

交错式半浸没型液冷板对锂电池散热性能的影响

季家东^{1,2}, 端诚挚¹, 孙海庭¹, 叶凡¹, 刘玉笼¹, 黄卫¹

(1. 安徽理工大学机电工程学院, 232001, 安徽淮南;

2. 安徽理工大学煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 232001, 安徽淮南)

摘要: 针对传统液冷板散热不均、流道阻力大,以及全浸没冷却对冷却液要求苛刻、易引发电池短路等问题,提出了一种新型交错式半浸没型液冷板结构。采用数值模拟方法,结合 NTGK 电化学模型与流体传热控制方程,系统分析了入口流速、通道角度和通道间距比(通道间距与通道宽度之比)对散热性能的影响;通过单电池产热实验及网格独立性分析,验证了模型可靠性。研究结果表明:增加入口流速可显著提升液冷板的散热性能并降低电池模组最高温度,相较于入口速度为 1.50 m/s 工况,2.25 m/s 的入口速度可使液冷板的综合散热性能提升 204.21%、电池模组最高温度降低 0.27 K;当通道角为 45°时,液冷板的综合散热性能最佳,其综合散热能力相较于通道角为 17°时提升了 114.40%;当通道宽度为 5 mm 时,通道间距比为 5:5 下的液冷板综合散热性能较好;相较于传统板式结构,提出的半浸没式结构将综合散热性能提升了 24.00%,将电池模组的最高温度降低了 2.86 K。该研究可为电池散热结构设计提供理论依据与技术参考。

关键词: 半浸没型;交错式;液冷板;锂电池;散热性能

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202610012 **文章编号:** 0253-987X(2026)10-0137-11

Effects of a Staggered Semi-Immersed Liquid Cooling Plate on the Heat Dissipation Performance of Lithium Batteries

Ji Jiadong^{1,2}, DUAN Chengzhi¹, SUN Haiting¹, YE Fan¹, LIU Yulong¹, HUANG Wei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan,

Anhui 232001, China; 2. State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining,

Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: To address the issues of uneven heat dissipation and high flow channel resistance in traditional liquid cooling plates, as well as the stringent requirements for coolants and the risk of battery short circuits in full-immersion cooling, this study proposes a novel staggered semi-immersed liquid cooling plate structure. Using numerical simulations combined with the NTGK electrochemical model and the governing equations for fluid flow and heat transfer, the effects of inlet velocity, channel angle, and channel spacing ratio (the ratio of channel spacing to channel width) on the heat dissipation performance were systematically analyzed. The reliability of the model was verified through single-cell heat generation experiments and a grid independence analysis. The results indicate that increasing the inlet velocity significantly enhances the heat

收稿日期: 2026-01-29。 作者简介: 季家东(1982—),男,教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175070);安徽高校自然科学研究重大项目(2024AH040068)。

网络出版时间: 2026-04-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260413.1742.010>

dissipation performance of the liquid cooling plate and reduces the maximum temperature of the battery module. Compared with the operating condition at an inlet velocity of 1.50 m/s, an inlet velocity of 2.25 m/s improves the comprehensive heat dissipation performance of the liquid cooling plate by 204.21% and reduces the maximum temperature of the battery module by 0.27 K. When the channel angle is 45°, the comprehensive heat dissipation performance of the liquid cooling plate is optimal, and its comprehensive heat dissipation capacity is increased by 114.40% compared to that at a channel angle of 17°. When the channel width is 5 mm, the liquid cooling plate with a channel spacing ratio of 5 : 5 exhibits better comprehensive heat dissipation performance. Furthermore, compared with the conventional plate structure, the proposed semi-immersed structure improves the comprehensive heat dissipation performance by 24.00% and reduces the maximum temperature of the battery module by 2.86 K. This study provides a theoretical basis and technical reference for the design of battery heat dissipation structures.

Keywords: semi-immersed; staggered; liquid cooling plate; lithium battery; heat dissipation performance

随着电动汽车及储能系统的快速发展,锂离子电池作为新能源汽车的存储单元,其性能与安全性成为行业进步的关键因素^[1]。电池在充放电过程中产生的热量若不能及时有效散发,将导致局部过热,甚至引发热失控,严重威胁使用安全并缩短电池寿命^[2]。因此,开发高效的电池热管理系统^[3-4]确保电池工作在最佳温度范围(20~40℃),并控制模块内温差在5℃以内^[5-6],已成为延长使用寿命及保障安全性的重要手段。

目前,锂离子电池散热方式主要分为风冷^[7-8]、液冷^[9-10]、相变材料(PCM)冷却^[11-12]以及浸没式冷却^[13-14]。在众多电池散热技术中,液冷技术因其高效的热传导能力而成为主流选择。Cao等^[15]设计一种新型的双蛇形冷却结构,分析了3种进出口布置、通孔数及通孔直径对冷却能力的影响,研究结果表明:引入交错式进出口布置可显著提高基板温度的均匀性。章正哲等^[16]提出一种对称蛇形流道结构,研究了不同对称蛇形流道的结构参数(流道数量、支流道宽度及二次流结构),结果表明:增加流道数与增大支流道宽度均能有效提高散热性能,其中缩短型二次流结构散热性能最佳。然而,传统液冷板设计多采用单一流道结构,存在散热不均、流道阻力大等问题,难以满足高密度、高效率散热需求。因此,优化液冷板结构,提升其散热性能与均匀性,已成为当前研究的热点^[17-18]。Lin等^[19]通过多目标优化,得到拓扑通道的平均温差升高值低于传统直线、蛇形和六边形液冷板。当质量流量在 $1 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-2}$ kg/s之间时,与直线液冷板相比,努塞尔数差异在1.33~5.90之间,即提高了15.60%~42.20%。在相同条件下,优化后液冷板的热交换能力和热均匀性更好。

浸没式冷却作为一种新兴的电池散热方式,通

过将电池部分或全部浸没在冷却液中,利用冷却液的直接接触实现高效热交换。这种冷却方式不仅能显著提升散热效率,还能有效减少电池模块间的温差,提高整体温度均匀性。Ji等^[20]率先为圆柱形锂离子电池设计了一种半浸没式液体冷却系统,实现了最高26.51 K的温度降低;在引入隔板后,冷却效率提高到30.65 K,提升了16%。Zhao等^[21]设计了一种用于棱柱式锂离子电池模块的主动浸没冷却系统,相较于静态浸没冷却和自由对流方法,温度最高分别降低了34%、47.7%,且并联电池布置相较于错开配置,具有更优越的冷却性能。

然而,浸没式冷却对冷却液的物理化学性质提出了更高要求,须具备导热性好、绝缘性高、阻燃性强的特点,这极大限制了冷却液的备选种类。此外,冷却液在长期使用后会产生各种累积污染,从而导致锂离子电池附属电子元器件的短路,进而引发热失控,而相关理论研究和解决方案尚鲜见报道。鉴于此,本文提出了一种新型交错式半浸没型液冷板结构,旨在通过优化液冷板设计,结合浸没式冷却的优势,提升电池散热性能与温度均匀性。通过数值模拟方法系统分析了入口流速、通道角度及通道间距比(通道间距与通道宽度之比)对散热性能的影响。相较于传统液冷板,采用半浸没式结构综合散热性能提高24.00%,最高温度降低了2.86 K。为高效电池热管理系统的开发与液冷板结构设计提供了理论依据与指导。

1 模型与方法

1.1 交错式半浸没型液冷板

本文提出的新型交错式半浸没型液冷板锂电池模组示意图如图1所示。

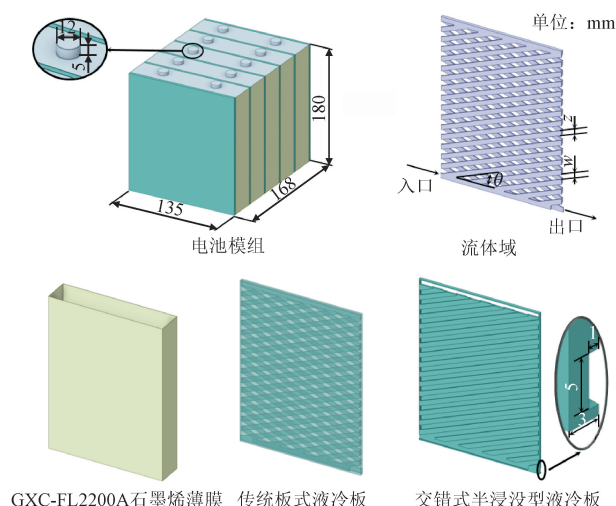


图 1 交错式半浸没型液冷板及锂电池模组示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interleaved semi-immersed liquid-cooled plate and lithium battery module

图 1 中, z 、 w 、 θ 分别为通道宽度、通道间距和通道角。模型由 5 块电池串联组成, 6 个液冷板在电池间交替排列并在电池表面包裹一层石墨烯薄膜。计算选用亿纬磷酸铁锂电池, 尺寸为 135 mm×30 mm×185 mm, 型号为 LF50K。冷却液由入口流

入, 随后分别流入若干平行通道。这些通道的左、右两侧均设有前、后连接通道, 以促进流体沿通道流动, 使得流体在到达每个通道末端时改变方向。当流体到达顶部区域时, 进行混合重新分配到另一组流动通道中。经过几个往复流动的循环后, 冷却液最终通过出口流出。计算过程中液冷板结构参数如表 1 所示。

表 1 液冷板的结构参数

Table 1 Structural parameters of liquid-cooled plate

参数	数值
通道角 $\theta/(^\circ)$	17, 22, 30, 45, 90
通道间距 w/mm	3, 5, 7
通道宽度 z/mm	5

电池正极材料为铝, 负极材料为铜, 液冷板材料为铝, 冷却液为水。因水具有导电性, 与电池直接接触易导致短路, 所以在电池外表面包裹一层 GXC-FL2200A 石墨烯薄膜。该石墨烯薄膜可避免冷却液与电池直接接触, 其高导热系数也可有效提高电池表面温度均匀性与散热效果。具体的材料物性如表 2 所示, 其中 ρ 为密度, c_p 为比定压热容, λ 为导热系数, λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的导热系数。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

参数	铜	铝	电池	石墨烯	水
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	897.8	2 719	193 4.2	3 500	998
$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	381	871	1 399	797	4 182
$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	387.6	202	$\lambda_x = \lambda_y = 10, \lambda_z = 1$	$\lambda_x = \lambda_y = 2 200, \lambda_z = 400$	0.6

1.2 网格划分

网格划分如图 2 所示, 均使用蜂窝状网格, 单元数为 8 342 251, 节点数为 1 488 752。为提高计算精度, 在近壁面处设置了 3 层边界层网格。

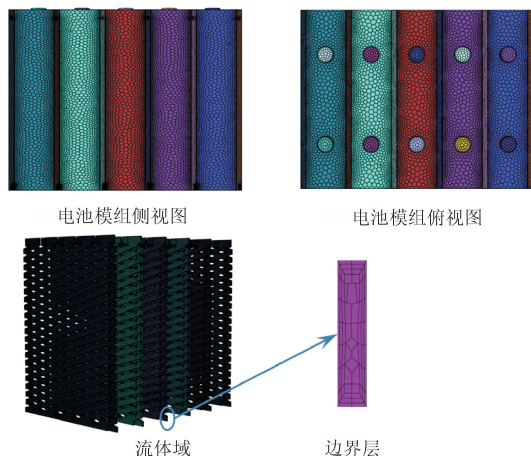


图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid division

1.3 边界条件设置

研究采用 FLUENT 软件开展瞬态计算, 打开能量方程并启用电池模型, 选择 MSMD 解法, 采用 NTGK 电化学模型, 选用 $k-\epsilon$ 模型。设置电池容量为 50 A·h, 放电倍率为 3C, 充、放电截止电压为 3.65、2.50 V, 指定电池反应区域与正负极区域。时间步长为 1 s, 放电时间为 1 200 s。

NTGK 电化学模型中的参数 U 、 Y 是电池放电深度 ζ_{DOD} 的函数, 通过不同放电倍率下电池的电压数据拟合而成, 表达式如下

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n \zeta_{\text{DOD},n} \right) - C_2 (T - T_{\text{ref}}) \quad (1)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n \zeta_{\text{DOD},n} \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: T 为温度; T_{ref} 为参考温度; a_n 、 b_n 为拟合系数; C_1 、 C_2 为 NTGK 模型特定常数。拟合系数和特定常数的具体数值^[22]如表 3 所示。

表3 具体参数设置^[22]
Table 3 Specific parameter settings^[22]

参数	数值	参数	数值
a_0	3.307 691	b_0	945.643 4
a_1	-0.988 470	b_1	-3 416.860 0
a_2	1.828 870	b_2	23 311.510 0
a_3	-5.189 040	b_3	-53 677.000 0
a_4	6.464 672	b_4	53 419.340 0
a_5	-3.002 900	b_5	-19 070.100 0
C_2	0.000 95	C_1	1 800.000 00

流体域入口设置为速度入口,入口流体温度设置为 298 K;出口边界采用压力出口,设置出口压力 $p_{\text{out}} = 1.013 \times 10^5$ Pa;重力加速度以 9.8 m/s^2 沿竖直向下方向施加。

1.4 控制方程与数据处理

将冷却液水视为不可压缩的牛顿流体,其质量守恒方程^[23]如下

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为水的密度; $\mathbf{v}$ 为速度矢量。

动量守恒方程^[24]写为

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p \quad (4)$$

式中: p 为压力; t 为时间。

能量守恒方程^[25]写为

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{v} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5)$$

式中: k 为水的热导率。

采用努塞尔数 Nu 表征传热性能^[26],写为

$$Nu = hD/\lambda \quad (6)$$

式中: D 为当量直径; h 为面均传热系数,表达式如下

$$h = q/\Delta T \quad (7)$$

$$\Delta T = \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}{\ln[(T_{\text{in}} - T_w)/(T_{\text{out}} - T_w)]} \quad (8)$$

其中, q 为热流量, ΔT 为对数平均温差, T_{in} 、 T_{out} 分别为水的入口和出口温度, T_w 为壁面温度。

采用综合传热性能因子 ξ_{IF} 评价液冷板的综合散热性能^[27],表达式为

$$\xi_{\text{IF}} = \frac{(j/j_r)}{(f/f_r)^{1/3}} \quad (9)$$

式中: j 、 f 分别为传热因子和阻力因子; j_r 、 f_r 分别为 j 和 f 的计算参考项。

j 和 f 的表达式分别为

$$j = \frac{Nu_m}{RePr^{1/3}} \quad (10)$$

$$f = \frac{2\Delta p D}{L\rho v_{\text{in}}^2} \quad (11)$$

式中: Nu_m 为平均努塞尔数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; Δp 为压降; L 为流体域长度; v_{in} 为流体的平均流速。

1.5 网格独立性分析

为验证模型的网格独立性,通过分析电池模组的压降 Δp 和最大温度 T_{max} 来评估网格独立性,验证结果如图3所示。由图可见,随着网格数的增加, Δp 和 T_{max} 均逐渐趋于稳定;在网格数约为 725 万之后再进一步增加网格数时, Δp 和 T_{max} 变化幅度较小。综合比较后发现,选取网格数约为 725 万已能够满足数值模拟的精度要求。

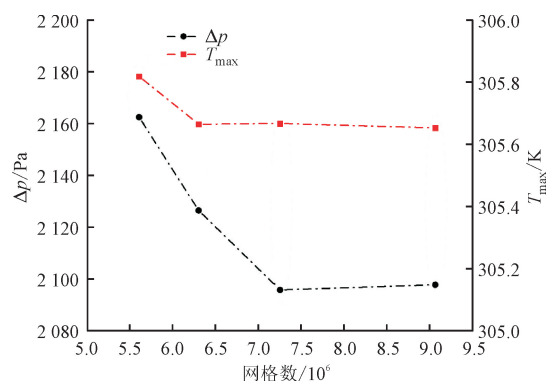


图3 网格独立性验证

Fig. 3 Grid independence verification

1.6 电池产散热验证

为了对电池的产热数据进行验证,基于 LF50K 电池搭建了单电池产热实验台,如图4所示。实验设备包括 AIBODUO 恒温恒湿箱、HTB-2060 电池综合测试仪、TP700 多路数据记录仪等。

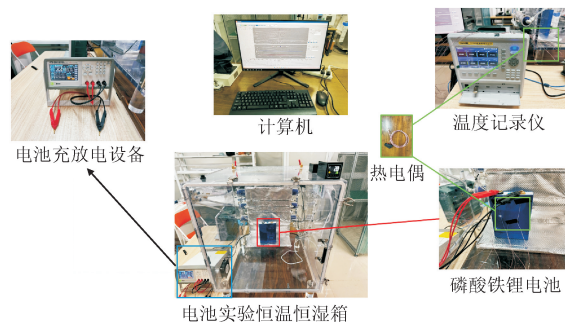


图4 单电池产热实验台

Fig. 4 Single-cell heat generation test bench

具体实验步骤为:恒温恒湿箱设置为 25°C ,电池使用 0.5C 恒流充电,充电至截止电压 3.65 V ,静

置 1 h;随后将电池以 0.2C 放电 3 600 s。为了测试电池温度,在电池正负极下方 10 mm 处以及电池表面中心处布置 3 个热电偶。

图 5 所示为模拟结果与产热实验结果的对比。为减小误差,开展 3 组实验,并取 3 组实验温度的平均值作为最终结果。从图 5 可见,模拟结果和实验结果的误差较小,表明仿真模型具有较高的计算精度。

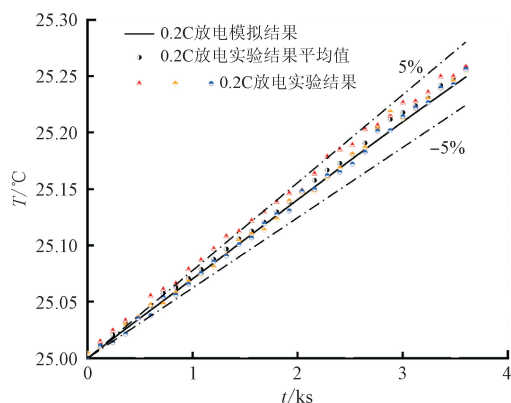


图 5 监测点温度的模拟结果和实验结果对比

Fig. 5 Comparison of simulated and experimental results for temperature at monitoring points

为验证模拟方法的准确性,建立与参考文献[28]中相同的液冷板结构和条件。模拟结果与实验数据的对比结果如表 4 所示。可见,在不同冷却剂质量流量条件下,模拟结果与实验结果之间的相对误差分别为 3.09%、1.87% 和 1.59%,说明了本文方法的准确性。

表 4 散热验证

Table 4 Thermal verification

质量流量/($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度 实验值/°C	温度 模拟值/°C	相对 误差/%
1.5	30.44	29.50	3.09
2.0	29.90	29.34	1.87
2.5	29.00	28.54	1.59

2 结果与讨论

2.1 入口流速的影响

图 6 所示为放电倍率为 3C、时间为 1 200 s 时,不同入口速度 v_{in} 下的温度分布。计算时,取通道角 $\theta = 22^\circ$,通道宽度为 5 mm,通道间距比 $w/z = 5:5$ 。

由图 6 可知,电池模组的最高温度位于两侧电池的正、负极处,这是因为正、负极为外接电极,串联

时为总电流的进、出口,其极耳的电阻更大、散热更差,且电流集中导致局部电阻骤增。根据焦耳定律,这些位置的焦耳热积累最多,故温度最高。

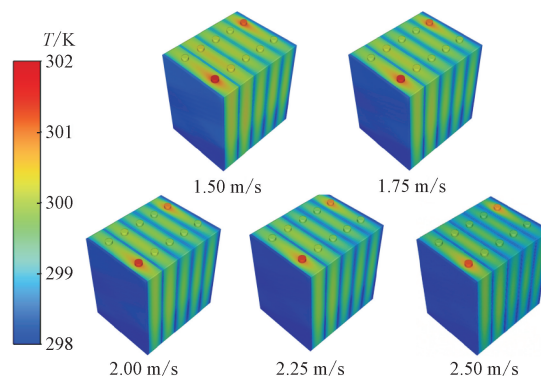


图 6 不同入口速度下的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution under different inlet velocities

不同入口速度工况下,第 3 块液冷板的温度分布如图 7 所示。由图可知,随着 v_{in} 的增加,液冷板温度不断降低,温度均匀性也有所提升。液冷板上端温度要明显高于底部,是由于随着冷却液的流动,冷却液的温度不断升高所导致。

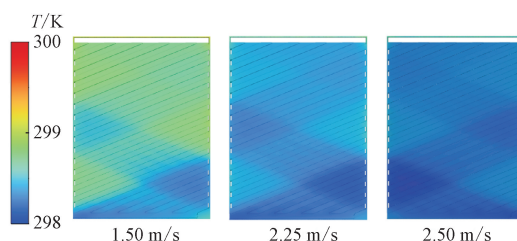


图 7 不同入口速度下液冷板的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of liquid-cooled plate under different inlet velocities

入口速度分别为 1.50、2.25、2.50 m/s 工况下,第 3 块液冷板中冷却液流速 v 的分布如图 8 所示。由图可知,低流速时流速分布较均匀,整体梯度较平缓;随着 v_{in} 的增加,高流速区逐渐扩大,且各分

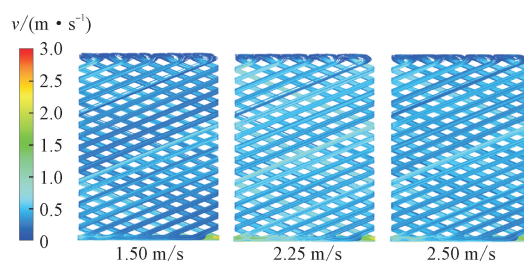
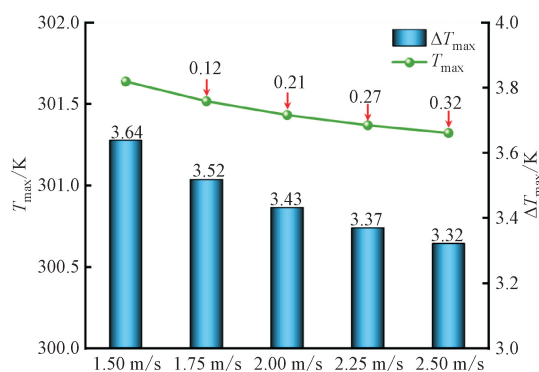


图 8 不同入口速度下冷却液的流速分布

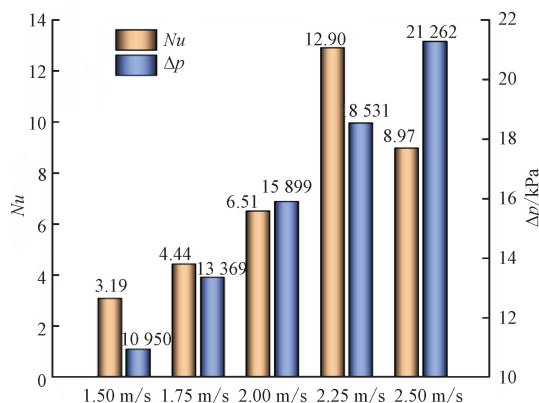
Fig. 8 Velocity distribution of coolant under different inlet velocities

支通道内的流速相差较小,距入口较远处的分支通道流速较低。

不同入口速度工况下,最高温度 $T_{\max}$ 、最大温差 $\Delta T_{\max}$ 、努塞尔数 Nu 和压降 Δp 的分布情况如图9所示。由图9(a)可知,随着 v_{in} 增加, $T_{\max}$ 与 $\Delta T_{\max}$ 均呈现减小趋势。在本文计算参数范围内, $T_{\max}$ 最大降低了 0.32 K, $\Delta T_{\max}$ 最低降至 3.32 K。这表明, v_{in} 的增加能够显著降低电池模组的整体温度和最大温差,原因为: v_{in} 的增加使得单位时间内流入通道的冷却液增加,可以带走更多的热量。由图9(b)可以看出, Nu 随着 v_{in} 的增加呈现先增加后减小的趋势,且当 $v_{\text{in}} = 2.25 \text{ m/s}$ 时达到最大,这可能是因为流速增大后,流动状态变得不稳定,反而削弱了散热效果。 Δp 随着 v_{in} 的增加而增加,这是由于流速增加导致的流动阻力增大所导致。



(a) $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$



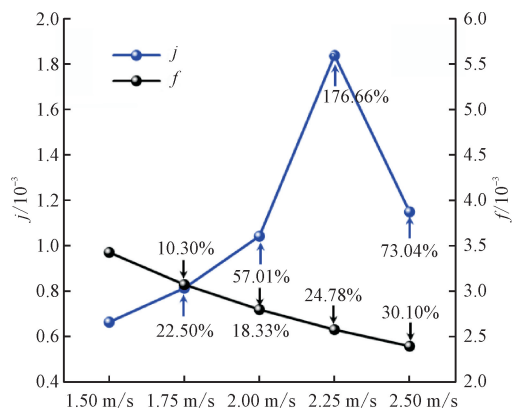
(b) Nu 和 Δp

图9 不同入口速度对 $T_{\max}$ 、 $\Delta T_{\max}$ 、 Nu 和 Δp 的影响

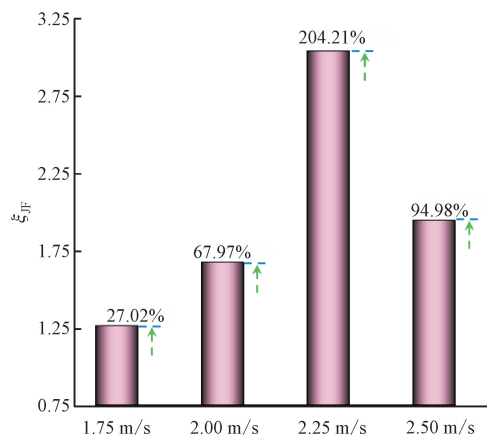
Fig. 9 Effect of different inlet velocities on $T_{\max}$, $\Delta T_{\max}$, Nu and Δp

为更全面地分析入口速度对散热性能的影响,对表征液冷板综合散热性能的 ξ_{JF} 参数(含 j 和 f 因子)进行计算,结果如图10所示。由图10(a)可见,当 v_{in} 增加时, j 因子呈现先增加后减小的趋势,最高

增幅高达 176.66%,且与 Nu 的变化规律一致; f 因子则呈现逐渐减小趋势,这与 Δp 的变化规律相反,主要是因为 f 因子在计算时考虑了流速的影响。由图10(b)可知,综合传热性能 ξ_{JF} 呈先增加后减小的分布趋势,且均大于 1.0,表明相较于 1.50 m/s 的入口速度,其他各个速度下的综合传热性能均有提升。当 $v_{\text{in}} = 2.25 \text{ m/s}$ 时, ξ_{JF} 达到最大,相较于参考速度 ($v_{\text{in}} = 1.50 \text{ m/s}$),增幅高达 204.21%,表明此时液冷板的综合散热能力最好。



(a) j 和 f



(b) ξ_{JF}

图10 不同入口速度对 j 、 f 和 ξ_{JF} 的影响

Fig. 10 Effect of different inlet velocities on j , f and ξ_{JF}

2.2 通道角的影响

图11所示为放电倍率为 3C、时间为 1 200 s 时,不同通道角 θ 下的温度分布。计算时,取入口速度 $v_{\text{in}} = 2.00 \text{ m/s}$ 、通道宽度为 5 mm、通道间距比 $w/z = 5:5$ 。由图11可知, θ 对电池模组的影响有限,不同 θ 条件下电池模组的温度分布和规律基本一致。

图12给出了不同通道角下,第3块液冷板的温度分布。由图可知, $\theta = 45^\circ$ 时温度均匀性最好, 90° 次之, 17° 时均匀性最差,温度梯度跨度最大。 $\theta = 17^\circ$, 90° 时,低温区主要分布在入口与液冷板的底部。

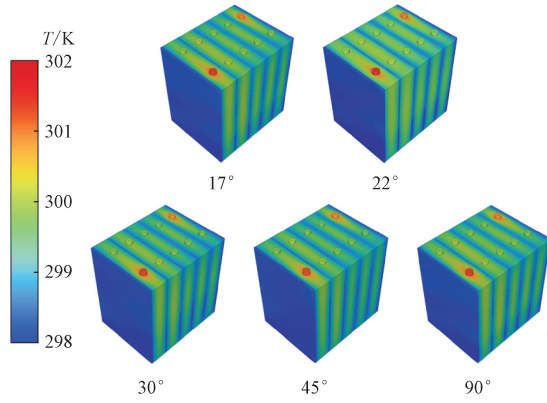


图 11 不同通道角下的温度分布

Fig. 11 Temperature distribution under different channel angles

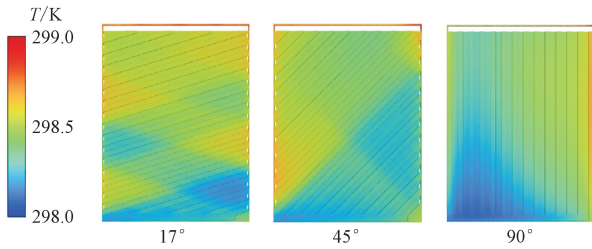


图 12 不同通道角下液冷板的温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of liquid-cooled plate under different channel angles

图 13 为 $\theta=17^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时,第 3 块液冷板中的冷却液流速分布。由图可知, $\theta=17^\circ$ 时流速分布极不均匀, 45° 流速分布最均匀, 90° 时入口处流速较高。这是因为 θ 过小时,流道弯折频繁,路径过长,流体在折弯处发生剧烈转向,动能损失严重;而 θ 过大时,流体会直接冲击子通道口。

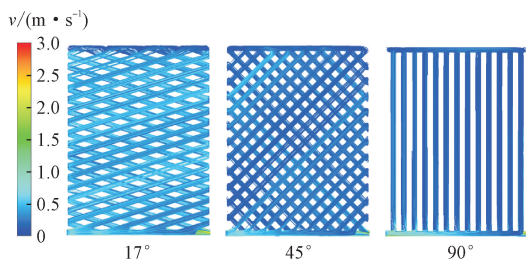


图 13 不同通道角下冷却液的流速分布

Fig. 13 Velocity distribution of coolant under different channel angles

图 14 给出了不同通道角对最高温度 $T_{\max}$ 、最大温差 $\Delta T_{\max}$ 、努塞尔数 Nu 和压降 Δp 的影响规律。由图 14(a) 可知,当 θ 增加时, $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 均呈现先减小后增加趋势,且当 $\theta=45^\circ$ 时,电池模组的 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 均最小。这表明存在最优通道角 $\theta=45^\circ$,使

得液冷板的散热能力和温度均匀性最佳。从图 14(b) 可以看出,当 θ 增加时, Nu 和 Δp 的变化规律不明显,但当 $\theta=45^\circ$ 时,液冷板的 Nu 最高且 Δp 最小。

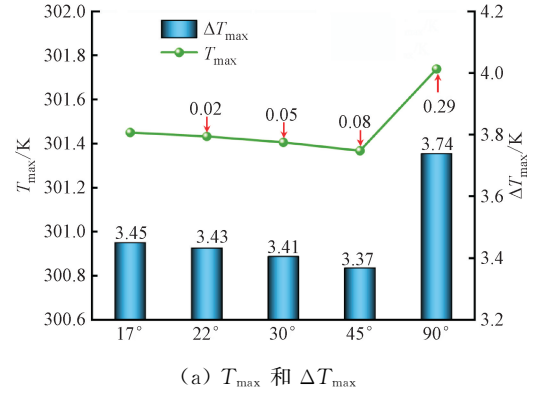
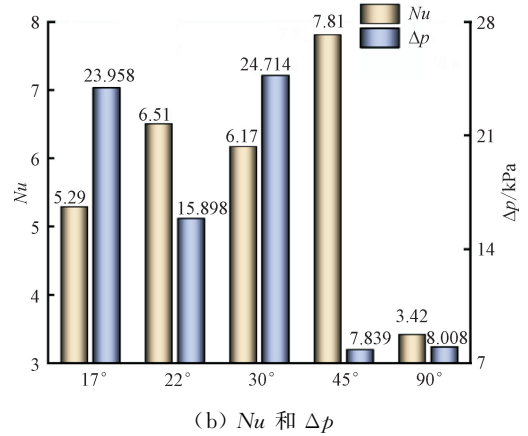
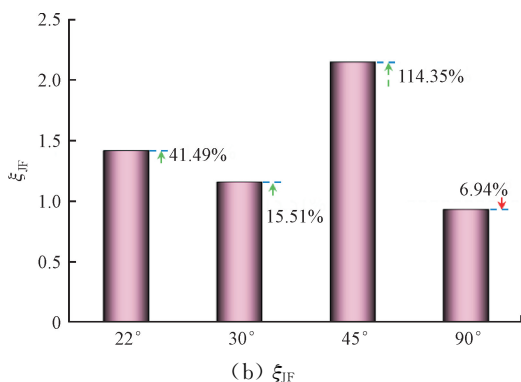
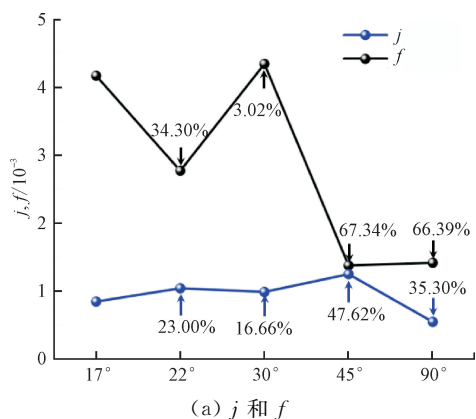
(a) $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ (b) Nu 和 Δp

图 14 不同通道角对 $T_{\max}$ 、 $\Delta T_{\max}$ 、 Nu 和 Δp 的影响
Fig. 14 Effect of different channel angles on $T_{\max}$, $\Delta T_{\max}$, Nu and Δp

为更全面地分析不同通道角对散热性能的影响,对表征液冷板综合散热性能的 ξ_{JF} 参数(含 j 和 f 因子)进行计算,结果如图 15 所示。由图 15(a) 可知,当 θ 增加时, j 因子变化相对平缓,相较于 $\theta=17^\circ$, $\theta=45^\circ$ 时的增幅最高,为 47.62%;但当 $\theta=90^\circ$ 时, j 因子下降 35.30%。 f 因子整体呈下降趋势, $\theta=45^\circ$ 时降幅最大,达 67.34%。由图 15(b) 可以看出,综合传热性能 ξ_{JF} 呈现先减小后增加的趋势,除 $\theta=90^\circ$ 外,其他角度下的 ξ_{JF} 均大于 1.0,表明综合散热性能均有提升。当 $\theta=45^\circ$ 时, ξ_{JF} 达到最大,增幅为 114.35%,也进一步表明 $\theta=45^\circ$ 时综合散热效果最好。分析图 15 出现上述现象的原因为:当 $\theta < 45^\circ$ 时,通道折流次数和通道长度均增大,使得流阻增加;当 $\theta=90^\circ$ 时,通道长度减小且无折流,通道内流阻减小,但流体从底部水平通道流入各子通道的角度较大,又使得流动阻力小幅增加。

图15 不同通道角对 j 、 f 和 ξ_F 的影响Fig. 15 Effect of different channel angles on j , f and ξ_F

2.3 通道间距比的影响

图16给出了放电倍率为3C、时间为1200s时,不同通道间距比 w/z 下的温度分布情况。计算时,取 $v_{in} = 2.00$ m/s, $\theta = 45^\circ$,通道宽度为5mm。由图16可见, w/z 对电池模组的影响有限,不同 w/z 下电池模组的温度分布及规律基本一致。

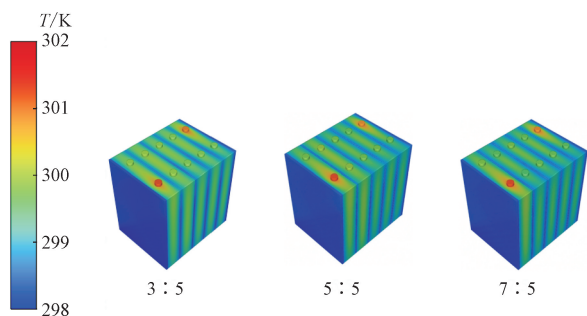


图16 不同通道间距比下的温度分布

Fig. 16 Temperature distribution under different channel spacing ratios

图17所示为不同通道间距比下,第3块液冷板的温度云图。由图可见, w/z 为5:5时,通道分布较均匀,因而温度分布较均匀, w/z 直接决定了液冷板内子通道数和冷却液的流量分配。

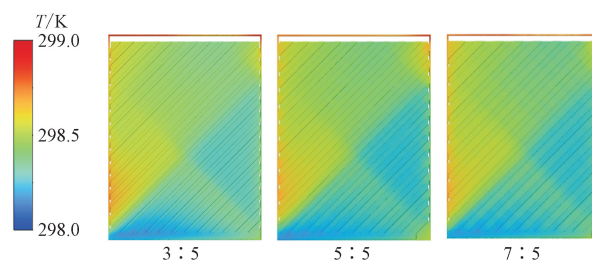


图17 不同通道间距比下液冷板的温度分布

Fig. 17 Temperature distribution of liquid-cooled plate under different channel spacing ratios

图18所示为不同通道间距比下,第3块液冷板中冷却液的流速分布。由图可知,相较于通道间距比为3:5和7:5,5:5时的流速分布更均匀,且流量分配更均匀。在相同入口条件下,子通道数较多时,分配给每个通道的流量有限,导致各通道内平均流速普遍低下;而子通道数较少时则相反。

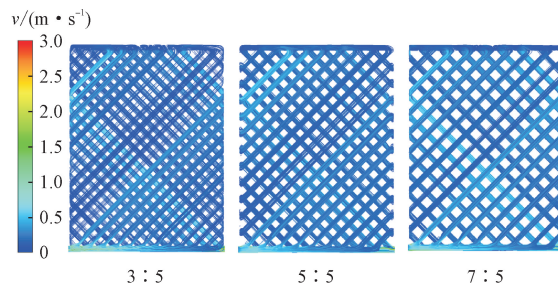
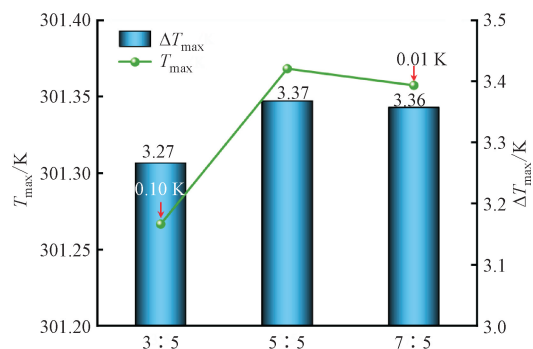
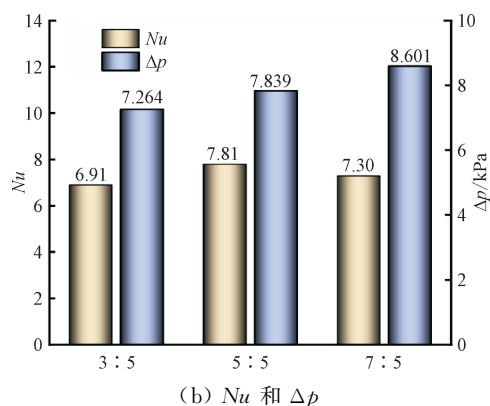


图18 不同通道间距比下冷却液的流速分布

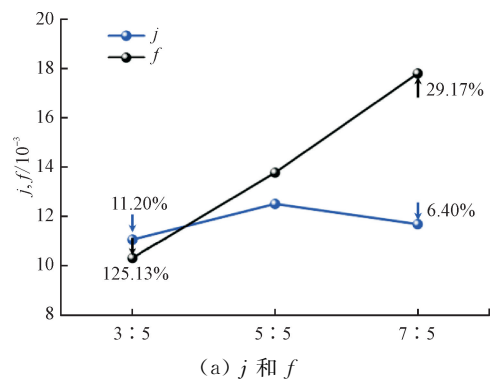
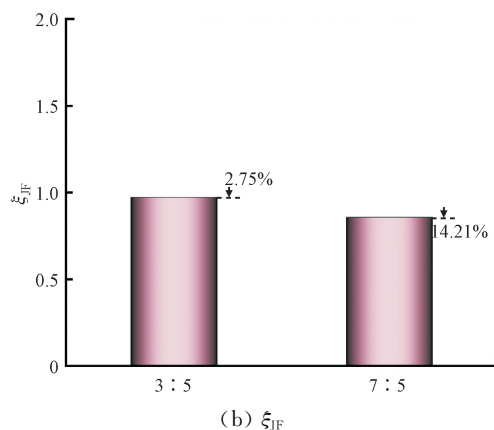
Fig. 18 Velocity distribution of coolant under different channel spacing ratios

图19给出了不同通道间距比对最大温度 T_{max} 、最大温差 ΔT_{max} 、努塞尔数 Nu 和压降 Δp 分布的影响规律。由图19(a)可知,当 w/z 增加时, T_{max} 和 ΔT_{max} 均呈现先增加后减小趋势,且当 $w/z = 3:5$ 时,电池模组的 T_{max} 和 ΔT_{max} 均最小。从图19(b)可以看出,当 w/z 增加时, Δp 均呈现增加趋势, Nu 则是先增加后减小;当 $w/z = 5:5$ 时, Nu 提升较大而 Δp 增加较小,表明此时的散热效果最优。

(a) T_{max} 和 ΔT_{max}

图 19 不同通道间距比下的 $T_{\max}$ 、 $\Delta T_{\max}$ 、 Nu 和 Δp Fig. 19 Effect of different channel spacing ratios on $T_{\max}$, $\Delta T_{\max}$, Nu and Δp

为更全面地分析通道间距比对散热性能的影响,对表征液冷板综合散热性能的 ξ_{JF} 参数(含 j 和 f 因子)进行计算,结果如图 20 所示。由图 20(a)可知,当 w/z 增加时, j 与 f 因子均呈增长趋势。 $w/z = 5:5$ 时 j 因子最高; $w/z = 7:5$ 时, j 因子下降 6.40%; $w/z = 3:5$ 时 j 因子降幅最高,达 11.20%。由图 20(b)可见,与 $w/z = 5:5$ 相比, $3:5$ 和 $7:5$ 时的 ξ_{JF} 均小于 1,表明 $w/z = 5:5$ 时综合散热效果最好。

(a) j 和 f (b) ξ_{JF} 图 20 不同通道间距比下的 j 、 f 和 ξ_{JF} Fig. 20 Effect of different channel spacing ratios on j , f and ξ_{JF}

进一步分析图 20 可知:当 w/z 较小时,虽然子通道数较多,流体与电池的接触面积较大,但各子通道内的平均流速减小,导致换热能力和流动阻力降低;当 w/z 较大时,虽然子通道数较少,流体与电池的接触面积较小,但各子通道内平均流速增加,流动状态不稳定性增强,导致换热能力略有降低,而流动阻力持续增强。

2.4 与板式液冷板散热性能对比

在 $v_{\text{in}} = 2.00 \text{ m/s}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $w/z = 7:5$ 工况下建模,将传统板式结构与本文交错式半浸没型液冷板结构进行对比,得到的结果如表 5 所示。计算时,将相同参数下的传统板式结构结果作为基准。

表 5 不同结构下散热性能参数的对比

Table 5 Comparison of heat dissipation performance parameters under different structures

参数	数值		变化幅度/%
	板式	半浸没式	
$T_{\max} / \text{K}$	304.21	301.35	-0.94
$\Delta T_{\max} / \text{K}$	6.21	3.36	-45.89
Nu	5.87	7.29	24.19
$\Delta p / \text{Pa}$	8 588	8 601	0.15
j	0.000 94	0.001 17	24.47
f	0.001 77	0.001 77	0
ξ_{JF}	1.00	1.24	24.00

由表 5 可知,半浸没式结构在降低温度与提高温度均匀性上要显著优于板式结构, $T_{\max}$ 降低了 0.94% (2.86 K), $\Delta T_{\max}$ 降低了 45.89% (2.85 K)。 Nu 与 j 因子均有显著提升,增幅分别高达 24.19%、24.47%,表明在传热性能方面,半浸没式结构要明显优于板式。 Δp 与 f 因子几乎没有变化, Δp 增幅仅为 0.15%,表明当结构参数与边界条件确定时,压降与阻力几乎不变。 ξ_{JF} 增幅约 24.00%,表明相较于板式结构,交错式半浸没型结构的综合散热性能有了显著提升。

3 结 论

基于一种新型交错式半浸没型液冷板,研究了不同入口速度 v_{in} 、通道角 θ 和通道间距比 w/z 对液冷板散热性能的影响规律,得到如下主要结论。

(1) v_{in} 是影响电池模组散热性能的关键因素之一。随着 v_{in} 增加,电池模组的 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 均降低,但综合散热性能随 v_{in} 的增加呈现先增加后减小趋势,且当 $v_{\text{in}} = 2.25 \text{ m/s}$ 时达到最大值。这可能是因

为 v_{in} 增大后,流动状态变得不稳定,反而削弱了散热效果。 Δp 随着 v_{in} 的增加而增加,这是由于流速增加导致的流动阻力增大所导致。

(2)计算模拟不同 θ 下的散热效果发现,当通道角为 45° 时,整体温度最低且温度分布最为均匀,散热效果最好。然而,过大的 θ (如 90°) 反而会恶化传热效率。

(3) w/z 是影响液冷板性能的另一重要参数,主要通过增大冷却液接触面积影响散热效果。研究结果显示,随着通道间距比增大,最高温度 T_{max} 和平均温差 ΔT_{max} 先升高后降低,压降 Δp 呈现单调上升趋势, Nu 先增大后减小。这表明,小间距比下虽然压力损失小但换热性能低,大间距比会导致压力损失增加。综合分析发现, w/z 为 5:5 时,综合传热性能达到最佳。

(4)通过对比不同参数组合下的散热性能,确定 $v_{in} = 2.25 \text{ m/s}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $w/z = 5:5$ 为最优参数组合。对比板式结构和半浸没式结构的散热性能发现: T_{max} 和 ΔT_{max} 分别降低了 0.94% (2.86 K)、45.89%, Nu 、 j 分别提升了 24.19%、24.47%, Δp 、 f 因子几乎无变化, Δp 有极小增幅,仅为 0.15%, ξ_{JF} 提升幅度高达 24.00%,表明交错式半浸没型结构要明显优于板式结构。

本文在研究 v_{in} 、 θ 和 w/z 对散热性能的影响时,仅考虑了参数的孤立影响。然而,为了兼顾参数间的交互作用,也同时计算了 $v_{in} = 1.50 \text{ m/s}$ 、 $\theta = 30^\circ$ 、 $w/z = 3:5$ 条件下, T_{max} 、 ΔT_{max} 、 Nu 、 Δp 、 j 、 f 和 ξ_{JF} 等参数对散热性能的影响,发现规律基本一致,这表明参数之间的交互作用不会影响本文结论。

综上所述,本文提出的交错式半浸没型液冷板结构在提升锂电池散热性能方面具有显著优势,为高效电池热管理系统的开发提供了新的解决方案和理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Sun Peiyi, Bisschop R, Niu Huichang, et al. A review of battery fires in electric vehicles [J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1361-1410.
- [3] Li Haoxuan, Chen Long, Zuo Hongyan, et al. Performance enhancement of a battery thermal management system using novel liquid cold plates with micro-channel featuring pin fins [J]. Energy, 2024, 301: 131731.
- [4] Tete P R, Gupta M M, Joshi S S. Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: a technical review [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102255.
- [5] 杨涵,刘宁豪,高强,等. 锂离子电池同心结构液冷板冷却性能分析及结构优化 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(3): 172-188.
- [6] Chacko S, Chung Y M. Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles [J]. Journal of Power Sources, 2012, 213: 296-303.
- [7] E Jiaqiang, Yue Meng, Chen Jingwei, et al. Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 231-241.
- [8] 尹诗佳,刘少胡,丁坤,等. 储能用“V”型风冷电池包结构优化 [J]. 电源技术, 2026, 50(3): 517-524.
- [9] 曾志鑫,崔旺,魏衍举,等. 圆柱锂电池组的肺泡仿生冷却结构设计与优化 [J]. 工程热物理学报, 2025, 46(11): 3681-3692.
- [10] Liu Na, Jiang Yueming, Liu Xujie, et al. Thermal performance analysis and structure optimization of bionic shark skin channel liquid cooling plate for lithium ion battery [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279(Part C): 127683.
- [11] Yang Zulin, Li Mingfei, Rao Mumin, et al. Investigation on enhanced heat transfer characteristics of hybrid convective cooling-phase change material composite systems for battery thermal management [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2026, 222: 110569.

- [12] 吴俊辉,邱雪梅,张承龙,等. 相变材料与液冷复合电池热管理系统研究 [J]. 工程热物理学报, 2024, 45(12): 3845-3852.
- Wu Junhui, Qiu Xuemei, Zhang Chenglong, et al. Investigation on battery thermal management systems with phase change materials and liquid-cooling [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(12): 3845-3852.
- [13] Liu Jiahao, Ma Qingwen, Li Xianbin. Numerical study on heat dissipation performance of a lithium-ion battery module based on immersion cooling [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 66: 107511.
- [14] He Hao, Liu Qian, He Kehan, et al. Structural and thermal regulation of strain behavior in batteries under air and immersion cooling [J]. Energy, 2026, 344: 140112.
- [15] Cao Xin, Liu Huanling, Shao Xiaodong, et al. Thermal performance of double serpentine minichannel heat sinks: effects of inlet-outlet arrangements and through-holes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 153: 119575.
- [16] 章正哲,张恒运,张健胜,等. 方形电池模组对称蛇形流道液冷板热特性研究 [J]. 上海工程技术大学学报, 2025, 39(4): 471-476.
- Zhang Zhengzhe, Zhang Hengyun, Zhang Jiansheng, et al. Study on thermal characteristics of symmetric serpentine flow channel liquid cooling plate for prismatic battery module [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2025, 39(4): 471-476.
- [17] Nie Jinquan, Liu Zuoqiang, Su Jintao, et al. Multi-objective optimization of liquid cooling system for lithium-ion battery [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 103(Part A): 114380.
- [18] Mo Xiaobao, Zhi Hui, Xiao Yizhi, et al. Topology optimization of cooling plates for battery thermal management [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 178: 121612.
- [19] Lin Xiangwei, Shi Mingyu, Zhou Zhifu, et al. Multi-objective topology optimization design of liquid-based cooling plate for 280 Ah prismatic energy storage battery thermal management [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 325: 119440.
- [20] Ji Jiadong, Ye Fan, Duan Chengzhi, et al. Thermal performance optimization of columnar lithium-ion batteries using a semi-immersion liquid cooling system [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279 (Part D): 127777.
- [21] Zhao Luyao, Wang Jiafeng, Zheng Minxue, et al. Design and performance optimization of liquid immersion cooling system for prismatic lithium-ion battery modules [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2026, 118: 110181.
- [22] Fan Liyun, Li Jingxue, Chen Ya, et al. Study on the cooling performance of a new secondary flow serpentine liquid cooling plate used for lithium battery thermal management [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 218: 124711.
- [23] Fan Yiwei, Wang Zhaohui, Fu Ting. Multi-objective optimization design of lithium-ion battery liquid cooling plate with double-layered dendritic channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 199: 117541.
- [24] He Ping, Lu Hao, Fan Yiwei, et al. Numerical investigation on a lithium-ion battery thermal management system utilizing a double-layered I-shaped channel liquid cooling plate exchanger [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 187: 108200.
- [25] E Shengxin, Liu Yuxian, Cui Yaxin, et al. Effects of composite cooling strategy including phase change material and cooling air on the heat dissipation performance improvement of lithium ion power batteries pack in hot climate and its catastrophe evaluation [J]. Energy, 2023, 283: 129074.
- [26] Ji Jiadong, Lu Yu, Shi Baojun, et al. Numerical research on vibration and heat transfer performance of a conical spiral elastic bundle heat exchanger with baffles [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 232: 121036.
- [27] Ji Jiadong, Ni Xuwang, Zhao Jinhui, et al. Numerical investigation of the effect of the structure and number of spiral baffles on the vibration and heat transfer coefficient of spiral tubes within spiral tube heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258(Part A): 124545.
- [28] Zhang Furen, He Yanxiao, Lao Yongchun, et al. Optimization design and numerical study on thermal performance of a novel diamond-type channel cold plate [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 188: 108254.

(编辑 李慧敏)