

基于液态金属冷却的电池液冷方案设计及参数多目标优化

杨利伟, 马凯伦, 周小明*

(河海大学机电工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要:【目的】针对锂电池高倍率放电产热问题,设计一种基于液态金属冷却的高效液冷方案,并通过多目标优化提升散热性能与系统稳定性。【方法】采用镓基液态金属作为冷却剂,设计单入口双出口液冷回路;利用Fluent软件进行数值模拟,分析冷却剂流速、管道高度、分支递增宽度及倾角对散热性能的影响;结合正交实验法筛选关键参数,并基于NSGA-II多目标遗传算法优化参数组合。【结果】优化后最优参数组合为冷却剂流速0.42 m/s、分支递增宽度0.13 mm、倾角87.38°、管道高度5.76 mm,系统最大温度312.66 K,温差11.66 K,压降0.712 kPa。与初始方案相比,最大温度降低0.53%,温差降低8.04%,压降略有增加。【结论】液态金属冷却显著提升散热效率,流速与管道高度对温度控制影响最大;NSGA-II算法可实现散热性能与压降的均衡优化,为高倍率电池热管理提供有效解决方案。

关键词:液态金属;液冷;高倍率放电;正交实验;多目标优化

中图分类号:TK01+1,TM912

文章编号:1674-8069(2025)02-0206-11

文献标志码:A

DOI编号:10.19944/j.eptep.1674-8069.2025.02.004

[引用本文格式]杨利伟,马凯伦,周小明.基于液态金属冷却的电池液冷方案设计及参数多目标优化[J].电力科技与环保,2025,41(2):206-216.

YANG Liwei, MA Kailun, ZHOU Xiaoming. Liquid cooling model design and multi-objective optimization of battery parameters based on liquid metal cooling[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(2):206-216.

Liquid cooling model design and multi-objective optimization of battery parameters based on liquid metal cooling

YANG Liwei, MA Kailun, ZHOU Xiaoming*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu China)

Abstract: [Objective] To address the heat generation issue of lithium batteries under high-rate discharge, a liquid cooling scheme based on liquid metal was designed, aiming to enhance thermal performance and system stability through multi-objective optimization. [Methods] A single-inlet double-outlet cooling loop using gallium-based liquid metal was proposed. Numerical simulations via Fluent were conducted to analyze the effects of coolant velocity, channel height, branch width increment, and inclination angle on thermal performance. Orthogonal experiments and the NSGA-II multi-objective genetic algorithm were employed for parameter screening and optimization. [Results] The optimal parameters were determined as coolant velocity 0.42 m/s, branch width increment 0.13 mm, inclination angle 87.38°, and channel height 5.76 mm. The optimized system achieved a maximum temperature of 312.66 K, temperature difference of 11.66 K, and pressure drop of 0.712 kPa. Compared to the initial design, the maximum temperature and temperature difference decreased by 0.53% and 8.04%, respectively, with a slight increase in pressure drop. [Conclusion] Liquid metal cooling significantly improves heat dissipation efficiency, with velocity and channel height being dominant factors. The NSGA-II algorithm effectively balances thermal performance and pressure drop, offering a

收稿日期:2024-11-02 录用日期:2025-03-02

Received: 2024-11-02 Accepted: 2025-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(12372261);国家能源集团科技项目(DY2023FK078);中国科学院微重力重点实验室课题(NML202305)

practical solution for high-rate battery thermal management..

Key words: liquid metal; liquid cooling; high rate discharge; orthogonal design; multi-objective optimization

0 引言

随着新能源行业的发展,锂电池在运行过程中会产生大量的热,需要对其进行热管理^[1-2]。锂离子电池具有能量密度高、循环寿命长、自放电小、无记忆效应等优点,被广泛用作电动汽车的动力源^[3-5]。动力电池热管理系统设计的主要目标是:在考虑空间布置、设计成本、轻量化等条件下,通过加热或冷却控制,保证电池系统工作在相对适宜的工作温度,同时减小单体间温度,保证一致性^[6]。有效的热管理可以延长电池的使用寿命^[7]。而电池在充放电过程中,极化反应和化学反应会产生大量的热量。如果热量不能及时散发出去,极易引发热失控^[8-9]。为了保证电池的高效工作以及电池的安全和寿命,需要对电池组进行开发高效合理的电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)。

目前,常见 BTMS 冷却策略主要分为风冷、液冷、相变材料(phase change material, PCM)冷却和热管冷却以及这些冷却方式的组合^[10-13]。风冷结构简单,价格较低,但风冷散热有着导热系数低,容易使得电池系统的散热能力不足,电池组温度分布不均匀^[14]。PCM 散热较为均匀,但在较高的放电率下,PCM 的散热能力较低^[15-16]。热管具有结构简单、导热系数高的优点,但其成本较高,难以投入大规模商业化^[17-18]。Shen 等^[19]设计了一种改进的 Z 形系统,分析发现流道最佳倾角为 19°,与传统的 Z 形风管相比,最高温度和最大温差分别降低 3.4% 和 5.8%。唐浩等^[20]以某离网型风光互补发电系统为例,发现风光互补发电系统具有更好的低碳效益。Zhang 等^[21]系统地进行了相变材料(PCM)剂量及其影响与相变温度、PCM 的热导率和传热系数的详细参数研究。结果表明,0.75 至 1 之间的“热比”比较适合在单次放电过程中控制电池温度。Zhang 等^[22]建立了包含扁平热管的电池热管理系统,讨论了电池温度场的变化,并将其与空气自然对流和铝板冷却两种冷却系统进行了比较,结果表明,采用扁平热管可以有效降低最大温度和温差,同时将能源成本降至最低。液冷式 BTMS 因其结构紧凑、传热系数高等优势成为许多商用车的主流选择。近年来,采用液冷

方式散热逐渐成为主流。Liu 等^[23]基于仿生学原理提出了一种夹有软包锂离子电池的仿生叶脉分支通道的液冷板,采用正交实验极差法对参数研究得出,冷却板入口流量和通道宽度是影响电池散热的主要因素,并采用非支配排序遗传算法(NSGA-II),对求解集进行了优化。安风霞^[24]等采用 NSGA-II 多目标优化方法对电路板换热器芯体的尺寸进行研究,大大降低了压降的同时提高了传热效率。

对于电池散热系统而言,传统的液冷冷却剂通常为水、乙二醇等,液态金属作为优良的散热剂,可用于电池散热。与水等传统冷却剂相比,镓基液态金属作为冷却剂具有超高导热系数、低熔点和高沸点等显著优点。汪朝晖^[25]基于仿生蛛网模型设计电池热管理模型并进行优化。然而,水和乙二醇相对于液态金属的散热能力较小,对于大功率放电的电池系统的散热能力不足。液态金属具有高导热系数,以其优良的导热性能被用于芯片及各类散热器^[26-28]。陈吉翔^[29]等研究了液态金属/硅酸铝颗粒的新型双介质储热体系,研究了双介质储热及调峰能力。然而液态金属作为散热剂对电池进行散热的研究较少。液态金属作为散热剂对电池进行散热的研究较少。Yang^[30]等首次提出了采用液态金属对电池模组进行散热,并于传统水冷作了比较,结果表明,在相同流量条件下,液态金属冷却系统可以获得更低且更均匀的模块温度,并且所需的泵功率更小。Deng 等^[31]研究了一种液态金属-水耦合的多通道液态金属对流散热系统,用于高热流密度芯片阵列的两级多通道液态金属冷却系统。Liu 等^[32]提出了一种基于 T 型和 Y 型通道设计的 T-Y 型微通道散热器,并于水冷却剂做了比较,证明使用液态金属冷却剂可以提高大功率散热器的传热性能。然而,对于高倍率电池的产热,现有的冷却剂的散热效果不佳。对比同为热源的锂电池和芯片发现,芯片工作产生的热流密度远高于锂电池高倍率放电时产生的热流密度。因此理论上液态金属和水相结合的复合式冷却系统可以有效解决超高容量锂电池组高倍率放电时的散热问题,这是传统水冷电池组热管理系统(BTMS)无法解决的。但由于芯片尺寸较小且热流密度较高,二者复合冷却系统的设

计具有很大差别。体现在:锂电池的几何尺寸远大于芯片,导致锂电池冷却板的几何尺寸远大于芯片冷却板。因此需要设计一个适合电池组热管理系统的液态金属冷却板,在保证换热性能的基础上尽可能降低冷却板制造成本并减少液态金属用量。

本文以镓基液态金属为冷却剂,设计了一种新型的单入口双出口冷却回路,研究了电池在5C倍率下冷却剂流速、流道高度、流道宽度递增长度以及流道倾角对电池系统的散热性能,通过正交实验极差法对比了各因素的影响程度,并通过基于非支配排序的遗传算法(NSGA-II)对电池热管理系统进行多目标优化的研究,确定电池热管理系统的最佳参数。

1 研究方法

1.1 研究对象

本文设计了一种新型的单入口双出口的冷却回路模型。锂电池热管理模型由三块冷却板、两块电池以及冷却板之间的管道组成。组中每两个带有微型通道的冷却板之间有一个锂电池,电池产生的热量通过接触面传递到冷却板中。因此,只需要保证每个冷板内管道的入口速度相同,然后就可以认为每个电池模块的散热相同。为了便于计算,将单体电池视为长方体。冷却板设计成与电池单元侧面相同的形状。在本研究中,选择了尺寸为 $110\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 260\text{ mm}$ 的50 Ah棱柱形锂离子电池。图1(a)是模型整体图。图1(b)是液冷管道平面图,冷板管道有一个出口布置在中间位置,两个出口布置在上下两端,管道呈上下对称,入口宽度为8 mm,主流道随着冷却剂进程逐渐减小至2 mm,便于冷却剂流向分支流道,分支流道宽度为6 mm,共有12个分支,各分支流道的宽度逐步递增,且与主流道呈一定的倾角,出口管道宽度为8 mm,与边界距离为3 mm。

分支管道宽度递增的表达式为

$$d = d_n - d_{n-1} (2 \leq n \leq 12) \quad (1)$$

本文中所使用的电池为ATL公司生产的方形磷酸铁锂电池,电池主要参数如下表所示。

1.2 控制方程

方形锂离子电池的热传导控制方程

$$\rho c_p \frac{dT}{d\tau} = \lambda_x \frac{d^2 T}{dx^2} + \lambda_y \frac{d^2 T}{dy^2} + \lambda_z \frac{d^2 T}{dz^2} + q \quad (2)$$

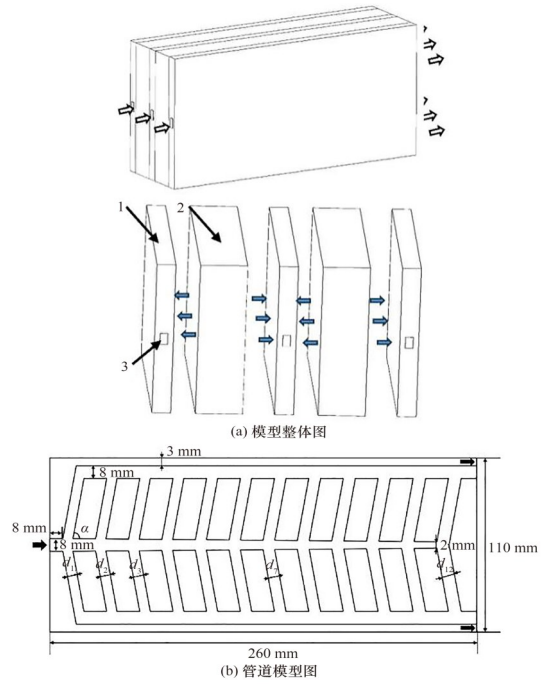


图1 模型三维图

Figure 1 Model 3D diagram

表1 锂离子电池参数

Table 1 Lithium-ion battery parameters

属性	参数
额定容量/Ah	50
标称电压/V	3.2
内阻/mΩ	≤2
尺寸	110 mm×25 mm×260 mm

式中, c_p 和 ρ 分别表示电池单元的比热容和密度; λ_x 、 λ_y 和 λ_z 分别表示x,y和z方向的导热系数; q 为电池内部单位体积的电池生热速率。

生热速率 q 是根据通过Bernardi的电池生热速率模型^[23]计算获得。表达式见式(4):

$$q = \left[(U_{oc} - V) - IT \frac{dU_{oc}}{dT} \right] / V_b \quad (3)$$

式中, U_{oc} 、 V 分别代表开路电压和电池的工作电压; T 代表电池的温度; I 分别代表电池的电流, V_b 表示单个电池的体积。 $\frac{dU_{oc}}{dT}$ 表示电池单元的熵热系数,表示电池的电压随温度的变化关系。

在本模型中选用液态金属作冷却剂,冷却剂的质量、动量、能量守恒方程见式(4)–(6)。

连续性方程

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (4)$$

动量方程

$$\rho_c \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (5)$$

能量方程

$$\rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v} T_c) = \nabla \cdot \left(\frac{k_c}{c_c} \nabla T_c \right) \quad (6)$$

式中, $\vec{v}$ 代表流体的速度矢量; μ 代表冷却剂的动态粘度; ρ_c 代表冷却剂的密度; k_c 表示冷却剂的导热系数, c_c 表示冷却剂的比热容和 ρ_c 表示冷却剂的密度。

冷却剂的雷诺数见式(7):

$$R_e = \frac{\rho_c v D}{\mu} \quad (7)$$

式中, D 表示冷却通道的水力直径。其计算方式如式(8):

$$D = \frac{2AB}{A+B} \quad (8)$$

式中, A 代表矩形管道入口的长度, B 代表矩形管道入口的宽度。

湍流强度经验计算公式^[33]如下:

$$I = 0.16 \times Re^{-0.125} \quad (9)$$

每块液冷板内冷却液进出口压降用式(10)表示:

$$\Delta P_{\max} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \quad (10)$$

式中, P_{in} 表示冷却剂入口表面的加权平均总压, P_{out} 表示冷却剂出口表面的加权平均总压。

为了降低问题的复杂程度,忽略电池正负极产生的热量,采用以下流动条件,对仿真模型做出以下假设以简化模型:

1) 只考虑热传递和对流,忽略热辐射对电池组散热的影响;

2) 充放电过程中电池内部电流密度及产热分布均匀;

3) 锂离子电池的相关热物性参数不随电池的温度发生变化;

4) 将电池视为均匀分布实体,同一方向的传热相同。

1.3 网格划分

进行有限元计算,需要对模型进行网格划分,电池组采用自动网格划分,采用 Fluent meshing 的自带的体网格填充法 polyhedra 进行多面体网格划分,

图2为网格独立性验证图。在生成网格时,网格的数量较少,计算精度不高,网格数量越多,计算时间越长,但过高的网格数量会造成计算资源的浪费。本文选用网格数量为 599 363 进行数值模拟计算,划分完成后,共得到 2 315 346 个节点,网格质量较好。图3显示了系统整体的网格划分。

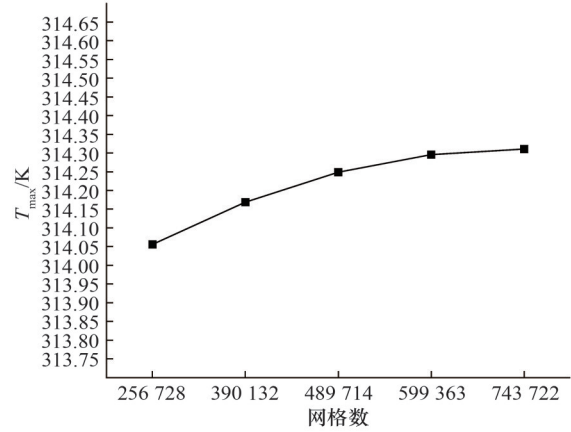


图2 网格独立性验证

Figure 2 Grid independence verification

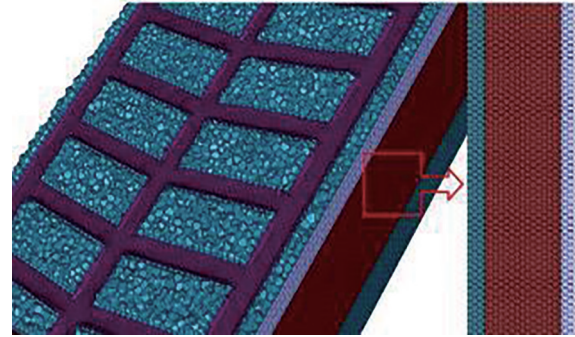


图3 系统整体网格图

Figure 3 Overall grid diagram of the system

1.4 材料参数

表2是电池、铝制冷却板、冷却剂液态金属(镓)的材料热物理参数。

1.5 边界条件

在 Solidworks 中进行建模, Fluent 进行网格划分和数值模拟分析, Tecplot 中进行后处理结果分析。对雷诺数小于 2 300 的情况采用层流模型, 对雷诺数大于 2 300 的情况采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。在边界条件设置中, 流道入口定义为速度入口, 出口定义为压力出口, 出口压力 101 325 Pa, 流道壁面定义为无滑移壁面。不同部件之间的接触面均定义为耦合

表 2 电池、冷却板、和液态金属(镓)的热物理参数表

Table 2 Thermophysical parameters for batteries, cooling plates, and liquid metals (gallium)

材料	属性			
	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
电池	8 000	950	$\lambda_x = 2.1$ $\lambda_y = \lambda_z = 0.8$	/
铝	2 719	871	202.4	/
镓	6 093	410	29.4	2.008×10^{-3}

壁面。暴露的外部侧面定义为自由对流边界条件,传热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。入口和出口的温度定义为 300 K 。锂电池放电速率为 5 C 。采用有限体积法离散控制方程,压力与速度耦合方法采用 Simple 算法,压力、动量和能量离散方法采用二阶迎风格式,松弛因子采用默认值,时间步长为 0.1 s ,总步数为 $7\ 200$ 。利用 Fluent 软件对锂离子电池组的散热仿真计算。

2 结果与讨论

2.1 单因素对电池组冷却系统的影响

本节研究了各单因素(冷却剂流速 v 、管道高度 h 、流道分支倾角 θ 和分支递增宽度 d)对液态金属冷却系统的性能影响,默认冷却剂流速 v 为 0.2 m/s 、管道高度 h 为 4 mm 、流道分支倾角 θ 为 80° 、分支递增宽度 d 为 0 mm ,各小节只改变所研究的单一变量,其他值默认不变。

2.1.1 冷却剂入口速度对电池组冷却系统的影响

冷却剂入口流速对电池组的散热性能有着较大的影响,本节分析了 5 种不同入口流速($v_{in}=0.1 \text{ m/s}$ 、 0.2 m/s 、 0.3 m/s 、 0.4 m/s 和 0.5 m/s)对电池组冷却性能的影响。图 4 显示了不同入口速度下电池组的最高温度和最大温差的变化曲线图,图 5 显示了不同入口速度下液态金属冷却系统的压降变化图。

可以看出,随着冷却剂流速的增加, $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 随着冷却剂流速的增大而降低,液冷板的压降随冷却剂流速的增大而增大。当冷却剂流速从 0.1 m/s 增大到 0.3 m/s 时,最大温度 $T_{\max}$ 和温差 $\Delta T_{\max}$ 随流速的增大显著降低, $T_{\max}$ 从 314.31 K 降低到 313.09 K ,降低了 1.22 K ; $\Delta T_{\max}$ 从 12.68 K 降低到 11.8 K ,降低了

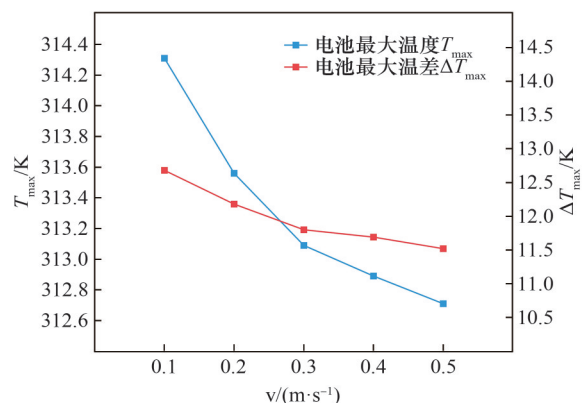


图 4 不同入口速度下电池组的最高温度和最大温差变化

Figure 4 Maximum temperature and maximum temperature difference curves of the battery pack at different inlet speeds

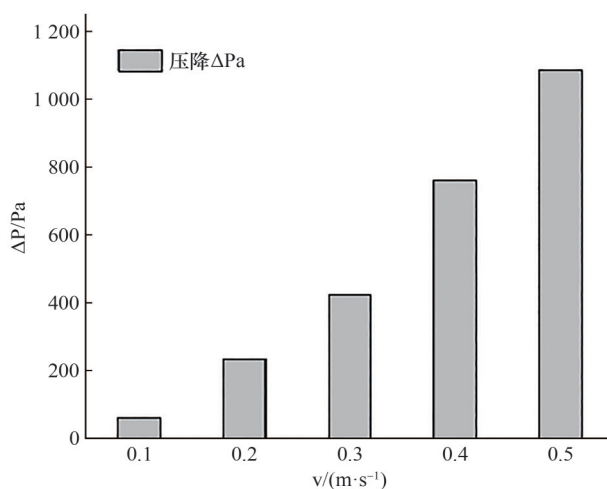


图 5 不同入口速度下液态金属冷却系统的压降变化图

Figure 5 Pressure drop variation diagram of liquid metal cooling system at different inlet velocities

0.88 K ; 压降 $\Delta P_{\max}$ 上升缓慢,从 63.5 Pa 上升到 424.54 Pa ,上升了 361.04 Pa 。当流速从 0.3 m/s 上升到 0.5 m/s 时, $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 随着冷却剂流速的增大而降低缓慢, $\Delta P_{\max}$ 随着冷却剂流速的增大而快速增大。这是因为流速的增大会增加 $Nusselt$ 数,从而增强了水流与冷板的传热系数。

2.1.2 冷却管道高度对电池组冷却系统的影响

冷却管道高度对电池组的散热性能有着一定的影响。增大管道高度,一方面可以增加单位时间内的流量;另一方面,可以使冷却剂吸收更多的热量,增大冷却系统的散热能力。本节分析了 4 种不同管道高度($h=3 \text{ mm}$ 、 4 mm 、 5 mm 和 6 mm)对电池

组冷却性能的影响。图 6 显示了不同冷却管道高度下电池组的最高温度和最大温差的变化曲线图,图 7 显示了不同冷却管道高度下液态金属冷却系统的压降变化图。

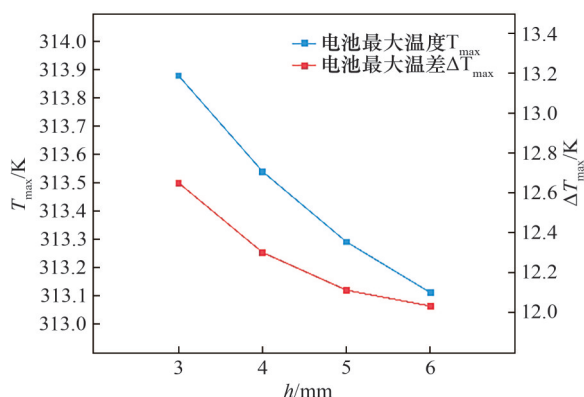


图 6 同流道高度下电池组的最高温度和最大温差变化曲线

Figure 6 Maximum temperature and maximum temperature difference curves of the battery pack at different runner heights

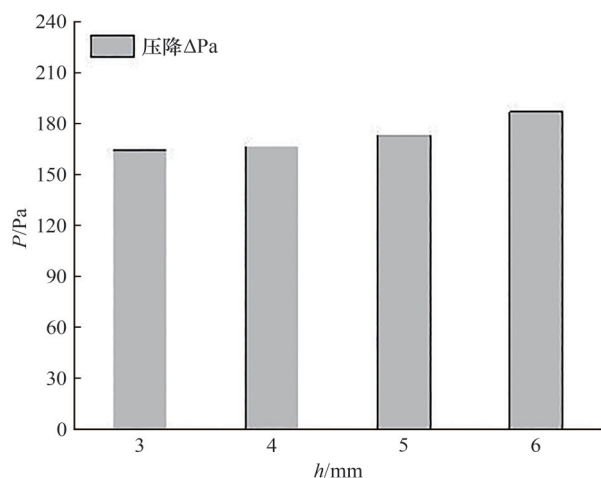


图 7 不同流道高度下液态金属冷却系统的压降变化图

Figure 7 Pressure drop variation of liquid metal cooling system at different channel heights

可以看出,随着冷却管道宽度的增加,最大温度 $T_{\max}$ 和温差 $\Delta T_{\max}$ 随着冷却管道高度的增大而减小,液冷板的压降随冷却管道高度的增大而略微增大。当冷却管道高度从 3 mm 增大到 4 mm 时, $T_{\max}$ 从 313.88 K 降低到 313.54 K,降低了 0.34 K; $\Delta T_{\max}$ 从 12.65 K 降低到 12.3 K,降低了 0.35 K。当冷

却管道高度从 4 mm 增大到 5 mm 时, $T_{\max}$ 从 313.54 K 降低到 313.29 K,降低了 0.25 K; $\Delta T_{\max}$ 从 12.3 K 降低到 12.11 K,降低了 0.19 K。当冷却管道高度从 5 mm 增大到 6 mm 时, $T_{\max}$ 从 313.29 K 降低到 313.11 K,降低了 0.18 K; $\Delta T_{\max}$ 从 12.11 K 降低到 12.03 K,降低了 0.08 K。在冷却管道高度不断增大的情况下,压降 $\Delta P_{\max}$ 的增大则比较缓慢。当冷却管道高度由 3 mm 增大到 5 mm 时,电池热管理系统最高温度 $T_{\max}$ 和最大温差 $\Delta T_{\max}$ 降低明显,而压降 $\Delta P_{\max}$ 上升的则较为缓慢;而当冷却管道高度由 5 mm 上升到 6 mm 时, $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 的下降变得缓慢,而 $\Delta P_{\max}$ 加快升高。

2.1.3 流道分支倾角对电池组冷却系统的影响

流道分支倾角对电池组的散热性能同样也有着一定的影响。增大流道分支倾角,可以增大散热面积,但同时也会使管道的压降得到升高。本节分析了 5 种不同流道分支倾角 ($\alpha=70^\circ$ 、 75° 、 80° 、 85° 和 90°) 对电池组冷却性能的影响。图 8 显示了不同流道分支倾角下电池组的最高温度和最大温差变化曲线图,图 10 显示了不同流道分支倾角下液态金属冷却系统的压降变化图。随着流道倾角的增大,最大温度 $\Delta T_{\max}$ 会略微降低;当 α 由 70° 逐渐增大到 80° 时, $\Delta T_{\max}$ 的下降较为缓慢,而当 α 由 80° 逐渐增大到 90° 时, $\Delta T_{\max}$ 的下降变快。在流道倾角 α 不断增大的过程中,压降 $\Delta P_{\max}$ 呈线性增加。这是因为随着分支流道倾角不断增大的过程中,回路的散热面积增大,降低了系统的温差;但随着流道倾角的不断增加,冷却剂的流向发生改变,故系统的压降也不断的增大。

2.1.4 分支流道递增宽度对电池组冷却系统的影响

分支流道递增宽度对电池组的散热性能有着一定的影响。增大管道高度,一方面可以增加单位时间内的流量;另一方面,可以使冷却剂吸收更多的热量,增大冷却系统的散热能力。本节分析了 4 种不同管道高度 ($d=0$ mm、0.05 mm、0.1 mm、0.15 mm 和 0.2 mm) 对电池组冷却性能的影响。图 10 显示了不同分支流道递增宽度下电池组的最高温度和最大温差的变化曲线图,图 11 显示了不同分支流道递增宽度下液态金属冷却系统的压降变化图。随着管道宽度的递增,对于模型的中后段散热能力得到增强,冷却剂流量增大,使得温度会降低,但增

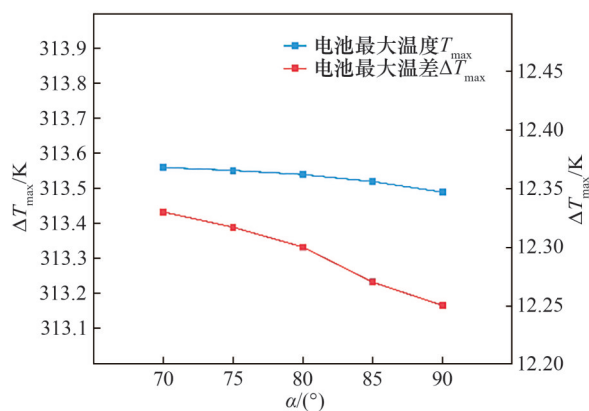


图8 不同流道分支倾角下电池组的最高温度和最大温差变化曲线

Figure 8 Maximum temperature and maximum temperature difference curves of battery pack under different flow channel branch angles

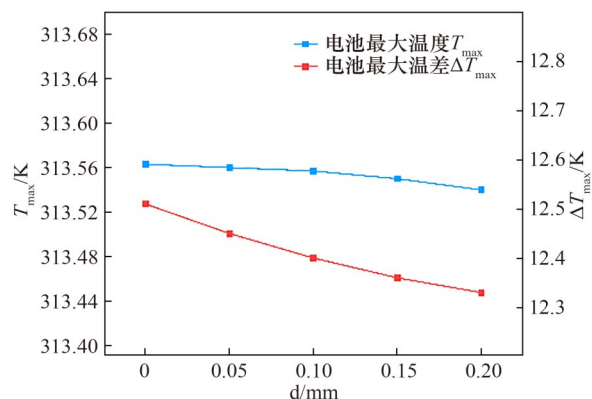


图10 不同分支流道递增宽度下电池组的最高温度和最大温差变化曲线

Figure 10 The maximum temperature and maximum temperature difference curve of battery pack under the increasing width of different branch channels

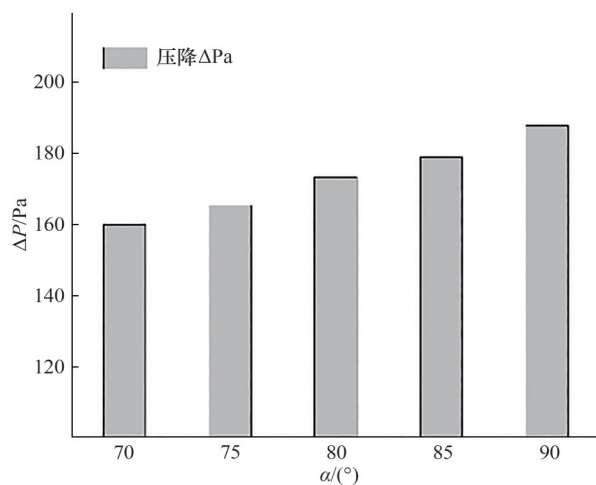


图9 不同流道分支倾角下液态金属冷却系统的压降变化图

Figure 9 Pressure drop variation of liquid metal cooling system under different channel branch angles

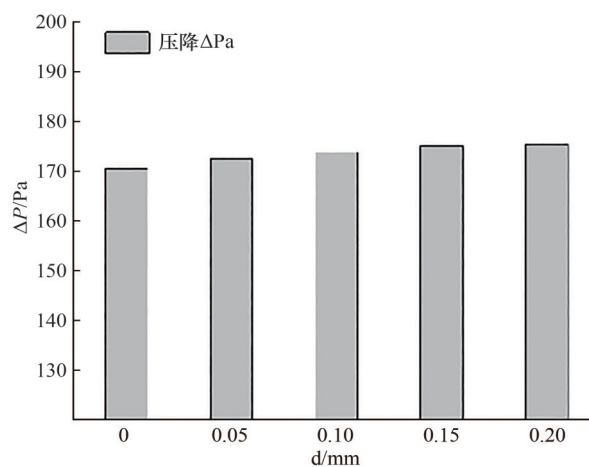


图11 不同分支流道递增宽度下液态金属冷却系统的压降变化图

Figure 11 Pressure drop variation diagram of liquid metal cooling system with increasing width of different branch channels

大流量,也会使系统的压强升高。

2.2 正交设计及极差分析

2.2.1 正交实验设计

以上分析可以看出,随着目标因素参数的改变,最大温度 $T_{\max}$ 和温差 $\Delta T_{\max}$ 的改变往往与压降 $\Delta P_{\max}$ 的改变方向不尽相同,且随着目标因素参数的改变,各个目标 $T_{\max}$ 、 $\Delta T_{\max}$ 和 $\Delta P_{\max}$ 的变化幅度也不尽相同。采用正交实验法可以在减少仿真量的前提下尽可能准确的获得整体数据。采用 $L_{16}(4^4)$ 正交表进行四因素四水平检验。选取冷却剂流速 v ,

通道递增宽度 d ,通道倾斜角度 θ 和通道高度 h 作为影响因素,每个影响因素设置4个级别,以电池最高温度 $T_{\max}$ 、电池最大温差 $\Delta T_{\max}$ 和系统最大压降 $\Delta P_{\max}$ 作为冷却性能的评价指标。下表3是正交因子的水平表用来展示各个因素的仿真数据。表4是设计的16种正交实验方案及其结果。

2.2.2 极差法分析

采用极差法对正交实验数据进行分析,分析原理如下公式(11)、(12):

表 3 正交因子水平表

Table 3 Horizontal table of orthogonal factors

编号	因素			
	$v/(m \cdot s^{-1})$	d/m	$\theta/(^{\circ})$	h/m
1	0.2	0.05	60	3
2	0.3	0.1	70	4
3	0.4	0.15	80	5
4	0.5	0.2	90	6

表 4 正交设计方案及结果

Table 4 Orthogonal design scheme and results

编号	因素				结果		
	$v/(m \cdot s^{-1})$	d/m	$\theta/(^{\circ})$	h/m	$T_{\max}/K$	$\Delta T_{\max}/K$	$\Delta P_{\max}/kPa$
1	0.2	0.05	60	3	313.93	12.53	0.28
2	0.2	0.1	70	4	313.56	12.25	0.22
3	0.2	0.15	80	5	313.3	12.07	0.21
4	0.2	0.2	90	6	313.14	11.88	0.2
5	0.3	0.05	70	5	312.92	11.71	0.4
6	0.3	0.1	60	6	312.82	11.63	0.33
7	0.3	0.15	90	3	313.45	12.12	0.63
8	0.3	0.2	80	4	313.14	11.88	0.46
9	0.4	0.05	80	6	312.61	11.49	0.67
10	0.4	0.1	90	5	312.73	11.53	0.74
11	0.4	0.15	60	4	312.93	11.63	0.67
12	0.4	0.2	70	3	313.18	11.93	0.9
13	0.5	0.05	90	4	312.74	11.59	1.18
14	0.5	0.1	80	3	312.95	11.72	1.39
15	0.5	0.15	70	6	312.51	11.35	0.86
16	0.5	0.2	60	5	313.63	12.46	0.94

$$k_{ij} = \sum_{j=1} y_{ij} \quad (11)$$

$$\varphi = \max(k_{ij}) - \min(k_{ij}) \quad (12)$$

式中, i 是仿真因素, j 是仿真编号, k_{ij} 是仿真编号 j 在因素 i 对应的仿真结果, y_{ij} 是仿真结果对应下 i 因素的 j 编号所对应的值。 k_{ij} 是仿真结果的因素 i 对应下不同编号 j 的仿真结果 y_{ij} 的总和。每个因素的最优水平和最优组合可以确定从 k_{ij} 和 φ 的值来确定。 φ 值越大, 则表明该因素对结果的影响越大。

采用上述方法对 $T_{\max}$ 、 $\Delta T_{\max}$ 和 $\Delta P_{\max}$ 进行极差分析, 如表 5 所示。

表 5 极差法分析结果

Table 5 The results were analyzed by range method

评价指标		因素			
		$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	d/m	$\theta(^{\circ})$	h/m
$T_{\max}/\text{K}$	k_{i1}	1 254	1 252.2	1 253.3	1 254
	k_{i2}	1 252	1 252.1	1 252.2	1 252
	k_{i3}	1 251	1 252.2	1 252	1 253
	k_{i4}	1 252	1 253.1	1 252.1	1 251
	$k_{i1}/4$	313.48	313.05	313.33	313.38
	$k_{i2}/4$	313.08	313.02	313.04	313.09
	$k_{i3}/4$	312.86	313.05	313	313.15
	$k_{i4}/4$	312.96	313.27	313.02	312.8
	φ	0.62	0.25	0.33	0.58
$\Delta T_{\max}/\text{K}$	k_{i1}	48.73	47.32	48.25	48.3
	k_{i2}	47.34	47.13	47.24	47.35
	k_{i3}	46.58	47.17	47.16	47.77
	k_{i4}	47.12	48.15	47.12	46.35
	$k_{i1}/4$	12.18	11.83	12.06	12.08
	$k_{i2}/4$	11.84	11.78	11.81	11.84
	$k_{i3}/4$	11.65	11.79	11.79	11.94
	$k_{i4}/4$	11.78	12.04	11.78	11.59
	φ	0.53	0.26	0.28	0.49
$\Delta P_{\max}/(\text{kPa})$	k_{i1}	0.91	2.53	2.22	3.2
	k_{i2}	1.82	2.68	2.38	2.53
	k_{i3}	2.98	2.37	2.73	2.29
	k_{i4}	4.37	2.5	2.75	2.06
	$k_{i1}/4$	0.23	0.63	0.56	0.8
	$k_{i2}/4$	0.46	0.67	0.6	0.63
	$k_{i3}/4$	0.75	0.59	0.68	0.57
	$k_{i4}/4$	1.09	0.63	0.69	0.52
	φ	0.86	0.08	0.13	0.28

由上表可以看出, 各因素对于目标的影响程度不同。对于 $T_{\max}$ 而言, 各影响因素影响程度的顺序: $v > h > \theta > d$, 最优组合方案为 $v_3 d_2 \theta_3 h_4$; 对于 $\Delta T_{\max}$ 而言, 各影响因素影响程度的顺序: $v > h > \theta > d$, 最优组合方案为 $v_3 d_2 \theta_4 h_4$; 对于 $\Delta P_{\max}$ 而言, 各影响因素影响程度的顺序: $v > h > \theta > d$, 最优组合方案为 $v_1 d_3 \theta_1 h_4$ 。

2.3 基于 NSGA-II 算法的多目标优化

2.3.1 多因素曲线拟合

针对提出的 4 个影响因素, 采用 NSGA-II 算法

的多目标优化,进而选择最优结构。基于最小二乘法原理建立基于各变量的目标函数值,为了便于计算,设定冷却剂流速 v 为 x_1 、通道递增宽度 d 为 x_2 、通道倾斜角度 θ 为 x_3 、通道高度 h 为 x_4 ,电池最高温度 $T_{\max}$ 为 y_1 、电池最大温差 $\Delta T_{\max}$ 为 y_2 、系统最大压降 $\Delta P_{\max}$ 为 y_3 ,根据正交实验所设计的16组仿真数据,基于最小二乘法原理,建立基于各影响因素的函数表达式,采用决定系数 R^2 来评估模型的精度, F_1 、 F_2 、 F_3 的 R^2 分别为0.969、0.957、0.992。

$$S_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\bar{y}_i - y_i)^2}{\sum [y_i - \text{mean}(\bar{y}_i)]^2} \quad (13)$$

式中, $\bar{y}_i$ 为预测目标函数值, y_i 为初始目标函数值, N 为样本数。

拟合所得曲线方程为:

$$\begin{aligned} F_1 = & 312.31 - 1.7315x_1 - 0.68581x_2 + \\ & 0.097924x_3 - 0.84518x_4 + 32.286x_1x_2 - \\ & 0.073929x_1x_3 - 0.092857x_1x_4 - 0.42769x_2x_3 + \\ & 2.741x_2x_4 - 0.0053205x_3x_4 + 36.641x_2^2 + \\ & 0.084423x_4^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_2 = & 9.5195 - 2.2328x_1 - 0.91187x_2 + \\ & 0.12633x_3 - 0.72086x_4 + 34.206x_1x_2 - \\ & 0.061214x_1x_3 - 0.21385x_1x_4 - 0.47404x_2x_3 + \\ & 2.7282x_2x_4 - 0.0063141x_3x_4 + 41.878x_2^2 + \\ & 0.089135x_4^2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_3 = & -1.5898 + 3.6457x_1 + 0.38567x_2 + \\ & 0.05121x_3 - 0.37376x_4 + 5.41x_1x_2 + \\ & 0.0053891x_1x_3 - 0.47247x_1x_4 - 0.073077x_2x_3 + \\ & 0.62308x_2x_4 - 0.00046154x_3x_4 + 0.42308x_2^2 - \\ & 0.00024327x_3^2 + 0.045769x_4^2 \end{aligned} \quad (16)$$

2.3.2 NSGA-II算法的多目标优化

目标函数优化目标如下:(1) $\min T_{\max}$ 、(2) $\min \Delta T_{\max}$ 、(3) $\min \Delta P_{\max}$,各变量约束如

$$\begin{cases} 0.2 \leq v \leq 0.5, 0.05 \leq d \leq 0.2, \\ 70 \leq \theta \leq 90, 3 \leq h \leq 6. \end{cases} \quad (17)$$

设置参数为:种群规模为50,最大进化代数150,交叉概率为0.8,适应度函数偏差为 1×10^{-4} 。利用NSGA-II得到Pareto最优解集。经过NAGA-II多目标优化的计算,得到如图13的Pareto最优解集分布。

随着 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 的减小, $\Delta P_{\max}$ 也会相应的增

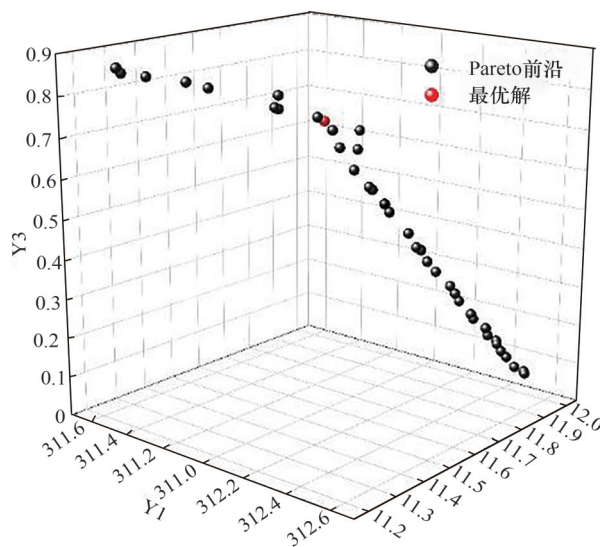


图12 帕累托最优解集

Figure 12 Pareto optimal solution set

大。根据实际情况,选取图13红色点为最优解,当 v 为0.42 m/s, d 为0.13 mm, θ 为87.38°、 h 为5.76 mm时,为该优化模型的最优解。为了验证基于NSGA-II的多目标遗传算法求解的准确性,对其计算出的Pareto最优解和CFD仿真结果进行了对比,得到如下表6的预测与仿真结果对比表。

表6 预测模型与实际仿真模型结果对比图

Table 6 Comparison between the results of the predicted model and the actual simulation model

	$T_{\max}/K$	$\Delta T_{\max}/K$	$\Delta P_{\max}/KPa$
预测值	311.96	11.61	0.727
仿真值	312.66	11.66	0.712
差异/%	0.22	0.43	2.11

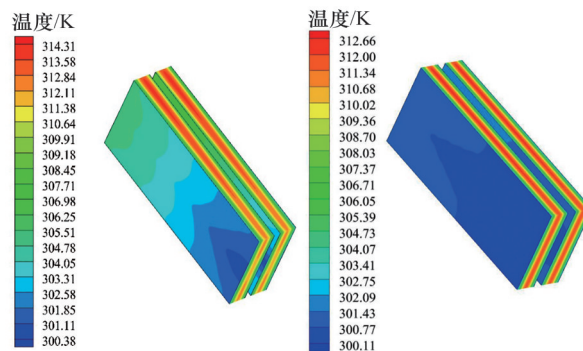


图13 优化前后电池组温度对比图

Figure 13 Comparison of battery pack temperature before and after optimization

通过表 6 的对比,各目标数值的仿真结果与预测值相差不大,说明基于 NSGA-II 的多目标遗传算法优化结果具有较高的准确性。将最优结果的仿真数值与初始冷却条件相比,如图 14 是优化结果与初始结果的温度对比云图。通过对比图可以发现,与初始冷却相比, $T_{\max}$ 降低了 1.65 K, $\Delta T_{\max}$ 降低 1.2 K, $\Delta P_{\max}$ 则相对增大。

3 结论

本文设计了一种新的液冷管道,采用液态金属镓作为锂电池热管理系统的冷却剂,开展了三维数值模拟,分析了冷却剂流速、管道高度、流道分支倾角和分支递增宽度对液态金属冷却系统的性能影响,采用正交设计原理设计并分析了各因素对于目标的影响,并通过非支配排序的遗传算法(NAGA-II)得出最优解集。结论如下:

1)随着冷却剂流速和管道高度的增大,液冷系统的最大温度和温差显著降低,压降则会明显增大;增大分支流道的角度和递增宽度,温度与温差逐渐降低,但趋势并不显著,压降则会升高。

2)经正交实验极差法分析得知,对于 $T_{\max}$ 而言,最优组合方案为 $v_3 d_2 \theta_3 h_4$;对于 $\Delta T_{\max}$ 而言,最优组合方案为 $v_3 d_2 \theta_4 h_4$;对于 $\Delta P_{\max}$ 而言,最优组合方案为 $v_1 d_3 \theta_1 h_4$ 。

3)基于正交实验设计所得到的数据,通过最小二乘法拟合得到各参数对各目标的拟合方程,采用 NAGA-II 优化得到电池参数最优解:当 v 为 0.42 m/s, d 为 0.13 mm, θ 为 87.38°, h 为 5.76 mm 时,该最优解的 $T_{\max}$ 为 312.66 K, $\Delta T_{\max}$ 为 11.66 K, $\Delta P_{\max}$ 为 0.712 kPa。与初始冷却相比, $T_{\max}$ 降低 0.53%, $\Delta T_{\max}$ 降低 8.04%, $\Delta P_{\max}$ 则相对增大。

参考文献:

- [1] 张博,张贺贺,马妍姣. 锂离子电池硬碳负极材料研究进展[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(3):221-236.
ZHANG Bo, ZHANG Hehe, MA Yanjiao. Research progress of hard carbon anode materials for potassium-ion batteries[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(3):221-236.
- [2] DUAN J, ZHAO J, LI X, et al. Modeling and analysis of heat dissipation for liquid cooling Lithium-Ion batteries[J]. Energies, 2021, 14(14):4187.
- [3] PATEL J R, RATHOD M K. Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries[J]. Journal of power sources, 2020, 480: 228820.
- [4] CHEN T, CAI L, WEN X T, et al. Experimental research and energy consumption analysis on the economic performance of a hybrid-power gas engine heat pump with LiFePO₄ battery[J]. Energy, 2021, 214:118913.
- [5] 宋旭,孙楠楠,曹恒超,等. 基于并联蛇形流道的动力电池冷媒直冷热管理系统研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(8):2726-2736.
SONG Xu, SUN Nannan, CAO Hengchao, et al. Research on a power battery thermal management system using direct refrigerant cooling with parallel serpentine flow paths[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(8):2726-2736.
- [6] COSLEY M R. Battery thermal management system[C]. Telecommunications Energy Conference IEEE, 2004: 38-45.
- [7] 王世学,张宁,高明. 动力汽车用锂电池热管理系统仿真分析[J]. 热科学与技术, 2016, 15(1):40-45.
WANG Shixue, ZHANG Ning, GAO Ming. Simulation analysis of lithium-ion battery thermal management in EV[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2016, 15(1):40-45.
- [8] 李锋,郎文嵩,焦志浩,等. 电池热管理系统的应用与试验研究[J]. 重型汽车, 2024, (2):31-32.
- [9] 黄恒,李洋,黄正,等. 基于双向加热膜的软包电池低温热管理研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(12):3332-3340.
HUANG Heng, LI Yang, HUANG Zheng, et al. Research on low-temperature thermal management of pack-battery based on bi-directional heating film[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(12):3332-3340.
- [10] ZHAO G, WANG X, NEGNEVITSKY M, et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219:119626.
- [11] OSMANI K, ALKHEDHER M, RAMADAN M, et al. Recent progress in the thermal management of lithium-ion batteries[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 136024.
- [12] 李哲,张华,盛雷. 新能源汽车浸没式锂离子电池冷却技术研究进展[J]. 制冷学报, 2024, 45(3):38-49.
LI Zhe, ZHANG Hua, SHENG Lei. Research progress of immersed cooling technology for lithium-ion batteries in new energy vehicles[J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(3):38-49.
- [13] 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(2):187-198.
CHEN Suhua, BAI Ying. 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(2):187-198.
- [14] XU X M, SUN X D, HU D H, et al. Research on heat dissipation performance and flow characteristics of air-cooled battery pack[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(11): 3658-3671.
- [15] ZHI M, FAN R, YANG X, et al. Recent research progress on

- phase change materials for thermal management of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45:103694.
- [16] 杨寒雪, 张冠华, 赵长颖, 等. 基于复合相变材料的锂电池热管理系统研究进展[J]. *能源科技*, 2023, 21(1):56-61.
YANG Hanxue, ZHANG Guanhua, ZHAO Changying, et al. Research on the progress of thermal management system for lithium battery based on composite phase change materials[J]. *Energy Science and Technology*, 2023, 21(1):56-61.
- [17] THAWKAR V, DHOBLE A S. A review of thermal management methods for electric vehicle batteries based on heat pipes and PCM[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(2):90.
- [18] ZHANG X H, LI Z, LUO L G, et al. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles[J]. *Energy*, 2022, 238:121652.
- [19] SHEN X, CAI T, HE C, et al. Thermal analysis of modified Z-shaped air-cooled battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58:106356.
- [20] 唐浩, 杨国华, 李卿. 风光互补发电系统低碳效益建模研究[J]. *电力科技与环保*, 2016, 32(5):47-50.
TANG Hao, YANG Guohua, LI Qing. Modeling of wind-solar hybrid generation system low-carbon benefits[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2016, 32(5):47-50.
- [21] ZHANG W, LIANG Z, LING G, et al. Influence of phase change material dosage on the heat dissipation performance of the battery thermal management system[J]. *The Journal of Energy Storage*, 2021, 41:102849.
- [22] ZHANG Z, WEI K. Experimental and numerical study of a passive thermal management system using flat heat pipes for lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 166:114660.
- [23] LIU F, CHEN Y, QIN W, et al. Optimal design of liquid cooling structure with bionic leaf vein branch channel for power battery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218:119283.
- [24] 安风霞, 杨玉, 吴帅帅, 等. 印刷电路板换热器芯体尺寸多目标优化研究[J]. *电力科技与环保*, 2023, 39(4):345-352.
AN Fengxia, YANG Yu, WU Shuaishuai, et al. Multi-objective optimization of the core size of a printed circuit heat exchanger[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2023, 39(4):345-352.
- [25] 汪朝晖, 熊肖, 高全杰, 等. 基于仿蜘蛛网流道结构设计的圆柱形锂电池热管理系统性能研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(22):150-162.
WANG Zhaohui, XIONG Xiao, GAO Quanjie, et al. Performance study of cylindrical lithium battery thermal management system based on the design of spider web-like flow channel structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(22):150-162.
- [26] DENG Y, JIANG Y, LIU J. Low-melting-point liquid metal convective heat transfer: A review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193:117021.
- [27] MUHAMMAD A, SELVAKUMAR D, IRANZO A, et al. Comparison of pressure drop and heat transfer performance for liquid metal cooled mini-channel with different coolants and heat sink materials[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 141:289-300.
- [28] LIU Y, CHEN H F, ZHANG H W, et al. Heat transfer performance of lotus-type porous copper heat sink with liquid GaInSn coolant[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 80:605-613.
- [29] 陈吉翔, 殷戈, 陈国庆, 等. 铅铋合金/硅酸锆颗粒双介质相变储热性能及演化规律数值研究[J]. *电力科技与环保*, 2023, 39(5):457-464.
CHENG Jixiang, YIN Ge, CHENG Guoqing, et al. Numerical study on the heat storage performance and evolution law of lead-bismuth alloy/zirconium silicate particles dual-media phase change[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2023, 39(5):457-464.
- [30] YANG X H, TAN S C, LIU J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal[J]. *Energy conversion and management*, 2016, 117: 577-585.
- [31] DENG Yueguang, ZHANG Manman, JIANG Yi, et al. Two-stage multichannel liquid-metal cooling system for thermal management of high-heat-flux-density chip array[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 259:115591.
- [32] LIU H L, AN X K, WANG C S. Heat transfer performance of T-Y type micro-channel heat sink with liquid GaInSn coolant[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 120:203-219.
- [33] WANG Ningbo, LI Congbo, LI Wei, et al. Heat dissipation optimization for a serpentine liquid cooling battery thermal management system: An application of surrogate assisted approach [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021(40):102771.



第一作者简介: 杨利伟(1999—), 男, 硕士, 研究方向为电池/电站热管理研究, 1044375692@qq.com;



马凯伦(2001—), 男, 硕士, 研究方向为电池/电站储能热管理研究, 1157634308@qq.com;



通信作者简介: 周小明(1981—), 男, 副教授, 主要从事高效换热和储能技术、热管理技术等方面的研究, xmzhou@hhu.edu.cn.

(编辑 沈凡卉)