



中国电建
POWERCHINA

汇聚 柔韧 进取 奉献 和谐
Convergence flexible and
enterprising dedication harmony

西北勘测设计研究院有限公司
NORTHWEST ENGINEERING CORPORATION LIMITED



大容量熔盐储热技术研究 及工程应用

王迎春

2024年9月

汇报目录



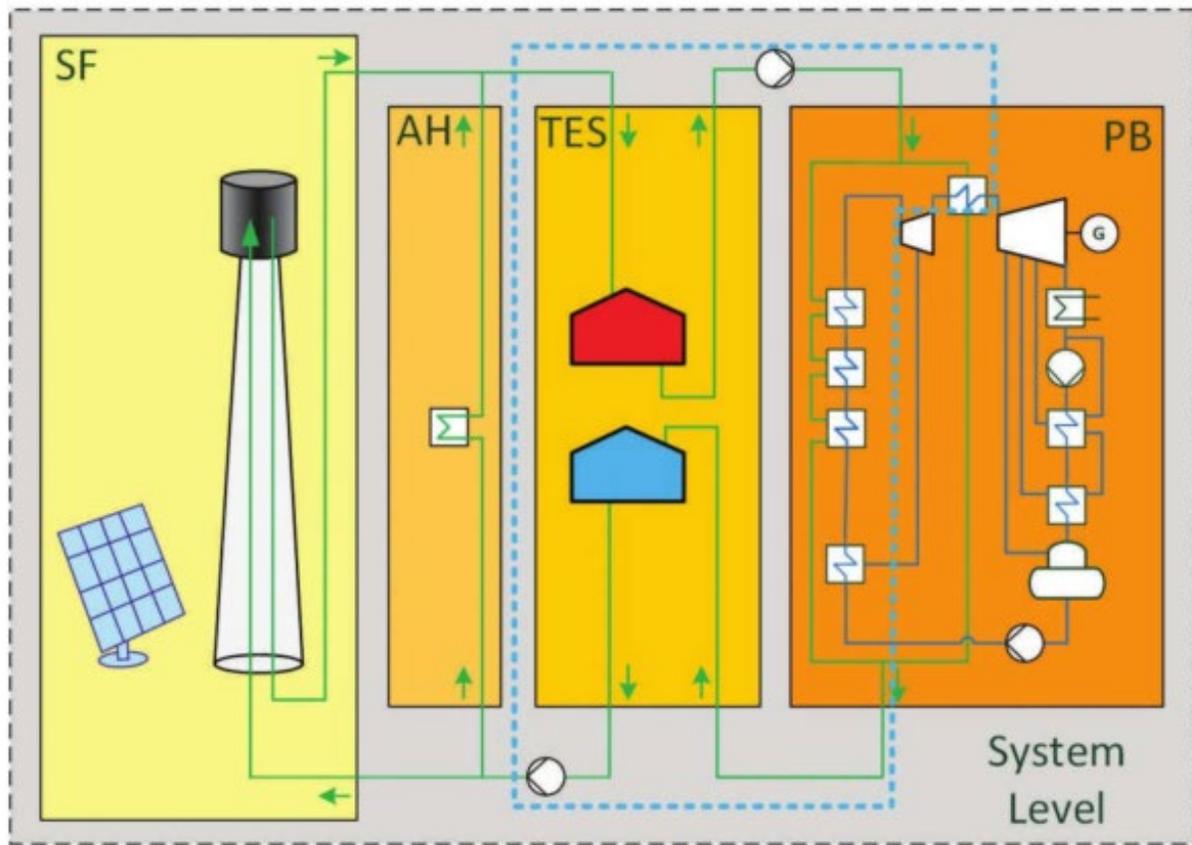
- 1 研究背景
- 2 技术研究
- 3 工程实践



研究背景

熔盐储热系统主要应用于光热发电行业，亦可应用于火电灵活性改造和供热行业等。可参与电网调峰、调频，支撑风电、光伏等其它可再生能源并网发电。

系统以太阳熔盐材料做为储热介质，熔盐从冷盐罐经过太阳直接辐射加热后的吸热器，温度由 300°C 左右提升到 560°C 左右，进入热熔盐罐内，发电时从高温罐经过蒸汽发生系统换热后回流低温罐，是热发电重要的系统之一。



光热发电流程图

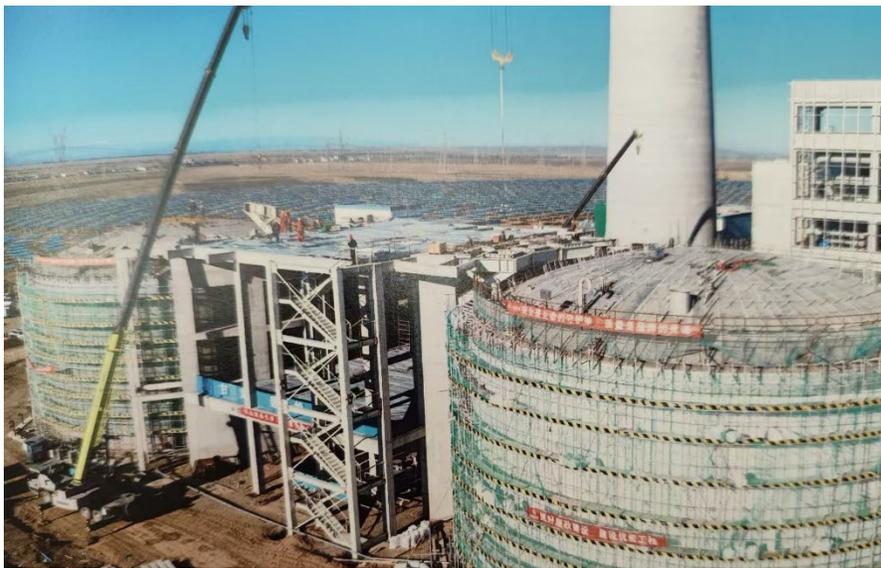


迪拜光热电厂项目CT区：
配置1x100MW塔式熔盐储热发电机组
(15小时储热系统)

南非红石100MW光热项目
(12小时储热系统)



目前在建项目，储罐基本
为国内设计，国内建造。



部分项目熔盐储罐外形尺寸及公称容积（数据仅参考）

| 项目 | 内直径 (m) | 竖壁高度 (m) | 液面高度 (m) | 公称容积 (m ³) |
|----------|------------|-------------|-------------|---------------------------|
| 共和 | 25 | 12.5 | 11 | 6800 |
| 鲁能 | 30 | 14.5 | 13 | 11500 |
| 金塔 | 32.5 | 16 | 14.5 | 14000 |
| 大成 | 33 | 14.5 | 13.5 | 12400 |
| 青豫直流 | 37 | 15 | 13.5 | 16100 |
| 首航 | 39.3 | 15 | 13.5 | 18100 |
| NOOR-III | 41.2 | 14 | 12.5 | 22000 |
| 迪拜 | 45.6 | 14.5 | 13 | 24000 |

目前迪拜项目储罐容量估计是塔式项目中最大的。储罐能做到多大？

储罐设计研发仍有很多工作要做

主要风险点

- 1、核心关键部位缺少标准规范等的指导（动态腐蚀余量、变形允许值、设计标准等）
- 2、材料性能指标缺失（高温本构、蠕变疲劳指标等）
- 3、储罐疲劳破坏问题尚未有效解决（动态循环受力，热变形趋势不均匀，底板受力复杂）
- 4、项目施工管理能力有待提升（材料质量、无损检测等）
- 5、加工建造水平有待提升（焊接质量及热应力、拼装等）
- 6、技术故障和人为错误，是事故的一个决定性因素（温度梯度，升温速率等）

有关文献：

- 1、熔盐腐蚀失效
- 2、局部失效
- 3、储罐焊接质量
- 4、地基非均匀沉降
- 5、储罐热膨胀受限
- 6、入罐熔盐温度波动较大。

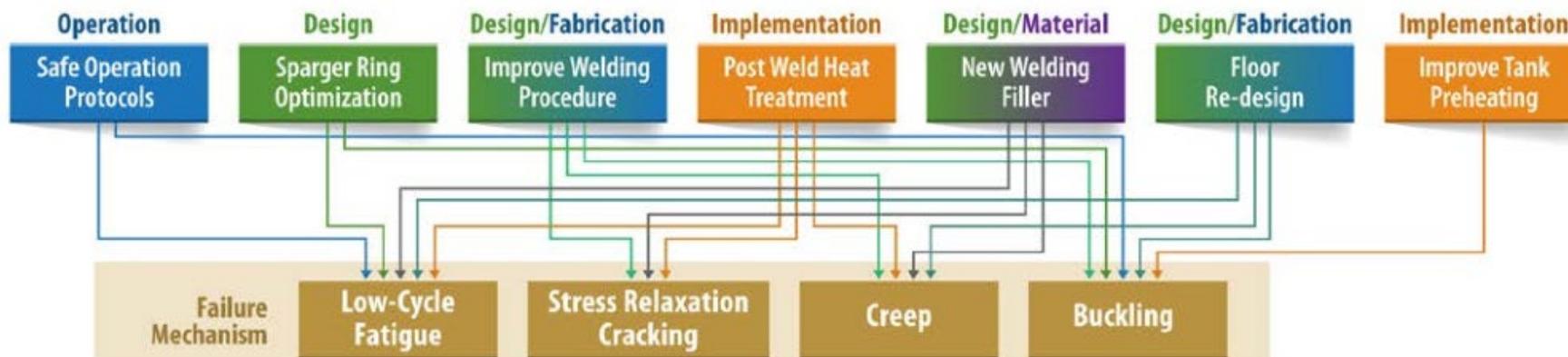


Figure 119. Potential alternatives to address molten salt TES tank failures



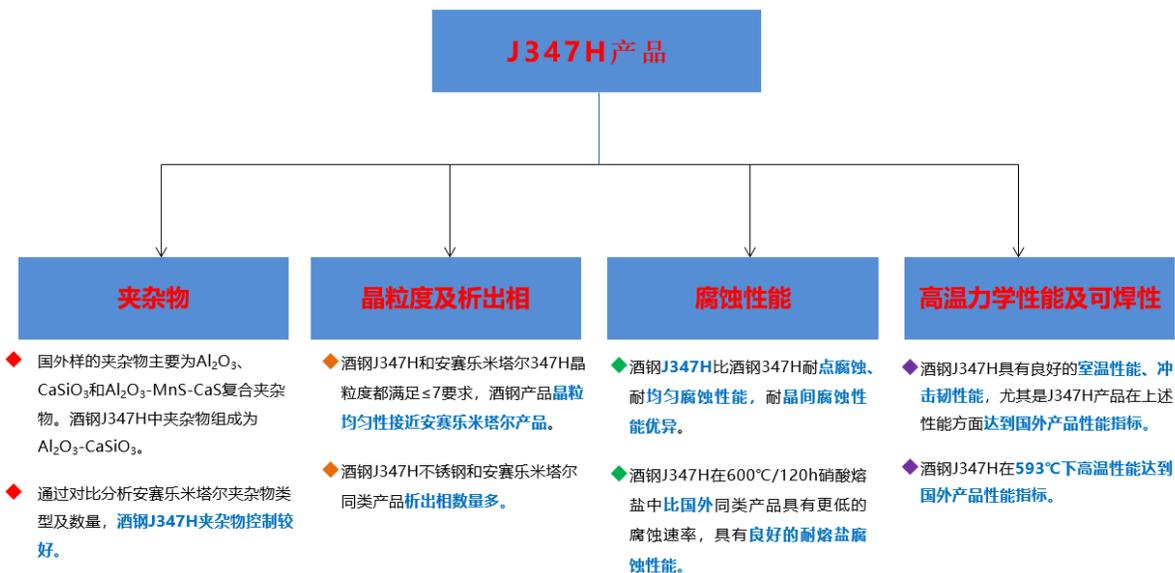
技术研究

2.1.1 钢材

储罐目前普遍采用347H、Q345R、SA516-Gr 70钢板拼装焊接而成。

- 1、尚无在统计或标准层面上对高温熔盐环境钢材腐蚀性能，高、低周循环下疲劳曲线等基本数据。
- 2、受制于厂家钢板供货（轧制）能力，储罐现场焊接拼接量偏大。
- 3、高温高强钢、高性能钢的研发和推广动力不足。

项目上目前主要参考已有经验和成果，与钢材供货厂家约定技术指标，以保证项目实施。

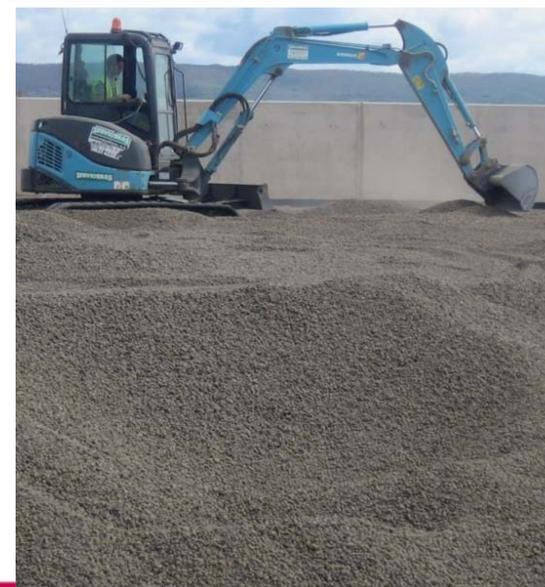


2.1.2保温

1、基础方面绝热层分为两类：柔性绝热层采用级配陶粒土分层压实，半刚性绝热层采用绝热板材分层铺砌。

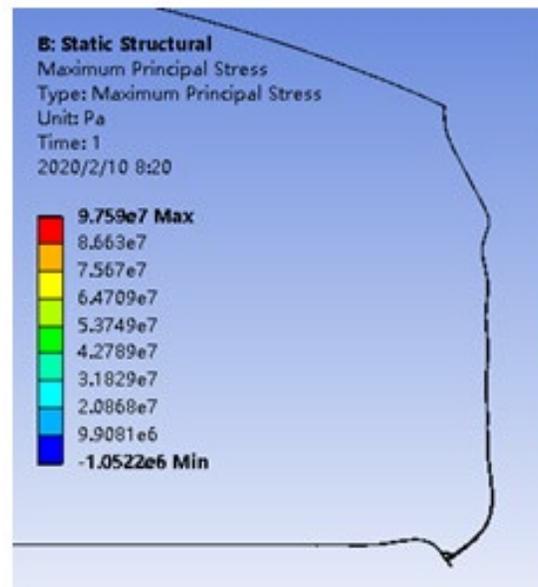
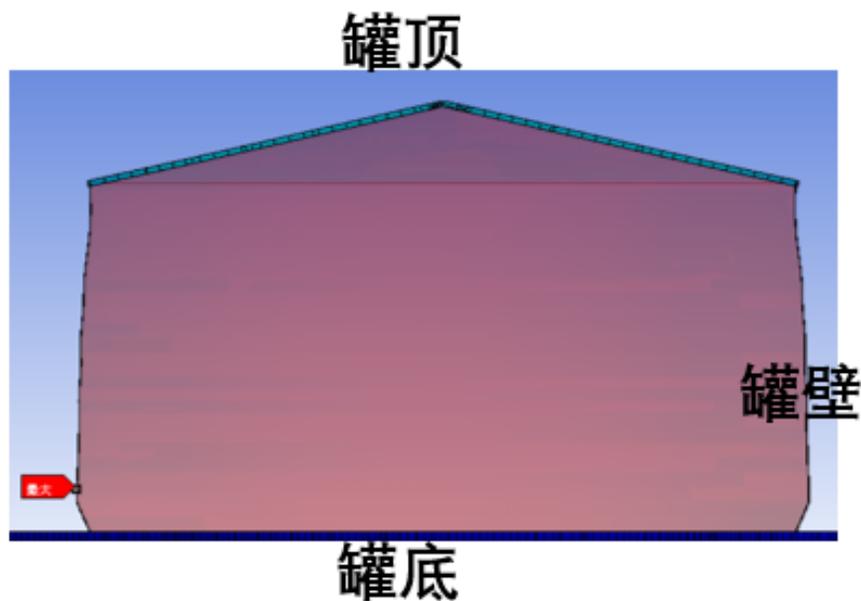
2、壁板绝热采用硅酸铝、高温岩棉材料。

由于保温材料市场产品质量参差不齐，项目管理上材料品控难度大，以及储罐温降验收难度大等因素。保温层厚度实践中存在一定差异。



- ◆ 储罐在温度和流体压力作用下，壁板变形下部呈象足状，顶部内收，中部较为均匀。在底部大脚焊缝处应力集中，其它部位以薄膜力为主。

- 1 罐顶稳定性分析
- 2 竖壁与边缘板厚度比分析
- 3 底部摩擦系数影响
- 4 底部边缘板外伸长度影响
- 5 罐底局部脱空分析
- 6 分叉壁
- 7 保温设计
- 8 储罐基础



变形轮廓

2.2.1 罐顶稳定性分析

◆ 罐顶的分析包括罐顶网格结构的整体稳定和杆件的稳定与强度计算。一般采用肋环形。

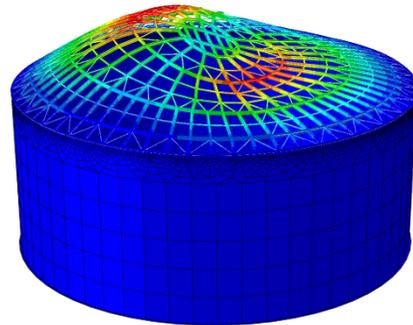
1 初始缺陷最大值按照网格跨度（即直径）的1/300进行计算

2 根据材料高温拉伸曲线确定本构关系

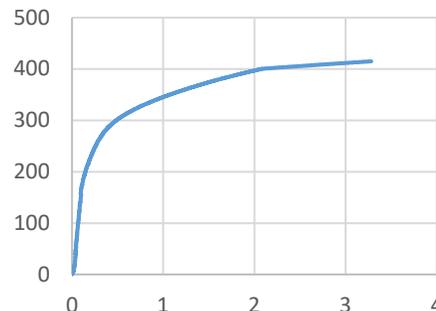
3 根据《空间网格结构技术规程》JGJ7-2010，单层球面网壳，按弹塑性全过程分析时，稳定极限承载力安全系数K可取为2.0

4 提取储罐罐顶构件的轴力与弯矩，对构件的强度与稳定性进行验算。杆件在壳体曲面外的计算长度取 $1.6l$ ，平面内取 $0.9l$

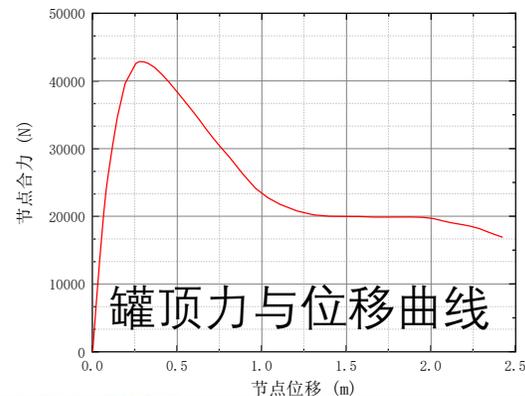
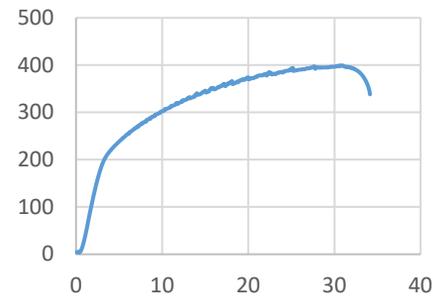
U, Magnitude
+1.045e+00
+9.576e-01
+8.705e-01
+7.835e-01
+6.964e-01
+6.094e-01
+5.223e-01
+4.353e-01
+3.482e-01
+2.612e-01
+1.741e-01
+8.705e-02
+0.000e+00



Q345R应力应变



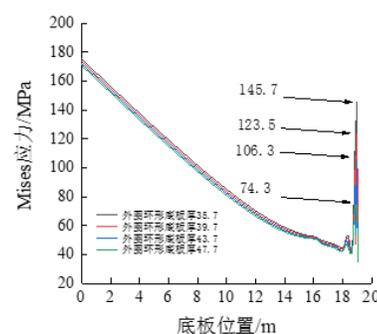
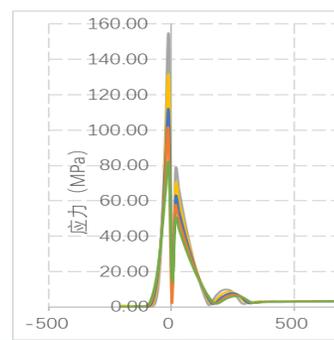
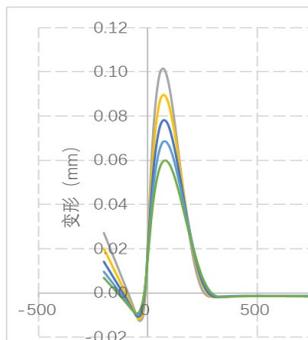
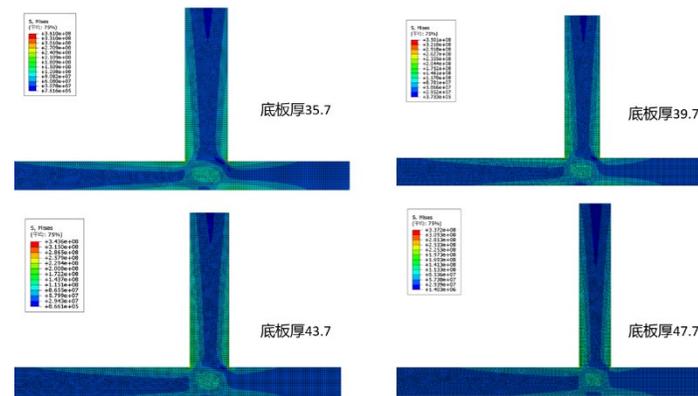
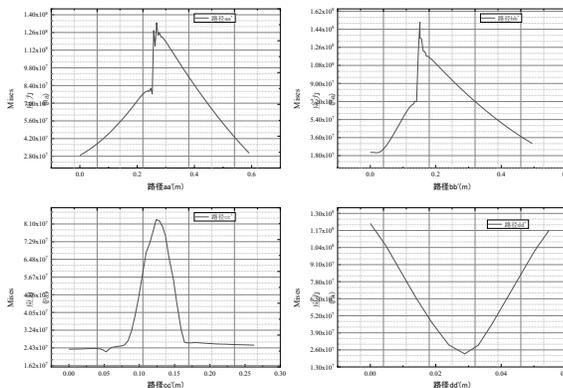
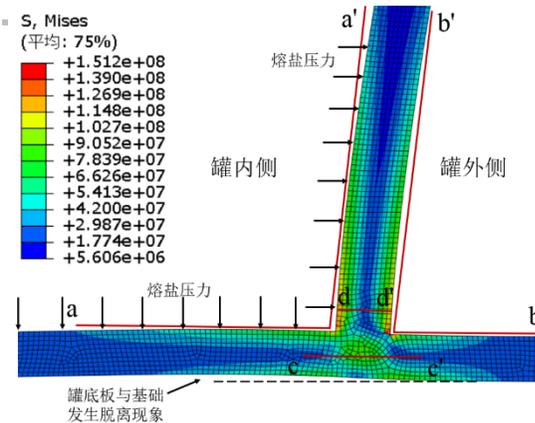
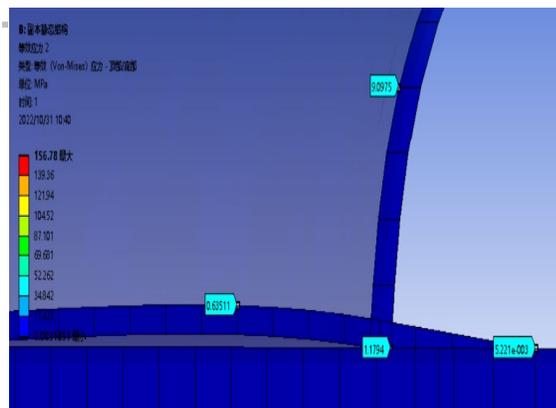
347H应力应变



2.2.2 竖壁与边缘板厚度比分析

◆ 储罐竖壁与底板连接的大角焊缝区域，储盐后壁板弯曲变形，大角焊缝的内侧和外侧应力最为集中，是需要重点验算的部位之一

- 1 底板局部变形、等效应力随板厚增加而减小。
- 2 底板变形较大的范围约在距壁板300mm左右。
- 3 随底板厚度增加，罐底安全性增加。建议罐底边缘板厚度不宜小于壁板厚度的0.6倍。

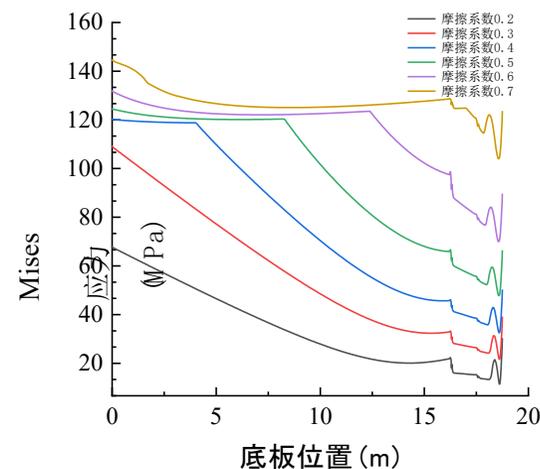
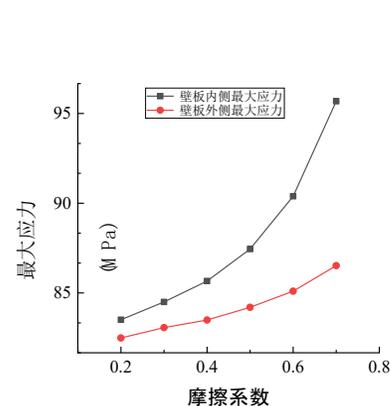
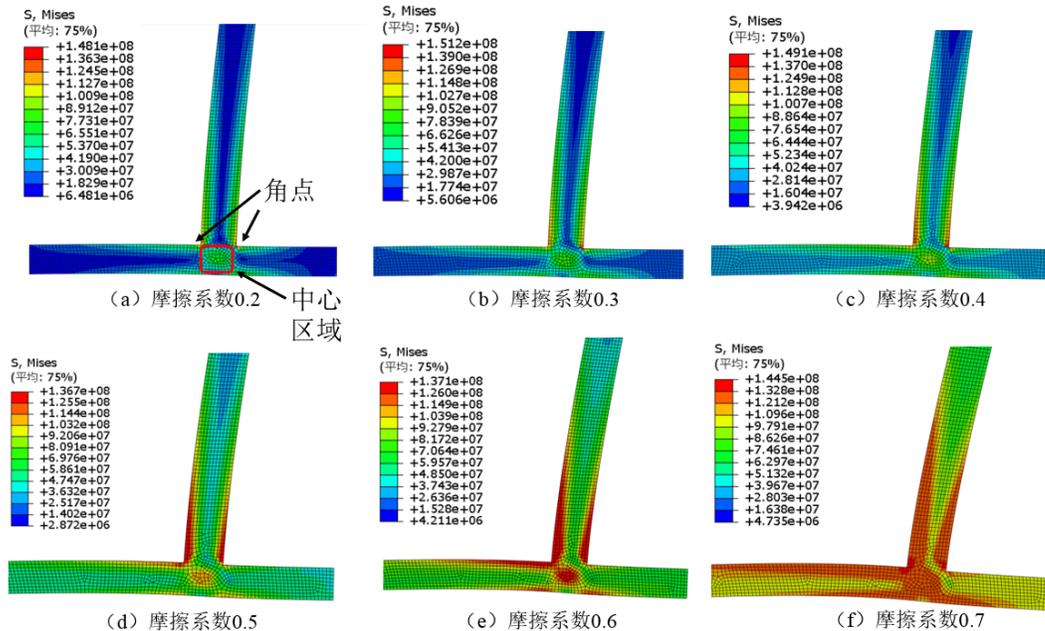
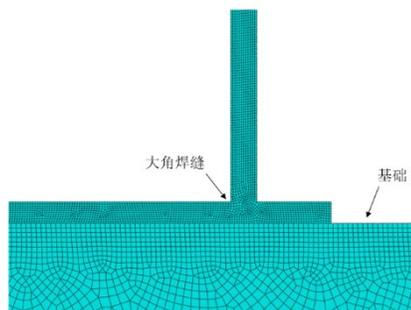


2.2.3 罐底与基础摩擦系数影响

◆ 罐底摩擦对储罐底部安全影响大

1 随着摩擦系数的增加，基础对于底板的横向膨胀变形的约束作用增强，大脚焊缝的最大应力均随着摩擦系数的增大而增大。

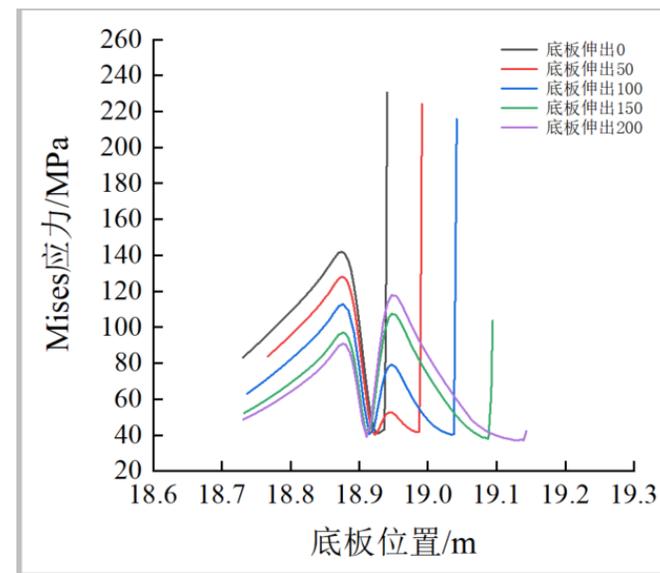
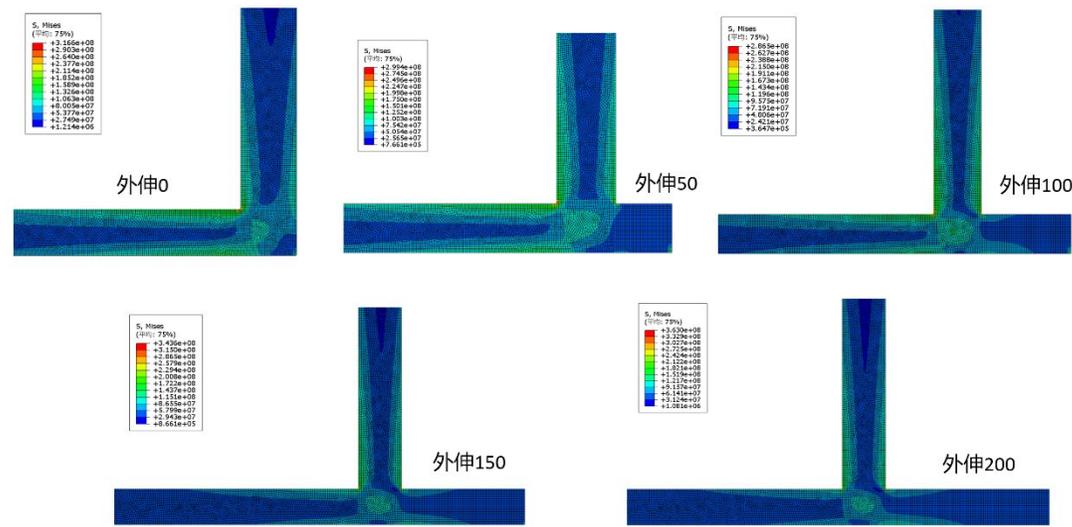
2 底板应力变化为中心大边缘小，随着摩擦系数的增加，应力整体上升。平整底板仍有较大压应力。



2.2.4 底部边缘板外伸长度影响

◆ 罐底边缘板伸长度宜合理

- 1 边缘板伸出的长度增加，板应力曲线中第一个波峰（壁板内侧对应位置）会减小，第二个波峰（壁板外侧对应位置）应力会上升，整体应力更平均。
- 2 底板伸出长度增加了，大脚焊缝处应力是先下降后上升，因此需要控制底板外伸出的长度。建议取100~150mm左右

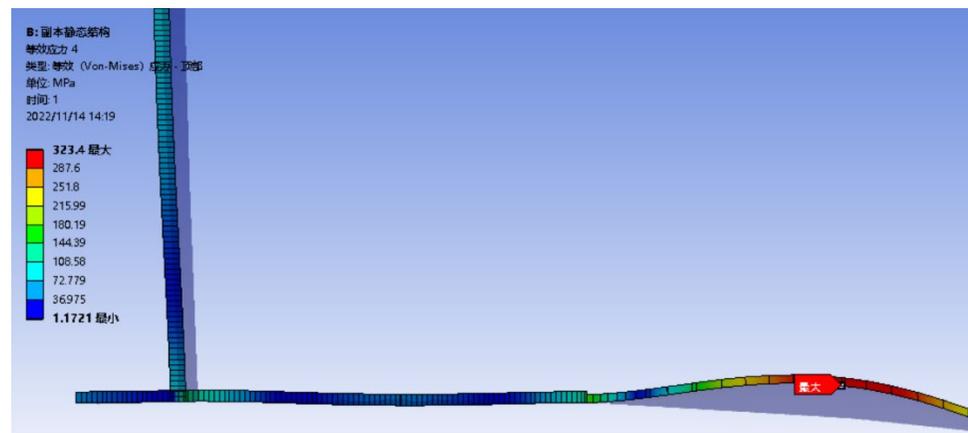
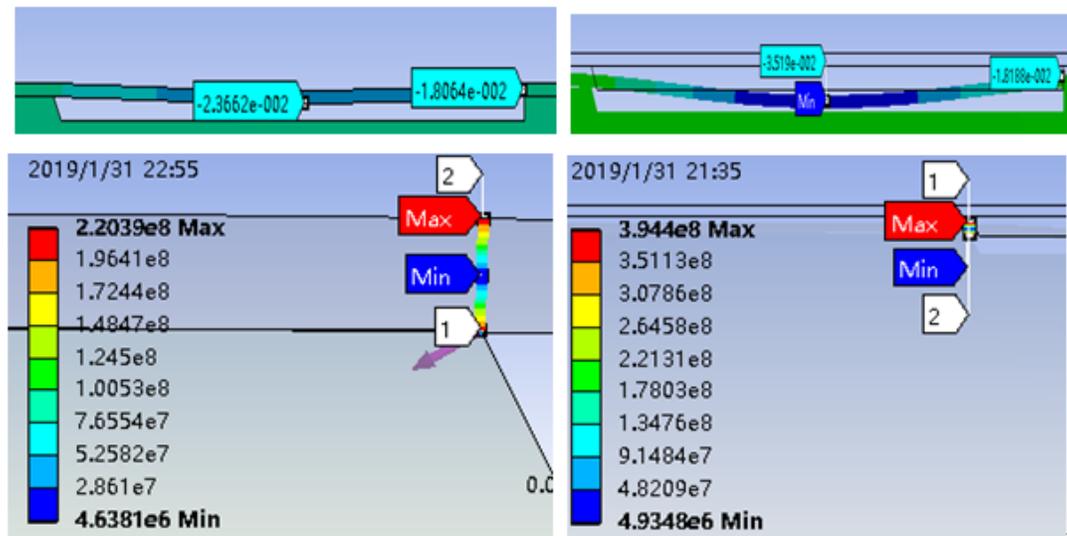


2.2.5 罐底局部脱空分析

◆ 罐底局部脱空危害大

1 罐底中幅板与基础局部脱空，中幅板较薄，脱空时应力变化很大。应严格控制其与基础的脱空范围和间隙尺寸。

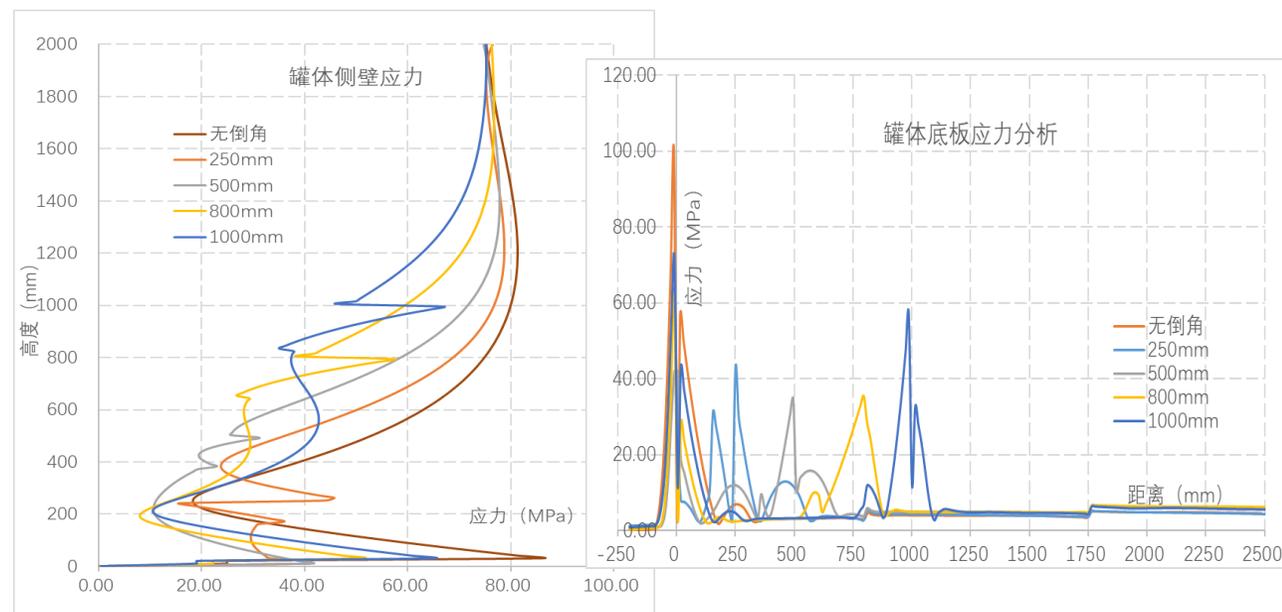
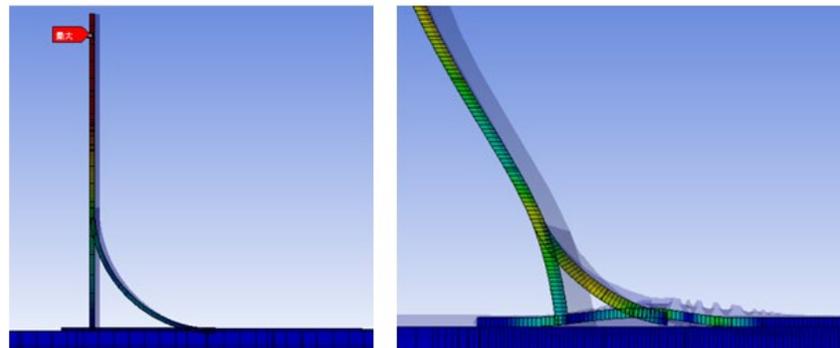
2 罐底中幅板常起坡约1.5%，起坡点处中幅板有局部拱起趋势，应力较大，形成安全隐患。



2.2.6 分叉壁

◆ 储罐在底部结构不连续，是应力和变形突变风险高发部位。当对储罐底部T型接头处内侧焊接倒角钢板形成分叉壁，可显著改善上述问题

- 1 在分叉连接处，局部变形和应力均有突变。
- 2 竖壁变形呈减小趋势，底板变形先增大，后减小。
- 3 适度倒角可使T形部位峰值应力下降，安全性显著提高。



2.2.7 保温

◆ 储罐由于基础散热量大，根据储罐温降每天不大于 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 的控制要求，罐壁保温层热流损失宜比现有标准降低。

1 《火力发电厂保温油漆设计规程》DL/T5072-2019给出允许热流量限值如右表，建议值分别取 102 和 $133\text{W}/\text{m}^2$ ，

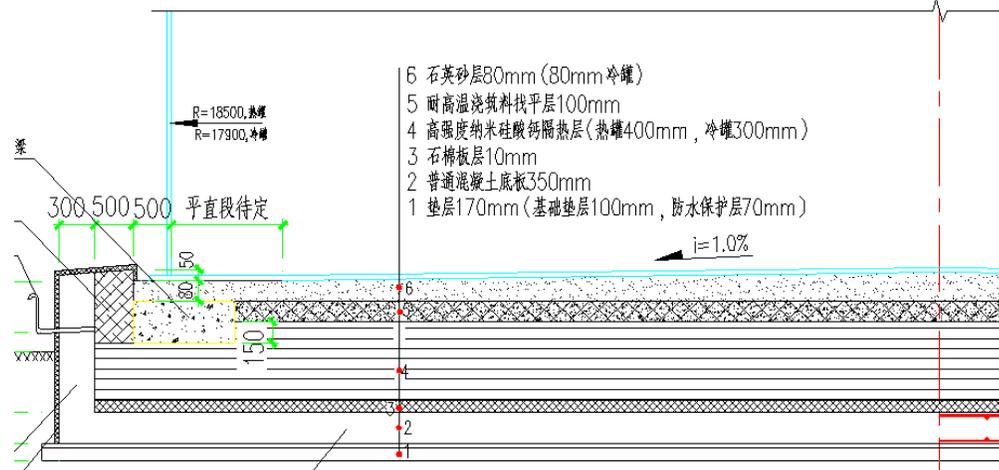
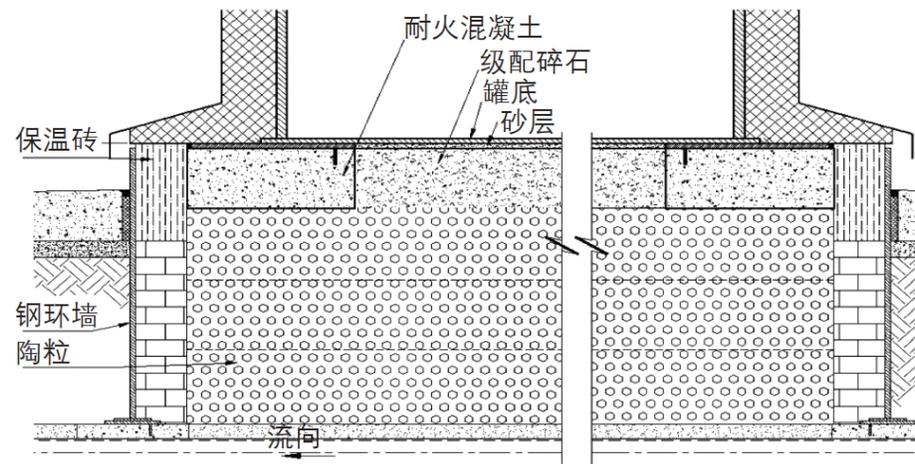
表 5.5-1 允许热流量^ρ

| 设备和管道外表面温度 t ($^{\circ}\text{C}$) ^ρ | 绝热层表面最大允许热损失量 (Q) W/m^2 ^ρ | |
|--|--|-------------------|
| | 常年运行 ^ρ | 季节运行 ^ρ |
| 50 ^ρ | 52 ^ρ | 104 ^ρ |
| 100 ^ρ | 84 ^ρ | 147 ^ρ |
| 150 ^ρ | 104 ^ρ | 183 ^ρ |
| 200 ^ρ | 126 ^ρ | 220 ^ρ |
| 250 ^ρ | 147 ^ρ | 251 ^ρ |
| 300 ^ρ | 167 ^ρ | 272 ^ρ |
| 350 ^ρ | 188 ^ρ | ↔ ^ρ |
| 400 ^ρ | 204 ^ρ | ↔ ^ρ |
| 450 ^ρ | 220 ^ρ | ↔ ^ρ |
| 500 ^ρ | 236 ^ρ | ↔ ^ρ |
| 550 ^ρ | 251 ^ρ | ↔ ^ρ |
| 600 ^ρ | 266 ^ρ | ↔ ^ρ |

2.2.8 储罐基础

◆ 储罐基础常为外环墙形式。基础构造从上到下：
砂层、褥垫层、找平层、绝热层（有侧限的陶粒土和块状绝热材料等）、混凝土基础或级配砂石垫层（含通风管）、地基。侧向为钢板环墙、隔热耐火砖等。

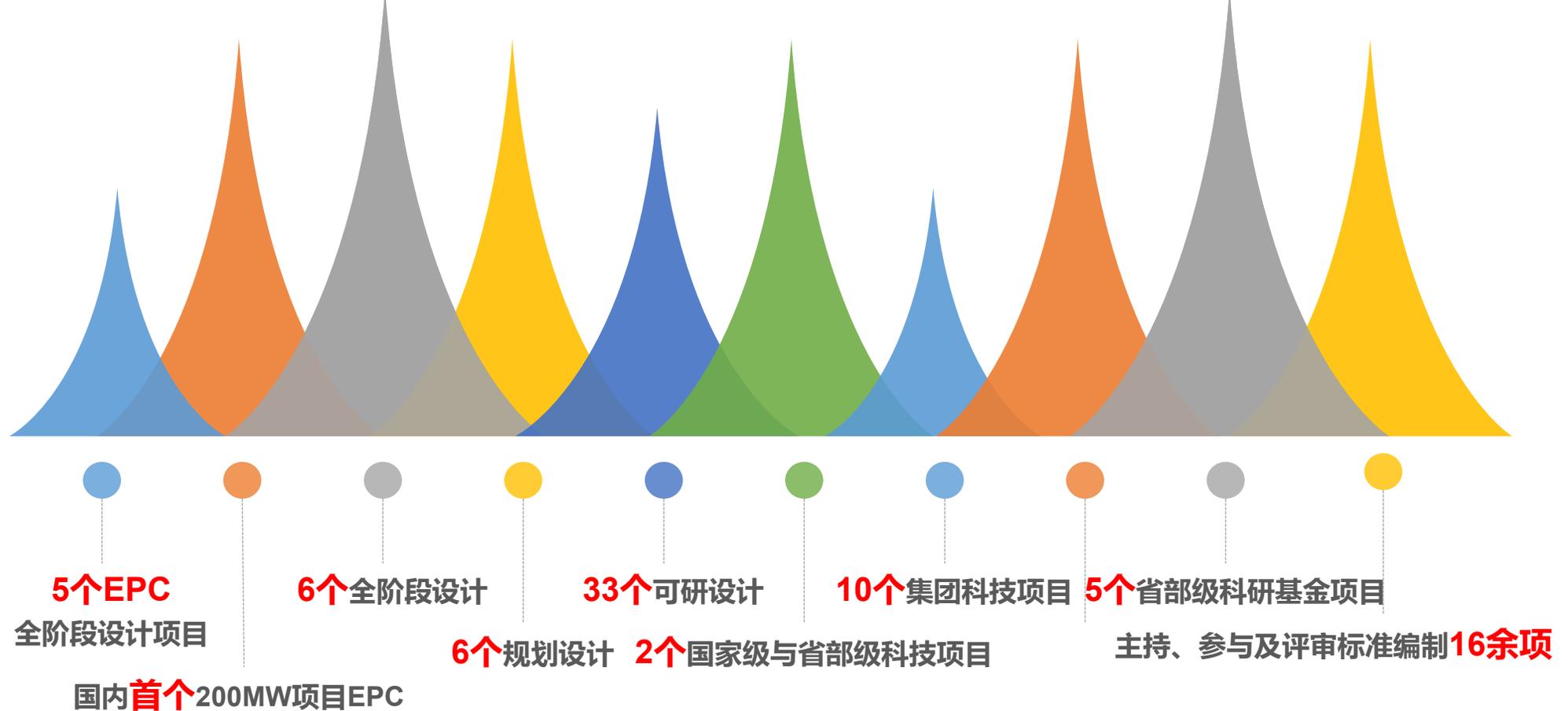
- 1 陶粒绝热层耐候性好，压实检测复杂
- 2 板材类绝热层，环境要求高，砌筑施工
- 3 基础自然通风与强制通风，建议强制通风
- 4 降摩擦措施：铺设钢板、砂类等，提高表面平整度，避免不均匀沉降。





工程实践

中电建西北院深入研究太阳能热发电技术、“风光热储”多能互补、“源网荷储”一体化等前沿技术，积极参与西部地区新能源开发。先后承担了**5个**EPC项目、**6个**全阶段设计、**国内首个**200MW项目EPC、**33个**可研设计、**2个**国家级与省部级科技项目、**10个**集团科技项目和**5个**省部级科研基金项目，积极主持、参与及评审标准编制**16项**。



主要业绩

□ 国电投哈密北90万千瓦光伏发电加10万千瓦光热发电项目：可研

□ 国家能源集团敦煌“光热+”项目100MW熔盐线性菲涅尔光热项目工程：全阶段设计

□ 某军民融合综合能源供给项目：全阶段设计

□ 甘肃光热+项目：可研

□ 魏家峁电厂#1高温蒸汽熔盐储热示范工程：施工图

□ 吉西鲁固直流外送项目：预可研阶段

□ 冀中能源井矿集团塞北“农光互补”光热供汽项目：全阶段设计

□ 拉萨柳梧新区1MW菲涅尔式聚光太阳能供热发电示范项目：全阶段设计。

□ 国投那曲市色尼250MW光伏+50MW光热一体化项目：可研

□ 西藏华电那曲色尼区170MW光伏光热一体化项目工程：可研

□ 济宁华源熔盐储热调峰项目：初步设计

□ 江苏国信靖江发电有限公司熔盐储热调峰、供汽项目：全阶段

□ 广州粤泷发电有限责任公司熔盐储能调峰供热灵活性改造项目：可研

□ 中广核新能源青海德令哈光储热一体化200万千瓦（光热20万千瓦）：EPC

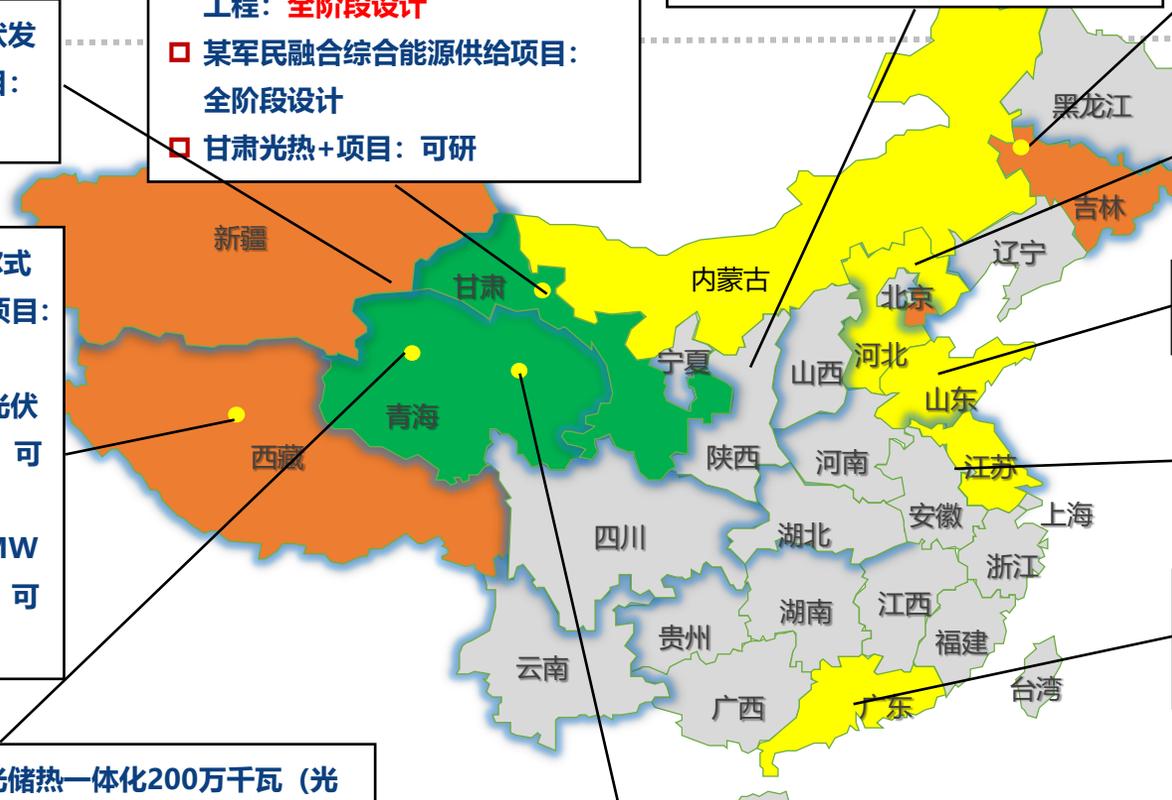
□ 青海戈壁、沙漠大基地项目：可研阶段

□ 中电建西北院青海共和50MW塔式光热发电项目：全阶段设计+EPC

□ 中电建共和100万千瓦光伏光热项目工程（大基地二期）：EPC

□ 青海青豫直流二期3标段1000MW光伏光热项目：EPC

□ 海南青豫直流二期10万千瓦光热项目：EPC



截止2023年底，中电建西北院完成的光热发电可行性研究设计总装机容量超过400万千瓦，勘察设计阶段工程业绩的总装机容量达75万千瓦，其中EPC工程容量达到55万千瓦，业绩居国内前列。

项目名称

- 100MW光热项目EPC总承包工程

建设规模

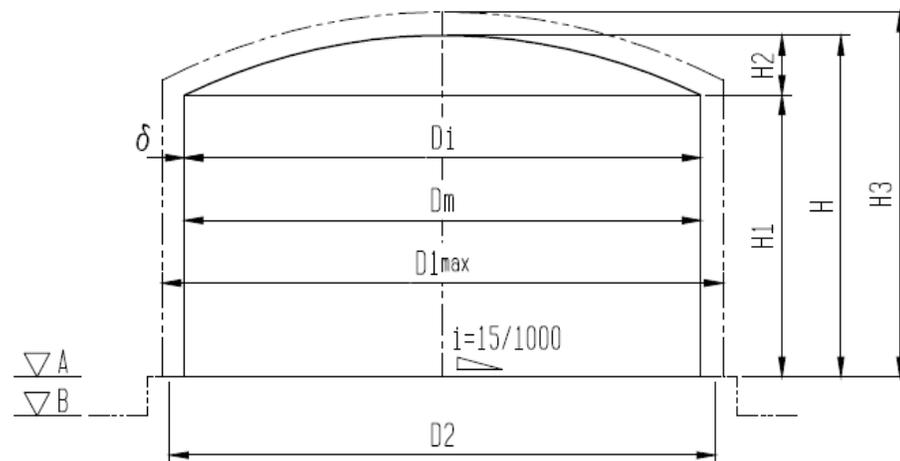
- 新建1×100MW熔盐塔式光热电站
- 配置12h熔盐储热

储罐特征

- 热罐：内径37m，壁高15m，设计温度575℃，有效容量16120m³
- 冷罐：内径35.8m，壁高15m，设计温度400℃，有效容量15093m³

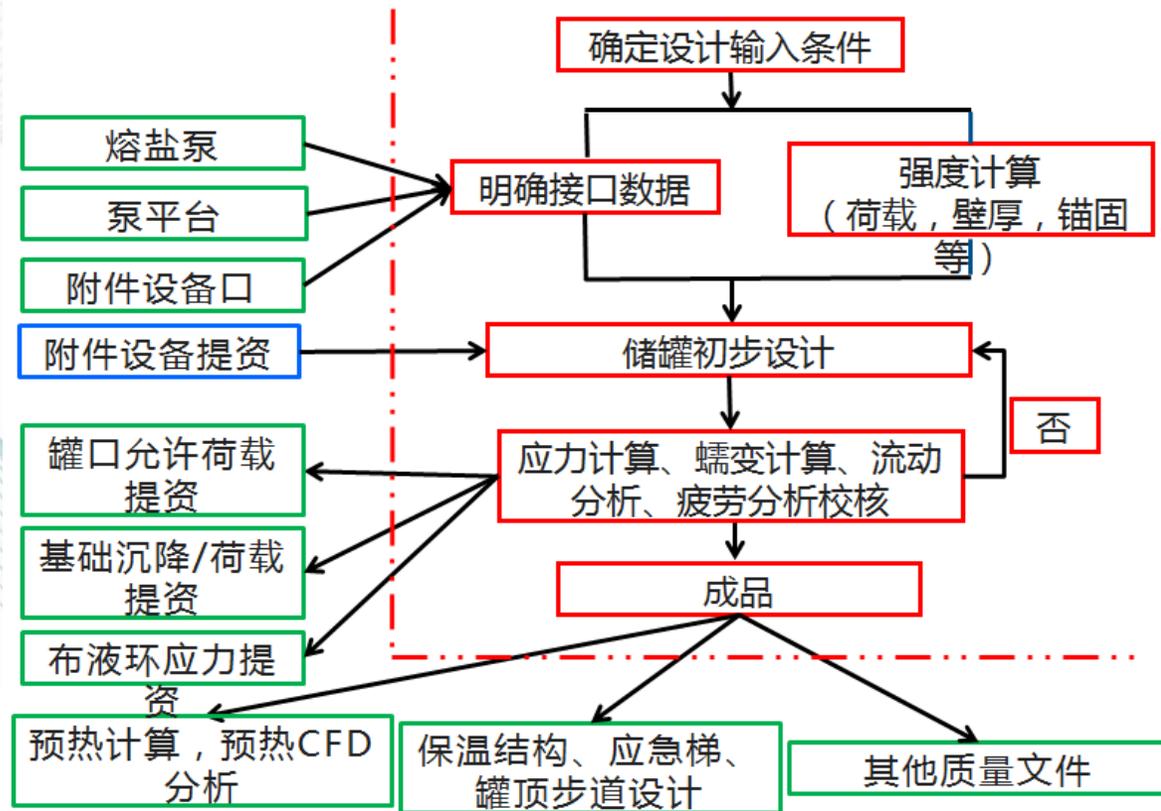
设计等级

- 储罐抗震设防类别：丙类（容积小于5万立方）
- 结构安全等级：二级，结构重要性系数 $\gamma_0=1.0$
- 设计工作年限：30年



储罐设计规范及流程

熔盐储罐的设计制造，国内主要参考《压力容器》GB150、《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB50341-2014。
国外主要参考《钢制焊接石油储罐》API650、《压力容器》ASME BPVC VIII-1 卷（常规设计）和II卷（分析设计）。



熔盐储罐

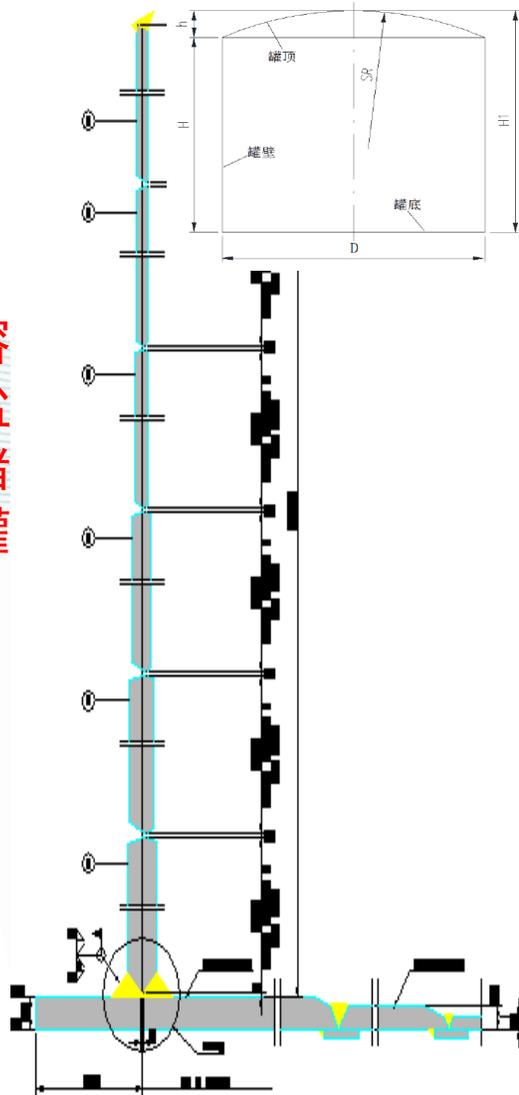


表 2.2 冷罐设备本体材料特征

| 部位 | 材料 | 钢板宽 (m) | 钢板厚 (mm) | 冷态内半径 (m) | 热态中半径/壁高 (m) |
|----|-------|---------|----------|------------|--------------|
| 壁板 | Q345R | 2.5 | 12 | 17.9 | 18017/2.513 |
| | Q345R | 2.5 | 16 | 17.9 | |
| | Q345R | 2.5 | 24 | 17.9 | |
| | Q345R | 2.5 | 31 | 17.9 | |
| | Q345R | 2.5 | 39 | 17.9 | |
| | Q345R | 2.5 | 48 | 17.9 | |
| 底板 | Q345R | 1.25 | 39 | | |
| | Q345R | 1.25 | 24 | | |
| | Q345R | | 11 | | |
| 顶板 | Q345R | | 8 | 40.2/4.215 | |

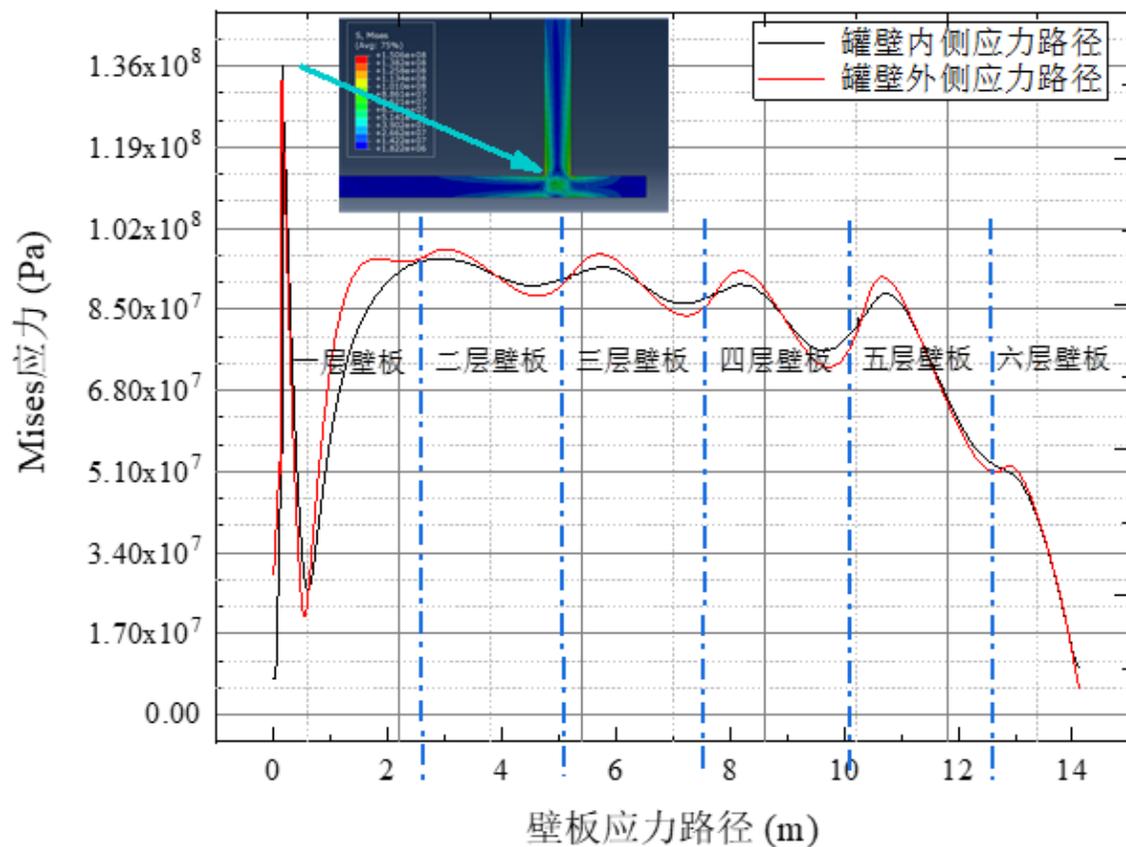
表 2.3 热罐设备本体材料特征

| 部位 | 材料 | 钢板宽 (m) | 钢板厚 (mm) | 冷态内半径 (m) | 热态中半径/壁高 (m) |
|----|------|---------|----------|------------|--------------|
| 壁板 | 347H | 2.5 | 12 | 18.5 | 18.72/2.525 |
| | 347H | 2.5 | 15 | 18.5 | |
| | 347H | 2.5 | 25 | 18.5 | |
| | 347H | 2.5 | 35 | 18.5 | |
| | 347H | 2.5 | 45 | 18.5 | |
| | 347H | 2.5 | 54 | 18.5 | |
| 底板 | 347H | 1.25 | 45 | | |
| | 347H | 1.25 | 26 | | |
| | 347H | | 10 | | |
| 顶板 | 347H | | 6 | 42.8/4.214 | |

| 序号 | 项目 | 单位 | 参数 | | 备注 |
|----|--------|----------------|---------|------------|----|
| | | | 低温罐 | 高温罐 | |
| 1 | 公称容积 | m ³ | 15099 | 16128 | 冷态 |
| 2 | 有效容积 | m ³ | 13974 | 14951 | 冷态 |
| 3 | 最小残留容积 | m ³ | 905.94 | 752.65 | 冷态 |
| 4 | 内直径 | m | 35.8 | 37.0 | 冷态 |
| 5 | 直壁高度 | m | 15 | 15 | |
| 6 | 保温材料 | | 硅酸铝+岩棉 | 硅酸铝+岩棉 | |
| 5 | 保温材料厚度 | mm | 200+200 | 400+400 | |
| 6 | 罐体材质 | | Q345R | SA240 347H | |
| 7 | 操作温度 | °C | 290 | 565 | |
| 8 | 设计温度 | °C | 400 | 575 | |
| 9 | 操作压力 | bar | ATM | ATM | |
| 10 | 设计压力 | bar | ≤0.02 | ≤0.02 | |
| 11 | 操作液位 | | | | |
| 12 | 最低操作液位 | m | 0.9 | 0.7 | |
| 13 | 最高操作液位 | m | 13.65 | 13.65 | |
| 14 | RT检测 | % | 100% | 100% | |
| 15 | 形式 | | 立式圆筒形 | 立式圆筒形 | |
| 16 | 罐顶类型 | | 自支撑 | 自支撑 | |

- Q345R: $[\sigma]=117/125$,
- 罐底焊缝系数0.85 $[\sigma]=99.5$
- 罐壁焊缝系数0.9 $[\sigma]=105.3/112.5$,
- 设计液位按**14.15m**计算
- 由于储罐整体结构呈现轴对称特征, 因此选用平面实体轴对称单元建立储罐整体结构有限元模型。
- 储罐热力耦合计算采用完全耦合分析方法。
- 罐底板与混凝土基础之间设置摩擦接触, 摩擦系数取0.5进行计算。

| | 板厚 | 抗拉强度 S_T MPa | 屈服强度 S_y MPa | 弹性模量 E GPa | 蠕变强度 S_c MPa | 屈服/最大许用应力 MPa | | 平均线膨胀系数 10^{-6} (20-400°C) | 腐蚀速率 $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ | 弹性模量 GPa | |
|-------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------------|---------|------------------------------------|---|-------------|-------|
| | | | | | | 400°C | 300°C | | | 400°C | 300°C |
| Q345R | 3~16 | 510 | 345 | 201 | | 200/125 (101) | 230/153 | 13.58 | | 170 | 183 |
| | 16~36 | 500 | 325 | | | 190/125 | 215/143 | | | | |
| | 36~60 | 490 | 315 | | | 175/117 | 200/133 | | | | |



图·3-6·冷罐罐体壁板应力路径图

➤ 底板



底板铺设



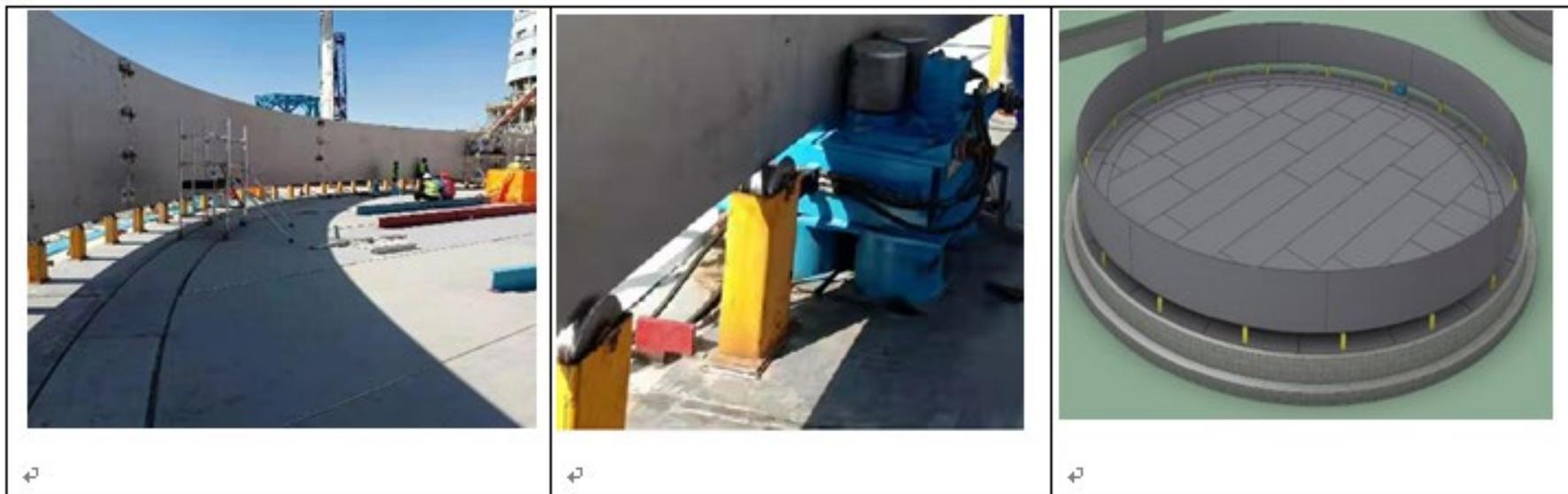
保温板铺设

➤ 底板



底板整体架空式施工

- 拼装 在底板圆周均匀放置底部滚动装置，利用底部滚动支撑和液压对口。



倒装提升法施工

➤ 罐顶

熔盐储罐的设计制造
仍需各位同仁共同努力。



两种肋环形罐顶结构

诚信为先 创新为魂 共赢为本
Integrity Innovation All-Win



中国电建
POWERCHINA

西北勘测设计研究院有限公司
NORTHWEST ENGINEERING CORPORATION LIMITED



谢谢

本报告引用的图片资料来源于网络等，仅供技术交流