

# 电加热单罐熔盐储能供暖装置实验研究

储 锐\*, 李志博, 万博文, 于国清#

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年9月2日; 录用日期: 2025年9月12日; 发布日期: 2025年10月10日

## 摘 要

在全球能源转型的背景下, 储能技术的研究愈发重要。本次测试针对河北永昕锅炉有限公司生产的相变熔盐储能罐, 旨在测量其在充放电工况及自然散热下的温度分布、热交换效率和电功率消耗情况。通过高精度的温度传感器、风速仪和数据采集系统, 测试分为储能阶段、释能阶段和自然冷却阶段, 记录了熔盐罐内外的温度变化、风速及能耗数据。结果表明, 熔盐罐在储能和释能过程中存在一定的热损失, 且保温性能有待提升。基于测试数据, 提出了优化熔盐加热温度、降低出风温度及改进储能罐结构的建议, 为进一步提高储能罐的性能提供了参考依据。

## 关键词

储能技术, 熔盐罐, 温度分布, 热交换效率, 电功率消耗, 性能测试

# Experimental Study on Electric Heating Single-Tank Molten Salt Thermal Energy Storage Heating Device

Kai Chu\*, Zhibo Li, Bowen Wan, Guoqing Yu#

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 2, 2025; accepted: September 12, 2025; published: October 10, 2025

## Abstract

Against the backdrop of the global energy transition, the research on energy storage technologies has become increasingly important. This test focuses on the energy storage molten salt tank produced by Hebei Yongxin Boiler Co., Ltd., aiming to measure its temperature distribution, heat

\*第一作者。

#通讯作者。

exchange efficiency, and electric power consumption under charging and discharging conditions, as well as during natural heat dissipation. By using high-precision temperature sensors, anemometers, and a data acquisition system, the test is divided into three stages: the energy storage stage, the energy release stage, and the natural cooling stage. The temperature changes inside and outside the molten salt tank, wind speed, and energy consumption data are recorded. The results show that there are certain heat losses during the energy storage and release processes of the molten salt tank, and its thermal insulation performance needs to be improved. Based on the test data, suggestions such as optimizing the molten salt heating temperature, reducing the outlet air temperature, and improving the structure of the salt storage tank are put forward, providing a reference for further enhancing the performance of the energy storage molten salt tank.

## Keywords

Energy Storage Technology, Molten Salt Tank, Temperature Distribution, Heat Exchange Efficiency, Electric Power Consumption, Performance Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景

在全球能源转型与“双碳”目标驱动的背景下，储能技术成为解决可再生能源间歇性、提升能源利用效率的关键手段[1]。熔盐储能技术因其宽温域(-50℃至 1000℃)、高储能密度(可达 800 MJ/m<sup>3</sup>)及长周期稳定性，在光热发电、工业余热回收及区域供暖等领域展现出显著优势[2]。然而，现有研究多集中于高温熔盐(>300℃)的太阳能热发电应用[3]，对中低温熔盐(200℃~500℃)在供暖领域的系统性实验研究仍存在不足[4]。

在技术层面，熔盐储热装置的性能优化面临多重挑战。首先，熔盐的腐蚀性对设备寿命构成威胁，研究表明硝酸盐熔盐在 150℃下对碳钢的腐蚀速率可达 0.5 mm/year [5]，而添加缓蚀剂或采用陶瓷涂层可降低腐蚀风险[6]。其次，相变过程中的传热效率直接影响系统响应速度，纳米颗粒掺杂可使熔盐导热系数提升 40%以上[7]，但长期循环后的材料相容性仍需验证。此外，熔盐罐的保温设计对减少热损失至关重要，实验表明传统硅酸铝纤维保温层的热损失率在自然冷却阶段可达 12.3%/h [8]，而采用多层真空绝热结构可降低至 5%/h 以下[9]。

国内研究方面，熔盐供暖技术尚处于示范阶段。李等[10]指出，我国北方燃煤供暖占比超 60%，熔盐储热结合低谷电加热可减少 30%的碳排放。然而，现有熔盐罐设计存在温度分布不均、热交换效率低等问题，例如某示范项目在释能阶段进出风温差仅为 60℃，远低于理论值[11]。国际研究则更关注系统集成，如 Yang 等[12]提出熔盐-热泵耦合系统可将综合能效提升至 85%，但未涉及装置级实验验证。

因此，本研究以河北永昕锅炉有限公司的相变熔盐储能罐(简称“储能罐”)为对象，通过多工况实验(储能、释能、自然冷却)揭示温度分布、热损失与电耗的关联机制，研究结果为单罐电加热熔盐储能罐在农业大棚的应用提供科学依据，为农业大棚移峰填谷的应用提供技术支持。

## 2. 测试方案

### 2.1. 测试对象

本次测试的对象为储能罐，该熔盐罐由河北永昕锅炉有限公司生产。罐体采用椭圆结构设计，具备

良好的强度和耐腐蚀性。罐体外部用金属柜包围，避免高温导致熔盐泄漏伤害周围人员和环境。内部填充 Solar Salt (60%  $\text{NaNO}_3$  + 40%  $\text{KNO}_3$ ) 720 kg，工作温度范围设定在  $200^\circ\text{C}$ ~ $500^\circ\text{C}$  之间。储能罐外观图见图 1，储能罐结构示意图见图 2。



Figure 1. Exterior diagram of salt storage tank  
图 1. 储能罐外观图

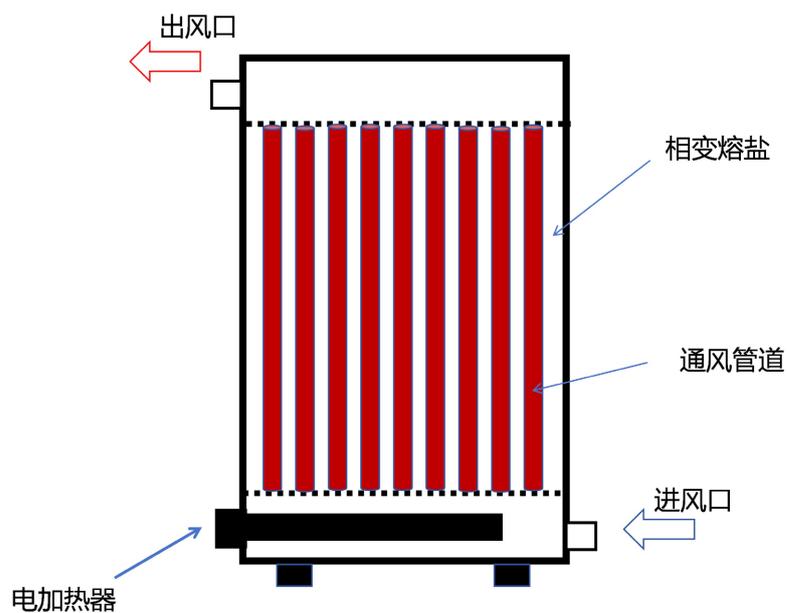


Figure 2. Schematic diagram of the structure of the salt storage tank  
图 2. 储能罐结构示意图

## 2.2. 测试仪器

1) 温度传感器: 采用 K 型热电偶温度计, 共计 10 个。其中, 3 个布置在熔盐罐内部不同高度位置(顶部、中部、底部), 用于监测熔盐主体温度变化; 3 个布置在储盐罐外壁不同方位, 以捕捉外壁温度分布情况; 1 个布置在装置外壁, 以监测装置受熔盐温度影响; 1 个布置在室内, 测得室内环境温度; 另外 2 个分别置于进出风口处, 实时测量进出风温度。这些温度传感器精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 能够满足温度测量需求。热电偶编号见表 1。

**Table 1.** Thermocouple number

**表 1.** 热电偶编号

编号	位置
101	罐内熔盐上部
102	罐内熔盐中部
103	罐内熔盐下部
104	进风温度
105	出风温度
111	熔盐罐外壁上部
112	熔盐罐外壁中部
113	熔盐罐外壁下部
114	熔盐罐周围温度
115	整个厂房环境温度

2) 风速仪: 选用高性能热线风速仪(见图 3), 分别安装在进出风口的关键位置。该风速仪测量范围为 0 m/s~30 m/s, 精度可达 $\pm 0.1$  m/s, 能够准确测量不同工况下进出风口的空气流动速度。



**Figure 3.** Anemometer model

**图 3.** 风速仪型号

3) 功率分析仪：连接到熔盐罐的供电系统，采用万用表(见图 4)，可实时监测并记录运行过程中的电流和电压。



Figure 4. Multimeter model  
图 4. 万用表型号

4) 数据采集系统：配备专业的数据采集系统，具备高速、大容量的数据采集和存储能力(见图 5)。采集频率设定为 30 s/次，能够实时采集并存储各项温度数据，确保数据的完整性和准确性。同时，该系统具备数据传输和远程监控功能，便于测试人员随时查看和分析数据。



Figure 5. Data acquisition instrument model  
图 5. 数据采集仪型号

### 2.3. 测试工况

1) 工况一：储能阶段

额定功率储能：启动熔盐罐的加热装置，以额定功率 8.5 kW 向罐内输入能量。每 30 s 记录一次熔盐罐内不同位置(顶部、中部、底部、内壁)的温度、进出风口的温度和风速，以及电功率消耗数据。持续监测直至熔盐温度达到设计最高温度 500℃，并稳定运行后停止记录。

### 2) 工况二：释能阶段

满负荷释能：在储能达到设计容量且熔盐温度稳定在最高温度后，停止加热装置，开启释能装置，以最大释能流量向外部系统释放能量。同样每隔 30 s 记录熔盐罐内温度、进出风口温度和风速、电功率消耗等数据，直至熔盐温度下降至 200℃或外部系统不再需要能量供应为止。

### 3) 工况三：自然冷却阶段

在储能达到一定水平且释能过程稳定后，停止运行，使储能罐进入相对稳定的工作状态。持续监测，每隔 30 s 记录各项参数，重点分析储能罐在自然冷却运行过程中的温度波动情况。

## 3. 各工况下的实验分析

### 3.1. 温度数据

#### 1) 储能阶段

在额定功率加热时，储能罐内温度从初始温度 180℃开始逐渐上升。最初，由于加热源靠近罐体底部，底部温度上升速度较快，在加热开始后的前 8 h 内，底部温度比顶部温度高出约 174℃。随着热传递的进行，热量逐渐向上扩散，经过 7 h 后，罐内温度分布趋于均匀，最终达到设计最高温度 500℃。此时，顶部、中部、底部温度差值缩小至 80℃以内。进出风口温度也随着罐内温度升高而逐渐上升。

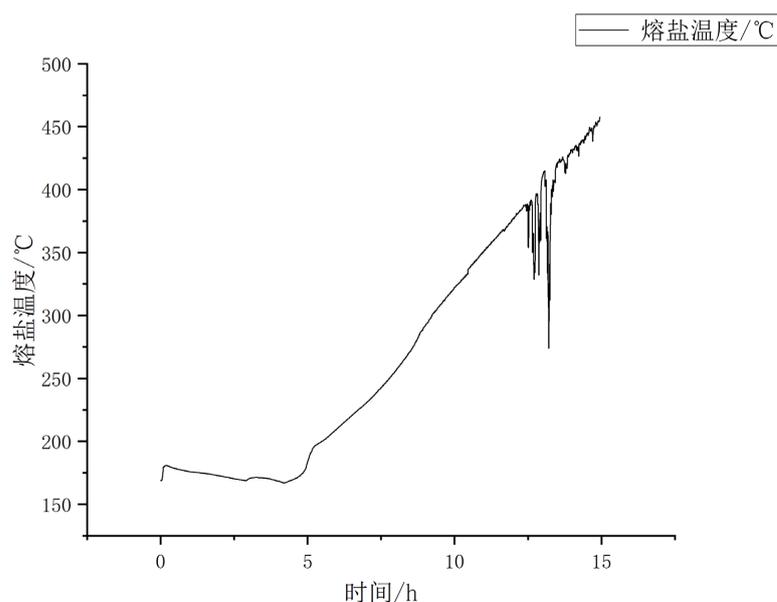


Figure 6. Curve graph of molten salt temperature change during the energy storage stage  
图 6. 储能阶段熔盐温度变化曲线图

通过图 6 温度曲线可以得知：熔盐的相变持续时间为 5 h，额定功率为 8.5 kW，所以熔盐相变阶段所消耗的电量为 42.5 kWh。整个储能阶段为 15 h，熔盐储能消耗电量为 127.5 kWh。

注：储能阶段，在局部过热条件下，温度的不均匀分布致使部分硝酸盐所处环境温度远超平均工作温度。以硝酸钾为例，其热分解反应是一个对温度极为敏感的过程。在正常工作温度范围内，它能保持

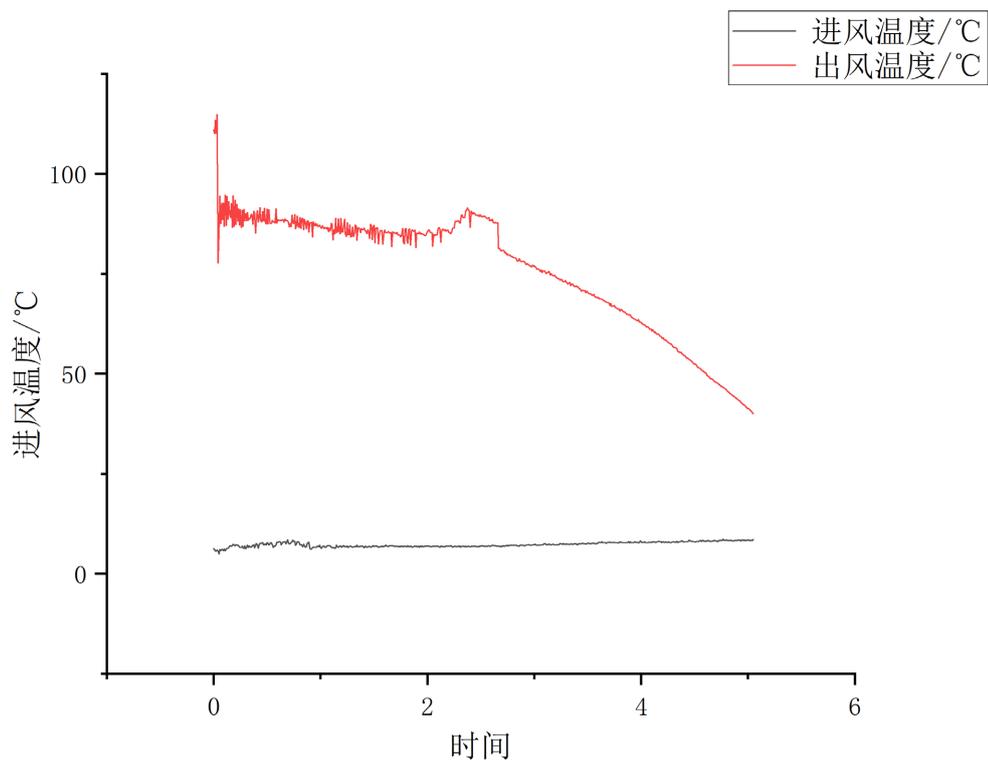
相对稳定,但当温度超过一定阈值,热分解反应便显著加速。一般而言,硝酸钾的热分解分阶段进行,在 $130^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ 进入硝酸盐分解阶段, $400^{\circ}\text{C}$ 以上则进入氮氧化物生成阶段。局部过热可能使这一进程提前且加剧,产生大量气体。由于安放测温设备,导致储盐罐密封性能变差,在熔盐顶部温度达到约 $450^{\circ}\text{C}$ 时,熔盐沸腾,部分熔盐由于气体推动通过测温设备的安置口溅射出来(如图7所示),导致在夜间23:39~00:21熔盐温度曲线出现剧烈波动,故建议加热熔盐的最高温度不要超过 $430^{\circ}\text{C}$ 。



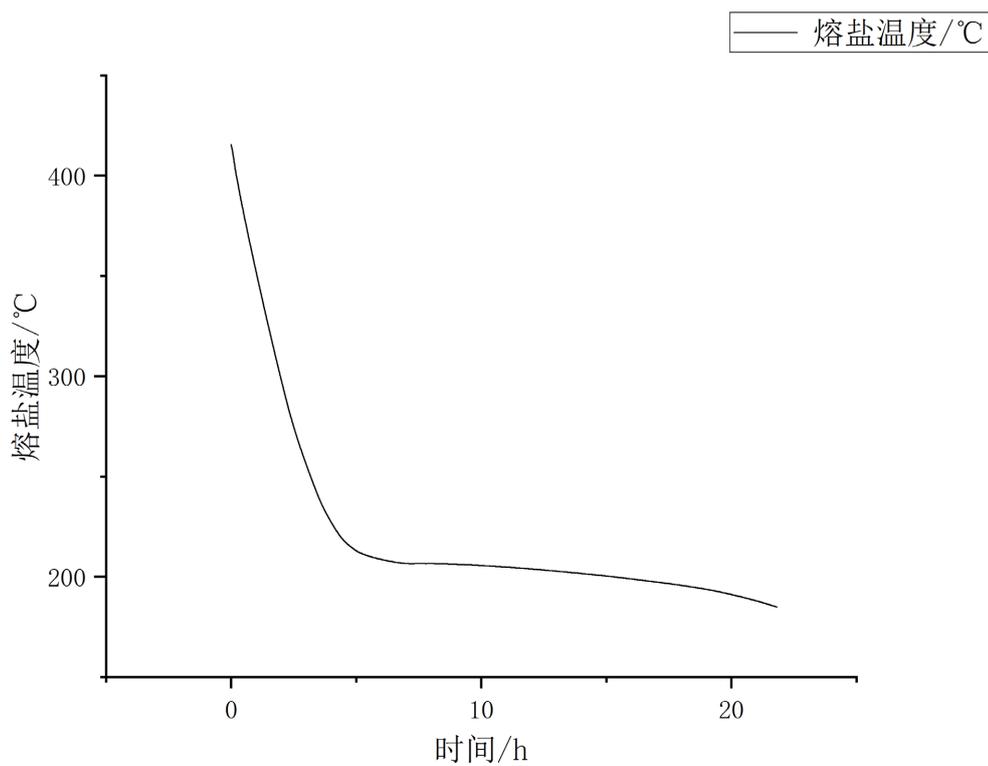
**Figure 7.** The molten salt splashes onto the tank body through the installation opening of the temperature measurement device  
**图 7.** 熔盐通过测温设备安置口溅射到罐体

## 2) 释能阶段

由图8、图9可知,释能开始后,熔盐温度迅速下降,平均每小时下降约 $50^{\circ}\text{C}$ 。在释能初期,由于熔盐与外部系统之间的温差较大,热交换速率较快,温度下降明显。随着释能过程的持续进行,熔盐温度逐渐降低,温差减小,热交换速率减缓,温度下降速率也随之降低。进出风口温度在释能过程中呈现先上升后下降的趋势。在释能开始后的前3 min内,出风口温度迅速上升至最高值 $90^{\circ}\text{C}$ ,随后随着熔盐温度的降低而逐渐下降。进风口温度则相对较为稳定,在室温范围内波动。



**Figure 8.** Curve graph of the inlet and outlet air temperature changes during the energy release stage  
**图 8.** 释能阶段进风、出风温度变化曲线图



**Figure 9.** Curve graph of molten salt temperature changes during the energy release stage  
**图 9.** 释能阶段熔盐温度变化曲线图

已知进风口直径为 25 cm,进风风速约为 4.5 m/s,进风温度为室温(白天在 3°C~5°C,夜间在 0°C~2°C),故质量流量约为 2.85 kg/s。

根据供热功率的计算公式,可以得到各时刻的供热功率,绘制成曲线图如下所示:

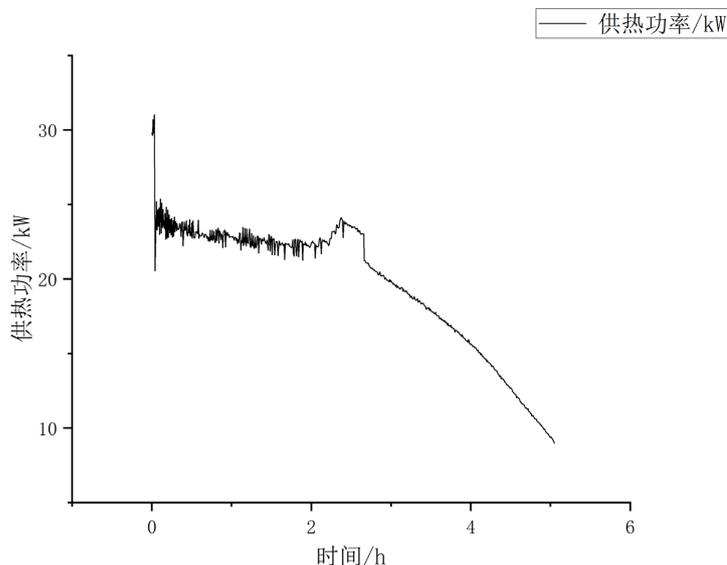


Figure 10. Curve graph of heating power changes  
图 10. 供热功率变化曲线图

从图 10 及释能阶段熔盐温度变化、出风温度变化可知,储能罐在熔盐温度 250°C 以上,供热功率可保证在 20 kW 以上,出风温度保持在 80°C 以上;当熔盐温度低于 250°C,储能罐的供热功率及出风温度将急剧下降。

### 3) 自然冷却阶段

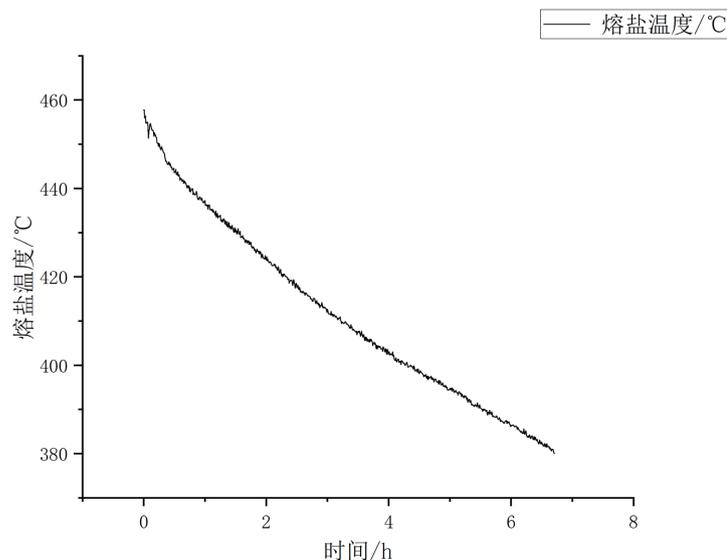


Figure 11. Curve graph of molten salt temperature changes during the natural cooling stage  
图 11. 自然冷却阶段熔盐温度变化曲线图

由图 11 可知, 在自然冷却运行期间, 储能罐内温度波动范围较大, 经过 6.7 h 的自然冷却, 熔盐温度降低约 87.2℃。这表明罐体的保温性能较差, 不能有效减少热量散失, 无法保持熔盐温度的相对稳定。

### 3.2. 风速数据

在释能阶段中, 释能时, 进风口风速受外部空气引入系统的控制, 可根据实际需求进行调节。在满负荷释能工况下, 进风口风速设定为 4.5 m/s, 以保证足够的冷空气进入罐体与高温熔盐进行热交换。出风口风速明显增大, 平均风速达到 7 m/s, 最高风速可达 7.8 m/s。这是因为释能过程中大量的热量从罐内传递到空气中, 使得空气体积膨胀, 流速加快。

### 3.3. 电功率数据

在储能阶段中, 在额定功率加热时, 电功率消耗较为稳定, 平均功率为 8.5 kW。在整个储能过程中, 熔盐从 195℃加热到 522℃, 加热时间约 15 h, 总耗电量为 127.5 kWh。

## 4. 结论与改进

### 4.1. 结论

本文首先对单罐熔盐蓄热供暖装置的发展进行了详细的介绍, 对现存问题进行思考, 对设计研发的可变熔盐储能罐进行实验测试, 然后通过实验数据分析储能罐的储热量、相变热、出风温度及供热功率。针对这些数据对储能罐进行评价, 得出以下结论:

1) 储能性能: 本装置的储热量为 127.5 kWh, 与传统镁铁蓄热砖相比, 同体积储热量高出 2.5~3.5 倍, 体现了熔盐储能的高密度优势。与高温熔盐(>300℃)在光热发电中的应用相比, 本装置的储能温度(200℃~500℃)虽处于中低温范围, 但储能效率与 Solar Salt 的理论值基本一致, 验证了中低温熔盐在供暖领域的可行性。

2) 释能性能: 本装置在熔盐温度  $\geq 250^\circ\text{C}$  时, 供热功率可稳定在 20 kW 以上, 出风口温度  $\geq 80^\circ\text{C}$ , 满足蔬菜大棚近 6 h 的热量需求。与引言中某示范项目释能阶段仅 60℃的进出风温差相比, 本装置的出风口温度更高(80℃以上), 热交换效率更优, 这得益于风道设计中进出风口的风速调控(进风 4.5 m/s、出风 7 m/s)。但与熔盐-热泵耦合系统 85%的综合能效相比, 本装置未集成热泵技术, 能效仍有提升潜力。

3) 保温性能: 在自然冷却运行期间, 熔盐罐内温度波动范围较大, 经过 6.7 h 的自然冷却, 熔盐温度降低约 87.2℃, 热损失率为 9%/h。与传统硅酸铝纤维保温层的热损失率(12.3%/h)相比有所提升, 但与采用多层真空绝热结构(5%/h 以下)相比还有提升空间。这表明罐体的保温性能较差, 不能有效减少热量散失, 无法保持熔盐温度的相对稳定, 后续会对储能罐的罐体及保温材料进行优化。

### 4.2. 改进

#### 1) 研究发现

本研究针对中低温熔盐(200℃~500℃)在供暖领域的系统性实验空白, 通过储能、释能及自然冷却工况的测试, 明确了其温度分布、热损失率及储/释能特性, 为农业大棚等场景的应用提供了基础数据。

针对熔盐腐蚀性威胁设备寿命的挑战, 本装置采用耐腐蚀椭圆结构罐体, 虽未直接测试腐蚀速率, 但为后续添加缓蚀剂或陶瓷涂层提供了实验平台。

针对相变传热效率低的问题, 本装置通过优化风速(进风 4.5 m/s、出风 7 m/s)提升了热交换效率, 验证了流场调控对传热的促进作用。

针对保温设计不足导致热损失的问题, 本装置的热损失率(9%/h)虽优于传统材料, 但与真空绝热技术

的差距表明，保温结构仍需针对性改进。

#### 2) 未来研究方向

**保温与密封优化：**采用多层真空绝热材料替换现有保温层，并改进测温设备的安装方式(如嵌入式密封结构)，目标将热损失率降至 5%/h 以下。

**腐蚀与材料相容性：**长期运行实验中监测熔盐对碳钢的腐蚀速率，评估添加缓蚀剂或陶瓷涂层后的防护效果。

**系统集成与能效提升：**借鉴熔盐 - 热泵耦合系统的思路，设计小型化耦合装置，目标将综合能效提升至 80% 以上。

**农业大棚场景适配：**结合大棚的动态热需求，开发智能温控算法，实现熔盐储热与大棚供暖的精准匹配。

本研究为中低温熔盐储能在供暖领域的应用提供了实验依据，后续通过针对性优化，有望推动其在农业、民用供暖等场景的规模化应用。

## 参考文献

- [1] IEA (2022) Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.
- [2] Zhang, Y., Wang, Z.J. and Zhang, X.Y. (2021) Molten Salt for Thermal Energy Storage: A Comprehensive Review. *Applied Energy*, **282**, Article 116045.
- [3] Kearney, D., O'Malley, M. and Leahy, P. (2021) Advances in CSP with Molten Salt Storage. *SolarPACES Conference Proceedings*, Malaga, 27 September-1 October 2021.
- [4] Wang, L. and Zhao, C.Y. (2023) Medium-Temperature Molten Salt for Heating: A Review. *Energy Conversion and Management*, **276**, Article 116532.
- [5] Fernández, A.G., Salvador, M.D. and Sáez, C. (2018) Corrosion Mechanisms of Molten Nitrate Salts in Carbon Steel. *Corrosion Science*, **135**, 57-67.
- [6] 刘伟, 张寅平, 王馨. 碳酸盐/氯化盐共晶熔盐的腐蚀抑制研究[J]. 化工学报, 2021, 72(5): 2768-2776.
- [7] Shin, D. and Banerjee, D. (2020) Enhanced Thermal Conductivity of Molten Salt Nanofluids. *Renewable Energy*, **145**, 1070-1077.
- [8] Xu, C., E, J.Q. and Li, Y.Y. (2020) Thermal Loss Analysis of Industrial Molten Salt Tanks. *Applied Thermal Engineering*, **167**, Article 114785.
- [9] Pacio, J., Dolado, I. and Sarasua, A. (2019) Vacuum Insulation for Molten Salt Storage. *Solar Energy Materials*, **193**, 278-291.
- [10] 李志明, 刘艳峰, 王登甲. 熔盐储热在区域供暖中的应用潜力[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 112-118.
- [11] 陈刚, 孙玉刚, 张娜. 熔盐罐温度场不均匀性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(3): 1-8.
- [12] Yang, Z., Wang, X.F. and Fan, J.H. (2021) Integrated Heat Pump-Molten Salt System for District Heating. *Energy Conversion and Management*, **227**, Article 113612.