

储热储冷多场景应用专刊



单罐熔盐储热系统的放热性能实验

李 炜¹, 聂阳彬², 李云飞¹, 刘绍鹏¹, 程晓君¹, 张永学²

(¹胜利油田技术检测中心, 山东 东营 257000; ²中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘 要: 本工作通过实验研究了采用直排管换热器的单罐熔盐储热系统放热性能, 分析了蓄热、放热及静置散热过程中的温度变化规律。实验表明, 在风机全功率运行时, 系统最大放热功率为 63.7 kW, 平均放热功率为 46 kW, 整体放热效率为 88%, 能够将冷水从 27℃ 加热至 64.4℃。放热过程中熔盐温度分布整体均匀, 但空气进口附近因局部换热强, 温度下降较快。在 12 小时静置散热过程中, 熔盐温度线性下降, 总降幅为 36.8℃, 平均散热功率为 4.8 kW, 垂直方向出现明显温度分层, 最大温差达 16.8℃。本研究为直排管换热器在单罐熔盐储热系统中的应用提供了实验依据, 对区域供热及工业储热工程设计具有参考价值。

关键词: 熔盐储热; 单罐系统; 放热性能; 直排管换热器; 静置散热

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0949

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-760-09

Heat release performance test of a single-tank molten salt thermal storage system

LI Wei¹, NIE Yangbin², LI Yunfei¹, LIU Shaopeng¹, CHENG Xiaojun¹, ZHANG Yongxue²

(¹Shengli Oilfield Technology Inspection Center, Dongying 257000, Shandong, China; ²China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: This study experimentally investigates the heat release performance of a single-tank molten salt storage system that utilizes a straight-tube heat exchanger. The study analyzes temperature variation patterns during heat storage, heat release, and static cooling processes. The experiments reveal that when the fan operates at full power, the system achieves a maximum heat release power of 63.7 kW, an average heat release power of 46 kW, and an overall heat release efficiency of 88%, allowing it to heat cold water from 27℃ to 64.4℃. During the heat release phase, the temperature distribution of the molten salt is generally uniform. However, near the air inlet, the temperature drops more rapidly due to intense local heat exchange. In the 12 h static cooling phase, the molten salt temperature decreases linearly by a total of 36.8℃, with an average cooling power of 4.8 kW. Notably, significant vertical temperature stratification is observed, with a maximum temperature difference of 16.8℃. This study provides experimental evidence supporting the use of straight-tube heat exchangers in single-tank molten salt storage systems and offers valuable insights for regional heating and industrial heat storage engineering design.

收稿日期: 2025-10-23; 修改稿日期: 2025-12-11。

第一作者: 李炜 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为油田节能技术, E-mail: liwei027.slyt@sinopec.com; 通信作者: 张永学, 教授, 主要研究方向为动力工程及工程热物理, E-mail: zhyx@cup.edu.cn。

引用本文: 李炜, 聂阳彬, 李云飞, 等. 单罐熔盐储热系统的放热性能实验[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 760-768.

Citation: LI Wei, NIE Yangbin, LI Yunfei, et al. Heat release performance test of a single-tank molten salt thermal storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 760-768.

Keywords: molten salt thermal energy storage; single-tank system; heat discharge performance; straight-tube heat exchanger; static cooling

化石燃料燃烧产生的环境污染与温室气体排放问题日益严峻^[1-2], 推动我国能源结构向太阳能、风电等新能源快速转型。然而, 新能源发电固有的间歇性与波动性, 给电网稳定运行与能源高效消纳带来了巨大挑战。在此背景下, 储热技术(thermal energy storage, TES)作为平衡能源供需、提升利用效率的关键手段, 展现出广阔的应用前景。

TES作为提升能源利用效率和平衡供需的重要手段, 在众多领域展现出替代传统直接加热的潜力^[3]。其核心价值在于能有效降低加热过程的一次能源消耗, 实现显著的节能与减排效益。目前主流的TES技术包括显热储热、潜热储热(相变储热)及热化学储热等^[4]。其中, 熔盐储热作为一种成熟的显热储热技术, 凭借其高储热密度、优异的热稳定性、低蒸汽压及相对低廉的成本等优势, 已在太阳能热发电、火电机组调峰调频、工业余热回收及区域供热等领域获得广泛应用^[5]。熔盐系统能够高效储存热能, 并在需要时提供稳定、持续的热量输出, 具备突出的经济性和环境友好性。

熔盐储热系统主要分为双罐式与单罐式^[6]。双罐系统结构相对复杂、初始投资成本较高, 使其应用多集中于大型项目, 如光热电站及火电灵活性改造^[7]。相比之下, 单罐熔盐储热系统凭借结构简化、投资成本显著降低等优势^[8-10]得到了更多潜在应用场景的关注。

在单罐系统中, 内置换热器的性能至关重要, 目前研究多集中于内置盘管式换热器的结构优化。孙晓丽等^[11]的实验研究表明, 在盘管外侧增设环形挡板可强化罐内熔盐的自然对流, 有效提升换热效率。施素丽等^[12]进一步优化了环形挡板结构尺寸, 发现当圆柱形隔板直径取罐体直径的0.6倍时, 系统放热效果最佳。Chen等^[9]则聚焦盘管换热器自身结构, 研究表明当量纲为1节距 $L/d=4$ 时, 放热功率和放热量达到最大, 此时熔盐温度与流场分布均匀, 避免了温度分层和旋涡的形成。在最优 L/d 前提下, 量纲为1管径 d/a 的变化会影响散热功率: 随 d/a 增大, 散热功率呈现先增后减的趋势; 当 $d/a=0.25$ 时, 熔盐流动更为顺畅且无阻碍传热的旋涡, 放热性能最优。此外, 孔庆龙等^[13]对比了单、

双盘管换热器换热性能, 指出叉排布置的双盘管换热器更具优势。

综上所述, 现有关于单罐熔盐储热系统内置换热器的研究主要集中于内置盘管式换热器的结构优化与放热性能强化, 且多限于小试规模。然而, 对于成本更低、维护更方便的内置直排管换热器在蓄/放热过程中的性能表现, 尚未见公开报道。为此, 本工作基于卧式储罐结构, 构建了一套结合直排管换热器的中试规模单罐熔盐储热实验系统, 通过实验研究了该系统在放热过程中以及静置散热过程中熔盐温度场的动态变化特性, 揭示了其放热规律, 以期单罐熔盐储热系统的实际工程应用与优化设计提供参考。

1 实验系统和方法

1.1 实验系统

图1所示为实验系统流程简图, 图2为其实物图。该实验台主要由熔盐储罐、循环风机、风水换热器(翅片管换热器)及两个储水罐等核心部件构成。循环风机采用变频控制, 调频范围5~50 Hz, 功率为5.5 kW, 最大风量3980 m³/h, 全压3650 Pa。

熔盐储罐底部布置有电加热器, 内部集成有排管换热器。具体而言, 储罐底部共安装20个电加热器, 单组功率3.5 kW, 表面温度最大800℃, 分

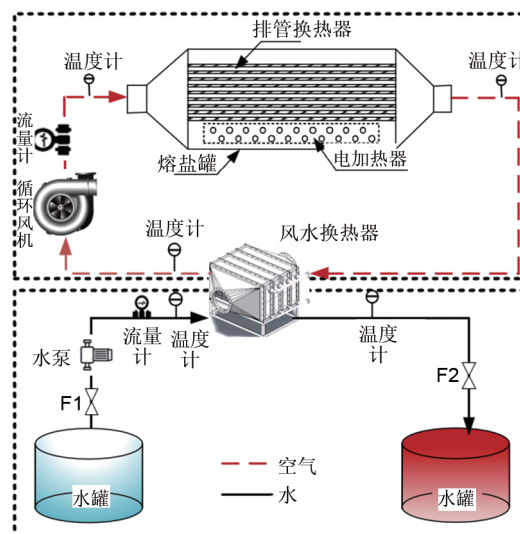


图1 实验系统流程图

Fig. 1 Experimental system flowchart



图2 实验装置图

Fig. 2 Experimental apparatus diagram

上下两排布置(每排 10 个), 总加热功率为 70 kW。罐体、管道及风/水换热器的保温材料均采用硅酸铝纤维。该材料具有耐高温与导热系数低的特点, 适用于高温环境下的隔热防护。其中, 罐体保温层厚度为 200 mm, 管道与风水换热器的保温层厚度则为 50 mm。

储热阶段。启动底部电加热器, 将储罐内的熔盐加热至设定温度。

放热阶段。循环风机驱动空气流经熔盐储罐内部的排管换热器, 熔盐热量被空气吸收形成高温空气。此高温空气随后进入风水换热器, 将热量传递给水并加热至目标温度, 从而完成熔盐热量的放热过程。

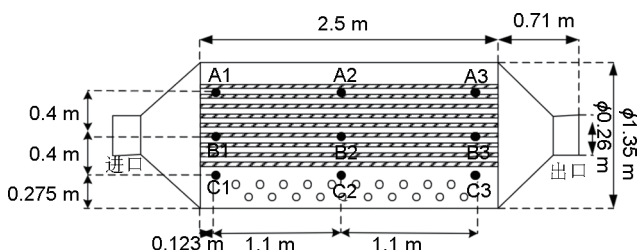


图3 熔盐储罐内温度传感器布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the temperature sensor arrangement inside the molten salt storage tank

图3展示了熔盐储罐内部温度传感器的布置方案。罐内共安装9个温度传感器: 在垂直方向上设置三个水平测量层, 最底层热电偶(C1, C2, C3)距罐底高度为0.275 m, 相邻垂直层间距为0.4 m; 在水平方向上, 每层内的3个温度传感器呈等间距布置, 水平间距为1.1 m。所有温度数据均由西门子EM AR04数据采集模块实时采集, 数据采集频率为5 s。

1.2 实验方法

本实验采用河北旭兴新能源科技有限公司生产的三元硝酸盐(53% KNO_3 +40% NaNO_2 +7%

NaNO_3)作为储热介质, 其物性参数如表1所示, 物性参数公式拟合的温度区间为423~773 K。本实验是为了验证单罐熔盐储热在风机全功率运行下系统的放热性能, 实验前将熔盐加热至400℃左右。操作流程如下: 启动水泵, 通过手动调节阀门将水流量稳定至预设值, 然后风机选择手动控制模式, 将风机的频率调至最大(50 Hz)。

表1 Hitec熔盐物性参数

Table 1 Hitec molten salt physical property parameters

参数	数值
凝固温度/℃	142
使用温度上限/℃	550
密度/ m^3	$2375.24 - 1.057T + 2.57 \times 10^{-4}T^2$
黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$1.06 \times 10^{-4} + 691.10e^{-\left(\frac{T}{31.14}\right)} + 0.05e^{-\left(\frac{T}{105.96}\right)}$
比热容/[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	1422
导热系数/[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	$0.2 + 0.24e^{-\left[0.5\left(\frac{T-439.64}{209.65}\right)^2\right]}$

1.3 数据分析

(1) 系统放热功率 P

$$P = c_w \rho_w q_w (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (1)$$

式中, c_w 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; q_w 风水换热器中流过的水流量, m^3/h ; ρ_w 为水的密度; T_{out} 为风水换热器出口水温, $^{\circ}\text{C}$; T_{in} 为风水换热器进口水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 水吸收热量 Q

$$Q = \int_{t_0}^t c_w \rho_w q_w (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) dt \quad (2)$$

式中, t_0 为放热过程中的初始时刻; t 为放热过程中的某一时刻。

(3) 放热效率 ε

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^9 T_i}{9} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_s} = \frac{\int_{t_0}^t c_w \rho_w (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) dt}{c_s m_s (T_{s_0} - T_s)} \quad (4)$$

式中, Q_s 为熔盐的放热量; c_s 为熔盐的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; M 为熔盐的质量, kg ; T_{s_0} 为熔盐初始的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为某时刻熔盐的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 误差分析

实验过程的误差主要来源于电磁流量计的水流量、温度传感器的进出口水温和熔盐温度、熔盐的

质量测量误差。由于本研究的熔盐为直接购买，质量满足设计容量，因此不考虑熔盐的质量误差。本实验中采用的电磁流量计型号是Focbar2202A-20，测量温度的传感器为PT100，测量仪器不确定度如表2所示。根据式(5)和(6)计算得到放热量的不确定度为1%。

表2 实验仪器不确定度

Table 2 Instrument uncertainty

设备	精度
数据采集仪	$\pm 0.2\%$
电磁流量计	$\pm 0.5\%$
PT100(水)	$\pm 0.35^\circ\text{C}$
PT100(熔盐)	$\pm 1.15^\circ\text{C}$

$$Y = f(X_1, X_2 \cdots X_n) \quad (5)$$

$$\Delta Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} \Delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} \Delta X_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n} \Delta X_n\right)^2} \quad (6)$$

式中， Y 为间接测量值； $X_1, X_2 \cdots X_n$ 为直接测

量值。

2 结果与讨论

2.1 蓄热过程中熔盐温度分布

在熔盐保持液态的加热过程中，其水平方向温度分布整体较为均匀，未出现明显分层。然而在垂直方向上，尤其在加热初期，存在显著的温度分层现象，且主要集中在顶部区域。加热初期，熔盐整体温度较低、黏度较大，自然对流较弱，热量传递主要依靠热传导，导致远离热源的顶部熔盐升温较慢，与其他部位形成较大温差，从而产生明显的温度分层。随着加热的持续，熔盐温度逐渐升高，黏度相应降低，罐内自然对流不断加强。大约加热2小时后，熔盐温度升至约 290°C ，罐内各区域温度趋于均匀，温度分布逐渐稳定。最终，熔盐罐内温度呈现为底部最高、顶部次之、中部最低的特征。

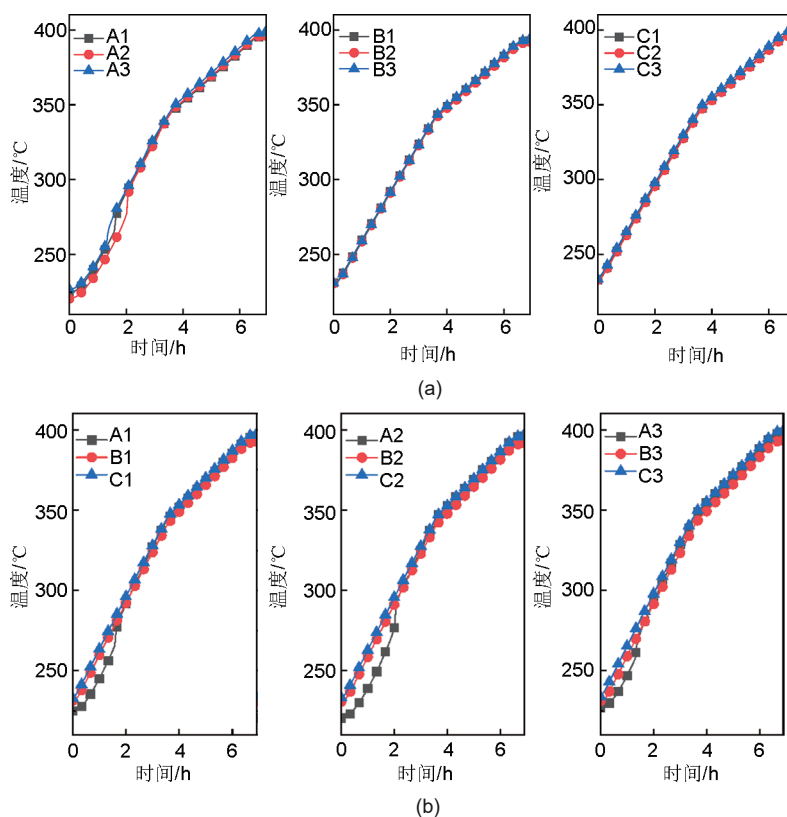


图4 蓄热过程中熔盐温度沿(a)水平和(b)垂直方向的分布

Fig. 4 Distribution of molten salt temperature during the heat storage process along (a) The horizontal and (b) Vertical directions

2.2 放热过程中熔盐温度分布

图5展示了放热过程中熔盐沿垂直与水平方向的温度分布。整体而言,整个放热阶段罐内熔盐温度分布较为均匀,未出现显著的温度分层现象。在放热初期,熔盐整体温度较高,黏度较低(根据表1物性参数,熔盐在300℃以上时黏度显著降低),罐

内自然对流强烈。在浮升力驱动下,高温熔盐向上运动,使得顶部温度略高于中底部,但温差维持在5℃以内。随着放热过程进行,熔盐温度逐渐下降,其黏度随之增大,导致自然对流强度减弱,底部高温熔盐向顶部的迁移速率变慢,使得底部熔盐温度相对较高。

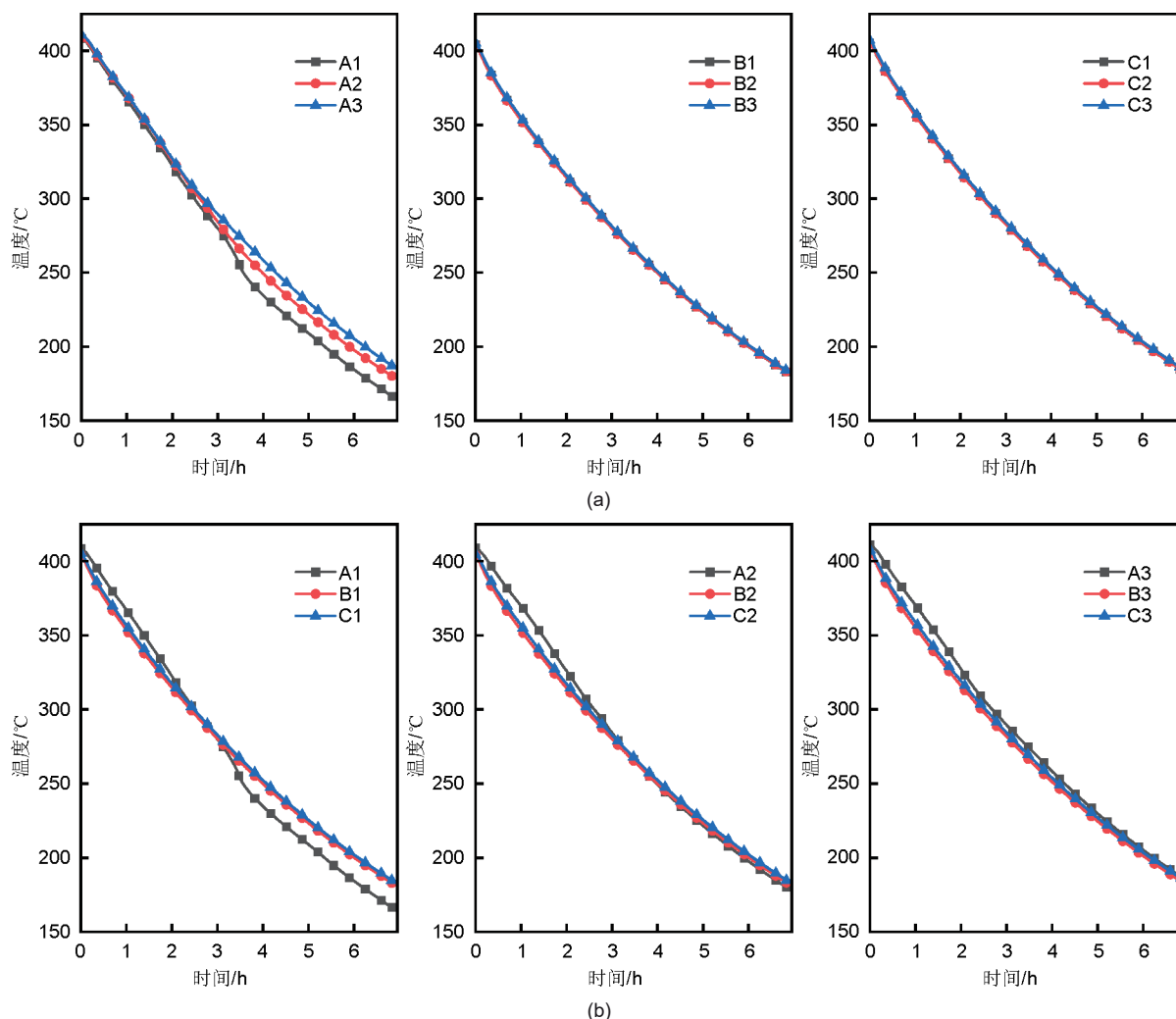


图5 放热过程中熔盐温度沿(a)水平和(b)垂直方向的分布

Fig. 5 Shows the distribution of molten salt temperature during the exothermic process along (a) The horizontal and (b) Vertical directions

值得注意的是,图中A1测点处的温度始终低于同层其他测点,且下降速率更快。这是由于A1传感器布置于空气进口附近,该区域熔盐与低温空气的初始温差最大,局部对流换热强度最高;同时,A1点靠近熔盐自由液面,存在额外的表面散热。随着放热进行,罐内整体自然对流减弱,A1点附近被冷却的熔盐难以被及时替换,形成局部

“低温”,导致其温度差异更为明显。这一现象凸显了局部流动与换热条件对温度监测结果的重要影响。

2.3 进出口水温变化

如图6所示,在与图8相同的流量条件下,系统出口水温呈现先升高后降低的趋势,而熔盐温度的下降速率则表现为先快后慢。在放热初期,熔盐

初始温度较高,系统放热能力强,冷水被迅速加热,同时熔盐温度下降较快;随着放热过程的持续,熔盐温度逐渐降低,系统放热能力相应减弱,导致出口水温下降,同时熔盐的降温速率也随之减缓。

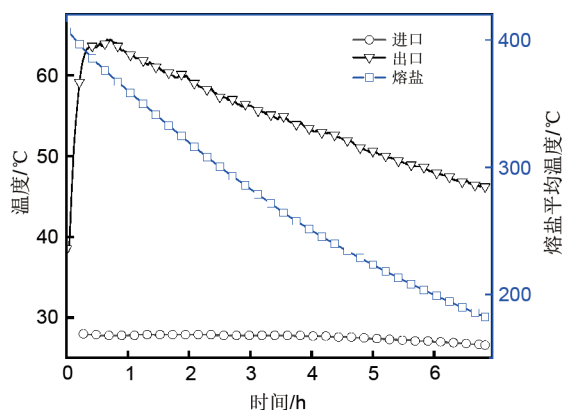


图6 进出口水温以及熔盐平均温度变化
Fig. 6 Changes in import and export water temperature

从图6、7可以看出,冷水初始温度为27℃,最高被加热至64.4℃,最大温升达37.4℃,平均温升为27℃。实验过程中,出口水温虽逐步下降,但仍可维持在50℃以上持续约5.5小时。至实验结束时,冷水温升保持在20℃左右,而熔盐累计温降为224℃。实际运行中,通过合理调控出口水温,可有效延长系统供热时间,提升整体热利用率。

2.4 放热功率变化

图9展示了系统在风机全功率运行下的放热功

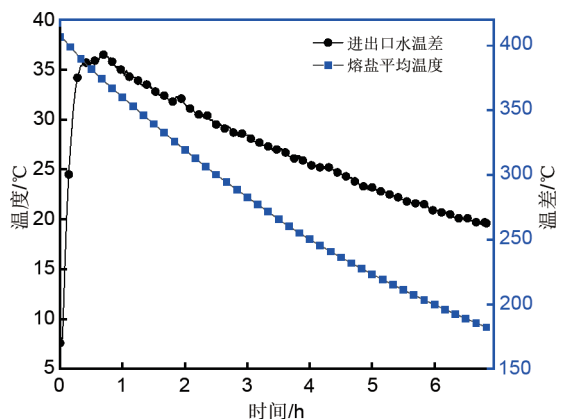


图7 进出口水温差与熔盐平均温度变化
Fig. 7 Inlet and outlet water temperature difference and average molten salt temperature variation

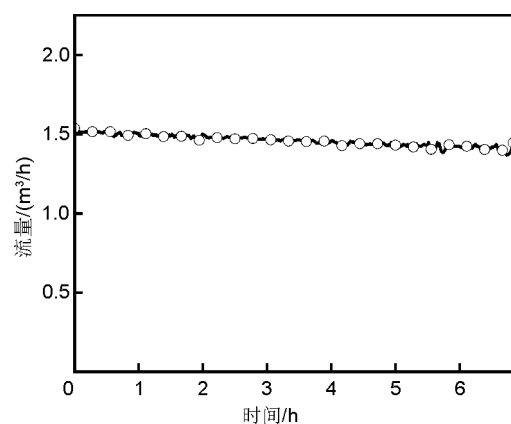


图8 放热过程中流量变化
Fig. 8 Flow variation during exothermic process

率变化情况。如图所示,放热功率的变化规律与出口水温基本一致:系统在初期达到最大放热能力后,随放热时间推移逐渐降低。放热过程中的最大功率达到63.7 kW,表明直排管换热器在高温差下具备优异的瞬时换热能力。

放热功率的衰减主要源于两方面:一是熔盐温度的下降,降低了换热的平均温差这一驱动力;二是熔盐黏度随温度降低而增大,削弱了罐内自然对流强度,降低了熔盐侧的对流换热系数。在风机全功率这一特定工况下,系统丧失了对出口水温与放热速率的主动调节能力,导致放热过程剧烈而集中。实验显示,经过6.8小时的放热,功率仍保持在30 kW以上,整个放热阶段的平均功率为46 kW。

值得强调的是,实验结束时熔盐温度(182℃)仍远高于其凝固点(142℃),系统仍保有可观的显热,此时系统显热利用率为0.85。因此,通过对风机频率的合理调控,不仅可延长释能时间,还可进一步提高储热系统的显热利用率,增强系统运行的经济性与灵活性。

2.5 不同流量下和不同环境温度下的熔盐放热量与水吸收热量

不同环境温度与流量条件下熔盐放热量与水吸收热量的变化过程如图10所示。具体而言,在环境温度为34℃、水流量为1.5 m³/h时,熔盐放热量为532.97 MJ,水吸热量为466.92 MJ,系统放热效率为0.88;当环境温度降至24℃、水流量保持1.5 m³/h时,熔盐放热量为493.40 MJ,水吸热量为330.55 MJ,系统放热效率降至0.67;在环境温度为24℃、水流量提高至1.7 m³/h时,熔盐放热量为367.40 MJ,水吸热量为254.12 MJ,系统放热

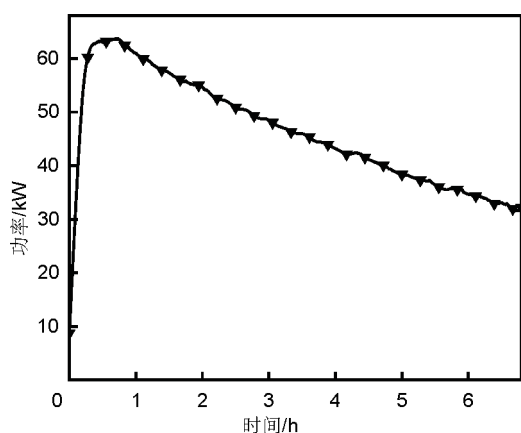


图9 系统放热过程中的放热功率变化

Fig. 9 Heat release power variation during the system's heat release process

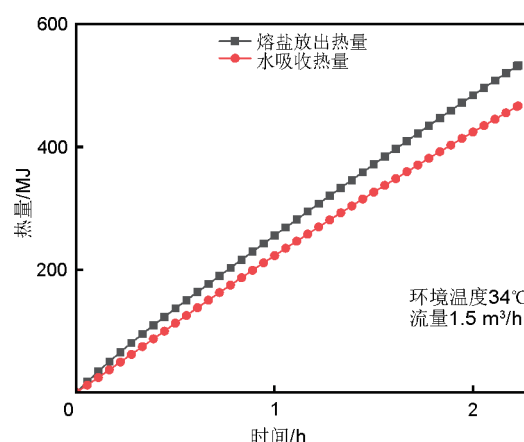
效率为0.69。实验结果表明,在流量一定时,环境温度对系统放热效率与放热时长均具有显著影响。环境温度越低,系统向环境的散热损失越大,导致水吸收热量减少,同时熔盐温度下降加快,系统热效率降低,放热过程缩短。在环境温度一定时,增大水流量将提高系统热负荷,加速熔盐温度下降,从而缩短放热时长;相比之下,流量变化对系统热效率的影响相对较小。

2.6 静置散热过程分析

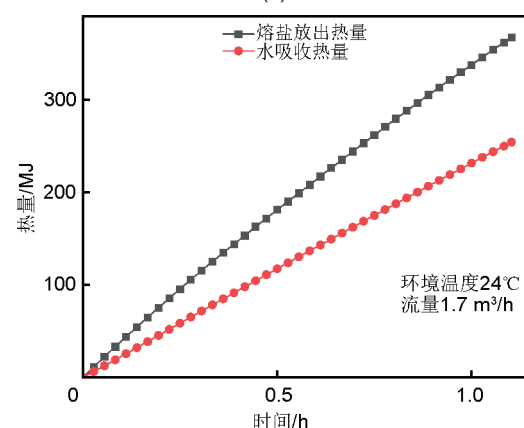
图10展示了熔盐在12小时静置散热过程中温度分布的变化。在此期间,垂直方向上出现了显著的温度分层,而水平方向温度分布相对均匀。这是由于在静态条件下,熔盐内部热量传递主要依赖自然对流和热传导。受浮升力驱动,高温熔盐不断向上聚集,而低温熔盐下沉至底部,形成稳定的热分层结构。随着散热进行,底部熔盐温度持续下降,与顶部温差逐渐拉大,实验结束时顶部、中部和底部熔盐的平均温度分别为370.1℃、366.1℃和353.3℃,最大平均温差达16.8℃,这种分层现象意味着储罐上部的保温性能更为关键。

从图12可以看出,经过12小时的静置散热过程,熔盐温度呈近似线性下降,总降温幅度达36.8℃,平均温降速率为3.1℃/h。从散热量变化曲线可知,在散热初始阶段,由于熔盐初始温度较高,与环境之间的温差较大,且罐内自然对流作用显著,因此该阶段散热速率较快。在此期间,熔盐累计散热量为209.15 MJ,相当于放热实验中前期1小时的放热量,对应平均散热功率为4.8 kW。

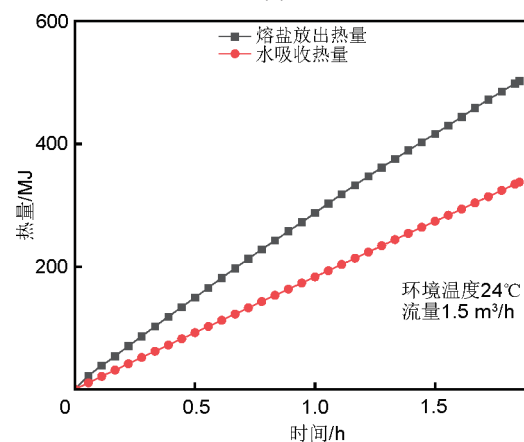
上述结果表明,熔盐储热系统在静置状态下仍



(a)



(b)



(c)

图10 不同流量下和环境温度熔盐放出热量和水吸收热量随时间变化

Fig. 10 Changes over time in the heat released by molten salt and the heat absorbed by water at different flow rates and ambient temperatures

存在可观的热量损失,尤其在高温区间由于对流强烈散热更为明显。因此,为提升系统整体热效率并减少非运行时段的热能损失,采取高效保温措施显得尤为重要。良好的保温设计不仅可有效降低散热

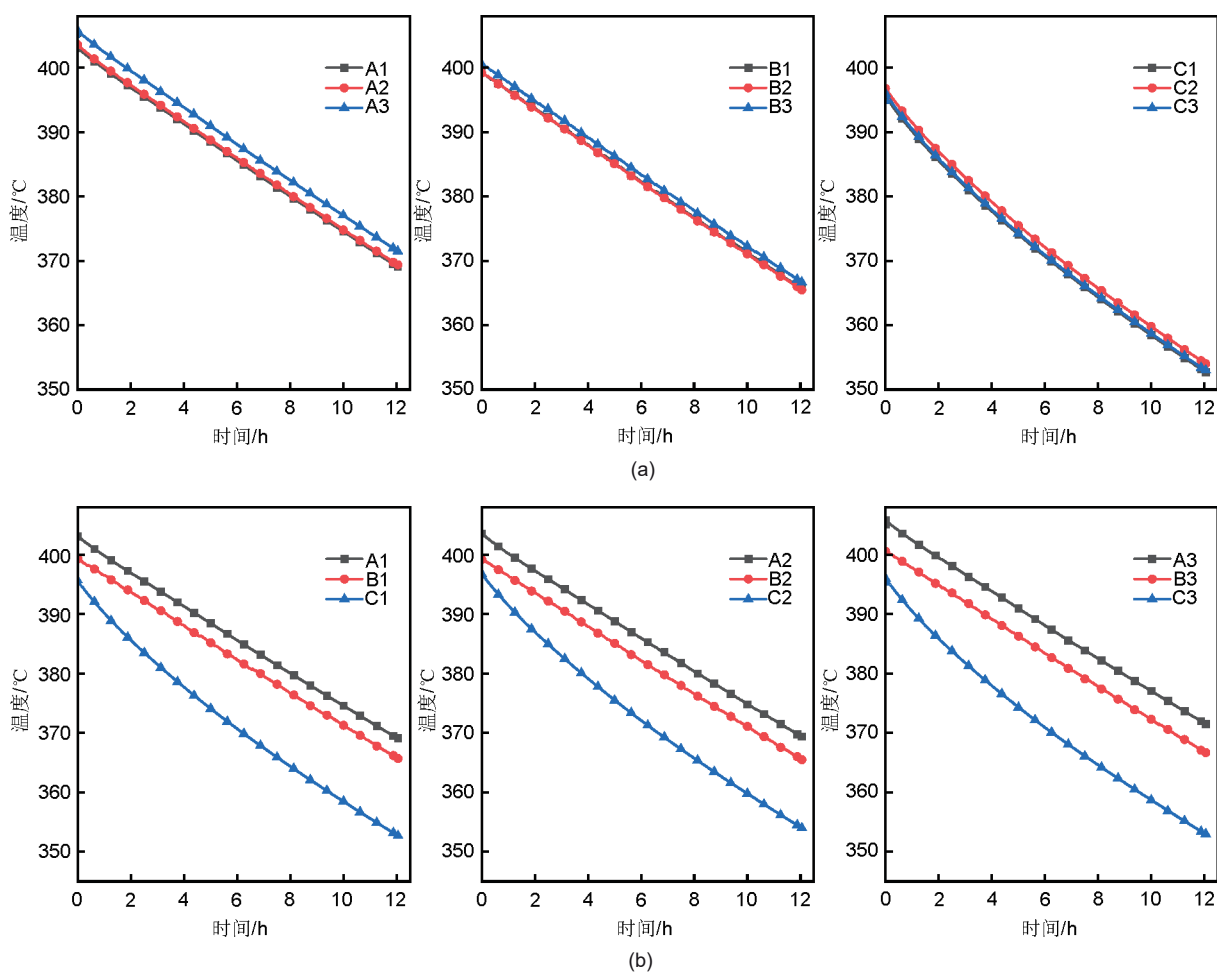


图11 静置散热过程中熔盐温度沿 (a) 水平和 (b) 垂直方向的分布

Fig. 11 Distribution of molten salt temperature along (a) Horizontal and (b) Vertical directions during natural convection heat dissipation process

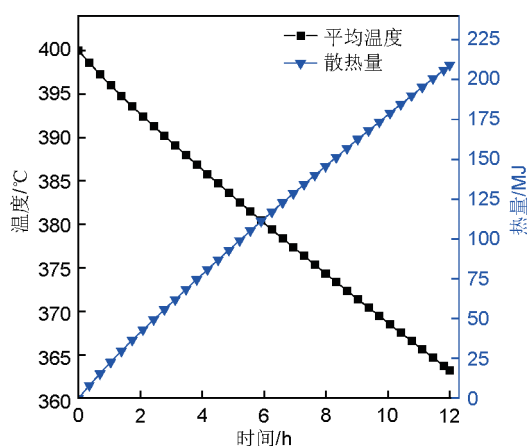


图12 熔盐平均温度和散热量变化

Fig. 12 Variation of average temperature and heat dissipation of molten salt

速率, 维持熔盐运行温度, 还能够提升系统在实际工况下的能量利用效率与经济性, 对熔盐储热技术

的工程应用具有重要的实践意义。

3 结 论

本工作对采用直排管换热器的单罐熔盐储热系统的放热性能进行了研究, 主要结论如下。

(1) 系统在风机全功率运行条件下可实现 63.7 kW 的最大放热功率, 平均放热功率为 46 kW, 整体放热效率达到 88%, 表明系统具有良好的释热能力和实际应用潜力。

(2) 放热过程中, 熔盐温度分布在垂直与水平方向均较为均匀, 未出现显著分层, 仅在空气进口附近因局部换热强度大而出现温度下降较快的现象。

(3) 通过调控风机运行频率可有效延长放热时间, 提高系统显热利用率。实验结束后熔盐温度仍

高于凝固点,说明系统仍具备进一步释热能力,在实际运行中可通过智能控制实现更优的热能输出稳定性与经济性。

(4) 静置散热实验表明,熔盐在12小时静置中温度呈线性下降,总降幅 36.8°C ,平均散热功率为 4.8 kW ,垂直方向出现明显温度分层,最大平均温差达 16.8°C ,突出了系统保温在非运行时段的重要性。

(5) 本研究为直排管换热器在单罐熔盐储热系统中的应用提供了实验依据,对中小规模储热系统设计、运行优化及区域供热场景中的工程应用具有参考价值。

参考文献

- [1] 王韵怡,张金亚. 太阳能储热井口原油加热系统性能研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2025, 38(1): 49-58. DOI:10.12422/j.issn.1006-396X.2025.01.007.
WANG Y Y, ZHANG J Y. Study on solar heating crude oil system with thermal energy storage-based installation[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2025, 38(1): 49-58. DOI: 10.12422/j.issn.1006-396X.2025.01.007.
- [2] 林长华,李洋,陈红伟,等. 太阳能加热原油系统设计与热力学性能分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2023, 43(1): 43-48. DOI: 10.12422/j.issn.1672-6952.2023.01.008.
LIN C H, LI Y, CHEN H W, et al. Design and thermodynamic performance analysis of solar heating crude oil system[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2023, 43(1): 43-48. DOI: 10.12422/j.issn.1672-6952.2023.01.008.
- [3] 姜竹,邹博杨,丛琳,等. 储热技术研究进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2746-2771. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0538.
JIANG Z, ZOU B Y, CONG L, et al. Recent progress and outlook of thermal energy storage technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2746-2771. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0538.
- [4] 李昭,李宝让,陈豪志,等. 相变储热技术研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(12): 5066-5085. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0376.
LI Z, LI B R, CHEN H Z, et al. State of the art review on phase change thermal energy storage technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(12): 5066-5085. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0376.
- [5] 张钟平,刘亨,谢玉荣,等. 熔盐储热技术的应用现状与研究进展[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 40-47. DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.006.
ZHANG Z P, LIU H, XIE Y R, et al. Application and research progress of molten salt heat storage technology[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 40-47. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.006.
- [6] CHE S, KIM J, JEON J, et al. Thermodynamic analysis of molten salt-based single-tank thermal energy storage system with heat transfer enhanced by gas injection[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109959. DOI:10.1016/j.est.2023.109959.
- [7] SUN F, JI J X, ZENG G, et al. Employment of molten salt thermal energy storage coupled to coal-fired power unit for power grid peak shaving: A thermodynamic study[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 131: 117503. DOI:10.1016/j.est.2025.117503.
- [8] CHEN X T, LU Y W, KONG Q L, et al. Research on dimensionless structure size of coil heat exchanger in heat discharging process of molten salt single tank heat storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119367. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119367.
- [9] HOFFMANN J F, FASQUELLE T, GOETZ V, et al. Experimental and numerical investigation of a thermocline thermal energy storage tank[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 896-904. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.12.053.
- [10] KIM D H, YOON S H, KIM Y, et al. Experimental studies of the discharge performance of single-medium TES for CSP applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 499-507. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.057.
- [11] 孙晓丽,鹿院卫,崔锡民,等. 熔融盐单罐储热系统释热传热规律研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 1032-1037.
SUN X L, LU Y W, CUI X M, et al. Heat discharge research of molten salt in single energy storage tank[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5): 1032-1037.
- [12] 施素丽,张银和,于强,等. 熔盐单罐释热过程圆柱形隔板径向尺寸优选[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 312-319. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1299.
SHI S L, ZHANG Y H, YU Q, et al. Radial dimension optimization of annular baffle in single thermal storage tank with molten salt[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(4): 312-319. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1299.
- [13] 孔庆龙,鹿院卫,于强,等. 熔盐单罐双盘管释热换热器布置方式优选[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 209-215. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-1388.
KONG Q L, LU Y W, YU Q, et al. Optimum layout of molten salt single tank double coil heat releasing heat exchanger[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(8): 209-215. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-1388.