

热力耦合作用下熔盐储罐的力学性能评估 及加强筋布置方案研究

任博, 田家铭, 李彪, 卢泳玮, 王跃社

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对熔盐储罐在运行过程中因液位变化和温度波动导致的罐壁应力集中问题, 开展热力耦合作用下的结构评估与优化研究。首先, 基于有限体积-有限元耦合方法, 建立熔盐储罐的热力学耦合模型, 通过多物理场仿真分析不同液位工况下罐壁温度场、应力场及变形场的分布特性; 其次, 结合模拟结果识别关键失效风险区域; 最后, 提出针对性优化方案并验证其有效性。模拟结果表明: 液位变化导致储罐温度呈现显著分层现象, 罐壁最大温差达 8°C ; 在热力耦合作用下, 罐壁应力随液位的升高而增大, 最大应力为 105 MPa , 且集中于第 1、2 层罐壁区域; 拱顶部位因受热膨胀约束最小, 变形最为显著, 最大变形可达 0.16 m , 而罐壁其他区域需保持热变形自由状态以避免附加应力; 通过局部布置加强筋优化结构设计后, 危险点应力降幅达 38% , 有效改善了结构的力学性能。该研究可为熔盐储罐的设计优化与安全运行提供理论支撑。

关键词: 熔盐储罐; 热力耦合; 热变形; 加强筋布置

中图分类号: TK513.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202510012 **文章编号:** 0253-987X(2025)10-0126-11

Mechanical Performance Evaluation of Molten Salt Storage Tanks under Thermo-Mechanical Coupling Effects and Research on Stiffener Arrangement Schemes

REN Bo, TIAN Jiaming, LI Biao, LU Yongwei, WANG Yueshe

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the stress concentration issues in molten salt storage tank walls caused by liquid level variations and temperature fluctuations during operation, structural evaluation and optimization research are conducted under thermo-mechanical coupling effects. First, a thermo-mechanical coupling model of the molten salt storage tank is established using a finite volume-finite element coupled method. Multi-physics simulations are employed to analyze the distribution characteristics of the temperature field, stress field, and deformation field in the tank wall under different liquid level conditions. Subsequently, key failure risk areas are identified based on simulation results. Finally, targeted optimization schemes are proposed, and their effectiveness is validated. Simulation results indicate that liquid level changes lead to significant temperature stratification in the tank, with a maximum temperature difference of 8°C in the tank wall. Under thermo-mechanical coupling effects, the wall stress increases with rising liquid levels, peaking at

105 MPa, primarily concentrated in the first and second layers of the tank wall. The dome area exhibits the most pronounced deformation due to minimal thermal expansion constraints, with a maximum deformation of 0.16 m, while other regions of the tank wall require thermal deformation freedom to avoid additional stresses. By locally arranging stiffeners to optimize the structural design, the stress at critical points is reduced by 38%, effectively improving the mechanical performance of the structure. This research provides theoretical support for the design optimization and safe operation of molten salt storage tanks.

Keywords: molten salt storage tank; thermo-mechanical coupling; thermal deformation; stiffener arrangement

在太阳能光热发电系统中,熔盐储罐作为关键储热设备,承担着储存和释放热能的重要任务,其性能直接影响整个系统的稳定性和经济性。实际运行过程中,熔盐储罐面临着液位变化和温度波动等复杂工况,其中液位变化会导致储罐内部的压力分布改变,温度的波动会引起材料的热膨胀和应力集中,这些因素共同作用可对储罐的力学性能产生显著影响^[1-2]。若储罐的力学性能不满足要求,可能会导致结构失效、泄漏等问题^[3-6],进而影响系统的安全性^[7]和可靠性^[8-9]。因此,对熔盐储罐进行力学性能评估和结构优化研究^[10-12]具有重要的理论意义和实际应用价值。

近年来,国内外学者对熔盐储罐的热分析以及力学分析做了大量研究。张晓明等^[13]通过有限元分析软件对熔盐储罐进行静力学模拟,采用顺序耦合合法进行热应力分析并开展应力评估。蔡君等^[14]对循环载荷作用下的熔盐储罐进行蠕变-疲劳失效分析,并与正常工况进行对比。孙嘉伟等^[15]建立熔盐储罐热力耦合模型,分析了不同进盐温度下罐壁的力学性能。杜保存等^[16]和 Guo 等^[17]建立 50 MW 熔盐储罐热力耦合模型,研究了储放热过程中罐壁的热力学性能及蠕变损伤。王昕等^[18]将储罐最高和最低温度作为交变载荷进行了热疲劳分析。Klasing 等^[19]探讨了具有热分层现象的大尺寸高温储罐中的弯曲应力问题。综上可知,现有研究大多集中在熔盐储罐的力学性能分析,针对热力耦合作用下加强筋布置对结构力学性能的影响研究较少。

基于此,本文对液位与温度变化耦合条件下熔盐储罐的力学性能进行了全面评估,并开展加强筋布置方案研究。通过建立热力耦合模型,结合有限元分析,深入研究了液位变化和温度下罐壁的应力分布规律,提出有效的加强筋布置方案,以提高储罐的力学性能和使用寿命。该研究不仅为熔盐储罐的设计和优化提供了理论依据,还为太阳能光热发电系统的安全、稳定运行提供了技术支持,具有重要的

理论意义和工程应用价值。

1 模型介绍

1.1 物理模型

本文以西北地区某塔式光热电站熔盐储罐设计参数为基准,建立熔盐储罐的三维热模型和力学模型,如图 1 所示。热模型考虑了储罐壁板、底板、空气、熔盐以及储罐保温结构,如图 1(a)所示。力学分析模型考虑了储罐壁板、大角焊缝与地基,如图 1(b)所示。熔盐储罐的设计参数如表 1 所示。熔盐材料为二元硝酸盐,其热物性随温度变化;固体保温材料热物性随温度变化较小,设置为常数;空气采用理想气体。热分析采用的固体保温材料与流体的热物性参数如表 2 所示,其中 T 为开尔文温度。在进行应力分析时,壁板材料的性能参数如表 3 所示。

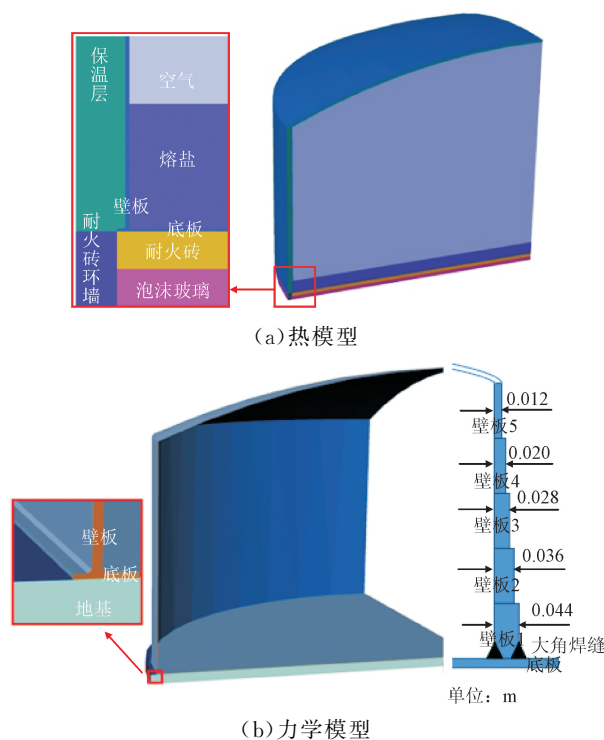


图 1 熔盐储罐模型

Fig. 1 Model of the molten salt storage tank

表1 高温熔盐储罐的设计参数

Table 1 Design parameters of high-temperature molten salt storage tank

参数	数值	参数	数值
储罐直径/m	42	拱顶曲率半径/m	50
储罐高度/m	14	底板厚度/mm	20
第1层壁板厚度/mm	44	焊脚高度/mm	15
第2层壁板厚度/mm	36	罐壁保温层厚度/mm	320
第3层壁板厚度/mm	28	耐火砖厚度/mm	300
第4层壁板厚度/mm	20	泡沫玻璃厚度/mm	400
第5层壁板厚度/mm	12		

表2 流体和固体的热物性参数^[20]Table 2 Thermophysical parameters of fluids and solids^[20]

物质	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	动力黏度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
熔盐	$2\,263.72 - 0.636T$	$1\,396 + 0.172T$	$0.391 + 0.000\,19T$	$7.55 \times 10^{-2}T - 2.78 \times 10^{-2}T^2 + 3.49 \times 10^{-7}T^3 - 1.474 \times 10^{-10}T^4$
空气		1 006.43	0.024 2	1.79×10^{-5}
壁板	7 980	470	20.2	
保温棉	120	840	0.04	
耐火砖	750	1 130	0.1	
泡沫玻璃	120	840	0.04	

表3 不同温度下347H不锈钢材料的性能参数^[21]Table 3 Performance parameter of 347H stainless steel material at different temperatures^[21]

参数	数值				
	20℃	200℃	300℃	400℃	600℃
线膨胀系数 $\alpha/10^{-6} \text{℃}^{-1}$	15.2	16.5	17.0	17.6	19.1
弹性模量 $E/10^3 \text{MPa}$	195	183	175	168	150
屈服强度/MPa	207	166	150	142	139
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

1.2 数学模型

本节给出了考虑对流传热^[22]、辐射传热^[23]以及热力耦合数学^[24]模型。

1.2.1 流动与对流传热方程

连续性方程写为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为密度； $\mathbf{u}$ 为速度矢量。

动量方程写为

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中： p 为压力； μ 为动力黏度； $\mathbf{g}$ 为重力加速度； $\boldsymbol{\tau}$ 为

黏性应力张量，计算如下

$$\boldsymbol{\tau} = \mu[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \quad (3)$$

式中： $\mathbf{I}$ 为单位张量。

能量方程写为

$$\rho c_p(\mathbf{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \varphi + Q \quad (4)$$

$$\varphi = \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{u} \quad (5)$$

式中： c_p 为比定压热容； k 为热导率； φ 为黏性耗散系数； Q 为热源项。

1.2.2 辐射传热方程

采用热射传递方程描述辐射传热方程，写为

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = -(K_a + K_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + K_a I_b(\mathbf{r}, \mathbf{s}) +$$

$$\frac{K_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \quad (6)$$

式中： $I(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ 为辐射强度； K_a 、 K_s 分别为吸收和散射系数； $I_b(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ 为黑体辐射强度； $\mathbf{r}$ 为位置矢量； $\mathbf{s}$ 、 $\mathbf{s}'$ 均为方向矢量； $\Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}')$ 为散射相函数，描述辐射方向从 $\mathbf{s}'$ 散射到 $\mathbf{s}$ 的概率分布； $d\Omega'$ 为立体角微元，表示围绕 $\mathbf{s}'$ 方向的微小立体角； $\int_{4\pi}$ 表示对整个 4π

立体角(即全空间所有方向)进行积分。

1.2.3 热应力计算方程

热应力是由于温度变化产生的固体结构内部的应力,其数学模型基于热弹性理论,包括以下方程。

平衡方程写为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{f} = 0 \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量; $\boldsymbol{f}$ 为体积力。

本构方程写为

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{C} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{th}) \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{C}$ 为弹性张量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为总应变张量; $\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$ 为热应变张量。

热应变方程写为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{th} = \alpha(T - T_0)\boldsymbol{I} \quad (9)$$

式中: α 为热膨胀系数; T_0 为参考温度。

几何方程写为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \boldsymbol{d} + (\nabla \boldsymbol{d})^T) \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{d}$ 为位移矢量。

等效应力用于评估多轴应力状态下材料的屈服强度,其计算公式为

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (11)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 均为主应力。本文以等效应力作为强度判据,并将 347H 材料在 560 °C 时的许用应力取为 93 MPa^[2]。

1.3 边界条件与求解

建立熔盐储罐的热力耦合分析模型,并设置相应的边界条件和求解参数。热模型为:保温层外表面采用第三类传热边界条件,泡沫玻璃与耐火砖环墙底部设为 90 °C 恒温边界,壁板与空气接触面的发射系数取 0.35,熔盐温度设为 565 °C。基于 Fluent 2022R1 软件平台,选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型(含壁面增强与浮力效应)和 DO 辐射模型,采用 SIMPLE 算法求解,收敛标准为温度和辐射残差达到 10^{-8} ,其他变量残差达到 10^{-5} 。力学模型为:考虑罐壁内侧的静水压力、结构自重和地基-底板间摩擦接触,摩擦系数为 0.3。通过 ANSYS Workbench 软件将热分析得到的温度场映射至结构模型,然后进行热力耦合计算,具体算法流程见图 2。

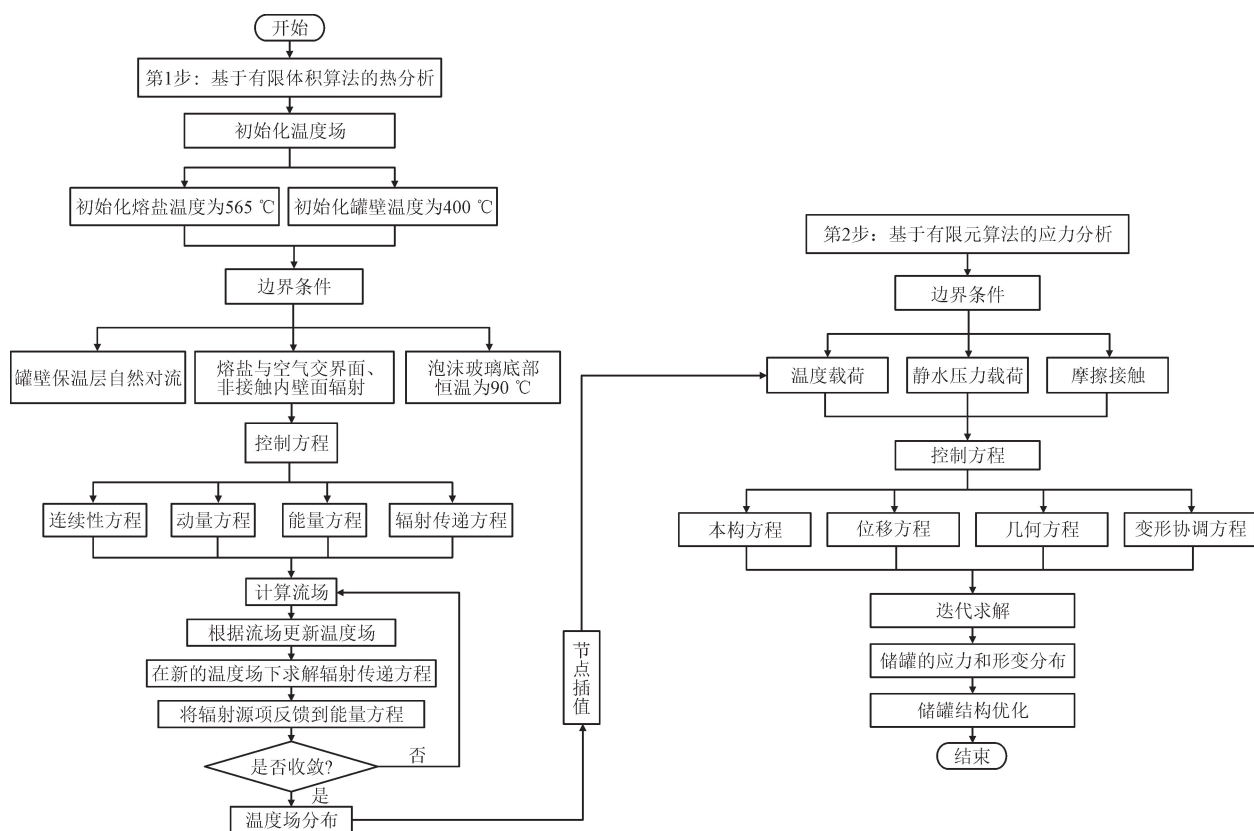


图 2 热力耦合算法流程

Fig. 2 Flowchart of thermo-mechanical coupling algorithm

2 模型验证

2.1 网格无关性验证

对热力耦合模型进行系统的网格独立性验证,结果如图 3 所示。

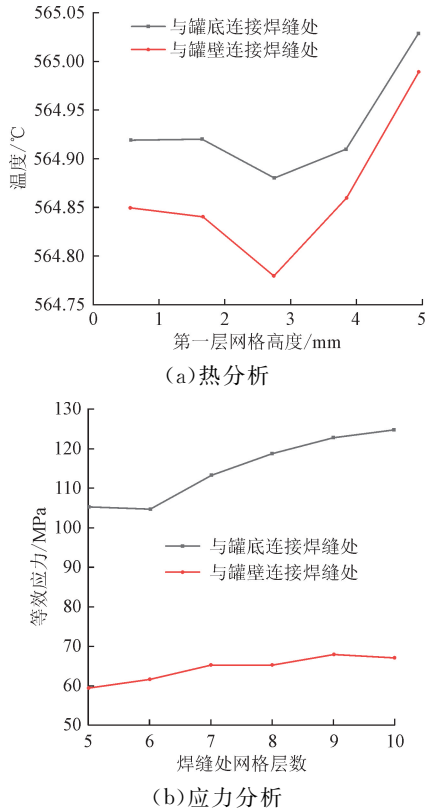


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

在罐壁、底板和焊缝等关键部位设置监测点,分别考察了温度场和应力场的网格参数敏感性。图 3(a)的热分析结果表明,当边界层初始网格高度小于 2 mm 时,保持边界层与主体网格的过渡比例(定义为局部加密网格与未加密主体网格的尺寸比例)不大于 1.2,监测点的温度计算值趋于稳定,此时的波动幅度小于 0.5%,因此确定最优初始层厚度为 2 mm。

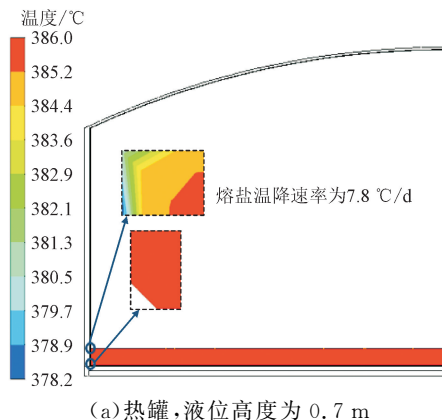


图 3(b)的应力分析结果显示,网格层数达到 9 且边界层与主体网格的尺寸比控制在 1.5 以内时,监测点应力值收敛,此时的相对误差小于 1%,由此可确定,焊缝区域采用 9 层网格进行精细化计算。该验证过程确保了计算结果的网格无关性,为后续分析提供了可靠的数值基础。热模型和力学模型网格划分细节如图 4 所示,基于实际物理问题需求,将计算域分为热模型和力学模型两部分。热模型计算域覆盖储罐壁板、底板、内部熔盐、空气层及保温结构,用于完整捕捉传热过程;力学模型计算域聚焦于壁板、大角焊缝和地基接触区域,用于分析应力与变形分布。

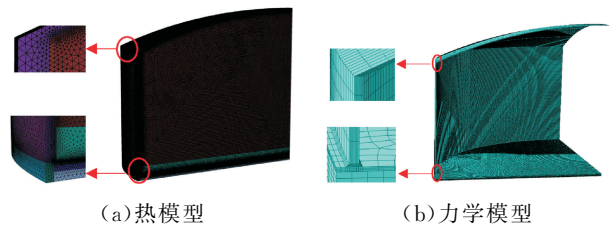
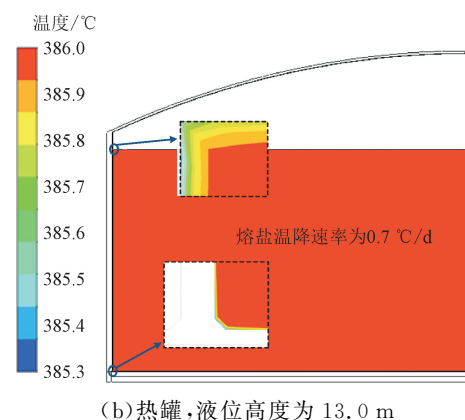


图 4 网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid division

2.2 模型正确性验证

基于 Andasol-1 电站^[25]的实测参数(直径为 38.5 m,高度为 14.0 m,熔盐中 NaNO_3 和 KNO_3 的质量分数分别为 60%、40%)和文献^[26]理论计算结果,模拟了 24 h 冷/热罐工况下的熔盐温降过程,设定热罐熔盐温度为 386 °C,冷罐熔盐温度为 292 °C,得到三维模型对称截面的温度分布如图 5 所示。由图可见,冷、热罐不同液位熔盐的温度降低区域出现在底角焊缝和液位位置,此处为熔盐最易发生凝固的位置。表 4 列出了熔盐温降速率的实验、理论计算与本文的结果对比。由表可知,本文的计算结果基本都在实验测量范围波动,与文献^[26]理论计算结果的最大偏差为 10%。相较于理论模型,本文模型完整考虑了储罐三维结构、多层保温和自然对流-辐射耦合传热,能更真实地反映实际工况。



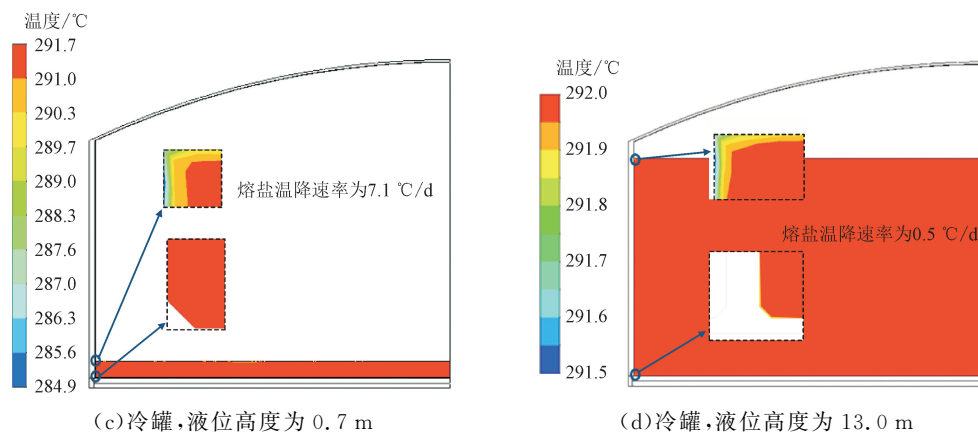


图 5 熔盐储罐截面温度分布云图

Fig. 5 Cross-sectional temperature distribution nephogram of the molten salt tank

表 4 熔盐储罐的实验、理论计算与本文的结果对比

Table 4 Comparison of experimental and theoretical calculations of molten salt storage tanks with the results in this paper

熔盐罐	状态	Andasol-1 电站降温速率/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$)			本文与理论计算结果的偏差/%
		实验结果 ^[25]	理论计算结果 ^[26]	本文计算结果	
热罐	满罐 (13.0 m)	<1	0.66	0.7	5.7
	空罐 (0.7 m)	5~6	8.52	7.8	8.2
冷罐	满罐 (13.0 m)	<1	0.55	0.5	10.0
	空罐 (0.7 m)	5~6	7.03	7.1	1.0

应力模型通过 SOLAR TWO 电站实验数据进行验证^[27]。图 6 给出了实验结果与本文计算结果的对比,其中 SE-NW 和 SW-NE 代表交叉对角线测量基线,用于检测储罐的非对称变形。由图可以看出,模拟结果与实验数据的最大偏差小于 10%,表明模型可准确预测热应力下的变形。

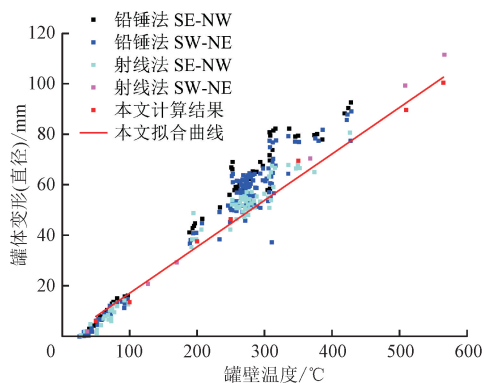


图 6 应力模型验证

Fig. 6 Stress model validation

3 结果分析

3.1 热仿真结果分析

通过数值模拟,得到熔盐储罐在 1 m 液位工况下的热力分布特征,如图 7~图 10 所示。图 7 展示

了熔盐与空气域的温度分布特征。由图可见,熔盐区域呈现显著热分层现象,核心区最高温度达 565 $^{\circ}\text{C}$,拱顶区域温度相对较低,为 557 $^{\circ}\text{C}$,形成 8 $^{\circ}\text{C}$ 的轴向温差。该温度分布特征表明,核心区的高温主要源于与壁板的热传导与熔盐的辐射作用,而拱顶区域仍保持 557 $^{\circ}\text{C}$ 则表明了顶部壁板的辐射以及罐内空气对流换热的影响。值得注意的是,空气域与熔盐域之间形成的温度梯度充分证实了界面处存在热阻效应。图 8 和图 9 揭示了熔盐储罐内特殊的流动与传热耦合特性。由图 8 可见,由于流体内部的温度差异,导致出现最大流速达 0.57 m/s 的强对流现象,使得拱顶局部区域的温度比壁板下部最高温度低约 15 $^{\circ}\text{C}$,产生了局部冷却效应。图 9 给出了壁板的温度分布,其中液位与拱顶区域的温度不均匀,并出现了温度分层,这是流体对流和热传导共同作用的结果。速度分布和温度分布之间互相影响,流体的对流运动增强了热传递,导致温度分布不均,而温度差异又进一步影响了流体的流动特性,两者相互作用,共同决定了储罐内部的热传递效率。图 10 展示了 1~13 m 不同液位条件下壁板轴向的温度分布特征。从中可见,所有液位工况下温度曲

线均呈相似的分布规律,液位面附近出现 5°C 的温度突变,拱顶区域形成 3°C 的二次温度梯度,而中部区域温度分布相对均匀。这种规律性的温度分布特征表明,液位界面和拱顶区域作为两个特征温度突变点,其梯度值保持稳定,分别为 5°C 和 3°C ,充分反映了气液界面热阻、拱顶热辐射以及空气对流对温度场的影响。

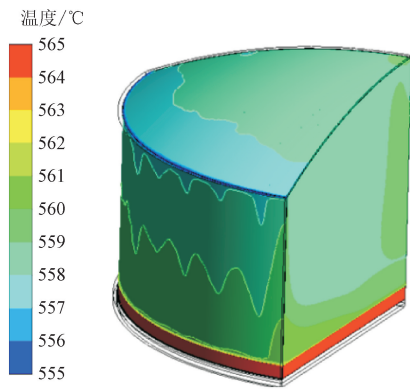


图 7 熔盐与空气的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of molten salt and air

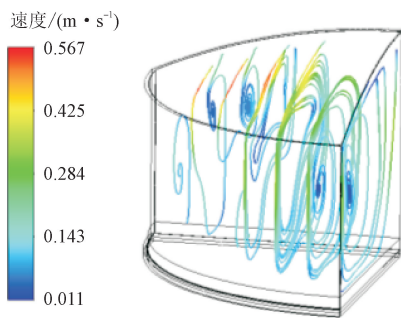


图 8 空气域速度流线分布

Fig. 8 Velocity streamline distribution in the air domain

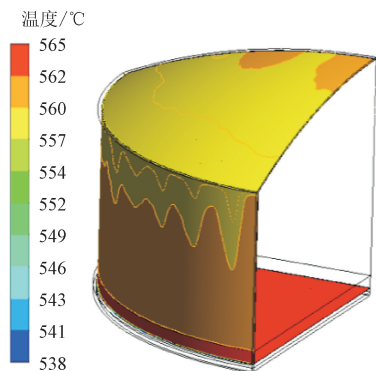


图 9 壁板的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of the wall plate

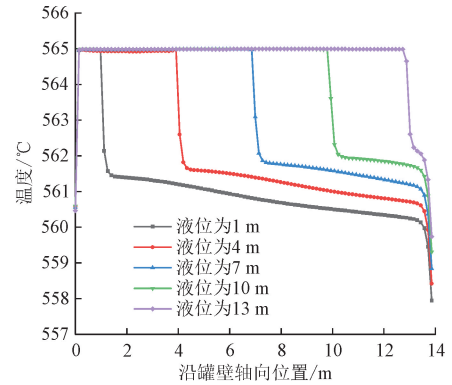


图 10 不同液位下沿壁板的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution along the wall plate at different liquid levels

3.2 热应力结果分析

图 11 展示了 13 m 高液位工况下熔盐储罐的应力分布云图。图 12 展示了 13 m 高液位工况下熔盐储罐的变形分布云图。

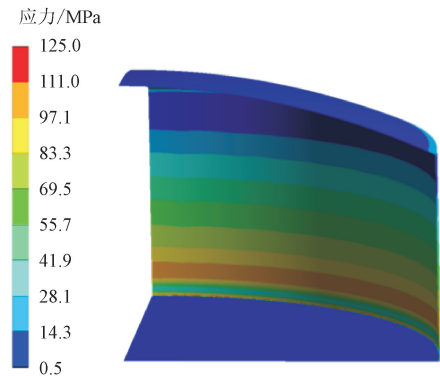


图 11 熔盐储罐应力分布云图(液位高度为 13 m)

Fig. 11 Stress distribution contour plot of the molten salt tank (with a liquid level height of 13 m)

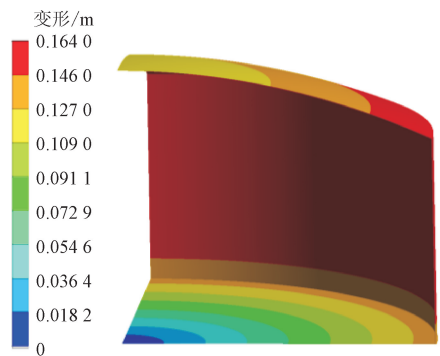


图 12 熔盐储罐变形分布云图(液位高度为 13 m)

Fig. 12 Deformation distribution contour plot of the molten salt tank (with a liquid level height of 13 m)

由图 11 可见,结构应力呈现轴向梯度特征,最大应力为 125 MPa,出现在底层壁板焊缝区域;壁板

的最大应力约为 105 MPa,随着高度的增加逐渐降低至最小值 0.54 MPa。图 12 的变形场分布表明,储罐整体发生显著热膨胀变形,最大径向位移为 0.164 m,出现在上部高温区域。值得注意的是,应力集中区域(底层壁板)与最大变形区域(上部高温区)在空间上呈现分离特征,这一现象揭示了储罐结构在热力耦合作用下的特殊响应机制,即高温区域主要产生热变形,而机械应力则集中在结构支撑区域。

图 13 和图 14 展示了不同液位高度下壁板的热力耦合特性分析结果。

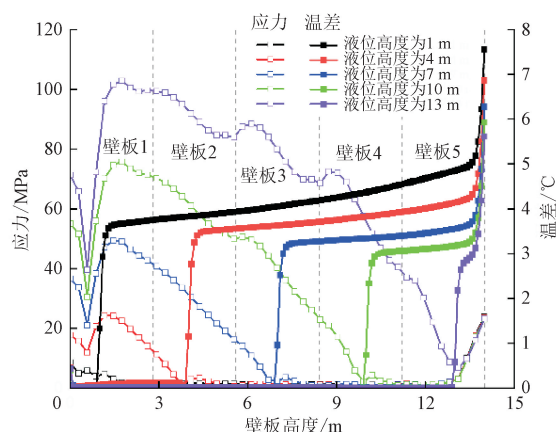


图 13 不同液位高度下壁板的应力与温差分布

Fig. 13 Stress and temperature difference distribution of wall plates under different liquid level heights

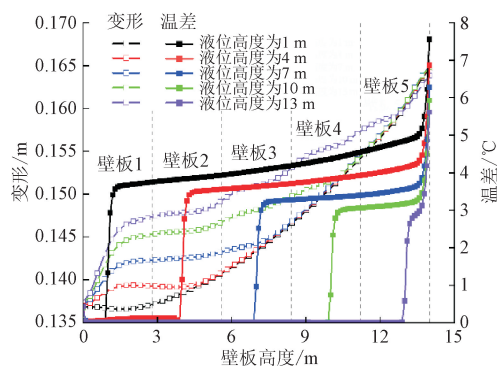


图 14 不同液位高度下壁板的变形与温差分布

Fig. 14 Deformation and temperature difference distribution of wall plates under different liquid level heights

由图 13 可见,随着液位升高,罐壁应力呈现明显的梯度变化,其中第 1 层和第 2 层罐壁的应力集中现象尤为显著。在 13 m 高液位工况下,最大应力达到 105 MPa,已超过材料许用应力 93 MPa,表明壁板 1 和壁板 2 为潜在的失效风险区域。图 14 的变形分析表明,壁板变形与温差呈显著正相关,从罐底到

罐顶呈现非线性增长,最大变形为 0.16 m,出现在拱顶与罐壁连接处。上述分析表明,温差对应力分布的影响相对有限,但对罐体的变形影响很大,而液位高度对应力分布起主导作用。

4 加强筋布置方案

由上述分析可知,在高温工况下,需要特别关注下部壁板的应力集中和上部区域的热变形,故本文采用加强筋改变其结构刚度,使得底部壁板的应力小于许用应力。图 15 给出了加强筋储罐结构的示意图。

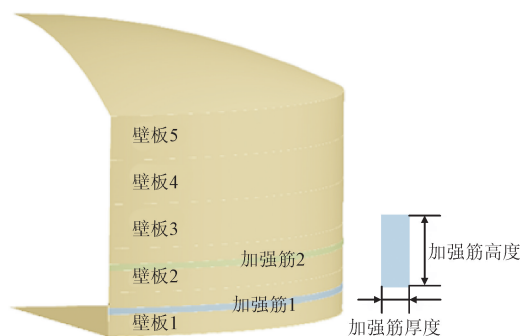


图 15 加强筋储罐结构示意图

Fig. 15 Schematic of the reinforced tank structure

采用 C3D8R 实体单元对熔盐储罐加强筋进行建模,通过局部网格加密处理应力集中区域,并采用绑定接触实现与罐壁实体单元的耦合。加强筋的高度为 0.1~1.0 m,厚度为 1/5~1 倍的罐壁厚度,材料与罐壁相同。对每层罐壁布置加强筋,高度分别为 0.1、0.5、1.0 m。图 16 给出了无加强筋和有加强筋时壁板的应力和变形分布。分析图 16 可知,加强筋高度与壁板变形呈负相关,但超过 0.5 m 后会导致应力集中现象。具体表现为:①加强筋高度增

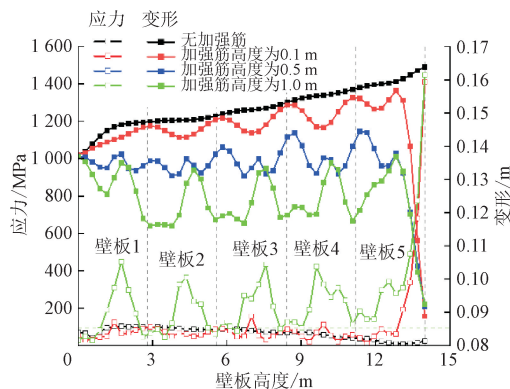


图 16 不同加强筋高度下壁板的应力和变形 (整体加强筋)

Fig. 16 Stress and deformation of wall plates at different reinforcement heights(global reinforcement)

加能有效抑制壁板变形;②当高度超过 0.5 m 时,拱顶区域因热膨胀受限产生应力集中,此时的热应力约为 1 400 MPa,远远超出许用应力 93 MPa。基于此,本文采取针对性优化方案,即仅在第 1、2 层壁板布置加强筋且高度小于 0.5 m,使得热变形下的应力水平小于 93 MPa。

图 17 展示了满液位工况下第 1、2 层壁板加强筋高度对应力和变形的影响。由图可见,随着加强筋高度增加,第 1、2 层变形呈递减趋势,从初始的 0.14 m 降至 0.12 m,降幅达 14.8%。然而,这种变形控制效果是以应力水平上升为代价的,当加强筋高度超过 0.1 m 时,应力急剧增大并超过 93 MPa。通过系统分析应力与变形的耦合关系,最终确定最佳加强筋高度为 0.1 m,即在保证最大变形为 0.14 m 的前提下,将应力水平严格控制在 85 MPa 内,实现结构安全性与变形控制的最佳平衡。

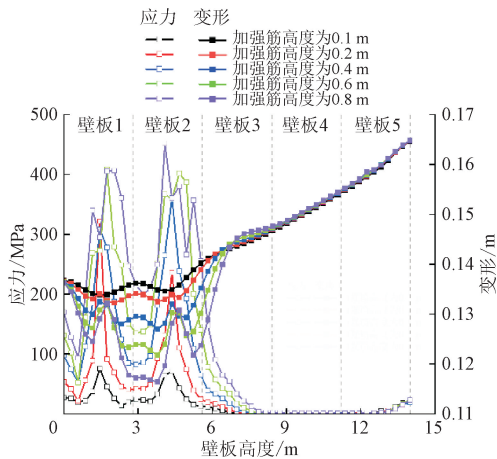


图 17 不同加强筋高度下壁板的应力和变形
(局部加强筋)

Fig. 17 Stress and deformation of wall plates at different reinforcement heights(local reinforcement)

图 18 给出了加强筋厚度对储罐力学性能的影响规律。由图可见,应力分布呈典型的双峰特征,峰值应力集中出现在第 1、2 层壁板的中部区域。随着加强筋厚度从 1/5 壁厚增至 4/5 壁厚,第 1 层壁板的最大应力呈明显下降趋势:当厚度为 1/5 壁厚时,应力最大达到 285 MPa;当厚度增至 4/5 壁厚时,应力降低至 89 MPa,低于材料 93 MPa 的许用应力。从图 18 还可以看出,第 2 层壁板的应力在 1/5~1 倍壁厚变化范围内始终稳定保持在安全区间。因此,虽然 1/5 壁厚时变形程度最低,但应力水平达到最高,故基于应力控制效果与材料经济性的综合评估,确定 4/5 壁板厚度为最优设计参数。

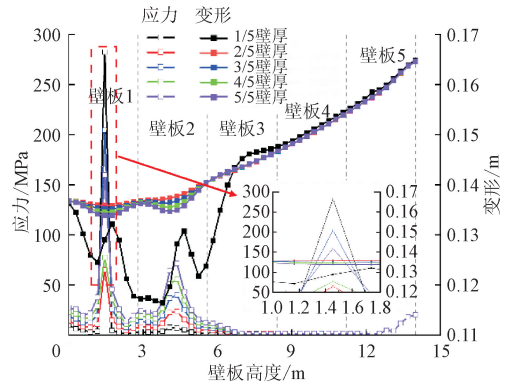


图 18 不同加强筋厚度下壁板的应力和变形

Fig. 18 Stress and deformation of wall plates at different reinforcement thicknesses

图 19 展示了布置加强筋优化前、后储罐力学性能的变化。由图可见,在关键的第 1、2 层壁板设置加强筋,使得最大应力从 105 MPa(超出许用应力 13%)显著降低至 65 MPa,降幅达 38%,这不仅完全消除了应力超标风险,还提供了 30%的安全裕度。与此同时,结构变形也得到了有效控制,最大变形从 0.15 m 降至 0.13 m,降幅达 13%,应力集中区域的变形协调性得到明显改善。

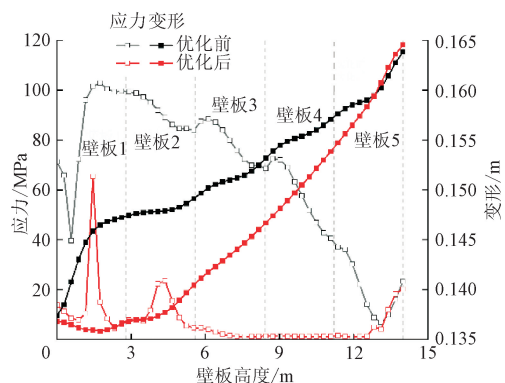


图 19 优化前、后壁板的应力和变形

Fig. 19 Stress and deformation of wall plates before and after optimization

5 结 论

(1)基于热力耦合模型的分析表明:不同液位工况下,熔盐储罐呈现显著的热分层现象,罐壁轴向最大温差达 8℃。应力分析显示,罐壁应力随液位升高而增大,第 1、2 层壁板为应力集中区域,高液位(13 m)时最大应力达 105 MPa,超过材料许用应力(93 MPa)13%。温度梯度导致的结构变形在拱顶区域最为显著,最大变形与温升呈正相关。

(2)加强筋布置方案研究表明,约束热变形将导致不可接受的热应力集中。针对性地在第1、2层壁板布置高度为0.1 m、厚度为4/5壁厚的加强筋,可将应力水平降低38%,使最大应力降至65 MPa,在保证强度要求的同时维持了必要的变形协调性,显著提升了储罐在热力耦合工况下的结构可靠性。

参考文献:

- [1] 田永兰,崔艳艳,洪增元. 光热电站熔盐储罐热应力分析[J]. 电站辅机, 2024, 45(1): 13-17.
TIAN Yonglan, CUI Yanyan, HONG Zengyuan. Thermal stress analysis of molten salt storage tanks in solar thermal power plants [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2024, 45(1): 13-17.
- [2] 薛义鸣,贺志宝,赵伟,等. 光热电站熔盐储罐结构的稳定与强度分析[J]. 西北水电, 2024(6): 126-135.
XUE Yiming, HE Zhibao, ZHAO Wei, et al. Stability and strength analysis of molten salt storage tank structure in CSP power plant [J]. Northwest Hydropower, 2024(6): 126-135.
- [3] 曾鑫,蔡君,郑维栋,等. 基于风险指引的光热电站高温熔盐储罐结构强度设计研究[J]. 机械强度, 2022, 44(3): 676-683.
ZENG Xin, CAI Jun, ZHENG Weidong, et al. Risk-informed strength design of hot molten salt storage tank for CSP plants [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(3): 676-683.
- [4] SHI Hua, ZHOU Hao, MA Pengnan, et al. Experimental investigation of migration and solidification of molten salt leaking through tank cracks [J]. Journal of Zhejiang University: Science A Applied Physics & Engineering, 2021, 22(12): 979-991.
- [5] 王翌文,周昊,罗佳伟,等. 储罐地基材料在熔盐泄露后的导热系数研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(1): 137-143.
WANG Zhaowen, ZHOU Hao, LUO Jiawei, et al. Research on thermal conductivity of storage tank foundation materials after molten salt leakage [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2022, 56(1): 137-143.
- [6] ZUO Yuhang, ZHANG Mingrui, CHENG Fangzheng, et al. Experimental investigation of the migration and solidification characteristics of solar salt in hot sand layer of tank foundation [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219(Part B): 119571.
- [7] 孔令峰,代增丽,潘任伟,等. 大型高温熔盐储罐运行高发风险及设计要点分析[J]. 中国标准化, 2024(S2): 88-93.
- [8] 俞兵,胡海军,谢国山,等. 熔盐罐罐底角焊缝疲劳可靠性评估方法及应用[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(1): 215-224.
YU Bing, HU Haijun, XIE Guoshan, et al. Methodology and application of fatigue reliability assessment fillet welds at the bottom of molten salt tanks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(1): 215-224.
- [9] 李秀峰,俞兵,谢国山,等. 光热装置熔盐罐接管焊缝结构疲劳寿命预测[J]. 化工机械, 2024, 51(6): 887-894.
LI Xiufeng, YU Bing, XIE Guoshan, et al. Prediction of fatigue life for the take-over weld structure of the molten salt tank in the solar thermal device [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2024, 51(6): 887-894.
- [10] GABBRIELLI R, ZAMPARELLI C. Optimal design of a molten salt thermal storage tank for parabolic trough solar power plants [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131(4): 041001.
- [11] 许立国,祁林攀,沈亚军,等. 塔式光热电站熔盐储罐设计优化探讨[J]. 西北水电, 2023(6): 113-116.
XU Liguang, QI Linpan, SHEN Yajun, et al. Design optimization of molten salt storage tank of tower solar thermal power station [J]. Northwest Hydropower, 2023(6): 113-116.
- [12] 李沛轩,贺志宝,郜振鑫. 光热电站熔盐储罐罐顶排版设计优化[J]. 西北水电, 2024(6): 136-140.
LI Peixuan, HE Zhibao, GAO Zhenxin. Optimization of the design of the row plate on the roof of molten salt storage tanks [J]. Northwest Hydropower, 2024(6): 136-140.
- [13] 张晓明,吴玉庭,张灿灿. 大型熔盐罐结构设计、温度分布与强度分析[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(9): 1064-1073.
ZHANG Xiaoming, WU Yuting, ZHANG Cancan. Temperature distribution and strength analysis of large-scale molten salt thermal storage tank [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(9): 1064-1073.
- [14] 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 Jun, LIU Changjun, GUO Hongxin, et al. Design and analysis of high temperature molten-salt stor-

- age tank under cyclic loading [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2023, 44(4): 516-521.
- [15] 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/OL]. 太原理工大学学报. (2024-02-27) [2024-11-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20240227.1459.002.html>.
- SUN Jiawei, DU Baocun, LEI Yonggang, et al. Dynamic thermal-mechanical property of high temperature molten salt storage tank under special filling conditions [J/OL]. *Journal of Taiyuan University of Technology*. (2024-02-27) [2024-11-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20240227.1459.002.html>.
- [16] 杜保存, 贾凡, 郭一帆, 等. 50 MWe 光伏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 Baocun, JIA Fan, GUO Yifan, et al. High temperature creep and mechanical properties 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.
- [17] GUO Yifan, DU Baocun, XU Chao, 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.
- [18] 王昕, 钱才富. 非锚固式大型立式熔盐储罐热疲劳分析 [J]. 压力容器, 2018, 35(4): 31-35.
- WANG Xin, QIAN Caifu. Thermal fatigue analysis of an unanchored large vertical melt salt storage tank [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2018, 35(4): 31-35.
- [19] KLASING F, SCHMITZ M, GERDES C, et al. Critical diameter for a single-tank molten salt storage: parametric study on structural tank design [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 101, Part B: 113870.
- [20] SUÁREZ C, IRANZO A, PINO F J, et al. Transient analysis of the cooling process of molten salt thermal storage tanks due to standby heat loss [J]. *Applied Energy*, 2015, 142: 56-65.
- [21] OSORIO J D, MEHOS M, IMPONENTI L, et al. Failure analysis for molten salt thermal energy storage tanks for in-service CSP plants [EB/OL]. (2024-03-15) [2024-12-20]. <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/89036.pdf>.
- [22] HE Zheng, LI Qing, ZHANG Yaru, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of SCO_2 in a novel parabolic trough collector tube utilizing impinging jets under non-uniform heat flux boundary [J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(12): 3724-3740.
- [23] CHEN Jingjing, KUMAR A, COVENTRY J, et al. Numerical modelling of radiative heat transfer in a polydispersion of ceramic particles under direct high-flux solar irradiation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 278: 108008.
- [24] LI Manjiang, ZHANG Jianfeng, HUANG Haimeng, et al. Numerical simulation of temperature and stress field distribution during the rapid quenching process of hollow glass microspheres [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2025, 654: 123447.
- [25] ARAÚJO A K A, MEDINA T G I. Analysis of the effects of climatic conditions, loading level and operating temperature on the heat losses of two-tank thermal storage systems in CSP [J]. *Solar Energy*, 2018, 176: 358-369.
- [26] RELLOSO S, DELGADO E. Experience with molten salt thermal storage in a commercial parabolic trough plant: Andasol 1 commissioning and operation [EB/OL]. [2025-01-15]. <https://www.researchgate.net/publication/308063722>.
- [27] BRADSHAW R W, DAWSON D B, ROSA W D L, et al. Final test and evaluation results from the solar two project: sand2002-0120 [R]. Albuquerque: Sandia Corporation, 2002.

(编辑 李慧敏)