

DOI:10.19666/j.rfld.202602041

管道电极式熔盐电加热器的温度特性研究

曾潇¹, 张顺奇², 李有霞³, 韩伟², 杨鹏¹, 张澳¹, 李小波¹, 杨荣贵^{1,4}

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074;

2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054;

3. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 643001;

4. 北京大学力学与工程科学学院能源与资源工程系, 北京 100871)

[摘要] 【目的】为应对火电机组灵活性改造与低谷电力消纳等问题, 提出一种基于管道流动的新型电极式熔盐加热器, 本文旨在探究该熔盐电加热器的温度特性。【方法】利用 COMSOL 软件建立了电加热器的多物理场仿真模型, 设计并搭建了熔盐电加热系统, 在 300~600 V 电压工况下进行相关测试, 然后在 2~4 kV 高电压工况下分别开展温度分布和温度响应的模拟研究。【结果】该电加热系统能使熔盐温度提升 1.2~25.5 °C。实验数据与模拟值的最大相对误差为 8.0%, 验证了 COMSOL 模型的准确性; 电极两端的发热段中, 沿熔盐流动方向, 径向温差均呈现先增大后减小的趋势, 并且在极限工况下, 最大径向温差为 9.4 °C, 但温度最高值 (572.8 °C) 出现在管路出口的近壁面处; 电加热器能够在扰动后的 15 s 内使熔盐温度达到目标温升的 0.85~0.96, 并且其温度响应速度与电压大小无关, 而提高熔盐流速可加快温度响应速度。【结论】所提出的熔盐电加热器具备温升调节能力, 径向温度分布均匀、响应速度快, 可为改善储能系统性能提供技术支撑。

[关键词] 熔盐; 电加热; 热储能; 温度分布; 瞬态响应

[引用本文格式] (本段作者勿动) 作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.

Research on temperature characteristics of pipeline electrode type molten salt electric heater

ZENG Xiao¹, ZHANG Shunqi², LI Youxia³, HAN Wei², YANG Peng¹, ZHANG Ao¹, LI Xiaobo¹, YANG Ronggui^{1,4}

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. Dongfang Boiler Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Chengdu 643001, China;

4. Department of Energy and Resources Engineering, School of Mechanics and Engineering Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: [Objective] In order to address the problems associated with the flexibility retrofitting of thermal power plants and the consumption of low-valley electricity, a novel electrode molten salt heater based on pipeline flow is proposed. This study aims to investigate the temperature characteristics of this new type of heater. [Methods] A multi-physics field simulation model of the electric heater was established by utilizing COMSOL software. An experimental system for molten salt electric heating was designed and constructed, and relevant experimental tests were carried out under voltage conditions ranging from 300 V to 600 V. After that, based on the COMSOL simulation model, simulation studies regarding temperature distribution and temperature response were conducted under high-voltage conditions ranging from 2 kV to 4 kV. [Results] The experimental results indicate that the electric heating system, under the specified operating conditions, is capable of raising the temperature of molten salt within a range of 1.2 °C to 25.5 °C. A comparison between experimental data and simulation outcomes reveals a

收稿日期: 2026-02-26 修回日期: 2026-03-12 接受日期: 2026-03-17 网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFB2408400); 湖北省自然科学基金——三峡创新发展联合基金 (2024AFD352)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2024YFB2408400); Hubei Provincial Natural Science Foundation: Three Gorges Innovation and Development Joint Fund (2024AFD352)

第一作者简介: 曾潇 (2001), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为热储能, 1547066348@qq.com。

通信作者简介: 李小波 (1982), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为热储能及应用、电子器件热管理, xbli35@hust.edu.cn; 韩伟 (1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为热储能, hanwei@tpri.com.cn。

maximum relative error of 8.0%, thereby confirming the accuracy and reliability of the COMSOL Multiphysics model established in this study. An analysis of the temperature field within the heating sections located at both ends of the electrode shows that, along the direction of molten salt flow, the radial temperature difference consistently follows a distinct pattern: it initially increases and then progressively decreases. Under extreme operating conditions, the maximum radial temperature difference observed is 9.4 °C. Notably, the peak temperature of the molten salt, reaching 572.8 °C, occurs near the wall at the pipeline outlet, indicating a relatively uniform temperature distribution across the radial cross-section. Furthermore, the transient response characteristics of the electric heater were evaluated. The results demonstrate that following a disturbance, the system can elevate the molten salt temperature to between 0.85 and 0.96 of the target temperature rise within a short period of just 15 seconds. This underscores the heater's fast temperature response capability. An investigation into the factors influencing this response speed revealed that it is independent of the applied voltage magnitude. However, increasing the flow velocity of the molten salt significantly accelerates the transient temperature response, offering a practical pathway for performance optimization. [Conclusion] Experimental and simulation results demonstrate that the proposed molten salt electric heater offers significant advantages, including temperature rise regulation capability, a uniform radial temperature distribution, and a fast response speed. These features collectively provide a theoretical basis and technical support for improving the performance of energy storage systems.

Key words: molten salt; electric heating; thermal energy storage; temperature distribution; transient response

可再生能源发电存在间歇性和波动性，其高比例并网会对电网造成冲击并带来发电不稳定等问题^[1]，储能系统的引入可有效解决可再生能源带来的问题，其中以熔盐储能为代表的热储能技术近年来发展迅速^[2]，其在火电灵活性改造与谷电消纳中广泛应用^[3]，该系统常需要将电能转化为热能储存起来，需要时再进行放热以实现供暖或发电^[4-5]。其中电加热器是电热转化的关键设备之一^[6-7]，目前主要采用管式电加热器。管式电加热器的结构类似“壳管式换热器”：电加热管束被密封地固定在一个圆筒形的外壳内。介质从一端流入外壳，流过被加热的管束外表面而被加热，然后从另一端流出。电加热管束是加热器的核心，通过电流的热效应产生热量，再将热量传递给熔盐来实现加热。单根电加热管的结构从内到外依次为：电阻丝、氧化镁粉、金属护套管。电加热管的绝缘依靠氧化镁填充层，而绝缘层过厚会影响加热器的响应速度。

近年来，高电压熔盐电加热技术得到广泛关注，也产生了一些新的技术，例如采用高绝缘填料的管式电加热器^[8-11]、感应式电加热器^[12-13]、电极式加热器^[14-15]等。Yi Zhang 等^[9-10]通过实验和仿真验证了 AlN 作为高压电热管填充材料的可行性，并通过数值仿真研究了功率和传热系数对加热管内温度分布的影响，将改性的 AlN 用作高压电热管的填充粉末，该电热管的导热系数和击穿电压是分别是传统氧化镁的 1.8 倍和 1.4 倍。应用方面，浙江绿储科技研制的“面向大容量储能的 6 kV/565 °C 智能化高压无级调节熔盐电加热系统”被列入《全国工业领域电力需求侧管理典型案例（2025 年）》名单。

感应式电加热装置的金属管道外部缠绕有感应线圈，熔盐在管道内流动。当感应线圈通入中频或高频交变电流时，会产生交变磁场，管壁内会感应出涡流而产热，最终将热量传递给内部流动的熔盐。Zhou 等人^[13]提出了一种类变压器结构的新型工频感应加热器，熔盐管道作为次级绕组，通过次级绕组形成电流回路发热而加热熔盐介质，仿真结果显示该结构电热效率超过 98%。应用方面，慧金科技研制的“熔盐储能用大功率高电压高效感应加热技术”被收录于《国家重点推广的低碳技术目录（第五批）》中。

电极加热方式目前主要应用于电极盐浴炉和电极锅炉。电极盐浴炉是机械工业中常用的热处理设备。20 世纪 50 年代初，中国引入了插入式盐浴炉，但由于其热效率较低，目前仅用于高速钢回火等少数工艺场合。盐浴炉中熔盐体积大、电导率高，因此通常采用低电压（11~36 V 交流电）和高电流进行加热。电极锅炉在欧洲已有超过 70 年的使用历史。其工作原理是通过电极将高压电（一般为 6~36 kV）作用于具有一定电阻的炉水，利用炉水产生的焦耳热来生产热水或蒸汽，从而实现高效的电热转换^[16]。20 世纪 20 年代，瑞典 Z&I 公司发明了第一台浸没式电极锅炉。20 世纪 40 年代，瑞士 SULZER 公司发明了喷射式电极锅炉，由此形成了两种技术路线，即浸没式和喷射式。20 世纪 60 年代，电极锅炉在欧洲尤其是水电资源丰富的国家得到广泛应用^[17]。20 世纪 70 年代，随着核电站建设进入高峰，电极锅炉常被用作启动锅炉，进一步促进了其发展^[18]。到 2010 年，随着风电在电网中占

比提升，电极锅炉开始被用于电力调节，可在电网电力过剩时通过功率调节在 30 秒内达到最大热输出^[19]。电极锅炉也适用于清洁供暖，K. Gicevski 等^[20]的研究表明，在电网辅助服务与区域供热场景中，电极锅炉是一种经济高效的解决方案。以水为工质的电极锅炉已经得到广泛的应用，为了进一步提高加热温度，近些年，以熔盐为工质的高电压熔盐电极锅炉也得到发展，例如，华源前线研制的“高压熔盐电极加热炉”，成功入选 2023 年度浙江省首台（套）装备名单。

上述几种高温熔盐加热技术的特点总结于表 1 中。管式电加热器由于其结构特性，提高响应速度较为困难，且存在高电压击穿风险。感应式加热的结构复杂、设备成本高；而现有的高电压电极式加热设备仍沿用传统水喷射式电极锅炉结构，需依赖熔盐在加热室内喷溅至电极实现加热，导致内部流速难以精确控制。为此，本研究提出一种管道电极式熔盐电加热方案，与现有的电极式加热方案不同的是，该方案引入了流动管路，通过电极直接给管内熔盐进行通电，之后熔盐能利用自身导电性而产生热量。该结构有以下几点优势：该结构无需引入电热元件或电磁感应设备，结构相对简单；可借助管道引导熔盐流动，从而更易于控制流速；并且可通过多管路并联的方式，实现出口熔盐电位的抵消，有效避免熔盐流出设备后带来的带电风险；能直接利用熔盐自身导电性来产热，不需要通过复杂的传热过程来实现对熔盐的加热，熔盐的径向温度分布更加均匀；加热不依赖于熔盐的热导率，通过直接电热转换来实现加热，响应速度更快。

表 1 三种熔盐加热方式的对比
Tab.1 Comparison of three molten salt heating methods

原理	发热形式	响应速度	复杂程度	高压可靠性
管式	间接	较慢	简单	高压击穿风险
感应式	间接	中等	复杂	绝缘性较好
电极式	直接	较快	喷射式结构的流量难以控制	介质带电风险控制

1 电加热器原理

电极加热器的基本结构如图 1（a）所示。该装置工作时，熔盐流经绝缘管道，并在管道两端电极上施加交流电压。电流经由熔盐导通，直接在熔盐中产生焦耳热，从而省去了传统加热方式中复杂的传热环节，实现了高效直接的电-热转换。另外，由于金属的电导率远高于熔盐，电流将优先通过电极金属管表面形成通路，产生短路效应。因此，流经金属管段的熔盐因无电流通过而不产生焦耳热。基于这一原理，本结构中仅绝缘管段为有效发热段。为进一步提升系统安全性、避免带电熔盐对周围导电设备造成影响，本设计采用了图 1（b）所示的改进结构。该结构将电极布置于管路中间，然后并联多条相同规格的加热管路，通过合理的电压相位设置使各管路电压相互平衡，使得管路进口与出口（即电气中性点）的电位得以维持在零电位，由此可在管道内部形成有效的电屏蔽，从而有效保障了系统的电气安全与运行可靠性。

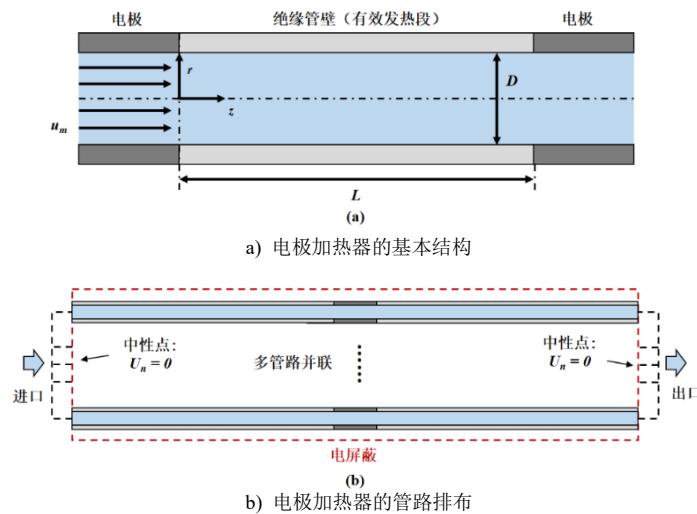


图 1 管道电极式熔盐电加热原理

Fig.1 Principle of pipeline electrode type molten salt electric heating

本文分别采用 Solar Salt^[21]和 LiNaKCaNO₃^[22]作为储热介质。Solar Salt 是光热发电领域已被广泛商业应用的储热材料,其工业适用温度范围为 290~575 °C。LiNaKCaNO₃ 是一种四元硝酸熔盐,其熔点低,适用温度范围为 93~450 °C,可用于低温实验研究,利用双钨极系统电化学阻抗法^[23]测量熔盐不同温度下的电导率,可拟合为一元二次多项式^[24]。两种熔盐的电导率拟合曲线如图 2 所示,涵盖了其适用温度范围内的电导率数据。熔盐电导率随温度升高而增大。图中给出了 LiNaKCaNO₃和 Solar Salt 的电导率拟合表达式,分别以 σ_1 和 σ_2 表示,单位为 S/m。误差主要源于系统误差,其中热电偶测量精度是主导因素。根据手册,热电偶极限温度偏差为 ± 1.1 °C。本文熔盐温度范围为 120~570 °C,以最低温度 120 °C 计算,则最大相对误差约为 $1.1/120=0.91\%$,在可接受范围内。另外,两者的决定系数 R^2 均高达 0.99,说明拟合关系良好。为确保实验过程的安全性及可操作性,首先使用 LiNaKCaNO₃ 来进行低电压级别的验证实验,在此基础上,基于已验证的低电压模型外推至高电压工况,进而采用更适合高压条件的 Solar Salt 来开展符合实际工程应用需求的高电压模拟研究

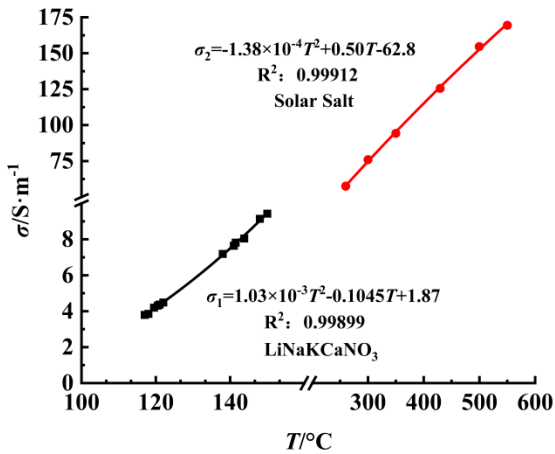


图 2 熔盐电导率的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve for the electrical conductivity of molten salt

2 方法

2.1 实验方法

为验证 COMSOL 模型的准确性和该种电极加热方案的可行性,设计并搭建了电加热实验系统,如图 3 所示,其核心部件是由两条管路并联组成的双流道电极加热器,设计单管径为 6 mm,单管总长

为 600 mm,两条管路通过三通接头进行连接,电极设置在每条管路的中间。低温罐下部设置预热器。采用 ITECH IT-M772 可编程交流电源供应器进行供电,导出三相交流电源的两相,分别连接两条管路中间的电极,设置相应的电压值,两者相位差为 180°,则两相电压在加热器的进口和出口处互相抵消,保证后续设备安全。电加热器两条管道的进出口分别设置有热电偶以记录温度数据。为测量熔盐流速,在高温熔盐罐顶部开孔并插入一个自制液位测量装置。该装置由焊接连接的浮球与铝杆组成,铝杆外套带刻度的通气管。随液面浮动的浮球带动铝杆升降,由工业相机实时记录通气管刻度变化。通过分析固定时间间隔内的液位差值,即可按以下公式计算流速:

$$u = \frac{D_i^2 \Delta h}{2D^2 \Delta t} \quad (1)$$

式中: D_i 为高温熔盐罐内径, m; Δh 为液位变化值, m; D 为加热器的单管内径, m; Δt 为液位变化时间, s。通过工业相机实时记录液位数据,每隔 5 min 测算熔盐流速,若几次数据相近,则认为流动已稳定,再将多次测量的流速数据取平均值用于后续分析。主要实验部件和型号规格列于表 2 中。为估算以上流速测量装置的精度,在此主要考虑 B 类系统误差,相关计算公式如下:

$$e_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

式中: e_B 为 B 类标准不确定度; a 为仪器的最大允许误差绝对值。对于类似流速这样间接计算得到的参数,需要借助误差传递公式来计算其相对不确定度:

$$R_e(y) = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial \ln y}{\partial x_i} \right)^2 e_B^2(x_i)} \quad (3)$$

式中: R_e 为相对不确定度; y 是需要间接计算的参数; x_i 表示计算 y 所需的变量参数。直接测量得到的参数有长度和时间,根据所用的仪器,两者的最大允许误差绝对值分别为 0.5 mm 和 0.2 s。对于式(1)中的变量,已知 $D_i=300$ mm, $D=6$ mm, $\Delta t=5$ min,实验工况下的熔盐流速约为 0.041~0.21 m/s,结合式(1)可估算经过 5 min 后液位变化值 Δh 约为 10~50 mm,这里取 30 mm 作为参考值以进行不确定度的估算。结合式(1)~(3)可计算得该装置测得的熔盐流速的相对不确定度约为 1.93%,表明该流速测量装置具有较好的测量精度。

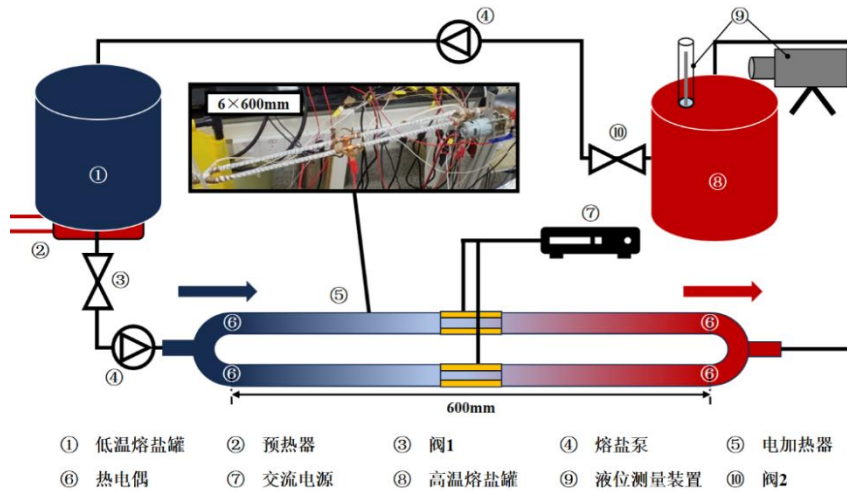


图3 电加热实验系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the electric heating experimental system

表2 电加热实验的主要部件及选型
Tab.2 Main components and selection of electric heating experiment

部件名称	型号/规格	品牌
浮球	Φ50 mm	—
铝杆	Φ30 mm	—
工业相机	LBAS-U313	凌云
熔盐泵	WS249	南京信可电子
热电偶	K 型	—
预热器	220 V-2 000 W	—
阀	304 DN15 球阀	—
交流电源	IT-M7723	ITECH
数据采集仪	KEITHLEY 2700	Keithley
熔盐罐	Φ300×500 mm	—

系统启动前,首先开启预热器,将低温罐内的熔盐加热至预定温度。随后关闭阀2,调节阀1开度及熔盐泵转速,记录高温罐的液位变化以测定熔盐流速,待流速稳定后,施加300~600 V的恒定交流电压,出口熔盐温度随之升高,当出口温度与进口温度不发生明显变化时,认为熔盐温升达到稳定状态,由于低压实验工况的温升较小,温度变化对流速测量影响可忽略。热电偶采集两条管路进出口的熔盐温度数据,分别取两条管路的进出口温度平均值进行分析,一次加热实验结束后,开启阀2并关闭阀1,使高温罐内熔盐流回低温罐,以备下一组实验,每组工况重复3次。

2.2 模拟方法

考虑到加热器的单管路是对称圆管,且本研究加热器管路采用横向布置,径向温差较小,因此熔盐的密度随温度变化并不显著^[21-22],可忽略重力对计算的影响。则加热管路的温度分布是对称的,因

此本文只建立 COMSOL 单管模型,如图4所示,该模型涉及温度场、流场和电场的耦合计算,做如下基本假设:流体为连续介质、流体为牛顿流体。

该电加热器的电场主要由欧姆定律描述,根据欧姆定律得熔盐流动传热过程中的热源项:

$$q_j = \vec{J} \cdot \vec{E} = \sigma |\nabla \phi|^2 \quad (4)$$

式中: J 是电流密度, A/m^2 ; E 是电场强度, V/m ; σ 是熔盐电导率, S/m ; ϕ 是标量电势, V 。列出电场边界条件:在电极处施加电势 U ,即 $z=L/2$ 时 $\phi=U$;在进口和出口设置电势为0,则 $z=0$ 和 $z=L$ 时 $\phi=0$ 。值得注意的是,为贴合电站实际运行中普遍采用的三相供电体制,本模拟在高压工况下采用三相电压接入方式,各相电压相位依次相差 120° 。

流场由质量守恒和动量守恒方程描述,根据质量守恒:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (5)$$

式中: ρ 是熔盐密度, kg/m^3 ; u 是速度矢量, m/s ; t 是时间, s 。根据动量守恒:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\gamma} + \rho \vec{g} \quad (6)$$

式中: p 是静压力, Pa ; γ 是黏性应力张量, Pa ; g 是重力加速度, m/s^2 。列出流场的边界条件:在管壁处选择无滑移条件,此处的 $u=0$;对于轴对称管道,入口条件为 $u=u_{in}$,其中 u_{in} 为单管入口平均流速, m/s 。对于管路出口,通常给定压力边界条件。

温度场由能量守恒定律描述,可列出能量微分方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p \bar{u} T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_j + \delta_v \quad (7)$$

式中： c_p 是熔盐比热容，J/(kg·K)； λ 是熔盐的热导率，W/(m·K)； T 是熔盐温度，℃； q_j 是焦耳热源项，W/m³； δ_v 是黏性耗散，W/m³；列出温度场的边界条件：对于管路入口， $T=T_i$ ， T_i 为入口温度，℃。在

流体与绝缘管的接触面上，满足温度连续和热流连续条件，即 $T=T_w$ ， $\lambda(\partial T/\partial n)=\lambda_w(\partial T_w/\partial n)$ ，其中 T_w 和 λ_w 是壁面温度和壁面材料的热导率， n 是交界面的法向方向；考虑隔热保温，可以将壁面外界面设置为绝热， $\partial T_w/\partial n=0$ 。

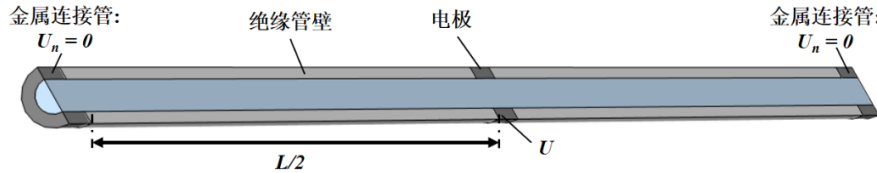


图4 电极加热器的 COMSOL 单管路模型
Fig.4 COMSOL single-pipe model of the electrode heater

对电加热器的 COMSOL 模型进行网格无关性验证，边界条件及尺寸设置为：电压 3 kV、流速 0.80 m/s，入口温度为 290 ℃，管长 2 m，管径 16 mm，雷诺数为 $Re=14\,281$ ，采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型，管外壁设置为绝热边界条件。比较了表 3 中五种网格的计算结果。如图 5 所示，为更清晰地表示出图中曲线上对应的熔盐所在位置，横坐标采用轴向无量纲长度 L_d ，其定义为沿流动方向某位置对应的长度 L_x 与加热器管路总长度 L 之比，即 $L_d=L_x/L$ 。需要说明的是，这里的 L_x 和 L 仅代表有效加热段的长度，电极金属管段不计入其中。可见轴向的温度分布是非线性的，并且曲线在电极位置处 ($L_d=0.5$) 出现转折。温度曲线被划分为区域 1 和区域 2。这一现象源于熔盐电导率的温度效应：随着熔盐沿流动方向升温，区域 2 的熔盐电导率低于区域 1，导致区域 2 中的熔盐产热更高。另外，1 段和 2 段管路的电势差是相等的，但由于区域 2 的焦耳热更大，则 2 段的轴向温度梯度会增大，与图中呈现的趋势一致。可以看到，网格 A 的结果与其他网格差异明显，而网格 B-E 的温度曲线基本重合，说明计算结果已趋于收敛。综合考虑计算精度与效率，选择网格 C 用于后续计算。

另外，实验工况下熔盐流动为层流状态，由于层流模型相较于湍流更简单，对网格要求并不高，且本文实验只关注加热器的温升，因此对于层流模型只做简单的网格验证，根据实验系统中加热器的结构，设置电压为 600 V，流速为 0.21 m/s，分别计算三种网格 A_0 、 B_0 、 C_0 条件下的出口温升，三者的单元数分别为 2.10×10^5 ， 3.96×10^5 ， 10.40×10^5 ，得到

结果分别为：6.84、6.78、6.78 ℃，可见 B_0 和 C_0 结果一致，因此采用网格 B_0 进行后续的计算。

表 3 电极加热器模型的网格参数
Tab.3 Mesh parameters of the electrode heater model

网格	最小单元大小/mm	最大单元大小/mm	最大单元增长率	单元数量/ 10^5
A	1.63	5.44	1.2	2.254 14
B	1.09	3.65	1.15	6.312 85
C	0.544	2.89	1.13	19.556 14
D	0.218	2.01	1.1	79.979 34
E	0.081 7	1.25	1.08	89.739 55

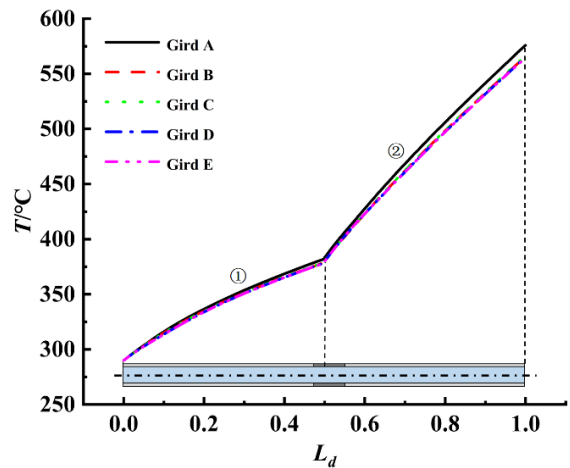


图5 5种网格计算的轴向温度分布曲线
Fig.5 Axial temperature distribution curves for five different grids

3 结果与分析

3.1 电加热器验证实验

本节采用 LiNaKCaNO_3 进行低电压实验, 各实验工况见表 4, 其中 T_i 为熔盐入口温度。同时, 为验证 COMSOL 模型的准确性和所提出的加热方案的可行性, 建立电加热器 COMSOL 模型, 并且加热器尺寸和边界条件与实验设备尺寸和实验工况保持一致, 将两者的温升结果进行对比。

表 4 设计的实验工况
Tab.4 Designed experimental conditions

U/V	$u_{in}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_i/^\circ\text{C}$	U/V	$u_{in}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_i/^\circ\text{C}$
	0.041 637	125		0.049 603	126
300	0.061 925	127.5	400	0.081 019	130.9
	0.126 591	132.9		0.149 573	133.7
	0.205 761	130.2		0.214 856	131.8
	0.052 130	126		0.063 925	127.5
500	0.069 444	128	600	0.078 955	127.5
	0.151 910	134		0.155 556	133
	0.202 508	131.3		0.213 675	131

图 6 显示了在不同流速或电压条件下, 实验与 COMSOL 模拟得到的稳态温升的对比结果。当保持熔盐流速不变, 提高输入电压, 根据式(4)可知电加热器的发热量将增大, 进而使熔盐的温升增大; 当保持电压不变时, 提高熔盐的流速, 显然熔盐被加热的时间缩短, 因此熔盐温升减小。图 6 也正好验证了上述的现象。在 300~600 V 和 0.041~0.21 m/s 的工况下, 电加热器能使熔盐温度提升 1.2~25.5 $^\circ\text{C}$, 可见该加热器具备一定的温升调节能力, 验证了所提出的加热方案的可行性。由图 6 可知, 实验与模拟结果存在一定偏差。由于实验中通过多次重复读数并取双管温度平均值的方式, 有效控制了随机误差, 因此该偏差主要来源于热电偶的系统误差。为定量分析实验结果与模拟值之间的一致性, 用两者相对误差 R_e 来评估:

$$R_e = \frac{|\Delta T_e - \Delta T_s|}{\Delta T_e} \quad (8)$$

式中: ΔT_e 和 ΔT_s 分别为实验和模拟测得的熔盐温升, $^\circ\text{C}$; 经计算, 实验与模拟的最大相对误差为 8.0%, 该值出现在 400 V 电压、0.081 m/s 流速的实验条件下, 总体而言, 模型与实验吻合良好, 表明 COMSOL 模型在低电压工况下具有良好的精度。由于电加热器的物理机制不随电压等级改变, 该模型可被视为一个经验证的可信数字孪生体, 因此也可以证明基于其开展的高电压模拟研究比较可靠。

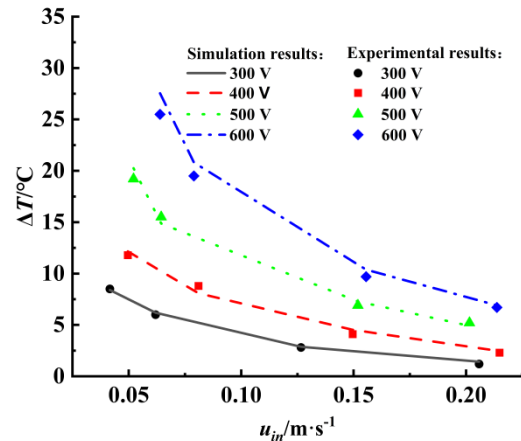


图 6 不同电压和流速条件下的实验与模拟的温升结果对比
Fig.6 Comparison of experimental and simulated temperature rise results under different voltage and flow rate conditions

3.2 电加热器的温度分布

从工程安全角度来看, 整个加热器内都不能有熔盐超温区域, 因为熔盐温度超过分解温度后, 会导致其发生热分解反应, 产生氮氧化物 (NO_x) 等气体产物, 从而使系统内部压力升高, 造成爆炸风险。为深入分析熔盐电极式加热器的温度分布规律, 本节将选用 Solar Salt 作为储热介质对加热器的温度分布展开研究, 设置如下算例: 输入线电压为 3 kV, 单管入口熔盐流速为 0.80 m/s, 管径为 16 mm, 单管长度为 2 m。选取该参数主要基于以下两方面考虑: 一方面, 输入线电压采用电站直接供电级别, 符合实际工程应用场景; 另一方面, 将入口熔盐流速设置为 0.80 m/s, 可使熔盐出口温度接近其最高适用温度, 从而有效验证电加热器在极限工况下的熔盐超温问题。

图 7 展示了单管路模型在 3 个不同轴向区间内的温度场与流场分布云图, 3 个区间分别为无量纲轴向长度 $L_d=0\sim 0.1$ 、 $L_d=0.46\sim 0.53$ 和 $L_d=0.9\sim 1.0$ 。熔盐流动方向为自下向上。从流场分布可以看出, 由于熔盐自身黏度的作用, 靠近壁面处的熔盐流速明显低于中心轴线处的流速。中心轴线上的最大流速约为 0.95 m/s, 高于入口平均流速 (0.80 m/s), 而沿径向方向流速逐渐降低, 这一分布特征符合典型的圆管湍流速度分布规律。对比三个区域的温度分布可知, 熔盐温度沿流动方向逐渐升高。另外, 考虑到近壁面流速较低, 熔盐停留时间更长, 吸收焦耳热更多, 因此温升应更显著。而中心轴线流速较快, 受热时间较短, 温升幅度较小, 从而会在管路

中形成一定的径向温度梯度。从图 7 可以看出，在 不明显。
特定区域内虽存在一定的径向温差，但整体差异并

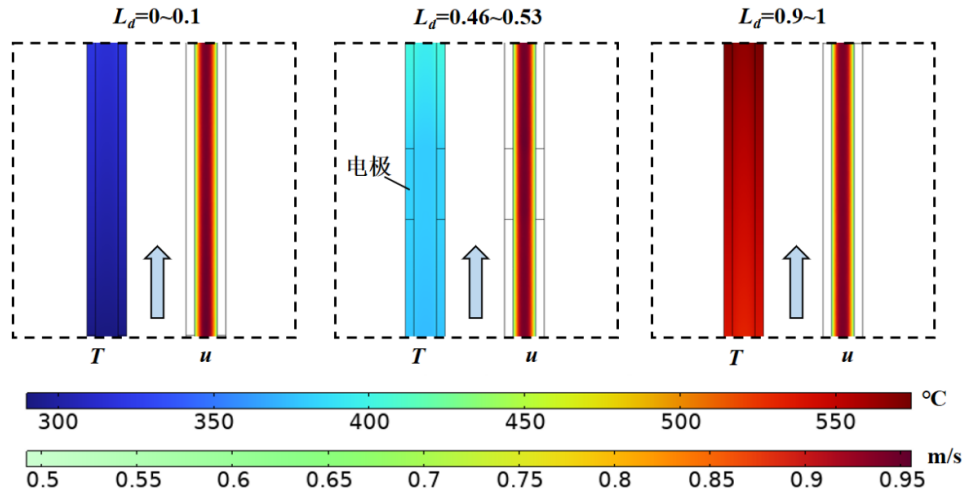


图 7 不同轴向位置处的温度和流场分布云图

Fig.7 Contour plots of temperature and flow field distribution at different axial positions

图 8 展示了几个典型位置处的径向温差曲线，纵坐标表示某点温度与中心轴温度之差，横坐标为径向位置，其中 $D=8\text{ mm}$ 对应中心轴线。可见，对于每个位置，温差极值都出现在近壁面处，这与前文分析一致。图 9 则展示了最大径向温差沿流动方向的变化曲线。加热器模型包含前后两段相同的有效发热段，该图也可分为 1 段和 2 段。两段径向温差沿流动方向均呈现先增大后减小的趋势。这一现象可结合式(7)解释：熔盐刚进入管路时，径向温差较小，主要源于流速不同引起的焦耳产热不均。随着温差增大，径向导热增强并逐渐占优，温差开始减小。进入第 2 段后，由于该段电导率更高，焦耳热重新占主导，径向温差再次增大，随后又将重复类似第 1 段的变化过程。可见，第 1 与第 2 段中径向温差的变化规律一致，均呈现先增大后减小的趋势。最大径向温差出现在 $L_d=0.64$ 处，为 9.4°C ，此处近壁面熔盐的温度为 445.2°C 。而出口处温差约为 7.0°C 。但由于出口位置中心轴线温度更高，因此熔盐的最大温度出现在出口近壁面处，为 572.8°C 。可见，虽然电加热器管内存在一定温差，但是整体分布均匀性较好，可靠性较高。

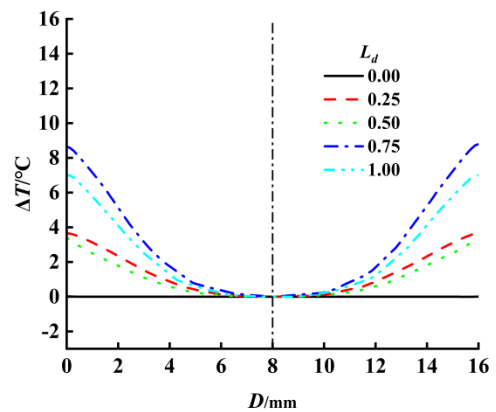


图 8 不同轴向位置处的径向温差分布

Fig.8 Radial temperature difference distribution at different axial positions

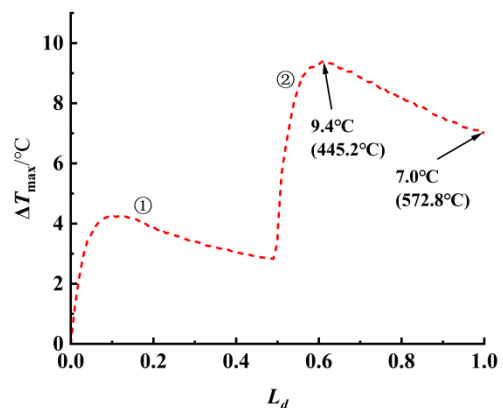


图 9 径向最大温差沿流动方向的变化曲线

Fig.9 Variation curve of radial maximum temperature difference along the flow direction

3.1. 电加热器的温度响应

瞬态响应速度对于电加热器是一个至关重要的性能指标，当工况变化时，响应速度快的电加热器能迅速调整输出，更快地将温度提升至设定点^[25]。这对于需要高精度恒温的应用至关重要，同时也影响着储能系统的调频能力。本节将对加热器的瞬态温度响应特性展开模拟分析。引入无量纲温度：

$$\theta = \frac{(T_o - T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (9)$$

式中： T_o 为加热器的出口熔盐温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_1 和 T_2 分别为初始温度和目标温度， $^{\circ}\text{C}$ 。以Solar Salt为储热介质，COMSOL模型的边界条件设置为：入口温度为 $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，初始电压 3 kV 、初始流速 2 m/s ，计算得到初始稳态出口温度为 $348\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此时假设电压阶跃提升至 3.3 、 3.75 、 4.5 kV ，或流速阶跃降低至 1.0 、

1.5 、 1.8 m/s 时，出口熔盐温度会发生不同程度的升高。

出口温度 T_o 及无量纲温度 θ 随时间变化的曲线如图10a)和10b)所示。瞬态响应过程可分为2个阶段：首先是快速升温阶段，焦耳热量的快速增加使管内熔盐温度迅速偏离初始稳态，出口温度快速上升；响应一段时间后，升温速率又开始显著降低，此时进入平稳变化阶段。为量化该响应过程，定义快速升温阶段的持续时间为 t_s ，同时令无量纲温度变化速率降低至 0.05 s^{-1} 以下时，可视为温升速率减小到较小值，已进入平稳阶段。图11显示了无量纲温度变化速率的曲线，可知， t_s 与入口熔盐流速密切相关，图11a)中3种电压扰动下的 t_s 几乎相等，约为 2.5 s ；而图11b)中3种扰动对应的 t_s 各不相同，表现为流速越快，则 t_s 越短。

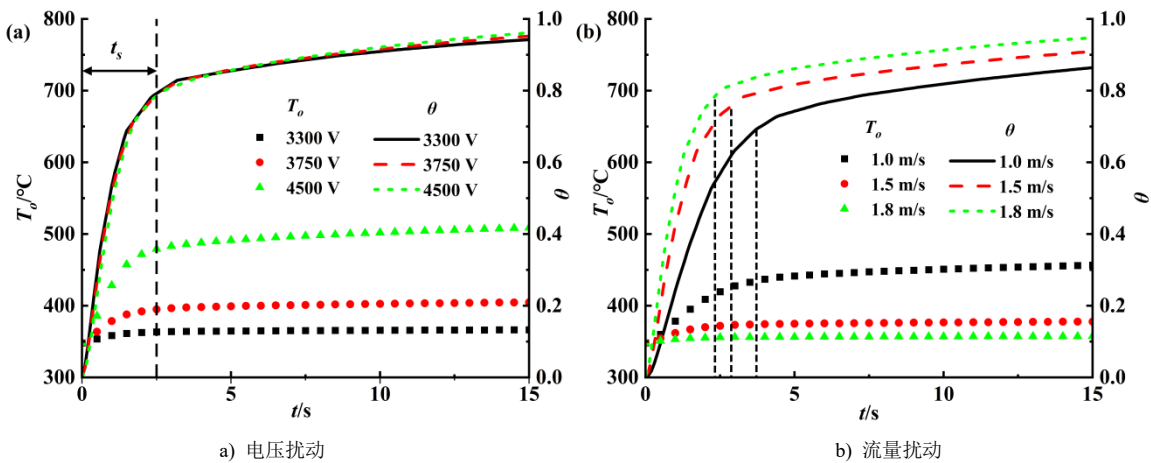


图 10 电压或流量扰动下出口温度随时间变化的曲线
Fig.10 Curves of outlet temperature over time under voltage or flow rate disturbances

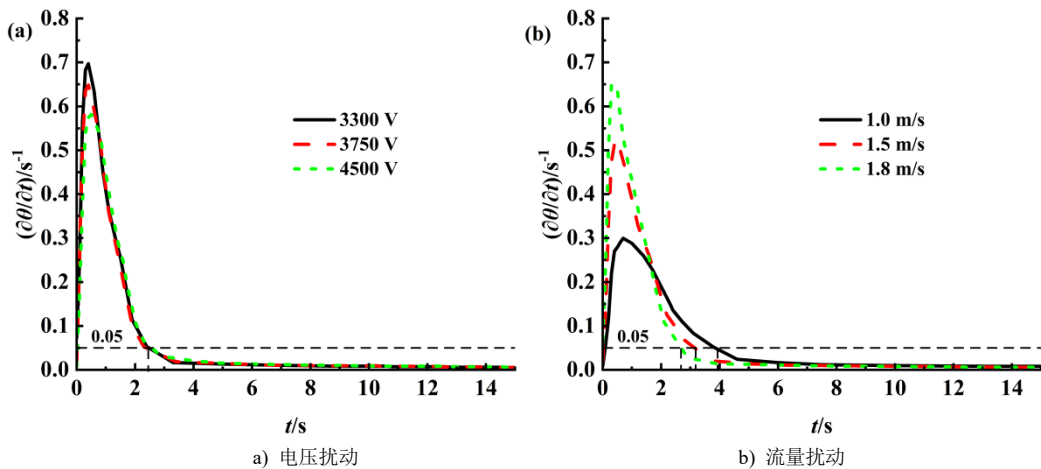


图 11 无量纲温度变化速率曲线
Fig.11 Curves of dimensionless temperature change rate

通过对比不同扰动条件的响应曲线,可以深入理解电压与流速两大参数对瞬态特性的不同作用机制。电压的影响相对有限,当保持流速恒定时,即使将输入电压从 3.3 kV 提升至 4.5 kV,三条无量纲温度曲线几乎重合,经过 15 s 后, θ 分别达到 0.948、0.952 和 0.961,差异较小,可见电压对加热器的瞬态响应特性影响不大;相反,流速的影响则十分显著,在输入电压不变的条件下,熔盐流速降低为 1.0、1.5、1.8 m/s 时, θ 曲线随流速增大而上移,15 s 时 θ 分别达到 0.864、0.909、0.946,可见流速会影响加热器的瞬态响应特性。

综上所述,电加热器具有快速的温度响应特性,能够在 15 s 内使熔盐温度趋近于目标温升的 0.85~0.96 以上,适用于对温度控制精度要求较高的应用场景。同时,其优异的动态响应能力也为提升储能系统的调频性能提供了重要的技术支撑。其中入口熔盐流速是影响响应速度的关键因素,流速越快,整体温度响应速度也越快。相比之下,输入电压的变化对瞬态温度响应速率的影响较小。

4 结论

本研究提出了一种基于管道流动的新型电极式熔盐加热器,通过实验与模拟相结合的方式,开展了加热器的温度特性研究,得到的结论如下:

1) 加热器具备一定的温升调节能力:提出的新型电加热器能够对熔盐温升进行调节,且提高电压或降低流速可以提高加热器的温升性能。

2) 管路内熔盐的温度分布均匀性良好:由于加热器基于熔盐自身导电性产热,径向温度分布整体较为均匀。电极的前后两个发热段的径向温差变化规律相似,均呈现先增大后减小的趋势,并且温度最大值出现在管路出口近壁面处,工程应用中需重点考查该处的温度是否超过许用值。

3) 揭示了加热的瞬态温度响应特性:该种加热器具有较快的响应速度,并且入口熔盐流速是影响温度响应速度的关键因素,流速越快,整体温度响应速度也越快。相比之下,输入电压的变化对瞬态温度响应速度的影响较小。

本文虽通过实验和模拟探究了加热器的温度特性,但目前工作仍存在一定局限性:在实验方面,目前仅开展了 300~600 V 低电压工况下的测试,尚缺乏更高电压条件下的实验验证;在模拟方面,本研究仅针对单根直管模型进行计算,未考虑多管路并联结构,也未涉及弯管等几何形式对温度分布的

影响。针对上述不足,后续研究可从以下方面开展进一步探索:

1) 搭建更高电压等级的实验平台,开展高电压工况的实验研究;

2) 建立多管路并联模型,同时考虑弯管等结构因素对温度特性的影响,以提升研究的完整性。

[参考文献]

- [1] LUND P D, LINDGREN J, MIKKOLA J, et al. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 785-807.
- [2] YANG Y, YUAN X, LI Z, et al. Conceptual design of eccentric micro annular channel electric heater for a thermal energy storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 99: 113191.
- [3] GORDON J M, FASQUELLE T, NADAL E, et al. Providing large-scale electricity demand with photovoltaics and molten-salt storage [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110261.
- [4] OKAZAKI T. Electric thermal energy storage and advantage of rotating heater having synchronous inertia [J]. *Renewable Energy*, 2020, 151: 563-74.
- [5] WEISHAUP T, MÜLLER K. Reliability of thermal energy storage technologies [J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2021, 93(4): 580-4.
- [6] LI P, YANG P, ZHANG S, et al. A comprehensive energy, exergy, economic and environmental analysis and optimization of an advanced adiabatic compressed air energy storage system integrated with an electric heater [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 140: 119057.
- [7] XU C, PANG J, WU Y, et al. Thermodynamic analysis of the chemical looping electricity storage system incorporating an electric heater [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 59: 106328.
- [8] 张国龙, 居文平, 常东锋, 等. 电阻式熔盐加热器动态建模与参数化分析 [J]. *热力发电*, 2023, 52(9): 155-161.
- [9] ZHANG G, JU W, CHANG D, et al. Dynamic modeling and parametric analysis of resistance molten salt heater[J]. *Thermal power generation*, 2023, 52(9): 155-161.
- [10] ZHANG Y, ZHANG C, WU Y, et al. Experimental and simulation study of high-voltage molten salt electric heating tubes for large-scale electric-to-thermal energy conversion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 264: 125404.
- [11] ZHANG Y, ZHANG C, WU Y, et al. Experimental study of AlN powder filled high voltage molten salt electric heater for large scale thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 91: 112143.
- [12] HE X, WANG Y, REN C, et al. Mitigation of the local overheating phenomenon in molten salt electric heaters through flow field optimization [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 94: 112229.
- [13] 张永乐, 张晓明, 吴玉庭, 等. 熔盐电磁感应加热系统的热性能分析 [J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(2): 319-25.
- [14] ZHANG Y, ZHANG X, WU Y, et al. Analysis of thermal performance of electromagnetic induction based molten salt heating system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(2): 319-325.
- [15] ZHOU F, LIU L, WANG Z, et al. Research on pipeline-

- type power frequency electromagnetic heating system and multi-layer winding based power regulation method [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 65: 105525.
- [14] 唐婧怡, 楚帅, 葛维春, 等. 电极式电制热与传统制热的差异及其在碳中和的应用前景 [J]. *发电技术*, 2021, 42(5): 525-536.
TANG J, CHU S, GE W, et al. Difference between electrode electric heating and traditional heating and its application prospect in carbon neutrality[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(5): 525-536.
- [15] MANNI M, NICOLINI A, COTANA F. Performance assessment of an electrode boiler for power-to-heat conversion in sustainable energy districts [J]. *Energy and Buildings*, 2022, 277: 112569.
- [16] 王昊, 董鹤鸣, 杜谦, 等. 中国电极锅炉现状及展望 [J]. *热能动力工程*, 2023, 38(8): 1-12.
WANG H, DONG H, DU Q, et al. Current situation and outlook of electrode boilers in China [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2023, 38(8): 1-12.
- [17] HUTABARAT R, NUGROHO G. High voltage electrode boiler implementation using hydropower in a process steam production scenario[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2088(1): 030008(1-11).
- [18] 胡睿, 赵正, 董鹤鸣, 等. 电极式锅炉应用和进展 [J]. *节能技术*, 2025, 43(2): 99-105.
HU R, ZHAO Z, DONG H, et al. Applications and advances of electrode boiler [J]. *Energy Conservation Technology*, 2025, 43(2): 99-105.
- [19] NOVIKOV P, TESLENKO O, BELDII V, et al. Review of technologies of thermal energy generation using high voltage electrode boilers in the context of their application as energy load regulator [M]//ZAPOROZHETS A. *Systems, Decision and Control in Energy V*. Cham; Springer Nature Switzerland. 2023: 355-70.
- [20] GICEVSKIS K, LINKEVICIS O. The role of decentralized electrode boiler in ancillary services and district heating: a feasibility assessment [J]. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2023, 60(5): 32-42.
- [21] 王金梁, 吴华栋. 太阳盐的热力学性质及其在光热发电中的应用 [J]. *发电设备*, 2021, 35(5): 334-8.
WANG J, WU H. Thermophysical properties of solar salt and its application in solar thermal power generation [J]. *Power Equipment*, 2021, 35(5): 334-8.
- [22] CARABALLO A, GALÁN-CASADO S, CABALLERO Á, et al. Molten salts for sensible thermal energy storage: A review and an energy performance analysis [J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1197.
- [23] SOMMERSETH C, MOLVIK K-R, HILLESTAD H, et al. Electrical conductivity of binary, ternary, quaternary and quinary molten salt mixtures based on NaCl-CaCl₂ [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2024, 171(10): 106503.
- [24] KATYSHEV S F, SHIROKOVA N V, TESLYUK L M. Conductivity of molten LiCl-KF-ZrF₄ mixtures [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2017, 53(5): 547-50.
- [25] GAO X, VON BOECKLIN M, ERMANOSKI I, et al. Low-cost radiant heater for rapid response, high-temperature heating [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 652203.

(责任编辑 李园)