

引文格式:孙嘉伟,杜保存,雷勇刚,等.特殊进盐工况下高温熔盐储热罐的动态热-机械性能研究[J].太原理工大学学报,2026,57(2):417-424.

SUN Jiawei, DU Baocun, LEI Yonggang, et al. Dynamic thermal-mechanical property of high temperature molten salt storage tank under special filling conditions[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(2):417-424.

特殊进盐工况下高温熔盐储热罐的动态热-机械性能研究

孙嘉伟,杜保存,雷勇刚,贾凡

(太原理工大学 土木工程学院,山西 太原)

摘要:【目的】长时储热型高温熔盐储热罐在运行过程中易产生失效泄漏现象。【方法】本文基于有限容积法和有限元法建立综合考虑复杂耦合换热与液位波动变化等因素的热-力耦合数值模型,并进行可靠性验证,探究首次进盐与低温进盐两种特殊工况下储热罐热与机械性能的动态变化规律。【结果】结果显示:两种进盐工况下罐壁面整体温度分布极不均匀,进盐过程中沿罐高方向温度梯度均呈先增大后趋于稳定的趋势,且均超过设计允许值,建议提高罐体预热温度、降低进盐温度(首次进盐工况)或设置辅助电极熔盐加热炉(低温进盐工况)以改善罐体温度均匀性;罐体峰值应力受壁面温差影响显著,进盐过程中应力水平逐渐降低,但两种工况下的角焊缝位置仍存在3.6~4.5 h的塑性损伤现象,为降低罐体峰值应力水平,建议在壁板与底板连接区域添加耐高温型隔热材料以降低壁面温差,进而提高罐体安全性能。

关键词:熔盐;储热罐;温度梯度;应力

中图分类号:TK 513.5 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20230811

文章编号:1007-9432(2026)02-0417-08

Dynamic Thermal-Mechanical Property of High Temperature Molten Salt Storage Tank under Special Filling Conditions

SUN Jiawei, DU Baocun, LEI Yonggang, JIA Fan

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract:【Purposes】 This research is conducted to address the molten salt leakage phenomenon in the high temperature storage tank during operation. 【Methods】 A coupled thermal-mechanical numerical model based on finite volume method and finite element method was developed and validated with considering of the complex coupling heat transfer and liquid level fluctuation, and the dynamic thermal and mechanical properties of storage tank under two special conditions of first filling and low-temperature filling were numerically studied. 【Results】 The results show that a non-uniform temperature distribution occurs on tank wall, and the temperature gradient along height direction exceeds the allowable value and shows a sharp rise then stabilization tendency. To improve the temperature unifor-

收稿日期:2023-12-27;修回日期:2024-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51906172);山西省科技合作交流专项项目(202104041101027);山西省科技创新重点人才团队项目(202304051001011);山西省基础研究计划资助项目(202303021221021)

第一作者:孙嘉伟,硕士,(E-mail)732061233@qq.com

通信作者:雷勇刚,教授,博士生导师,主要从事热量高效传递与储热、供热管网与节能、通风空调气流组织等研究,(E-mail)leiyonggang@tyut.edu.cn

mity of tank wall, the methods of increasing the preheating temperature, reducing the salt filling temperature (first filling condition), or setting the auxiliary electrode salt heating furnace (low-temperature filling condition) are suggested in operations. The peak stress of storage tank is significantly affected by the temperature difference between wallboard and baseplate, which gradually decreases during filling process. However, 3.6~4.5 h of plastic damage phenomena still exist on fillet weld with the adopted special filling conditions. In order to reduce the peak stress level of storage tank, it is suggested that thermal insulating materials should be added in the connection area between wallboard and baseplate to reduce temperature difference and improve safety performance.

Keywords: molten salt; storage tank; temperature gradient; stress

双罐熔盐储热技术是一种可实现大容量(MWh~10 GWh)与长时间蓄能(>12 h)的能量存储方式,其通过绿电、谷电、蒸汽等加热熔盐以存储可再生能源或低谷电能,从而促进新能源消纳、提升电网灵活性^[1]。目前熔盐储热技术已广泛应用于光热电站、风光热互补基地、火电机组灵活性改造、园区供汽与供热等领域。熔盐储热罐是储能系统的核心部件^[2],其中,冷-热流体的独立存储方式可有效避免斜温层,储热效率更高,应用前景最为广阔。然而,熔盐储罐在储-放热过程中存在高温(400~565 °C)、波动静水压力与应力集中等因素导致的动态损伤失效泄漏现象,给系统安全运行带来极大挑战。据报道,在多损伤因素协同作用下,如西班牙 GemaSolar 与美国 Crescent Dunes 塔式光热电站的熔盐储罐均产生了熔盐泄漏事故,并造成了较大经济损失^[3]。

近年来研究人员针对熔盐储罐应力特性开展了大量研究工作。针对双罐系统中的高温熔盐储罐, WAN 等^[4]利用有限元法探究了基础刚度、液位高度等因素对罐体力学性能的影响;张晓明等^[5]通过建立二维静力学模型,研究了边缘板厚度、外伸长度等结构参数对应力的影响;同时,王昕^[6]与 ZENG 等^[7]通过建立三维储罐数值模型,对不同载荷工况下的罐体进行了应力分析与蠕变-疲劳评定;特别地,蔡君等^[8]对储罐在正常和异常工况下进行了棘轮失效分析和寿命评估;此外,针对单罐填充床储热结构, DU 等^[9-10]构建了适用于分析填充床罐体动态蠕变与应力特性的数值方法,并提出了一种具有低蠕变损伤时间和应力水平的双层储热结构。

目前针对高温熔盐储罐机械性能的研究多针对正常储-放热工况且在给定罐体壁面温度条件下开展应力分析。一方面,给定的壁面温度并未考虑罐体内复杂导热-对流耦合换热过程,研究结果无法准确反映罐体真实温度与应力的动态变化情况;

另一方面,已有研究缺乏针对罐体预热后首次进盐、云层遮挡条件下低温熔盐进罐等特殊进盐工况开展高温与波动静水压力等因素协同作用的动态热-机械性能研究。为此,本文以某 50 MWe 塔式光热电站中的高温熔盐储罐为研究对象,基于有限容积法和有限元法建立综合考虑复杂耦合换热过程与液位波动变化等因素的热-力耦合数值模型,并进行可靠性验证。接着,模拟研究 2 种特殊进盐工况下高温熔盐储罐热与机械性能的动态变化规律,研究结果可为实际工程中优化熔盐储罐进盐方法提供参考。

1 计算模型

以某 50 MWe 塔式电站中储热时长 8.5 h 的高温熔盐储罐为研究对象,如图 1 所示。模型中综合考虑了变厚度壁板、角焊缝、底板等真实结构,储热介质选用光热电站常用的太阳盐(质量分数 60% NaNO₃ 和 40% KNO₃)^[9],罐体材料选取常用的 347H 不锈钢,焊缝材料选用同等级强度的 TFW-347H 焊丝,保温材料选用硅酸铝岩棉,具体结构参数见表 1,物性参数见表 2。其中,347H 不锈钢按变物性考虑,其线性膨胀系数($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)、弹性模量(GPa)与屈服强度(MPa)见公式(1)~(3)^[11]。

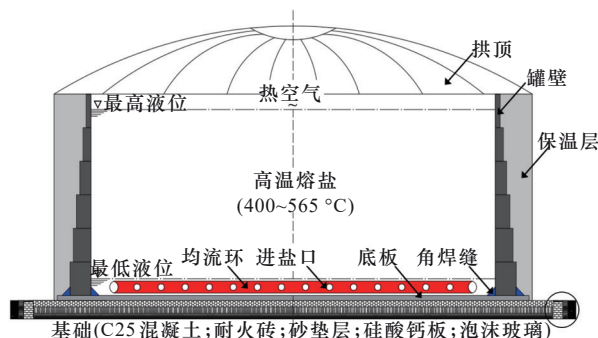


图 1 高温熔盐储罐结构示意图

Fig.1 Structural diagram of molten salt tank

$$\alpha(T) = 15.258 + 0.00859T - 1.456 \times 10^{-5}T^2 + 1.709 \times 10^{-8}T^3. \quad (1)$$

$$E(T) = 205.986 - 0.0852T - 1.468 \times 10^{-5}T^2 + 1.896 \times 10^{-8}T^3. \quad (2)$$

$$\sigma_s(T) = 218.473 - 0.329T + 3.365 \times 10^{-4}T^2 + 5.497 \times 10^{-9}T^3. \quad (3)$$

表1 熔盐储罐结构参数

Table 1 Structure parameters of molten salt tank

参数	数值
储罐内径/m	25.2
储罐高度/m	12
最高液位/m	11.7
最低液位/m	1.0
拱顶厚度/mm	8.0
拱顶保温层厚度/mm	400
壁板:1~6高度/m	2.0,2.0,2.0,2.0,2.0,2.0
壁板:1~6厚度/mm	10,10,16,20,24,30
角焊缝尺寸/mm	13
底板厚度/mm	22
边缘板长度/mm	160

表2 材料物性参数

Table 2 Physical parameters of materials

物理量	太阳盐	347H	保温
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 090.095 4-0.636T/°C	7 980	350
$c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 443.025 8-0.172T/°C	470	960
$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.443+1.9×10 ⁻⁴ T/°C	20.2	0.1

2 数值方法

建立二维、轴对称、瞬态热分析模型,计算区域如图2所示。为简化计算,作如下假设:1)熔盐是层流且不可压缩的流态;2)计算区域进出口的流速分布均匀;3)忽略罐体表面的辐射热损失;相应控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0. \quad (4)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = F_b - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 V. \quad (5)$$

能量守恒方程:

$$\rho \frac{dU}{dt} = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \nabla V + \Phi. \quad (6)$$

式中, V 为流体的速度矢量; F_b 为流体体积力; p 为压力; q 为热量; ρ 为密度; μ 为动力黏度; T 为温度; k

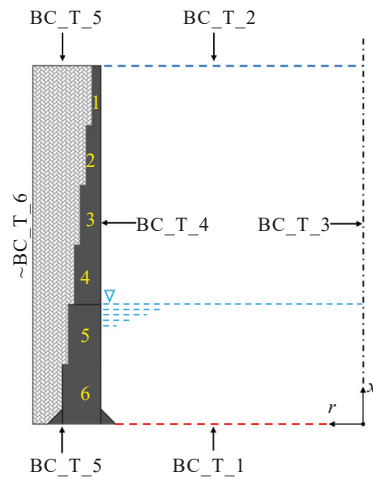


图2 热分析计算区域

Fig.2 Calculation region of thermal analysis

为热传导系数; U 为单位质量流体内能; Φ 为剪切黏性生热量。

流动换热分析中采用的边界条件如表3所示。采用有限容积法对流动换热控制方程进行求解时,连续性方程选用VOF多相流模型求解,压力-速度耦合方程采用SIMPLEC算法求解,动量与能量方程采用二阶迎风格式进行求解。

表3 流动换热分析的边界条件

Table 3 Boundary conditions of thermal analysis

边界名称	边界条件
BC_T_1, (0≤r≤D/2, x=0)	速度入口, $u_{in}=0.00035 \text{ m/s}$, $T_{in}=838/673 \text{ K}$
BC_T_2, (0≤r≤D/2, x=H)	自由出流边界
BC_T_3, (r=0, 0≤x≤H)	轴对称边界
BC_T_4, (r=D/2, 0≤x≤H)	无滑移边界
BC_T_5, (D/2≤r≤D/2+δ _w +δ _{ins} , x=0, x=H)	绝热边界
BC_T_6, (r=D/2+δ _w +δ _{ins} , 0≤x≤H)	对流换热边界, $T_a=298 \text{ K}$, $h_a=12.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

为准确反映罐体应力特性,构建考虑变壁厚壁板、底板以及大角焊缝等真实结构的三维罐体应力分析模型,计算区域如图3所示。相应控制方程如下^[9]:

本构方程:

$$\epsilon_{x_i} = \frac{1}{E} (\sigma_{x_i} - \nu \cdot \Theta) + \alpha \Delta T. \quad (7)$$

位移方程:

$$(\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + G \cdot \nabla^2 u_i - \frac{\alpha E}{1 - 2\nu} \frac{\partial (\Delta T)}{\partial x_i} = 0. \quad (8)$$

几何方程:

$$\epsilon_{x_i} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{9}$$

应变协调方程:

$$\nabla^2 \sigma_{x_i} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i^2} = -\alpha E \left[\frac{1}{1-\nu} \nabla^2 (\Delta T) + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 (\Delta T)}{\partial x_i^2} \right] \tag{10}$$

式中, ΔT 表示内/外壁的温度梯度, G 和 λ 为剪切弹性模量和拉梅常数。 Θ 为体积应力, θ 为体积应变。

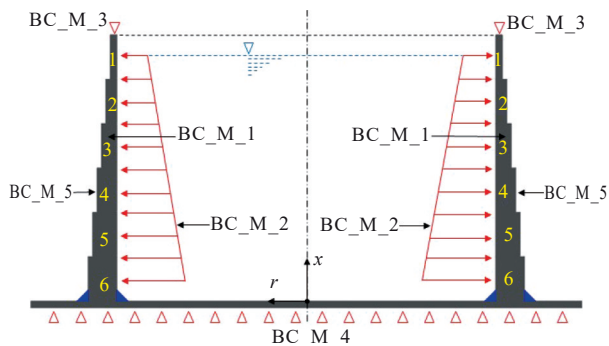


图 3 应力分析计算区域

Fig.3 Calculation region of stress analysis

应力分析采用的边界条件如表 4 所示。

表 4 应力分析边界条件

Table 4 Boundary conditions of stress analysis

边界名称	边界条件
BC_M_1, ($D/2 \leq r \leq D/2 + \delta_w$, $-D/2 - \delta_w \leq r \leq -D/2$, $0 \leq x \leq H$)	温度载荷
BC_M_2, ($r = \pm D/2$, $0 \leq x \leq H$)	熔盐静压载荷
BC_M_3, ($D/2 \leq r \leq D/2 + \delta_w$, $-D/2 - \delta_w \leq r \leq -D/2$, $x = H$)	拱顶载荷
BC_M_4, ($-D_b/2 \leq r \leq D_b/2$, $x = -\delta_b$)	x 方向的位移约束
BC_M_5, ($r = \pm (D/2 + \delta_w)$, $0 \leq x \leq H$)	自由约束

对热分析和应力分析模型进行了时间步长和网格独立性考核。选取 1 s 为迭代时间步长进行流动换热与应力性能分析时,控制方程的收敛残差小于 10^{-4} 数量级;热分析与应力分析网格数分别为 251,520 和 321,486 时,可获得独立解。

为验证本文所建立的热-力耦合模型的可靠性,将模拟结果与文献实验值^[12]进行对比分析。针对热分析模型,模拟计算得到的系统热损失为 102.197 kW,与实验值 (102 ± 21 kW) 吻合良好。针对应力分析模型,从图 4 可以看出,随着罐壁温度的增加,储罐形变模拟值与实验值具有较好的一致

性,565℃熔盐环境下二者误差约为 4.14%,说明本文所构建的应力分析模型是可靠的。

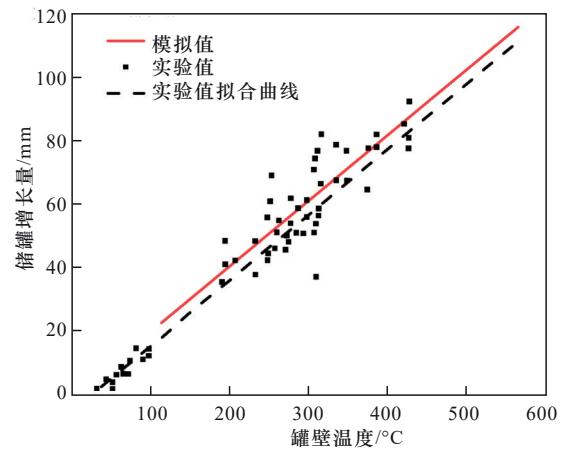


图 4 应力分析模型验证

Fig.4 Model validation of stress analysis

3 结果与讨论

本文首先基于有限容积法模拟获得罐体壁面的动态温度分布;进一步通过节点插值法将二维动态温度场旋转映射至三维储罐数值模型中;最后,基于有限元法模拟获得罐体应力的动态分布与变化规律。

3.1 首次进盐工况

熔盐储罐初次投运时,为降低罐体热应力并避免出现熔盐凝固现象,需提前使用电伴热或热空气将罐体预热至 330℃,再将 565℃高温熔盐注入罐内,并经 8.5 h 后完成首次进盐过程。

图 5 和图 6 分别给出了壁面温度的动态分布云图以及平均温度和温度梯度随进盐时间的变化情况。可以看出,首次进盐过程中,在导热与对流换热作用下,罐体壁面被高温熔盐加热后平均温度逐渐升高,且沿罐体高度方向产生了较大的温度梯度。同时,壁面温度梯度呈先增大后趋于稳定的变化趋势,且梯度值远高于罐壁温差最大允许值 25℃^[13],给罐体安全运行造成较大隐患。针对该进盐工况存在的壁面温度梯度较高的现象,可通过提升罐体预热温度或降低进盐温度等方法,以保证壁面整体的温度均匀性。

图 7 给出了首次进盐工况下罐体等效应力的动态分布云图。可以看出,由于壁面与底板相连角焊缝区域存在结构不连续性与热膨胀量无法释放,从而导致该位置易产生应力集中现象。此外,图 8 也给出了沿罐高方向的壁面应力与罐体平均应力随时间的变化情况。可以看到,在进盐过程中罐体平

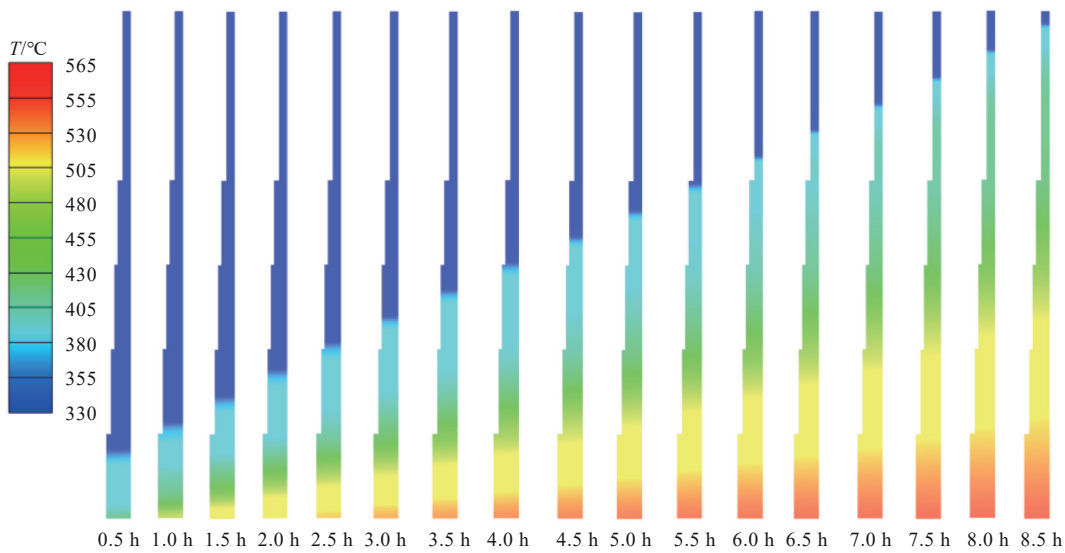


图5 罐体壁面随充盐时间变化下的动态温度分布

Fig.5 Dynamic temperature distributions of wall with the first filling condition

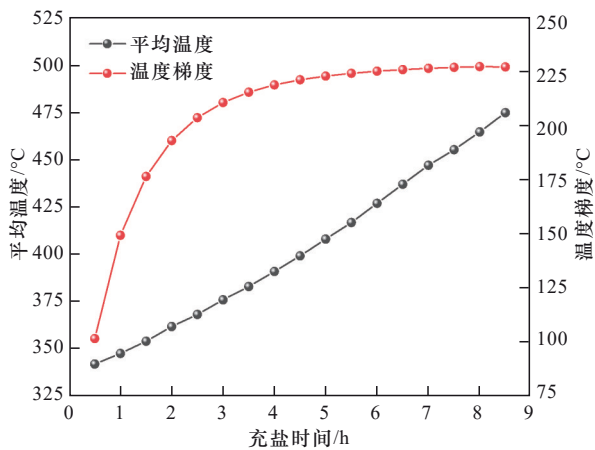


图6 壁面平均温度及温度梯度随时间变化情况

Fig.6 Variations of average temperature and temperature gradient with time

罐体又恢复至低应力水平的弹性状态。

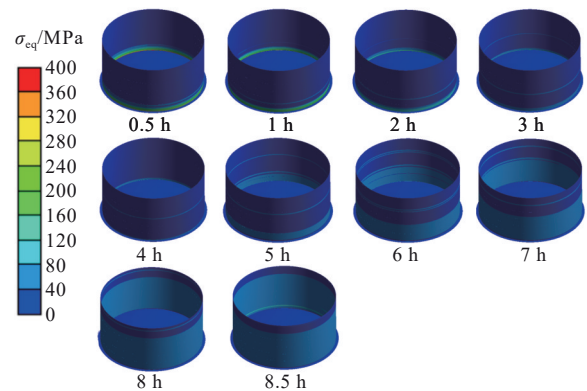


图7 储罐动态应力分布

Fig.7 Dynamic stress distributions of tank

均应力呈先减小后增大的变化趋势。这是由于在进盐初始阶段,角焊缝位置的峰值应力逐渐降低,且大部分壁板应力水平较低,致使罐体平均应力也逐渐降低;随着进盐时间的增加,大部分壁板被高温熔盐加热后应力水平增大,从而导致罐体平均应力又呈增大趋势。

由上可知,进盐过程中罐体温度影响其应力水平。为进一步探究罐体温度对应力影响情况,图9又给出了罐体峰值应力与壁面及底板间温差随时间的变化情况。可以看到,峰值应力受壁面温差影响显著。随着高温熔盐的不断注入,底板与壁板间温差逐渐减小,峰值应力逐渐降低。此外,也可以看出,首次进盐4.5 h内罐体角焊缝区域峰值应力水平高于347H不锈钢材料的屈服强度(139 MPa),致使罐体产生塑性损伤;随着壁面温差逐渐降低,

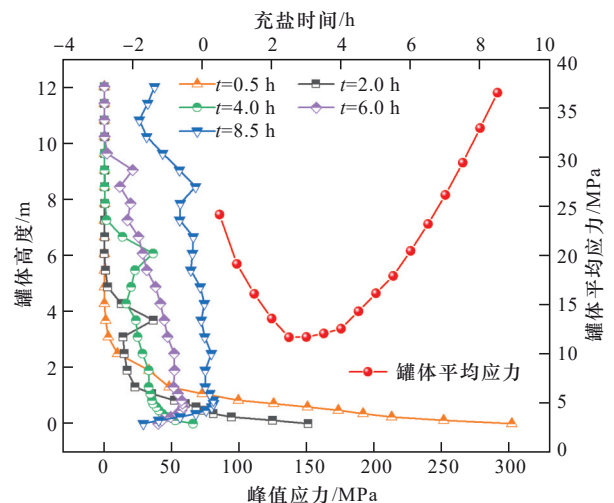


图8 罐体平均应力与沿罐高方向的壁面应力随时间变化情况

Fig.8 Variations of average stress and stress along height direction with time

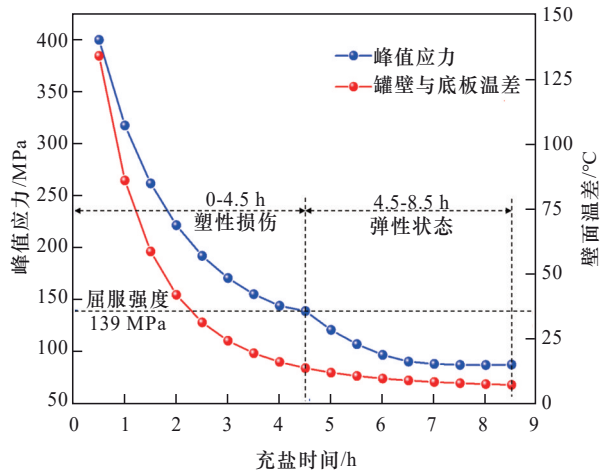


图9 罐体峰值应力与壁面温差随时间变化情况

Fig.9 Variations of peak stress and temperature difference of storage tank with time

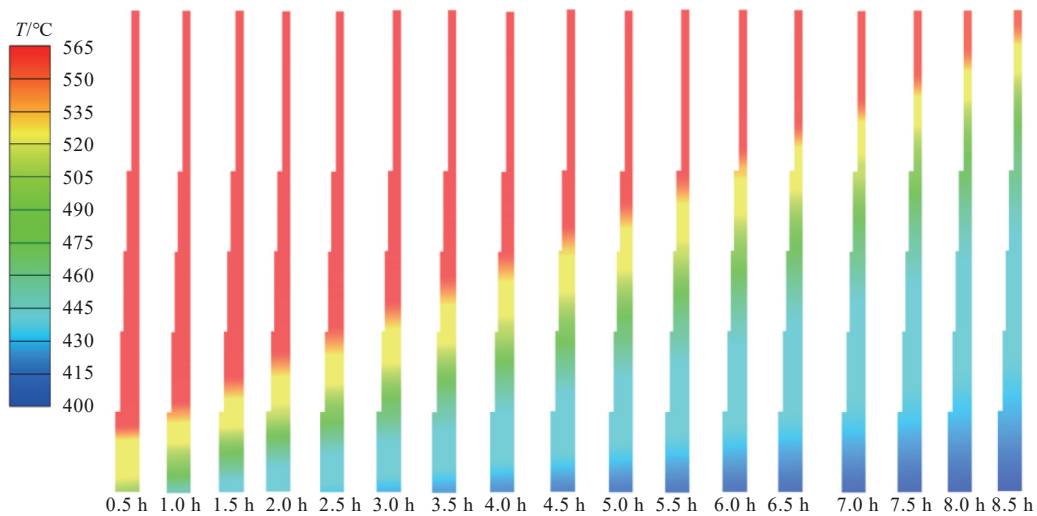


图10 罐体壁面随充盐时间变化下的动态温度分布

Fig.10 Dynamic temperature distributions of wall with the low-temperature filling condition

图12与13分别给出了罐体应力的动态分布云图以及沿罐高方向的壁面应力与罐体平均应力随时间的变化情况。可以看出,罐体角焊缝区域与底板以及大部分壁板存在应力水平相差较大的现象。此外,结合图8也可以发现,在低温熔盐注入高温储罐的过程中,罐体平均应力以及壁面沿高度方向应力值相较于首次进盐工况均有所下降。

图14进一步给出了低温进盐过程中罐体峰值应力与壁面及底板间温差的变化情况。可以发现,低温熔盐的直接注入使得罐体壁面与底板连接区域产生了3.6 h的塑性损伤。针对首次进盐工况和低温进盐工况下罐体角焊缝区域存在的长时间塑性损伤现象,可将抗腐蚀、耐高温型隔热材料添加至底板与壁板连接区域,以降低罐体壁面温差和峰

3.2 低温进盐工况

光热电站运行过程中,常存在多云、阴雨等气候条件下熔盐无法被有效加热至设计温度(565 °C),但低温熔盐(400 °C)仍需注入高温储罐(565 °C)的运行工况。为此,本文又进一步探究低温进盐工况下罐体动态热与机械性能的变化情况。

图10与11分别给出了壁面动态温度云图以及罐壁平均温度与温度梯度随时间的变化情况。可以看出,在低温进盐工况下,壁面逐渐被冷却,平均温度下降,罐壁沿高度方向温度梯度呈先升高后保持稳定的变化趋势。针对该运行工况下同样存在较大温度梯度的现象,可通过设置辅助电极熔盐加热炉,如利用风光热互补基地的绿电,将400 °C低温熔盐提前加热至565 °C后再注入高温储罐,以降低壁面温度梯度,保证罐体安全运行。

值应力水平。

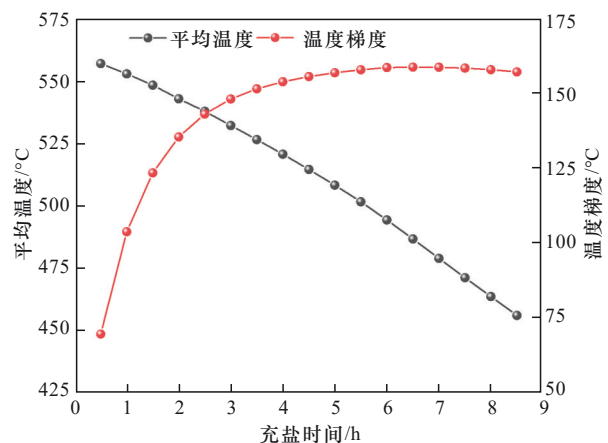


图11 壁面平均温度及温度梯度随时间变化情况

Fig.11 Variations of average temperature and temperature gradient with time

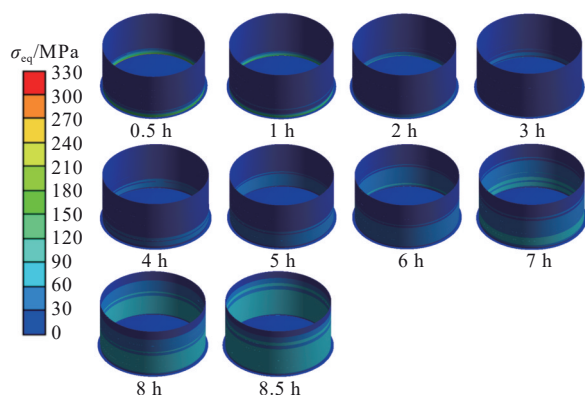


图 12 储罐动态应力分布

Fig.12 Dynamic stress distributions of tank

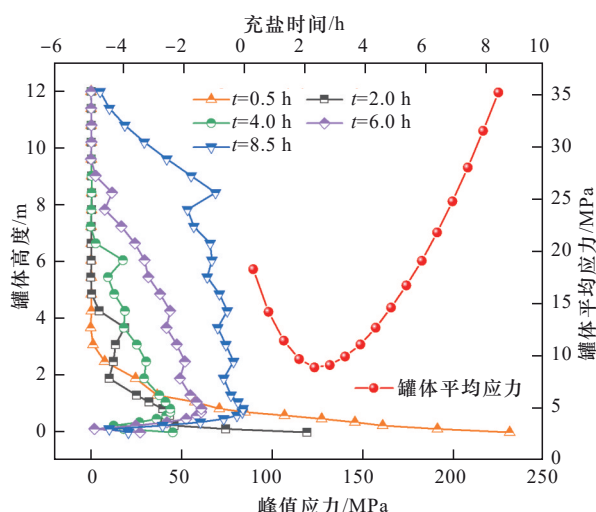


图 13 罐体平均应力与沿罐高方向的壁面应力随时间变化情况

Fig.13 Variations of average stress and stress along height direction with time

4 结论

本文以某 50 MWe 塔式光热电站中高温熔盐储热罐为研究对象,基于有限容积法和有限元法建立了综合考虑复杂耦合换热过程和液位波动变化等因

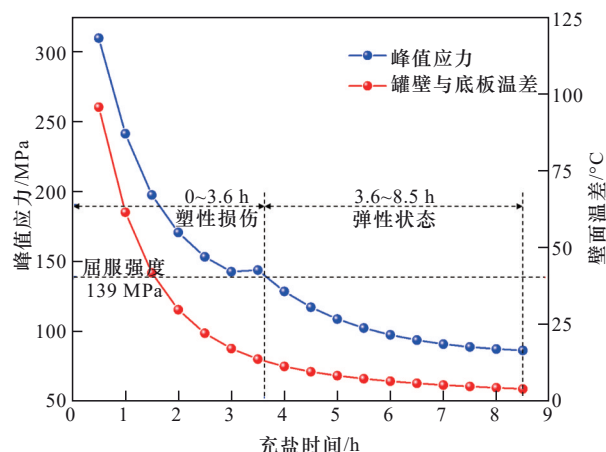


图 14 罐体峰值应力与壁面温差随时间变化情况

Fig.14 Variations of peak stress and temperature difference of storage tank with time

素的热-力耦合模型并进行了可靠性验证,进而探究了首次进盐与低温进盐 2 种特殊工况下储罐热与机械性能的动态变化规律,得到的主要结论如下:

1)首次进盐与低温进盐过程中,储罐壁面温度分布极不均匀,沿罐体高度方向的温度梯度呈先升高后趋于稳定的变化趋势;

2)两种进盐工况下的罐体壁面温度梯度均远高于罐壁温差设计允许值;针对首次进盐工况,建议提高罐体预热温度或降低进盐温度等方式以改善壁面温度分布的均匀性;针对低温进盐工况,建议设置辅助电极熔盐加热炉,利用绿电将 400 °C 低温熔盐加热至 565 °C 后再注入高温储罐,以有效降低壁面温度梯度;

3)罐体壁面温差影响峰值应力水平,进盐过程中应力值逐渐降低,但角焊缝位置仍存在应力集中导致的塑性损伤现象;为降低壁面温差与峰值应力水平,建议将抗腐蚀、耐高温型隔热材料添加至壁板与底板连接区域,以提高熔盐储罐服役寿命。

参考文献:

- [1] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟.2022 中国太阳能热发电行业蓝皮书[R].2023.
- [2] 杜保存,贾凡,郭一帆,等.50 MWe 光热电站填充床储罐的高温蠕变与机械性能研究[J].太原理工大学学报,2023,54(3): 555-561.
DU B C, JIA F, GUO Y F, et al.High temperature creep and mechanical analysis of the packed-bed thermal storage tank in 50 MWe solar power plant[J].Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(3): 555-561.
- [3] MEHOS M, PRICE H, CABLE R, et al.Concentrating solar power best practices study[R].Colorado: National renewable energy laboratory of USA.
- [4] WAN Z J, WEI J J, QAISRANI M A, et al.Evaluation on thermal and mechanical performance of the hot tank in the two-tank molten salt heat storage system[J].Applied Thermal Engineering, 2020, 167: 114775.
- [5] 张晓明.熔盐蓄热系统安全问题研究及泛(火用)分析[D].北京:北京工业大学,2020.
- [6] 王昕.大型熔盐储罐应力分析及预热和进盐瞬态模拟[D].北京:北京化工大学,2020.
- [7] ZENG X S, WANG X, LI H F, et al.Strength and creep-fatigue analysis of a molten-salt storage tank[C] // 2019 International

- Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM), Dublin, Ireland, 2019: 742-746.
- [8] 蔡君, 刘长军, 郭洪辛, 等. 循环载荷作用下的高温熔盐储罐设计分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 516-521.
- CAI J, LIU C J, GUO H X, et al. Design and analysis of high temperature molten-salt storage tank under cyclic loading[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2023, 44(4): 516-521.
- [9] DU B C, GUO Y F, XU C, et al. Dynamic creep and stress performances of the packed-bed thermal energy storage tank with molten salt EPCM particles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120247.
- [10] GUO Y F, DU B C, XU C, et al. Effects of EPCM particle properties on creep damage of the molten salt packed-bed thermal energy storage system[J]. *Journal of Energy storage*, 2023, 68: 107808.
- [11] ASME: BPVC. 11. D. M—2013 Boiler and Pressure Vessel Committee on Nuclear Power. ASME Boiler and pressure vessel code II. Materials Part D Properties (Metric)[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [12] PACHECO J E, BRADSHAW R W, DAWSON D B, et al. Final test and evaluation results from the solar two project[R]. United States: Sandia National Laboratories, 2002.
- [13] 韩伟, 崔凯平, 刘欣, 等. 太阳能热发电站熔盐储罐首次充盐策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 282-287.
- HAN W, CUI K P, LIU X, et al. Research on first salt filling strategy for storage tanks of CSP plant [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2022, 43(3): 282-287.

(编辑: 万 佳)