



仿生叶脉的非均匀流道优化及电池液冷板传热特性研究

张泽龙, 张 信, 焦 艳, 朱 虹, 胡浩威, 丁 超
(安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为提高锂离子电池热管理系统的热工水力性能, 本工作提出了一种受仿生叶脉启发的非均匀流道结构液冷板。该冷板沿冷却剂主流方向划分为入口区、过渡区和出口区3个功能区域。通过数值模拟, 系统研究了分支数量、分支间距和分支宽度对冷却剂分配、温度均匀性及压降的影响。结果表明, 增加分支数量所降低的压降幅度大于其引起的最高温度上升幅度。入口区采用适当的非均匀分支间距可改善冷却剂再分配, 在可接受的水力代价下提升电池温度均匀性。分支宽度的影响效果与其所在区域密切相关: 增大入口区和出口区的分支宽度会降低流动阻力, 但削弱热性能; 而适度增加过渡区宽度则可以改善温度均匀性。基于正交试验法和等权重法构建综合性能函数, 确定了最优结构参数组合。在此结构下, 最高温度、温差和压降分别为39.51℃、11.13℃和50.11 Pa, 与原结构 ($T_{\max}=40.38^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=12.44^{\circ}\text{C}$, $\Delta P=45.95\text{ Pa}$) 相比, 优化设计的最高温度降低2.15%, 温差降低10.53%, 而压降升高9.05%。综上, 本研究所提出的非均匀设计在仅付出中等水力代价的情况下, 显著改善了电池温度均匀性并抑制了温度峰值, 展现了良好的综合热工水力性能。

关键词: 锂离子电池; 热管理系统; 仿生叶脉; 液冷板

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0389

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3448-14

Biomimetic leaf-vein-inspired nonuniform channel optimization and heat transfer characteristics of battery liquid cooling plate

ZHANG Zelong, ZHANG Xin, JIAO Yan, ZHU Hong, HU Haowei, DING Chao
(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: A biomimetic liquid cold plate with a leaf-vein-inspired nonuniform channel structure is proposed to improve the thermo-hydraulic performance of lithium-ion battery thermal management systems. The proposed cold plate was divided into three functional regions: inlet, transition outlet. The effects of branch number, spacing, and width on coolant distribution, temperature uniformity, and pressure drop were systematically investigated using numerical simulations. The results demonstrate that increasing the branch number reduced pressure drop but had little effect on the maximum temperature. An appropriate nonuniform branch spacing in the inlet region improved coolant redistribution and battery temperature uniformity with an acceptable hydraulic penalty. The effect of branch width depended strongly

收稿日期: 2026-05-09; 修改稿日期: 2026-06-29。

基金项目: 国家自然科学基金 (52476097、52576051、52406166)。

第一作者: 张泽龙 (1989—), 男, 讲师, 主要研究方向为传热强化技术、锂电池热管理, E-mail: zzl@ahjzu.edu.cn; 通信作者: 丁超, 教授, 研究方向为建筑环境与火灾防控、新能源火灾、防火材料, E-mail: dc707@ustc.edu.cn。

引用本文: 张泽龙, 张信, 焦艳, 等. 仿生叶脉的非均匀流道优化及电池液冷板传热特性研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3448-3461.

Citation: ZHANG Zelong, ZHANG Xin, JIAO Yan, et al. Biomimetic leaf-vein-inspired nonuniform channel optimization and heat transfer characteristics of battery liquid cooling plate[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3448-3461.

on the region. Increasing the width in the inlet and outlet regions reduced flow resistance but weakened thermal performance, whereas a moderate increase in the transition region improved temperature uniformity. Using orthogonal testing and equal-weight methods, a comprehensive performance function was constructed to determine the optimal combination of structural parameters. This optimization yielded a maximum temperature ($T_{\max}$) of 39.51°C , a temperature difference (ΔT) of 11.13°C , and a pressure drop of 50.11 Pa . Compared with the original structure ($T_{\max} = 40.38^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 12.44^{\circ}\text{C}$, and $\Delta P = 45.95\text{ Pa}$), these values represent a 2.15% decrease in $T_{\max}$, a 10.53% decrease in ΔT , and a 9.05% increase in ΔP . These results demonstrate that the proposed nonuniform design significantly improves the temperature uniformity of lithium-ion batteries while suppressing the temperature peak at only a moderate hydraulic cost, demonstrating excellent comprehensive thermo-hydraulic performance.

Keywords: lithium-ion battery; thermal management system; biomimetic leaf-vein; liquid cooling plate

锂离子电池作为新能源汽车的核心储能部件, 凭借其高能量密度、高效率及长循环寿命, 在电动汽车、储能系统及航空航天领域得到了广泛应用^[1-2]。然而, 在高倍率充放电条件下, 锂离子电池会产生大量热量, 过高的温升及温度不均匀性可能导致性能衰退、使用寿命缩短, 严重时甚至引发热失控^[3-5]。因此, 开发高效、可靠且能保证运行安全和温度均匀的电池热管理系统, 已成为当前研究的关键问题^[6-8]。目前, 主流的电池热管理技术包括空气冷却、液体冷却、相变材料冷却、热管冷却及其混合形式。其中, 液体冷却因其较高的换热系数、强大的温度调节能力以及良好的工程适应性, 被视为适用于中高倍率工况下电池模组的关键热管理技术^[9-12]。在液冷热管理系统中, 液冷板是热量排出与冷却剂分配的核心部件, 其内部流道布局、分支结构及流动阻力直接影响系统的传热性能和温度均匀性。因此, 液冷板的结构优化已成为动力电池热管理领域的重要研究方向^[13-15]。

传统平行流道、蛇形流道和多通道液冷板结构简单、加工方便, 但在实际运行中容易出现冷却剂分配不均、局部换热不足和压降较大等问题, 从而导致电池模组局部热点和较大温差。为改善上述不足, 仿生设计被引入液冷板流道构型中。血管、叶脉、蜂窝和分形网络等自然输运结构具有良好的分流与传质特性, 可为冷却剂均匀分配和局部换热强化提供设计参考。已有研究表明, 仿生分支流道能够有效降低电池最高温度和模组温差, 并在一定程

度上提升流动性能^[16-21]。随着研究的深入, 液冷板设计已由单一几何参数改进逐渐转向多参数、多目标协同优化。拓扑优化、响应面法、神经网络、遗传算法、群智能算法及综合评价方法等被用于建立结构参数与热-流性能之间的关联关系, 并在最高温度、温差、压降和泵功之间寻求综合平衡^[22-28]。然而, 现有研究多关注整体拓扑重构、入口出口布置或全局流道参数优化, 对沿冷却剂主流方向不同区域内分支数量、分支间距和分支宽度非均匀分布的影响关注相对不足。尤其是在保持整体仿生流道拓扑结构不变的条件下, 如何通过局部流道宽度调节实现冷却剂再分配, 并阐明其对流场演化、温度均匀性和压降损失的作用机制, 仍需进一步研究。

基于此, 本工作以动力电池液冷板为研究对象, 在成熟传热-流动控制方程的基础上, 构建面向冷却剂再分配的仿生叶脉非均匀流道结构模型。根据冷却剂主流方向, 将冷板划分为入口区、过渡区和出口区三个功能区域, 分别调节各区域分支数量、分支间距和分支宽度, 分析其对流场、温度场和压降特性的影响, 揭示分区非均匀结构对冷却剂分配和电池温度均匀性的调控机制。本工作并未将基础生热模型和流体控制方程作为主要创新点, 而是在已有均匀仿生分支流道研究的基础上, 重点关注不同区域流道参数非均匀配置对热工水力性能的影响。在此基础上, 采用混合水平正交设计方法, 以最高温度、温差和压降为评价指标, 构建综合性能函数, 对液冷板结构参数进行协同优化, 获得兼顾散热性

能与流动阻力的优化方案。本研究可为仿生液冷板结构设计及动力电池热管理系统优化提供参考。

1 模型建立与数值方法

1.1 冷板结构设计

本研究提出了一种受植物叶脉启发的液冷板结构。仿生流道布局旨在克服传统冷板的常见缺点,如冷却剂分配不均、泵功消耗大以及进出口压降过高。该结构由一条中央主流道和两侧多条倾斜侧流道组成,形成了一个并行主-分支网络,可提升冷却剂分配的均匀性。工作时,冷却剂流经主流道后进入侧流道。靠近入口处的冷却剂温度较低且流速较高,该区域的传热较强。随着冷却剂向出口流动,其温度上升,换热能力逐渐下降,导致电池温度分布不均匀,如图1所示。此外,电池产生的大部分热量通过底面与冷板的接触热交换导出,从而在电池内部形成自上而下递减的温度梯度。基于此,本研究提出一种沿主流方向分区调控的非均匀仿生叶脉流道结构,旨在通过优化冷却剂流量再分配,提升锂离子电池热管理系统的综合热工水力性能。其中,入口区(in)、过渡区(tra)和出口区(out)的长度分别约占总流道长度的1/3、1/2和1/6。入口区主要用于实现冷却剂的初始分配,并强化高温区域附近的对流换热;过渡区作为冷却剂流量再分配的核心区域,对温度均匀化和改善整体传热性能起主导作用;出口区则主要用于抑制下游局部热点,并维持流场的稳定性与冷却连续性。

与传统平行流道相比,仿生叶脉流道通过主流道一支流道网络增加了冷却剂横向分配路径,可减弱部分通道流量过大或过小导致的温度不均;与蛇形流道相比,该结构具有并联分流特征,可在保证换热面积的同时降低沿程阻力累积;与一般均匀仿生分支流道相比,本工作进一步引入分区非均匀设计,使入口区承担初始分配和流动调节功能,过渡区承担主要流量再分配和温度均匀化功能,出口区用于抑制下游热点并维持冷却连续性。因此,该结构的优势不仅体现在仿生形态本身,更体现在基于区域热负荷和流动阻力差异的定向调控能力。

冷板的初始几何参数如下:尺寸为283 mm×152 mm×8 mm,主流道宽度为10 mm,侧流道宽度为2 mm,侧流道与主流道夹角为80°。这些参数将作为后续热流体分析和结构优化的基础。

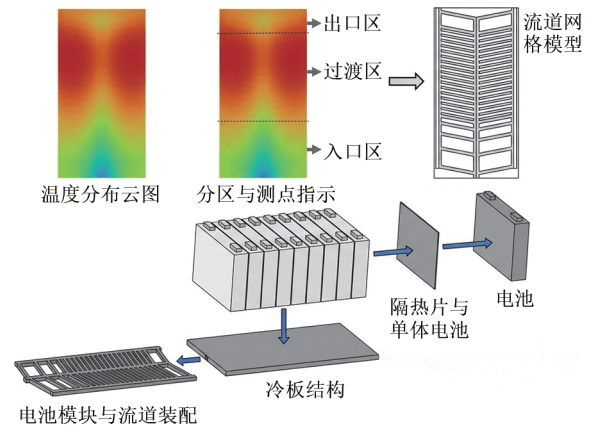


图1 仿生流道设计及电池模组结构

Fig.1 Biomimetic flow channel design and battery module structure

1.2 电池生热模型

本研究采用 Bernardi 等^[29]提出的经典生热模型来表征锂离子电池充放电过程中的热行为。总生热量包括由内阻引起的不可逆焦耳热和电化学反应产生的可逆热。体积生热率可表达为

$$q = \frac{1}{V_b} \left[(U_{ocv} - U) - T \frac{\partial U_0}{\partial T} \right] \quad (1)$$

式中, I 为充放电电流, A; V_b 为锂离子电池体积, m^3 ; U_{ocv} 为锂离子电池开路电压, V; U 为锂离子电池端电压, V; T 为锂离子电池温度, K; $\partial U_{ocv} / \partial T$ 为锂离子电池熵热系数, V/K。

简化方程为

$$q = \frac{1}{V_b} \left(I^2 R_0 - IT \frac{\partial U_0}{\partial T} \right) \quad (2)$$

本研究所用三元锂离子电池模型额定容量为 50 Ah, 额定电压为 3.65 V, 内阻为 0.7 mΩ。放电时可逆热视为正值, 充电时为负值, 相应的电压差设为 0.051 V。在 1 C (50 A) 和 2 C (100 A) 放电倍率下, 计算得到的体积生热率分别为 11752 W/ m^3 和 33025 W/ m^3 。

上述生热模型和流体控制方程属于电池热管理数值研究中较为成熟的理论基础, 其作用是保证热源计算和流-固耦合传热分析的可靠性与可比性。本工作的研究重点并非重新构造基础生热方程或流体控制方程, 而是在相同热源与边界条件下, 比较不同分区非均匀仿生流道结构对冷却剂再分配、温度均匀性和压降损失的影响。

1.3 控制方程与数值方法

模拟中, 将冷却剂建模为单相、不可压缩、稳

态且密度恒定的流体。冷板内的流态使用雷诺数判定, 定义如下:

$$Re = \frac{\rho_c V D_h}{\mu} \quad (3)$$

式中, ρ_c 为冷却剂密度, kg/m^3 ; V 为通道内流体速度, m/s ; D_h 为水力直径, μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。在进出口截面积固定的条件下, 冷却剂的质量流量与其速度成正比。每个矩形冷板入口尺寸为 $10\text{ mm}\times 6\text{ mm}$, 对应水力直径为 7.5 mm 。冷却剂采用 50% 的乙二醇-水混合液, 室温下运动黏度为 $3.64\text{ mm}^2/\text{s}$, 热导率、比热容等性质如表 1 所示, 质量流量为 0.01 kg/s 。在此条件下, 计算得到所有 3 种通道设计的雷诺数均为 320, 雷诺数低于 2300, 流动处于层流状态, 有利于降低系统泵功消耗。

连续性方程:

$$\nabla(\rho u) = 0 \quad (4)$$

动量方程 (层流):

$$\rho_c (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (5)$$

式中, P 为压力, Pa ; μ 为水的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\mathbf{u}$ 为冷却剂流速, m/s 。

冷却剂能量方程:

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

式中, k_c 为有效热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ρ_c 为流体密度, kg/m^3 ; c_c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

冷板能量方程:

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = -\nabla \cdot (\lambda_p \nabla T_p) \quad (7)$$

式中, ρ_p 、 c_p 和 λ_p 分别代表冷板材料的密度 (kg/m^3)、比热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] 和热导率 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]。

1.4 边界条件

本研究选取容量为 50 Ah 、尺寸为 $148\text{ mm}\times 27\text{ mm}\times 97\text{ mm}$ 的方形锂离子电池作为研究对象, 其材料热物性参数见表 1。考虑到方形电池内部极片、隔膜和集流体呈层状堆叠, 电池本体传热过程具有明显各向异性, 因此采用 3 个主方向的等效热导率进行描述, 分别设为 k_x 、 k_y 和 k_z 。模型坐标系中, x 方向为电池长度方向, 并与冷却剂主流方向一致; y 方向为电池高度方向; z 方向为电池厚度方向, 即垂直于液冷板换热面的方向。其中, x 和 y 方向为电池面内传热方向, 导热能力相对较强; z 方向为厚度方向, 受层状结构影响, 热导率较低。

相比之下, 冷板、绝缘垫和冷却剂均假设为各向同性材料, 其热导率在各方向上保持一致。

仿真中, 环境温度维持在 26°C , 冷却剂以 25°C 和质量流量 0.01 kg/s 进入系统。出口边界条件定义为压力出口。所有暴露于环境的电池表面采用自然对流边界条件, 对流换热系数为 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

在材料选择方面, 电池外壳为铝, 冷板采用 6063 铝合金, 其导热性高。电芯之间放置硅基气凝胶隔热垫, 以最小化它们之间的热干扰。系统使用特定体积分数的水基冷却剂, 以确保有效的导热性和流动稳定性。

表 1 模型所用材料的热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of materials used in the model

材料	密度/ (kg/m^3)	热导率/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	比热容/ $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
电芯	2218	$k_x = 23.4, k_y = 17.2, k_z = 5.3$	1060
冷板	2690	201	900
绝缘垫	3	0.021	1000
冷却剂	1070	0.384	3300

1.5 网格无关性验证

为保证数值模拟的准确性和可靠性, 对计算域进行系统化的网格无关性研究。采用混合网格划分策略, 核心区域生成非结构多面体网格, 流-固界面处铺设棱柱边界层网格, 并采用 1.2 的边界层扩张比, 以更好地捕捉壁面热通量变化。网格尺寸在 $1\sim 10\text{ mm}$ 间变化, 总单元数从 10 万到 400 万进行逐步加密测试。在几何曲率大的区域应用基于二阶曲率的自适应加密技术, 以提高局部分辨率。不同网格密度下的仿真结果表明, 当网格数量达到 211 万时, 电池表面最高温升趋于稳定 (图 2)。此外, 网格质量参数证实了数值稳定性, 正交质量大于 0.15, 纵横比低于 5, 单元体积变化率低于 0.3。计算得到的网格收敛指数低于 3%, 进一步证实了解的独立性和可靠性。

综合考虑计算精度和资源效率, 选择了约 312 万单元的精细网格。使用 ANSYS Fluent 2023R1 平台, 该方案下的典型仿真运行时间保持在 10 h 以内, 实现了精度与计算成本的平衡。

1.6 模型验证

为确保仿真结果的准确性和可靠性, 利用实验数据对建立的电池热模型进行验证。根据 Chang

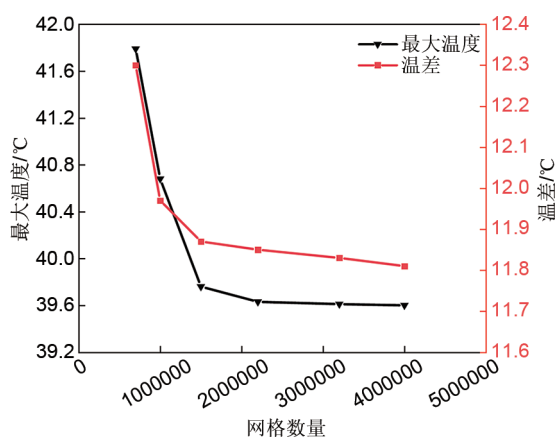


图2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

等^[30]的研究, 锂离子电池的温升过程包括3个阶段: 初始缓慢加热阶段、温度平台期和最后快速升高阶段。然而, 传统数值方法难以有效地捕捉这些转变。Chang 等进一步观察到, 在 2 C 及以上放电倍率下, 前两个阶段变得不明显甚至消失, 温升呈现近线性趋势。因此, 本研究在 2 C 放电条件下, 采用 Bernardi 模型计算的恒定体积生热率作为热源输入, 未引入时变修正系数。此外, 电池类型和建模方法与参考文献的一致性增强了模拟结果的可比性。图3展示了 2 C 放电倍率下仿真结果与实验数据的对比。结果表明, 放电末期最大温度偏差不得超过 0.8°C, 证实该热模型能准确反映电池热响应, 并表现出较强的趋势一致性。这验证了其在后续电池热管理系统研究与优化中的适用性。

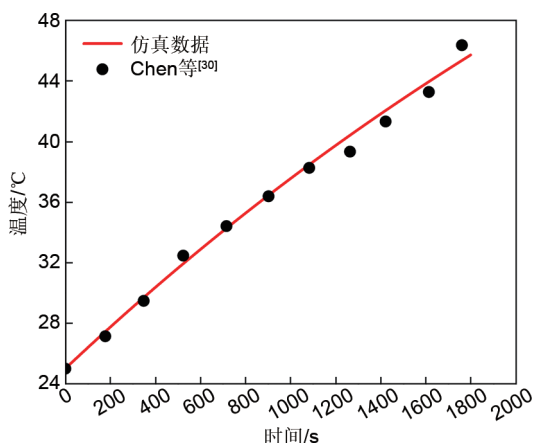


图3 生热模型验证

Fig. 3 Validation of the heat generation model

2 数值结果与分析

2.1 分支数量的影响

本节优化聚焦于改变分支流道的数量, 记为 n 。在恒定流量条件下, 分支宽度固定为 5 mm。本工作设计了分别有 15、20、25、30 和 35 个分支数量的液冷板结构, 研究它们对电池组的冷却性能影响。15、25、35 个分支数量的几何构型如图 4 所示。

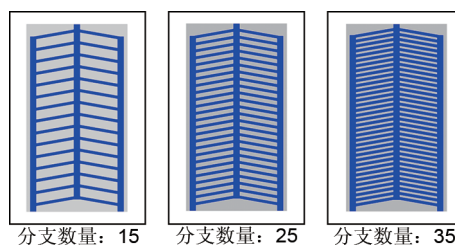


图4 不同分支数量的几何结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of geometrical structures with different branch numbers

不同分支数量变化对电池温差、最高温度、压降等指标的影响结果和温度分布结果如图 5 所示。从图 5(a)中可以看到, 当分支数量从 15 增至 35 时, 最高温度变化范围较小, 从 40.62°C 降低到 40.32°C, 降低比例仅为 0.71%, 表明分支数量对峰值温度影响有限。相反, 温差从 12.28°C 逐渐增至 13.01°C, 增加比例为 5.94%。温差的增加幅度大于最高温度的变化幅度, 表明冷却效果得到了增强。同时, 压降从 47.42 Pa 降至 44.04 Pa, 降幅比例约为 7.1%。这表明增加分支数量可以有效降低冷板的水力阻力。

图 5(b)中的温度云图进一步显示, 高温区面积减小, 表明分支数量的增加改善了冷却效果, 与图 5(a)结果相对应。虽然分支数量增加, 电池底部平均温度降低, 但仍然存在局部高温区, 其均匀性变差。增加分支数量扩大了总流通面积, 降低了冷却剂速度, 每个通道内的局部传热强度减弱, 导致通道过渡区的冷却效果下降, 出现局部高温区域。但同时总流通面积增大, 减小了流动阻力, 从而降低了压降。然而, 冷却剂也更多地分布在通道间均匀分配, 削弱了局部对流换热, 限制了最高温度的降低。

总体上, 增加分支数量能够有效降低系统压

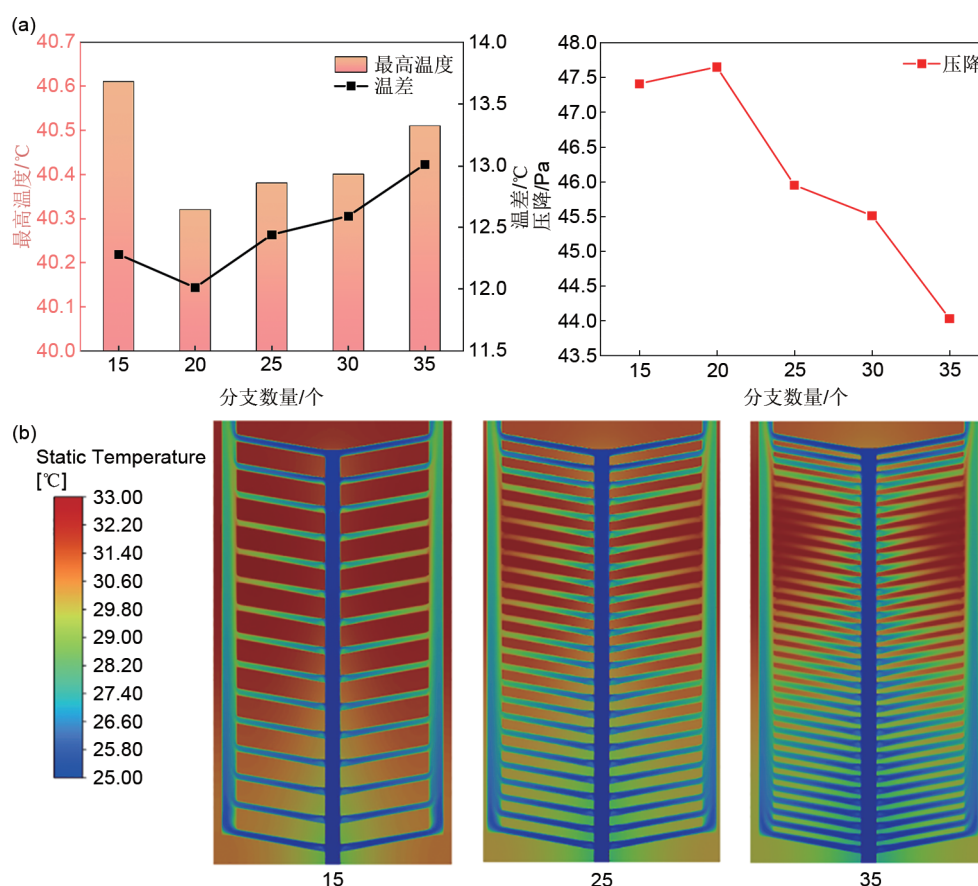


图5 (a) 不同分支数量下的数值结果; (b) 液冷板中间截面温度云图

Fig. 5 (a) Numerical results for different branch numbers; (b) Temperature contours on the mid-plane of the liquid cold plate

降,从而减小冷却液的流动阻力,但当分支数量超过20个后,电池最高温度及最大温差均有所增加。因此,结构设计需要在冷却性能与流动阻力之间进行平衡。在所研究的范围内,分支数量为25~30时综合性能相对均衡。

2.2 分支间距的影响

本节在恒定总流量下,通过改变分支流道的间距对液冷板进行优化。在此条件下,改变分支宽度或间距对冷却性能的影响类似于改变分支数量,因为两者都是通过改变并联通道的等效水力阻力分布,进而改变冷却剂流量分配。与传统研究主要通过调整分支数量来实现均匀间距不同,本研究进一步引入了非均匀分支间距设计,以实现冷却剂流动行为和温度分布的更精细调控。

沿主流方向,将冷板划分为3个特征区域:入口区、过渡区和出口区。每个区域布置不同数量的分支管道,从而形成沿流向变化的间距分布。基于此设计,系统研究了流动再分配对电池温度均匀性

和冷却性能的影响。在与前述相同的模拟条件下,首先对入口区域进行参数化研究,考虑了分支数为9、7、5、3和1的5种情况。

不同入口区分支数量的最高温度、温差、压降的计算结果如图6所示,当入口区域分支数从9减至1时,电池温差先降低再上升。最小温差11.25°C出现在分支数为3时,较分支数量为9的方案温差降低了约9.61%。最高温度也呈现相似趋势,逐步下降并在分支数为3时达到最小值40.09°C。相比之下,压降随入口区域支管数量减小单调增加。这表明适当增加入口区域间距(或减少分支数,增加非均匀性)可以改善冷却剂再分配,提高温度均匀性,但总的通道截面变小,流动阻力增加。

综合考虑热与水力性能,入口区域分支数为3~5时可提供相对较优的综合性能。入口区域的非均匀间距优化能有效调控冷却剂分配,抑制入口附近过度的流体集中,并增强下游传热。与仅均匀调

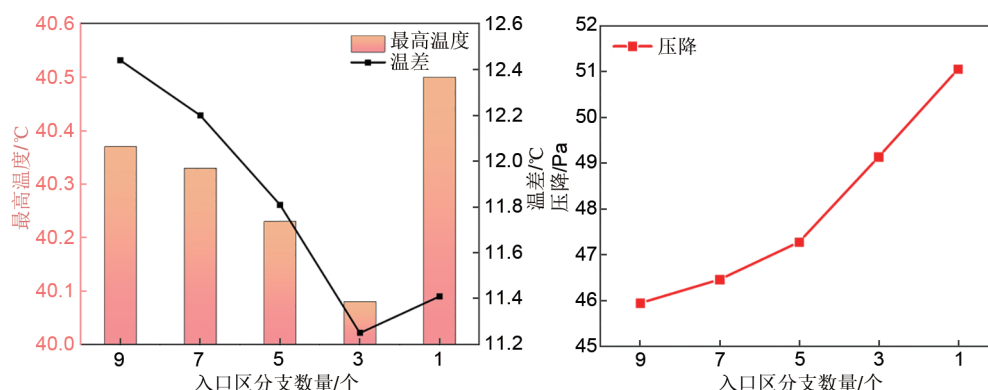


图6 入口区域不同分支数量下的数值结果

Fig. 6 Numerical results for different branch numbers in the inlet region

整分支间距相比,引入适当的非均匀间距分布能够在可接受的压降代价下提高电池温度均匀性。

对于过渡区域,分支间距的影响相对有限,因为该区域面积较大且热生成相对集中,而分支数量已经很多,各分支内流速较低。在相同模拟条件下,考虑了分支数为13、10和7的3种代表性方案。计算结果如图7所示,随着过渡区域间距增大(即分支数从13减至7),温差从12.44°C增至12.98°C,最高温度从40.38°C升至40.87°C,表明温度水平和温度均匀性同时恶化。相比之下,压降几乎稳定在46 Pa左右,表明过渡区域的间距变化主要影响局部流量再分配,而非整体水力阻力。由于冷却剂在此区域已经相对分散,进一步的间距调整对改善流量分配的能力有限,甚至可能削弱向下游区域的冷却剂供应。

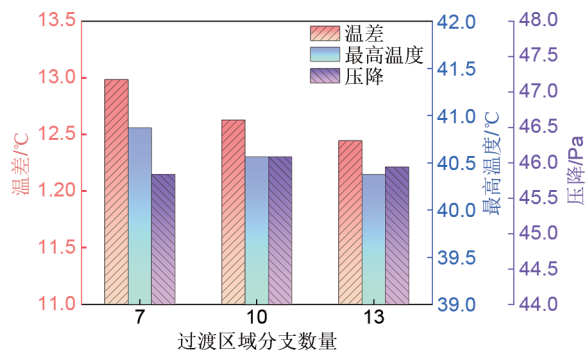


图7 过渡区域不同分支数量下的数值结果

Fig. 7 Numerical results for different branch numbers in the transition region

对于出口区域,由于几何限制,分支间距的调节范围相对较小。为保持结构可行性,考虑了分支数为3、2和1的3种代表性方案。

出口区域分支数量对最高温度、温差和压降影响结果如图8所示,随着出口区域通道间距增大(即分支数从3减至1),温差从12.44°C降至12.25°C,最高温度从40.38°C降至40.18°C。这表明增大出口区域通道间距(减小分支数)可以改善出口附近的局部换热条件,在一定程度上抑制峰值温度。同时,压降增加幅度低于1 Pa,表明水力代价上升有限。由于出口区域位于主流道末端,其结构调整主要影响局部流动行为,对整体压降影响较小。

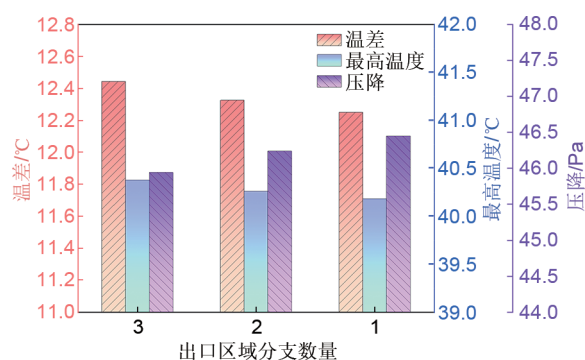


图8 出口区域不同分支数量下的数值结果

Fig. 8 Numerical results for different branch numbers in the outlet region

2.3 分支宽度的影响

本节在恒定流量条件下,研究了分支宽度对液冷板冷却性能的影响。分支总数固定为25,并将流道沿主流方向划分为入口区、过渡区和出口区。通过在各区域分配不同的分支宽度,系统分析了分支宽度对冷却剂分配和电池温度调控的影响。

对于入口区域,考虑了2 mm、4 mm、6 mm和8 mm 4种分支宽度,其他所有模拟参数与之前

保持一致，计算结果如图9所示。

如图9(a)所示，随着入口区域分支宽度增加，最高温度和温差均逐渐升高，而压降则显著下降。当分支宽度从2 mm增至8 mm时，最高温度从39.62℃升至40.59℃，温差从11.39℃上升至12.78℃，压降从56.43 Pa降至43.60 Pa。这些结果表明，入口区域分支宽度对热性能和水力性能都有显著影响。一般而言，较大的分支宽度有利于降低流动阻力，但会削弱温度控制能力。

这一趋势可归因于分支宽度增加导致流道截面积增大。在恒定流量条件下，冷却剂速度降低，削弱了入口区的对流换热，导致整体温度水平升高和温度均匀性变差。同时，流速降低减少了摩擦损失，导致压降显著下降。图9(b)中的温度云图进一步显示，随着分支宽度增加，高温区域逐渐扩大，表明温度均匀性恶化。因此，入口区域分支宽度在散热能力与流动阻力之间存在明确的权衡关系。

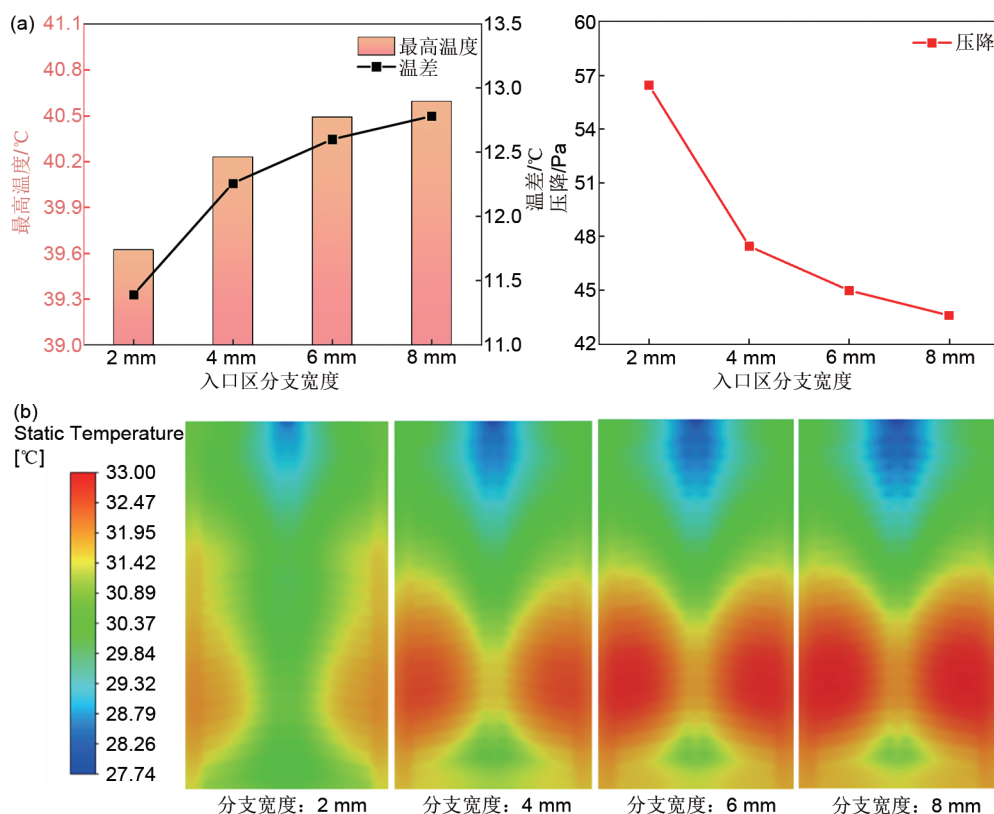


图9 (a) 入口区域不同分支宽度下的数值结果；(b) 电池底面温度云图

Fig. 9 (a) Numerical results under different inlet-region branch widths; (b) Temperature contours on the bottom surface of the battery

对于过渡区域，在相同模拟条件下也考虑了2 mm、4 mm、6 mm和8 mm的分支宽度。过渡区域随分支宽度变化的温差、最高温度、压降变化和电池底面的温度分布计算结果显示在图10中。在图10(a)中可以看到，随着过渡区域分支宽度增加，最高温度和温差均先下降后趋于稳定，而压降则逐渐降低。当宽度从2 mm增至4 mm时，两个温度指标均显著下降，表明适当增加过渡区分支宽度可以改善流量分配并增强换热。当宽度进一步增至6~8 mm时，温度变化变得非常小，说明热性能

改善已渐趋饱和。同时，流动阻力的持续减小导致压降稳步下降。

从物理角度看，过渡区是连接入口区与出口区的关键调节段，其分支宽度直接影响流向流量分配。适度增加分支宽度可降低局部水力阻力，促进冷却剂更均匀地输送到下游区域，从而抑制局部热量积聚，减小温度梯度。然而，当宽度过大时，冷却剂速度降低，对流换热的增强效果减弱，导致热性能改善趋于有限。图10(b)的温度分布进一步证实了这一趋势：高温区域随宽度增加而缩小，但当

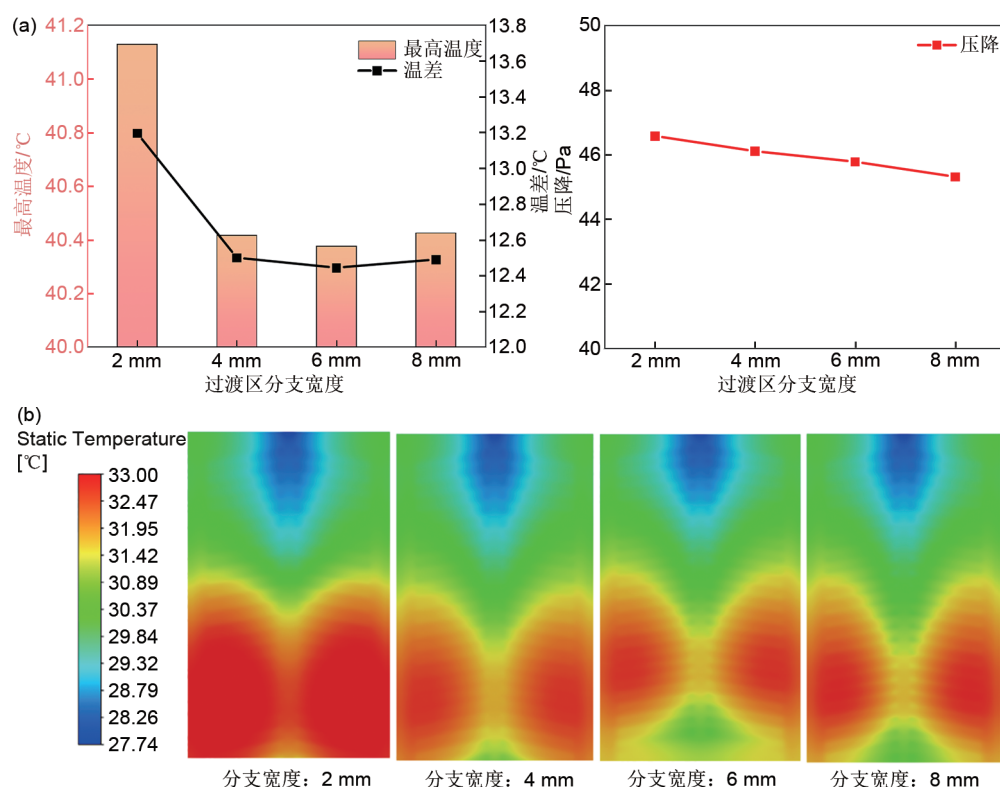


图10 (a) 过渡区域不同分支宽度下的数值结果; (b) 电池底面温度云图

Fig. 10 (a) Numerical results for different branch widths in the transition region; (b) Temperature contours at the bottom surface of the battery

宽度超过一定范围后,温度场变化甚微。总的来说,过渡区域分支宽度存在一个合适的范围,可在维持相对低压降的同时改善温度均匀性。

对于出口区域,在相同模拟条件下研究了2 mm、4 mm、6 mm和8 mm的分支宽度,图11显示了随分支宽度变化的温差、最高温度、压降变化和电池底面的温度分布。出口区分支宽度对最高温度、温差、压降的影响结果如图11(a)所示,随着出口区域分支宽度增加,最高温度和温差持续上升,而压降则逐渐降低。当宽度从2 mm增至8 mm时,热性能逐渐恶化,表明较大的出口区分支宽度削弱了下游段附近的局部换热能力。同时,更大的流通面积降低了水力阻力,导致压降稳步下降。

此行为主要归因于出口区域分支宽度增加导致冷却剂速度降低。尽管较大宽度有利于降低局部阻力,但它也削弱了出口段的对流换热,而此处的冷却剂温度已经相对较高,导致对局部热点的抑制效果变差,最高温度和温差升高。图11(b)显示了随出口区域分支宽度和温度变化的电池底部温度分

布,结果显示随着出口区域分支宽度增加,高温区域逐渐扩大,证实了温度均匀性的恶化。因此,选择出口区域分支宽度时,也需权衡热性能与水力损失。

综上,可以看出分支宽度的影响因区域而异。增大入口和出口区域分支宽度倾向于削弱热性能同时降低压降,而在过渡区适度增加分支宽度可在水力代价很小的前提下改善温度均匀性。这些结果表明,分支宽度是进行分区流动调控的关键设计参数,应以非均匀的方式进行优化,以实现更好的整体热工水力性能。

3 正交设计与混合水平优化方法

3.1 正交试验设计

为系统研究流道结构参数对液冷板热工水力性能的影响,将冷板沿冷却剂主流方向划分为入口区、过渡区和出口区3个功能区域。考虑到这些区域在流动调节和传热增强中的不同作用,选取流道宽度和流道数量作为正交分析的主要设计因子。

对于每个区域,流道宽度设定4个水平,即

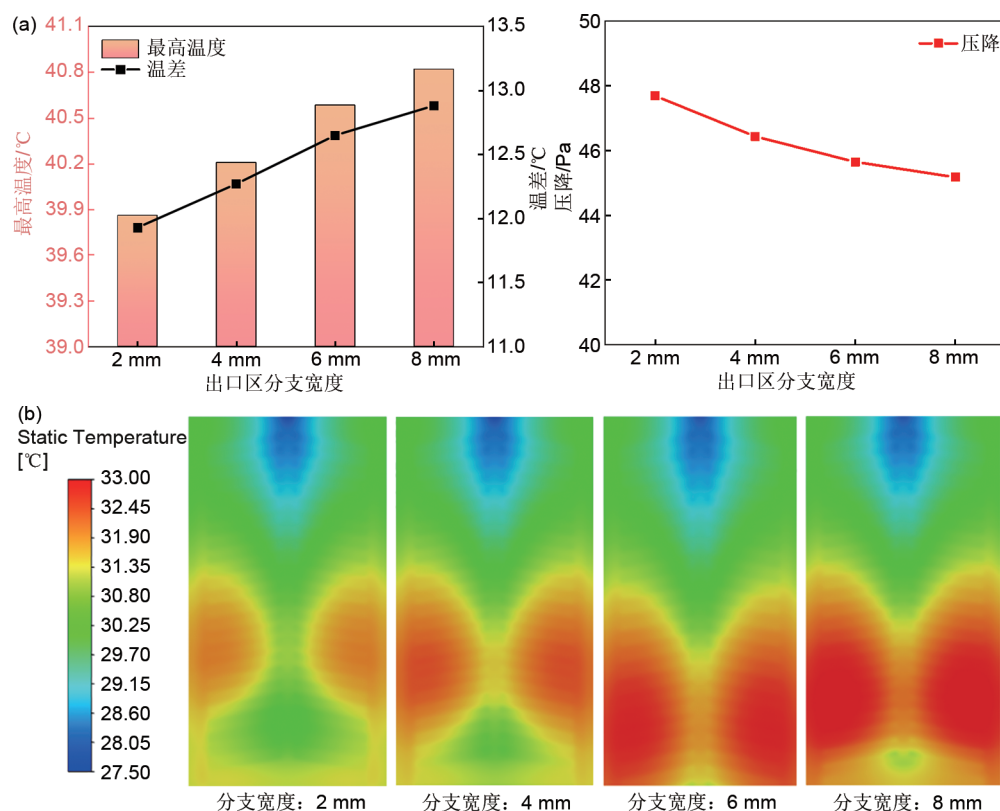


图 11 (a) 出口区域不同分支宽度下的数值结果; (b) 电池底面温度云图

Fig. 11 (a) Numerical results for different branch widths in the outlet region; (b) Temperature contours at the bottom surface of the battery

2 mm、4 mm、6 mm 和 8 mm。流道数量根据各区域的结构功能和流量分配要求设定，每个区域取 3 个水平：入口区为 7、5 和 3；过渡区为 13、10 和 7；出口区为 3、2 和 1。这些参数组合可以系统地研究区域水力阻力分布和冷却剂流量再分配，为后续结构优化奠定基础。

3.2 混合水平正交设计策略

本研究涉及 3 个四水平因子（流道宽度）和 3 个三水平因子（流道数量），构成了一个典型的混合水平多因子设计问题。原则上，严格混合水平正交表如 L144 ($4^3 \cdot 3^3$) 可以保证各因子之间的完全正交性。然而，这种方法需要大量的仿真案例，显著增加三维数值分析的计算成本。

因此，综合考虑正交性、计算效率和工程可行性，采用了基于标准正交表的混合水平正交设计。在此方法中，每个四水平因子由 2 列正交的两水平列表表示，并与三水平因子一同嵌入同一正交表中，从而可以独立且有效地评估所有结构参数的主效应。尽管该方法属于部分正交设计，不能准确捕获

高阶交互作用，但它足以揭示区域结构参数对流量分配和温度调节的主导效应，因此可在计算效率和分析精度之间实现合理平衡。

所得到的混合水平正交方案大幅减少了仿真案例的数量，同时保持了统计分析的有效性，因而适用于多参数液冷板结构的耦合优化。36 组正交试验计算的温差、最高温度和压降结果如表 2 中数据所示。表 2 中， W 与 S 分别表示分支宽度与分支数量，下标 in、tra、out 分别对应入口区域、过渡区域与出口区域。

3.3 综合优化分析及最优参数组合

为确定最优结构参数组合并揭示区域设计参数对整体热工水力性能的影响，基于混合水平正交结果，采用三步法——单指标矩阵分析、综合性能函数构建以及综合矩阵分析进行研究。该方法可在保持各主要因子效应独立分析的同时，实现多目标优化。

首先分别对温差、最高温度和压降 3 项性能指标进行分析。由于这 3 个指标均为望小型指标，直

表2 混合水平正交设计方案及对应结果

Table 2 Mixed-level orthogonal design scheme and corresponding results													
序号	W_{in}	S_{in}	W_{tra}	S_{tra}	W_{out}	S_{out}	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$T_{max}/^\circ\text{C}$	$\Delta P/\text{Pa}$	$z\Delta T$	z_{Tmax}	$z_{\Delta P}$	F
1	2	7	2	13	2	3	10.28	38.74	64.14	0.98	1.00	0.48	0.82
2	2	5	2	10	2	2	10.21	39.41	71.42	1.00	0.80	0.29	0.70
3	2	3	2	7	2	1	10.61	40.04	83.12	0.89	0.61	0.00	0.50
4	2	7	2	13	6	3	11.81	40.34	59.14	0.59	0.52	0.61	0.57
5	2	5	2	10	6	2	10.90	40.21	65.43	0.82	0.56	0.45	0.61
6	2	3	2	7	6	1	10.79	40.45	73.56	0.85	0.49	0.24	0.53
7	2	7	8	13	8	3	11.06	39.86	55.63	0.78	0.67	0.70	0.71
8	2	5	8	10	8	1	10.77	40.26	61.05	0.85	0.55	0.56	0.65
9	2	3	8	7	8	2	11.29	41.24	63.73	0.72	0.26	0.49	0.49
10	6	7	6	13	4	1	11.91	40.05	47.38	0.56	0.61	0.91	0.69
11	6	5	6	10	4	3	11.68	40.33	47.26	0.62	0.53	0.91	0.69
12	6	3	6	7	4	2	11.64	40.59	48.88	0.63	0.45	0.87	0.65
13	6	7	4	10	8	3	13.11	41.20	44.58	0.25	0.27	0.98	0.50
14	6	5	4	7	8	1	12.34	40.99	46.98	0.45	0.33	0.92	0.57
15	6	3	4	13	8	2	11.55	40.47	47.61	0.65	0.49	0.90	0.68
16	6	7	8	10	2	3	12.05	40.30	45.61	0.53	0.54	0.95	0.67
17	6	5	8	7	2	1	11.78	40.64	47.53	0.59	0.43	0.90	0.64
18	6	3	8	13	2	2	11.09	40.02	48.83	0.77	0.62	0.87	0.75
19	4	7	8	10	2	3	11.83	40.03	49.25	0.58	0.62	0.86	0.69
20	4	5	8	7	2	2	11.44	40.25	52.55	0.68	0.55	0.78	0.67
21	4	3	8	13	2	1	11.06	40.15	54.00	0.78	0.58	0.74	0.70
22	4	7	4	10	6	3	12.43	40.62	48.12	0.43	0.44	0.89	0.59
23	4	5	4	7	6	2	11.87	40.63	51.50	0.57	0.44	0.80	0.60
24	4	3	4	13	6	1	10.98	40.03	53.68	0.80	0.62	0.75	0.72
25	4	7	6	7	6	3	12.61	40.81	47.97	0.38	0.39	0.89	0.55
26	4	5	6	13	6	2	11.24	40.02	50.82	0.73	0.62	0.82	0.72
27	4	3	6	10	6	1	11.03	40.13	52.85	0.78	0.59	0.77	0.71
28	8	7	4	7	2	3	12.13	40.29	45.64	0.50	0.54	0.95	0.67
29	8	5	4	13	2	2	11.23	39.80	47.00	0.73	0.68	0.92	0.78
30	8	3	4	10	2	1	11.29	40.13	48.16	0.72	0.59	0.89	0.73
31	8	7	6	7	4	2	12.80	40.79	44.77	0.33	0.39	0.97	0.57
32	8	5	6	13	4	1	11.74	40.30	45.45	0.60	0.54	0.96	0.70
33	8	3	6	10	4	3	11.61	40.48	45.87	0.64	0.48	0.95	0.69
34	8	7	6	7	4	2	14.11	42.13	43.95	0.00	0.00	1.00	0.33
35	2	7	2	13	2	3	11.88	40.45	45.64	0.57	0.49	0.95	0.67
36	2	5	2	10	2	2	11.44	40.29	45.73	0.68	0.54	0.95	0.72

接计算各因子水平下的平均值，得到相应极差，汇总于表3。

极差分析的基本思想是通过比较同一因素在不同水平下评价指标平均值的变化幅度，判断该因素对目标响应的影响程度。具体而言，首先将正交试验结果按某一因素的不同水平分组，并计算各水平下性能指标的平均值；随后以各水平平均值中的最大值与最小值之差作为极差 R 。 R 值越大，说明该

因素水平变化对评价指标的影响越显著； R 值越小，则表明该因素影响相对较弱。对于最高温度、温差和压降等望小型指标，平均值越小代表该水平越有利于性能提升。本工作在单指标极差分析的基础上进一步构建综合性能函数，从而筛选兼顾散热性能和流动阻力的优化方案。

对于温差和最高温度这2个热性能指标，过渡区域分支数量展现出最大的极差，表明该因子对温

表3 不同因子对评价指标影响的极差分析

Table 3 Range analysis of the influence of different factors on the evaluation indices

评价指标	水平	W_{in}	S_{in}	W_{tra}	S_{tra}	W_{out}	S_{out}
$\Delta T/^\circ\text{C}$	1	11.32	11.90	11.27	11.05	11.05	11.75
	2	11.58	11.44	11.69	11.62	11.93	11.58
	3	11.74	11.63	11.98	12.33	12.04	11.86
	4	12.09	—	12.06	—	12.26	—
	R	0.77	0.46	0.79	1.28	0.78	0.28
$S_{tra} > W_{tra} > W_{out} > W_{in} > S_{in} > S_{out}$							
$T_{max}/^\circ\text{C}$	1	40.12	40.58	40.03	39.98	40.21	40.54
	2	40.35	40.27	40.48	40.33	40.47	40.36
	3	40.61	40.44	40.63	40.95	40.64	40.63
	4	40.94	—	40.89	—	40.92	—
	R	0.82	0.31	0.86	0.97	0.71	0.27
$S_{tra} > W_{tra} > W_{in} > W_{out} > S_{in} > S_{out}$							
$\Delta P/\text{Pa}$	1	49.87	54.03	47.62	45.48	45.48	52.11
	2	50.92	51.50	52.55	48.12	49.26	49.78
	3	54.63	50.92	58.37	52.86	52.85	48.63
	4	61.74	—	63.72	—	59.11	—
	R	11.87	3.11	16.10	7.38	13.63	3.48
$W_{tra} > W_{out} > W_{in} > S_{tra} > S_{out} > S_{in}$							

度分布和局部热点形成的影响最强。这一结果意味着过渡区是流动再分配的关键区域，分支数量的变化直接改变局部速度场，进而影响整体对流换热强度和温度均匀性。对于压降，过渡区域分支宽度表现出最大的极差，其次是出口区域分支宽度。这表明流道几何形状在水力阻力中起主导作用，增加流道宽度会降低局部速度和摩擦损失，从而显著影响整体压降。

总体来看，对于所有实验组的3项性能指标，过渡区域的结构参数均为最具影响的因子，表明冷板的中段是决定流量再分配和温度调控的核心区域。同时，不同指标的主导因子有所不同，反映出热性能与水力性能之间固有的平衡关系。例如，增加流道数量可改善温度均匀性，但也影响流动阻力。因此，最优结构组合不能仅由单指标分析确定，需要进行综合性能评价以实现协调的多目标优化。

为解决多目标冲突，首先对3个性能指标进行归一化处理。由于所有指标均为望小特性，采用以下归一化表达式：

$$z_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (8)$$

式中， $z_{ij} \in [0, 1]$ ，为归一化指标值，值越大表

示性能越好； $x_j^{\max}$ 代表参数最大值； $x_j^{\min}$ 代表参数最小值； x_{ij} 为数组对应值。

为避免人为赋权引入主观偏差，采用等权重法构建综合性能函数：

$$F = \frac{1}{3}(z_{\Delta T} + z_{T_{max}} + z_{\Delta P}) \quad (9)$$

式中， F 为综合评价指标， F 越大表示整体热工水力性能越好。式(9)计算的 F 对应的不同结构的数值结果显示在表2中。

综合表2的矩阵分析，结构参数对整体热工水力性能的影响排序为： $S_{tra} > W_{out} > S_{in} > W_{tra} > W_{in} > S_{out}$ 。这表明过渡区域的结构参数主导了液冷板的多目标性能。特别是，过渡区域的流道数量对温度均匀性和流动阻力展现出最强的耦合影响。从物理角度看，过渡区域是冷却剂再分配的关键区段，其结构变化直接影响速度场和局部对流换热，从而显著影响温度分布和压降特性。相比之下，出口区域流道数量对整体性能的影响最弱。

基于表2的综合矩阵分析，确定的最优参数组合为 $W_{in2}S_{in2}W_{tra4}S_{tra1}W_{out1}S_{out2}$ （下标数字代表正交表中的水平序号），即进口区域流道宽度4 mm，流道数量5；过渡区域流道宽度8 mm，流道数量13；出口区域流道宽度2 mm，流道数量2。在此优化结构下，仿真计算得到的结果为最高温度、温差和压降分别为39.51℃、11.13℃和50.11 Pa。与原始结构相比，优化设计最高温度降低2.15%，温差降低10.53%，而压降增加了9.05%。这些结果表明，本工作所提出的非均匀设计在仅付出中等水力代价的情况下，显著改善了电池温度均匀性并抑制了温度峰值，展现了良好的综合热工水力性能。

4 结 论

本研究提出了一种用于锂离子电池热管理的仿生叶脉启发的非均匀流道结构液冷板。通过数值模拟，系统研究了不同区域的分支数量、分支间距和分支宽度对液冷板热工水力性能的影响，并进一步采用混合水平正交设计方法进行结构优化，主要结论如下。

(1) 分支间距的影响表现出明显的区域差异。在入口区，适当的非均匀间距布置改善了冷却剂再分配，抑制了入口附近过度的流动集中，并在可接受的压降代价下增强了电池温度均匀性。在过渡

区, 间距变化对整体热工水力性能的影响有限; 而在出口区, 增加分支间距可略微改善局部传热并降低峰值温度, 压降仅略有增加。

(2) 分支宽度的影响同样与所在区域密切相关。增大入口和出口区分支宽度会降低流动阻力, 但削弱了热性能。与之相反, 适度增加过渡区分支宽度可改善温度均匀性和换热性能, 同时维持相对较低的压降, 表明分区非均匀宽度设计有利于整体热工水力优化。

(3) 混合水平正交分析表明, 各区域结构参数对最高温度、温差和压降的影响不同, 热性能与水力性能之间存在权衡关系。综合性能分析确定的最优参数组合为: 入口区分支宽度 4 mm、分支数量 5; 过渡区分支宽度 8 mm、分支数量 13; 出口区分支宽度 2 mm、分支数量 2。优化结构的最高温度、温差和压降分别为 39.51℃、11.13℃和 50.11 Pa。与原结构相比, 最高温度降低 2.15%, 温差降低 10.53%, 压降增加 9.05%, 说明该结构可在适度增加水力阻力的条件下有效抑制温度峰值并改善温度均匀性。

(4) 本工作提出的分区非均匀仿生叶脉流道主要通过局部流道参数调整实现性能提升, 无须整体拓扑重构。与复杂分形网络、多层流道或拓扑优化冷板相比, 该方法结构改造难度较低, 与现有液冷板加工和模具体系具有较好的兼容性, 可为动力电池液冷板的低成本优化设计提供参考。

符号说明

符号	含义	单位
q	体积生热率	W/m^3
I	充放电电流	A
V_b	电池体积	m^3
U_{ocv}	开路电压	V
U	电池端电压	V
T	温度	K
U_{ocv}/T	熵热系数	V/K
R_0	电池内阻	Ω
Re	雷诺数	
ρ_c	冷却剂密度	kg/m^3
V	流体速度	m/s
D_h	水力直径	mm
μ	动力黏度	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
u	速度矢量	m/s

P	压力	Pa
k_c	冷却剂热导率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
c_c	冷却剂比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
T_c	冷却剂温度	K
ρ_p	冷板密度	kg/m^3
c_p	冷板比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
λ_p	冷板热导率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
T_p	冷板温度	K
ΔT	电池温差	℃
T_{max}	最高温度	℃
ΔP	压降	Pa
F	综合评价指标	
z_{ij}	归一化指标值	

参考文献

- [1] HASAN M M, HAQUE R, JAHIRUL M I, et al. Advancing energy storage: The future trajectory of lithium-ion battery technologies [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 120: 116511. DOI:10.1016/j.est.2025.116511.
- [2] PHOGAT P, DEY S, WAN M. Powering the sustainable future: A review of emerging battery technologies and their environmental impact[J]. RSC Sustainability, 2025, 3(8): 3266-3306. DOI: 10.1039/d5su00127g.
- [3] 周海洋, 张振东, 盛雷, 等. 储能用锂电池浸没式热性能调控仿真及热安全实验研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(5): 1866-1874.
ZHOU H Y, ZHANG Z D, SHENG L, et al. Simulation of immersion thermal performance regulation and thermal safety experimental study for energy storage lithium batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(5): 1866-1874.
- [4] LIU J L, ZHOU L F, ZHANG H, et al. Aging and thermal behavior of lithium-ion battery under high charging current cycling[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2026, 69: 104466. DOI:10.1016/j.tsep.2025.104466.
- [5] ZHOU L F, JIN X M, CHUN E, et al. Thermal behavior and failure mechanisms of lithium-ion battery under high discharging rate[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 278: 127043. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127043.
- [6] BAI M C, LIU N J, LIU J X, et al. A review of thermal management technologies for electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 143: 119658. DOI: 10.1016/j.est. 2025. 119658.
- [7] DAS K, RAWAT S, SAINI D K. Advances in thermal management optimization for small electric vehicles using lithium-ion batteries: A comprehensive review[J]. Clean Energy, 2026, 10(1): 118-139. DOI:10.1093/ce/zkaf065.
- [8] TAKISO T A, YU J W. Research progress on the optimization of thermal management systems for lithium-ion batteries in new energy vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 134: 118144. DOI:10.1016/j.est.2025.118144.
- [9] WANG C, LIU Q X, WANG Z Q, et al. A review of power battery

- cooling technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 213: 115494. DOI:10.1016/j.rser.2025.115494.
- [10] FU P, ZHAO L, WANG X G, et al. A review of cooling technologies in lithium-ion power battery thermal management systems for new energy vehicles[J]. *Processes*, 2023, 11(12): 3450. DOI:10.3390/pr11123450.
- [11] PILALI E, SOLTANI M, HATEFI M, et al. Passive thermal management systems with phase change material-based methods for lithium-ion batteries: A state-of-the-art review[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 632: 236345. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.236345.
- [12] HE L G, GU Z H, ZHANG Y, et al. Review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles: Advances, challenges, and outlook[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(7): 4835-4857. DOI:10.1021/acs.energyfuels.2c04243.
- [13] ZHAO Y Z, ZHANG X L, YANG B, et al. A review of battery thermal management systems using liquid cooling and PCM[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109836. DOI: 10.1016/j.est.2023.109836.
- [14] YAO Z M, YIN R X, PENG Q G. A review on thermal management system and employed biomimetic technology to enhance lithium-ion battery packs for electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 111: 115399. DOI: 10.1016/j.est.2025.115399.
- [15] LIU H K, SHI C T, LIU C H, et al. A review of lithium-ion battery thermal management based on liquid cooling and its evaluation method[J]. *Energies*, 2025, 18(17): 4569. DOI: 10.3390/en18174569.
- [16] AN Z G, GAO W L, ZHANG J Y, et al. Enhancing heat dissipation of thermal management system utilizing modular dual bionic cold plates for prismatic lithium batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 87: 111541. DOI:10.1016/j.est.2024.111541.
- [17] CHEN Z H, HONG X B, HUO Z R, et al. Enhancing lithium-ion battery cooling efficiency through leaf vein-inspired double-layer liquid cooling plate design[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 88: 111584. DOI:10.1016/j.est.2024.111584.
- [18] DONG H Y, CHEN X C, YAN S T, et al. Multi-objective optimization of lithium-ion battery pack thermal management systems with novel bionic lotus leaf channels using NSGA-II and RSM[J]. *Energy*, 2025, 314: 134226. DOI: 10.1016/j.energy.2024.134226.
- [19] 李志强, 巴义春, 孙广强. 锂电池蜂窝形状流道冷板散热研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(5): 1776-1783.
- LI Z Q, BA Y C, SUN G Q. Research on heat dissipation of cold plates with honeycomb and fork channels of lithium batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(5): 1776-1783.
- [20] ZHAN S, SHI X L, LIU Y G, et al. Topology optimization of a new leaf-vein type bionic channel liquid-cooling plate for lithium batteries[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2025, 116: 109932. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2025.109932.
- [21] SUN G Q, LI Z Q, WANG F, et al. Study on cooling of bionic leaf-vein channel liquid-cooled plate for lithium-ion battery pack[J]. *Thermal Science*, 2024, 28(5 Part A): 3907-3919. DOI: 10.2298/tsci231030110s.
- [22] YUAN J F, GU Z J, BAO J, et al. Structure optimization design and performance analysis of liquid cooling plate for power battery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 87: 111517. DOI:10.1016/j.est.2024.111517.
- [23] MENG J H, MA C Y, LIU Y, et al. Artificial neural network (ANN) based prediction and optimization of battery thermal management for non-uniform flow channel design[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 111: 115404. DOI:10.1016/j.est.2025.115404.
- [24] ZHOU X L, GUO W L, SHI X Y, et al. Machine learning assisted multi-objective design optimization for battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 253: 123826. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.123826.
- [25] YE L S, LI C S, WANG C H, et al. A multi-objective optimization approach for battery thermal management system based on the combination of BP neural network prediction and NSGA-II algorithm[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 99: 113212. DOI: 10.1016/j.est.2024.113212.
- [26] YANG H, LIU N H, LI M M, et al. Design and optimization of heat pipe-assisted liquid cooling structure for power battery thermal management based on NSGA-II and entropy weight-TOPSIS method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 272: 126416. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.126416.
- [27] PENG Z Y, HUANG J X, LV J S, et al. Multi-objective optimization of cold plate with spoiler for battery thermal management system using whale optimization algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 260: 124974. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124974.
- [28] CHEN H P, ZHANG T S, HAN Z W, et al. Battery thermal management enhancement based on bionics[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 157: 107756. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107756.
- [29] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12. DOI:10.1149/1.2113792.
- [30] CHANG L J, CHEN W Y, MAO Z Y, et al. Experimental study on the effect of ambient temperature and discharge rate on the temperature field of prismatic batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 59: 106577. DOI:10.1016/j.est.2022.106577.