

新型浸没式液冷储能电池模组流动传热特性分析

郭俊山¹, 祝令凯¹, 巩志强¹, 梁凯¹, 钟子威¹, 商攀峰¹, 王鑫煜^{2*}

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 山东大学热科学与工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:为提高浸没式液冷电池模组流动传热特性,解决内部传热过程难以有效预测等问题,本研究提出一种新型浸没式液冷储能电池模组。对比新型折流板内构件式模组与传统浸没式模组内流动传热过程差异,综合考虑冷却液流速及初始温度对新型模组内电池传热特性的影响,构建冷却液外掠电池流动换热过程努塞尔数预测关联式。结果表明:相较于传统浸没式模组,新型电池模组流动及传热特性显著提高;增加冷却液流速可改善模组传热性能及温度均匀性,高温电池平均温度降低5.7%,模组内最大温差降低47.6%;提高初始温度会降低新型电池模组传热性能,提升模组温度均匀性,高温电池平均温度升高28.2%,模组内电池间最大温差降低59.5%;在给定范围内,关联式预测值与数值模拟值平均相对误差为2.0%,关联式能够准确预测新型模组传热特性。

关键词:浸没式液冷;储能电池模组;流动传热特性;温度均匀性;传热预测关联式

中图分类号:TM912

文献标志码:A

引用格式:郭俊山,祝令凯,巩志强,等. 新型浸没式液冷储能电池模组流动传热特性分析[J]. 山东大学学报(工学版),2026,56(2):147-157.

GUO Junshan, ZHU Lingkai, GONG Zhiqiang, et al. Analysis of flow and heat transfer characteristics in the novel energy storage battery module with immersion cooling[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):147-157.

Analysis of flow and heat transfer characteristics in the novel energy storage battery module with immersion cooling

GUO Junshan¹, ZHU Lingkai¹, GONG Zhiqiang¹, LIANG Kai¹, ZHONG Ziwei¹, SHANG Panfeng¹, WANG Xinyu^{2*}

(1. State Grid Shandong Electric Power Company Electric Power Research Institute, Jinan 250003, Shandong, China; 2. Institute of Thermal Science and Technology, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: To address the limitations of immersion liquid-cooled battery modules, such as limited heat transfer performance and inaccurate internal heat transfer prediction models, a novel immersion liquid-cooled energy storage battery module was proposed. In this work, the flow and heat transfer characteristics of the novel module incorporating an internal baffle were systematically compared with those of traditional immersion modules. The effects of coolant velocity and initial temperature on battery heat transfer performance were comprehensively investigated. Furthermore, a Nusselt number correlation was developed to predict the heat transfer process associated with coolant sweeping across the cells. The results demonstrated that the novel battery module exhibited superior flow and heat transfer performance compared with the traditional immersion module. Increasing the coolant flow rate significantly enhanced the heat transfer capability and temperature uniformity of the module, resulting in a 5.7% reduction in the average battery temperature of the high-temperature battery and a 47.6% reduction in the maximum temperature difference within the module. In addition, raising the initial temperature deteriorated the heat transfer performance but improved the module temperature uniformity, which increased the average battery temperature by 28.2% and decreased the temperature difference by 59.5%. Within the specified range, the proposed correlation predicted the heat transfer behavior with an average relative error of 2.0% compared with numerical simulation results, indicating high accuracy in characterizing the heat transfer performance of the novel module.

Keywords: immersion liquid cooling; energy storage battery module; flow and heat transfer characteristics; temperature uniformity; heat transfer prediction

收稿日期:2024-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52576077)

第一作者简介:郭俊山(1989—),男,山东潍坊人,高级工程师,硕士,主要研究方向为网源协调、热电联产、新型储能技术。

E-mail:junshan_guo@sina.com

* **通信作者简介:**王鑫煜(1988—),男,山东曲阜人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为电子设备热管理、低碳能源与节能技术、高效换热设备与系统设计开发。E-mail:xyw@sdu.edu.cn

0 引言

在“双碳”目标下,国家电力能源绿色低碳转型正在稳步推进^[1]。电池储能系统是推进能源绿色低碳转型的重要手段,然而储能电池热管理问题却是制约电池储能系统发展的关键因素之一^[2-3]。储能电池在工作过程中会出现产热积聚、温度不稳定等问题,进而造成电池工作性能下降、热失控等安全风险^[4]以及循环寿命缩短^[5-6],因此,迫切需要高效电池热管理技术,确保储能系统高效、安全运行^[7]。

常见储能电池热管理技术可分为风冷^[8]、相变材料冷却^[9]、热管冷却^[10-11]及间接式冷板冷却技术^[12],通常存在冷却能力较低、安全性不高及运维成本较高等问题^[13]。浸没式液冷技术作为一种新兴直接式液冷技术,因其散热性能优越、均温性好、可靠性高等优势在储能电池热管理领域引起广泛关注^[14]。文献[15-16]对比锂离子电池运行过程中自然对流冷却、相变材料冷却、浸没式液冷等不同冷却方式冷却性能及热失控抑制性能,应用浸没式液冷技术后电池模组内温差低至 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对自然对流冷却方式,电池最高温度降低 94.44% ,同时有效抑制了电池热失控发展。

近年来,诸多学者在冷却液类型^[17]、工作条件^[18]、电池模组结构^[19]等方面研究浸没式液冷技术对电池散热性能的影响规律。文献[20]研究对比三种不同冷却液(矿物油、去离子水、AC-100冷却液)在不同流速下的冷却性能,综合考虑冷却效果及整体功耗,提出冷却液筛选标准。设计优化电池模组结构是提高模组散热性能的重要方式。文献[21]综合考虑电池间距、模组尺寸、冷却液入口数量等参数,通过机器学习预测优化了电池模组结构,相较于原始模型,实现电池最高温度降至 $32.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差降低至 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述,现阶段研究大多集中于模组结构优化及运行规律探究等方面,对重要工作参数下浸没式液冷电池模组内传热过程预测仍较少涉及。本研究针对传统浸没式液冷储能电池模组中后段电池温度均匀性及冷却液流动均匀性较差等问题,提出一种在模组中后段布置折流板内构件的新型电池模组,从电池温度特性、冷却液流动均匀性及压力损失等方面对比新型电池模组与传统模组,研究冷却液流速及初始温度对电池模组流动传热特性的影响规律,构建冷却液外掠电池流动传热过程预测关联式,为电池储能系统浸没式液冷技术提供理论支撑。

1 模型与验证

1.1 物理模型

浸没式液冷电池模组模型如图1所示,其中图1(a)为浸没式液冷电池模组物理模型。电池模组包括电池模块与冷却液流动模块,电池模块由8块串联方形电池及连接导线组成,冷却液流动模块由冷却液进出口及模组内冷却液流动区域组成。冷却液选用已经在工程实际中广泛应用的 Novec 7000 氟化液,具有介电常数低、材料兼容性好、传热性能出色等优势。单体电池为磷酸铁锂电池,长宽高为 $174\text{ mm}\times 71\text{ mm}\times 207\text{ mm}$,电池间距及电池-模组壁面间距均为 35.5 mm ($1/2$ 电池厚度),基于试验测量及数据拟合方法,获得不同温度条件下电池模型特性参数^[15,22],采用多尺度多域(multi-scale multi-domain, MSMD)三维电-热耦合模型计算放电过程电池产热及电学特性^[23]。冷却液入口及出口布置在模组两侧面底部及顶部。浸没式液冷电池模组工作过程如图1(b)所示,冷却液由入口进入模组浸没电池,并外掠电池表面流动换热,最终由出口流出电池模组。模拟过程电池及冷却液基本参数设置^[24-25]如表1与表2所示。

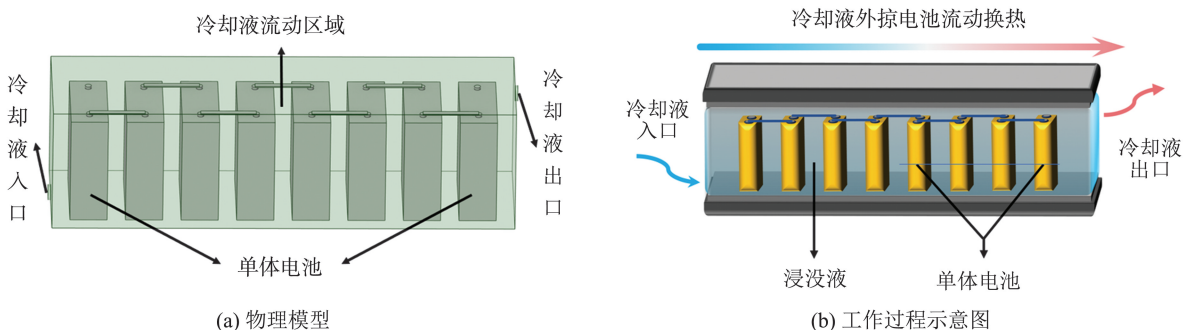


图1 浸没式液冷电池模组模型

Fig.1 Model of the immersion liquid-cooled battery module

表 1 电池基本参数
Table 1 Basic parameters of the cell

电池标称电压/V	电池密度/(kg·m ⁻³)	电池比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	电池热导率/(W·(m·K) ⁻¹)
3.20	2 147.20	1 030.00	x/y/z:20.50/20.50/4.92

表 2 冷却液基本参数
Table 2 Basic parameters of the coolant

运动黏度/(m ² ·s ⁻¹)	冷却液密度/(kg·m ⁻³)	冷却液比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	冷却液热导率/(W·(m·K) ⁻¹)
0.32	1 400.00	1 300.00	0.08

1.2 数学模型

浸没式液冷电池模组运行过程中包含冷却液外掠电池表面流动及传热过程,涉及基本控制方程包括连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程^[26],表达式如下。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

式中: ρ_f 为冷却液密度,kg/m³; t 为时间,s; \mathbf{u} 为冷却液速度矢量,m/s。

动量守恒方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \mathbf{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f \mathbf{u}_i \mathbf{u}_j) = \\ & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_f \overline{\mathbf{u}'_i \mathbf{u}'_j}) + \rho_f \mathbf{g}_i, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: p 为压强,Pa; \mathbf{u}_i 、 \mathbf{u}_j 、 \mathbf{u}_k 分别为速度矢量在不同方向上的分量,m/s; μ 为冷却液动力黏度,pa·s; \mathbf{g} 为重力加速度矢量,m²/s²; $-\rho \overline{\mathbf{u}'_i \mathbf{u}'_j}$ 为雷诺应力项。

流体能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho_f c_f T_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u} c_f T_f) = \nabla \cdot (h_{\text{eff}} \nabla T_f + \tau_{\text{eff}} \cdot \mathbf{u}), \quad (3)$$

式中: c_f 为冷却液比热容,J/(kg·K); T_f 为微元体内冷却液温度,K; h_{eff} 为冷却液有效换热系数,W/(m²·K); τ_{eff} 为等效应力,为雷诺应力与黏性应力之和,pa。

三维电-热耦合为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_c c_c T_c}{\partial t} = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) + \sigma_+ |\nabla \Phi_+|^2 + \\ & \sigma_- |\nabla \Phi_-|^2 + \dot{q}_{\text{ECh}} + \dot{q}_{\text{short}}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ_c 为电池等效密度,kg/m³; c_c 为电池等效比热容,J/(kg·K); T_c 为电池温度,K; k_c 为电池等效导热系数,W/(m·K); Φ_+ 及 Φ_- 分别为正负电极电位, σ_+ 及 σ_- 分别为正负电极有效电导率; \dot{q}_{ECh} 及 \dot{q}_{short} 分别为电化学反应产热与电池内部短路工况产热。

选用剪切应力输运 (shear-stress transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型封闭求解控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega, \quad (6)$$

式中, k 为湍动能, ω 为湍动能耗散率, G_k 及 G_ω 分别为湍动能的生成项与湍动能耗散率的生成项, Γ_k 及 Γ_ω 分别为湍动能的有效扩散系数与湍动能耗散率的有效扩散系数, Y_k 为由湍流导致的 k 的耗散率, Y_ω 为由湍流导致的 ω 的耗散率。

本研究选用二阶 RC 等效电路模型^[27]求解电池内部电学特性,表达式为

$$V = V_{\text{ocv}}(\text{soc}) - V_1 - V_2 - R_s(\text{soc})I(t), \quad (7)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1(\text{soc})C_1(\text{soc})}V_1 - \frac{1}{C_1(\text{soc})}I(t), \quad (8)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2(\text{soc})C_2(\text{soc})}V_2 - \frac{1}{C_2(\text{soc})}I(t), \quad (9)$$

$$\frac{d(\text{soc})}{dt} = \frac{I(t)}{3\ 600 Q_{\text{ref}}}, \quad (10)$$

式中: V 为单体电池电压; $V_{\text{ocv}}(\text{soc})$ 、 $R_s(\text{soc})$ 、 $R_1(\text{soc})$ 、 $C_1(\text{soc})$ 、 $R_2(\text{soc})$ 、 $C_2(\text{soc})$ 分别为特定荷电状态(state of charge, soc)下的开路电压、欧姆电阻、极化电阻、极化电容、扩散电阻、扩散电容; $I(t)$ 为电池实时工作电流; Q_{ref} 为电池容量。

1.3 网格无关性验证

采用多面体网格对浸没式液冷电池模组模型进行网格划分,以冷却液流量为 3 L/min、初始温度为 25 ℃、1C 放电倍率下高温电池平均温度对模型网格进行独立性验证,验证结果如图 2 所示。由验证结果可知,当网格数 N_{mesh} 大于 753 289 时,电池平均温度 $T_{c,\text{ave}}$ 基本不再变化,综合考虑计算经济性及结果准确性,选取网格数量 753 289 作为后续计算基准网格数。

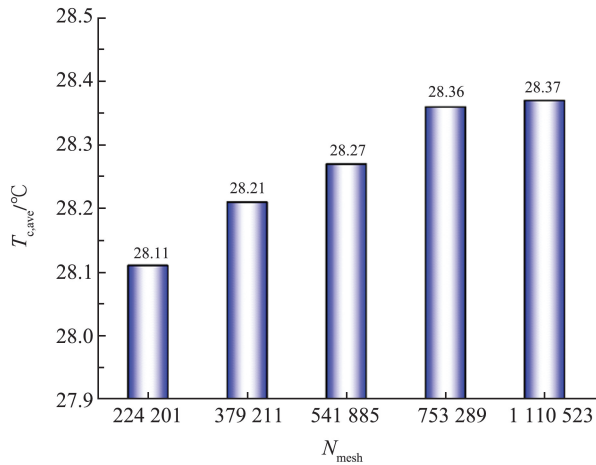


图2 网格无关性验证结果

Fig.2 Results of the grid independence verification

1.4 模型验证

为了验证电池热仿真模型准确性,与文献[22, 28]的试验结果对比。在试验及数值模拟过程中,电池初始温度及周围环境温度均为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 电池以 1C 倍率放电,通过在较大空间内自然对流冷却方式进行散热,放电过程中监测电池表面中心点处温度 T_{center} 变化情况。数值模拟过程中电池表面中心点温度变化情况如图3所示,将模拟结果与试验数据比较,数值模拟结果与试验结果最大相对误差为 4.6% ,表明本研究所建立电池热仿真模型能够准确计算电池产热及冷却过程。

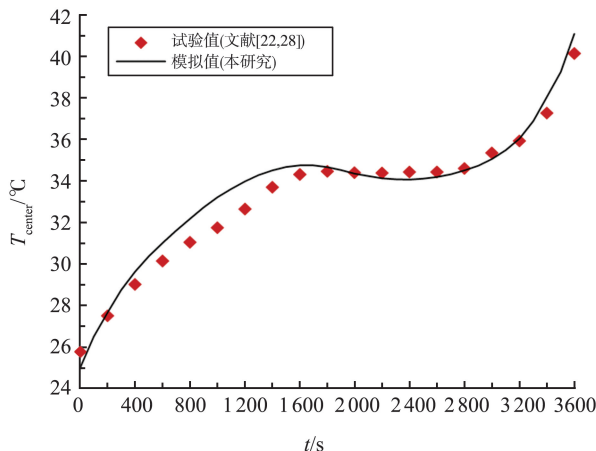


图3 模型验证结果

Fig.3 Results of the model validation

2 结果与讨论

2.1 浸没式液冷储能电池模组优化设计

浸没式液冷电池模组中各单体电池平均温度变化情况如图4所示。其中,cell 1至 cell 8分别为模组内第1至第8号单体电池。由图4可知,运

行过程中随着电池持续放电,各单体电池平均温度持续升高,其中冷却液入口及出口处单体电池平均温度相对更低,电池模组中后部单体电池平均温度相对更高。相较于其他单体电池,cell 1平均温度始终更低,cell 6及 cell 7平均温度则更高。在冷却液浸没单体电池并外掠电池表面流动换热过程中,冷却液自入口流入电池模组后,首先与近入口处电池接触换热,因此冷却液入口处单体电池与冷却液之间温差更大,传热效果更好,进而导致 cell 1平均温度最低。随着冷却液绕流单体电池并流出模组,冷却液温度逐渐升高,其与电池间温差降低,使得冷却效果变差,最终导致模组中后部电池平均温度更高,模组内各电池间温度分布不均匀。

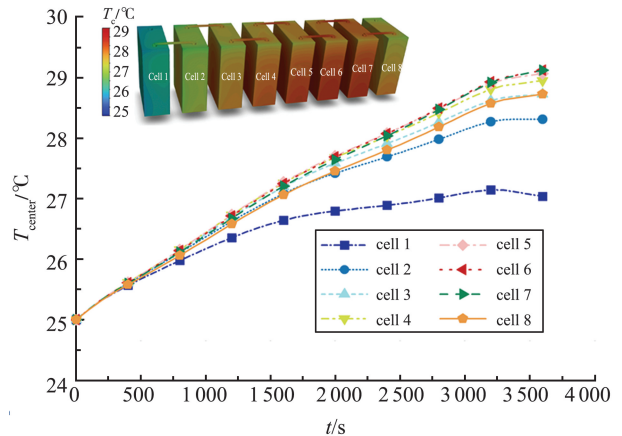


图4 浸没式液冷模组内单体电池平均温度

Fig.4 Average temperature variation of individual cells in the immersion liquid-cooled module

电池模组内冷却液流速 u_f 分布如图5所示。由图5可知,电池模组中冷却液流速分布呈现出明显不均匀性,其中电池模组两侧流动区域冷却液流速较高,模组顶部区域冷却液流速则较低,单体电池间流动区域内冷却液流速最低。同时,由于出口处模组壁面阻挡折流作用,cell 8与模组后壁面、cell 7与 cell 8夹层流体内冷却液流速有小幅度提升。

电池表面对冷却液阻挡折流导致冷却液流速分布不均匀。在浸没式液冷电池模组中,冷却液流动方向垂直于电池表面,这导致冷却液流动过程中局部损失较大,同时电池间距较小使得冷却液掠过单体电池后流动空间不充分,单体电池间冷却液流速大幅度下降。结合上文所述,传统浸没式液冷电池模组结构导致模组内存在中后段电池平均温度较高、温度分布不均匀及冷却液流速分布不均匀等问题。

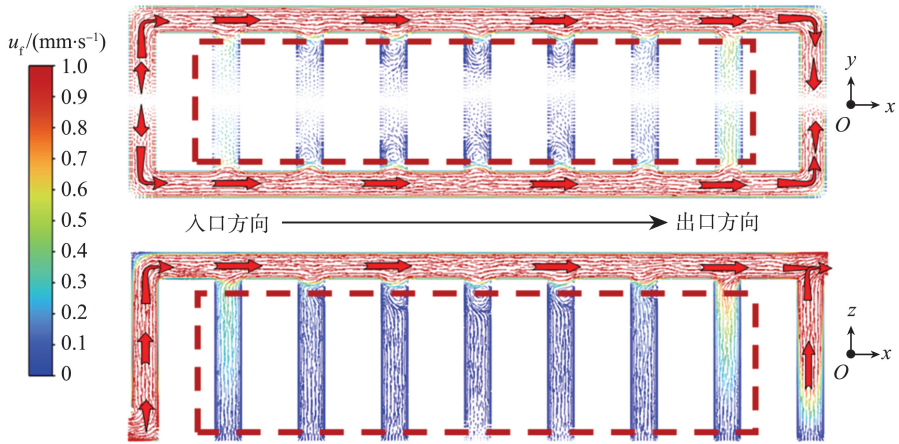


图 5 浸没式液冷电池模组冷却液流速分布

Fig.5 Coolant velocity distribution in the immersion liquid-cooled battery module

针对传统浸没式液冷模组中后段电池平均温度较高,且各单体电池间冷却液流速几乎滞停的问题,在模组中后段各电池之间布置折流板内构件。新型浸没式液冷模组内单体电池平均温度变化如图 6 所示,折流板被均匀布置在自 cell 3 至 cell 8 电池间隙中心位置。

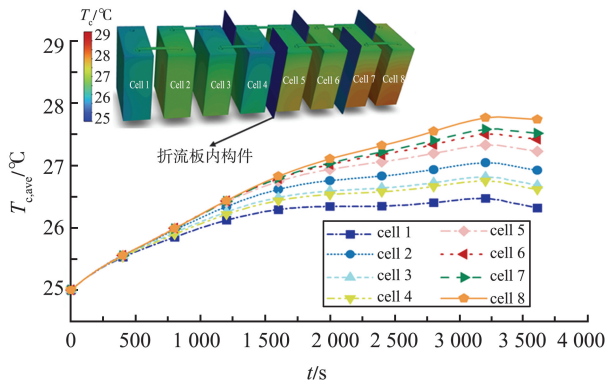


图 6 新型浸没式液冷模组内单体电池平均温度

Fig.6 Average temperature of individual cells in the novel immersion liquid-cooled module

相较于无折流板传统电池模组,新型折流板内构件电池模组各单体电池平均温度降低,最高平均温度电池由 cell 6 改变为 cell 8,最高平均温度降低 2.2%,各电池平均温升降低 24.9%;各电池温度均匀性得到提升,电池模组内单体电池最大温差降低 28.3%。

折流板内构件新型电池模组中冷却液流速分布情况如图 7 所示。相较于无折流板模组,新型模组内各单体电池间出现明显冷却液折流,冷却液流速及流速分布均匀性显著提升,传统电池模组冷却液滞停问题得到改善,从而降低单体电池平均温度,提升模组内电池温度均匀性。局部过热是影响电池工作性能、安全性以及使用寿命的重要因素。折流板内构件对高温电池局部热点温度 $T_{c,max}$ 的影响如图 8 所示。由图 8 可知,在电池放电过程中,无折流板传统电池模组高温电池 (cell 6) 局部热点温度始终高于新型电池模组高温电池 (cell 8) 局部热点温度。相较于传统电池模组,新型电池模组局部过热情况得到改善,高温电池局部热点温度降低 20%。

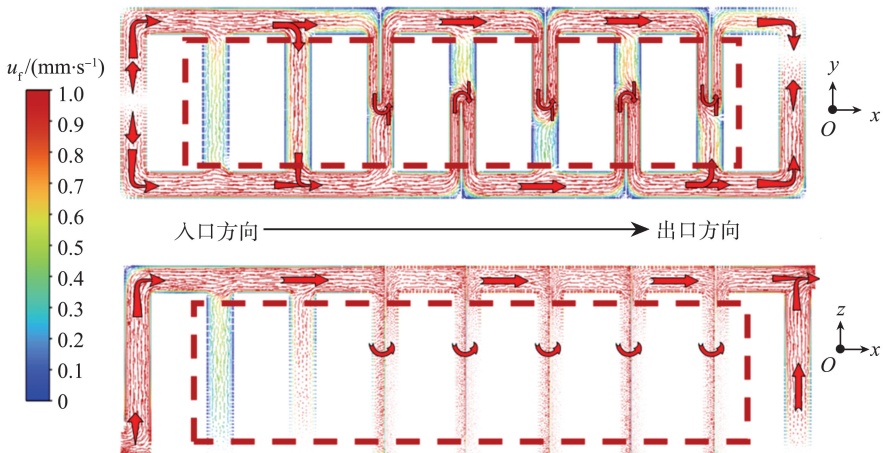


图 7 新型浸没式液冷电池模组中冷却液流速分布

Fig.7 Coolant velocity distribution in the novel immersion liquid-cooled battery module

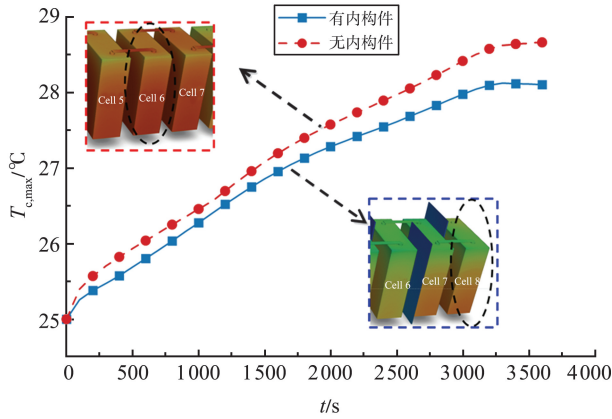


图8 内构件对高温电池局部热点温度的影响
Fig.8 Effects of internal components on the local hotspot temperature of the high-temperature cell

折流板内构件对冷却液起到了主动导流作用。在冷却液流动过程中,折流板交错布置改变了两侧流道冷却液流动方向,使冷却液在单体电池间充分流动,同时,根据文献[29]的研究,折流板使冷却液流程显著增加,冷却液外掠电池有效换热面积增大,最终导致模组内冷却液绕流电池流动传热特性得到改善。

布置内构件将导致电池模组内冷却液压力损失升高。图9对比了是否设置折流板内构件对模组内冷却液压力损失 P_{loss} 的影响。相较于传统电池模组,由于内构件阻挡折流冷却液,布置折流板内构件后新型电池模组压力损失由 47.21 Pa 升高到 61.59 Pa,升高 30.5%。文献[30]研究表明,由于电池温度均匀性对充放电功率、电池老化退化特性及电池运行安全性具有极大影响,随着温差增大,电池模组工作性能及运行安全性将显著下降,因此添加折流板内构件虽然使电池模组压力损失升高,但能够有效降低电池平均温度、温升及模组温差,进而提升电池模组工作性能及运行安全。

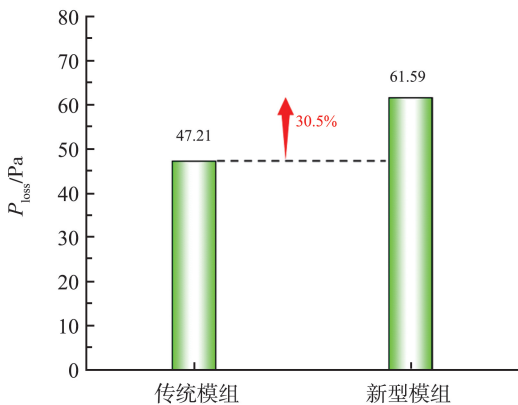


图9 折流板内构件对模组内冷却液压力损失的影响
Fig.9 Effects of the baffle internal component on the coolant pressure drop within the module

2.2 冷却液流速对新型电池模组流动传热特性的影响

不同冷却液流速下新型电池模组内高温电池平均温度变化如图10所示。由图10可知,初始放电阶段各电池平均温度升高速率相对较快,这代表初始放电阶段电池产热速率相对更快。随着电池模组持续放电,各电池平均温度升高速率逐渐减慢。不同冷却液流速下高温电池平均温度存在显著差异,随着冷却液流速提高,高温电池平均温度降低,冷却液流速由 1 L/min 提高到 5 L/min,高温电池平均温度由 28.7 °C 降低到 27.1 °C,降低了 5.7%。

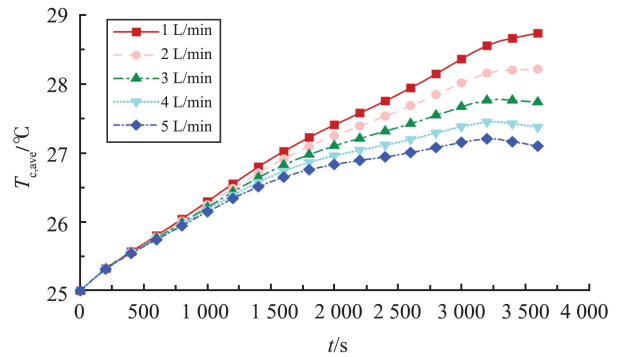


图10 不同流速下高温电池平均温度
Fig.10 Average temperature of the high-temperature cell under different flow velocities

不同冷却液流速下,各单体电池温升 $\Delta T_{c,ave}$ 曲线如图11所示。随着冷却液流速提高,各单体电池温升均呈降低趋势。冷却液流速由 1 L/min 提高到 5 L/min,单体电池最高温升降低 48.9%,各电池平均温升降低 44.1%。

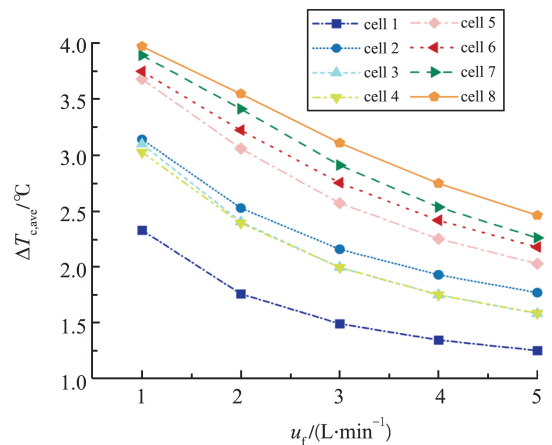


图11 不同流速下各单体电池温升
Fig.11 Temperature rise of individual cells at different flow velocities

图12展示了不同流速对单体电池内局部热点温度的影响。随着冷却液流速提高,高温电池(cell 8)局部热点温度下降,冷却液流速由 1 L/min 提高到 5 L/min,电池局部热点温度由 29.0 °C 降低到

27.5 °C,降低 5.2%。流速的提高增大了与电池直接接触换热的冷却液质量流量,其单位时间内散热能力提升,进而导致单体电池平均温度、温升以及高温电池局部热点温度均降低。

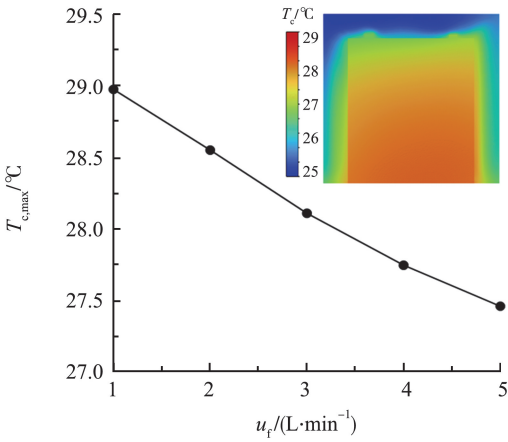


图 12 不同流速下单体电池内局部热点温度
Fig.12 Local hotspot temperature within individual cells at different flow velocities

不同冷却液流速下,单体电池间温差 ΔT_{module} 如图 13 所示。随着冷却液流速提高,模组内电池温差减小,电池温度均匀性提升。冷却液流速由 1 L/min 提高到 5 L/min,电池间最大温差由 1.89 °C 降低到 0.99 °C,降低 47.6%。随着冷却液流速提高,各单体电池平均温度及温升均降低,最大温升与最小温升差距减小,导致单体电池间温差被有效缩减,进而提升了电池模组温度均匀性。文献[31]表明,提高流速显著提升冷却液外掠电池表面对流换热能力,从而改善了模组内单体电池冷却性能。

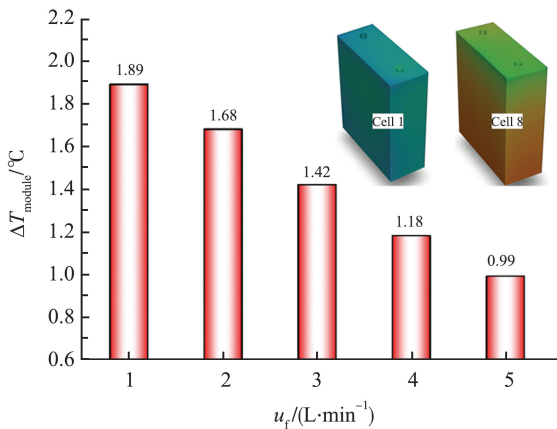


图 13 不同流速下电池模组内电池温差
Fig.13 Temperature difference among cells in the battery module at different flow velocities

提高冷却液流速将导致冷却液压力损失升高。不同流速下冷却液压力损失如图 14 所示。流速由 1 L/min 提高到 5 L/min,冷却液压力损失增大 4.7 倍。在同等冷却液流速增幅下,文献[31]压力损失

增大 7.4 倍,相较于文献[31]的结论,本研究新型模组内冷却液压力损失降低 36.6%。根据文献[29]及文献[31]的结论,虽然增大冷却液流速显著提升了电池冷却性能,但也会导致冷却液压力损失增大,因此在实际工程应用中应合理选用冷却液流速条件以兼顾冷却液压力损失特性。

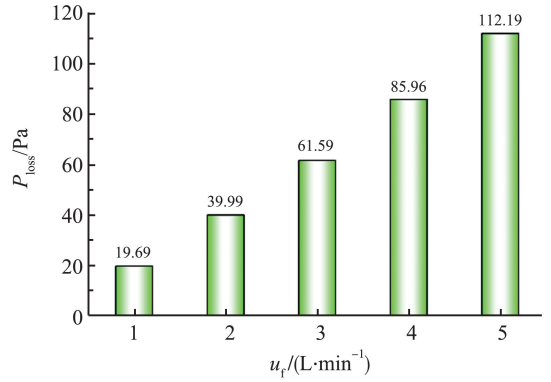


图 14 不同流速下冷却液压力损失
Fig.14 Coolant pressure drop at different flow velocities

2.3 冷却液初始温度对电池模组传热特性的影响

不同冷却液初始温度 $T_{f,initial}$ 下高温电池 (cell 8) 平均温度变化如图 15 所示。由图 15 可知,由于初始放电阶段单体电池产热速率更快,因此各工况下 cell 8 平均温度均呈上升趋势。

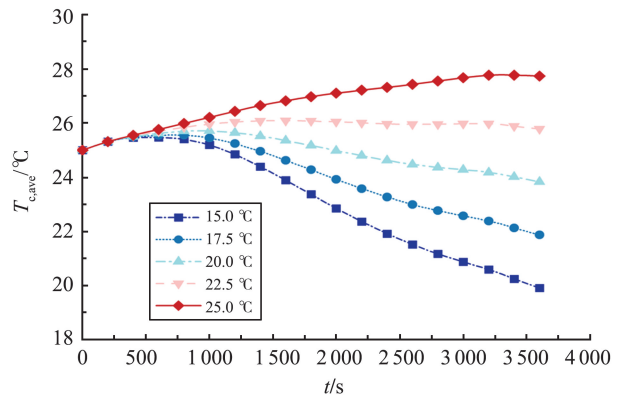


图 15 不同初始温度下高温电池平均温度
Fig.15 Average temperature of high-temperature cells at different initial temperatures

随着电池模组持续放电,冷却液初始温度相对更高(25 °C)时,高温电池平均温度仍呈上升趋势,冷却液初始温度为 22.5 °C 时,电池温度曲线趋近平缓;冷却液初始温度降低使各高温电池平均温度出现不同程度降低。冷却液初始温度由 15 °C 提高到 25 °C,高温电池在放电结束时平均温度由 19.92 °C 升高到 27.74 °C,升高了 28.2%。图 16 为不同冷却液初始温度下各单体电池温度变化情况(正值为温升,负值为温降)。随着冷却液初始温度提高,各单体电池冷却过程均由温降过程转变为温升过程,冷

却液初始温度由 15 °C 提高到 25 °C,最大电池温度变化出现在 cell 8,增大了 1.8 倍,平均各电池温度变化增大了 1.4 倍。

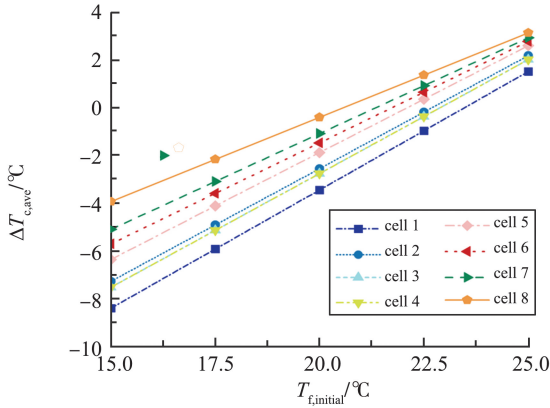


图 16 不同冷却液初始温度下各单体电池温度变化
Fig.16 Average temperature of high-temperature cells at different initial cell temperatures

不同冷却液初始温度对单体电池内局部热点温度的影响如图 17 所示。随着冷却液初始温度提高,高温电池(cell 8)内局部热点温度呈升高趋势,冷却液初始温度由 15 °C 提高到 25 °C,电池局部热点温度由 21.1 °C 升高到 28.1 °C,升高了 33.2%。

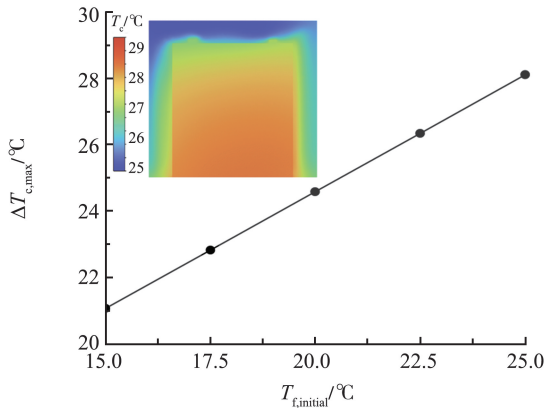


图 17 不同冷却液初始温度下单体电池最高温度
Fig.17 Maximum temperature of individual cells at different initial coolant temperatures

图 18 展示了不同冷却液初始温度下电池模组内单体电池间最大温差。随着冷却液初始温度提高,电池模组内电池温差减小。冷却液初始温度由 15 °C 提高到 25 °C,电池间最大温差由 3.51 °C 降低到 1.42 °C。降低了 59.5%。随着冷却液初始温度提高,单体电池与冷却液之间温差减小,直接降低换热对象间传热速率,进而造成单体电池冷却效果恶化,并最终导致电池平均温度、温度变化及高温电池局部热点温度随冷却液初始温度提高而升高。同时,冷却液与单体电池温差过大会导致与低温冷却液直接接触的电池被过度冷却,进而造成模组内温

差增大。这与文献[32]结论一致。结合上文所述,冷却液初始温度降低虽然能够大幅度提升单体电池冷却效果,但同时也会恶化电池模组内电池温度均匀性。

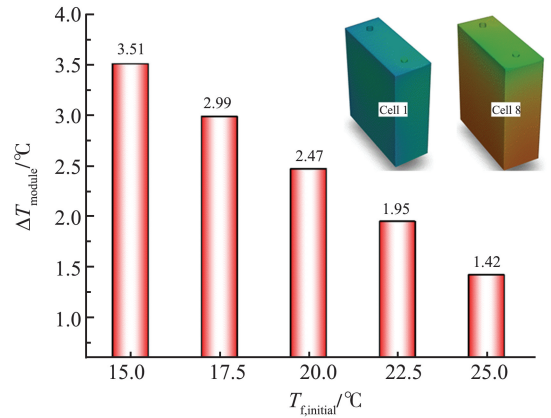


图 18 不同冷却液初始温度下电池模组内电池温差
Fig.18 Temperature difference among cells in the battery module at different initial coolant temperatures

2.4 新型浸没式液冷电池模组传热预测关联式构建

综合上文结果,在新型浸没式液冷电池模组内,冷却液外掠单体电池表面流动换热过程中,冷却液与单体电池换热效果受冷却液流速、初始温度影响明显。为了有效预测该传热过程,参考文献[33]及文献[34],构建综合考虑流速及初始温度的新型浸没式液冷电池模组内冷却液外掠单体电池流动传热过程努塞尔数(Nusselt number, Nu)预测关联式。

由于冷却液与单体电池间传热过程在室温下进行,在此温度范围内,冷却液物性参数变化极小,因此,忽略传热过程中冷却液自身物性参数变化。该传热过程不定函数表示为

$$F(h, u, T_0, C_0) = 0, \quad (11)$$

进一步整理,式(11)可以表示为

$$Nu = C_1 Re^{C_2} \left(\frac{T_0}{T_\infty} \right)^{C_3} + C_0, \quad (12)$$

式中: $C_0 \sim C_3$ 为未知系数; T_0 为冷却液初始温度, °C; T_∞ 为环境温度, 25 °C; Re 为雷诺数。冷却液努塞尔数 Nu 与雷诺数 Re 为

$$Nu = \frac{h_{conv} l}{\lambda}, \quad (13)$$

$$Re = \frac{\rho_f u l}{\mu}, \quad (14)$$

式中: l 为电池模组特征长度, m; λ 为冷却液导热系数, W/(m·K); ρ_f 为冷却液密度, kg/m³; u 为冷却液

流速, m/s ; h_{conv} 为对流换热系数。

$$h_{conv} = \frac{\Phi}{A\Delta T}, \quad (15)$$

式中: Φ 为冷却液与电池间总热流量, W ; A 为模组内电池总表面积, m^2 ; ΔT 为模组进出口冷却液温差, K 。

基于数值模拟计算所得数据, 构建考虑冷却液流速及初始温度的新型浸没式液冷电池模组内冷却液外掠电池传热过程 Nu 预测关联式

$$Nu = 56.4075 Re^{0.187} \left(\frac{T_0}{T_\infty} \right)^{-3.5195} - 13.2641. \quad (16)$$

关联式适用范围: $1 \text{ L/min} \leq u \leq 5 \text{ L/min}$; $15 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

对比数值模拟值与关联式计算值, 平均相对误差为 2.0%, 最大相对误差为 5.4%。图 19 对比了 Nu 准则数值模拟结果 Nu_{simu} 与关联式计算结果 Nu_{pred} 。各工况下模拟值与计算值结果偏离参考线(图中表示 Nu 计算值与 Nu 模拟值相等线)程度较小, 模拟值与计算值一致性较强, 因此, 式(16)可以准确预测新型浸没式液冷电池模组内冷却液外掠单体电池传热过程。

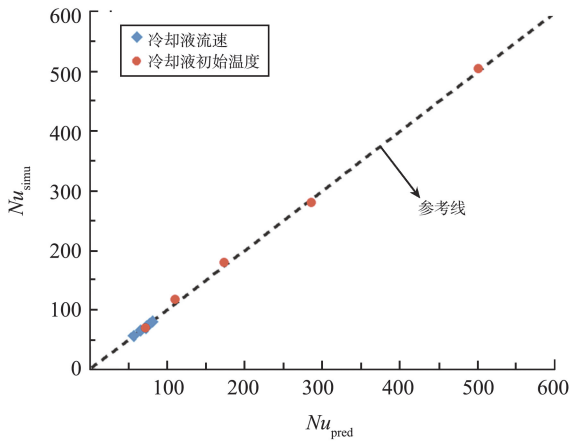


图 19 Nu 计算值与模拟值比较

Fig.19 Comparison between calculated and simulated Nu

3 结论

本研究提出一种新型折流板内构件浸没式液冷储能电池模组, 与传统浸没式液冷模组进行对比, 构建考虑流速及初始温度的新型电池模组内冷却液外掠电池流动换热过程 Nu 预测关联式, 主要结论如下。

(1) 相较于传统电池模组, 新型模组折流板主动导流作用使得冷却液流动均匀性以及电池散热性能、模组温度均匀性均提升, 同时使冷却液压力损失

升高。其中高温电池平均温度降低 2.2%, 局部热点温度降低 2.0%, 各电池平均温升降低 24.9%, 模组内电池间最大温差降低 28.3%, 压力损失升高 30.5%。

(2) 增大冷却液流速可提升新型电池模组传热性能。冷却液流速由 1 L/min 提高到 5 L/min, 高温电池平均温度降低 5.7%, 局部热点温度降低 5.2%, 各电池平均温升降低 44.1%, 模组内电池间最大温差降低 47.6%。

(3) 提高冷却液初始温度降低了新型电池模组传热性能, 但同时使模组温度均匀性上升。冷却液初始温度由 15 $^\circ\text{C}$ 提高到 25 $^\circ\text{C}$, 高温电池平均温度升高 28.2%, 电池局部热点温度升高 33.2%, 模组内电池间最大温差降低 59.5%。

(4) 综合考虑冷却液流速及初始温度对电池模组内传热过程的影响规律, 构建了冷却液外掠电池表面流动换热 Nu 预测关联式。数值模拟值与关联式计算值平均相对误差为 2.0%, 最大相对误差为 5.4%。在给定范围内, 关联式能够准确预测新型模组传热特性。

参考文献:

- [1] 赵龙成. 中国能源绿色发展成为全球能源转型引擎[J]. 生态经济, 2024, 40(11): 9-12.
- [2] 张继阳, 郑秀, 赵斌, 等. 电网级大规模储能的电池技术进展[J]. 电池, 2024, 54(5): 745-750.
ZHANG Jiyang, ZHENG Xiu, ZHAO Bin, et al. Progress in battery technology for large-scale grid-level energy storage[J]. Battery Bimonthly, 2024, 54(5): 745-750.
- [3] ZHU J T, FENG G Z, ZHOU W M, et al. Simulation analysis and optimization of containerized energy storage battery thermal management system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97: 112870.
- [4] 陈和洋, 周金平, 何春庆, 等. 基于物联网技术的变电站蓄电池设备数据采集系统研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(1): 30-35.
CHEN Heyang, ZHOU Jinping, HE Chunqing, et al. Research on data collection system of storage battery equipment in substation based on Internet of Things technology[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(1): 30-35.
- [5] 薛太林, 张超, 闫来清, 等. 基于 WOA-BP 神经网络的锂离子电池健康状态估算[J]. 山东电力技术, 2022, 49(10): 16-22.
XUE Tailin, ZHANG Chao, YAN Laiqing, et al. Health state estimation of lithium-ion battery based on WOA-BP

- neural network[J]. *Shandong Electric Power*, 2022, 49(10): 16-22.
- [6] 李凯, 胡丽, 宋婷婷. 基于 CNN-Bi-LSTM 的锂离子电池健康状态估算[J]. *山东电力技术*, 2023, 50(10): 66-72.
- LI Kai, HU Li, SONG Tingting. Health state estimation of lithium-ion batteries based on CNN-Bi-LSTM [J]. *Shandong Electric Power*, 2023, 50(10): 66-72.
- [7] 陈国贺, 吕培召, 李孟涵, 等. 锂离子电池热失控传播特性及其抑制策略研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(7): 2470-2482.
- CHEN Guohe, LÜ Peizhao, LI Menghan, et al. Research progress on thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion batteries and its inhibiting strategies [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(7): 2470-2482.
- [8] 郭鹏宇, 王铭民, 许栋栋, 等. 调峰和调频工况下磷酸铁锂电池组的冷却研究[J]. *低温与超导*, 2024, 52(3): 88-95.
- GUO Pengyu, WANG Mingmin, XU Dongdong, et al. Study on cooling of Lithium iron phosphate battery under peak shaving and frequency modulation conditions [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2024, 52(3): 88-95.
- [9] ZHANG J Y, LI X X, ZHANG G Q, et al. Characterization and experimental investigation of aluminum nitride-based composite phase change materials for battery thermal management [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: 112319.
- [10] 王悦齐, 钱煜平, 谢翌, 等. 平板热管式锂离子电池热管理系统仿真分析研究[J]. *推进技术*, 2024, 45(3): 177-188.
- WANG Yueqi, QIAN Yuping, XIE Yi, et al. Simulation analysis of lithium-ion battery thermal management system based on flat heat pipe [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(3): 177-188.
- [11] 柳洋, 朱波, 陈超伟, 等. 多热源冷却的新型环路热管设计及性能[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2025, 55(6): 90-99.
- LIU Yang, ZHU Bo, CHEN Chaowei, et al. Design and performance of a novel loop heat pipe for multi-heat-sources cooling [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2025, 55(6): 90-99.
- [12] LI Y B, ZHOU Z F, WU W T. Three-dimensional thermal modeling of Li-ion battery cell and 50 V Li-ion battery pack cooled by mini-channel cold plate [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 829-840.
- [13] 石鑫, 尹建光, 李方伟, 等. 储能电池组初期短路故障检测与定位方法研究[J]. *山东电力技术*, 2023, 50(4): 64-71.
- SHI Xin, YIN Jianguang, LI Fangwei, et al. Research on incipient short-circuit fault detection and location method of energy storage battery pack [J]. *Shandong Electric Power*, 2023, 50(4): 64-71.
- [14] GAO Q, LU Y, LIU X D, et al. A novel pulse liquid immersion cooling strategy for Lithium-ion battery pack [J]. *Energy*, 2024, 310: 133266.
- [15] LI Y, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Thermal management for the prismatic lithium-ion battery pack by immersion cooling with Fluorinated liquid [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257(ScienceDirect): 124453.
- [16] LIU X Y, ZHOU Z F, WU W T, et al. Modelling for the mitigation of lithium ion battery thermal runaway propagation by using phase change material or liquid immersion cooling [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52: 103749.
- [17] 王紫啸, 张振东, 盛雷. 锂离子电池浸没式热管理性能仿真研究[J]. *低温与超导*, 2023, 51(12): 64-72.
- WANG Zixiao, ZHANG Zhendong, SHENG Lei. Simulation study on the performance of submerged thermal management of lithium-ion batteries [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2023, 51(12): 64-72.
- [18] ZHAO R, GU J J, LIU J. Optimization of a phase change material based internal cooling system for cylindrical Li-ion battery pack and a hybrid cooling design [J]. *Energy*, 2017, 135: 811-822.
- [19] 刘周斌, 朱涛, 姜巍, 等. 储能锂离子电池包冷却系统的数值模拟与结构优化[J]. *中国电力*, 2023, 56(10): 202-210.
- [20] JITHIN K V, RAJESH P K. Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188: 122608.
- [21] AHMAD S, LIU Y H, ALI KHAN S, et al. Modeling liquid immersion-cooling battery thermal management system and optimization via machine learning [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 158: 107835.
- [22] 王伟. 可再生能源并网系统中电池储能系统特性及优化[D]. 济南: 山东大学, 2022: 146-149.
- WANG Wei. Characteristics and optimization of the battery energy storage system in the renewable energy grid-connected system [D]. Jinan: Shandong University, 2022: 146-149.
- [23] KIM G H, SMITH K, LEE K J, et al. Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-

- physics in varied length scales [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158(8): A955-A969.
- [24] WANG S P, SONG L F, LI C H, et al. Experimental study of gas production and flame behavior induced by the thermal runaway of 280 Ah lithium iron phosphate battery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 74 (ScienceDirect): 109368.
- [25] 李岳峰, 徐卫潘, 韦银涛, 等. 储能锂电池包浸没式液冷系统散热设计及热仿真分析[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(10): 3534-3544.
- LI Yuefeng, XU Weipan, WEI Yintao, et al. Thermal design and simulation analysis of an immersing liquid cooling system for lithium-ions battery packs in energy storage applications [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(10): 3534-3544.
- [26] ANDERSON T B, JACKSON R. Fluid mechanical description of fluidized beds. equations of motion [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1967, 6(4): 527-539.
- [27] CHEN M, RINCON-MORA G A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(2): 504-511.
- [28] WANG W, YUAN B Q, SUN Q, et al. Analysis and modeling of calendar aging and cycle aging of LiCoO₂/graphite cells [J]. *Journal of Thermal Science*, 2024, 33(3): 1109-1118.
- [29] PATIL M S, SEO J H, LEE M Y. A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113715.
- [30] SAW L H, YE Y H, TAY A A O, et al. Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling [J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 783-792.
- [31] LIU J H, MA Q W, LI X B. Numerical study on heat dissipation performance of a lithium-ion battery module based on immersion cooling [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 66: 107511.
- [32] WANG Y B, RAO Z, LIU S C, et al. Evaluating the performance of liquid immersing preheating system for Lithium-ion battery pack [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 190: 116811.
- [33] HUANG Y Q, WANG S, LU Y J, et al. Study on a liquid cooled battery thermal management system pertaining to the transient regime [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 180: 115793.
- [34] CAMILLERI R, MEIGNEN-VIAUD N. Prediction and measurement of the heat transfer coefficient in direct, oil-cooled batteries [J]. *Energies*, 2023, 16(23): 7725.

(编辑:熊小原)

(上接第146页)

- [7] 刘庆志, 杨昌鹏, 徐侃, 等. 空间大功率热源两相控温系统设计与仿真 [J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(4): 104-110.
- LIU Qingzhi, YANG Changpeng, XU Kan, et al. Design and simulation of two-phase thermal control system for space high power source [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(4): 104-110.
- [8] 赵陶程, 郑毅, 王贺, 等. 泵驱两相回路中的小通道蒸发器传热特性试验研究 [J]. *航空科学技术*, 2022, 33(8): 95-102.
- ZHAO Taocheng, ZHENG Yi, WANG He, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of minichannel evaporator in mechanically pumped two-phase loop [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(8): 95-102.
- [9] 林灵娇. 飞机电作动器散热特性实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 3-5.
- LIN Lingjiao. Experimental research on heat transfer characteristics of aircraft electromechanical actuator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 3-5.
- [10] 柳洋, 朱波, 陈超伟, 等. 多热源冷却的新型环路热管设计及性能 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2025, 55(6): 90-99.
- LIU Yang, ZHU Bo, CHEN Chaowei, et al. Design and performance of a novel loop heat pipe for multi-heat-sources cooling [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2025, 55(6): 90-99.
- [11] 冯亚利, 黄胜利, 高长松, 等. 泵驱两相冷却系统设计与性能验证 [J]. *电子机械工程*, 2021, 37(5): 22-26.
- FENG Yali, HUANG Shengli, GAO Changsong, et al. Design and performance verification of pump-driven two-phase cooling system [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2021, 37(5): 22-26.
- [12] 谭慧. 相控阵天线冷却微通道拓扑结构及传热特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 14.
- TAN Hui. Study on the topology and heat transfer performance of the microchannel for phased array antenna cooling [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 14.

(编辑:郭少华)