

采用拓扑优化液冷与相变材料协同的大圆柱电池热管理

张达¹, 林梓灿², 孙亚松^{2,3,4}, 曹胡泉², 马菁⁵

(1. 长安大学陕西省交通新能源开发、应用与汽车节能重点实验室, 710064, 西安; 2. 长安大学西安市交通先进动力重点实验室, 710064, 西安; 3. 西华大学四川省新能源汽车智能控制与仿真测试技术工程研究中心, 611130, 成都; 4. 同济大学上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 201804, 上海; 5. 长安大学汽车学院, 710018, 西安)

摘要: 针对传统大圆柱电池液冷板的压降大和均温性差的问题, 优化设计了一种结合拓扑优化液冷板与相变材料的热管理系统。首先, 基于液冷板与相变材料设计了冷却方案 1; 其次, 针对换热面积受限导致液冷换热性能无法充分发挥的问题, 提出了一种增大换热面积的蛇形液冷通道冷却方案 2。最后, 利用金属材料的高导热特性, 设计了一种基于拓扑优化液冷板、相变材料和导热铝的复合冷却方案 3。对比流动和传热性能发现: 方案 1 虽然温度均匀性较好, 但电池与液冷板间的换热面积小、相变材料存在无效填充; 方案 2 虽增大了换热面积, 提升了换热性能, 但液冷板流阻较大且均温性较差。与上述两种方案相比, 方案 3 的平均温度分别降低了 9.11% 和 4.32%, 达到了 38.80 °C; 方案 3 的出、入口压降分别降低了 0% 和 90.08%, 达到了 33.90 Pa; 方案 3 的电池表面温度标准差分别降低了 12.51% 和 23.97%, 达到了 2.35 °C。该研究的优化传热路径及拓扑优化方法将为紧凑空间内的大圆柱电池热管理设计提供新思路。

关键词: 大圆柱电池; 液冷板; 相变材料; 导热铝; 拓扑优化

中图分类号: TK124

文献标志码: A

Topology-Optimized Liquid Cooling Combined with Phase Change Materials for Thermal Management of Large Cylindrical Batteries

ZHANG Da¹, LIN Zican², SUN Yasong^{2,3,4}, CAO Huquan², MA Jing⁵

(1. Key Laboratory of Shaanxi Province for Development and Application of New Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Advanced Power Systems for Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Sichuan Provincial Engineering Research Center for Intelligent Control and Simulation Testing Technology of New Energy Vehicles, Xihua University, Chengdu 611130, China; 4. Key Laboratory of Aerodynamics and Thermal Environment Simulation for Ground Transportation Vehicles, Tongji University, Shanghai 201804, China; 5. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To address the issues of high pressure drop and poor temperature uniformity in traditional large cylindrical battery liquid cooling plates, a thermal management system combining a topologically optimized liquid cooling plate with phase change materials was designed. First, cooling scheme 1 was developed based on the liquid cooling plate and phase change materials. Second, to overcome the limitation of restricted heat exchange area that hinders the full utilization of liquid cooling performance, cooling scheme 2 was proposed featuring serpentine liquid cooling channels to increase the heat exchange area. Finally, leveraging the high thermal conductivity of metallic materials, a composite cooling scheme 3 was designed integrating the topology-optimized liquid cooling plate, phase change material, and heat-conductive aluminum. Comparative analysis of flow and heat transfer performance revealed: Scheme 1 exhibited good temperature uniformity but suffered from limited heat exchange area between the battery and liquid cooling plate, along with inefficient filling of the phase change material; Scheme 2 increased heat exchange area and improved performance but incurred high flow resistance in the liquid cooling plate and poor temperature uniformity. Compared to the above two schemes, Scheme 3 reduced the average temperature by 9.11% and 4.32%, respectively, achieving 38.80 °C. The inlet and outlet pressure drops of Scheme 3 decreased by 0% and 90.08%, respectively, reaching 33.90 Pa. The standard deviation of the battery surface temperature in Scheme 3 decreased by 12.51% and 23.97%, respectively, reaching 2.35 °C. The optimized heat transfer pathways and topology optimization methodology

收稿日期: 2025-12-11。 作者简介: 张达 (1999—), 男, 硕士生; 孙亚松 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2025GH-YBXM-04, 2025CY-YBXM-094); 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室开放基金资助项目(VATLAB-2025-7); 中央高校基本业务费资助项目(300102225203)。

网络出版时间:

网络出版地址:

developed in this study offer novel insights for thermal management design of large cylindrical batteries in confined spaces.

Key words: large cylindrical battery; liquid cooling plate; phase change material; thermal conductive aluminum; topology optimization

动力电池是新能源汽车的核心动力源,其成组形式和热管理水平直接影响着汽车性能^[1]。锂电池的最佳工作温度范围为 20~40 °C,且电池组内各单体间的温差不应超过 5 °C^[2-3]。近年来,圆柱动力电池日益提升的高充放电倍率,以及日益增大的单体能量密度,使电池组内部热量更容易聚集,这将导致电池寿命与容量的衰减,甚至会引发热失控^[4-5],因此,迫切需要展开大圆柱动力电池的热管理研究。

电池热管理系统的冷却技术根据冷却介质不同主要分为 3 类:空气冷却、液体冷却、相变冷却^[6-7]。其中,空气冷却^[8]和液体冷却^[9-10]技术已成功实现商业化应用,并普遍使用于电池热管理系统中。例如,日产聆风和马恒达 e2o Plus 等车型采用的是空气冷却技术,而特斯拉、现代 Kona、福特福克斯和捷豹 I-Pace 等车型则采用的是液冷方案^[11]。圆柱电池的径向导热与周向散热的均匀性问题较为突出,而这 3 类冷却技术中,空气冷却、液体冷却因与电池接触面积有限而效率低下^[12];相变冷却虽然能够在圆柱电池的布置间隙中填充相变材料,提高温度均匀性和电池组体积利用率,但是其导热系数通常较低,且存在泄漏与固液相变体积变化等问题^[13]。此外,热管冷却虽然结合了高导热性与被动式冷却的优点,能够快速将电池热量传递至远端散发,尤其适用于局部高温的抑制,然而该技术由于高成本、体积大、噪声高等原因,使其在电动汽车上应用困难^[14]。因此,圆柱电池热管理系统常通过整合多种冷却技术来优化性能。但需要平衡主动冷却的高效性与被动冷却的简洁可靠性^[15]。

在复合冷却方案中,结合主动冷却中的液体冷却或空气冷却以及被动冷却中的散热片或相变材料,能够提升在高负荷工况或复杂环境下的温度调控能力。李君浩等^[16]设计了一种波形微流道液冷板,探究了流体流速、波形频率、阻尼区间与液冷板冷却性能及流体压降的关系。Wang 等^[17]提出了一种基于空气冷却的梯度泡沫金属结构,探究了不同孔隙密度下的换热结构性能。Xin 等^[18]提出了一种导热块和液体冷却组合的电池热管理系统,通过使导热块与电池侧面曲率相匹配,从而实现均匀散热。Cao 等^[19]提出了一种针对圆柱形锂离子电池组的相变材料-液冷协同热管理系统,探究了冷却液进出位置、流量、温度及相变材料特性对该系统性能的影响。作为主要冷却方式,这种基于低设计自由度的液冷流道(如蛇形流道、矩形流道等)难以满足高倍率充放电条件下,电池持续工作的散热需求^[20],而另一种基于经验、直觉设计的仿生液冷流道(如蜘蛛网结构、叶脉结构等)也存在高昂的试错成本^[21]。

拓扑优化可根据设定的边界约束条件和目标自动生成仿生流道,具有良好的流动和传热特性,近年来,随着增材制造技术的发展,逐渐成为换热器设计的研究热点。当前,采用拓扑优化方法设计的换热器在矩形锂电池冷却领域展现出一定优势^[22],但该方法在圆柱形锂电池换热器设计中应用甚少。Chen 等^[23]在圆柱电池间隙中设计了基于拓扑优化的横置液冷板,并与常规流道对比了性能差异。Belwadi 等^[24]通过拓扑优化设计了圆柱电池基于相变材料的最优热传导增强结构。然而,针对 4680 大圆柱电池的高效散热结构设计以及复合冷却方式下的多物理场耦合仿真,仍有待深入研究。因此,本文结合材料特性与结构差异,采用拓扑优化方法,旨在研究针对 4680 大圆柱电池在高倍率充电条件下,高效散热结构与复合冷却方案的散热形式,并重点分析其在高充放电倍率下的散热性能、温度均匀性及功耗特性。

本文主要工作如下:①提出基于相变材料与液冷的复合冷却方案 1,分析其流动和传热性能;②针对复合冷却方案 1 的不足,提出加大换热面积的蛇形液冷方案 2,并分析其流动和传热性能;③提出一种基于拓扑优化液冷板、相变材料和导热铝的高效复合冷却方案 3,并对比 3 种方案的流动和传热性能。

1. 模型与验证

图 1 展示了大圆柱电池组的物理模型。由图可知,该集成电池组由若干节 4680 电池(外径 46 mm,高度 80 mm)相互串联组成,各电池等距排列,在电池间隙中设置液冷与相变的复合散热系统。

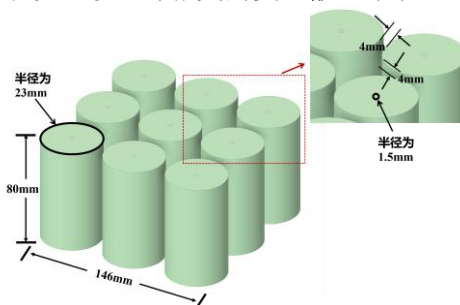


图 1 大圆柱电池组模型

Fig.1 Large cylindrical battery pack model

为了模拟锂离子电池在充电过程中的产热情况,采用有限元方法建立了三元材料聚合物锂离子电池(NMC111)的电化学模型^[25]。其中,正负极材料分别为镍钴锰酸锂和多孔石墨。

在锂离子电池整个充电过程中,电池组和冷却系统中的温度均随时间不断发生变化。在任意时刻,电池能量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_b c_{p,b} T_b) = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + \frac{dQ_{\text{gen}}}{dt} \quad (1)$$

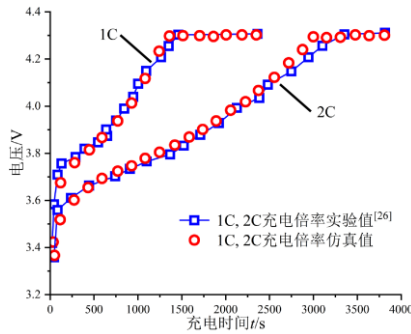
式中: ρ_b 、 $c_{p,b}$ 、 k_b 分别为锂离子电池材料的密度、比热容和热导率; Q_{gen} 为电池在充电过程中产生热量, 的发热率; $\frac{dQ_{\text{gen}}}{dt}$ 为发热率; T_b 为电池绝对温度。

在充电时, 电池发热量等于电池内阻产生的焦耳热与化学反应热的总和, 其表达式为:

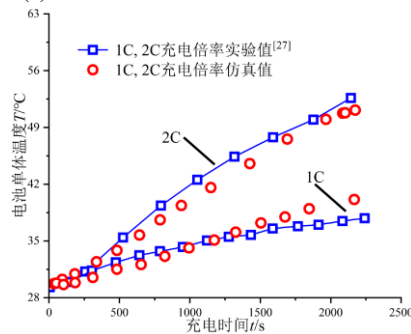
$$Q_{\text{gen}} = Q_j + Q_{\text{ec}} = I(E - V) - T_b \Delta S \frac{1}{nF} \quad (2)$$

式中: Q_j 为焦耳热; Q_{ec} 为反应热; I 为充电电流; E 为开路电压; V 是电池的工作电压; n 为电化学反应中半平衡反应的电子数; ΔS 是与电化学反应相关的熵变化; F 为法拉第常数。

在锂电池热管理的研究中, 主要选择两种生热模型: Bernardi 生热模型和电化学-热耦合模型。Bernardi 生热模型在简化数学和物理模型后, 通过近似拟合、加权平均的方式获得电池生热速率, 但是由于忽略了电池内部的电化场, 可能导致对电池在充电过程中热行为描述的不准确。电化学-热耦合模型结合了电化学反应过程和电池热传递过程, 对电池温度场的描述更加准确。图 2 为本文通过电化学-热耦合模型获得仿真值与文献[26]、文献[27]中的实验值进行对比的结果。其中, 1C、2C 分别表示电池以额定容量的电流充电, 可在 1、0.5 h 内充满。由图可知, 本文仿真值与实验值的最大相对误差小于 6%, 由此验证了该模型的可靠性。



(a) 1C, 2C 倍率电池恒流的充电曲线



(b) 1C, 2C 电池恒流的充电温度变化

图 2 电化学-热耦合模型的验证

Fig.2 Validation of electrochemical-thermal coupling model

2. 拓扑优化设计方法

基于伪密度方法在二维优化设计域中假设 1 个设计变量 θ , 该设计变量表示输出材料在设计域中的伪密度。 θ 取值范围为 0~1, 当 θ 趋近于 0 时, 介质就越接近固体, 反之介质就越接近于液体。基于流体对流和固体热传导方程, 将理论方程无量纲化。其中, 基于流场控制方程的无量纲表达式为

$$\begin{aligned} (\mathbf{u}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{u}^* &= \nabla^* \cdot \left\{ -p^* \mathbf{I} + \frac{1}{Re} \left[(\nabla^* \mathbf{u}^*) + (\nabla^* \mathbf{u}^*)^T \right] \right\} \\ &\quad - \left(1 + \frac{1}{Re} \right) \frac{1}{Da} \frac{1-\theta}{1+\theta} q \mathbf{u}^* \\ \nabla^* \cdot \mathbf{u}^* &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ∇^* 为无量纲梯度算符; $\nabla^* \cdot$ 为无量纲散度算符; ρ^* 为无量纲冷却液密度; $\mathbf{u}^*$ 为无量纲流动速度矢量; p^* 为无量纲压力; Re 为雷诺数; Da 为达西数; q 为达西插值模型惩罚因子。

在伪密度法中, 通过固体域和流体域的热导率线性插值积分, 可得到无量纲组合能量方程, 其表达式为

$$\begin{aligned} \theta Re Pr (\nabla^* \cdot \mathbf{u}^*) T^* &= \\ \left[(1-\theta) \frac{k_s}{k_f} + \theta \right] \nabla^{*2} T^* &+ (1-\theta) Q^* \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Pr 为普朗特数; k_f 为流体的导热系数; k_s 为固体的导热系数; ∇^{*2} 为无量纲拉普拉斯算子; T^* 为无量纲温度; Q^* 为依赖于局部温度的无量纲发热量, Q^* 的表达式为

$$Q^* = h^* (1 - T^*) \quad (5)$$

式中: h^* 为无量纲换热系数。

由于热源与拓扑优化过程相关联, 当 $\theta=1$ 时, $(1-\theta)Q^*=0$, 这意味着流体域不产生热量。因此, 如果 k_s 取值较大, 则所产生的能量将会被固体自身消耗, 拓扑结构分叉少, 不利于满足电池表面均匀散热的拓扑结构通道的生成。所以, 为了增大有效换热表面积, 取 $k_s = k_f$ 。则式(5)可表示为

$$\theta Re Pr (\nabla^* \cdot \mathbf{u}^*) T^* = \nabla^{*2} T^* + (1-\theta) Q^* \quad (6)$$

为避免拓扑优化问题中可能存在的网格依赖, 需设置一个相应的密度过滤器。在热流耦合的拓扑优化问题中, 为了保证优化结果的求解稳定性以及便于后处理, 采用基于亥姆霍兹滤波的密度过滤器。另外, 在拓扑优化过程中, 应用双曲正切投影, 可减少流体和固体区域间的灰度单元, 突出流体与固体的界限, 图 3 展示了相关对比结果。

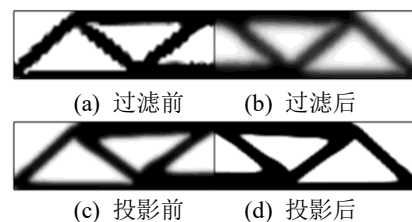
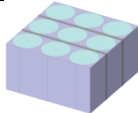
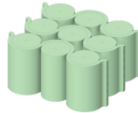
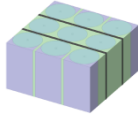


图3 采用密度过滤、双曲正切投影前后的对比
Fig.3 Comparison before and after density filtering and hyperbolic tangent projection

布置在电池组间隙中的液冷板，是带走热量的主要部件。因此，以最大换热量为目标，优化液冷板的拓扑结构，能够提高热量导出效率。由于采用三维拓扑结构进行优化，计算和时间成本都极大，所以本文通过采用二维拓扑结构优化来提高计算效率。为了降低液冷板前端与后端的温度差异，设计拓扑优化模型时，将进、出口交错布置，从而得到以最大换热量为目标的拓扑优化结构。液冷板设计域模型尺寸为146 mm×80 mm，进、出口通道分别平行等距布置在设计域上，设计域入口的无量纲初始温度 T_{in}^* 和无量纲出口压力 p_{out}^* 均为0。上述拓扑优化模型的相关参数如表1所示。

表1 拓扑优化模型参数 Table 1 Topology optimization model parameters	
参数	数值
优化设计域面积/mm ²	11 680
达西数	0.000 1
惩罚系数	0.01
雷诺数	200
普朗特数	6.78
动力黏度/(Pa·s)	0.005
无量纲入口温度	0.0

表2 大容量圆柱电池的冷却方案
Table 2 Cooling solutions for high-capacity cylindrical batteries

方案	模型	结构特点	设计思路	优化路径
方案1		拓扑结构与相变材料的复合	通过相变材料填充间隙，提高空间利用率，拓扑优化液冷板强化对流换热	增大电池组与液冷板间的换热面积，降低相变材料的无效填充
方案2		蛇形液冷通道	增大换热面积，使流道贴合电池表面，充分发挥液冷系统的散热性能	降低系统泵驱装置数量，减少系统的泵功消耗，解决远端区域热集中问题
方案3		拓扑结构、相变材料、导热金属的复合	添加导热金属加大换热面积与导热；相变材料填充远端区域提高温度均匀性	

由于圆柱电池排列特性，需要在电池之间的剩余空隙填充相变材料，以提高复合冷却方案的散热效率。当相变材料填充于狭窄间隙，液相的自然对流效应便可忽略。需说明的是，该假设会使相变融化速率的预测结果偏低，从而低估系统的传热能力。然而，在以导热和液冷为主要传热方式的热管理系统中，这样的简化处理不会显著影响模型的可靠性，具备良好的适用性。表3列出了相变材料相关参数及取值。

表3 相变材料参数
Table 3 Phase change material parameters

无量纲入口速度	0.5
流体域体积分数	0.5

设计域内，热源产生的热量会在流体和固体接触界面处传递给流体，再由流体带走。设计域中，以最大换热量 J_{th} 为目标，以流体域的体积分数 $V_f=0.5$ 为约束，拓扑优化过程的无量纲目标函数可描述为

$$\begin{cases} \max J_{th} = \int_{\Omega} h^* (1 - \theta) (1 - T^*) d\Omega \\ \text{s.t.} \int_{\Omega} \theta d\Omega \leq V_f \cdot \int_{\Omega} 1 d\Omega \\ \int_{\Gamma_{in}} p_{in}^* \mathbf{u}^* d\Gamma_{in} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中： Ω 为优化设计域； Γ_{in} 为入口边界； p_{in}^* 为无量纲入口压力。

基于上述方法，按照模型初始化、有限元分析、敏感性分析、拓扑优化、收敛性判别以及结束的流程进行求解，若流程中判定不收敛，则返回有限元分析重新求解直至收敛。

3. 复合冷却方案设计及结果分析

针对大容量圆柱电池高倍率充电热管理的需求，本文提出的3种冷却方案如下表2所示，表中列举了各方案的设计思路与优化路径，本节将按照下表进行三维验证与方案优化，并对各方案进行对比分析。

参数	数值
相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)	263
相变温度/°C	39
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.2
密度/(kg·m ⁻³)	1 050
恒压比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2 000
相转变间隔温度/K	8

圆柱形电池组复合冷却方案1的模型几何结构如图4所示。由上述方法得到的基于最大换热量的拓扑优化液冷板，通过铝壳封装，与相变材料根据图4所示进行布置与填充。

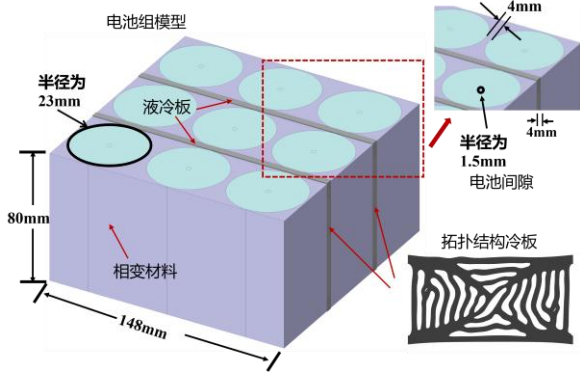


图4 液冷、相变复合冷却系统（方案1）

Fig.4 Liquid-cooled and phase-change hybrid cooling system (scheme 1)

电池组复合冷却系统数值计算模型的有关边界条件如下：①液冷介质水的总流量为 $10 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ；②冷却液初始温度为 26.8°C ；③出口压力等于 0 Pa 。另外，电池产热来自电化学-热耦合模型，电池温度与电池产热及热量积累过程有关，因此需分析电池组在 4C 倍率下充电 340 s （电池组达到最高温度的时刻）时的温度分布情况。在后续对二维拓扑优化结构进行三维验证时，采用上述相同的边界条件。

本文进行的是稳态数值仿真，故冷却剂稳态流动下的控制方程有如下表达式

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{v}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 c_{p,1} T_1) + \rho_1 c_{p,1} (\mathbf{V} \cdot \nabla) T_1 = \nabla \cdot (k_1 \nabla T_1) \quad (11)$$

式中： ρ_1 、 $c_{p,1}$ 、 T_1 、 P 分别为液体的密度、比热容、温度和压力； μ 为冷却剂的动力黏度； $\mathbf{v}$ 为流速矢量。

为了对比分析不同热管理系统的流动与传热性能，采用不同指标衡量热管理系统的各项性能。使用最高温度 $T_{\max}$ 观测热点区域，平均温度 T_{avg} 表征换热性能，表面温度标准差 T_σ 表征温度均匀性，进出口压力差 ΔP 衡量流动阻力。其中， T_σ 的计算式为

$$T_\sigma = \sqrt{(T_i - T_{\text{avg}})^2} \quad (12)$$

式中： T_i 为电池表面温度。

为了在提高数值仿真计算速度的同时，能够保证数值计算的质量，对网格剖分进行无关性检验，结果如图5所示。由图可知，网格数为 2.8×10^6 时，对 T_{avg} 、 ΔP 的影响较小。因此，选择 2.8×10^6 的网格数作为网格基础进行后续计算。

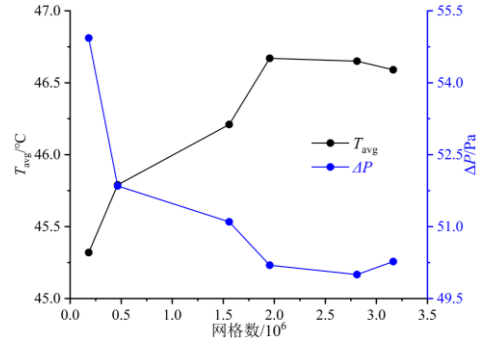


图5 网格无关性验证

Fig.5 Grid independence test

在仿真软件中进行多物理场耦合的数值模拟，复合冷却方案1的仿真结果如图6所示。由图6(a)可知，电池组温度仅在与冷却板较近的部分区域得到控制，在远离冷却板、靠近出口的区域形成高温区，多数相变材料未达到相变温度，冷却系统无法完全带走电池热量。由图6(b)可知，相变材料仅在与电池接触边界的小范围区域内产生明显相变，距离电池较远的相变材料填充区域无明显的相变化，与温度云图结果一致。上述分析表明了该复合冷却方案无法在高性价比的情况下满足该电池组模型的散热需求，这是因为图6(b)中最大液相率为 34.3% ，热量无法通过低导热系数的相变材料传递，所以相变材料无法作为该模型的主要冷却方式。此外，液冷板虽然有良好的冷却能力，但在该方案中与圆柱电池的接触面积较小，无法完全发挥液冷板的散热性能。因此，该方案具有一定的局限性。

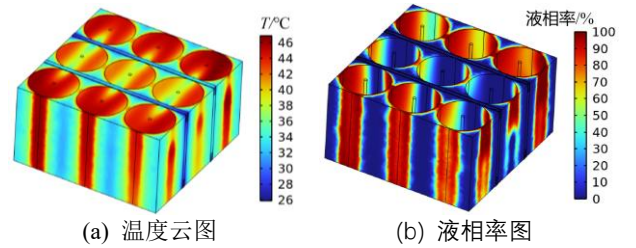


图6 方案1的电池热管理性能

Fig.6 Performance of battery thermal management for scheme 1

在方案1中，以最大换热量为优化目标时，压降为 33.90 Pa 。图7展示了不同目标函数下，方案1的性能对比（单一目标仅以最大换热量为目标函数；多目标中换热权重系数为 0.7 ，流阻为 0.3 ）。由图7可知，与最大换热量为优化目标的方案相比，平均温度上升了 0.39°C ，压降降低了 0.15 Pa 。因此，在本文中，以牺牲换热量为代价来提升流动性能的效果并不明显。后续优化方案将仅采用最大换热量为优化目标函数。

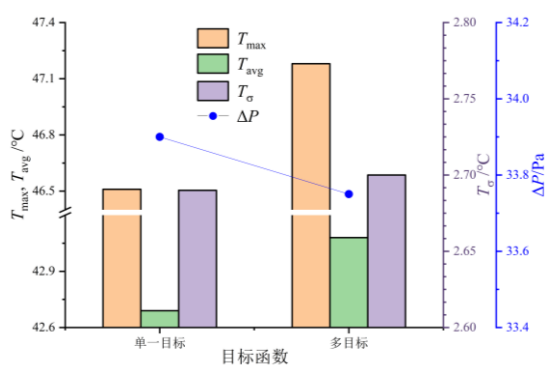


图7 不同目标函数下方案1冷板的性能对比

Fig.7 Performance comparison of cold plate in scheme 1 under different objective functions

针对相变材料参数的高敏感性,图8展示了在不同的相变材料导热系数和潜热下,热管理系统的传热性能。

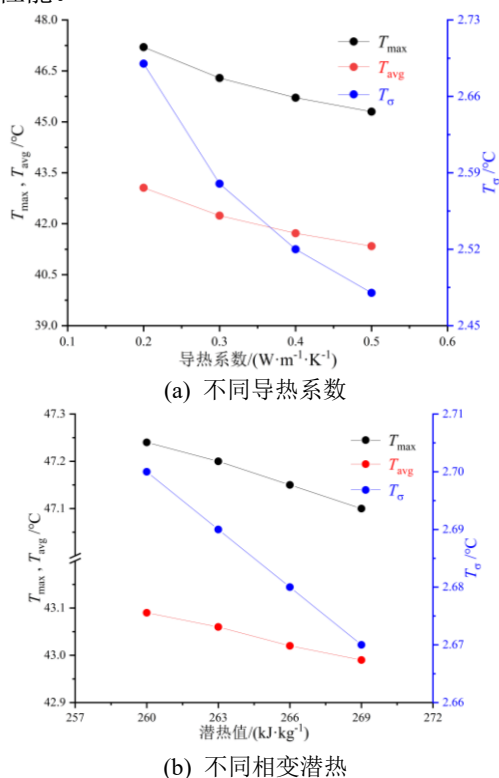


图8 不同相变材料参数下3种方案的传热性能对比
Figure 8 Comparison of heat transfer performance among three schemes under different phase change material parameters

由图8(a)可知,增大相变材料导热系数,有利于电池组内的热量传递,能够更好地发挥相变材料的均温控制能力。由图8(b)可知,增大相变潜热,可以使相变材料在相变阶段吸收更多热量,但对于传热性能与均温性的提升不明显。这是由于相变材料导热系数较低,限制了远端相变材料的吸热能力,热量无法充分传导。

为了更好发挥液冷方式的冷却性能,加大液冷系统与电池组的换热面积,基于复合冷却方案1的数值模拟结果,设计了冷却方案2,采用了如图9(a)

所示的蛇形液冷通道冷却管。在保持冷却介质总流量不变的前提下,液冷系统的仿真结果如图9(b)和9(c)所示。其中,温度云图证明了通过增大换热面积来增强液冷系统换热方式是有效的,并且电池与冷板接触区域的温度均匀性较好,但在无液冷板接触的区域会形成高温集中区。压力云图表明该液冷系统具有较高的流动阻力,需要额外的泵驱装置和泵功耗,从而证明了该散热系统无法在高性价比的情况下满足该电池组模型的散热需求。这是因为增大接触面积虽然能够增强液冷板冷却性能,并且通过设置多个进出口,在部分区域呈现良好的温度均匀性,但是在远端会形成热集中区域。该区域入口处的最大压力为366.99 Pa,中间部分最大压力约为200.00 Pa,这是由非接触区域热量无法带出,液冷板的圆弧形结构造成的较大流动阻力所导致。因此,该方案具有一定的局限性。

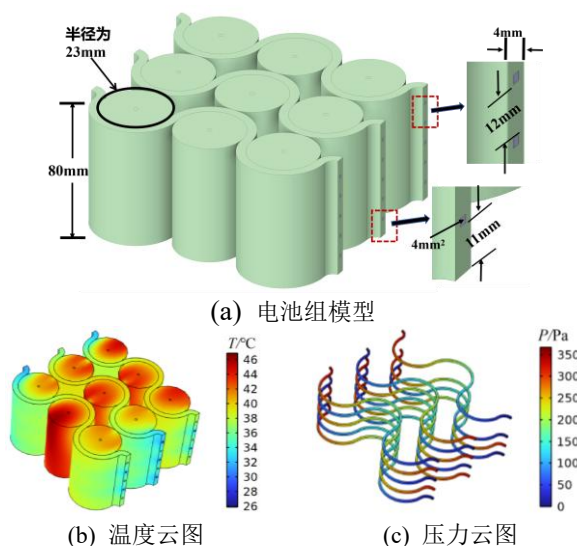


图9 蛇形缠绕液冷系统(方案2)的结构设计和性能
Fig.9 Structure design and performance of serpentine coiled liquid cooling system (scheme 2)

为了充分发挥液冷板的冷却能力,同时不额外增加液冷板泵驱装置与泵功耗,以及增大远离冷板区域的热量传递。结合上述2种方案的局限性与优势点,设计了基于拓扑优化液冷板、相变材料和导热铝块的高效复合的冷却方案3,该冷却系统如图10所示。由图可知,铝作为导热金属增加了电池模组热量向液冷板的传递,相变材料填充远端间隙吸收了冷板无法吸收的热量,拓扑优化冷板作为主要冷却方式带走大部分的电池热量,直板形式则能最大程度的降低流动阻力。

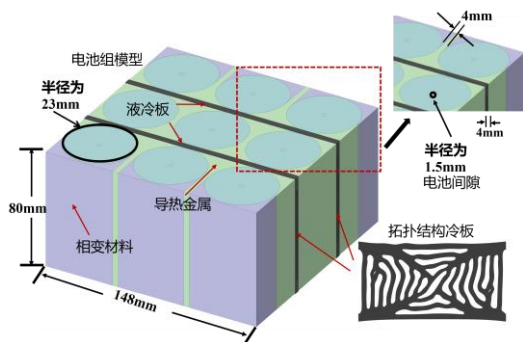


图 10 液冷、相变、导热铝复合冷却系统（方案 3）
Fig.10 Liquid-cooled, phase-change, and thermal-conductive aluminum composite cooling system (scheme 3)

该方案的数值模拟结果如图 11 所示。图 11(a)所示的温度云图证明了该方案具有优异的冷却性能。金属铝块能够将电池产生的热量高效传导到液冷板；拓扑优化液冷板能够高效换热，并且具有较好的温度均匀性；相变材料能够弥补远端区域热量无法传递的劣势，虽然在温度抑制上不如液冷，但也能作为辅助模块解决远端小区域的散热问题。图 11(b)所示的液相率图体现了相变材料在远端区域能抑制电池温度，将导热金属无法覆盖的区域热量吸收，并辅助导热金属高效导热。上述分析证明了该冷却方案可以有效降低电池温度，提升电池组温度均匀性。

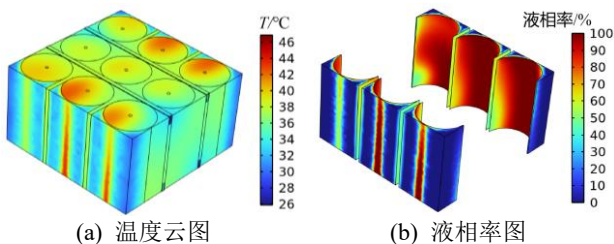


图 11 方案 3 的电池热管理性能
Fig.11 Performance of battery thermal management for scheme 3

为了探究拓扑优化冷板的性能贡献，图 12 展示了常规矩形冷板的模型结构与尺寸。在相同质量流量，流道厚度，出、入口边界条件及压降取值方式下，表 4 对比了传统冷板与拓扑优化冷板的热管理系统性能。对比结果表明：相较于常规通道，拓扑优化冷板在换热性能略有提升的情况下，具有较好的流动性能。因此，拓扑优化冷板可以使热管理系统具有良好的流动与换热性能。

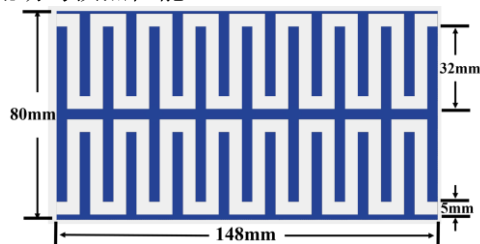


图 12 矩形冷板模型
Fig.12 Rectangular cold plate model

表 4 常规冷板与拓扑优化冷板的性能对比

Table 4 Performance comparison of conventional cold plate vs. topology-optimized cold plate

冷板	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{avg}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\sigma}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta P/\text{Pa}$
拓扑冷板	43.67	38.80	2.35	33.90
常规冷板	44.43	40.12	2.73	814.11

图 13 展示了 3 种方案的流动和传热性能。方案 3 的最高温度 $T_{\max}$ ，平均温度 T_{avg} ，表面温度标准差 T_{σ} ，出、入口压力差 ΔP 均为最小，分别为 43.67、38.80 2.35 $^{\circ}\text{C}$ 和 33.90 Pa。方案 1 的 $T_{\max}$ 、 T_{avg} 最大，分别为 46.51、42.69 $^{\circ}\text{C}$ 。方案 2 的 ΔP 、 T_{σ} 最大，分别为 341.75 Pa、3.09 $^{\circ}\text{C}$ 。方案 1 的散热性能最差，方案 2 的温度均匀性与流动性能最差，方案 3 的流动和传热性能均较好，这与电池组表面温度云图的结果一致。因此，基于拓扑优化液冷板、相变材料和导热铝块的高效复合冷却方案 3 具有优异的综合性能。

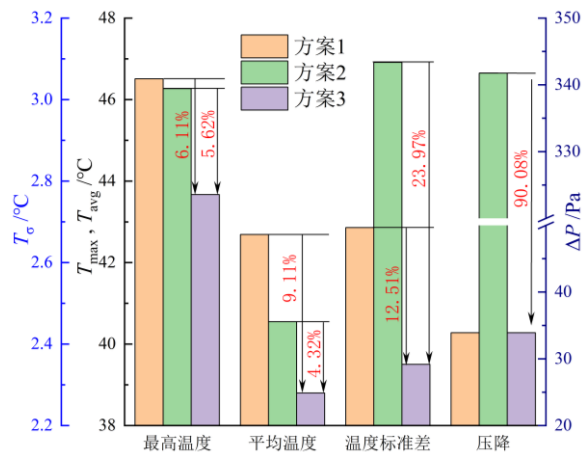


图 13 3 种方案的综合性能对比
Fig.13 Three schemes performance comparison

进一步对比分析了不同充放电倍率(4C 和 2C)、不同环境温度(26.8、25.0 $^{\circ}\text{C}$)下，3 种方案热管理系统的换热性能，表 5~表 7 列出了 3 种方案的对比结果。由表可知，方案 2 的换热能力优于方案 1，但温度均匀性不如方案 1。相较于方案 1 和方案 2，在不同充电倍率及环境温度下，方案 3 在换热性能和温度均匀性上均更有优势，这与 4C 充电倍率下的结论一致，由此证明了该优化方案具有普适性。同时，电池组温度随着充放电倍率的增加而上升，并且环境与冷却液温度保持一致可以提升温度均匀性。

表 5 方案 1 的性能对比

Table 5 Performance comparison for scheme 1

环境 温度/ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{avg}}/^{\circ}\text{C}$		$T_{\sigma}/^{\circ}\text{C}$	
	4C	2C	4C	2C	4C	2C
26.80	46.51	34.65	42.69	32.78	2.69	0.91
25.00	46.12	34.68	42.72	32.58	3.04	1.10

表 6 方案 2 的性能对比

Table 6 Performance comparison for scheme 2

环境 温度/ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{avg}}/^{\circ}\text{C}$		$T_{\sigma}/^{\circ}\text{C}$	
	4C	2C	4C	2C	4C	2C

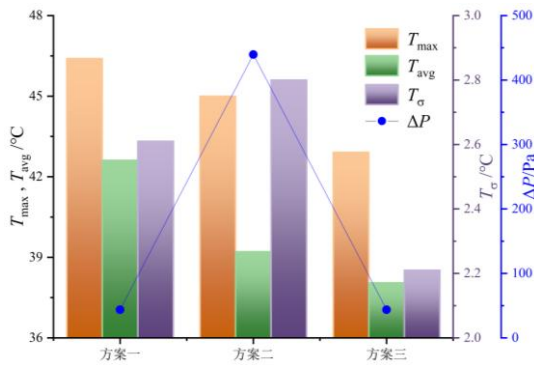
26.80	46.27	33.11	40.55	31.28	3.10	1.23
25.00	46.04	33.10	40.38	31.27	3.25	1.33

表 7 方案 3 的性能对比

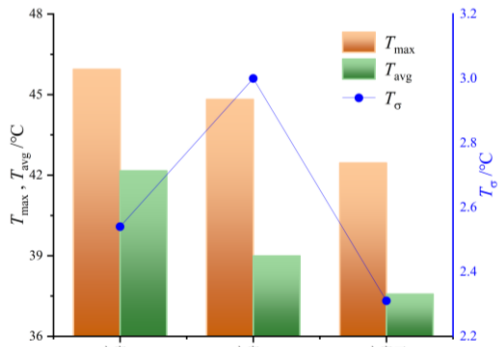
Table 7 Performance comparison for scheme 3

环境	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{avg}}/^{\circ}\text{C}$		$T_{\sigma}/^{\circ}\text{C}$	
温度/ $^{\circ}\text{C}$	4C	2C	4C	2C	4C	2C
26.80	43.67	32.74	38.80	30.99	2.35	0.89
25.00	43.37	32.69	38.57	30.96	2.62	1.05

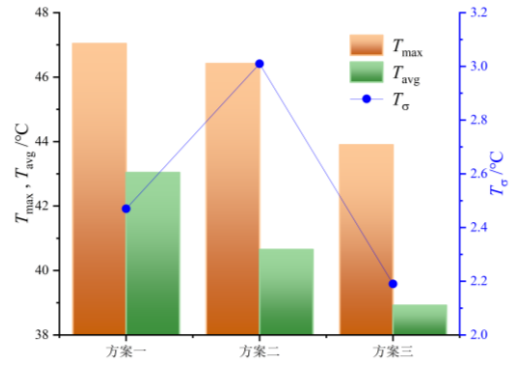
为了进一步确定方案 3 在不同工况下具有优异性能的普适性。图 14 展示了质量流量为 $12\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入口温度为 $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、环境温度为 $28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及热浸环境 $45.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 3 种方案的热管理系统性能。图 14(a)、14(b)和 14(c)展现的 3 种方案流动和传热性能与图 13 一致。相较于方案 1 和方案 3, 增加质量流量, 会使方案 2 产生更大的流动阻力。热浸环境下, 初始温度高, 方案 1 中相变材料的劣势被扩大, 电池温度无法吸收或导出, 使得整体处于高温, 故而 T_{σ} 较低。相较于方案 1 与方案 2, 方案 3 在多种工况下的传热性能和温度均匀性均有优势。因此, 方案 3 的优异性能具有普适性。



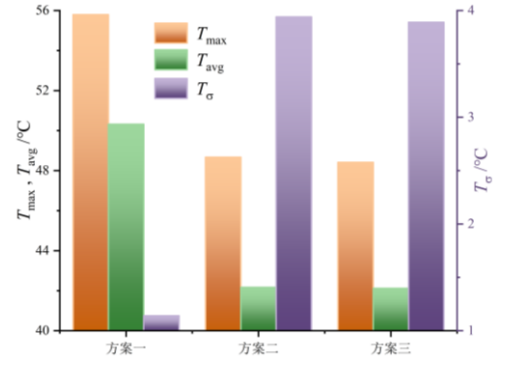
(a) 质量流量为 $12\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$



(b) 入口温度为 25°C



(c) 环境温度为 28°C



(d) 热浸环境温度 45°C

图 14 不同工况下 3 种方案的流动和传热性能
Fig.14 Flow and heat transfer characteristics of three schemes under different operating conditions

4. 结 论

本文针对 4680 大圆柱电池进行热管理系统设计, 提出了 3 种热管理方案。得到如下主要结论。

(1) 方案 1 (液冷与相变材料的复合) 显示, 单纯依靠相变材料虽可改善温度均匀性, 但因导热率较低且有效换热面积不足, 会导致热量累积, 散热性能受限, 平均温度达到 $42.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 方案 2 (蛇形液冷通道) 通过贴合电池壁面设计提升散热, 验证了增大换热面积对降低平均温度的有效性, 平均温度降低了 4.90% , 但也带来了流道阻力的急剧增加, 出、入口压力差增加了 828.47% 。

(3) 方案 3 (液冷、相变材料与导热金属的复合) 融合前两者优点。通过导热金属优化传热路径并增加换热面积, 相较于方案 1 和方案 2, 表面温度标准差分别降低了 12.51% 和 23.97% , 平均温度分别降低了 9.11% 和 4.32% 。此外, 通过低阻流道设计, 显著降低了流动阻力, 相较于方案 2, 出、入口压力差降低了 90.08% 。因此, 方案 3 同时实现了传热效率的提升和流动性能的优化。

虽然引入导热金属能够增强结构强度, 但仍需在能量密度与散热需求间进行精细化权衡, 并在设计中要确保电气安全。拓扑优化流道目前常采用 3D 打印技术进行加工, 密封性较好, 但针对微小结构, 其表面粗糙度仍有待提升。

参考文献:

- [1] 韩旭,贾凡,陈彬,等.不同跨临界CO₂直冷系统架构下动力电池冷却系统性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2026, 60, 1-10.
Han X, Jia F, Chen B, et al. Performance analysis of power battery cooling system under different transcritical CO₂ direct cooling system architectures [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60, 1-10.
- [2] 任峰胜,江艳红,杨辉著.液冷板流道拓扑优化设计及动力电池散热性能分析[J].制冷与空调, 2025, 25, 78-85.
Ren FS, Jiang YH, Yang H. Topology optimization design of liquid-cooled plate flow channels and thermal performance analysis of power batteries [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2025, 25, 78-85.
- [3] 袁航,高强.变接触面圆柱形锂电池组液冷散热的热特性[J].电源技术, 2021, 45, 302-304.
Yuan H, Gao Q. Thermal characteristics of liquid cooling of cylindrical lithium battery with variable contact surface [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45, 302-304.
- [4] Acker L, Hofmann P, Konrad J. Predictive battery thermal management for fast charging of electric vehicles using nonlinear model predictive control and dynamic programming[J]. Automotive and Engine Technology, 2026, 11, 1.
- [5] 王兵兵,乔加飞,那尔苏,等.一种储能电池双向逆流式换热板传热仿真[J].电源技术, 2025, 49, 1899-1906.
Wang BB, Qiao JF, Na ES, et al. Thermal simulation of a bidirectional counter-flow heat exchange plate for energy storage batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49, 1899-1906.
- [6] Wankhede S, Pingale AD, Kale A. Experimental investigation on thermal management of lithium-ion battery pack for formula student electric vehicle using air-cooling system [J]. Energy Storage and Saving, 2025, 4, 38-47.
- [7] 李存璞,唐晓霞,魏子栋.锂离子电池的热失控与预防[J].科技导报, 2024, 42, 178-192.
Li CP, Tang XX, Wei ZD. Thermal runaway and prevention of lithium-ion batteries [J]. Science & Technology Review, 2024, 42, 178-192.
- [8] 刘树宇,罗丁.均热板耦合热电制冷器的方形电池热管理系统数值研究[J].储能科学与技术, 2026, 15, 266-274.
Liu SY, Luo D. Numerical investigation of flat battery thermal management system integrated with vapor chamber and thermoelectric coolers [J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15, 266-274.
- [9] 陈素华,白莹.锂离子动力电池热失控机理及热管理技术研究进展[J].中国科学基金, 2023, 37, 187-198.
Chen SH, Bai Y. Thermal runaway mechanism and research progress on thermal management of lithium-ion power batteries [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37, 187-198.
- [10] Zhou L, Zhang S, Jain A, et al. Recent advances in indirect liquid cooling of lithium-ion batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 132, 117750.
- [11] Kumar R, Goel V. A study on thermal management system of lithium-ion batteries for electrical vehicles: A critical review [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 71, 108025.
- [12] Wei LS, Liu HL, Tang CG, et al. Investigation of novel type of cylindrical lithium-ion battery heat exchangers based on topology optimization [J]. Energy, 2024, 304, 131886.
- [13] 吴成会,梁才航.基于浸没式冷却的锂离子电池实验研究[J].电源技术, 2023, 47, 1409-1413.
Wu CH, Liang CH. Experimental study of lithium-ion battery based on immersion cooling [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47, 1409-1413.
- [14] 吕福祥,陆晓峰,李洪峰,等.“散-储”一体化的电池热管理系统研究[J].储能科学与技术, 2025, 14, 3677-3686.
Lv FX, Lu XF, Li HF, et al. The research of the “dissipation-storage” integrated battery thermal management system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14, 3677-3686.
- [15] Elmi MA, Zhao P. Review of thermal management strategies for cylindrical lithium-ion battery packs [J]. Batteries, 2024, 10(2), 50.
- [16] 李君浩,任晓龙,杨炯,等.锂电池冷板新波形微流道传热特性研究及结构优化[J].西安交通大学学报, 2024, 58, 14-26.
Li JH, Ren XL, Yang J, et al. Research on heat transfer characteristics and structural optimization of new waveform microchannels for lithium-ion batteries cooling plates [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58, 14-26.
- [17] Wang YF, Ma XL, Ouyang ZW, et al. Comprehensive analysis of forced convection heat transfer enhanced by metal foam with pore density gradient structure [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 285, 113549.
- [18] Xin SJ, Wang C, Xi H. Thermal management scheme and optimization of cylindrical lithium-ion battery pack based on air cooling and liquid cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224, 120100.
- [19] Cao HQ, Lin ZC, Zhang D, et al. Design and optimization of thermal management system for cylindrical battery pack combining liquid cooling with phase change materials based on nondominated sorting genetic algorithm[J]. Energy, 2026, 342, 139591.
- [20] Ba J, Li B, Zeng X, et al. Topology optimization of 3D conformal cooling channels using within-surface flow model [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 267, 125765.
- [21] Sun YS, Bai RH, Ma J. Design and thermal analysis of a new topological cooling plate for prismatic lithium battery thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219, 119547.
- [22] Guo C, Liu HL, Guo Q, et al. Investigations on a novel cold plate achieved by topology optimization for lithium-ion batteries [J]. Energy, 2022, 261, 125097.
- [23] Chen P, Gao L, Li W, et al., A topology optimization-based-novel design and comprehensive thermal analysis of a cylindrical battery liquid cooling plate[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 252, 123747.
- [24] Belwadi ZA, Akula R. Design of a PCM-based thermal management system for cylindrical Li-ion battery using topology optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 270, 126143.
- [25] Sun YS, Bai RH, Ma J. Development and analysis of a new cylindrical lithium-ion battery thermal management system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35, 100.
- [26] Sheng L, Zhang HY, Su L, et al. Effect analysis on thermal profile management of a cylindrical lithium-ion battery utilizing a cellular liquid cooling jacket [J]. Energy, 2021, 220, 119725.
- [27] Wang W, He T, He S, et al. Modeling of thermal runaway propagation of NMC battery packs after fast charging operation[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 154: 104-117.

(编辑 刘懿莹)