文章编号:1671-6833(2025)05-0043-07

熔盐潜热蓄热装置的动态释热特性分析

韩振兴, 许继雪, 王朝宇

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

摘 要: 为了给基于熔盐潜热蓄热能量利用系统设计与制定运行策略提供更多关键信息,采用数值分析方法对基于二元共晶硝酸盐($NaNO_3$ 和 KNO_3,质量比为 23∶27)的管壳式结构相变蓄热单元的放热过程进行研究。通过对空气作为传热流体的相变蓄热单元内熔盐凝固释热过程的仿真计算,分析熔盐内温度与液相率等的动态演变特性、相变蓄热单元放热速率以及空气出口温度等随时间变化规律。计算结果表明:熔盐内自然对流效应在其凝固释热过程中仍然扮演重要角色;相变期间,熔盐液相率变化基本遵循抛物线规律,放热速率和空气出口温度线性下降趋势明显。

关键词:相变; 熔盐; 凝固; 释热特性; CFD; 多相流

中图分类号:TK02 ;TK11+4 **文献标志码**:A **doi**:10.13705/j.issn.1671-6833.2025.05.013

随着能源需求的日益增加和降低碳排放的要求,使得传统化石能源面临巨大压力与挑战。因此,开发风能、太阳能等可再生能源,发展储能技术,提高能源利用效率是双碳背景下能源行业发展的必然选择。储能技术可以解决风能、太阳能等可再生能源的间歇性和波动性问题,并能通过移峰填谷实现供能和用能的时空匹配[1-2]。储热技术分为显热储热、热化学储热和相变储热。相变储热技术热能存储密度高、等温性能好、蓄热容量大、占地面积较小,具有广阔的应用前景[3-7]。

熔盐类材料除作为显热蓄热介质外,其较高的相变潜热、良好的热稳定性决定了它们也是中、高温热利用领域较为理想的相变蓄热材料[8-9]。提高熔盐材料的导热性能是其作为相变蓄热介质的重要研究方向,目前研究主要聚焦于添加纳米颗粒,制作基于膨胀石墨、泡沫金属或多孔陶瓷的复合熔盐相变材料等提高导热性能等方面[10-13]。相变蓄热储热器主要有管壳式、填充床式、板式和热管式等形式。管壳式结构具有加工简单、易于维护等特点而被众多研究所采用[13]。张腾腾等[14]的研究发现,相较于纯十五烷,添加了膨胀石墨的十五烷作为相变蓄热材料能够显著提升相变蓄热单元的储热性能。韩涛等[15]研究了不同安装形式、不同散热片结构对石蜡 RT50 相变蓄热单元熔化过程的影响,结果显示立式安装效果优于卧式布置,直肋较环肋传热效果更优。Khan 等[16]研究了添加不同浓度单壁纳米管对石蜡 RT82 凝固释热性能的影响,结果表明,添加质量浓度为 4%的单壁碳纳米管可以使石蜡凝固时间缩短 13.2%。基于熔盐材料相变蓄热装置的运行特性也为相关研究人员所关注,Han 等[17]在评估散热损失的基础上研究了基于二元硝酸盐的管壳式相变蓄热单元的蓄、放热性能。Knysh[18]采用 $NaNO_3$ 作为相变蓄热介质,应用非平衡热力学研究了长管壳式相变蓄热装置中流体流动与传热之间的相互作用,并通过选择最佳传热流体流动参数增强对流换热,最小化传热流体流动摩擦损失。

当前对熔盐相变蓄热工作特性研究主要围绕其熔化蓄热过程进行,更多关注熔盐侧相关参数变化,缺少对熔盐相变释热过程和传热流体参数变化的认识。潜热蓄热装置作为热能利用系统的中间环节,其释热过程直接决定了后续热利用环节的运行模式,乃至整个能量利用系统的构建。因此,有必要对基于熔盐的相变蓄热装置的动态释热特性进行研究。本文以二元硝酸盐作为相变蓄热介质,采用数

收稿日期:2025-04-02;**修订日期**:2025-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52090062;51821004)

作者简介:韩振兴(1973—),男,河北阜城人,华北电力大学副教授,博士,主要从事蓄热技术和多相流检测的研究,E-mail: hzx@ncepu.edu.cn。

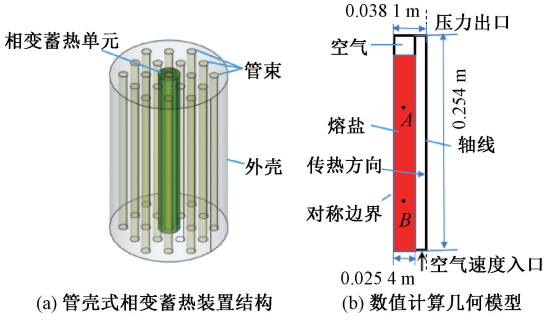
引用本文:韩振兴,许继雪,王朝宇.熔盐潜热蓄热装置的动态释热特性分析[J].郑州大学学报(工学版),2026,47(5):43-49.[Han Zhenxing, Xu Jixue, Wang Chaoyu. Analysis on heat release characteristics of molten salt-based latent heat thermal energy storage device [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(5): 43-49.]

值方法研究管壳式相变蓄热单元的动态释热过程。除关注熔盐自身相变过程外,同时关注放热速率、空气出口温度等参数变化,从不同角度呈现基于熔盐潜热蓄热单元的释热特性。

1 计算模型与计算条件设置

1.1 计算模型与热物性参数

管壳式相变蓄热装置结构与数值计算几何模型如图 1 所示。管壳式相变蓄热装置可以认为是由并联在一起的多个相变蓄热单元构成,如图 1(a)所示。单个相变蓄热单元可视作旋转轴对称结构,由此将相变蓄热单元内的流动传热简化为如图 1(b)所示平面的二维问题。为便于与实验数据对比,模型尺寸与文献[17]中的几何尺寸一致。蓄热单元长度为 0.254 m,外径为 0.076 2 m,内管直径为 0.025 4 m,外径与内管直径之比为 3,单元长度与内管直径之比为 10。根据上述数据可得蓄热单元容积约为 1.03×10^{-3} m^3。如忽略对流效应或采用 Boussinesq 方法计算对流效应,熔盐会充填整个蓄热单元高度[19-20]。实际充填需考虑其相变过程中的体积变化而在熔盐上方预留一定空间。基于此,本文在熔盐上方设置空气腔隙,对应高度 l_{air} 为 0.022 m,即熔盐充填高度为 0.232 m。管子壁面厚度 δ 相对其他几何尺寸可以忽略,只在壁面条件中加以设置。



(a) 管壳式相变蓄热装置结构 (b) 数值计算几何模型

图 1 管壳式相变蓄热装置结构与数值计算几何模型

Figure 1 Structure of a shell and tube phase change heat storage device and geometric model for numerical calculation

研究采用 $NaNO_3$ 和 KNO_3 质量比为 23∶27 的二元共晶硝酸盐作为相变蓄热介质,并分布于图 1(b)中所示区域。考虑温度变化区间较小,将其固相和液相的比热容、热导率均视作常数。固相熔盐密度设为常数,考虑对流效应将液相密度设为关于温度的函数。动力黏度只设置液相数值。熔盐凝固后的固态行为与特征通过动量方程中的源项进行描述。糊状区热物性参数根据液相线温度和固相线温度采用线性插值方法计算。空气作为换热流体在管内自下而上流动,不涉及相变过程,相关参数视作常数处理。熔盐与空气的主要热物性参数参见表 1。

1.2 控制方程

相变蓄热单元凝固释热过程涉及熔盐与空气两相,研究采用 VOF(volume of fluid)两相流动计算模型。VOF 模型假定流动各相的压力分布相同,进而各相具有相同的速度与温度场。

(1)连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{v})=0。 \tag{1}$$

式中:t 为时间,s;ρ、$\vec{v}$ 分别为模型各相基于体积分数 α_i 计算所得平均密度和平均速度,kg/m^3、m/s,可通过式(2)和式(3)分别得出。

$$\rho=\alpha_i\rho_i; \tag{2}$$

$$\vec{v}=\frac{1}{\rho}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\rho_i\vec{v}_i; \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\alpha_i=1。 \tag{4}$$

(2)动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v})+\nabla\cdot(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla\cdot[\mu(\nabla\vec{v}+\nabla\vec{v}^{\mathrm{T}})]+\rho g+S。 \tag{5}$$

式中:黏性系数 μ 为各相黏性系数 μ_i 与体积分数 α_i 乘积之和,$N\cdot s/m^2$,可通过式(6)得出;S 为凝固过程发生而引入的源项,可通过式(7)得出。

$$\mu=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\mu_i; \tag{6}$$

$$S=\frac{(1-\beta)^2}{(\beta+\varepsilon)}A_{\mathrm{mush}}\vec{v}。 \tag{7}$$

式中:$\varepsilon=0.001$,用于防止分母为 0;A_{mush} 为糊状区

表 1 熔盐与空气的热物性参数

Table 1 Thermophysical properties of molten salt and air

类别	密度 ρ/($kg\cdot m^{-3}$)	比热容 c_p/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	热导率 k/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	动力黏度 μ/($10^{-6}kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)	熔化潜热 L/($J\cdot kg^{-1}$)	固相线温度 $T_{solidus}$/K	液相线温度 $T_{liquidus}$/K
熔盐($NaNO_3$+KNO_3)[18]	2 052.6(固)/2 300−0.689 1T(液)	1 270(固)/1 450(液)	0.385(固)/0.461(液)	210	108 000	491.88	494.98
空气	1.225	1 006.43	0.024 2	18			

常数;β 为液体体积分数,液体体积分数 β 取决于熔盐的温度水平,当低于固相线温度 T_{solidus} 或高于液相线温度 T_{liquidus} 时,β 分别为 0 或 1,介于二者之间的温度区间采用线性插值方法计算。公式为

$$\begin{cases}\beta = 0, T < T_{\text{solidus}};\\ \beta = 1, T > T_{\text{liquidus}};\\ \beta = \dfrac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}}, T_{\text{solidus}} \leqslant T \leqslant T_{\text{liquidus}}。\end{cases} \tag{8}$$

(3)能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T)。 \tag{9}$$

式中:H 为材料总焓,由显焓 h 和潜热 ΔH 构成,J/kg,可通过式(10)得出,显焓 h 等于基准焓值 h_{ref} 与基准温度至指定温度的热量变化之和,J/kg,可通过式(11)得出,潜热 ΔH 等于液体体积分数 β 和材料潜热 L 之积,J/kg,可通过式(12)得出;k_{eff} 为模型体积平均导热系数,可通过式(13)得出。

$$H = h + \Delta H; \tag{10}$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^{T} c_p \mathrm{d}T; \tag{11}$$

$$\Delta H = \beta L; \tag{12}$$

$$k_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i k_i。 \tag{13}$$

式中:h_{ref} 为材料的基准焓,J/kg;T_{ref} 为基准温度,K;c_p 为比热,J/(kg·K)。

1.3　计算条件与网格设置

模型边界条件如图 1(b)所示,右侧边界为模型对称轴,左侧边界为对称边界;熔盐侧上方与下方均为绝热条件。空气侧采用速度入口边界,空气由下方进入管束,空气流速与温度分别为 3.1 m/s 和 473 K;上方空气出口采用压力出口边界。

模型起始为蓄热完毕状态,熔盐及空气温度均设置为 527 K。时间步长设置为 0.01 s,压力速度耦合采用 PISO 算法,动量及能量方程均采用二阶迎风格式进行离散,采用 PRESTO! 模式进行压力修正。能量方程计算收敛残差设定为 1×10^{-6},连续性与速度残差均为 0.001。

模型计算域采用四边形结构化网格进行划分。本文采用 3 种不同规模网格进行网格无关性验证,对应网格数量分别为 31 878,47 376 和 107 568,其中网格数量为 47 367 的结构化网格如图 2 所示。3 种网格条件下的熔盐液相率随时间变化曲线如图 3 所示。随网格数增加,相邻网格数量计算偏差减小,网格数为 47 376 的计算结果与网格数为 107 568 的计算结果之间最大偏差低于 1.5%。考虑计算效率需求,系列研究均采用网格数为 47 376 的结构化网格进行,本文分析数据为对应该结构化网格的计算结果。

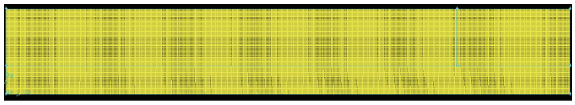


图 2　网格数为 47 376 的结构化网格

Figure 2　Structured mesh of 47 376 cells

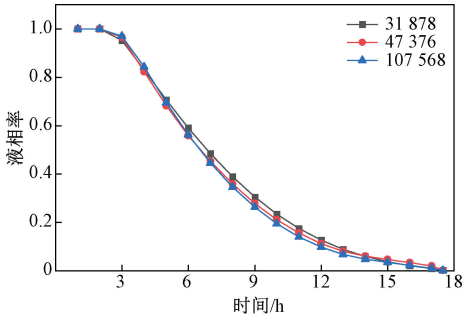


图 3　不同网格数量下液相率变化曲线对比

Figure 3　Comparison of liquid phase fraction change curves under different mesh numbers

1.4　计算模型验证

本文计算模型与文献[17]实验研究采用的相变蓄热单元尺寸相同。在熔盐区域垂直中线位置分别选取 A 点和 B 点,如图 1(b)所示,二者分别距离底部 17.8 cm 和 5.1 cm。图 4 给出了此两点在相同工况条件下的计算温度和实验测量温度变化曲线。由于数值计算中相关壁面设置绝热条件使得熔盐相变起始时间和持续相变释热时间要远长于实验结果。尽管实验研究采取了较好的保温措施,但热损失仍在熔盐释热过程中产生了重要影响。根据文献[17]的实验数据,环境温度为 21 ℃,在释热过程起始阶段,热损失数量约为释热总功率的 1/4。换热流体和热损失的共同作用导致熔盐进入相变释热节点快,且相变释热持续时间短。实验终了状态与环境条件有关,空气反向向熔盐提供热量弥补蓄热单元的热损失,蓄热单元进入热平衡状态。A 点与 B 点相变释热完成后的数值计算结果和实验结果如图 4 中标记所示。数值计算终了状态 A 点和 B 点对应温度分别为 482.8 K 和 474.1 K,实验终了状态 A 点和 B 点对应温度分别为 456.7 K 和 448.6 K,计算值与实验值的温度偏差分别为 26.1 K 和 25.5 K,相对实验值的偏差均为 5.4%。基于上述对比分析,本文所采用数值计算模型是合理有效的。

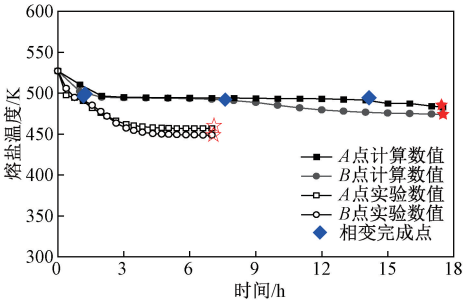


图 4 计算温度与实验测量温度变化对比

Figure 4 Comparison of calculated and measured temperatures

2 计算结果分析

2.1 熔盐温度与液相率变化云图

熔盐温度云图随时间演变如图 5 所示,不同时刻熔盐区域的速度矢量分布如图 6 所示。由于熔盐起始温度设置超过相变温度,故在前 2 h 主要为液态熔盐放热阶段,空气自下而上在管内流动,同时受熔盐上方空气影响,诱发熔盐内对流效应。在此阶段,熔盐区域自然对流整体呈顺时针方向,且在下端位置形成涡状流动,如图 6 中 $t=1.0$ h 时的速度矢量图所示。涡状区内温度相对均匀,涡状区外等温线除壁面附近区域外基本呈水平分布状态。近涡状区受其影响呈现较大温度梯度,上方区域几乎不受影响,等温线较为均匀,如 $t=1.0$ h 时的图 5 云图所示。涡状区温度接近相变起始温度后,涡状区上移,涡状区下方几乎没有温度梯度,如图 6 中 $t=2.0$ h 的速度矢量图所示。图 4 中数值计算和实验测量的两点温度几乎同时达到相变温度也证实了上述过程。在熔盐液态释热阶段,通过对计算数据核算,经熔盐上方空气传递至管内空气的热量仅为总热量的约 1.5%。

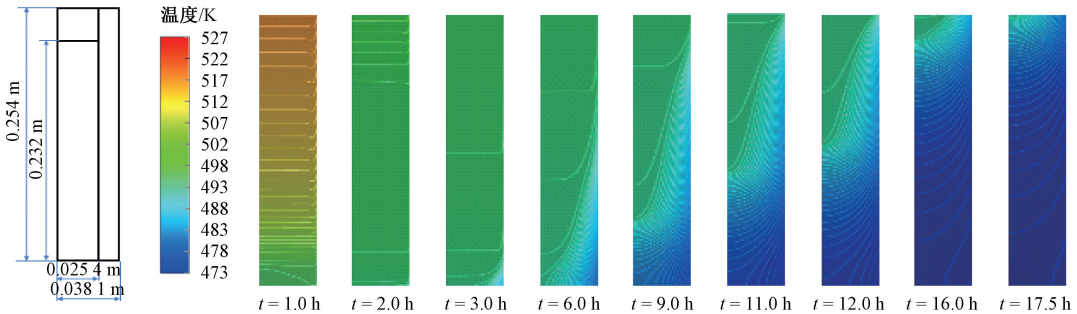


图 5 熔盐温度云图演变

Figure 5 Evolution of temperature contour maps of molten salt

蓄热单元进入相变释热阶段后,涡状区消失,如图 6 中 $t=3.0$ h 的速度矢量图所示。熔盐完全凝固自其右下区域开始,液相率较高区域仍保留自然对流效应的影响,等温线仍基本呈水平状态。由于熔盐内上、下温差较显热释热阶段大幅降低,使得自然对流效应的强度大幅降低,靠近管束壁面区域熔盐速度只为液态放热阶段的 1/10。

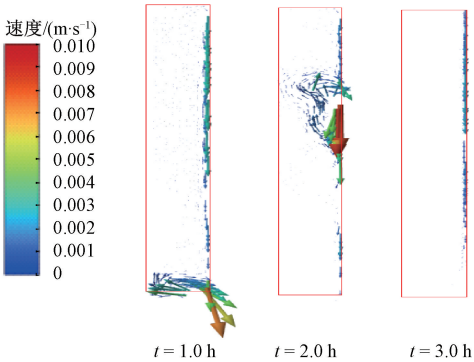


图 6 不同时刻熔盐区域的速度矢量分布

Figure 6 Velocity vectors in the region of molten salt at different times

后续熔盐凝固区域逐渐向左上扩展,并在 $t=6.0$ h 时扩展至整个下端截面,之后固-液界面形状基本保持不变,整体向上推进,待凝区域逐渐缩小。$t=11.0$ h 时,靠近空气管壁侧熔盐凝固发展至顶部截面,待凝熔盐需克服固态熔盐热阻才能与管内空气换热,增加了此部分熔盐的释热难度。固相区等温线分布遵循热传导规律,大致与固-液界面平行。待凝区域中液相率较高区域等温线仍受自然对流效应影响,保持为水平状态;而液相率较低区域自然对流效应受到抑制,更多呈现固态特性,等温线也逐渐过渡至与固-液界面平行状态。

图 7 给出了熔盐区域液相率演变云图。熔盐的液相率变化是传热与流动的综合对外表现。如前所述,释热过程前期为液态释热阶段,熔盐液相率保持为 1.0,如图 7 中 $t=1.0$ h 的液相率云图所示。温度下降至相变起始温度后,靠近空气入口管壁区域液相率开始下降,如图 7 中 $t=2.0$ h 时的云图所示。同前述分析,熔盐完全凝固自右下区域开始,如图 7 中 $t=3.0$ h 时的云图所示,后续熔盐凝固区域逐渐

向左上区域发展。对照 $t=6.0$ h 的云图可以发现,熔盐凝固已扩展至整个熔盐下端截面。之后熔盐固-液分界面整体向上推进。在 $t=11.0$ h 时,靠近管壁区域熔盐固-液分界面传递至熔盐上端截面位置,固态熔盐将熔盐未凝区域和管束壁面完全隔离开,此时熔盐内对流效应几乎消失,剩余熔盐释热主要通过热传导方式进行,热阻增加,释热速率极大降低,增加了该部分熔盐潜热的利用难度。在 $t=17.5$ h 时整个相变释热过程基本结束。等液相率线和等温线特点类似,在低液相率区域主要受界面形状与位置影响,而在高液相率区域受自然对流效应影响基本呈水平分布。

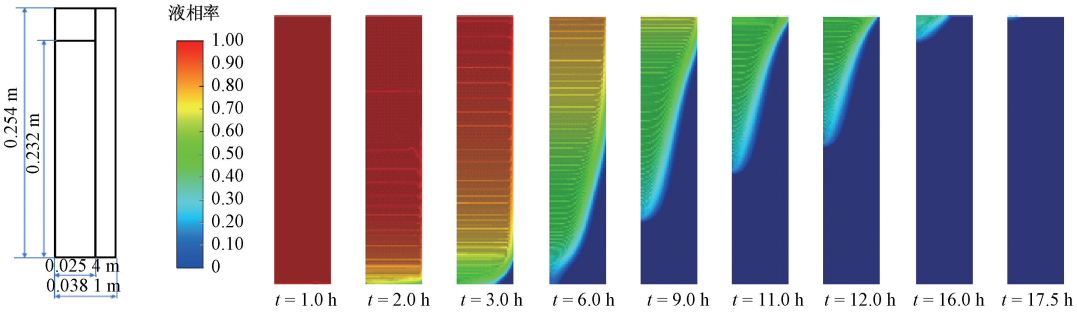


图 7　熔盐凝固液相率演变云图

Figure 7　Evolution of liquid phase fraction contour maps of molten salt

2.2　熔盐凝固过程相关参数变化

2.2.1　熔盐整体液相率及其变化率

熔盐液相率及其变化率随时间的变化曲线如图 8 所示。与熔盐液相率云图相对应,前 2 h 为液相释热阶段,液相率无变化并等于 1.0。相变过程液相率变化形状与抛物线近似,整个相变过程持续约 16 h。相变前期放热速率较高,从凝固开始至液相率等于 0.6 用时约 3.5 h。随释热进行,放热速率放缓,液相率从 0.6 降至 0.2 用时约 4.5 h。液相率降至 0.1 后,熔盐放热速率大大降低,至熔盐完全凝固约耗时 6 h,即此 10% 的熔盐相变耗时约占总凝固时间的 3/8。图 8 中进一步给出了熔盐液相率变化率,相变初期受自然对流效应影响,液相率变化率可达约 0.13 h,后续受自然对流效应减弱与固态熔盐热阻增加等因素影响,变化率逐渐降低,并逐渐趋于零。

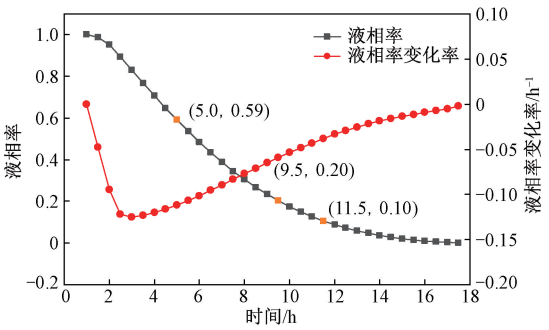


图 8　熔盐液相率及其变化率随时间的变化曲线

Figure 8　Variation of liquid phase fraction of molten salt with time and its change rate

2.2.2　空气出口温度和放热速率

图 9 给出了熔盐相变释热过程中空气出口平均温度的变化规律。在空气入口温度为 473 K 时,熔盐初始温度高于其相变起始温度,出口空气平均温度可升至 480 K;熔盐相变开始,对应空气出口平均温度为 477.6 K;相变结束时,熔盐能够释放热量接近枯竭,对应空气温度仅为 473.7 K。在无热损失情况下,空气出口温度在整个熔盐相变期间的波动仅为 3.9 K,变化较为平稳,显示了良好的等温性能。可以将空气温度变化转换为相变蓄热单元熔盐放热速率,如图 9 所示。在熔盐相变起始阶段,考虑熔盐对流效应影响,熔盐释热速率可达 11.2 W;随着壁面区域熔盐开始凝固,传热热阻增加,传热速率线性下降趋势明显;熔盐相变过程结束,对应放热速率为 1.6 W,仅为相变起始放热速率的 14%。

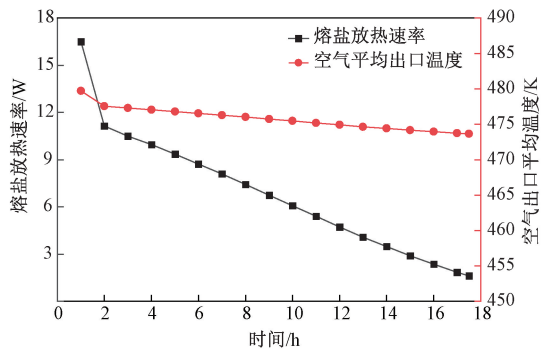


图 9　空气出口平均温度与熔盐放热速率随时间变化曲线

Figure 9　Variations of average air outlet temperature and heat release rate of molten salt with time

2.2.3　热流密度、壁面温度与熔盐侧换热系数

图 9 中不同时间熔盐的放热速率为熔盐不同高度热流密度对管壁面积积分的结果。以相变蓄热单元下端作为高度起点,图 10 给出了 3 个不同时间热

流密度沿熔盐高度的变化曲线。$t=1.0$ h 时熔盐处于液态放热阶段,热流密度主要与空气和熔盐之间的温差有关,热流密度沿空气流动方向较快下降并逐渐趋于平缓。$t=2.5$ h 时,由于熔盐凝固、热阻增加致使起始高度热流密度明显降低。剩余区域热流密度变化与液态放热阶段变化趋势类似,热流密度大幅度下降,这主要归因于熔盐与换热空气温差减小,熔盐内自然对流效应的极大减弱。$t=8.5$ h 时,由于下方熔盐相变释热已经结束,熔盐完全转变为固态,热阻增加,与空气温差减小,故热流密度较低。沿空气流动方向逐渐增加至相变尚未结束区域对应数值,其变化趋势与液相率云图中的固-液界面演变表现一致。

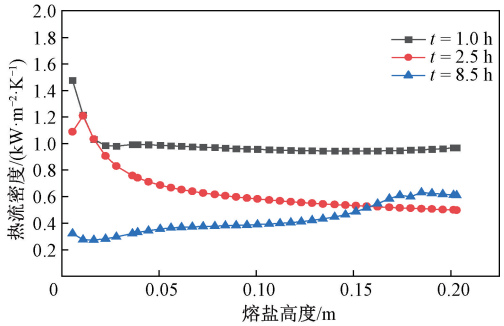


图 10 不同时间热流密度沿熔盐高度变化曲线

Figure 10 Variations of heat flux along the height of molten salt at different times

上述不同时间熔盐侧壁面温度沿熔盐高度变化曲线如图 11 所示。$t=1.0$ h 时,处于液态放热阶段,与熔盐沿高度方向温度变化类似,壁面温度呈现逐渐升高的趋势。$t=2.5$ h 开始转变为相变释热阶段,空气入口处熔盐开始凝固,对应壁面温度较低。上方熔盐处于接近相变温度状态,故壁面温度也接近为一定值。$t=8.5$ h 时,下部熔盐凝固后温度会有进一步下降,对应壁面温度也会较低,上方熔盐由于尚未凝固,壁面温度也沿熔盐高度方向逐渐增加至熔盐待凝状态对应的壁面温度水平。

根据上述热流密度的结果可以计算熔盐侧的换热系数。图 12 给出了对应图 10 中不同时间熔盐侧换热系数沿熔盐高度变化曲线。$t=1.0$ h 时,熔盐侧换热系数在整个熔盐高度方向上为一定值,等于 1 666.1 W/(m^2·K)。$t=2.5$ h 时,起始高度熔盐已经凝固,故熔盐侧换热系数开始也为一定值,等于 1 394.5 W/(m^2·K)。后续随高度增加,换热系数提高至液态换热系数水平;$t=8.5$ h 时的换热系数变化与 $t=2.5$ h 时类似,只不过壁面处熔盐已在大部分高度上凝固。后续有必要进一步探讨不同运行工况参数条件变化对自然对流换热系数的影响,并对结果进行实验验证。

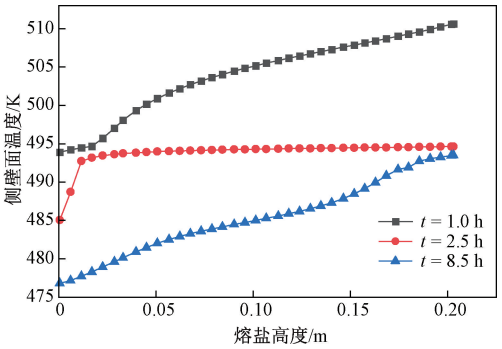


图 11 不同时间熔盐侧壁面温度沿熔盐高度变化曲线

Figure 11 Variations of wall temperature on the molten salt side along the height of molten salt at different times

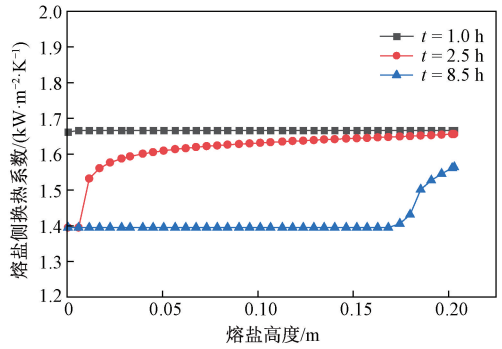


图 12 不同时间熔盐侧换热系数沿熔盐高度变化曲线

Figure 12 Variations of heat transfer coefficient on the molten salt side along the height of molten salt at different times

3 结论

(1)自然对流效应在熔盐凝固释热阶段依然扮演重要角色,尽管其强度较液态释热阶段大幅减弱。

(2)熔盐液相率变化呈现抛物线形状;熔盐相变期间的放热速率和空气出口平均温度线性下降趋势明显。放热速率由 11.2 W 降至 1.6 W,空气出口平均温度由 477.6 K 降至 473.7 K。

(3)根据计算数据求得液态熔盐侧自然对流换热系数为 1.666 1 kW/(m^2·K),固态熔盐换热系数为 1.394 5 kW/(m^2·K)。

参考文献:

[1] Li Shuangcheng, Wang Qiaoling, Liu Yinglu. Renewable energy development in China under dual carbon goal: opportunities and challenges[J]. Climatic and Environmental Research, 2024, 29(3): 390-398. [李双成, 王巧玲, 刘迎陆. “双碳”目标下的中国可再生能源发展:机遇与挑战[J]. 气候与环境研究, 2024, 29(3):

390-398.]

[2] Wu Haowen, Wang Jun, Gong Yingli, et al. Development status and application prospect analysis of energy storage technology[J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(5): 434-443. [吴皓文, 王军, 龚迎莉, 等. 储能技术发展现状及应用前景分析[J]. 电力学报, 2021, 36(5): 434-443.]

[3] Liu Ruili, Gao Qiongmin, Ma Jing, et al. Study on preparation of shaped phase change sheet and thermal performance of phase change wall[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(4): 105-110. [刘瑞丽, 高琼旻, 马静, 等. 定形相变板材制备及相变墙体热工性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(4): 105-110.]

[4] Rathore P K S, Sikarwar B S. Thermal energy storage using phase change material for solar thermal technologies: A sustainable and efficient approach[J], Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 277: 113134.

[5] Li Jingwei, Tang Zhiwei, Wang Hao. Performance research of low-temperature phase change heat storage materials and their application in mobile heat storage devices [J]. Chemical progress, 2021, 40 : 163-167. [李京卫, 唐志伟, 王昊. 低温相变蓄热材料性能研究及在移动蓄热装置中应用[J]. 化工进展, 2021, 40: 163-167.]

[6] Wang Hongming, Cheng Bo. Optimization study of phase change heat storage air source heat pump system and solar complementary heating system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 1980-1982. [王洪明, 程勃. 相变蓄热型空气源热泵系统与太阳能互补供暖系统的优化研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1980-1982.]

[7] Ma Shuang, Yang Qirong, Li Youping, et al. A review on preparation, thermal transport properties, phase-change characteristics, and thermal stability of molten salts [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141272.

[8] Bhatnagar P, Siddiqui S, Sreedhar I, et al. Molten salts: potential candidates for thermal energy storage applications [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(13): 17755-17785.

[9] Zhang Lijuan, Zhu Hongwei, Zeng Lingxiao, et al. Preparation and heat storage characteristics of high-temperature phase change macrocapsules of chloride eutectic salt [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 274: 112972.

[10] Li Y, Zhou S H, Wang S, et al. Preparation and thermal properties of a novel ternary molten salt/expanded graphite thermal storage material[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109273.

[11] Dai Yucheng, Wang Zengpeng, Liu Kaibao, et al. Research progress of heat storage and heat transfer enhancement based on phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 431-458. [戴宇成, 王增鹏, 刘凯豹, 等. 基于相变材料的储热器及其传热强化研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 431-458.]

[12] Shi J, Wang L, Chen S, et al. Thermal performance of phase change material based heat exchanger filled with inorganic salt/expanded graphite [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 87: 111240.

[13] Wang Liuyi, Huang Yaoqi, Li Linfeng, et al. Binary nitrate molten salt magnetic microcapsules modified with Fe_3O_4-functionalized carbon nanotubes for accelerating thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109394.

[14] Zhang Tengteng, Qu Zhiguo, Xu Hongtao, et al. Experimental study on performance of shell-in-tube latent heat ThermalEnergy storage system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021(9): 2345-2351. [张腾腾, 屈治国, 徐洪涛, 等. 管壳式相变蓄热系统性能实验研究[J]. 工程热物理学报, 2021(9): 2345-2351.]

[15] Han Tao, Ma Yanhua, Fang Jiabin, et al. Numerical simulation study of heat transfer characteristics on solar tube-and-shell phase change heat storage unit[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(3): 525-532. [韩涛, 马彦花, 方嘉宾, 等. 管壳式太阳能相变储热器传热特性的数值研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 525-532.]

[16] Khan S, Abdellatif H E, Belaadi A, et al. Numerical study of shell and tube thermal energy storage system: enhancing solidification performance with single-walled carbon nanotubes in phase change material[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 160: 108338.

[17] Han Zhenxing, Wickramaratne C, Goswami D Y, et al. Experimental study on operating characteristics of nitrate salt-based latent heat thermal energy storage unit[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 202: 117846.

[18] Knysh L. Thermo-fluid performance enhancement in a long double-tube latent heat thermal energy storage system [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 70: 108020.

[19] Pirasaci T, Wickramaratne C, Moloney F, et al. Influence of design on performance of a latent heat storage system at high temperatures[J]. Applied Energy, 2018, 224: 220-229.

[20] Zhang Shuai, Yan Yuying. Evaluation of discharging performance of molten salt/ceramic foam composite phase change material in a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit[J]. Renewable Energy, 2022, 198: 1210-1223.

(下转第 67 页)