

锂离子电池同心结构液冷板冷却性能分析及结构优化

杨涵, 刘宁豪, 高强, 杨广丰

(长安大学汽车学院, 710018, 西安)

摘要: 针对锂离子电池在工作过程中产生大量热量,从而导致温度和温差升高,进而威胁电池的性能、使用寿命和安全性的问题,提出了一种新型同心十边形结构液冷板设计方案。该方案旨在通过优化液冷板的冷却性能,有效降低电池的工作温度和温差,从而延长电池的使用寿命并提升其安全性。通过数值仿真,研究了不同结构液冷板的冷却性能,采用熵权法分析的结果表明,同心十边形液冷板在综合冷却性能方面表现最佳。为了进一步提升液冷板的冷却效果,通过单因子分析法研究了环形流道的宽度、深度、液冷板壁厚和圆心距等结构因素对电池组冷却性能的影响。采用正交试验法筛选出了3个对液冷板冷却性能影响最大的结构因素作为设计变量。以电池组的最高温度、最大温差和平均温度作为目标函数,建立设计变量与目标函数之间的响应面代理模型,并采用NSGA-II算法对液冷板结构因素进行了优化。利用熵权法确定了帕累托前沿最优解,改善其他研究在选择最优解时受主观影响的缺陷。仿真结果表明:相比于初始结构,优化后的液冷板电池组的最高温度、最大温差和平均温度分别下降了1.39、0.42、1.15℃,并且温度均匀性得到了显著改善。通过在不同放电倍率和环境温度下的验证,证明了优化结构在多种工况下的鲁棒性。该研究结果可为液冷式锂电池冷却结构的设计与优化提供有效的理论依据和实践参考。

关键词: 锂离子电池;同心十边形液冷板;正交试验;NSGA-II算法;熵权法

中图分类号: TM912.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202503016 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0172-17

Cooling Performance Analysis and Structural Optimization of Concentric Structure Liquid Cooling Plate for Lithium-Ion Batteries

YANG Han, LIU Ninghao, GAO Qiang, YANG Guangfeng

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: In response to the issue of excessive heat generation during the operation of lithium-ion batteries, leading to increased temperature differentials and posing threats to the battery's performance, lifespan, and safety, a novel concentric decagonal structure liquid cooling plate design scheme is proposed. This scheme aims to optimize the cooling performance of the liquid cooling plate to effectively reduce the operating temperature and temperature differentials of the battery, thereby extending the battery's lifespan and enhancing its safety. Through numerical simulations, the cooling performance of different structural liquid cooling plates is investigated. The results, analyzed using the entropy weight method, indicate that the concentric decagonal

收稿日期: 2024-08-26。 作者简介: 杨涵(2000—),男,硕士生;高强(通信作者),男,教授,硕士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878066);陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-530)。

网络出版时间: 2024-11-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20241129.1053.002>

liquid cooling plate exhibits the best overall cooling performance. To further enhance the cooling effectiveness of the liquid cooling plate, the influence of structural factors such as the width, depth, wall thickness, and center distance of the annular flow channel on the cooling performance of the battery pack is explored using a single-factor analysis method. Three structural factors that have the greatest impact on the cooling performance of the liquid cooling plate are selected as design variables through orthogonal experimental design. Using the maximum temperature, maximum temperature differential, and average temperature of the battery pack as objective functions, a response surface surrogate model is established between the design variables and objective functions. The NSGA-II algorithm is employed to optimize the structural factors of the liquid cooling plate. The Pareto optimal solution is determined using the entropy weight method to improve the deficiency of subjective influence in selecting the optimal solution in other studies. Simulation results show that compared to the initial structure, the optimized liquid cooling plate reduces the maximum temperature, maximum temperature differential, and average temperature of the battery pack by 1.39, 0.42, and 1.15 °C, respectively, with significant improvement in temperature uniformity. Finally, validation under different discharge rates and environmental temperatures demonstrates the robustness of the optimized structure under various operating conditions. These research findings provide effective theoretical basis and practical references for the design and optimization of liquid-cooled lithium-ion battery cooling structures.

Keywords: lithium-ion batteries; concentric decagon liquid cooling plate; orthogonal test; NSGA-II algorithm; entropy weight method

近年来,为应对全球能源短缺和环境污染问题,电动汽车正逐步取代传统燃油车,成为未来汽车发展的主要趋势^[1]。锂电池因其高能量密度、长循环寿命、低自放电率以及无记忆效应等优点,已成为众多电动汽车的主要动力来源^[2-3]。锂电池的工作温度对其性能和寿命有显著影响,因此必须在适宜的温度范围内工作。理想的工作温度范围为 20~40 °C,并且电池之间的温差应控制在 5 °C 以内^[4]。若温度超过锂电池的最高安全值,可能会引发热失控、起火或爆炸等危险情况^[5],不仅对安全构成威胁,还会增加额外的成本。因此,引入电池热管理系统(BTMS)以维持电池组的温度在安全范围内,并确保温度分布均匀是十分必要的。

BTMS 中的冷却技术依据传热介质的不同,可以分为液体冷却^[6-7]、空气冷却^[8-9]、热管冷却^[10-11]、相变材料(PCM)^[12-13]以及这些方法的组合^[14]。过去,风冷因其结构简单、成本低廉和轻便而广泛用于小型汽车。然而,随着电动汽车电池能量密度及充放电倍率的提升,空气冷却已无法满足极端工况下的散热需求^[15]。尽管 PCM 能够有效吸收电池产生的热量,但由于其高成本和较大的质量,尚未得到广泛应用。热管冷却系统能较好地保持电池组温度均匀性,但需要其他冷却方式来完成冷凝部分,导致系

统结构较为复杂,限制了其发展^[16]。相较于风冷,液体因其较高的比定压热容和导热系数,在相同流量条件下,提供了更优的冷却性能,因此更适合当前电动汽车在高倍率放电下的冷却需求^[17]。液体冷却分为直接冷却和间接冷却。直接冷却的特点是电池被浸入不导电的流体中,从而与电池直接接触^[18]。直接冷却具有良好的冷却性能,但由于需要与电池表面直接接触且冷却液黏度较高,这要求使用低泄漏密封和高功率输出泵,从而增加了其实际应用的难度^[19]。相比之下,间接冷却采用基于液冷板的方法,电池通过热界面材料与液冷板接触^[20]。综上所述,考虑到电池能量密度、使用成本和安全性等因素,间接液冷方式已成为目前最广泛应用的电池热管理系统^[21]。

近年来,研究人员对液冷板的布置^[22]和冷却通道的设计进行了广泛研究^[23]。Li 等^[24]比较了单通道、微通道和 S 形通道布局对 BTMS 的效果,并评估了这 3 种液冷板的性能。研究表明,电池组两侧布置两片液冷板冷却效果最佳。刘显茜等^[25]设计了一款蜘蛛网状流道液冷板,采用数值方法研究了流道夹角、流道槽深、冷板壁厚和冷却液质量流量对锂离子电池冷却性能的影响。杨涵等^[26]设计了一种双迷宫流道液冷板,利用数值模拟将双迷宫

液冷板和传统蛇形液冷板冷却性能进行对比,以电池组的最高温度和最大温差为目标函数,建立液冷板结构参数与目标函数之间的代理模型,采用 NSGA-II 遗传算法对液冷板结构参数进行优化,优化后的结构使电池组最大温差降低了 29.1%,电池组的温度均温性更好。汪朝晖等^[27]设计了一种含仿生流道结构的电池热管理系统,应用于圆柱形锂离子电池模组,研究不同流道参数和进口速度对冷却性能的影响。研究表明,进口速度为 0.4 g/s 时最佳结构参数能保持电池的最高温度、最大温差和压降分别为 302.972 ℃、3.858 ℃和 22.750 Pa。Liu 等^[28]把交叉通道引入到传统蛇形液冷板中,研究了交叉数量、交叉宽度以及 V 型交叉蛇形通道等因素对热特性的影响。交叉数为 7、宽度为 2.0 mm、角度为 45°时可获得最佳冷却性能。Monika 等^[4]以系统压降和温度均匀性为性能指标,对恒定通道体积下的蛇形、U 形弯曲、直形、南瓜形、螺旋形和六边形液冷板的性能进行研究,研究结果表明:蛇形和六边形液冷板可以显著提高温度均匀性,而南瓜形液冷板具有更低的系统功耗。Zhao 等^[29]设计了蜂窝通道来增强液冷板和冷却剂之间的热交换面积。综上所述,冷却通道的设计显著影响液冷板的冷却性能。

目前,对间接液冷 BTMS 的改进主要集中在冷却通道设计上,并通过算法对液冷板各结构参数进行优化。然而,现有研究并未系统地分析各结构参数对冷却性能指标的影响强度关系,多种结构参数的代理模型往往导致优化精度不足。此外,现有研究也缺乏对算法参数敏感性分析的探讨。算法参数敏感性分析可以评估不同参数对优化目标及算法性能的影响,从而帮助选择合适的优化参数,并提高算法的效能。

本文设计了一种新型同心十边形冷却通道液冷板,并通过数值模拟比较了同心四边形、六边形、八边形、十边形以及圆形液冷板的冷却性能。研究表明,同心十边形液冷板表现出最佳的冷却效果。为了进一步优化其冷却性能,本文研究了冷却液流向、环形流道数量、环形流道宽度和深度、液冷板壁厚和圆心距等因素对电池组冷却性能的影响。通过正交试验筛选出 3 个主要影响因素作为设计变量,并以电池组的最高温度、最大温差和平均温度为目标函数,建立了设计变量与目标函数之间的响应面模型。优化过程中,采用了 NSGA-II 遗传算法,并结合参数敏感性分析进行优化。通过熵权法确定了最佳解,最后在不同放电倍率和环境温度下验证了优化模型的鲁棒性。

1 模型与计算流体法

1.1 BTMS 几何模型

本文使用如图 1 所示的 BTMS 几何模型,液冷板放置在电池组底部,液冷板及流道示意图如图 2 所示。所选电池为方形磷酸铁锂电池,尺寸为 140 mm×18 mm×65 mm。电池组的尺寸为 140 mm×58 mm×65 mm,为了使电池组被冷却流道完全覆盖,同时考虑空间利用率,设置液冷板的初始尺寸为 140 mm×65 mm×7 mm。其中,主流道宽度为 4 mm,环形流道宽度为主流道宽度一半,流道深度为 3 mm,圆心距为 70 mm,液冷板壁厚为 2 mm。考虑到铝材具有良好的导热性和轻质特性,能够有效提高 BTMS 的散热效率并减轻整体设计质量,因此液冷板的材料选用铝。此外,冷却液选用乙二醇水溶液,因其具备优异的热传导性能、较低的冰点和较高的沸点,可以在较宽的温度范围内保持液态,防止冻结与沸腾。乙二醇还具有良好的抗腐蚀性,可有效保护冷却系统中的金属部件,并且其低黏度有助于提高流动性与热交换效率,从而保证冷却系统的高效稳定运行。因此,乙二醇水溶液被选为冷却液。表 1 提供了单体电池、液冷板和冷却液在 30 ℃下的物理特性。 k_x 、 k_y 、 k_z 分别代表锂电池 x 轴、 y 轴、 z 轴 3 个方向的导热系数。

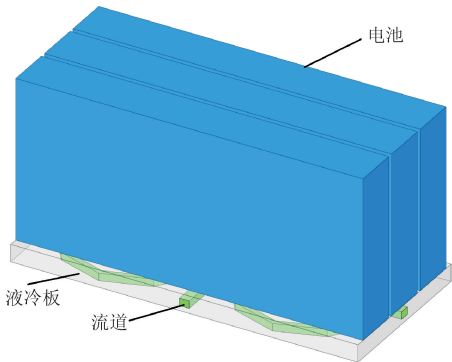


图 1 BTMS 几何模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of BTMS geometric model

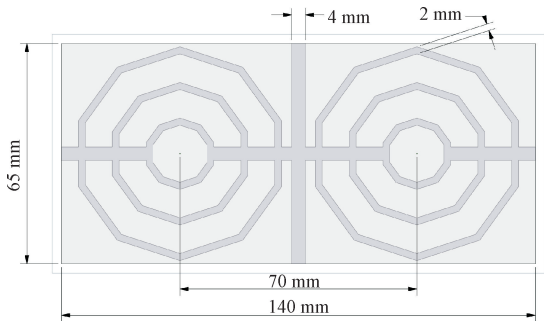


图 2 液冷板及流道示意图
Fig. 2 Schematic diagram of liquid cooling plate and flow path

表 1 电池模组在 30 ℃ 下的物理特性

Table 1 Physical characteristics of the battery module at 30 ℃

模组 部件	密度/ (kg · m ³)	比定压热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
电池	2 136.00	1 633	$k_x = 1, k_y = k_z = 29$
液冷板	2 719.00	871	202.400
冷却液	1 068.75	3 319	0.387

1.2 电池生热模型及验证

本文电池生热模型使用 Bernardi 模型^[30],其生热量的数学表达式为

$$q = \frac{1}{V} \left[I^2 R + IT \frac{\partial U}{\partial T} \right] \tag{1}$$

式中: q 为电池体积产热率; V 为电池体积; I 为充放电电流; R 为电池内阻; T 为电池温度; $\frac{\partial U}{\partial T}$ 为电池温熵系数。

单体电池不同倍率发热量见表 2,为了验证电池生热模型的准确性,根据文献[31]提供的电池生热速率,对单体电池在自然对流条件下进行 2C 倍率放电的模拟计算,并将计算得到的表面平均温度与参考文献[31]中的实验数据进行了比较,结果如图 3 所示。研究表明,在 2C 放电倍率下,文献[31]结果和仿真计算结果几乎吻合,这说明本文生热模型具有较高的可靠性,可以用于电池组冷却散热的仿真分析。

表 2 单体电池不同倍率发热量

Table 2 Calorific value of each battery at different rates

放电倍率	热通量/(W · m ⁻²)	电池生热速率/(W · m ⁻³)
1C	287	15 935
2C	771	42 858
3C	1 454	80 769

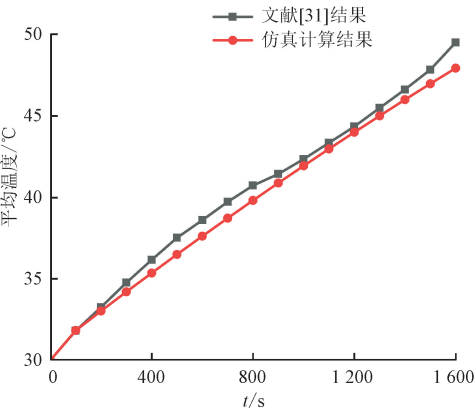


图 3 在 2C 放电倍率下电池表面平均温度仿真结果与文献[31]结果的对比

Fig. 3 At 2C discharge rate, the simulated average temperature of the battery surface was compared with that in the literature [31]

1.3 控制方程

通过数值计算来探讨结构对温度性能的影响。该模拟使用了计算流体力学方法。在数值计算过程中,作出了以下假设:①不同材料的热物性保持不变;②锂离子电池被视为稳定的热源;③忽略电池间的辐射以及空气浮力的影响;④流体与固体之间不存在相对滑移,接触面被假设为耦合状态。流体的流动状态依据雷诺数被分为层流和湍流。当雷诺数低于 2 300 时,由于黏性效应,流动保持为层流;当雷诺数超过 4 000 时,流体的黏性效应减弱,流动转变为湍流^[32]。

考虑到所有模型雷诺数均小于 2 300,本文采用层流模型。

基于上述假设,层流的控制方程可用下列方程^[26]表示,连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

动量方程为

$$u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_i}{p} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \tag{3}$$

液体冷却剂的能量方程为

$$\rho_l c_{pl} \left(u \frac{\partial T_l}{\partial x} + v \frac{\partial T_l}{\partial y} + w \frac{\partial T_l}{\partial z} \right) = k_l \left(\frac{\partial^2 T_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right) \tag{4}$$

电池的能量方程为

$$\rho_b c_{pb} \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_b \left(\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} \right) + \dot{Q}_b \tag{5}$$

式中: u_i 为流体的速度分量, $i = 1, 2, 3, u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w, u, v, w$ 分别为沿 x, y, z 方向的速度; T_l, c_{pl}, k_l, ρ_l 分别为液体冷却剂的温度、比定压热容、导热系数和密度; T_b, c_{pb}, k_b, ρ_b 分别为电池的温度、比定压热容、导热系数和密度; t 和 p 分别为时间和压力; $\dot{Q}_b$ 为电池芯的体积发热率。

1.4 初始条件和边界条件

本文假设电池组、液冷板、冷却液以及环境初始温度均为 30 ℃。液冷板的结构参数如下:流道宽度为 2 mm,壁厚为 2 mm,流道深度为 3 mm。流体入口设为质量流量入口,流速为 0.5 g/s;流体出口设为压力出口,出口压力为 0 Pa。液冷板与电池之间的热传递被定义为热传导过程,而电池组与环境空气之间的热传递方式则采用自然对流,其恒定换热

系数设定为 $5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。此外,冷却液与液冷板之间以及液冷板与电池之间的接触面设置为流固耦合接触换热面,以模拟更为真实的热传递过程。

计算中采用基于压力的求解器,并使用 Simple 算法结合有限体积法进行求解。质量、动量和能量方程均采用二阶迎风离散格式。为平衡计算精度与计算成本,时间步长设定为 10 s ,仿真总时间步数为 180,总放电时间为 $1\,800\text{ s}$ 。最大迭代次数设置为 20 次,能量残差项的阈值设定为 10^{-5} ,其他参数均采用默认设置。

1.5 网格独立性测试

为了验证 BTMS 几何模型的网格独立性,采用图 1 所示的模型进行测试。在测试中,电池组、液冷板、冷却液以及环境的初始温度均设为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却液的质量流量为 0.5 g/s 。利用 fluent meshing 对液冷 BTMS 进行网格划分,使用六面体和多面体生成体网格。通过分析电池组的最高温度和最大温差来评估网格独立性,验证结果如图 4 所示。当网格数增加至 5.6×10^5 时,电池组的最高温度和最大温差趋于稳定。进一步增加网格数时,最高温度和最大温差的变化幅度分别仅为 0.003 、 $0.000\,6\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化幅度微小。因此,为了平衡计算精度与经济性,选择 5.6×10^5 作为后续计算的基准网格数。

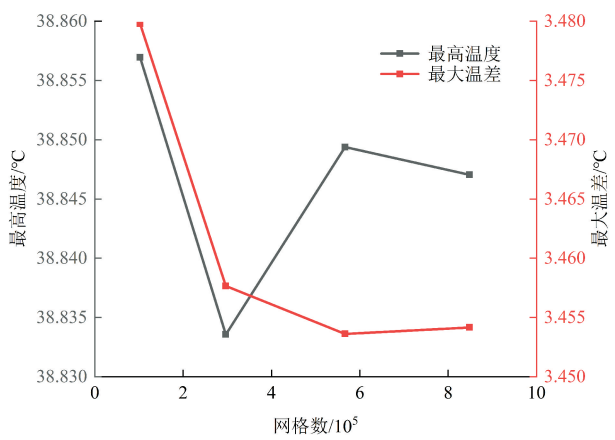


图 4 网格独立性验证
Fig. 4 Grid independence verification

2 不同流道结构液冷板冷却性能分析

2.1 冷却液流量对液冷板性能的影响

为了评估不同同心结构液冷板对电池组冷却效果的影响,在保持液冷板壁厚、流道深度、环形流道宽度和数量一致的条件下,使用电池组的最高温度、

最大温差和平均温度作为评估液冷板冷却性能的指标。图 5 展示了不同液冷板结构下电池组的最高温度、最大温差、平均温度和系统压降随冷却液质量流量的变化。从图 5 中可以看出,随着冷却液质量流量的增加,所有液冷板的冷却性能指标均有所下降。这是由于更高的流速提升了冷却液的热交换效率,带走了更多的热量,从而降低了电池温度。然而,尽管增加质量流量能有效降低电池温度,但系统压降也随之增加。例如,当冷却液质量流量从 0.5 g/s 增加到 2.5 g/s 时,同心圆、四边形、六边形、八边形和十边形液冷板的电池组的最大温差分别仅下降了 9.1% 、 13% 、 10.4% 、 10% 和 9.5% ,而系统压降则分别增加了 638.3% 、 675.5% 、 641.4% 、 649.1% 和 646.1% 。这个结果表明,尽管提高冷却液质量流量能有效降低电池组的温度,但系统压降的显著上升限制了其应用效益。值得注意的是,在冷却液质量流量为 0.5 g/s 时,电池组的最高温度和最大温差均能满足锂电池的理想工作温度要求。因此,基于以上结果,后续研究将保持冷却液质量流量为 0.5 g/s ,以平衡冷却性能和系统压降。

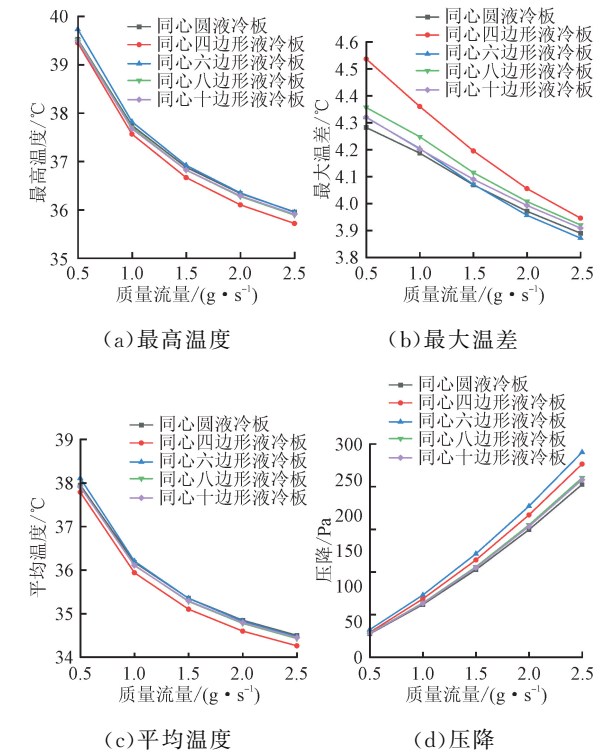


图 5 不同液冷板结构下电池组最高温度、最大温差、平均温度和系统压降随冷却液质量流量的变化
Fig. 5 Maximum temperature, maximum temperature difference, average temperature of battery pack and system pressure drop change with the mass flow of coolant under different liquid cooling plate structure

2.2 最佳同心结构液冷板选择

在冷却液质量流量为 0.5 g/s 时,不同流道类型液冷板对应的性能指标见表 3。表 3 的数据表明,不同结构液冷板对应的性能指标之间存在矛盾和互相制约的情况,无法同时实现最佳性能。例如,尽管同心四边形液冷板使电池组的最高温度和平均温度最小化,但它的电池间温差却是最大的。以往研究中,最佳结构的选择往往受决策者主观意愿的影响,存在一定的主观性。本文通过熵权法(EWM)来计算各指标的权重,从而选出冷却性能最优液冷板。

表 3 不同流道类型液冷板对应的性能指标
Table 3 Performance indexes of different flow channel types of liquid cooled plates

流道类型	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$
同心圆	39.52	4.29	37.95
同心四边形	39.45	4.54	37.79
同心六边形	39.73	4.32	38.11
同心八边形	39.51	4.37	37.91
同心十边形	39.49	4.32	37.90

EWM 确定权重的一般步骤^[26]如下。
步骤 1 数据标准化。标准化处理如下

$$x_{ij} = \frac{\max(y_j) - y_{ij}}{\max(y_j) - \min(y_j)} \tag{6}$$

式中: y_{ij} 表示第 i 个流道类型在第 j 个指标下的原始数据; x_{ij} 表示标准化后的值; $\max(y_j)$ 和 $\min(y_j)$ 分别表示第 j 个指标下的最大值和最小值。

步骤 2 计算标准化后每个数据 x_{ij} 的占比

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \tag{7}$$

式中: P_{ij} 表示第 i 个流道类型在第 j 个指标上的标准化值所占的比例。

步骤 3 计算各指标的信息熵。计算第 j 个指标的熵权

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \tag{8}$$

式中: m 是流道类型数量; e_j 是第 j 个指标的熵权。

信息效用值 d_j 为
$$d_j = 1 - e_j \tag{9}$$

步骤 4 确定各指标权重。计算第 j 个指标的权重为

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \tag{10}$$

式中: w_j 是第 j 个指标的权重。

根据上述步骤计算得到的最高温度、最大温差

和平均温度的权重分别为 31.859%、31.925% 和 36.216%。权重系数从小到大的顺序为:同心十边形、同心圆、同心八边形、同心四边形、同心六边形。由于性能指标为负向指标,所以同心十边形液冷板冷却性能最佳,后续的研究选择同心十边形液冷板。

3 单因子仿真分析

3.1 冷却液流向对液冷板冷却性能的影响

由于冷却液流向对液冷板的温度分布有显著影响,从而直接影响到电池组的冷却效率。为此,在液冷板壁厚设定为 2 mm、环形流道宽度为 2 mm、深度为 3 mm、圆心距为 70 mm 的条件下,本文分析了 3 种不同的冷却液流向,其示意图如图 6 所示。在不同冷却液流向下,电池组的最高温度、最大温差和平均温度数据见表 4。从表 4 可以看出,流向 3 表现出最佳的冷却效果,其最高温度、最大温差和平均温度均低于其他流向方案。图 7 所示为不同冷却液流向方案下电池组温度云图,从图 7 可以看出,流向 2 和流向 3 对应的温度分布更加均匀。从热力学和流体动力学角度分析,流向决定了冷却液与电池表面的接触方式,从而影响热量传递的路径和效率。在液冷 BTMS 中,冷却液的流动方向会影响其与电池表面热交换的均匀性和流动的稳定性。流向 2 和流向 3 流动方向设计合理,充分利用了双通道的优势,可以使冷却液带走电池表面更多的热量,避免冷却液在某些区域滞留,确保热量迅速而均匀地分散。流向 1 中纵向流道冷却效果不佳,主要依赖横向流道进行冷却,冷却液从右侧进入并从左侧排出时,流道下游电池组的温度逐渐升高。因此合理的冷却流向能够优化冷却性能,提升系统的稳定性与效率。由于流向 3 略优于流向 2,后续分析将使用流向 3 作为冷却液流向方案。

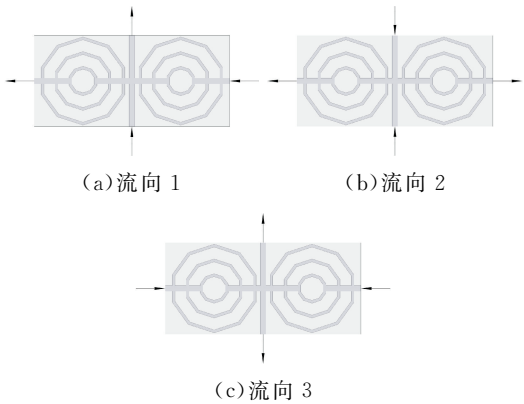


图 6 冷却液流向方案设计

Fig. 6 Coolant flow design scheme

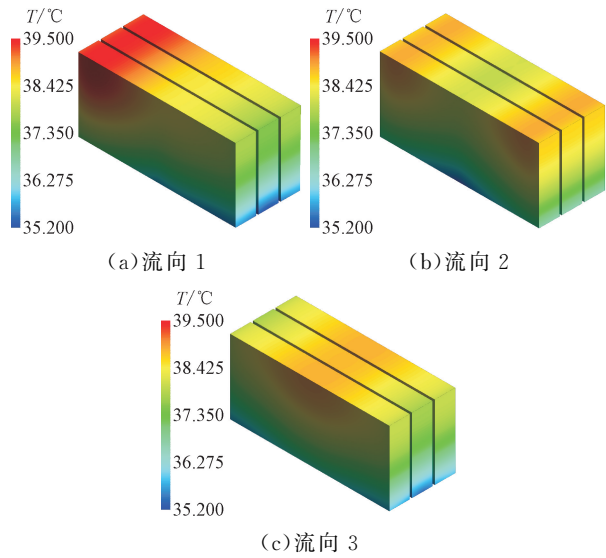


图 7 不同冷却液流向方案下电池组温度云图

Fig.7 Temperature cloud image of battery pack under different coolant flow scheme

表 4 不同冷却液流向方案下电池组的最高温度、最大温差及平均温度

Table 4 Maximum temperature, maximum temperature difference and average temperature of the battery pack under different coolant flow schemes

流向方案	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$
1	39.49	4.32	37.90
2	38.88	3.54	37.74
3	38.74	3.46	37.62

3.2 环形流道数对液冷板冷却性能的影响

为了探讨环形流道数对液冷板冷却性能的影响,在液冷板壁厚为 2 mm、环形流道宽度为 2 mm、深度为 3 mm、圆心距为 70 mm 的条件下,研究了环形流道数从 2 个增加到 5 个时液冷板冷却性能的变化。环形流道数对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响见表 5,从表 5 可以看出,电池组的最高温度和平均温度随环形流道数的增加而下降,而最大温差随环形流道数的增加而增加。不同环形流道数下电池组的温度云图分布如图 8 所示,从图 8 可以看出,随着环形流道数的增加,电池组的最高温度明显下降,温度均匀性也有所改善。这是因为流道数的增加意味着冷却液能覆盖更多的区域,更多的流道使冷却液能更均匀地分布于电池组表面,避免局部温度过高或过低,减少热量积聚,从而实现更均匀的热分布。此外,增加流道数提高了热交换效率,优化了冷却液的流动路径,确保了整个系统的温

度更为均衡,提升了电池组的性能和安全性。尽管相较于流道数为 2,流道数为 5 时的最大温差增加了 0.33 °C,但是最高温度和平均温度分别下降了 0.51、0.71 °C,且温度均匀性得到了改善,后续的研究采用 5 个环形流道。

表 5 环形流道数对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响

Table 5 Influence of the number of annular channels on the maximum temperature, maximum temperature and average temperature of the battery pack

流道数	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$
2	38.93	3.39	37.86
3	38.74	3.46	37.62
4	38.73	3.58	37.56
5	38.42	3.72	37.15

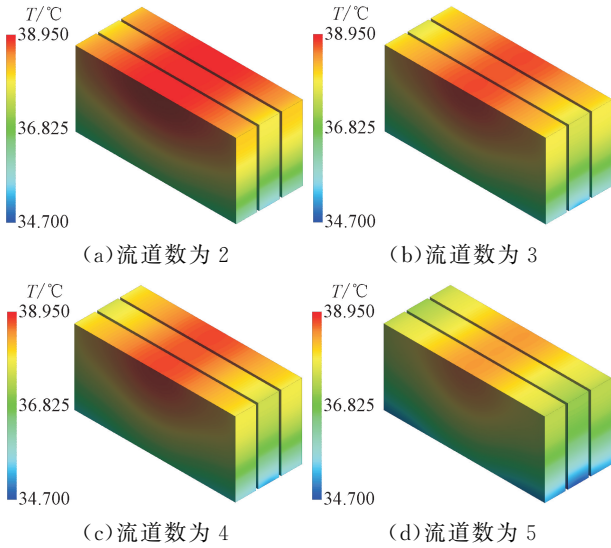


图 8 不同环形流道数下电池组的温度云图

Fig. 8 Temperature cloud image of battery pack with different number of annular channels

3.3 液冷板壁厚对液冷板性能的影响

考虑到液冷板壁厚影响热传导的速度和冷却液的热交换效率,进而直接影响电池组的温度。因此,在环形流道宽度为 2 mm、深度为 3 mm 以及圆心距为 70 mm 的条件下,研究了液冷板壁厚从 1 mm 增加至 3 mm 时液冷板的冷却效果。图 9 展示了液冷板壁厚对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响。从图 9 可以发现,随着壁厚的增加,电池组的最高温度和最大温差逐渐降低,而平均温度的变化则表现为先上升后下降。在所有参数中,壁厚对最大温差的影响最为显著,而对平均温度的影响较小。

增加液冷板的壁厚有助于降低电池组的最高温度和最大温差。该现象可以归因于液冷板热容量的增加,使其能够暂时储存更多的热量,从而减缓电池组温度的上升过程。此外,壁厚的增加有助于改善热交换效率,减少局部温度集中效应,使电池组的温度分布更加均匀稳定,从而降低了最高温度的风险。

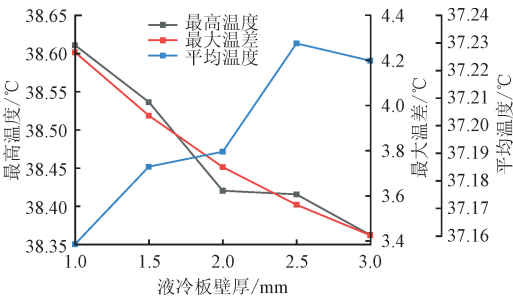


图 9 液冷板壁厚对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响

Fig. 9 Influence of liquid cooling plate wall thickness on maximum temperature, maximum temperature difference and average temperature of battery pack

3.4 环形流道宽度对液冷板性能的影响

考虑到流道宽度影响流体流速、热交换效率和流动模式,进而影响电池表面的温度分布。因此,在液冷板壁厚为 2 mm、流道深度为 3 mm 以及圆心距为 70 mm 的条件下,研究了流道宽度从 1 mm 增至 3 mm 时液冷板性能的变化情况。图 10 展示了环形流道宽度对最高温度、最大温差和平均温度的影响。从图 10 可以看出,电池组的最高温度和平均温度随着流道宽度的增加先上升后下降,而最大温差则表现出先下降后上升的趋势。总体而言,较窄的环形流道宽度通常会使电池组的最高和平均温度较低,而较宽的流道则有助于降低电池组的最大温差。流道宽度的变化会影响换热面积和强制对流换热系

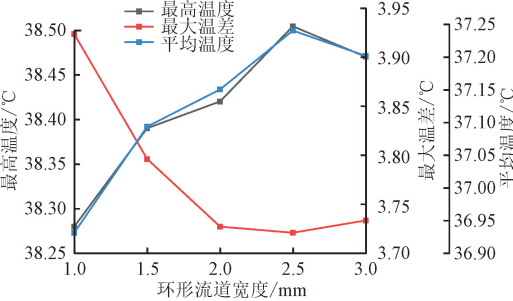


图 10 环形流道宽度对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响

Fig. 10 Influence of annular channel width on maximum temperature, maximum temperature difference and average temperature of battery pack

数。具体来说,流道宽度增加时,流道的横截面积增加,换热面积随之扩大,但由于入口流量保持不变,流道横截面积的扩大会导致流速减缓,从而降低了强制对流换热系数。因此,电池组的温度变化是换热面积扩大和强制对流换热系数降低共同作用的结果。

3.5 流道深度对液冷板性能的影响

考虑到流道深度直接影响液冷板的整体厚度和流动速度,进而影响热传递能力。因此,在液冷板壁厚为 2 mm、环形流道宽度为 2 mm 以及圆心距为 70 mm 的条件下,研究了流道深度从 1 mm 增到 5 mm 时液冷板冷却性能的变化。图 11 展示了环形流道深度对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响。从图 11 可以看出,电池组的最高温度在流道深度增加时初期上升,随后下降,而最大温差则随流道深度增加而上升,平均温度则呈现下降趋势。流道深度从 1 mm 增加到 2 mm 时,各性能指标的变化最为明显,而流道深度从 2 mm 增加到 5 mm 时,性能变化趋于平稳。这是因为随着流道深度的增加,液冷板的整体厚度也在增加,从而提升了热容量,使得温度上升的速度减缓。然而,由于流道深度增加导致冷却液流速降低,强迫对流换热系数也相应减小,因此这两个因素共同作用会导致电池组的最高温度略有上升。此外,流道深度增加使得入口区域的流速减小,从而使得电池组的最低温度略有上升,同时在最高温度基本保持不变的情况下,电池组的最大温差有所降低。

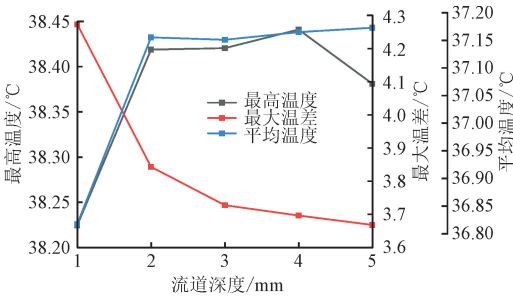


图 11 流道深度对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响

Fig. 11 Influence of channel depth on maximum temperature, maximum temperature difference and average temperature of battery pack

3.6 圆心距对液冷板性能的影响

为了探讨圆心距对液冷板冷却性能的影响,在液冷板壁厚为 2 mm、环形流道宽度为 2 mm、深度为 3 mm 的条件下,研究了圆心距从 70 mm 增加到 78 mm 时液冷板冷却性能的变化。图 12 展示了圆

心距对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响。从图 12 可以看出,电池组的最高温度、最大温差和平均温度随圆心距的增大而增大,其中,最大温差受圆心距的影响最为明显,这是因为随着圆心距的增大,入口区域的电池组温度下降较为明显,在最高温度变化不大的情况下,最大温差逐渐上升。

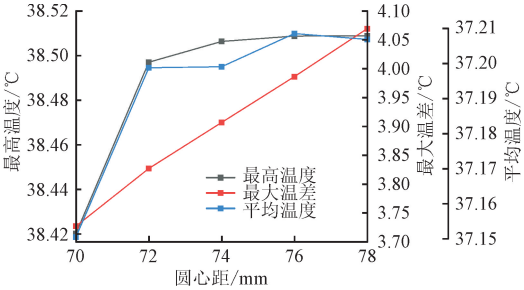


图 12 圆心距对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响

Fig. 12 Influence of concentric distance on maximum temperature, maximum temperature difference and average temperature of battery pack

4 同心十边形液冷板结构因素多目标优化

上述研究结果表明,不同的液冷板壁厚、环形流道宽度、深度以及圆心距都会对液冷板的冷却性能产生影响,且各性能指标之间相互矛盾,无法同时达到最优,如何选择 4 个结构因素,提高液冷板的冷却性能是本文需要解决的关键问题。

4.1 同心十边形液冷板结构因素优化流程

由第 2、3 节内容可知,同心十边形液冷板冷却性能优于其他同心结构液冷板,不同的液冷板壁厚、环形流道宽度、深度以及圆心距都会影响液冷板的冷却性能,第 4 节将从结构因素方面对同心液冷板进行优化,优化流程如图 13 所示。先采用正交试验极差分析研究环形流道宽度、深度、液冷板壁厚和圆心距(分别用 A、B、C、D 代表这 4 个结构因素,单位均为 mm)对电池组最高温度、最大温差和平均温度的影响大小。从中选出对冷却性能指标影响较大的结构因素进行多目标优化。各结构因素的取值范围见表 6。

表 6 各结构因素的取值范围

Table 6 Value range of each structure factor				
范围	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm
下限	1	1	1	70
初值	2	3	2	70
上限	3	5	3	78

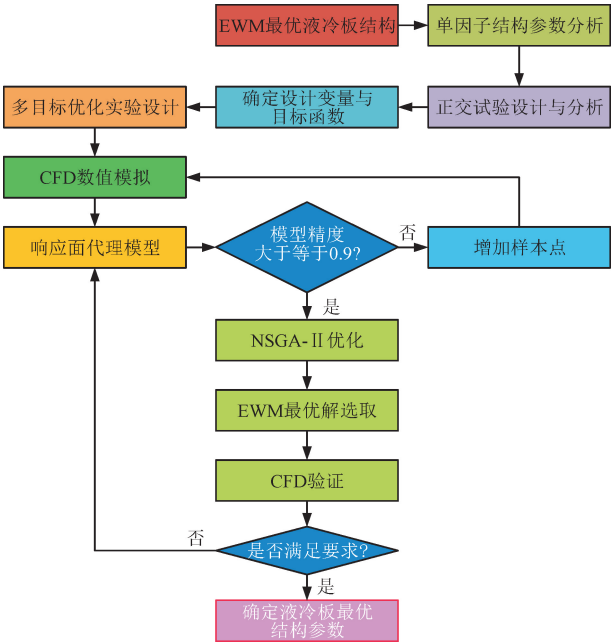


图 13 液冷板结构参数优化流程

Fig. 13 Liquid cooling plate structure parameter optimization process

4.2 正交试验极差分析

应用正交试验极差分析确定上述 4 个结构因素对试验性能指标的影响。极差计算公式^[33]如下

$$K_{ij} = \sum_{i=1}^n Z_{ij} \tag{11}$$

$$k_{ij} = \frac{1}{n} K_{ij} \tag{12}$$

$$R_i = \max \{k_{ij}\} - \min \{k_{ij}\} \tag{13}$$

式中: Z_{ij} 表示对应试验指标; K_{ij} 表示因素 i 在水平 j 下对应的试验性能指标之和; k_{ij} 表示因素 i 在水平 j 下对应的试验性能指标的均值; n 为水平数; R_i 为因素 i 下 k_{ij} 的极差; i 为 A、B、C、D; j 为 1、2、3。

对液冷板结构参数 A、B、C、D 各取表 7 中的 3 个水平,以最高温度、最大温差以及平均温度作为性能指标。选择 $L_9(3^4)$ 正交表,9 组正交试验方案及相应计算结果见表 8。从表 8 可得:9 组方案中电池组最高温度、最大温差和平均温度的最大值与最小值分别相差 14.8%、30.9%和 14.2%,表明结构参数对最大温差影响最大。

电池组最高温度、最大温差和平均温度的极差分析见表 9。从表 9 可以看出,以最高温度、最大温差和平均温度为评价指标时,结果分别为 $R_A > R_C >$

$R_D > R_B, R_C > R_B > R_D > R_A, R_A > R_D > R_B > R_C$ 。以最高温度、最大温差和平均温度为总评价指标时,结果为 $R_C > R_A > R_B > R_D$,表明结构参数 D 对性能影响最小,所以后续的优化取 D 为 70 mm,对结构因素 A 、 B 、 C 做进一步优化。

表 7 正交试验因素水平表				
Table 7 Orthogonal test factor level table				
水平	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm
1	1	1	1	70
2	2	3	2	74
3	3	5	3	78

表 8 正交试验方案及仿真结果							
Table 8 Orthogonal test scheme and simulation results							
编号	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$
试验 1	1	1	1	70	38.48	4.82	36.88
试验 2	1	3	3	74	38.21	3.76	36.94
试验 3	1	5	2	78	38.15	4.21	36.75
试验 4	2	1	3	78	38.21	4.07	36.89
试验 5	2	3	2	70	38.46	3.74	37.19
试验 6	2	5	1	74	38.55	4.28	37.06
试验 7	3	1	2	74	38.66	4.83	37.06
试验 8	3	3	1	78	38.72	4.69	37.16
试验 9	3	5	3	70	38.43	3.33	37.28

表 9 最高温度、最大温差和平均温度极差分析表					
Table 9 Maximum temperature, maximum temperature and average temperature range analysis table					
评价指标	i	极差			
		k_{i1}	k_{i2}	k_{i3}	R_i
$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	A	38.280	38.409	38.605	0.326
	B	38.452	38.465	38.377	0.087
	C	38.585	38.284	38.425	0.302
	D	38.458	38.476	38.360	0.116
$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	A	4.264	4.032	4.283	0.251
	B	4.575	4.062	3.941	0.634
	C	4.596	3.722	4.260	0.875
	D	3.967	4.288	4.323	0.356
$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$	A	36.857	37.046	37.168	0.311
	B	36.942	37.097	37.031	0.155
	C	37.035	37.036	36.999	0.037
	D	37.115	37.023	36.934	0.181

4.3 代理模型建立

代理模型可视为对原始仿真模型的高精度近似。它通过输入有限数量的样本点来估算原始模型的响应。建立代理模型主要包括实验设计(DOE)和模型选择两个步骤。实验设计方法有均匀实验设计、正交实验设计、中心组合设计、拉丁超立方抽样(LHS)以及优化拉丁超立方抽样(OLHS)等。OLHS抽样是在LHS基础上的一种高级改进方法,通过优化样本点在空间中的位置,提升了抽样的效率和精度。本文采用OLHS方法随机生成了22

个样本,样本分布如图14所示。这些样本在设定范围内呈现出均匀且随机的分布。代理模型的构建包括响应面法(RSM)、径向基函数法(RBF)和克里金法(Kriging),每种方法都有其独特的优势和适用场景。选择适当的代理模型可以有效提高计算精度和效率。由于代理模型的计算结果通常与实际值存在一定误差,选择合理的模型时会使用一些评估指标。本文采用 R^2 和均方根误差(设为 R_{MSE})来衡量模型的准确性。 R^2 接近1表示模型拟合度高,而 R_{MSE} 较小则表示模型精度较高。 R^2 和 R_{MSE} 的计算公

式^[34]为

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(F_{i,p} - F_{i,s})^2}{F_{i,s}^2}$$

(14)

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{i,p} - F_{i,s})^2}$$

(15)

式中： $F_{i,p}$ 为预测值； $F_{i,s}$ 为仿真值。

表 10 所示为评价指标对不同代理模型的预测结果,结果表明,响应面法模型比其他两种方法具有更高的精度,所以采用响应面模型作为代理模型。

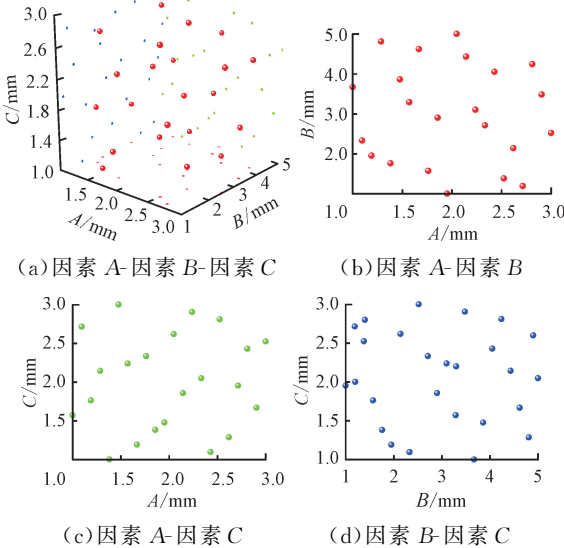


图 14 样本点在设计空间中的分布

Fig. 14 Distribution of sample points in design space

表 10 评价指标对 3 种代理模型的预测结果
Table 10 The prediction results of evaluation indicators for different surrogate models

预测对象	R^2			R_{MSE}		
	RSM	RBF	Kriging	RSM	RBF	Kriging
$T_{\max}$	0.945	0.875	0.835	0.064	0.098	0.112
$\Delta T_{\max}$	0.903	0.776	0.732	0.092	0.143	0.154
T_{ave}	0.935	0.872	0.832	0.079	0.098	0.136

4.4 优化模型

以电池组最高温度、最大温差和平均温度为优化目标,各约束变量取值范围为： $1 \leq A \leq 3, 1 \leq B \leq 5, 1 \leq C \leq 3$ (单位均为 mm)。同心液冷板结构参数多目标优化数学模型如下

$$\begin{cases} \min F(A,B,C) = \begin{cases} T_{\max}(A,B,C) \\ \Delta T_{\max}(A,B,C) \\ T_{\text{ave}}(A,B,C) \end{cases} \\ \text{s. t. } \begin{cases} 1 \leq A \leq 3 \\ 1 \leq B \leq 5 \\ 1 \leq C \leq 3 \end{cases} \end{cases}$$

(16)

5 帕累托可行点选取与优化结果分析

5.1 优化过程

5.1.1 优化算法选择和参数设置

NSGA-II 算法非常适合用于优化液冷 BTMS,因为它能够有效处理多目标优化问题,如最高温度、最大温差和平均温度等相互矛盾的目标。该算法通过非支配排序和拥挤度计算,不依赖于预设目标权重,能够在不确定的、非线性的复杂系统中提供一组 Pareto 最优解,帮助找到不同目标之间的平衡。同时,NSGA-II 算法具有全局优化能力,避免局部最优,能够处理多种约束条件,且适应性强,可以高效地应对不同规模和复杂度的优化问题,特别适用于优化液冷 BTMS。

在采用 NSGA-II 算法进行优化时,算法参数的设置是至关重要的,因为这些参数直接影响优化过程的效率、收敛性、解的多样性和最终结果。不同的参数设置会对算法的性能和结果产生不同的影响。本文主要涉及的算法参数包括种群规模、进化代数、突变概率、交叉概率、交叉分布指数和变异分布指数。通常,种群大小一般根据问题的规模和计算资源选择,本文主要考虑 3 个结构变量,因此种群大小设置在 12~20 之间,可以获得很好的解;进化代数一般根据优化的复杂程度进行选择,本文的进化代数设置为 50~150;交叉概率通常设置在 0.7~0.9 之间,初期可以较高,以增加解的多样性,后期可以适当降低以稳定收敛;突变概率通常设置在 0.01~0.10 之间,较低的变异概率适用于收敛阶段,较高的概率适用于探索阶段,本文取 0.10;交叉和变异分布指数控制交叉和变异操作的“强度”,交叉分布指数决定了交叉操作中新解的分布宽度,变异分布指数决定了变异操作的强度,本文交叉和变异分布指数分别为 10 和 20。

5.1.2 敏感性分析

算法参数敏感性分析可以评估不同参数对优化目标和算法性能的影响,帮助优化参数选择、提高算法效率、避免过度依赖经验、确保算法的稳定性和鲁棒性。本文通过正交试验极差分析对种群规模、进化代数和交叉概率(分别用 a, b, c 表示)进行敏感性分析。表 11 为正交试验算法参数的水平表。选择 $L_9(3^3)$ 正交表,9 组正交试验方案及相应优化目标计算结果见表 12。其中优化目标是通过 EWM 选

取帕累托前沿中的最优解。从正交表可以看出,9 组试验方案的结果大致可以分为两类。优化目标的极差分析见表 13。从表 13 中可以看出,以最高温度、最大温差和平均温度为评价指标时,结果分别为 $R_b > R_a > R_c$,说明算法参数 b 对优化目标的影响最大,其次是参数 a 和 c 。通过极差分析,得出因素水平的最佳组合分别为 $a_1b_2a_1$ 和 $a_2b_1c_2$ 。考虑到锂离子电池在放电过程中应首先确保电池最高温度降低最小值,以免发生爆炸等危险,其次在考虑温度差引起的锂离子寿命衰减问题。因此,在最高温度最低的情况下,算法参数最优组合为 $a_2b_1c_2$ 。

采用 NSGA-II 算法进行多目标优化,参数设置如下:种群规模为 16,进化代数设为 50,交叉概率为 0.8,突变率为 0.1,交叉分布指数为 10,变异分布指数为 20。经过 800 次迭代得到 191 组帕累托最优解,如图 15 所示。通过 EWM 计算帕累托前沿最优解,得出最高温度、最大温差和平均温度的权重分别为 38.242%、19.506% 和 42.252%。根据这些权重,当液冷板的壁厚、流道宽度和流道深度分别为 3、3、1 mm 时,液冷板的冷却性能达到最佳,其性能指标见表 14。

表 11 正交试验算法因素水平表

Table 11 Horizontal table of parameters of orthogonal experiment algorithm

水平	a	b	c
1	12	50	0.7
2	16	150	0.8
3	20	100	0.9

表 12 正交试验方案及算法优化结果

Table 12 Orthogonal test scheme and algorithm optimization results

编号	a	b	c	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$
1	12	50	0.7	37.998	3.725	36.684
2	16	150	0.8	37.998	3.725	36.684
3	20	100	0.9	37.998	3.723	36.684
4	12	150	0.9	38.183	3.477	36.932
5	16	100	0.7	37.998	3.723	36.684
6	20	50	0.8	37.998	3.724	36.684
7	12	100	0.8	37.999	3.721	36.685
8	16	50	0.9	37.997	3.728	36.684
9	20	150	0.7	38.186	3.423	36.909

表 13 最高温度、最大温差和平均温度极差分析表

Table 13 Maximum temperature, maximum temperature and average temperature range analysis table

评价指标	i	极差			
		k_{i1}	k_{i2}	k_{i3}	R_i
$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	a	38.060	37.998	38.061	0.063
	b	37.998	38.112	37.999	0.124
	c	38.061	37.998	38.060	0.062
$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	a	3.641	3.725	3.623	0.102
	b	3.726	3.542	3.722	0.184
	c	3.624	3.723	3.642	0.099
$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$	a	36.767	36.684	36.759	0.083
	b	36.684	36.842	36.685	0.158
	c	36.759	36.684	36.767	0.082

表 14 熵权法选择结果

Table 14 Selection results of entropy weight method

结果	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$
预测值	38	3.72	36.68
仿真值	38.1	3.9	36.75
相对误差	0.26%	4.62%	0.19%

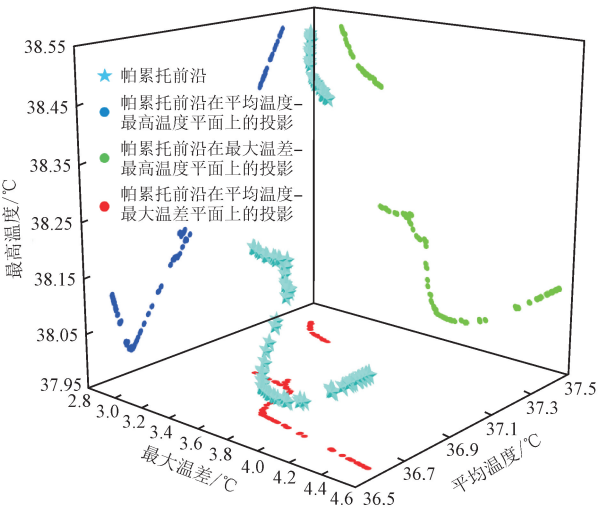


图 15 NSGA-II 算法的帕累托前沿

Fig. 15 NSGA-II algorithm Pareto front

5.2 优化结果分析

优化前后性能指标对比见表 15。从表 15 可以看出,电池组最高温度从 39.49 °C 降低到 38.10 °C,降低了 1.39 °C;最大温差从 4.32 °C 降到 3.90 °C,降低了 0.42 °C;此外,平均温度从 37.90 °C 降到 36.75 °C,降低了 1.15 °C。初始结构和优化结构在放电结束

后 BTMS 的温度分布如图 16 所示。从图 16 可以看出,优化后电池组的最高温度有所降低,并且电池组的温度均匀性也得到显著改善。

表 15 优化前后性能指标对比

Table 15 Comparison of performance indicators before and after optimization

结构	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$
优化前	39.49	4.32	37.90
优化后	38.10	3.90	36.75

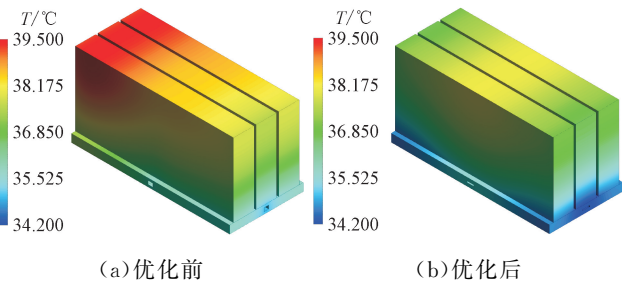


图 16 优化前后 BTMS 温度云图对比

Fig. 16 Initial and optimized BTMS temperature cloud image

5.3 优化结果验证

为了在电池组层面验证优化前后液冷板冷却性能的变化,如图 1 所示,将液冷板布置在电池组底部。试验设置中,液冷板的质量流量为 0.5 g/s,冷却液的入口温度为 30 °C。考虑到液冷 BTMS 与外界空气之间存在一定的对流换热,设置液冷板和电池组表面之间的对流换热系数为 5 W/(m² · K)。此外,为了验证优化设计对液冷板冷却性能的提升,本文还将优化前后的液冷板与图 17 所示的传统蛇形流道进行对比。实验保持一致的边界条件,以确保结果的可比性,并进一步验证优化设计在提升液冷板冷却性能方面的鲁棒性。

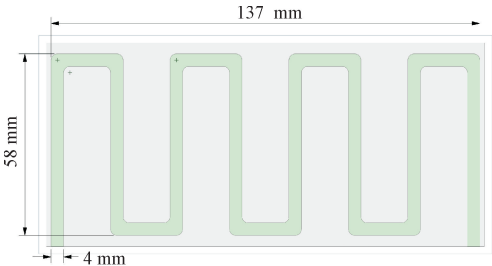


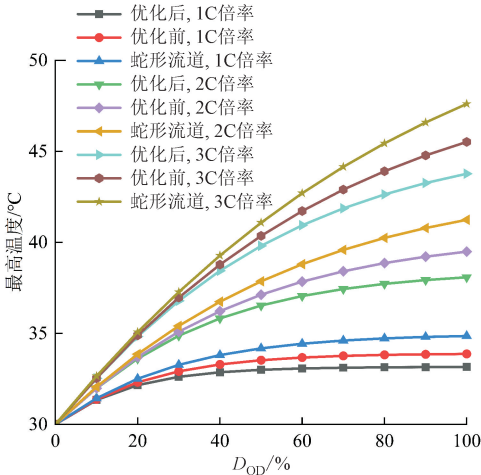
图 17 蛇形流道示意图

Fig. 17 Schematic diagram of serpentine flow channel

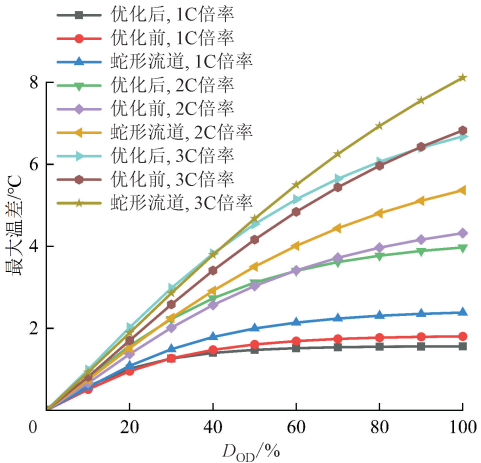
5.3.1 放电倍率的影响

由于电动汽车的行驶速度并非始终匀速,动力电池需要根据不同的工况提供相应的电流。为了验

证不同放电倍率对液冷板冷却性能的影响,数值模拟设置液冷 BTMS 在环境温度为 30 °C 的条件下,分别以 1C、2C 和 3C 的放电倍率进行放电。如图 18 所示,展示了电池组在不同放电倍率下的最高温度、最大温差和平均温度随放电深度的变化趋势, D_{OD} 表示放电深度。从图 18 中可以看出,在所有放电倍率下,优化后的液冷板始终展现出最强的冷却能力,其冷却性能明显优于优化前的液冷板和传统蛇形流道液冷板。具体而言,优化后的液冷板能够显著降低电池组的最高温度、最大温差和平均温度。随着放电倍率的增加,优化后的液冷板展现出更为明显的冷却优势。具体数据如下:在 1C 放电倍率结束时,相较于优化前液冷板和蛇形流道液冷板,电池组的最高温度分别下降了 0.72、1.71 °C;最大温差分别下降了 0.24、0.82 °C;平均温度分别下降了 0.56、1.43 °C。在 3C 放电倍率结束时,电池组的最高温度分别下降了 1.75、3.84 °C;最大温差分别下降了 0.15、1.43 °C;平均温度分别下降了 1.53、3.55 °C。这表明,优化后的同心十边形液冷板在各放电倍率下综合性能均为最优。



(a) 最高温度



(b) 最大温差

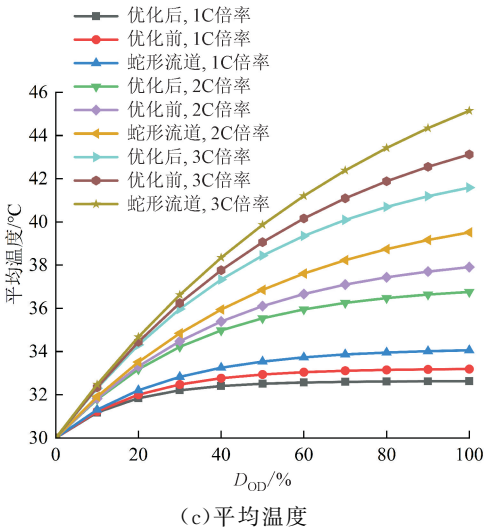


图 18 优化前、优化后、蛇形流道液冷板在不同放电倍率下电池组的热特性对比

Fig. 18 Comparison of the thermal characteristics of the battery pack with the pre-optimized, post-optimized, and serpentine liquid cooling plates at different discharge rates

5.3.2 环境温度的影响

我国四季温差大,锂电池性能受温度影响很大,因此需要考虑环境温度对电池组冷却性能的影响。设置 BTMS 在环境温度分别为 20、30、40 ℃ 的条件下进行 2C 倍率放电。如图 19 所示为电池组最高温度、最大温差和平均温度随放电时间的变化,从图 19 中可以看出,不同环境温度下,优化后的液冷板对电池组的冷却性能最强,优化前的液冷板其次,蛇形流道液冷板冷却性能最差。尽管在放电前期,优化后的液冷板对应的最大温差较优化前表现的略高,但是在放电结束时,优化后的液冷板对应的最大温差明显低于优化前,并且随着环境温度的升高,优化后液冷板在大多数时间都表现出最低的最大温差。这表明,绝大部分时间内,优化后的液冷板均温性更好。随着环境温度的上升,优化后的液冷板展现出更为明显的冷却优势。具体数据如下:在 20 ℃ 环境温度放电结束时,相较于优化前液冷板和蛇形流道液冷板,电池组的最高温度分别下降了 0.52、1.16 ℃;最大温差分别下降了 0.11、0.32 ℃;平均温度分别下降了 0.55、1.19 ℃。在 40 ℃ 环境温度放电结束时,电池组的最高温度分别下降了 2.41、4.93 ℃;最大温差分别下降了 0.91、2.45 ℃;平均温度分别下降了 1.76、4.07 ℃。这表明,优化后的同心十边形液冷板在各环境温度下综合性能均为最优。

综合来看,优化后的液冷板在各放电倍率、各环境温度下均表现出最佳的冷却效果,这表明本文提出的液冷板优化方案在不同放电倍率、不同环境温

度下均具有良好的鲁棒性,能够有效提升电池组的热管理性能。

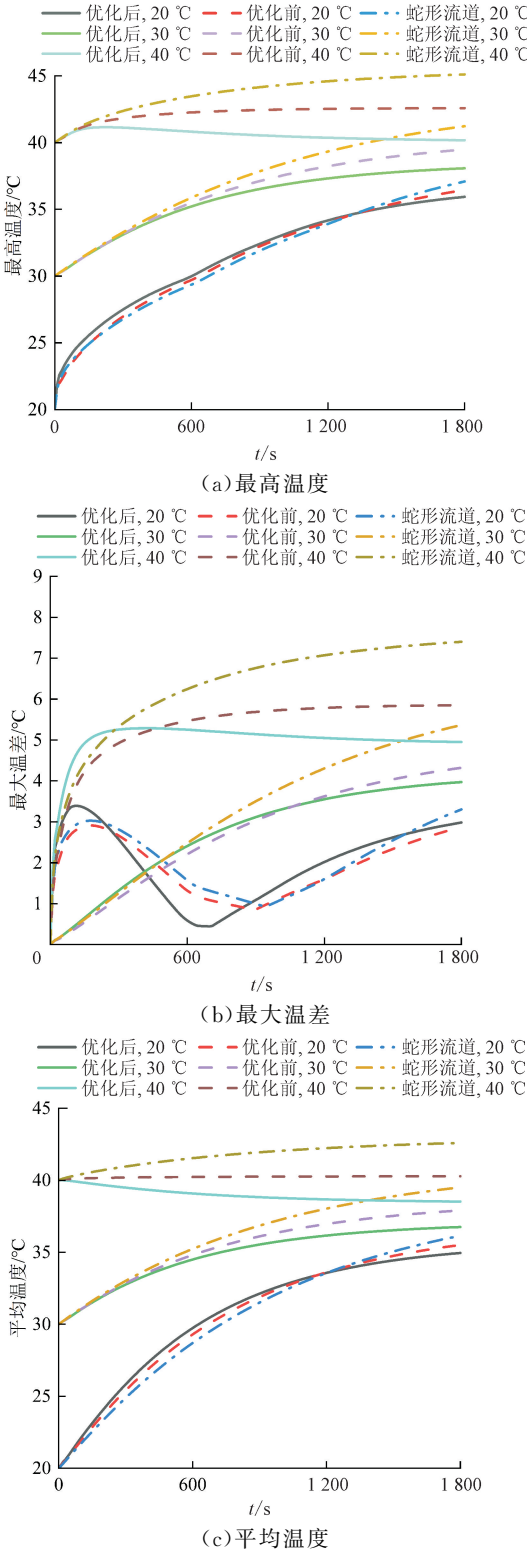


图 19 优化前、优化后、蛇形流道液冷板在不同环境温度下电池组的热特性对比

Fig. 19 Comparison of the thermal characteristics of the battery pack with the pre-optimized, post-optimized, and serpentine liquid cooling plates at different ambient temperatures

6 结 论

为了降低锂离子电池工作温度和温差,本文设计了一款同心十边形结构液冷板,分析了液冷板结构因素对其冷却性能的影响,采用正交试验分析各结构因素对冷却性能指标影响的强弱关系,选择强相关的结构因素作为设计变量,以电池组的最高温度、最大温差和平均温度为目标函数,建立设计变量和目标函数之间的响应面代理模型并采用 NSGA-II 遗传算法对液冷板结构因素进行优化。主要结论如下。

(1) 5 种同心结构液冷板冷却性能指标相互矛盾,无法同时达到最优,通过 EWM 得出同心十边形综合冷却性能最佳。

(2) 液冷板壁厚、环形流道宽度、深度以及圆心距等结构因素都会影响液冷板的冷却性能,其中,最大温差受结构因素影响最大。

(3) 采用正交试验可得流道宽度 A 和液冷板壁厚 C 对电池组的最高温度影响最显著;液冷板壁厚 C 和流道深度 B 对最大温差影响最显著,流道宽度 A 和圆心距 D 对平均温度影响最显著。综合分析液冷板壁厚 C 、流道宽度 A 和深度 B 对温度影响最为显著,后续研究以结构参数 A 、 B 、 C 为设计变量进行多目标优化。

(4) 构建 A 、 B 、 C 与电池组最高温度、最大温差以及平均温度之间的 Kriging 代理模型,利用 NSGA-II 优化算法进行多目标寻优,并使用 EWM 选取最优解。与初始结构相比,优化后的液冷板结构使电池组的最高温度降低 $1.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最大温差降低 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均温度降低 1.15% ,电池组的温度均匀性也得到显著改善。

(5) 优化后的液冷板更有利于电池组温度的控制,在高温环境和高放电倍率的工况下,优化后的液冷板表现出更显著的优势。

参考文献:

- [1] LAN Chuanjin, XU Jian, QIAO Yu, et al. Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 101: 284-292.
- [2] LI Hua, XIAO Xiangyu, WANG Yanan, et al. Performance investigation of a battery thermal management system with microencapsulated phase change material suspension [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 180: 115795.

- [3] ETACHERI V, MAROM R, ELAZARI R, et al. Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(9): 3243-3262.
- [4] MONIKA K, DATTA S P. Comparative assessment among several channel designs with constant volume for cooling of pouch-type battery module [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 251: 114936.
- [5] KHOSHVAGHT-ALIABADI M, ABBASZADEH A, SALIMI A, et al. Structural modifications of sinusoidal wavy minichannels cold plates applied in liquid cooling of lithium-ion batteries [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 57: 106208.
- [6] ZHANG Furen, HUANG Zhikai, LI Shiyuan, et al. Design and thermal performance analysis of a new micro-fin liquid cooling plate based on liquid cooling channel finning and bionic limulus-like fins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 237: 121597.
- [7] ZHAO Ding, LEI Zhiguo, AN Chao. Research on battery thermal management system based on liquid cooling plate with honeycomb-like flow channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119324.
- [8] WANG Chun, XU Jun, WANG Meiwei, et al. Experimental investigation on reciprocating air-cooling strategy of battery thermal management system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106406.
- [9] ZENG Wei, MA Chuyuan, HU Sihang, et al. The performance investigation and optimization of reciprocating flow applied for liquid-cooling-based battery thermal management system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 292: 117378.
- [10] 马菁, 段志勇, 孙勇飞, 等. 基于热管的储能锂电池散热特性数值模拟研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(17): 6737-6745.
MA Jing, DUAN Zhiyong, SUN Yongfei, et al. Numerical simulation on the heat dissipation characteristics of lithium battery for energy storage based on heat pipe [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(17): 6737-6745.
- [11] SHI Shang, XIE Yongqi, LI Ming, et al. Non-steady experimental investigation on an integrated thermal management system for power battery with phase change materials [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138: 84-96.
- [12] KIZILEL R, SABBAH R, SELMAN J R, et al. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 1105-1112.

- [13] AL-ABIDI A A, MAT S, SOPIAN K, et al. Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 61: 684-695.
- [14] XIN Shiji, WANG Chun, XI Huan. 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.
- [15] LIANG Lin, ZHAO Yaohua, DIAO Yanhua, et al. Inclined U-shaped flat microheat pipe array configuration for cooling and heating lithium-ion battery modules in electric vehicles [J]. *Energy*, 2021, 235: 121433.
- [16] E Jiaqiang, YI Feng, LI Wenjie, et al. Effect analysis on heat dissipation performance enhancement of a lithium-ion-battery pack with heat pipe for central and southern regions in China [J]. *Energy*, 2021, 226: 120336.
- [17] LI Ke, YAN Jiajia, CHEN Haodong, et al. Water cooling based strategy for lithium ion battery pack dynamic cycling for thermal management system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 575-585.
- [18] DUBEY P, PULUGUNDLA G, SROUJI A K. Direct comparison of immersion and cold-plate based cooling for automotive li-ion battery modules [J]. *Energies*, 2021, 14(5): 1259.
- [19] WANG Haitao, TAO Tao, XU Jun, et al. Thermal performance of a liquid-immersed battery thermal management system for lithium-ion pouch batteries [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46: 103835.
- [20] BAKHSHI S, DUBEY P, SROUJI A K, et al. Comparison of different liquid cooling configurations for effective thermal management of Li-ion pouch cell for automotive applications [C]//ASME 2020 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2020 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME 2020 18th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. New York, USA: ASME, 2020: V001T11A011.
- [21] MONIKA K, CHAKRABORTY C, ROY S, et al. Parametric investigation to optimize the thermal management of pouch type lithium-ion batteries with minichannel cold plates [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120568.
- [22] PANCHAL S, KHASOW R, DINCER I, et al. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 122: 80-90.
- [23] SALIMI A, KHOSHVAGHT-ALIABADI M, RASHIDI S. On thermal management of pouch type lithium-ion batteries by novel designs of wavy minichannel cold plates: comparison of co-flow with counter-flow [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52(Part B): 104819.
- [24] LI Xinke, ZHAO Jiawei, DUAN Jiabin, et al. Simulation of cooling plate effect on a battery module with different channel arrangement [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 49: 104113.
- [25] 刘显茜, 曹军磊, 李文辉, 等. 蜘蛛网流道冷板冷却液对向流锂离子电池散热分析 [J]. *材料导报*, 2024, 38(4): 10-15.
- LIU Xianqian, CAO Junlei, LI Wenhui, et al. Analysis of lithium-ion battery heat dissipation with coolant counter current in spider web channel cooling plate [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(4): 10-15.
- [26] 杨涵, 刘宁豪, 高强, 等. 基于 NSGA-II 的双迷宫流道液冷板结构优化设计 [J/OL]. *材料导报*. (2024-08-20) [2024-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240820.1319.004.html>.
- YANG Han, LIU Ninghao, GAO Qiang, et al. Optimized design of double labyrinth runner liquid cooling plate structure based on NSGA-II [J/OL]. *Materials Reports*. (2024-08-20) [2024-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240820.1319.004.html>.
- [27] 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.
- [28] LIU Huaqiang, GAO Xiangcheng, ZHAO Jiyun, et al. Liquid-based battery thermal management system performance improvement with intersected serpentine channels [J]. *Renewable Energy*, 2022, 199: 640-652.
- [29] ZHAO Ding, LEI Zhiguo, AN Chao. Research on battery thermal management system based on liquid cooling plate with honeycomb-like flow channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119324.
- [30] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [31] 劳永春. 液冷式锂离子电池热管理系统设计及优化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

- [32] 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(11): 14-26.
- LI Junhao, REN Xiaolong, YANG Jiong, 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(11): 14-26.
- [33] 段志勇, 马菁. 锂电池热管-液冷板式冷却结构多目标优化 [J]. 汽车工程, 2023, 45(11): 2047-2057.
- DUAN Zhiyong, MA Jing. Multi-objective optimization of lithium battery composite cooling structure based on heat pipes and liquid cooling plate [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11): 2047-2057.
- [34] ZHANG Shunbo, NIE Fen, CHENG Jinpeng, et al. Optimizing the air flow pattern to improve the performance of the air-cooling lithium-ion battery pack [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236 (Part A): 121486.
- (编辑 武红江)