耐热混凝土浇筑过程中可使用机械捣固装置,保证混凝土施工质量均匀、外观光洁、内部紧实。
- 10.2.6 耐热混凝土施工尽量保持连续,如必须中断,相隔时间不应超过耐热混凝土的初凝时间,且在继续施工中,需要将已浇筑表面打毛并清理干净,并用水淋湿。
- 10.2.7 耐热混凝土浇筑宜分仓分节进行,具体划分参考顶部钢板(钢顶板)排版图,确定对应分仓做法,以便后续顶部钢板的安装。
- 10.2.8 钢顶板宜为扇形钢板,上面宜设置若干气孔,避免安装空鼓。
- 10.2.9 钢顶板吊装过程中,应将钢顶板吊装到调整好的耐热混凝土上,并调整水平,直到钢顶板放置位置与预先标记的限位钉子相一致后取下吊具。
- 10.2.10 耐热混凝土浇筑之后应采取覆盖保温等方式,降低内外温差,避免因温差造成的开裂,如耐热混凝土结构为大体积混凝土浇筑,还应采用散热方式,并缓慢降温,避免因温差应力造成的耐热混凝土开裂。
- 10.2.11 每层耐热混凝土浇筑之后应进行振捣,提高耐热混凝土的密实度。
- 10.2.12 不应过早拆模,不应有人员踩踏等现象,采取措施避免因耐热混凝土基础承受较大施工载荷与振动造成的开裂现象。
- 10.2.13 耐热混凝土结构初凝前应做好防雨措施,防止雨水侵入耐热混凝土层造成腐蚀开裂。

10.3 质量验收

- 10.3.1 耐热混凝土的浇筑分层厚度,应根据拌和能力、运输能力、浇筑速度、气温等因素确定。分层浇筑时,应注意使上下层耐热混凝土一体化,浇筑应保持连续性,间歇时间应通过试验确定。
- 10.3.2 耐热混凝土浇筑面应平整,在其抗压强度尚未达到 2.5 MPa 前,不应进行下道工序的准备工作。
- 10.3.3 耐热混凝土施工缝面应无乳皮,微漏粗砂。
- 10.3.4 耐热混凝土试验取样应遵守 YB/T 4352 的规定。
- 10.3.5 耐热混凝土质量验收应符合表 10 的要求。

表 10 耐热混凝土质量验收要求

| 序号 | 检验项目 | 数值 |
|----|------------------------------|--------------|
| 1 | 耐热混凝土的浇筑分层厚度 | 30 cm~50 cm |
| 2 | 预埋件允许高度偏差(10 m 内) | ±3 mm |
| 3 | 预埋件允许高度偏差(整体) | ±5 mm |
| 4 | 耐热混凝土试块常温抗压强度(3 d 时) | 5 MPa~10 MPa |
| 5 | 耐热混凝土试块常温抗压强度(7 d 时) | 10 MPa |
| 6 | 耐热混凝土试块 600 °C 下抗压试验(28 d 时) | 5 MPa |
| 7 | 耐热混凝土试块 600 °C 下导热试验(28 d 时) | ≤0.28 W/M*K |

11 罐体充水与沉降观测

11.1 施工中每台熔融盐储热罐基础均需要设置沉降点,并在施工结束后进行沉降观测试验,且需要有完备的流程文件,主要包括沉降观测点布置图纸、沉降观测人员的资质要求、沉降观测要求与标准、沉降差允许值(各阶段)以及沉降超限后的处理方案。

11.2 沉降观测点应按基础圆周方向均匀布置,且需要按设备图纸要求数量设置。当无设计图时,观测点确定原则应符合表 11 的要求。

表 11 熔融盐储热罐基础沉降观测点设置数量

| 序号 | 罐体公称容积 m ³ | 观测点数量 个 |
|----|--------------------------|------------|
| 1 | 5000 | 10 |
| 2 | 10000 | 16 |
| 3 | 20000 | 20 |
| 4 | 30000 | 24 |
| 5 | 50000 | 40 |

11.3 应选取不受破坏和扰动的基准点作为水准点,并做好基准点的维护和标识,用倒红三角显著标识。

11.4 充水试验应采用无腐蚀性清洁淡水,熔融盐储热罐的试验用水温度不应低于 5℃。充水过程中应进行基础沉降观测,如基础发生设计不允许的沉降,应停止充水,待处理后方可继续充水。

11.5 熔融盐储热罐基础沉降应安排专人定期观测,自充水开始后每天测量不应少于 2 次,并应做好记录。沉降观测应包括充水前、充水过程中、充满水后、放水后的全过程。

11.6 沉降观测应使用固定的经计量部门鉴定的合格测量器具,如精密水准仪和钢钢尺、精密的工程水准仪和刻度精确的水准尺。

11.7 熔融盐储热罐的不均匀沉降值不可超过设计文件的要求。当设计文件无要求时,支撑罐壁的基础部分不应发生沉降突变,沿罐壁圆周方向任意 10 m 弧长内的沉降差不宜大于 13 mm,总体沉降量不宜超过 50 mm,满足设计要求。

12 安全措施

12.1 综合安全保证措施

12.1.1 所有施工人员应经过现场安全培训方可进入现场施工,专业工种应持证上岗。

12.1.2 所有现场人员进入现场时劳保用品应配备齐全。

12.1.3 正式施工开始前应编制安全施工方案和实施措施,经审批后,做好施工技术与安全交底及班前喊话,并在施工过程中加强过程检查。

12.1.4 施工现场安全管理人员配置应满足项目安全制度要求。

12.1.5 高温季节施工期间应配置防暑降温措施。

12.2 施工区域围护措施

12.2.1 施工现场应采用硬质围栏防护将每日施工区域进行隔离。

12.2.2 吊装作业区域应进行硬质维护,非作业相关人员不应入内。

12.3 机械运行安全保证措施

- 12.3.1 作业期间应配置信号工进行机械协调指挥，信号工应经专业培训、具备专业资质。
- 12.3.2 机械操作员应持证上岗，不应将机械交于无本机操作证的人员操作。
- 12.3.3 每日应对机械设备状态进行全面检查，确保设备满足施工条件后方可入场施工。
- 12.3.4 应定期对设备进行巡检维护，降低设备故障发生率。

12.4 吊装作业安全保证措施

- 12.4.1 吊装前应对吊装设备及吊索吊具进行安全检查。
- 12.4.2 吊装作业时应有索工对吊物进行牵引，索工应经过专业培训并具备专业资质。
- 12.4.3 吊装作业期间任何人员机械不应在吊物下行走或停留。
- 12.4.4 五级以上大风不应进行吊装作业。

12.5 成品安全防护措施

- 12.5.1 隔热环墙从材料存储到施工完成过程中应注意防水防潮，用塑料薄膜整体覆盖。
- 12.5.2 陶粒具有较强的吸水性能，在陶粒回填施工过程中，需要注意天气情况，并在熔融盐储热罐基础旁边常备塑料布，以免雨水影响陶粒性能。

12.6 焊接安全保证措施

- 12.6.1 使用切割机切割材料时操作人员应佩戴面罩。
- 12.6.2 焊工应穿戴防烫手套、专用面罩，避免皮肤直接裸露在弧光下。
- 12.6.3 焊接完成的焊缝应冷却后才能触碰，且注意防止被烫伤、电弧伤眼。
- 12.6.4 在进行焊缝酸洗钝化时，应穿戴手套，避免皮肤被腐蚀。

13 环保措施

13.1 现场环保监督检查

应加强环保的自控自检，现场设环保监督监测员，每天对现场的环保工作进行监督检查。应重点检查与管理现场废土和垃圾的清理清运情况。

13.2 材料、工器具堆放

应设置各施工材料、工器具的堆放点，材料、工具、设备应堆码整齐，应有安全通道。

13.3 混凝土浇筑

混凝土浇筑时应防止将混凝土倾撒在施工场地上，如操作不慎，应及时清理，场地应干净整洁。

13.4 施工场地修复

在施工过程中对施工场地产生破坏时，应及时进行场地修复。

13.5 生产垃圾处理

施工完成后应及时清除临时设施工程及建筑垃圾，做到工完场清，保持施工区域整洁。

附录 A

(资料性)

静态平板荷载控制方法

A.1 概述

静态平板荷载试验是通过 2 次加载测得陶粒变形模量,并计算得到 E_{v1} 和 E_{v2} 的数值及比值,全面、综合判定陶粒塑性残余变形量以代表压实状态、反映荷载承载能力。

A.2 判定标准及试验理论依据

要求静态平板荷载测试为加载(最大应力不超过 300 kN/m²)—卸载—再加载,循环测试的第一次加载和第二次加载的变形模量值 E_{v1} 与 E_{v2} 满足: $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.2$,且 $E_{v1} \geq 40\text{MPa}$ 。

根据 DIN 18134,由静载试验过程中记录下的荷载和沉陷值拟合应力—沉陷二次曲线,并得出各项系数,再根据公式得出变形模量的值。

沉陷值拟合公式见式(A.1)。

$$s = a_0 + a_1 \sigma + a_2 \sigma^2 \quad (\text{A.1})$$

式中:

s ——沉陷值,单位为毫米(mm);

σ ——承载板上的平均正应力,单位为兆牛每平方米(MN/m²);

a_0 ——系数,单位为毫米(mm);

a_1 ——系数,单位为兆牛每平方米(MN/m²);

a_2 ——系数,单位为兆牛每四次方米(MN/m⁴)。

然后将式(A.1)得出的各项系数代入变形模量公式得出不同加载循环下的变形模量值,见式(A.2)。

$$E_v = 1.5 \cdot r / (a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0max}) \quad (\text{A.2})$$

式中:

E_v ——变形模量,单位为兆牛每平方米(MN/m²);

r ——承载板半径,单位为毫米(mm);

a_1 ——系数,单位为兆牛每平方米(MN/m²);

a_2 ——系数,单位为兆牛每四次方米(MN/m⁴);

σ_{0max} ——最大平均正应力,单位为兆牛每平方米(MN/m²)。

A.3 试验取点及场地

分别在陶粒回填层从下至上的第二层和顶层陶粒面层上做静载试验,每层选取有代表性的 2 个测点,分别位于熔融盐储热罐基础的中心和边缘位置;边缘位置的压实难度大,静态变形模量相对较低。

A.4 试验仪器及过程

采用的加载装置为标准的 10 t 配重(共三个),承载板直径宜为 600 mm,因此理论最大加载应力可达到 1840 kN/m²。

采用 DIN 18134 建议的支点式试验装置，将位移传感器直接放置在承载板上方，两边用配重块作为支架，通过调节承载板上的液压千斤顶实现逐级加载直到设计给定的最大应力 300 kN/m^2 为止，然后逐级卸载到零。此后可以执行下一个加载循环，加载遵守下列规定。

- a) 静态平板载荷试验的第 1 次加载按下列步骤进行。
 - 1) 预压 0.01 MPa 的荷载 30 s ;
 - 2) 以大致相等的荷载增量（荷载增量为 0.08 MPa ）逐级加载；
 - 3) 沉降量达到 5 mm 时或最大荷载达到 0.5 MPa 后，进行卸载；应注意，需要按最大荷载的 50% 、 25% 和 0% 进行 3 级卸载。
- b) 静态平板载荷试验的第 2 次加载。在第 1 次加载并卸载后（达到荷载后需保持半小时，但两次加载间无需在额外间隔），按照第 1 次加载的操作步骤，并保持与第 1 次加载时各级相同的荷载进行第 2 次加载，直到达到第 1 次加载时的最大荷载的倒数第 2 个荷载级即可。

A.5 试验数据收集

通过记录加载循环中位移传感器的读数，绘制出静载试验应力—沉陷折线图。

A.6 试验数据分析

第一次加载过程中，基础的沉陷来源于回填层的弹性变形和塑性变形。加载过程中，陶粒之间的间隙减小，即回填层变形模量增大，因此斜率应逐渐变小。卸载后第二次加载尽可能地消除了塑性变形的影响，主要沉陷来源于弹性变形。因此，二次加载曲线与一次加载曲线形状类似，但弯曲程度小，更接近直线。

分别用分析软件，如 Origin 拟合第一次和第二次加载的应力—沉陷二次曲线。

将两次加载拟合二次曲线的系数 a_1 和 a_2 分别代入变形模量公式，得出 E_{v1} 与 E_{v2} 及比值。

附录 B

(资料性)

动态平板荷载控制方法

B.1 概述

早期陶粒型熔融盐储热罐基础设计中,为满足荷载要求,提出分层碾压并逐层静态平板荷载试验。但明显耗时费力,通过引入动态变形模量,实现了快捷测量。动态变形模量 E'_{vd} (dynamic modulus of deformation) 是指土体在一定大小的竖向冲击力和冲击时间作用下抵抗变形能力的参数,与弹性模量 E_c 间明确关系,快速反映每层动态压实情况。

B.2 试验理论依据

根据 Boussinesq 建立的适用于刚性圆板的分析方法,针对所选陶粒的物理特性,可以建立弹性模量 E_c (定值) 和动态变形模量 E'_{vd} (基准) 之间的关系,从而实现通过动态平板荷载试验对每层陶粒的压实质量(即碾压是否充分)的量化控制。该关系的表达式见式(B.1),其中, E_c 的值参照所选陶粒的技术标准要求。

$$E_c = \frac{\pi(1-\mu^2)}{3} E'_{vd} \quad (\text{B.1})$$

式中:

μ ——泊松比。

根据设计质量参数要求和参照 DIN 18134,采用动态变形模量测试仪进行动态平板荷载试验和沉降相对稳定法(慢速法)的进行浅层静态平板荷载方法来检测回填后的陶粒层的质量。

根据平板压力公式,动态变形模量按式(B.2)计算。

$$E'_{vd} = 1.5 \times r \times \sigma / s \text{ MN/m}^2 \quad (\text{B.2})$$

式中:

1.5——承载板形状影响系数;

r ——承载板的半径,取 150 mm;

σ ——测试仪最大冲击应力;

s ——承载板的沉陷值,单位为毫米(mm)。

B.3 试验取点及场地

具体由设计指定,应根据单位工程计算,抽验数量宜每 500 m^2 不少于 1 个点,对于直径 20 m 以上的大型熔融盐储热罐,宜每 500 m^2 不应少于 2 个点,且检测点从中心沿直径向两端对称且均匀分布,覆盖整个储罐基础。

每层压实完成试验。若实测数据相对同组数据的偏离值较大,则人工排除奇异点,就近选取其他测点,重新测试。

B.4 试验仪器及过程

B.4.1 采用定制化仪器,如 TERRATEST 4000 USB 轻型落锤测试仪来检测土体压实指标。

B.4.2 试验过程如下：

- a) 准备阶段：首先将承载板平放在测试点，将沉陷测试仪和承载板用连接线连接，落锤固定到导杆上部的挂钩上；
- b) 校验阶段：启动沉陷测试仪，前三次释放落锤，仪器会自动检测结果，并语音提示进入正式测量阶段；
- c) 正式测量阶段：三次分别释放落锤，显示屏上会显示三次沉陷值 s_4 、 s_5 、 s_6 ，相对应的沉陷曲线以及最后的结果 E'_{vd} 值。

B.5 试验数据收集与分析

使用动态平板测试仪配套数据软件，如 TERRATEST 2.4 读取并自动分析试验数据。如果压实充分，三条沉陷曲线应较为贴近，且 s_4 、 s_5 、 s_6 对应的最大沉陷幅度应依次减小。最大沉陷值 s 取 s_4 、 s_5 、 s_6 的平均数。

B.6 试验结果判定

要求 E'_{vd} 最小值不应小于 14 MPa。

参 考 文 献

- [1] GB 50007 建筑地基基础设计规范
 - [2] GB 50011 建筑抗震设计规范
 - [3] GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
 - [4] GB 50300 建筑工程施工质量验收统一标准
 - [5] GB 50666 混凝土结构工程施工规范
 - [6] GB/T 50756 钢制储罐地基处理技术规范
 - [7] GB 51004 建筑地基基础工程施工规范
 - [8] DL/T 5578 电力工程施工测量标准
 - [9] DL/T 5628 太阳能热发电厂岩土工程勘察规程
 - [10] JGJ 8 建筑变形测量规范
 - [11] SH/T 3510 石油化工设备混凝土基础工程施工质量验收规范
 - [12] SH/T 3528 石油化工钢制储罐地基与基础施工及验收规范
 - [13] TB 10102 铁路工程土工试验规程
 - [14] DIN 18134 Determining the deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test
-