

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260625001

基于仿形螺旋通道的锂离子电池液冷板散热性能研究

何平¹ 刘润发¹ 余欢¹ 李新宇² 范益伟³ 袁彬¹ 刘静¹

(1 安徽建筑大学机械与电气工程学院 合肥 230601; 2 合肥工业大学 机电产品低碳循环利用技术与装备安徽省

重点实验室 合肥 230009; 3 巢湖学院机械工程学院 合肥 238024)

摘要 为了有效控制电池在高倍率充电时发生热失控的风险,本文以99 A·h方壳锂离子电池为研究对象,设计了一种仿形螺旋通道液冷板。通过实验测得电池的内阻和熵系数,基于Bernardi产热理论构建了电池体积热源模型。运用正交试验研究长度比、螺旋角度和宽度比3个关键设计参数对目标函数的影响,确定了综合性能最佳参数组合方案(长度比为0.75、螺旋角度为160°、宽度比为0.85)。将螺旋通道与传统并行、波纹形及特斯拉阀形通道的散热性能进行了对比。结果表明:螺旋通道由于其独特的内外多圈结构,有效提高了冷却液的吸热效率,其最高温度和表面平均温度最优,能将电池最高温度控制在312.65 K。最后,通过期望函数分析,螺旋通道的期望值最高(0.086),证实了螺旋通道液冷板具有较佳综合散热性能。

关键词 电池冷却;螺旋通道;板式换热器;CFD仿真

中图分类号: TM912;TK124

文献标识码: A

Heat Dissipation Performance of a Lithium-Ion Battery Cooling Plate Using Profiled Spiral Channels

He Ping¹ Liu Runfa¹ Yu Huan¹ Li Xinyu² Fan Yiwei³ Yuan Bin¹ Liu Jing¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Key Laboratory of Low Carbon Recycling Technology and Equipment for Mechanical and Electrical Product, Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. School of Mechanical Engineering, Chaohu University, Hefei 238024, China)

Abstract

Objective The development of new energy vehicles that use the lithium-ion batteries (LIBs) as the power source has brought into the prominence of thermal safety risks arising from high-rate chargings. The accumulation of excess heat inside the batteries results in the large temperature differences and induces the thermal runaway, thereby threatening the safety of electric vehicles. Given that the optimal operating temperature range of LIBs is 293.15–313.15 K, an efficient thermal management system is critical for ensuring the battery performance and safety. Accordingly, this study proposes a profiled spiral channel liquid cooling plate, inspired by the DNA double helix and intertwined vine structures, to meet the heat dissipation demand of 99 Ah prismatic LIBs with a 3C charging current, and evaluates its performance in obtaining an optimal charging scheme that balances the thermal and hydraulic performances.

Methods The internal resistance and entropy coefficient of a 99 A·h prismatic LIB were measured, and a volumetric heat source model of the battery was constructed based on Bernardi's heat generation theory. A three-factor four-level $L_{16}(4^3)$ orthogonal experiment was designed to investigate the impacts of the length ratio, spiral angle, and width ratio on the maximum temperature, average surface temperature, and system pressure drop, and the optimal parameter integration was determined using the range analysis. For a consistent channel cross-sectional area, channel number, and inlet flow rate, the spiral channel was compared with three typical structures, i. e., parallel, corrugated, and Tesla valve channels. The laminar flow was numerically simulated using ANSYS Fluent and verified with a grid independence study. Finally, the desirability function method was adopted to evaluate the thermal-hydraulic performance of each scheme quantitatively.

Results and Discussion The range analysis results show that the spiral angle most affects the maximum and average surface temperatures, whereas the width ratio and system pressure drop are positively correlated. The optimal parameter integration is determined

收稿日期:2026-06-25;修回日期:2026-08-11;录用日期:2026-08-12

责任编辑:



移动阅读

as a length ratio of 0.75, spiral angle of 160° , and width ratio of 0.85. Also, four types of channels show the distinct heat dissipation performances: the parallel channel delivers the worst cooling effect with a maximum LIB temperature of 319.22 K; the corrugated channel achieves a slightly improved performance; the Tesla valve channel reduces the maximum temperature to 312.92 K, owing to its distinctive flow-field characteristics; and the proposed spiral channel achieves an optimal temperature control performance, limiting the maximum temperature to 312.65 K. The inner-outer multiring structure of the proposed spiral channel extends the fluid flow path, optimizes the flow distribution, and improves the heat absorption efficiency of the coolant. In terms of the pressure drop, the parallel channel has the lowest flow resistance, whereas the spiral and Tesla valve channels exhibit the higher pressure drops owing to their complex structures. Per the desirability function calculation, the spiral channel has a desirability value of 0.086, and ranks the first in the heat dissipation among four structures.

Conclusions The experimental internal resistance ($1.17\text{ m}\Omega$) and entropy coefficient ($-6.0\times 10^{-5}\text{ V/K}$) accurately characterize the heat generation of the $99\text{ A}\cdot\text{h}$ LIB, thereby supporting the numerical simulations. The structural parameters of the spiral channel exert different degrees of influences on the thermal and hydraulic performances, and the optimized parameter integration can balance the temperature control and flow resistance. Compared with the three conventional liquid cooling channels, the proposed spiral channel exhibits superior heat dissipation, thus providing a new design guideline for structurally optimized liquid cooling plates in the thermal management systems of LIBs.

Keywords battery cooling; spiral channel; plate heat exchanger; computational fluid dynamics simulation

随着全球能源短缺和环境污染问题的不断恶化,以电动汽车(electric vehicle, EV)为代表的新能源汽车产业实现了爆发式增长,成为实现“双碳”目标和节能减排的重要途径^[1]。作为EV的核心“动力心脏”,动力电池的性能直接决定了新能源汽车的续航里程与安全可靠性^[2]。其中,锂离子电池凭借高能量密度和长循环寿命等显著优势,已成为当前储能与动力领域的首选^[3-4]。然而,锂离子电池的电化学性能和安全性极易受到工作环境温度的影响^[5]。在大电流充放电工况下,电池内部由于欧姆内阻和电化学反应会产生大量热量。当散热效率不足时,极易引发热量聚集与温差过大,甚至诱发热失控,导致EV起火或爆炸等安全事故^[6]。研究表明,锂离子电池的最佳工作温度为 $293.15\sim 313.15\text{ K}$ ^[7]。因此,高效的电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)显得尤为重要。

现有电池冷却方案主要划分为主动冷却与被动冷却2类。主动冷却包含强制风冷与液冷,被动冷却则涵盖自然风冷、相变材料散热及热管散热^[8-10]。其中,液冷凭借其优异的换热效率,现已成为BTMS的主流研发方向。现阶段液冷式BTMS的相关研究大多聚焦于液冷板的结构优化,液冷板的性能直接影响电池组的冷却效果。唐程波等^[11]设计了一种基于正弦函数的液冷板,评估了不同放电倍率、入口温度及流速下,流体流向对锂电池散热性能的影响。研究表明,低频低幅的正弦流道能有效增强换热。Fan Yiwei等^[12]提出了一种基于构形理论的双层树状通道液冷板,数值模拟表明,在最佳结构参数下,该仿生设计较同等换热面积的蛇形流道展现出卓越的冷却

性能。

除上述关于传统液冷板通道结构的研究外,部分学者引入仿生学设计理念,从自然界动植物的形态结构中汲取灵感,设计出一系列的仿生结构液冷板。Xiong Xiao等^[13]提出了一种仿生蜘蛛网流道的液冷板,多因素优化数值分析表明,在同等体积分数下,该仿生结构相较于蜂窝状及传统螺旋流道,不仅实现了更优的电池控温与均温性能,还显著降低了系统压降,成功兼顾了高效散热与低泵送功耗的设计需求。Fan Xu等^[14]提出了一种仿生鱼骨通道液冷板,正交优化结果表明,单进双出对称鱼骨结构在有效降低电池最高温度与最大温差的同时,使系统压降显著降低了19.16%,实现了高效均温与低泵送功耗的优异平衡。Wang Yichao等^[15]提出了一种新型蝴蝶状流道液冷板,结果表明,蝴蝶状结构通过改进流道分布,在显著提升传热效率、优化电池表面温度均匀性的同时,有效降低了系统的压力损失。

本文以 $99\text{ A}\cdot\text{h}$ 的锂离子电池为研究对象,设计了一种仿DNA双螺旋和相互缠绕的藤蔓结构的螺旋通道液冷板。首先实验获得锂离子电池的热物理参数,建立电池体积热源产热模型。接着分析结构参数对液冷板传热性能的影响,通过正交试验获得最优结构参数组合。再将螺旋通道与并行通道、波纹形通道、特斯拉阀形通道3种典型液冷板通道结构的冷却性能进行对比。

1 模型与方法

1.1 液冷板的设计

通过仿制DNA双螺旋结构和相互缠绕的藤蔓的

外形,设计了一种螺旋通道液冷板(图1)。如图1(a)所示,液冷板排布在电池两侧,采用对称布置方式。单块液冷板的尺寸为300 mm×93 mm×4 mm。如图1(b)所示,液冷板内设计有4个独立通道,冷却液的进出口分别设置在液冷板两端。如图1(c)所示,该螺旋通道被设计成内外3圈的结构,其入口截面尺寸为3 mm×2 mm。

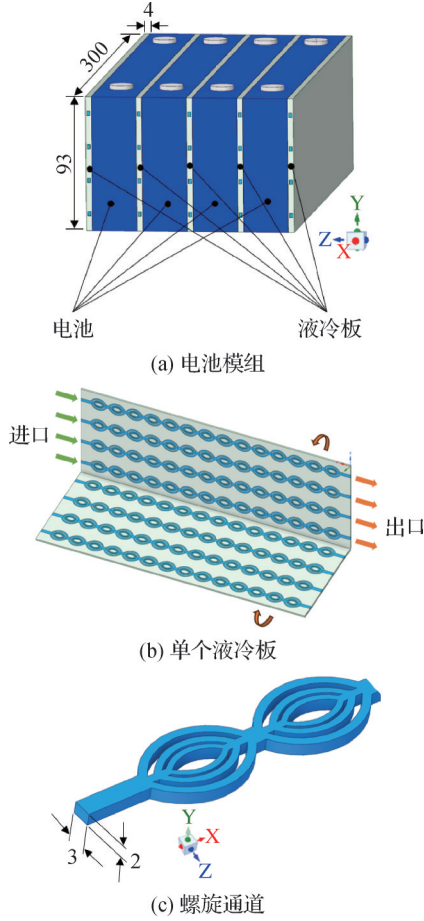


图1 液冷板结构

Fig.1 Structure of the cold plate

1.2 控制方程

为便于仿真分析,对数值模拟进行一定程度的简化处理,如下:1)液冷板均匀且各项同性;2)冷却液单相且不可压缩;3)锂离子电池均匀发热;4)忽略重力和热辐射^[16];5)固体和流体域的热物理性质保持不变;

能量方程的收敛残差设定为 10^{-6} ,可以确保高精度的计算。液冷板的材料为铝,并采用液态水作为冷却液,具体热物性参数如表1所示。

由此可知,冷却液的质量、动量和能量控制方程如下:

$$\nabla \cdot (\rho_w \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

表1 水和铝的特性

Tab.1 Properties of water and aluminum

热物性参数	铝	水
密度/(kg/m ³)	2 179	998.2
比热容/[J/(kg·K)]	871	4 182
导热系数/[W/(m·K)]	202.4	0.6
动力黏度/(Pa·s)	—	1.003×10^{-3}

$$\rho_w (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nabla \cdot p = \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

$$\rho_w c_w (\vec{v} \cdot \nabla T_w) = k_w \nabla^2 T_w \quad (3)$$

式中: ρ_w 、 $\vec{v}$ 、 p 、 μ 、 c_w 、 T_w 、 k_w 分别为冷却液的密度(kg/m³)、速度矢量(m/s)、静压(Pa)、动力黏度(Pa·s)、比热容(J/(kg·K))、温度(K)和导热系数(W/(m·K))。

液冷板的能量控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_p c_p T_p) = -\nabla \cdot (\lambda_p \nabla T_p) \quad (4)$$

式中: τ 为时间(s); ρ_p 、 c_p 、 T_p 、 λ_p 分别为液冷板的密度(kg/m³)、比热容(J/(kg·K))、温度(K)和导热系数(W/(m·K))。

1.3 电池产热模型

选取99 A·h的方形壳锂离子电池为对象开展热物理参数测试实验,实验测试平台如图2所示。该平台主要由3部分组成,动力支撑系统(型号:CE-6002n-200V300A-H)用于给锂离子电池提供特定倍率下的充放电需求;恒温恒湿试验箱(型号:HD-E702-100B)为测试提供相应的环境温度与湿度;数据监测系统用于记录测试时电压与电流的实时数据。



图2 充电测试平台

Fig.2 Charging test platform

设计了混合脉冲功率特性测试,对电池内阻进行分析。首先,在电池2.25 C倍率下进行10 s充电后静置40 s,再以相同的倍率放电10 s,测试结果如图3所示。最终电池的总内阻可由式(5)进行计算。

$$R = \frac{(V_3 - V_1)}{I} \quad (5)$$

式中: R 为电池总内阻,Ω; V_1 、 V_3 为瞬时电压,V; I 为电

流, A。

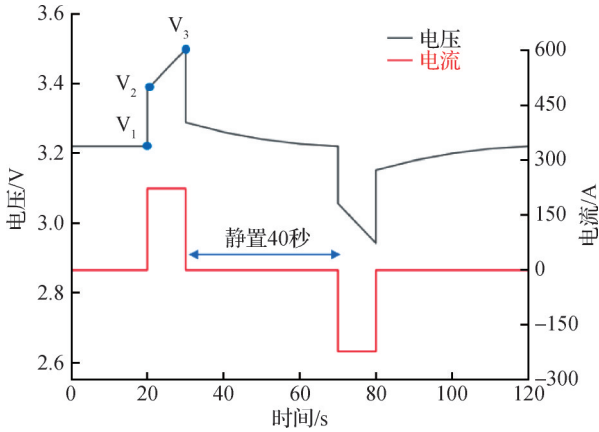


图3 循环步骤电压和电流变化

Fig.3 Voltage and current variations during cycling steps

进一步采用电位法测量电池的开路电压(V_{ocv})随温度(T)的变化。分别在 290、300、310、320 K 这 4 个温度点,记录在热力学达到平衡时的 V_{ocv} 值,结果如图 4 所示。通过计算其斜率,即可得到电池的熵系数。根据测得的电池内阻($1.17 \text{ m}\Omega$)和熵系数($-6.0 \times 10^{-5} \text{ V/K}$),并借鉴 D. Bernardi 等^[17]提出的电池产热模型来计算发热量,计算如下:

$$R = R_e + R_p = \frac{(V_3 - V_1)}{I} \quad (6)$$

$$Q = I^2(R_e + R_p) + IT_b \frac{\partial V_{ocv}}{\partial T_b} \quad (7)$$

式中: R_e 、 R_p 分别为电池的欧姆内阻和极化内阻, Ω ; Q 为电池的发热功率, W; T_b 为电池的工作温度, K; V_{ocv} 为电池的开路电压, V。

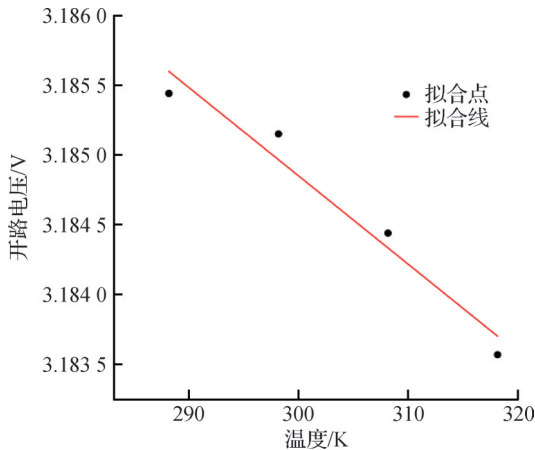


图4 实验拟合结果

Fig.4 Experimental fitting results

1.4 初始边界条件与网格独立性测试

数值模拟的相关边界条件如下。

1)入口:冷却液和环境温度设置为 298.15K,单

个入口的质量流量为 1.2 g/s。

2)出口:出口压力设为大气压为 0 Pa。

3)壁面:模拟设置两侧壁面的热流是恒定的,热通量在两侧壁面上均匀分布。当电池以 3 C 倍率充电时,根据式(8)可计算出电池与液冷板壁面间的热通量为 $q=3\,533.17 \text{ W/m}^2$ 。通过式(9)与式(10)计算出通道内冷却液的雷诺数(Re)为 478.66,远小于临界雷诺数 2 300,因此采用层流流动模型进行数值模拟计算。

$$q = \frac{Q}{A_0} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho D_h v_{in}}{\mu} \quad (9)$$

$$D_h = \frac{4f}{p} = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (10)$$

式中: q 为热通量, W/m^2 ; A_0 和 f 分别表示液冷板与电池接触面的面积和通道的横截面积, m^2 ; v_{in} 为冷却液入口流速, g/s ; D_h 为通道横截面的水力直径, m ; p 为通道的周长, m ; a 和 b 分别是通道横截面的长度和宽度, m 。

网格独立性检验主要对最高温度、表面平均温度和压降进行分析,结果如图 5 所示。考虑到时间和计算成本,后续模拟的网格数量以 693 502 进行数值计算。

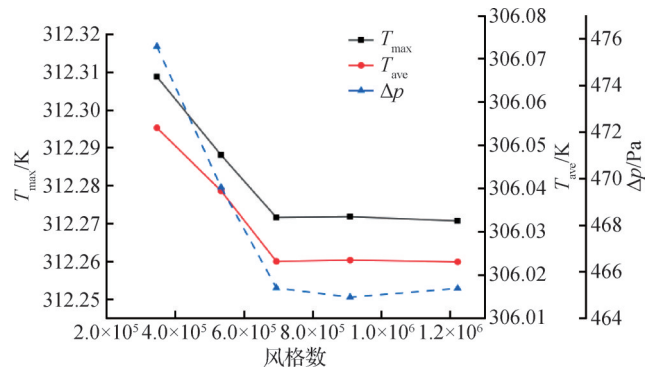


图5 网格独立性检验结果

Fig.5 Grid independence verification results

2 液冷板的结构优化

2.1 结构设计参数

螺旋结构分流处设计成内外 3 圈的结构(图 6)。设计了长度比(A)、螺旋角度(B)和宽度比(C)3 个设计参数,初始宽度 W_0 和长度 L_0 分别为 3 mm 和 20 mm。 A 设置为 0.60、0.65、0.70、0.75, B 设置为 130°、140°、150°、160°, C 设置为 0.70、0.75、0.80、0.85, A 和 C 的计算如下。

$$A = \frac{W_3}{W_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_1}{W_0} \quad (11)$$

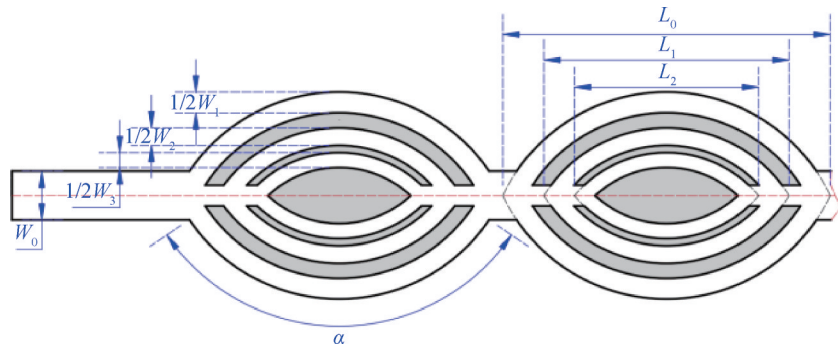


图6 螺旋结构尺寸设计

Fig.6 Dimensional design of the spiral structure

$$C = \frac{L_2}{L_1} = \frac{L_1}{L_0} \quad (12)$$

式中： W_1 、 W_2 、 W_3 分别为螺旋通道内外三圈的宽度，mm； L_1 、 L_2 分别为螺旋通道内圈的长度，mm。

2.2 正交试验设计

正交试验是开展多因素多水平参数优化的经典数理统计方法,可系统分析多变量耦合作用的影响规律。选取的3个优化变量分别为长度比、螺旋角度与宽度比,正交试验结果见表2。

表2 正交实验结果

Tab.2 Orthogonal experiment results

编号	因素			评价指标		
	A	B	C	$T_{\max}/\text{K}$	T_{ave}/K	$\Delta p/\text{Pa}$
1	0.60	130°	0.70	312.65	306.70	471.97
2	0.60	140°	0.75	312.55	306.49	455.42
3	0.60	150°	0.80	312.42	306.23	467.95
4	0.60	160°	0.85	312.25	305.94	456.53
5	0.65	130°	0.75	312.69	306.62	416.30
6	0.65	140°	0.70	312.36	306.35	530.46
7	0.65	150°	0.85	312.42	306.10	414.79
8	0.65	160°	0.80	312.14	305.88	504.97
9	0.70	130°	0.80	312.68	306.48	373.25
10	0.70	140°	0.85	312.55	306.23	369.52
11	0.70	150°	0.70	312.11	306.05	585.39
12	0.70	160°	0.75	312.01	305.82	558.59
13	0.75	130°	0.85	312.65	306.33	337.08
14	0.75	140°	0.80	312.42	306.16	411.98
15	0.75	150°	0.75	312.15	305.97	519.55
16	0.75	160°	0.70	311.86	305.76	647.70

2.3 正交试验结果分析

极差分析计算结果汇总如表4所示,其中 R 为极差, K_i 为同一因素下第 i 水平对应评价指标的数值总

和, k_i 为对应水平的指标均值。

由表4中各 k_i 的值可分析出不同水平下各结构设计参数对目标函数的影响。对于最高温度,结构设计参数的最优水平为 A_4 、 B_4 、 C_1 (1至4为结构设计参数值由小到大)。因此,单对最高温度分析时,最优设计方案为 $A_4B_4C_1$ 。对于表面平均温度和压降,最优设计方案分别为 $A_4B_4C_4$ 和 $A_1B_1C_1$ 。表3所示为可能的最佳方案之间的结果对比。液冷板的最佳设计方案可由上述3种方案中选出。极差 R 可反映出各设计参数对目标函数的影响权重。根据 R 的值可知影响因素对目标函数的显著性为 $T_{\max}:B>C>A$; $T_{\text{ave}}:B>A>C$; $\Delta p:C>B>A$ 。

表3 候选方案评价指标

Tab.3 Candidate program evaluation indicators

候选方案	$T_{\max}/\text{K}$	T_{ave}/K	$\Delta p/\text{Pa}$
$A_4B_4C_1$	311.86	305.76	647.70
$A_4B_4C_4$	312.09	305.70	458.95
$A_1B_1C_4$	312.95	306.74	331.04

综合最高温度、表面平均温度和压降3个目标函数的影响,确定液冷板的最佳设计参数方案。参数 B 对最高温度和表面平均温度的影响最大,且当 B 越大时最高温度和表面平均温度越小,所以取 B_4 。参数 C 对压降的影响最大,且呈正相关,所以取 C_4 。由已选出的3种方案和 B_4 、 C_4 可知,液冷板的最佳设计参数方案为 $A_4B_4C_4$ 。

3 结果与讨论

3.1 温度云图分析

并形、波纹形及特斯拉阀形为3种常用的液冷板流道结构。由于不同流道结构形式差异显著,为保证各方案冷却性能对比的客观性,使4种通道结构的液冷板保持基本一致的流道横截面积。通

表4 正交试验结果极差分析
Tab.4 Analysis of extreme differences of orthogonal experimental results

	$T_{\max}/\text{K}$			T_{ave}/K			$\Delta p/\text{Pa}$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
K_1	1 249.87	1 250.67	1 248.98	1 225.36	1 226.13	1 224.86	1 851.87	1 598.60	2 235.52
K_2	1 249.61	1 249.88	1 249.40	1 224.95	1 225.23	1 224.90	1 866.52	1 767.38	1 949.86
K_3	1 249.35	1 249.10	1 249.66	1 224.58	1 224.35	1 224.75	1 886.75	1 987.68	1 758.15
K_4	1 249.08	1 248.26	1 249.87	1 224.22	1 223.40	1 224.60	1 916.31	2 167.79	1 577.92
k_1	312.47	312.67	312.25	306.34	306.53	306.22	462.97	399.65	558.88
k_2	312.40	312.47	312.35	306.24	306.31	306.23	466.63	441.85	487.47
k_3	312.34	312.28	312.42	306.15	306.09	306.19	471.69	496.92	439.54
k_4	312.27	312.07	312.47	306.06	305.85	306.15	479.08	541.95	394.48
R	0.20	0.60	0.22	0.29	0.68	0.08	16.11	142.30	164.40

道数量统一设置为4条,入口截面宽度与高度分别取3 mm和2 mm,与本文的螺旋通道完全相同,进一步保障对比结果的准确性。

图7所示为4种通道液冷板的半深度平面温度分布,冷却性能依次增强。并形通道的最高温度为319.22 K,由于结构简单、冷却液停留时间短,所以冷却性能最差。波纹形通道最高温度为318.19 K,温度分布特征与并行通道相近,性能略有提升但与后2种复杂结构差距明显。特斯拉阀形通道最高温度为312.92 K,温度分布特征与并行通道相近,性能略有提升但与后2种复杂结构差距明显。特斯拉阀形通道最高温度降至312.92 K,因入口与通道衔接处压差不足,入口

区域并非全场最低温,冷却液进入通道主体后才充分发挥换热作用。螺旋通道的最高温度仅为312.65 K,其复杂流道可实现均匀流量分配,且多层内外圈布局延长了流体流动路径与停留时间。当流体在圆弧弯曲或螺旋通道中流动时,由于离心力的作用,通道中心流速较大的流体将被推向外侧壁面,而壁面附近流速较小的流体受挤压沿边缘流回内侧。在每1次弯曲和多圈分流处,原本发展的热边界层被强行破坏并在新的壁面重新发展,使得热边界层保持极薄的状态,加强了其吸热效率。

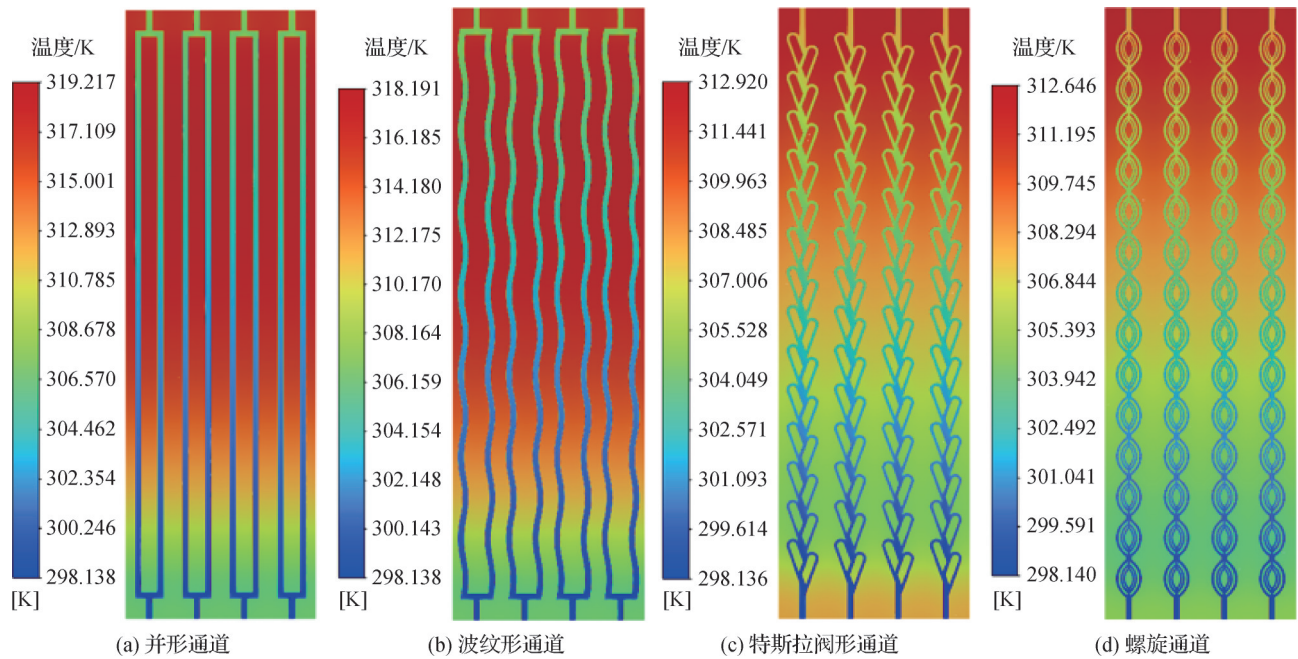


图7 不同通道结构的液冷板中心截面温度

Fig.7 Temperature at the central cross-section of liquid cooling plates with different channel structures

图8所示为4种液冷板通道的综合性能。温度均匀性以螺旋通道最优,特斯拉阀形通道与之相近,

波纹形通道次之,并行通道最差。压降的规律则与之相反,并行通道压降最低,波纹形通道略高,特斯

拉阀形与螺旋通道的压降远高于前两类通道。

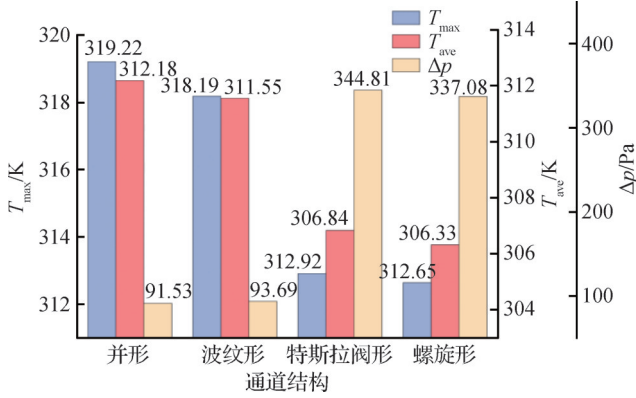


图8 不同通道结构冷却性能对比

Fig.8 Comparison of cooling performance of different channel structures

3.2 期望函数分析

为了更直观地对比4种通道的综合冷却性能,引入式(13)所示的期望函数 D_e ,从最高温度、表面平均温度与压降3个维度开展评价。由图8可确定各参数取值上下限,为保障对比公平,3项评价指标权重均取1,即权重比为1:1:1。表5所示为各通道结构的 D_e 值。值越大代表液冷板冷却性能越优越,因此可知螺旋通道的性能最优。

$$D_e = (dT_{\max}^{r_1} \cdot dT_{\text{ave}}^{r_2} \cdot d\Delta p^{r_3})^{\frac{1}{\sum_{i=1}^3 r_i}} \quad (13)$$

表5 期望函数值

Tab.5 Desirability function value

通道结构	$dT_{\max}$	dT_{ave}	$d\Delta p$	D_e
并形通道	0.262	0.097	0.881	0.022
波纹形通道	0.331	0.160	0.875	0.046
特斯拉阀形通道	0.682	0.631	0.158	0.068
螺旋通道	0.700	0.683	0.180	0.086

4 总结与展望

本文设计了一种仿形螺旋通道液冷板,通过数值仿真与正交试验方法开展了系统的性能研究,得出结论如下:

1)基于实验测得电池的内阻($1.17 \text{ m}\Omega$)与熵系数($-6.0 \times 10^{-5} \text{ V/K}$),可以准确表征出电池的发热特性。

2)通过极差分析显示,螺旋角度是影响电池最高温度与表面平均温度的最主要因素。宽度比对系统压降的影响最大,且与压降呈正相关。长度比、螺旋角度和宽度比这3个设计参数的最佳组合为0.75、

160°、0.85。

3)与3种典型通道液冷板的冷却性能进行对比,通过数学期望的计算结果可知,螺旋通道的综合性能最优。

综上所述,本文设计的仿形螺旋通道液冷板具有较佳的综合散热性能,能将99 A·h方壳锂电池最高温度控制在312.65 K,但其仍有一定的局限性。当前研究主要依赖于数值仿真,且侧重于固定高倍率工况下的稳态分析。后续可从以下几个方面展开研究:加工微流道液冷板实物原型,搭建物理实验平台以强化系统级的实测试验;建立瞬态的热传导模型,结合电池动态产热规律,研究不同工况下液冷板的动态散热响应特性;液冷板选用传统铝材料加工制造,后续可拓展新型材料的应用研究。

本文受中央高校基本科研业务费专项资金(PA2025GDSK0091),安徽建筑大学科研储备库培育项目(2024XMK04),安徽省高校自然科学基金项目(2024AH051349)资助。(The project was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. PA2025GDSK0091), the Research Reserve Nurturing Project in Anhui Jianzhu University (No. 2024XMK04), and the University Natural Science Research Project of Anhui Province(No. 2024AH051349).)

参考文献

- [1] 瞿国春, 赵世佳, 王建斌. 我国新能源汽车产业高质量发展战略研究[J]. 中国软科学, 2025(6): 1-7. (Qu Guochun, Zhao Shijia, Wang Jianbin. Research on the high-quality development strategy of China's new energy vehicle industry[J]. China Soft Science, 2025(6): 1-7.)
- [2] 舒强, 王艺帆, 梁元. 我国电动汽车动力电池安全标准现状及展望[J]. 汽车工程, 2022, 44(11): 1706-1715. (Shu Qiang, Wang Yifan, Liang Yuan. Current situation and prospect of traction battery safety standards for electric vehicles in China[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(11): 1706-1715.)
- [3] Chen Yifan, Hu Zhong. Computational fluid dynamic modeling of pack-level battery thermal management systems in electric vehicles [J]. Energies, 2025, 18(3): 484.
- [4] Shahjalal M, Shams T, Islam M E, et al. A review of thermal management for Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102518.
- [5] Choi H, Lee H, Kim J, et al. Hybrid single-phase immersion cooling structure for battery thermal management under fast-charging conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 287: 117053.

- [6] Bravo Diaz L, He Xuanze, Hu Zhenwen, et al. Review—meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: industry challenges and research contributions [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(9): 090559.
- [7] Qin Peng, Sun Jinhua, Yang Xulai, et al. Battery thermal management system based on the forced-air convection: a review[J]. eTransportation, 2021, 7: 100097.
- [8] Chen Kai, Zhang Zhenli, Wu Bingheng, et al. An air-cooled system with a control strategy for efficient battery thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121578.
- [9] Yuan Xiaolu, Zheng Rentong, Yang Jiaming, et al. Compact thermal management for high-density lithium-ion batteries: Liquid cooling solutions [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 113: 115523.
- [10] Gungor S, Lorente S. PCM-based passive cooling solution for Li-ion battery pack, a theoretical and numerical study [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124262.
- [11] 唐程波, 锁要红, 何昭坤. 基于正弦函数的液冷板上流体流向对锂离子电池散热性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(8): 2547–2555. (Tang Chengbo, Suo Yaohong, He Zhaokun. Effect of fluid-flow direction on heat dissipation from lithium-ion batteries based on sine-function cooling plate [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(8): 2547–2555.)
- [12] Fan Yiwei, Wang Zhaohui, Fu Ting, et al. Numerical investigation on lithium-ion battery thermal management utilizing a novel tree-like channel liquid cooling plate exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 183: 122143.
- [13] Xiong Xiao, Wang Zhaohui, Fan Yiwei, et al. Numerical analysis of cylindrical lithium-ion battery thermal management system based on bionic flow channel structure [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 42: 101879.
- [14] Fan Xu, Meng Chao, Yang Yawen, et al. Numerical optimization of the cooling effect of a bionic fishbone channel liquid cooling plate for a large prismatic lithium-ion battery pack with high discharge rate [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108239.
- [15] Wang Yichao, Xu Xiaobin, Liu Zhiwei, et al. Optimization of liquid cooling for prismatic battery with novel cold plate based on butterfly-shaped channel [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 109161.
- [16] Kewalramani G V, Agrawal A, Saha S K. Modeling of microchannel heat sinks for electronic cooling applications using volume averaging approach [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 395–409.
- [17] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5–12.

通信作者简介

何平,男,教授,安徽建筑大学机械与电气工程学院,0551-63828221,E-mail:heping@ahjzu.edu.cn。研究方向:车载动力电池冷却及储能技术。

About the corresponding author

He Ping, male, professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, 86-551-63828221, E-mail: heping@ahjzu.edu.cn. Research fields: cooling and energy storage technologies for vehicle-mounted power batteries.