



基于煤气化渣的 Fe_2O_3 纳米流体制备与电池热管理试验

高春雷 侯竣升 丁子涵 黄磊 张浩 田佰起 吴俊杰 郝南京

引用本文:

高春雷, 侯竣升, 丁子涵, 等. 基于煤气化渣的 Fe_2O_3 纳米流体制备与电池热管理试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 181–190.

GAO Chunlei, HOU Junsheng, DING Zihan. Synthesis and battery thermal management of coal gasification slag based Fe_2O_3 nanofluid: An experimental research[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 181–190.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0350>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤气化渣资源化利用综述

Review on resource utilization of coal gasification slag

煤炭科学技术. 2024, 52(8): 192–208 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1147>

煤气化渣特性分析及综合利用研究进展

Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 251–257 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2a495359-0e29-4312-ab2f-8a48f369ec17>

煤气化渣理化特性及其所含重金属迁移规律综述

Review of physical and chemical characteristics and heavy metal migration rules of coal gasification slag

煤炭科学技术. 2025, 53(2): 426–443 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0475>

煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势

Resource utilization status and development trend of bulk solid waste of coal-based ash/slag

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 238–252 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1102>

煤炭地下气化过程中温度场及其传热特征研究进展

Research progress of temperature field and heat transfer characteristics in process of underground coal gasification

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 275–285 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8e23924d-2ea2-44e8-99c8-106790d2b372>

气化渣残炭粒子电极的制备及电催化性能研究

Preparation and electrocatalytic performance of gasification slag residual carbon particle electrode

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 248–256 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0447>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



高春雷, 侯俊升, 丁子涵, 等. 基于煤气化渣的 Fe_2O_3 纳米流体制备与电池热管理试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 181–190.

GAO Chunlei, HOU Junsheng, DING Zihan, et al. Synthesis and battery thermal management of coal gasification slag based Fe_2O_3 nanofluid: An experimental research[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 181–190.

移动扫码阅读

基于煤气化渣的 Fe_2O_3 纳米流体制备与电池热管理试验

高春雷¹, 侯俊升², 丁子涵², 黄磊², 张浩³, 田佰起³, 吴俊杰², 郝南京²

(1. 焦矿能源集团股份有限公司, 山东邹城 273500; 2. 西安交通大学 化学工程与技术学院, 陕西西安 710049; 3. 陕西未来能源化工有限公司, 陕西榆林 719054)

摘要: 随着煤化工行业的发展, 以煤气化渣为代表的煤基固废产量逐年增长, 其大规模的高值化利用问题亟待解决。当前, 由煤基固废制备的功能材料主要有沸石、活性炭、碳硅复合材料等。这些材料在吸附剂、催化剂等领域展现出广阔的应用前景。然而, 相对粉煤灰、煤矸石等, 煤气化渣的资源化利用率仍偏低。鉴于煤气化渣巨大的产量与当前相对有限的应用需求现状之间存在的显著矛盾, 寻求更为广泛且高效的利用途径显得尤为重要。在此背景下, 利用煤气化渣作为原材料, 大规模制备具有卓越热物理性能的纳米流体, 是煤气化渣的高值化利用的一条新的路径。其中, 纳米流体在电池热管理领域的应用不仅实现了资源的高效转化与增值, 还显著提升了电池热管理系统的换热性能, 有助于推动纳米流体在新能源产业中的大规模应用。以煤气化渣为原料, 通过元素活化分离, 制备了具有良好稳定性的水基 Fe_2O_3 纳米流体。并且, 对合成的纳米流体进行电池热管理试验研究, 探究了浓度、流速、放电倍率变化对纳米流体传热性能影响规律。研究结果表明: 纳米流体在压降略微增大的情况下显著降低了电池温升和温差, 电池表面温升和表面温差分别降低了 22% 和 34%。纳米颗粒对热导率的增强作用及其扰动效应是强化传热性能的关键因素。研究结果为煤基固废的大规模高值化利用开辟了新方向, 同时为电池热管理提供了新的研究思路。

关键词: 煤气化渣; 纳米流体; 强化传热; 电池热管理; 单相对流传热

中图分类号: TQ536.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)06-0181-10

Synthesis and battery thermal management of coal gasification slag based Fe_2O_3 nanofluid: An experimental research

GAO Chunlei¹, HOU Junsheng², DING Zihan², HUANG Lei², ZHANG Hao³, TIAN Baiqi³,
WU Junjie², HAO Nanjing²

(1. Yankuang Energy Group Co., Ltd., Zoucheng 273500, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Shaanxi Future Energy Co., Ltd., Yulin 719054, China)

Abstract: With the development of the coal chemical industry, the production of coal-based solid waste including coal gasification slag is increasing annually, and it is increasingly urgent for its high-value resource utilization. Functional materials prepared from coal gasification slag include zeolite, activated carbon, carbon-silicon composite materials, etc. These materials are mainly applied in fields including adsorbents, construction materials and catalysts. However, the application of coal gasification slags was relatively limited compared to other coal based solid wastes. Therefore, it is necessary to expand new application. Coal gasification slag, which is rich in elements including iron, silicon, aluminum, and calcium, serves as an excellent raw material for sustainably and economically preparing nanofluids, which are promising in heat transfer enhancement applications. Nanofluids can obviously enhance both one-phase and two-phase heat transfer with negligible extra energy consumption, which enable nanofluids as promising materials for battery thermal management. Water-based Fe_2O_3 ,

收稿日期: 2025-03-15 策划编辑: 常琛 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2025-0350

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3904301)

作者简介: 高春雷(1981—), 男, 山东泰安人, 正高级工程师, 硕士。E-mail: 154680999@qq.com

通讯作者: 吴俊杰(1999—), 男, 四川成都人, 硕士。E-mail: 1275046331@qq.com

nanofluid was prepared from coal gasification coarse slag and experimental research on battery thermal management based on nanofluid was conducted. Nanofluid with a mass fraction of 0.1% to 0.3% and an average particle diameter of 85 nm was prepared through chemical activation, element separation, pH adjustment, calcination and supersonic dispersion. The effects of nanofluid mass fraction, flow rate, and discharge rate on heat transfer performance were investigated. The nanofluids can decrease the maximum temperature rise of the battery surface by 22% and the maximum temperature difference by 34% without obvious extra pressure drop. Besides, the overall performance evaluation criterion was enhanced significantly with the application of nanofluids. Enhanced thermal conductivity and the disturbance effect of nanoparticles are related to the heat transfer enhancement. This research provides a new method for high value utilization of coal gasification slag and battery thermal management.

Key words: coal gasification slag; nanofluids; heat transfer enhancement; battery thermal management; single-phase flow heat transfer

0 引言

随着煤化工行业的发展,煤气化渣^[1-2](Coal Gasification Slag, CGS)、粉煤灰^[3-4]、煤矸石^[5]等煤基固废产量日益增加。据统计,中国 CGS 年产量为 $50 \times 10^6 \sim 70 \times 10^6$ t^[6-7],然而,CGS 的资源化利用率仅为 30%^[8],规模化资源化利用尚不成熟,绝大部分被填埋处理^[9],这不仅造成了资源的巨大浪费,还引发了严重的土壤污染问题^[10-11]。当前,关于 CGS 高值化利用的研究主要集中于沸石^[12-13]、多孔分子筛^[14-16]、活性炭^[17-18]及硅碳复合材料^[19-20]等功能材料上。但相较于 CGS 的巨大产量,上述领域的应用需求仍显不足,难以全面消化其产量,因而,亟需开拓新的应用领域,以实现其大规模高值化利用。CGS 富含 Fe、Al、Si 等无机元素,通过添加活化剂煅烧、pH 调节等步骤,可以实现这些元素的有效分离。在制备基于上述元素的纳米流体材料方面,CGS 展现出巨大潜力。纳米流体是将纳米尺度(1~100 nm)的颗粒均匀分散到基础工质得到的流体^[21],因其优良热物理性质在传热领域广泛应用。在众多类型的纳米流体中,水基 Fe_2O_3 纳米流体因其较高的热导率^[22-23]和环境友好特性^[24]而在传热领域备受青睐。已有大量关于氧化铁纳米流体制备、性能表征和应用有关研究。任根宽等^[25]研究表明,固相还原法制备 Fe_2O_3 纳米粉体最佳温度为 500 ℃,最佳反应时长为 60 min。杨柳等^[26]的研究表明,含有氨水的 Fe_2O_3 纳米流体,在十二烷基苯磺酸钠质量分数 0.8%,超声处理时长 30 min 时稳定性达到最佳,该研究结果与双电层理论吻合。SADEGHI 等^[27]的研究显示,氧化铁纳米流体的黏度与颗粒平均粒度相关,粒度越大黏度越低。这是由于,纳米颗粒表面具有一层结构独特的水分子层,颗粒与水分子界面形成了独特的 Fe—O 键,从而增大黏度。颗粒粒度越小,比表面积越大,该效应对黏度的增大作用越显著。AF-SHARI 等^[28]的研究指出,体积分数 2.0% 的氧化铁

纳米流体可使管内流动的传热系数提高 19%。近年来,含铁固废被用于制备可溶性铁盐,进而制备 Fe_2O_3 纳米流体。在众多含铁固废中,CGS 含铁量可达 7.7%~23.9%^[9,11],产量巨大,Fe 赋存形式简单易于分离,是制备可溶性铁盐,进而制备 Fe_2O_3 纳米流体的良好材料。

在电池热管理系统(Battery Thermal Management System, BTMS)领域,纳米流体的应用尤为引人注目。随着动力电池的能量密度日益提升,对高效 BTMS 需求日益迫切^[29]。液冷 BTMS 因其出色的传热性能和稳定性,已成为主流选择^[30]。为进一步提高液冷 BTMS 的性能,研究者采用了优化流道设计^[31-32]、改变工质种类^[33-34]、与其他技术(相变材料(Phase Change Materials, PCM)、热管等)联合应用^[35-36]等多种策略。在众多策略中,纳米流体强化传热因其效果显著,无需附加结构,额外功耗低的优势得到广泛关注和应用,并逐步发展为液冷 BTMS 的新分支——纳米流体 BTMS^[37]。目前已有大量关于纳米流体 BTMS 的研究。YETIK 等^[38]的研究表明,当环境温度为 283 K,放电倍率为 2.0 C 时,质量分数为 2.0% 的氧化铁纳米流体可使电池表面最高温度控制在 294 K。KIANI 等^[39]的研究表明,在外加磁场,发热功率为 71 W 时,体积分数 2.0% 的氧化铁纳米流体可使 PCM 工作时间延长 82%。纳米流体 BTMS 效果确切,具有广泛的应用前景。

笔者基于活化与元素分离策略,以煤气化粗渣(Coal Gasification Coarse Slag, CGCS)为铁源,制备了具有良好稳定性的 Fe_2O_3 纳米流体。对纳米流体 BTMS 进行了试验研究,得到了纳米流体 BTMS 的最佳运行参数,并对 BTMS 性能影响因素进行了深入分析与讨论。纳米流体在不同浓度下均有效降低了电池表面温升与温差。较高的热导率及纳米颗粒的扰动效应有效提高了相同流速下的传热系数(Heat Transfer Coefficient, HTC),从而提升 BTMS 的性能。本研究为煤气化灰渣等煤基固废的高值化大

规模利用及电池热管理提供了重要参考。

1 材料与试验方法

1.1 材料、试剂与仪器

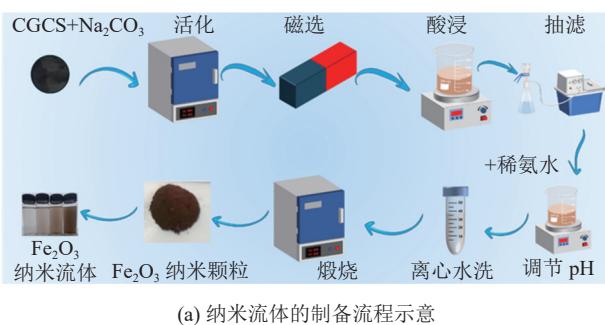
CGCS、浓盐酸 (37%)、NaOH (≥99%)、 Na_2CO_3 (≥99%)、浓氨水 (28%)。CGCS 被预先研磨并过 200 目 (75 μm) 筛, 取筛余物。其他试剂均不作预处理。

本试验涉及的仪器包括: ZSX Primus III+X 射线荧光光谱分析 (X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF), 用于分析 CGCS 的元素组成; SmartLab SE X 射线衍射仪 (X-Ray Diffraction, XRD), 用于分析铁精矿及纳米粉体的物相进行; MAIA3 LMH 扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM), 用于分析

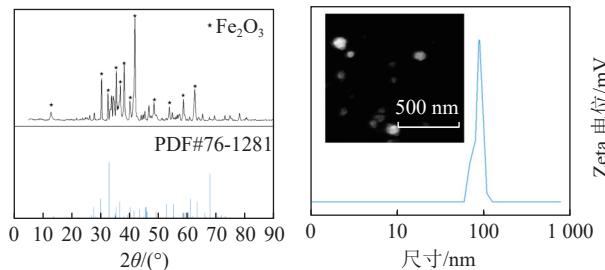
纳米颗粒形貌与尺寸; ZSE 粒度仪, 用于测定纳米颗粒的尺寸分布及纳米流体的 Zeta 电位; Hot Disk TPS2500S 导热系数仪, 用于测定液态工质的热导率。

1.2 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米流体的制备

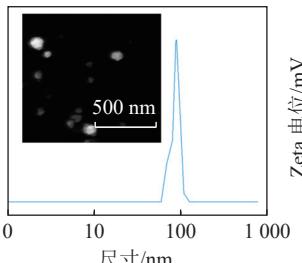
纳米粉体制备过程如图 1a 所示。通过向 CGCS 加入化学活化剂并高温煅烧, 可使 Fe、Al、Si、Ca 等元素转变为高反应活性的物相, 为后续 Fe 的富集与分离创造条件。将 CGCS 粉碎并过 200 目 (75 μm) 筛, 与 Na_2CO_3 以质量比 2:1 混合, 并在 750 $^{\circ}\text{C}$ 下煅烧 90 min。将冷却后的上述物料粉碎并过 200 目 (75 μm) 筛, 水洗, 干燥后使用磁铁进行磁选, 水洗, 得到铁精矿。XRD 结果显示, 铁精矿中 Fe 的存在形式为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 及 Fe_3O_4 (图 1b)。



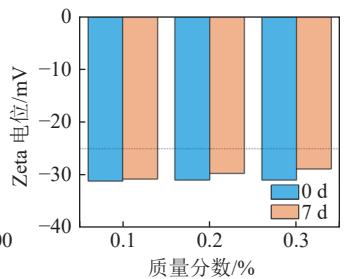
(a) 纳米流体的制备流程示意



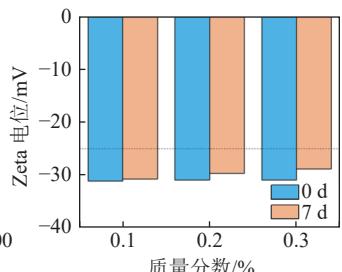
(b) 铁精矿的 XRD 分析



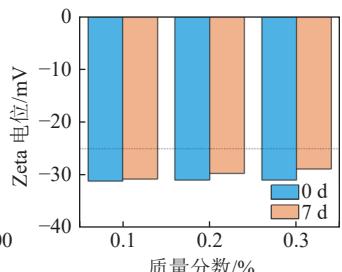
(c) 纳米颗粒的粒度测定及 SEM 表征



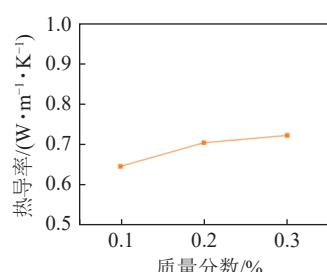
(d) 纳米粉体的 XRD 分析



(e) 纳米颗粒的粒度测定及 SEM 表征



(f) 纳米流体的 Zeta 电位表征



(g) 纳米流体的导热系数测定结果

图 1 纳米流体的制备及性能

Fig.1 Preparation and performance of nanofluids

取 10 g 铁精矿, 加入 80 mL 浓度为 4.0 mol/L 的 HCl, 在 85 $^{\circ}\text{C}$ 下浸出 120 min, 抽滤。取 15 mL 滤液, 以去离子水稀释至 50 mL, 在 40 $^{\circ}\text{C}$ 下敞口搅拌 30 min, 将溶液中的 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 。随后逐滴加入稀氨水 (5 mL 氨水 + 5 mL 去离子水), 在 80 $^{\circ}\text{C}$ 下以 600 r/min 搅拌 60 min。将所得产物离心并水洗, 于 105 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱内烘干, 随后送入马弗炉, 650 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧 120 min, 得到 Fe_2O_3 纳米颗粒粉体。用分析天平称取一定质量粉体, 加入去离子水中, 超声分散 120 min, 最终得到水基 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米流体 (图 1c)。

1.3 试验平台的搭建

试验平台包含 3 部分: 模拟电池模块, 冷板模块

及数据采集模块。模拟电池模块以国内生产的方形磷酸铁锂电池 (200 mm \times 130 mm \times 36 mm, 额定放电倍率 1 C, 额定容量 90 Ah, 内阻 0.5 m Ω) 为模拟对象, 包含 1 块对应尺寸铝块及均匀分布于内部的 5 根加热棒。冷板模块包含水箱、恒温槽、管路及冷板 4 个部分。电池表面分布有 5 个测温点, 表面各点温度、进出口温度及铝板底面温度、进出口压差由数据采集器实时采集, 并使用 Labview 软件进行后台记录。为确保装置绝热性, 使用发泡塑料垫包裹整个测试段。

1.4 电池生热与传热模型

根据热的来源, 电池工作过程中的热量可分为

反应热 Q_r 、焦耳热 Q_j 、极化热 Q_p 、副反应热 Q_s 4 个部分^[40]。

反应热是主要反应, 即 Li^+ 的定向移动所伴随的热量变化, 在充电过程中反应热为负值, 即电池吸热; 在放电反应中反应热为正值, 即电池放热。反应热的计算过程如式(1)—式(4)所示。

$$Q_r = \frac{T \Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

其中, T 为温度, K ; ΔS 为电化学反应过程中的熵变, J/K 。

$$\Delta S = \frac{n F dE}{dT} \quad (2)$$

其中, F 为法拉第常数, 其值为 $96\,484.5\,\text{C/mol}$; dE/dT 为温度影响系数, 常用取值范围是 $0.22\sim0.50$ ^[41], 本文取 0.3 。

$$I = \frac{nF}{\Delta t} \quad (3)$$

其中, I 为电流, A ; n 为发生定向移动的电子物质的量, mol ; t 为时间, s 。

从而,

$$Q_r = IT \frac{dE}{dT} \quad (4)$$

焦耳热来源于电池的内阻, 其值恒为正, 计算式如式(5)所示。

$$Q_j = I^2 R \quad (5)$$

其中, R 为固有内阻, Ω 。

电池放电过程中, 电极存在极化效应, 导致电池输出电压低于标称值。因极化效应带来的额外内阻即为极化电阻, 其产生的热量称为极化热。极化热值恒为正, 计算式如式(6)所示。

$$Q_p = I^2 R_p \quad (6)$$

其中, R_p 为极化内阻, Ω 。

在正常工况下, 副反应热不予考虑, 总热量为反应热、焦耳热、极化热三者之和。采用 Bernardi 式^[41](式(7))计算电池产热功率。

$$Q_{\text{heat}} = I^2 r + IT \frac{dE}{dT} \quad (7)$$

其中, Q_{heat} 为发热功率, W ; I 为电池放电电流, A ; r 为电池等效内阻, Ω ; T 为电池温度, K , 本研究中取 $293\,\text{K}$ 。

电池的传热方式包括热辐射、热传导和热对流 3 类。电池工作时, 内部温度与表面温度基本一致, 故热辐射可忽略不计。电池的传热主要包含热传导和热对流。热传导是指在物体内或不同物体间存在温度梯度时, 热由高温区域自发流向低温区域的过程。

该部分传热量在电池工作时通常保持固定, 可使用傅里叶定律表示, 如式(8)所示。

$$Q = A \lambda \frac{dT}{db} \quad (8)$$

其中, A 为垂直于热流方向的面积, m^2 ; dT/db 为一维尺度上的温度梯度, K/m 。热对流可用牛顿冷却式表示, 如式(9)所示。

$$\Phi = h A \Delta T \quad (9)$$

其中, Φ 为对流传热功率, W ; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$; A 为传热面积, m^2 。

1.5 电池热管理试验

为模拟电池在不同工况下的温升情况, 本研究选择了 $1\,\text{C}$ 、 $2\,\text{C}$ 、 $3\,\text{C}$ 三种放电倍率进行试验研究。据式(7), 3 种工况对应的 Q_{heat} 分别为 $12\,\text{W}$ 、 $32\,\text{W}$ 和 $60\,\text{W}$ 。将定量蠕动泵设置为所需流量, 待流动状态稳定时, 将直流电源输出功率迅速调整至对应值, 并维持相应时间, 以模拟电池完全放电的工况。试验全程保持 $T_{\text{in}}=20\,\text{℃}$ 。

优异的装置绝热性与稳定性是数据可靠性的基础。为验证装置绝热性, 本研究使用纯水作工质进行热平衡试验, 以 $60\,\text{W}$ 加热功率持续加热, 直至电池表面最高温度在 $30\,\text{s}$ 内波动不超过 $0.02\,\text{℃}$, 记录对应的出口温度 T_{out} , 换热量 Q_t 的计算式如式(10)所示:

$$Q_t = qc(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (10)$$

其中, q 为质量流量, kg/s ; c 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$; T_{in} 为入口温度, ℃ 。

热损失(Q_{loss})的计算式如式(11)所示。

$$Q_{\text{loss}} = \frac{Q_{\text{heat}} - Q}{Q_{\text{heat}}} \times 100\% \quad (11)$$

纳米流体具有优异的传热性能, 但较高的黏度导致额外压降。为权衡二者, 采用整体性能评估标准(Performance Evaluation Criterion, PEC)衡量 BTMS 性能, 计算过程如式(12)—式(15)所示^[42]:

$$f = \frac{2d_e \Delta P}{L \rho u^2} \quad (12)$$

其中, f 为摩擦因数; d_e 为当量直径, m ; ΔP 为压差, Pa ; L 为特征长度, m ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为流速, m/s 。

$$h = \frac{Q_{\text{heat}}/A}{T_s - (T_{\text{out}} + T_{\text{in}})/2} \quad (13)$$

其中, h 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为冷板面积, m^2 ; T_s 为壁面温度, ℃ 。

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (14)$$

其中, λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

$$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (15)$$

其中, Nu 为努塞尔数, Nu_0 为基准工况的努塞尔数; f_0 为基准工况的摩擦因数。本文以流速 240 mL/min , 放电倍率 3 C, 纯水工质为基准工况。

2 试验结果与分析

2.1 纳米流体的性质

XRD 分析结果显示, 纳米粉末的衍射曲线符合 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 无显著的杂峰与弥散峰, 标志着粉末具有良

好的纯度与结晶度(图 1d)。粒度仪及 SEM 测定结果显示, 纳米颗粒平均直径为 85 nm(图 1e)。Zeta 电位测定结果显示, 质量分数 0.1% ~ 0.3% 的纳米流体静置 7 d 后 Zeta 电位绝对值 > 25 mV(图 1f), 标志着纳米流体具有良好的稳定性。热导率测定结果显示, 纳米流体的热导率相对纯水有所提高, 且与质量分数正相关(图 1g)。

2.2 装置可靠性

试验装置的结构如图 2a 所示。模拟电池块及加热棒的尺寸如图 2b 所示。流道结构如图 2c 所示。测温点位置如图 2d 所示。如图 2e 所示, 装置的热损失小于 5%, 标志着良好的绝热性。3 次重复性试验显示, 电池温升曲线吻合良好, 标志试验装置优异

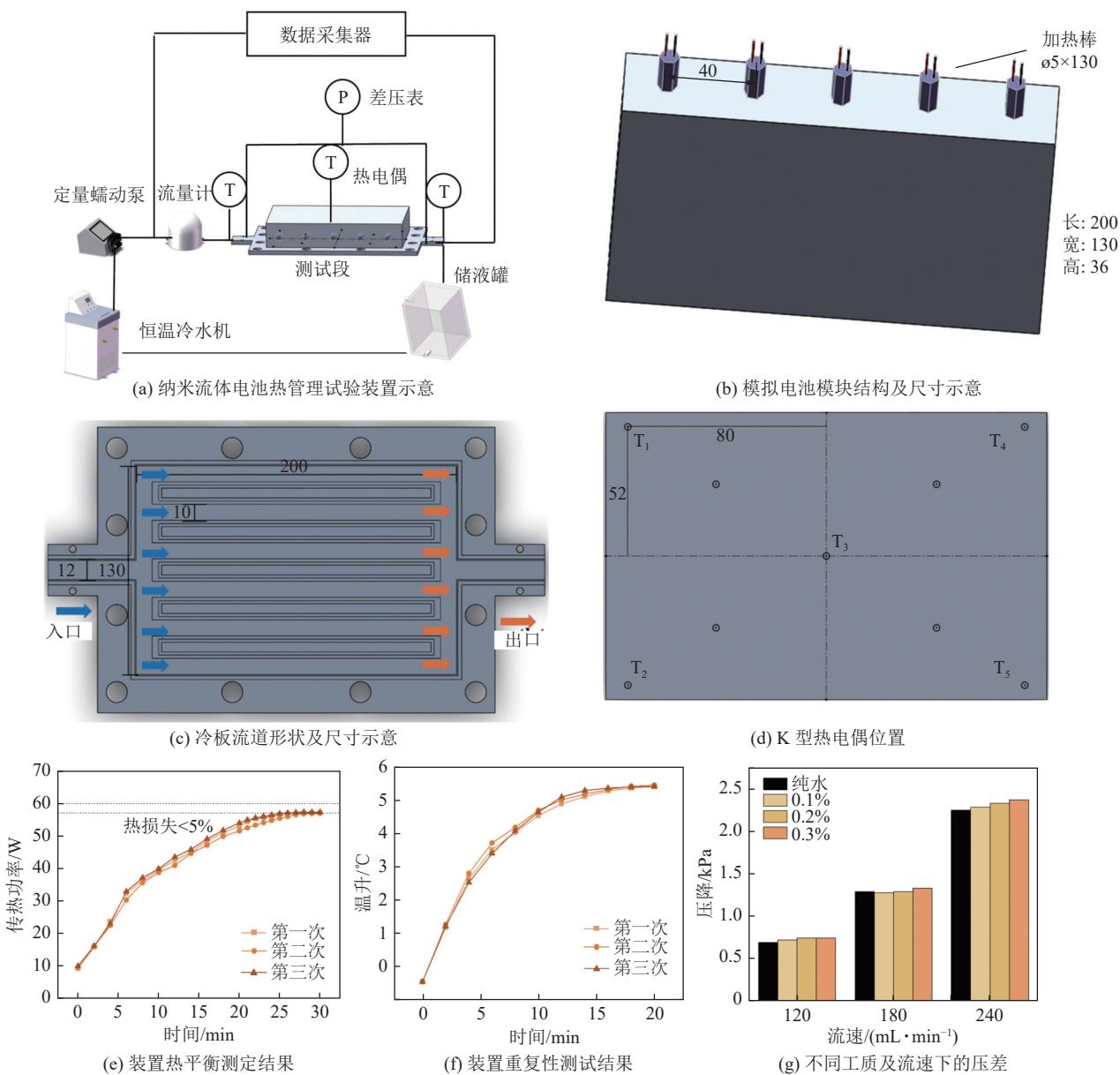


图 2 试验装置的结构与性能

Fig.2 Structure and performance of experimental equipment

的可靠性(图2f)。此外,在不同流速下,纳米流体带来的额外压降均<10%(图2g),额外能耗可忽略不计。

2.3 电池热管理试验结果与分析

电池热管理试验结果如图3所示。在不同质量

分数(0.1%~0.3%)与流速(120~240 mL/min)下,纳米流体均有效降低了电池的温升(图3a—图3i)与温差(图3j—图3l)。本部分系统讨论质量分数、流速、放电倍率对纳米流体BTMS性能的影响。

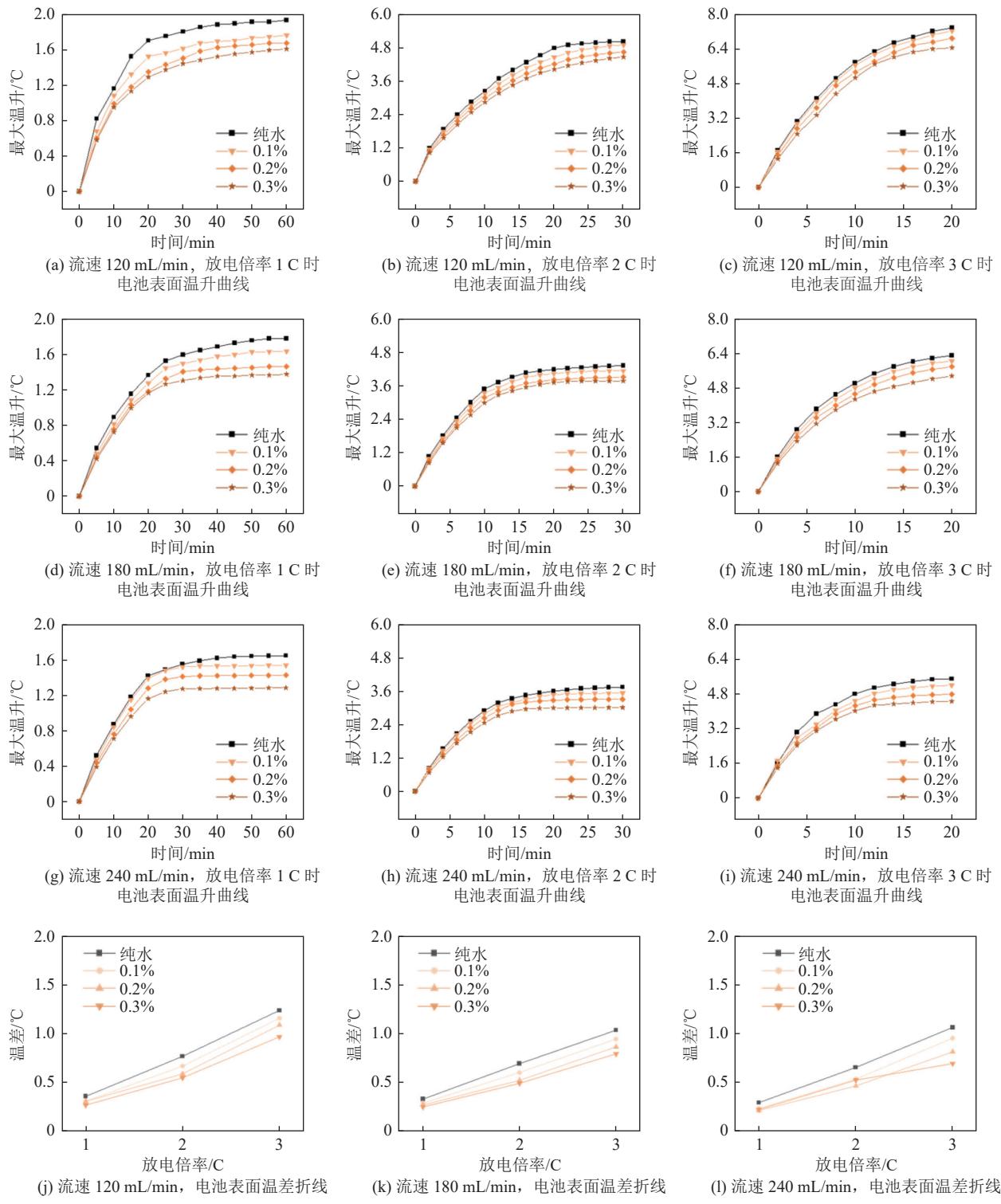


图3 不同工况下的BTMS性能

Fig.3 Performance of BTMS under different conditions

2.3.1 质量分数的影响

在不同流速下,高质量分数纳米流体BTMS均

表现出更佳的性能(图4a—图4c)。当电池放电倍率为3C,流速为240 mL/min,相对纯水冷却的工况,质

量分数 0.3% 的纳米流体使电池表面温升降低了 $1.17\text{ }^\circ\text{C}$ (22%), 表面温差降低了 $0.39\text{ }^\circ\text{C}$ (34%); 质量分数 0.1% 的纳米流体电池表面温升与温差均无显著降低。高质量分数纳米流体具有更高的热导率(图 1g), 能提高工质带走热量的能力。由式(2)可知, 更高的热导率使达到热平衡时壁面温度更低。另外, 布朗运动所致的扰动效应(图 4d)也起到强化传热作用^[43-44], 使冷板带走热量的能力增强(图 4e), 降低电池温升, 并可使达到热平衡时间提早。高质量分数纳米流体内部悬浮的颗粒数目更多, 扰动效应更显著。此外, 纳米颗粒与基液之间的相互作用, 如颗粒与流体分子之间的相互碰撞、摩擦和流动影响, 会进一步增强传热性能。纳米颗粒与固体表面之间的界面热阻往往小于宏观颗粒。较高的质量分数使颗粒与热交换表面的接触面积增加, 能够有效减少热界面层的热阻, 从而提高热交换效率。纳米流体还具备优化流动通道和颗粒分布的作用。在单相流动传热过程中, 流体的流动通道和颗粒的分布情况对热传递有显著影响。均匀分布的纳米颗粒能够优化流动的流态, 从而使得热传递更均匀, 减小电池表面的温差, 而不均匀分布的颗粒可能会导致局部区域的热传递效率低下, 增大电池表面的温差。质量分数高达 0.3% 时纳米流体仍可保持良好的稳定性, 从而

有效改善流态, 减少或消除局部过热点, 降低温差。热导率的提升与颗粒扰动效应、颗粒与基液间热传导增强效应共同作用, 使 BTMS 的 HTC 最大提高了 43%, 同时纳米流体对流态的改善有效降低温差。尽管高质量分数纳米流体较高的黏度导致了额外压降, 但其强化传热性能使 PEC 提升 40%(图 4f), 标志着纳米流体优异的强化传热作用和较低的额外压降显著提升了 BTMS 的性能。

2.3.2 流速的影响

液态工质流速是液冷 BTMS 性能的重要影响因素之一。对于纯水 BTMS, 高流速下性能无显著提升。当放电倍率为 3 C, 冷却工质为纯水, 将流速从 120 mL/min 增至 240 mL/min , 电池表面温升仅由 $7.11\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $5.79\text{ }^\circ\text{C}$, 表面温差仅由 $1.23\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $1.10\text{ }^\circ\text{C}$, 但压降增加 2.06 倍。对于纳米流体 BTMS, 高流速下的性能显著提升。放电倍率为 3 C, 流速为 240 mL/min , 纳米流体质量分数 0.3% 时, 相对同流速纯水冷却的工况, 电池表面温升降低 $1.17\text{ }^\circ\text{C}$ (22%), 温差降低 $0.39\text{ }^\circ\text{C}$ (34%); 相对同浓度流速 120 mL/min 工况, 表面温升降低 $1.95\text{ }^\circ\text{C}$ (34%), 温差降低 $0.26\text{ }^\circ\text{C}$ (27%)。

高流速下, 纳米颗粒的扰动效应更强烈, 显著提升 HTC, 进而提升 PEC。纳米流体质量分数 0.3% 时,

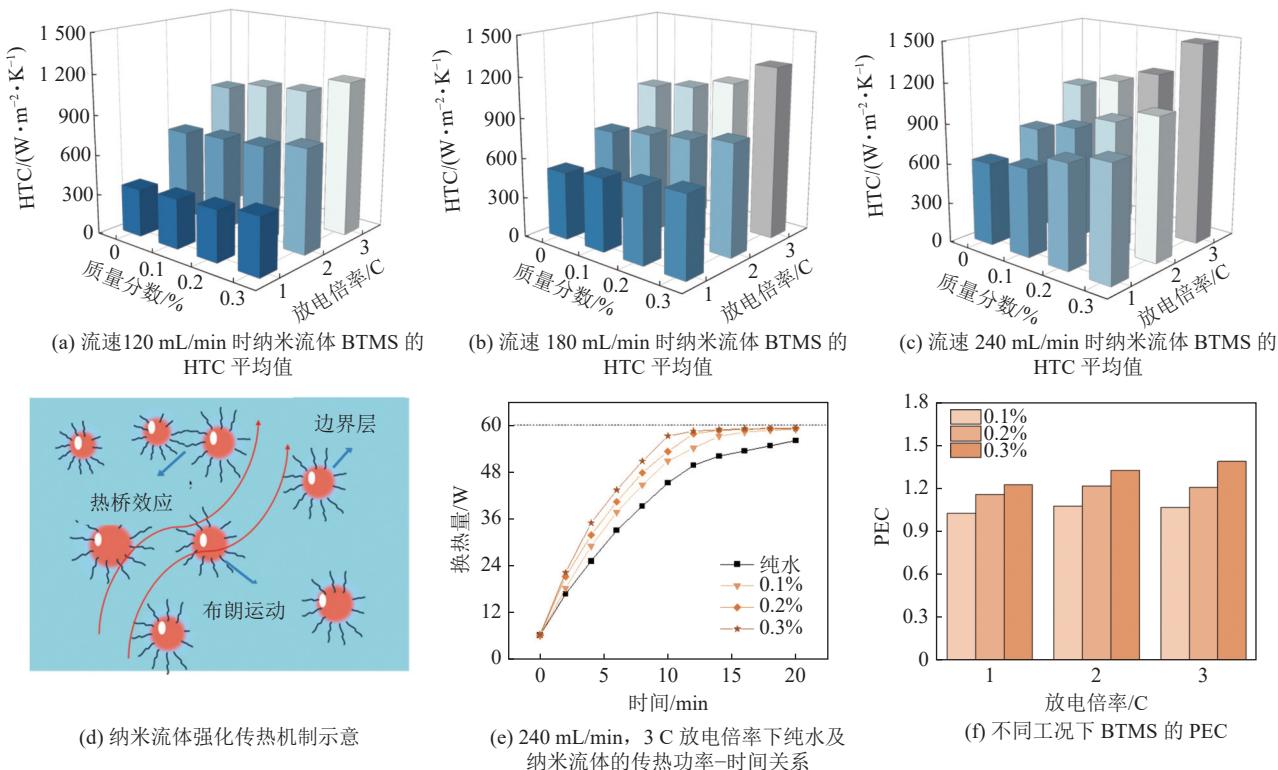


图 4 纳米流体强化传热原理分析

Fig.4 Principles of nanofluid heat transfer enhancement

相对流速 120 mL/min 的工况, 流速 240 mL/min 的工况使 HTC 提升 33%, 尽管存在额外压降, 但优异的传热性能导致 PEC 提升 42%; 以纯水为工质时, 因高流速带来的 HTC 提升仅 9%, 额外压降导致 PEC 无显著提升。较大的流速进一步降低了电池温升与温差, 提升纳米流体 BTMS 的性能。

2.3.3 放电倍率的影响

不同放电倍率产热速率不同, 因此放电倍率显著影响纳米流体 BTMS 的性能。纳米流体 BTMS 在较高放电倍率下性能更突出。当质量分数 0.3%, 流速 240 mL/min 时, 在 1 C、2 C 和 3 C 工况下, 相对基础工质, 纳米流体使得表面温升分别降低 0.29 °C (16%), 0.68 °C (18%) 和 1.17 °C (22%); 表面温差降低 0.08 °C (24%), 0.21 °C (27%) 和 0.39 °C (34%)。高放电倍率下, 工作周期更短, 纳米颗粒的沉降与团聚程度更小^[41], 有效维持纳米流体的高热导率及扰动效应, 更显著地提升 HTC, 使纳米流体 BTMS 具有更佳的性能。

3 结 论

1) 以 CGCS 为原料制备了 FeCl_3 溶液, 并通过直接水解-煅烧法制备了稳定性优异, 颗粒平均直径为 85 nm, 质量分数 0.1% ~ 0.3% 的水基 Fe_2O_3 纳米流体。

2) 质量分数 0.1% ~ 0.3% 的纳米流体在放电倍率为 1 ~ 3 C, 流速 120 ~ 240 mL/min 的工况下显著降低了电池表面温升及温差当放电倍率为 3 C, 工质流速为 240 mL/min, 相对纯水 BTMS, 质量分数 0.3% 的纳米流体使表面温升降低了 1.17 °C (22%), 表面温差降低了 0.39 °C (34%); 该工况下 PEC 为 1.40, 标志着 BTMS 性能显著提升。在高质量分数下, 纳米流体悬浮颗粒数目较多, 扰动效应明显; 高流速下颗粒的扰动效应进一步增强, 从而有效提高 HTC, 进而提高 PEC。

3) 纳米流体 BTMS 在高放电倍率下性能更佳。高放电倍率下, 循环时间较短, 纳米颗粒的沉降与团聚程度更小, 良好维持布朗运动带来的扰动效应及高热导率, 从而具有更优异的强化传热性能。

参考文献(References):

- [1] 石旭, 初茉, 董建飞, 等. 气流床气化细渣中碳-灰的结合形态及其解离特性[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 576–584.
- SHI Xu, CHU Mo, DONG Jianfei, et al. Combined morphology and dissociation characteristics of carbon-ash in fine slag of entrained flow gasification[J]. Journal of China University of Min-
- ing & Technology, 2023, 52(3): 576–584.
- [2] 丁子涵, 马丽, 吴俊杰, 等. 煤气化渣制备功能微纳材料研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(9): 1671–1684.
- DING Zihan, MA Li, WU Junjie, et al. Research progress on the preparation of functional micro/nano materials from coal gasification slag[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(9): 1671–1684.
- [3] XU Y, QIN H, LI H S. Preparation of Mg-Al layered double hydroxide with fly ash[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 634–639.
- [4] 潘金禾, 周长春, 温智平, 等. 四川某地粉煤灰中稀土元素的富集回收[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 998–1006.
- PAN Jinhe, ZHOU Changchun, WEN Zhiping, et al. Recovery of rare earth elements in coal fly ash from Sichuan Province[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 998–1006.
- [5] ZHANG W Q, CHAI J, FENG X J, et al. Preparation and micro-structure of coal gangue-based geopolymer[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 539–547
- [6] ZHU Y K, WU J J, ZHANG Y X, et al. Preparation of hierarchically porous carbon ash composite material from fine slag of coal gasification and ash slag of biomass combustion for CO_2 capture[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125452.
- [7] ZHANG Y F, QU J S, ZHANG J B, et al. Distribution, occurrence, and leachability of typical heavy metals in coal gasification slag[J]. Science of the Total Environment, 2024, 926: 172011.
- [8] 吴锦文, 邓小伟, 焦飞硕, 等. 煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 238–252.
- WU Jinwen, DENG Xiaowei, JIAO Feishuo, et al. Resource utilization status and development trend of bulk solid waste of coal-based ash/slag[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 238–252.
- [9] 刘艳丽, 李强, 陈占飞, 等. 煤气化渣特性分析及综合利用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 251–257.
- LIU Yanli, LI Qiang, CHEN Zhanfei, et al. Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 251–257.
- [10] REN L, DING L, GUO Q H, et al. Characterization, carbon-ash separation and resource utilization of coal gasification fine slag: A comprehensive review[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 398: 136554.
- [11] 高海洋, 梁龙, 斯开宇, 等. 煤气化渣资源化利用综述[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 192–208.
- GAO Haiyang, LIANG Long, JIN Kaiyu, et al. Review on resource utilization of coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 192–208.
- [12] XU L Y, DONG K M, GUO F Q, et al. Synthesis of zeolite-based porous catalysts from coal gasification fine slag for steam reforming of toluene[J]. Energy, 2023, 274: 127294.
- [13] YUAN N, TAN K Q, ZHANG X L, et al. Synthesis and adsorption performance of ultra-low silica-to-alumina ratio and hierarch-

- ical porous ZSM-5 zeolites prepared from coal gasification fine slag[J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 134839.
- [14] CHEN C W, HUANG H, YU Y K, et al. Template-free synthesis of hierarchical porous carbon with controlled morphology for CO_2 efficient capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 353: 584–594.
- [15] LIU S, CHEN X T, AI W D, et al. A new method to prepare mesoporous silica from coal gasification fine slag and its application in methylene blue adsorption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1062–1071.
- [16] LIU Y F, WANG Z Q, ZHAO W H, et al. Hierarchical porous nanosilica derived from coal gasification fly ash with excellent CO_2 adsorption performance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140622.
- [17] TIAN X D, CHEN Z C, HOU J, et al. Sustainable utilization method of using coal gasification fine ash to prepare activated carbon for supercapacitor[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132524.
- [18] XU Y T, CHAI X L. Characterization of coal gasification slag-based activated carbon and its potential application in lead removal[J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(3): 382–391.
- [19] ZHU D D, ZUO J, JIANG Y S, et al. Carbon-silica mesoporous composite in situ prepared from coal gasification fine slag by acid leaching method and its application in nitrate removing[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 136102.
- [20] GU Y Y, QIAO X C. A carbon silica composite prepared from water slurry coal gasification slag[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, 276: 303–307.
- [21] CHOI U S. Developments and applications of non-newtonian flows[J]. ASME, 1995, 66: 474–480.
- [22] LI S Y, JI W T, ZHAO C Y, et al. Effects of magnetic field on the pool boiling heat transfer of water-based $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 128: 762–772.
- [23] PENG Y P, GHAHNAVIYEH M B, AHMAD M N, et al. Analysis of the effect of roughness and concentration of Fe_3O_4 /water nanofluid on the boiling heat transfer using the artificial neural network: An experimental and numerical study[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 163: 106863.
- [24] AHMED M A, ALI S M, EL-DEK S I, et al. Magnetite–hematite nanoparticles prepared by green methods for heavy metal ions removal from water[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2013, 178(10): 744–751.
- [25] 任根宽, 罗欣, 朱登磊, 等. 固相还原法制备纳米氧化铁热力学分析及其实验研究[J]. 无机盐工业, 2025, 57(4): 73–78.
REN Genkuan, LUO Xin, ZHU Denglei, et al. Thermodynamic analysis and experiment research on preparation of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -nanoparticles by solid-phase reduction method[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2025, 57(4): 73–78.
- [26] 杨柳, 杜垲, 李彦军, 等. 氨水- Fe_2O_3 纳米流体稳定性影响因素分析[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9): 1457–1460.
YANG Liu, DU Kai, LI Yanjun, et al. Dispersing of Fe_2O_3 nanoparticles in ammonia-water suspension[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(9): 1457–1460.
- [27] SADEGHI S S, HADI A, MOSAVI MASHHADI M. Viscosity of Fe_2O_3 -water nanofluids by molecular dynamics simulations: Effects of nanoparticle content, temperature and size[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 382: 121859.
- [28] AFSHARI F, SÖZEN A, KHANLARI A, et al. Heat transfer enhancement of finned shell and tube heat exchanger using Fe_2O_3 /water nanofluid[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(11): 3297–3309.
- [29] ALI ABDELKAREEM M, MAGHRABIE H M, ABO-KHALIL A G, et al. Battery thermal management systems based on nanofluids for electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104385.
- [30] THAKUR A K, PRABAKARAN R, ELKADEEM M R, et al. A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101771.
- [31] SARCHAMI A, TOUSI M, KIANI M, et al. A novel nanofluid cooling system for modular lithium-ion battery thermal management based on wavy/stair channels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 182: 107823.
- [32] SRINIVAAS S, LI W, GARG A, et al. Battery thermal management system design: Role of influence of nanofluids, flow directions, and channels[J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2020, 17(2): 021110.
- [33] SIRIKASEMSUK S, NAPHON N, EIAMSA-ARD S, et al. Analysis of nanofluid flow and heat transfer behavior of Li-ion battery modules[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 208: 124058.
- [34] TOUSI M, SARCHAMI A, KIANI M, et al. Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical Li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102910.
- [35] SMAISIM G F, AL-MADHHACHI H, ABED A M. Study the thermal management of Li-ion batteries using looped heat pipes with different nanofluids[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 37: 102227.
- [36] ROSTAMI S, NADOOSHAN A A, RAISI A, et al. Effect of using a heatsink with nanofluid flow and phase change material on thermal management of plate lithium-ion battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104686.
- [37] 吴俊杰, 侯峻升, 马丽, 等. 纳米流体电池热管理研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(8): 1498–1508.
WU Junjie, HOU Junsheng, MA Li, et al. Research progress on nanofluids for battery thermal management[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(8): 1498–1508.
- [38] YETIK O, MORALI U, KARAKOC T H. A numerical study of thermal management of lithium-ion battery with nanofluid[J]. *Energy*, 2023, 284: 129295.
- [39] KIANI M, OMIDDEZYANI S, NEJAD A M, et al. Novel hybrid thermal management for Li-ion batteries with nanofluid cooling in the presence of alternating magnetic field: An experimental

- study[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101539.
- [40] 张璐阳. 一种用于方型锂离子电池的相变材料与液冷耦合的动力电池热管理[D]. 西安: 长安大学, 2024.
- ZHANG Luyang. Thermal management of power battery coupled with phase change material and liquid cooling for square lithium ion battery[D]. Xi'an: Changan University, 2024.
- [41] 刘帅. 基于纳米流体的锂离子电池液冷散热性能试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- LIU Shuai. Experimental study on liquid cooling heat dissipation performance of lithium ion battery based on nanofluids[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [42] FANG H, LIU C H, ZHANG X, et al. Numerical study of a novel battery thermal management system coupled with heat pipe and cold plate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 256: 124096.
- [43] CHEN H Q, ZHANG Y H, HUANG L, et al. Microfluidic production of silica nanofluids for highly efficient two-phase cooling with micro pin-fins structure[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142799.
- [44] FANG X D, WANG R, CHEN W W, et al. A review of flow boiling heat transfer of nanofluids[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 1003–1017.