

锂电池冷板新波形微流道传热特性研究及结构优化

李君浩^{1,2}, 任晓龙², 杨炯¹, 汤松臻¹

(1. 郑州大学机械与动力工程学院, 郑州, 450001; 2. 广东顺德创新设计研究院, 广东佛山, 528300)

摘要: 为了在锂电池安全范围内提升电池组的温度均匀性并减少能耗, 基于欠阻尼的二阶系统单位阶跃响应曲线设计了一种新型波形流道, 以方形三元锂为电芯的 1p12s (1 并 12 串) 590 模组, 在 25 °C 进行 2C 放电的工况下采用计算流体力学 (CFD) 数值计算方法进行单因子试验稳态分析, 研究流体流速、波形频率、阻尼和区间与液冷板冷却性能及流体压降的关系。通过单因子试验选取合适参数设计正交试验并进行极差和方差分析, 根据显著性得到各因子组合, 计算综合性能指标得到最优组合。结果表明: 最高温度与阻尼和区间正相关, 与流速和频率负相关, 最大温差与区间呈正相关, 与流体流速和频率呈负相关且影响程度均递减, 阻尼对其影响表现出先降低后增加, 压降与流速和频率呈正相关, 与阻尼和区间呈负相关。正交试验分析最佳因子组合是频率为 4、阻尼为 0.03 和区间为 1 的波形流道, 最大温度、最大温差和压降分别为 35.368 °C、2.125 °C 和 6.121 kPa, 相比原始余弦流道分别增加了 1.99%、减小 42.61% 和 39.96%。通过调整频率、阻尼和区间参数, 显著提高了液冷板的热传递效率和电池组温度均匀性, 提高电池组稳定性和寿命的同时降低了能耗。该设计方案为动力电池间接液冷应用于多种工程情况提供了思路。

关键词: 锂离子电池; 波形微通道; 电池热管理; 数值模拟; 正交试验

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202411002 **文章编号:** 0253-987X(2024)11-0014-13

Research on Heat Transfer Characteristics and Structural Optimization of New Waveform Microchannels for Lithium-Ion Batteries Cooling Plates

LI Junhao^{1,2}, REN Xiaolong², YANG Jiong¹, TANG Songzhen¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Guangdong Shunde Innovative Design Institute, Foshan, Guangdong 528300, China)

Abstract: To enhance the temperature uniformity of the battery pack within a safe range and reduce energy consumption, a novel waveform channel is designed based on the underdamped second-order system unit step response curve. Using a 1p12s (1 parallel and 12 series) 590 module with square ternary lithium as the core, a steady-state analysis of a single-factor experiment is conducted under the condition of 2C discharge at 25 °C using the computational fluid dynamics (CFD) numerical calculation method. The relationship between fluid flow velocity, waveform frequency, damping, interval, liquid cooling plate cooling performance, and fluid pressure

收稿日期: 2024-06-28。 作者简介: 李君浩(2000—), 男, 硕士生; 杨炯(通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52376078); 河南省重点研发专项资助项目(241111320900)。

网络出版时间: 2024-08-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240812.1417.004>

drop is investigated. Suitable parameters are selected through single-factor experiments to design orthogonal experiments. Range and variance analyses are then conducted to determine significant factor combinations and calculate the optimal combination based on comprehensive performance indicators. The results show that the maximum temperature is positively correlated with the damping and interval, and negatively correlated with the flow velocity and frequency. The maximum temperature difference is positively correlated with the interval, and negatively correlated with the flow velocity and frequency, with decreasing impact levels. Damping initially decreases and then increases its impact. Pressure drop is positively correlated with flow velocity and frequency, and negatively correlated with damping and interval. The orthogonal experiment analysis reveals that the optimal factor combination is a waveform channel with a frequency of 4, damping of 0.03, and interval of 1. The maximum temperature, maximum temperature difference, and pressure drop are 35.368 °C, 2.125 °C, and 6.121 kPa, respectively. In comparison to the original cosine channel, these values increase by 1.99%, decrease by 42.61%, and decrease by 39.96%, respectively. By adjusting the parameters of frequency, damping, and interval, the heat transfer efficiency of the liquid cooling plate and the temperature uniformity of the battery pack are significantly improved, enhancing the stability and lifespan of the battery pack while reducing energy consumption. The flexible adjustment of the parameters of these three factors provides insights for application in various engineering scenarios.

Keywords: lithium-ion batteries; wavy microchannel; battery thermal management; numerical simulation; orthogonal test

锂离子动力电池(以下简称锂电池)作为新能源汽车的能量来源,具有低自放电率、循环寿命长、能量密度高及重量轻等优点^[1-2]。因为锂电池对工作温度较敏感,过高或过低温都将影响锂电池的各项性能,在充放电过程累积的热量甚至会引起锂电池的自燃或爆炸^[3-6]。新能源汽车电池包内的多串电芯导致前后电芯有较大温差,多次充放电后导致容量、内阻、老化速率的不一致,严重影响整个电池包寿命,最终引发锂电池组过早失效。

合理的动力锂电池热管理系统(BTMS)可维持电池包的温度稳定在最佳的工作温度 20~40 °C^[7],同时温差小于 5 °C 以保证电池的最佳性能和寿命。目前电池热管理根据其传热介质的不同可分为 3 类^[8-9]:基于空气的电池热管理(ACS)、基于相变材料的电池热管理(PCM)和基于液体介质的电池热管理(LCS)。空气的低导热性和低热容性使 ACS 难以满足工况要求^[10],相变材料高成本及单相时较差的导热性使其有一定的局限性^[11]。由于 LCS 优秀的导热性,可以维持各电芯温度在最佳区间内的同时保持较小的温差,因此 LCS 方案具有较高的研究价值^[12-13]。Zhao 等^[14]在单流道的基础上,优化通道宽度、高度和冷却剂流速;为了进一步改善电池

模块的温度均匀性,在电池模块上方增加另一块液冷板;改进后的 BTMS 可将最高温度控制在 27.7 °C,将温差控制在 1.9 °C。Zhu 等^[15]设计了一种具有离散、倾斜和交替排列的肋槽的冷板。根据肋槽倾角、柱间距、排间距、肋槽长度 4 个结构参数对电池模组热性能和能耗的影响得出最佳结构。Li 等^[16]验证了一种螺旋流道液冷板,确定了该系统的最优结构和冷却策略,用于电动汽车中的电池组测试,测试结果表明,最高温度控制在 25.51 °C 以下,最大温差控制在 0.21 °C 以下。Amalesh 等^[17]提出了 7 种包括矩形槽、方波、正弦波等微流道,发现冷却性能均优于直矩形流,其中圆槽型和锯齿形流道的均温性显著优于方波和正弦波。王新婷等^[18]将多目标遗传算法与仿真软件耦合,优化波纹微通道冷板 4 个结构参数,发现流道宽度与冷板性能关系最为显著。余剑武等^[19]设计了一种强化传热结构,通过对液冷板的稳态分析,发现整体布置强化传热结构可使液冷板的平均温度和最大温差分别降低 8.9 °C 和 9.06 °C。

现阶段,波形流道的研究在均温性和压降两个参数无法体现出优势。因此,本文基于欠阻尼二阶系统的阶跃响应曲线设计出振幅逐渐衰减的波形流道,改变流道不同流段的流动特性和对流换热继而

改变液冷板的冷却效果。相较于其他波形流道,引入阻尼因素,使得频率、阻尼及波形区域及其相互作用共同影响流道结构继而优化液冷板冷却性能,其中频率改变拐点曲率和液冷板流道实际长度,阻尼改变幅值衰减的速度,波形区域在上述两个参数不变的情况下影响波形幅值、拐点曲率和流道实际长度,从而实现流道结构的多维度灵活控制,得到不同结构下电池组的最大温度、最大温差和流道内流体压降,获得综合性能最优的流道结构。

为满足实际工况下电池包温度要求,本文以某品牌新能源汽车为例,简化三元锂方形电池为电芯的 1p12s(1 并 12 串)590 模组,以液冷板为研究对象提出一种波纹流道液冷板的设计方案,基于多物理场分析 Comsol 软件建立模型,对不同流道结构进行仿真,得到频率、阻尼及波形区域对各电芯最高温度、电芯间最大温差和压降的影响规律。

1 模型的建立与计算方法

1.1 电池生热模型

基于 Bernardi 等电池生热模型将电池生热分为焦耳热和可逆反应热,为描述锂离子电池充放电过程的热效应,单位体积热效应公式^[20]如下

$$Q = \frac{I}{V_b}[(U_{oc} - U) + \psi] \tag{1}$$

$$\psi = T \frac{dU_{oc}}{dT} \tag{2}$$

式中: ψ 为可逆反应热; Q 为电池的产热总功率; V_b 为电池单体体积; I 为回路电流; U_{oc} 、 U 分别为开路电压和工作电压, $U_{oc} - U = IR_o$, R_o 为电池内阻。

本文采用的三元锂电池模型额定容量为 37 A·h,额定电压为 3.65 V,内阻为 0.7 mΩ,可逆反应热在电池放电时为正,反之为负,本文中 $U_{oc} - U$ 为 0.051 4 V^[21]。分别在 1C、2C,即 1 倍和 2 倍的放电倍率的工况下,电流为 37、74 A,计算得单位体积热功耗为 7 780、20 773 W·m³。

1.2 热物性参数

由于锂电池的分层结构,将电池视为一个各向异性材料。 x 轴与 y 轴方向上介质密度均匀, x 、 y 方向的等效导热系数 λ_x 、 λ_y 相同,采取并联热阻法计算,如下式

$$\lambda_x = \lambda_y = \sum_i \frac{\lambda_i l_{xi}}{l_x} \tag{3}$$

式中: l_x 为电池在 x 方向上的总厚度; l_{xi} 为电池在 x 方向上各层材料的厚度; λ_i 为各层材料的导热系数。

z 轴方向上由若干层级片与隔膜堆叠而成, z 方

向的等效导热系数采用串联热阻法计算,如下式

$$\lambda_z = l_x / \sum_i \frac{l_{zi}}{\lambda_i} \tag{4}$$

式中: l_{zi} 表示 z 方向上各层材料的厚度。

锂电池的比定压热容 $c_{p,b}$ 为定值且与材料性质相关,考虑方形电池的分层堆叠结构,通过质量加权法计算获得^[22]

$$c_{p,b} = \frac{1}{m_b} \sum c_i m_i \tag{5}$$

式中: c_i 为各层材料比热容; m_i 为各材料质量; m_b 为电池单体质量。系统中各材料的相关热物性参数见表 1。

表 1 各材料的相关热物性参数

Table 1 Related thermal property parameters of each material

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	比定压热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
电池内核	2 056	812	(30,30,3)
电池外壳	2 713	903	238
液冷板	2 690	900	201
隔热片	3	1 200	0.021
冷却液	1 070	3 280	0.41

注: (30,30,3) 为电池内核 x 、 y 、 z 方向等效导热系数。

根据式(1)~式(4)计算得到锂电池内核的相关热物性参数。本研究电池外壳材料为铝,液冷板材料选用 6063 铝合金,电池间隔热片选用硅基气凝胶,冷却液选用体积分数为 50% 的乙二醇水溶液。

1.3 模型验证

计算得到锂电池单位体积热耗率和各方向上的导热系数,采用 Comsol 对模型进行求解。

锂电池的充/放电性能测试试验平台如图 1 所示,主要包括锂电池、充/放电设备以及数据采集系统。实验过程中,将 5 个温度传感器(热电偶)布置在锂电池表面放置在 25℃ 室内,分别采集 1C 和 2C 放电电池表面升温情况,试验结果与数值计算结果如图 2 所示。

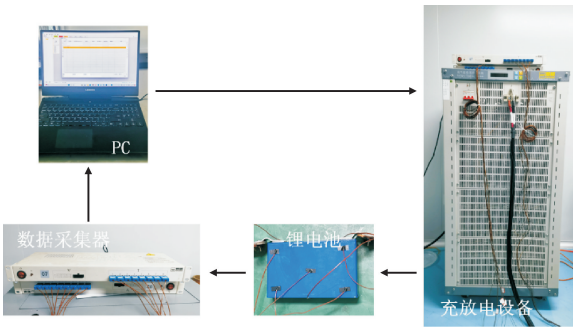


图 1 电池性能测试试验平台

Fig. 1 Battery performance test platform

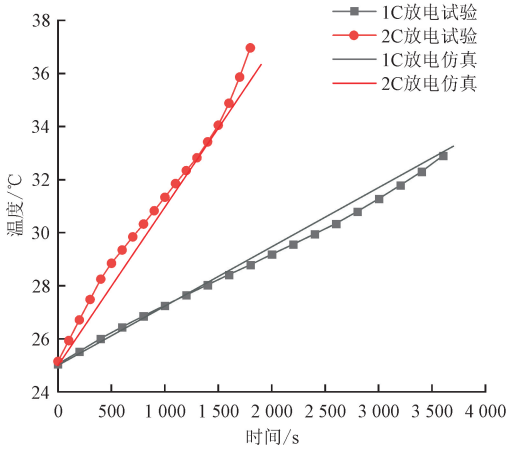


图 2 单体电池温升仿真与试验结果对比

Fig. 2 Comparison between simulation and test for temperature rise of single battery

由图 2 可知,仿真与试验测量对比结果最大误差小于 5%,产生差异的原因主要有:一方面锂电池制造导致内阻与实际内阻的差异;另一方面室内温度和锂电池表面对流换热无法稳定在一个恒定值。此模型二者一致性较好,仿真计算具有一定参考性。

1.4 CFD 控制方程与计算方法

流体的流动状态根据雷诺数分为层流与湍流。当雷诺数小于 2 300 时,流体因为黏性作用而紊动衰减,流动保持为层流。当雷诺数大于 4 000 时,流体黏性作用减弱,因为流体惯性作用使得流动转变为湍流^[23]。雷诺数计算公式为

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度; v 为流场特征速度; L 为流场特征长度; μ 为流体黏度。

乙二醇溶液密度在 20~40 °C 间随温度变化较小,计算时忽略不计。其黏度在 3.94~1.83 范围内变化,分别代入式(5)计算雷诺数均大于 4 000,因此采用 k - ω 湍流模型,其控制方程如下。

连续方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

雷诺平均 N-S 方程为

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{K} + \mathbf{R}] + \mathbf{F} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{R} = (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{K} - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{K} \quad (9)$$

k - ω 模型输送方程包括湍动能与耗散率方程,其表达如下

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta_0^* \rho \omega k \quad (10)$$

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_\omega) \nabla \omega] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta_0 \omega^2 \quad (11)$$

其中

$$\mu_T = \rho \frac{k^2}{\omega} \quad (12)$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (13)$$

式中:运算符 $:$ 表示 $\nabla \mathbf{u}$ 与 $\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T$ 所有对应元素的乘积之和; $\mathbf{u}$ 为流体速度矢量; ρ 为流体密度; p 为流体压力; $\mathbf{K}$ 为湍流瞬时扰动量; $\mathbf{F}$ 为外力; μ_T 为湍流黏度; k 为湍动能; ω 为湍动能耗散率; σ_k 、 σ_ω 分别为湍动能与湍动能耗散率的湍流普朗特数; β_0^* 、 β_0 、 α 为湍流修正系数。

液冷板的热传导方式遵循质量守恒、能量守恒和动量守恒方程,表达式分别如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}^2) = \nabla p \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_{p,l} T) + \nabla \cdot (\rho c_{p,l} T \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (16)$$

液冷板在传热过程中的能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_p c_{p,p} T) = \lambda_p \nabla^2 T \quad (17)$$

式中: $c_{p,l}$ 为流体比定压热容; λ 为流体传热系数; ρ_p 为液冷板材料密度; $c_{p,p}$ 为液冷板比定压热容; λ_p 为液冷板导热系数。

1.5 几何模型

BTMS 示意图如图 3 所示,本文针对方形三元锂电池的散热需求进行优化设计,散热系统主要包括锂电池、隔热片和液冷板,其主要几何参数见表 2, L 、 W 、 H 分别表示各结构 x 、 y 、 z 方向的几何尺寸参数。

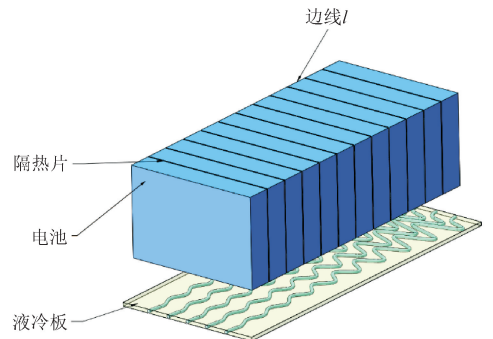


图 3 BTMS 示意图

Fig. 3 Schematic of BTMS

表 2 模型几何参数

Table 2 The geometry parameters of the models

模型	L/mm	W/mm	H/mm
电池	148	27	98
隔热片	148	1	98
液冷板	370	160	3

本文根据欠阻尼二阶系统阶跃响应曲线设计一种波纹流道,标准二阶系统传递函数如下式

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (18)$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\beta-j\infty}^{\beta+j\infty} \Phi(s) e^{st} ds \quad (19)$$

式中: ω_n 为自然频率; ξ 为阻尼比。

采用拉普拉斯逆变换式(15)得到流道波纹函数

$$\varphi(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \arccos \xi) \quad (20)$$

其中

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$$

式中: ω_d 为阻尼振荡频率。

基于本模型,为简化后续的计算做出以下假设:

- ①忽略电芯与隔热片之间、电芯与液冷板之间、隔热片与液冷板之间的接触热阻与热辐射;
- ②视液体为不可压缩的理想流体,忽略液体的等温压缩和体积膨胀;
- ③将电池简化为规则立方体,忽略正负极极耳。

2 数据仿真与结果分析

2.1 网格独立性验证

在环境温度为 25℃、冷却液流速为 0.2 m·s⁻¹、2C 放电的工况下,提出 6 个网格方案对模型进行网格独立性验证,方案 1~6 的单元数分别为 5.8×10⁶、1.26×10⁷、1.54×10⁷、2.06×10⁷、2.50×10⁷、2.72×10⁷。

受到电池各向异性的影响,电芯最高温度均沿边线 l 分布,采用统计学中的均方误差(MSE)概念,基于 Matlab 计算各网格方案在边线 l 上的温度均方误差,以此来直观体现网格单元数对优化目标的影响。本文根据网格单元数对最高温度、最低温度与均方误差的影响,验证其无关性,如图 4 所示,最低温度随网格单元数变化不明显,方案 3 后 l 上的均方误差小于 0.1,最高温度不随网格数的增加发生明显变化。所以,考虑到计算速度与精度,最终选

择方案 3 进行后续仿真分析。

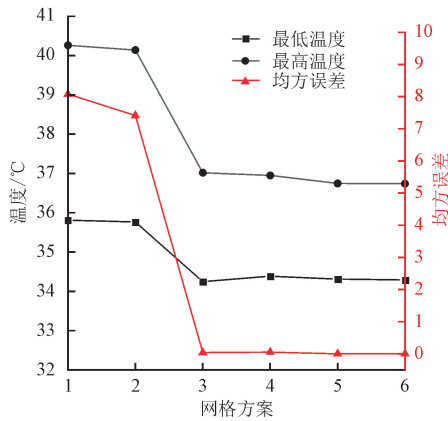


图 4 网格独立性验证

Fig. 4 Grid independence verification

2.2 单因子仿真分析

2.2.1 冷却剂入口流速的影响

从入口处将各电池编号为 1~12,图 5 表示不同流速下各电池的最大温度,图 6 表示不同流速下电池组的最大温差和压降,图 7 表示不同流速下电池组和流道截面的温度云图。根据图 3 可以看出,当入口流速为 0.10 m·s⁻¹时,电池组最高温度为 40.38℃,电池组最大温差为 4.435℃,不符合锂电池理想工作温度要求。电池组最高温度与最大温差随着流速的增加而降低,随着流速从 0.10 m·s⁻¹增加到 0.20 m·s⁻¹,最高温度和最大温差显著降低,最高温度、最大温差和各电芯最高温度的方差分别降低了 5.271℃、2.451℃、1.46,从 0.20 m·s⁻¹开始最高温度随着流速的增加变化较小,最高温度、最大温差和各电芯最大温度方差仅下降 1.33℃、0.509℃、0.138。

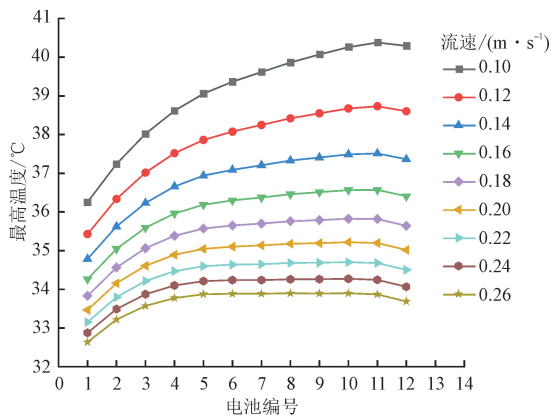


图 5 不同流速下各电池的最高温度

Fig. 5 Maximum temperature of each cell at different flow rates

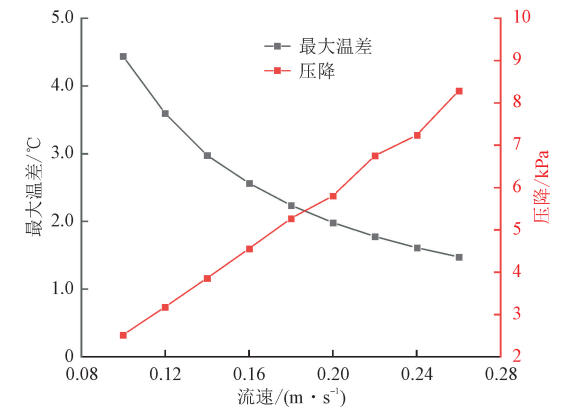


图 6 不同流速下电池组的最大温差与压降

Fig. 6 Maximum temperature difference and pressure drop of the battery pack at different flow rates

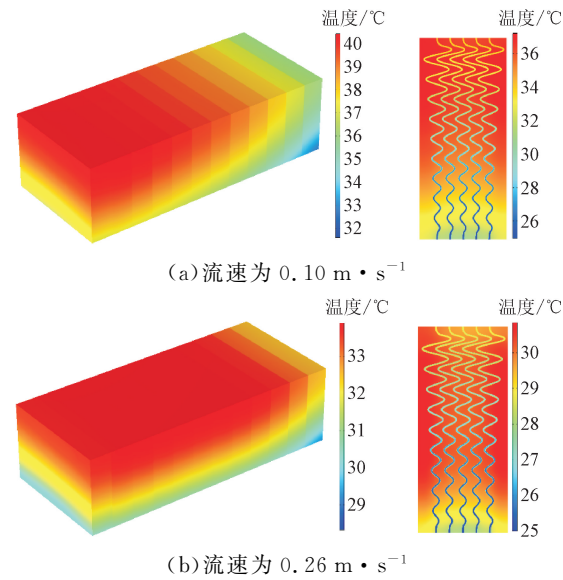


图 7 不同流速下电池组和流道截面的温度云图

Fig. 7 Temperature clouds of battery pack and runner cross-section at different flow rates

根据图 7 中液冷板和流道内流体温度云图分析,使电池组温度分布变化的主要原因为:随着流速的增加,单位时间流过流体的质量也随之增加,能带走更多的热量且升温较小,使流道中断仍保持较低温度。流体与流道表面相对速度差变大,热量传递速度加快,且湍流强度随着流速增大而加强,使得对流换热系数增大,单位时间内制冷剂可以带走更多的热量。随着流速进一步增加,此时对流换热达到极限值,进而持续增加流速不能明显提高换热系数,同时,流体与流道表面的冲击会增加流体的动能损失,反而不利于换热。综合影响下使得温差和最高温度不断降低,而降低幅度逐渐减小。

增大入口流速可显著改善电池模块的冷却效果,然而过大的流速反而会影响冷却效果。随着流

速增加,压降大幅增加,根据图 6 可以看出,当流速大于 0.20 m · s⁻¹后压降增幅变大。综上可知,当入口流速增大到一定值后对冷却性能影响较小,反而流体压降显著增加,使得液压泵功耗显著增大。

2.2.2 频率的影响

图 8 表示各电池在不同频率 ω_n 下的最高温度,图 9 表示电池组在不同 ω_n 下的最大温差和压降,图 10 表示不同 ω_n 时电池组和流道截面的温度云图。根据图 8 可以看出当 ω_n 为 1.0 rad/s 时,电池组最高温度为 40.37 °C,电池组最大温差为 5.445 °C,不符合锂电池理想工作温度要求。随着 ω_n 的增加,最高温度与最大温差不断降低, ω_n 从 1.0 rad/s 增加到 2.5 rad/s,最高温度、最大温差和各电芯最大温度方差分别降低 3.754 °C、3.87 °C、2.794, ω_n 从 2.5 rad/s 增加到 4.5 rad/s,最高温度随着 ω_n 的增加变化较小,最高温度、最大温差和各电芯最大温度方差下降 0.344 °C、1.143 °C、0.583。 ω_n 从 4.5 rad/s 增加到 5.0 rad/s,电池组最高温度增加 0.33 °C,而最大温差仅减小 0.039 °C。

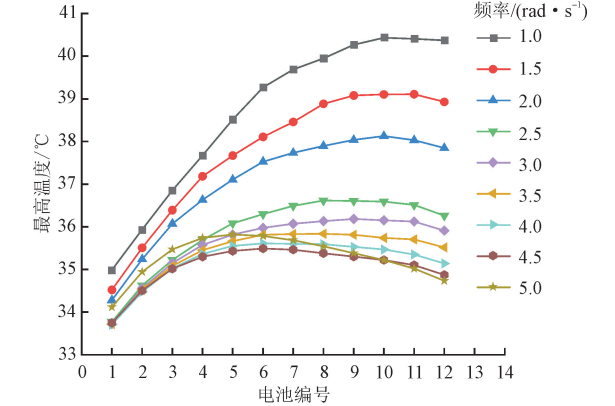


图 8 不同频率下各电池的最高温度

Fig. 8 Maximum temperature of each cell at different frequencies

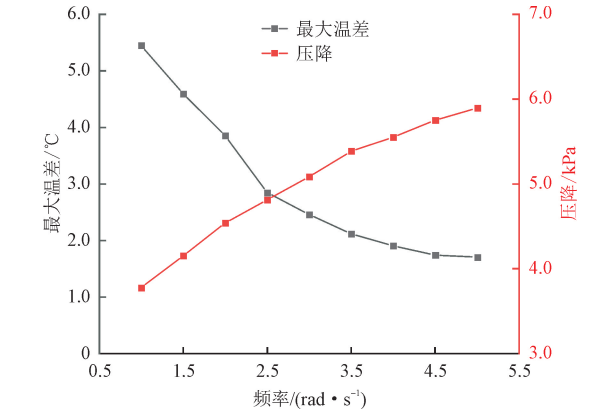


图 9 不同频率下电池组的最大温差与压降

Fig. 9 Maximum temperature difference and pressure drop of the battery pack at different frequencies

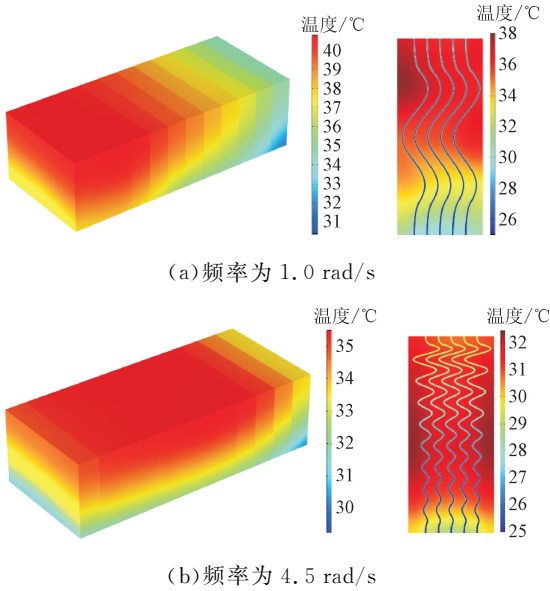


图 10 不同频率下电池组和流道截面温度云图
Fig.10 Temperature clouds of battery pack and runner cross-section at different frequencies

根据图 10 中液冷板和流道内流体温度云图分析,使电池组温度分布变化的主要原因为:流道弯曲导致流体在流道内部产生速度分布不均匀的现象,而这种速度梯度会促进对流换热。此外,流体流动受到弯曲的影响会增大流体与流道表面接触面积,也会导致流体在弯曲处产生离心力和向心力,从而增加流体的湍流程度,接触面积和湍流强度的增加会提高对流换热系数,单位时间内制冷剂可以带走更多的热量使温度逐渐降低。相同长度和阻尼系数 ξ 情况下,流道拐点随着 ω_n 减小而减少,导致流道出口处和入口处曲率均较大,随着 ω_n 的增加,入口处流道曲率减小,对流换热系数减小,同时,流道拐点的增多使冷却液到后段仍有较大温差,根据热传导定律,热传导速率正比于温度梯度,使后段仍具有良好的制冷效果,电池组最大温差逐渐减小。当 ω_n 达到 5 时,前段曲率趋于直型流道,对流换热系数极小,使电池 1 °C 到 10 °C 的最高温度不再继续减小,反而开始增大。随着 ω_n 进一步增加,流道前段已经达到较小曲率,此时对流换热降低到极限值,进而持续增加不能明显抑制前段流体温度的升高,使其到达曲率较大的后段时温度也降低到极限值,所以换热效果降低。

增加 ω_n 可显著改善电池模块的冷却效果,然而过大的 ω_n 反而会影响冷却效果。由图 9 可以看出,

随着流速增大,压降持续增加。综上可知,当 ω_n 增大到一定值后对冷却性能影响较小,而流体压降不断增大,使得液压泵功耗显著增大。

2.2.3 阻尼的影响

图 11 表示各电池在流道模型函数的不同阻尼系数 ξ 下的最高温度,图 12 表示电池组在不同阻尼下的最大温差和压降,图 13(a)、13(b)表示不同 ξ 时电池组和流道截面的温度云图。

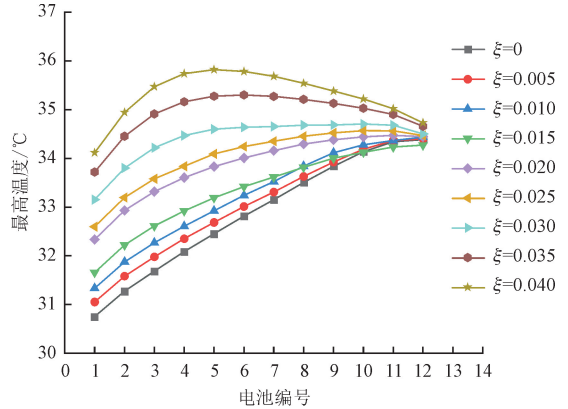


图 11 不同阻尼下各电池的最高温度
Fig.11 Maximum temperature for each cell under different damping

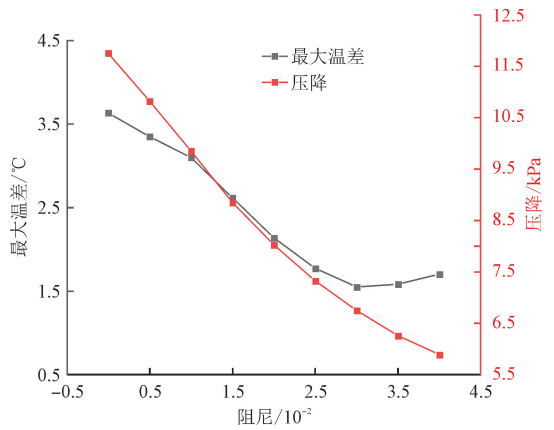
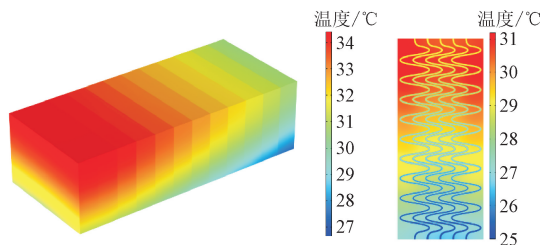
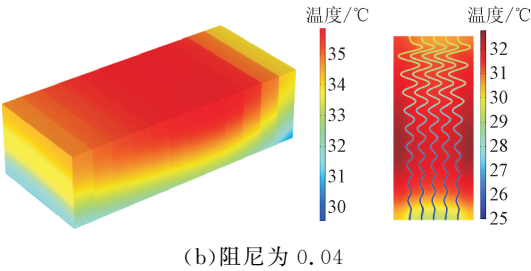


图 12 不同阻尼下电池组的最大温差与压降
Fig.12 Maximum temperature difference and pressure drop of the battery pack at different damping



(a) 阻尼为 0



(b)阻尼为 0.04

图 13 不同阻尼下电池组和流道截面的温度云图
Fig.13 Temperature clouds of battery pack and runner cross-section at different damping

电池组最高温度随着 ξ 的增加先减小后增大, ξ 为 0~0.01 时,最高温度减小 0.387 °C; ξ 为 0.01~0.03 时,最高温度增大 0.708 °C; ξ 为 0.03~0.04 时,最高温度增大 1.116 °C,此时最高温度出现在 5 或 6 号电池。最大温差先减小后增大,在 ξ 等于 0.03 处达到最小值, ξ 为 0~0.03 时,最大温差和各电池最高温度方差分别减小 1.551 °C、1.295(°C)²; ξ 为 0.03~0.04 时,最大温差和方差分别增大 1.551 °C、0.038(°C)²。根据图 13 中液冷板和流道内流体温度云图分析,使电池组温度分布变化的主要原因为: ξ 较小时,流道前段曲率大、对流换热强,高温流体到后段制冷效果差;当 ξ 增大至临界值,流道前段曲率减小,流体受流道弯曲影响使对流换热小到临界值,导致流体后端温度低,根据热传导定律,后段制冷效果较好。

根据图 12 可以看出,随着 ξ 增加压降持续减小,减小幅度和渐缓。随着 ξ 的增大,最高温度先减小后增大,最大温差在阻尼为 0.03 时达到最优,所以要综合考虑能耗和冷却效果选择 ξ 。

2.2.4 区间的影响

从原点每隔一个周期等长截出 9 个部分并分别记作 $S_d(d = 1, \dots, 9)$ 。图 14 表示各电池在流道不同区间下的最大温度,图 15 表示电池组在不同区间的最大温差和压降,图 16(a)、16(b)表示不同区间电池组和流道截面的温度云图。

各电池的最高温度和电池组最大温差均呈现不断增加,而压降呈现不断减小的趋势。根据图 16 中液冷板和流道内流体温度云图分析,使电池组温度分布变化的主要原因为:随着 d 的不断增大,流道波形趋近曲线末端,后段波形曲率更小甚至近似于直线,过小的曲率导致较弱对流换热强度和湍流强度,使流体无法充分带走热量,液冷板温度较高,流道末端仍保持较低的温度,严重影响制冷效果。

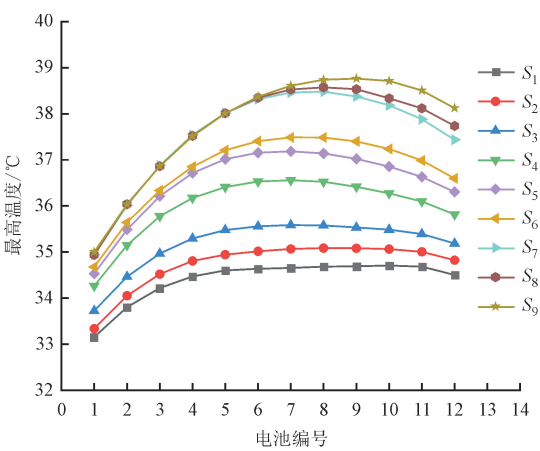


图 14 不同区间下各电池的最高温度

Fig.14 Maximum temperature of each cell under different sections

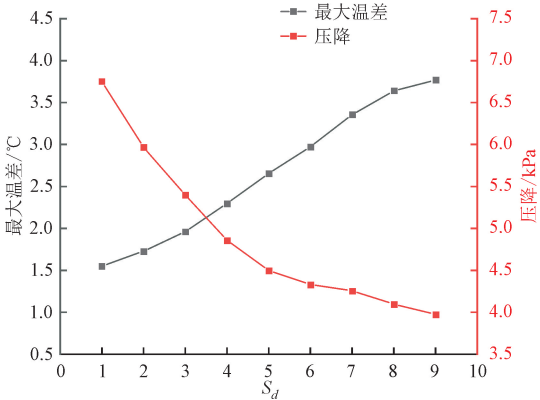
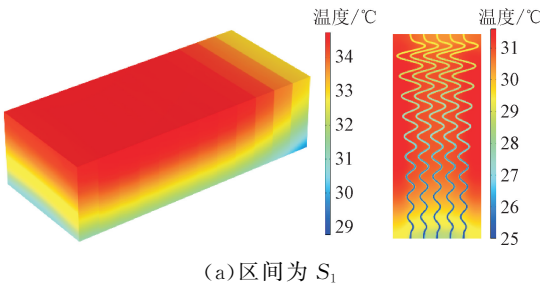
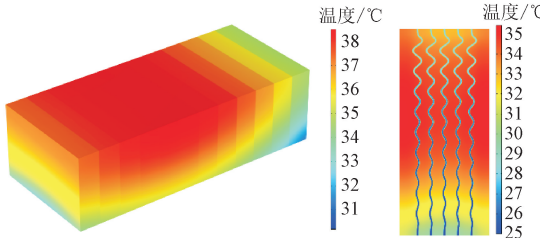


图 15 不同区间下电池组的最大温差与压降

Fig.15 Maximum temperature difference and pressure drop of the battery pack at different sections



(a)区间为 S_1



(b)区间为 S_9

图 16 不同区间下电池组和流道截面的温度云图
Fig.16 Temperature clouds of battery pack and runner cross-section at different sections

2.3 单因素试验总结

各电芯最高温度和电池组最高温度与阻尼和区间 S_d 呈正相关,与流体流速和频率呈现负相关。随着频率和流速的不断增加,最大温度增高的趋势不断减弱。当 S_d 持续增加,最高温度将趋于平稳。阻尼的增加对最高温度的影响较小,增加到极限值后才会对最高温度产生较大影响。

电池组最大温差和各电池最大温度方差与 S_d 呈正相关,与频率和流体流速呈负相关,与阻尼呈现先降低后增加的趋势。随着流体流速、频率和 S_d 的增加,对温差和方差的影响不断减小,阻尼对其影响先减小后增大。

流体压降与流速和频率呈正相关且线性增加,与阻尼和 S_d 呈负相关,随着阻尼和 S_d 的增加压降减小的趋势逐渐缓慢。

3 正交试验

最高温度、最大温差和流道内流体压降受到频率、阻尼和区间的综合影响。现阶段确定各因素最优的参数组合主要方法有正交试验后极差和方差分析、响应面法和遗传算法等,因为研究流道的 3 个

因素可能存在复杂的交互作用且初始样本点较少。综合考虑下,本文通过正交试验极差和方差分析得到最优的参数组合。

3.1 正交试验设计

通过正交试验分析不同参数下的冷却性能以及压降,获得新波形液冷板的最佳结构参数。令 A 、 B 、 C 分别为频率因子、阻尼因子和区间因子,根据单因素试验获得 3 个水平参数,如表 3 所示。

表 3 频率因子、阻尼因子和频率因子对应水平
Table 3 Frequency factor, damping factor and level corresponding to frequency factor

水平	A	B	C
1	3.0	0.020	S_1
2	3.5	0.025	S_2
3	4.0	0.030	S_3

通过单因素研究发现因子 ω_n 和因子 ξ 、因子 ω_n 和因子 S_d 的不同水平间的交互作用曲线严重不平衡,作为交互项设计正交表,正交试验与各试验仿真结果见表 4, $T_{\max}$ 、 $\Delta T_{\max}$ 和 Δp 分别表示最高温度、最大温差和压降。

表 4 正交试验与不同试验仿真结果
Table 4 Orthogonal tests and different simulation results

编号	A	B	$A \times B$	C	$A \times C$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta p/\text{kPa}$
试验 1	1	1	1	1	1	35.944	3.123	6.031
试验 2	1	2	2	2	2	36.484	3.052	5.239
试验 3	1	3	3	3	3	37.411	3.338	4.539
试验 4	2	1	1	2	2	35.709	2.832	6.180
试验 5	2	2	2	3	3	36.427	2.827	5.128
试验 6	2	3	3	1	1	35.708	2.386	5.812
试验 7	3	1	2	1	3	35.114	2.628	7.014
试验 8	3	2	3	2	1	35.568	2.375	5.916
试验 9	3	3	1	3	2	36.482	2.536	4.969
试验 10	1	1	3	3	2	36.610	3.278	5.208
试验 11	1	2	1	1	3	35.945	3.116	6.028
试验 12	1	3	2	2	1	36.774	2.999	4.948
试验 13	2	1	2	3	1	36.058	2.943	5.587
试验 14	2	2	3	1	2	35.555	2.575	6.150
试验 15	2	3	1	2	3	36.249	2.578	5.222
试验 16	3	1	3	2	3	35.334	2.626	6.448
试验 17	3	2	1	3	1	35.995	2.535	5.399
试验 18	3	3	2	1	2	35.368	2.125	6.123

注:符号 $\times$ 表示交互作用。

3.2 极差分析

采用极差 R_j ^[18] 表示各试验因子对各评价指标的影响程度,公式如下

$$K_{ij} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \tag{21}$$

$$k_{ij} = \frac{1}{n} K_{ij} \tag{22}$$

$$R_j = \max\{k_{ij}\} - \min\{k_{ij}\} \tag{23}$$

式中: i 、 j 和 n 分别表示因子水平、试验因子和因子水平数; y_{ij} 表示对应试验指标; K_{ij} 表示 j 因子在 i 水平试验之和; k_{ij} 表示 j 因子在 i 水平试验平均值; R_j 表示因子 j 试验指标范围。极差分析结果见表 5。

交互项对各指标影响较小,各因子对最高温度和最大温差影响顺序为 $A > C > B$,对压降影响顺序为 $C > B > A$ 。各因子水平对最高温度、最大温差和压降最佳组合分别为 A3B1C1、A3B3C1 和 A1B3C3。

3.3 方差分析

极差分析可直观地确定各评价指标每个因素的最佳水平组合,但是难以区分试验结果差异是否由误差引起。所以需要进行方差分析验证因素对试验评价指标影响的显著性。总平方和、各因子平方和以及平方误差总和^[24] 计算式分别如下

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \tag{24}$$

$$S_j = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \tag{25}$$

$$S_e = S_T - \sum_{j=1}^m S_j \tag{26}$$

式中: n 为试验总数; n_i 为水平 i 试验; y 为评价指标的 n 次试验的平均值; m 为因子数。

总自由度、各因子自由度、误差自由度^[23] 计算式分别如下

$$\begin{cases} U_z = n - 1 \\ U_j = n_j - 1 \\ U_e = U_z - U_j \end{cases} \tag{27}$$

因子总和均方值、误差平方和均方值及 F 值^[24] 分别如下

$$M_j = \frac{S_j}{U_j} \tag{28}$$

$$M_e = \frac{S_e}{U_e} \tag{29}$$

$$F = \frac{M_j}{M_e} \tag{30}$$

表 5 评价指标极差分析结果
Table 5 Range analysis of evaluation indicators

评价指标	极差	A	B	A × B	C	A × C
$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	k_{1j}	36.528	35.628	36.054	35.606	36.008
	k_{2j}	35.951	35.996	36.037	35.853	36.035
	k_{3j}	35.477	36.332	35.864	36.497	35.913
	R_j	1.057	0.704	0.190	0.891	0.122
$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	k_{1j}	3.151	2.905	2.787	2.659	2.727
	k_{2j}	2.690	2.747	2.762	2.744	2.733
	k_{3j}	2.471	2.660	2.763	2.910	2.852
	R_j	0.680	0.245	0.025	0.251	0.125
压降/kPa	k_{1j}	5.332	6.078	5.638	6.193	5.616
	k_{2j}	5.680	5.644	5.673	5.659	5.644
	k_{3j}	5.978	5.268	5.679	5.138	5.730
	R_j	0.646	0.810	0.041	1.055	0.114

方差分析结果见表 6,因子对评价指标的影响通过查询 F 分布表得 $F_{0.0025}(2,4) = 38$ 、 $F_{0.005}(2,4) = 26.28$ 、 $F_{0.01}(2,4) = 18$ 、 $F_{0.05}(2,4) = 6.94$,各因子的 F 值根据其对评价指标影响程度分为 5

个显著区间: $F < F_{0.05}$ 、 $F_{0.05} < F < F_{0.01}$ 、 $F_{0.01} < F < F_{0.005}$ 、 $F_{0.005} < F < F_{0.0025}$ 和 $F > F_{0.0025}$,显著性分别用“*”、“**”、“***”、“****”和“*****”表示。

表 6 评价指标方差分析结果
Table 6 Variance analysis of evaluation indicators

评价指标	因子	偏差平方和 Q	自由度 U	均方误差 M	F	显著性
$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	A	3.324	2	1.662 0	26.710	****
	B	1.486	2	0.743 0	11.655	**
	$A\times B$	0.132	2	0.066 0	1.035	*
	C	2.542	2	1.271 0	19.937	***
	$A\times C$	0.049	2	0.024 5	0.384	*
$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	A	1.446	2	0.723 0	78.162	*****
	B	0.185	2	0.092 5	10.000	**
	$A\times B$	0.002	2	0.001 0	0.108	*
	C	0.195	2	0.097 5	10.541	**
	$A\times C$	0.060	2	0.030 0	3.243	*
$\Delta p/\text{kPa}$	A	1.253	2	0.626 5	33.413	****
	B	1.968	2	0.984 0	52.480	*****
	$A\times B$	0.006	2	0.003 0	0.160	*
	C	3.335	2	1.667 5	88.933	*****
	$A\times C$	0.042	2	0.021 0	1.120	*

根据表 6 可以看出交互项 $A\times B$ 和 $A\times C$ 对各评价指标都不显著。因子 A 和 C 对电池组最高温度影响极为显著, B 为一般显著因素, 具体显著性顺序为 $A>B>C$ 。因子 A 对电池组最大温差影响极为显著, 因子 B 和因子 C 为一般显著且显著性基本一致, 具体显著性顺序为 $A>B=C$ 。各因子对压降的影响都极为显著, 具体顺序为 $C>B>A$ 。

3.4 综合分析

根据对正交试验结果的极差和方差分析, 因子 B 对电池组最高温度和最大温差影响较小且较不显著, 应选水平 3 作为最佳值。因子 A 对电池组最高温度和最大温差影响极大且显著性明显高于其他两因子, 而对流体压降的影响和显著性小于其他两因子, 因此选水平 3 为最佳值。因子 C 对电池组最高温度和流体压降影响较大且显著, 当水平为 3 时压降最小但最大温度受到不利影响, 因此需要对因子 C 的最佳值进行更多测试。为了反映各因子组合相较于文献[17]中原始余弦流道对各评价指标的优化效果, 建立余弦流道模型并进行计算。各因子组合与原始余弦流道模型对比结果及增大、减小程度见表 7。

表 7 各因子组合与原始模型^[17]对比结果
Table 7 Comparison results of orthogonal factors combination with the original model^[17]

因子组合	分析方法	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta p/\text{kPa}$
原始模型		34.676	3.703	10.195
A3B1C1	极差分析	35.114	2.628	7.014
A1B3C3		37.411	3.338	4.539
A3B3C1		35.368	2.125	6.121
A3B3C2	方差分析	35.881	2.281	5.483
A3B3C3		36.482	2.536	4.969

注: 原始模型^[17]即频率为 3 rad/s、阻尼为 0、区间为 S_1 的余弦流道。

根据表 7 可以看出, 对比原始余弦各评价指标, 极差分析和方差分析得到的各因子组合对各评价指标均有不同程度的影响, 最高温度增大程度大部分在 5% 以内, 而最大温差优化程度基本在 29%~43% 之间, 流体压降优化程度均在 30% 以上, 甚至可达 50%。虽然电池组最大温度有略微增加, 但大幅优化了温度的均匀性和能耗。

为了更好地描述散热性能与能耗之间的平衡, 引入综合性能指标 $\tau^{[21]}$, 表示如下

$$\tau = \mu_1 \frac{\alpha_i - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} + \mu_2 \frac{\beta_i - \beta_{\min}}{\beta_{\max} - \beta_{\min}} + \mu_3 \frac{\gamma_i - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}$$

(31)

式中： $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$; $\mu_2 = \mu_3 = \frac{1 - \mu_1}{2}$; α_i 、 β_i 和 γ_i 分别表示综合分析各因子组合的最高温度、最大温差和压降; $\alpha_{\max}$ 、 $\beta_{\max}$ 和 $\gamma_{\max}$ 分别表示综合分析所有因子组合中最高温度、最大温差和压降的最大值; $\alpha_{\min}$ 、 $\beta_{\min}$ 和 $\gamma_{\min}$ 分别表示综合分析所有因子组合中最高温度、最大温差和压降的最小值; τ 的值越小代表综合性能越好。

对于新能源汽车的应用中,应当在保证电池组最大温度小于规定温度的情况下,尽可能地降低电池组的温差和流体压降。因为上述因子组合的最大温度均小于 40℃,系数 μ_1 取值在 0.18~0.22 范围内,系数 μ_2 和 μ_3 相等。不同系数下综合性能指标 τ 的计算结果见表 8。

表 8 各组合综合性能指标 τ 的计算结果

Table 8 Calculation of the combined performance metric τ for various combination

因子 组合	τ				
	$\mu_1=0.18$	$\mu_1=0.19$	$\mu_1=0.2$	$\mu_1=0.21$	$\mu_1=0.22$
	$\mu_2=0.41$	$\mu_2=0.405$	$\mu_2=0.4$	$\mu_2=0.395$	$\mu_2=0.39$
	$\mu_3=0.41$	$\mu_3=0.405$	$\mu_3=0.4$	$\mu_3=0.395$	$\mu_3=0.39$
A3B0C1	0.820 0	0.810 0	0.800 0	0.790 0	0.780 0
A3B1C1	0.338 9	0.336 7	0.334 6	0.332 4	0.330 2
A1B3C3	0.495 2	0.501 3	0.507 5	0.513 6	0.519 8
A3B3C1	0.160 2	0.161 3	0.162 5	0.163 6	0.164 7
A3B3C2	0.188 2	0.191 3	0.194 4	0.197 5	0.200 6
A3B3C3	0.256 8	0.261 7	0.266 6	0.271 6	0.276 5

根据表 8 得到,组合 A3B3C1 的综合性能指标 τ 为最小值,此组合为综合平衡分析得到的最佳结构参数。

4 结 论

本研究设计应用于新能源汽车的新型波形流道液冷板结构,并在 2C 放电下对该结构的冷却性能和能耗进行研究。分别对流体流速、波形频率、波形阻尼和波形各区间进行单因素试验,得到各因素对电池组最高温度、电池组最大温差和流体压降的影响规律并简要分析其原因。根据单因素试验确定流体流速并在频率、阻尼和区间中选取水平 3 设计正交试验,根据正交试验分析结果进行综合平衡分析得到最佳流道结构参数,主要结论如下。

(1)电池组最高温度与阻尼和区间 S_d 呈正相关,与流体流速和频率呈现负相关。电池组最大温差与 S_d 呈正相关,与流体流速和频率呈负相关,阻尼对其影响表现出先减小后增加。流体压降与流速和频率呈正相关,与阻尼和 S_d 呈负相关。

(2)正交试验分析结果表明,因子交互作用不显著,频率对温差、阻尼和区间对压降的影响表现极为显著,频率、区间和阻尼对最高温度的显著性逐渐降低。

(3)最佳结构参数组合频率为 4,阻尼为 0.03,波形区间为 S_1 的波形流道。最高温度、最大温差和压降分别为 35.368℃、2.125℃和 6.121 kPa,较原始余弦流道增大 1.99%、减小 42.61%和 39.96%。

本研究基于欠阻尼的二阶系统单位阶跃响应曲线设计,流道具有通用性,根据不同情况可灵活调整波形频率、阻尼和区间 3 个因素的参数,得到适用于对应工程情况的流道结构,对液冷板的设计提供了新的思路。

参考文献:

[1] ZHAO Jiateng, RAO Zhonghao, HUO Yutao, et al. Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 33-43.

[2] MALIK M, DINCER I, ROSEN M A. Review on use of phase change materials in battery thermal management for electric and hybrid electric vehicles [J]. International Journal of Energy Research, 2016, 40(8): 1011-1031.

[3] WILKE S, SCHWEITZER B, KHATEEB S, et al. Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: an experimental study [J]. Journal of Power Sources, 2017, 340: 51-59.

[4] WANG H, LARA-CURZIO E, RULE E T, et al. Mechanical abuse simulation and thermal runaway risks of large-format li-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2017, 342: 913-920.

[5] CAO Jiahao, LUO Mingyun, FANG Xiaoming. Liquid cooling with phase change materials for cylindrical Li-ion batteries: an experimental and numerical study [J]. Energy, 2020(191): 116565.

[6] MENDELEY V G, DHOBLE A S, PANCHAL S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal manage-

- ment system and its optimization [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020 (163): 120434.
- [7] CHACKO S, CHUNG Y M. Thermal modelling of lithium polymer battery for electric vehicle drive cycles [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 213: 296-303.
- [8] ZHAO Chunrong, CAO Wenjiong, DONG Ti, et al. Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120: 751-762.
- [9] Zhao Jiateng, Wu Chenhui, Rao Zhonghao. Investigation on the cooling and temperature uniformity of power battery pack based on gradient phase change materials embedded thin heat sinks [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020(174): 115304.
- [10] CHEN Dafen, JIANG Jiuchun, KIM G H, et al. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 94: 846-854.
- [11] 冯能莲, 马瑞锦, 陈龙科, 等. 新型蜂巢式液冷动力电池模块传热特性研究 [J]. *化工学报*, 2019, 70(5): 1713-1722.
- FENG Nenglian, MA Ruijin, CHEN Longke, et al. Heat transfer characteristics of honeycomb liquid-cooled power battery module [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(5): 1713-1722.
- [12] WEI Wenhua, LUO Zhi, QIAO Shixin, et al. Analysis and design of module-level liquid cooling system for rectangular li-ion batteries [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 225: 125435.
- [13] ZHANG Xinghui, LI Zhao, LUO Lingai, et al. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles [J]. *Energy*, 2022(238): 121652.
- [14] ZHAO Ding, AN Chao, JIA Zhixue, et al. Structure optimization of liquid-cooled plate for electric vehicle lithium-ion power batteries [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 195: 108614.
- [15] ZHU Jiahui, WANG Junbo, CHENG Dongxu, et al. Numerical investigation and parameter optimization on a rib-grooved liquid-cooled plate for lithium battery thermal management system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 85: 111085.
- [16] LI Peizheng, ZHAO Jiawei, ZHOU Shuai, et al. Design and optimization of a liquid cooling thermal management system with flow distributors and spiral channel cooling plates for lithium-ion batteries [J]. *Energies*, 2023, 16(5): 2196.
- [17] AMALESH T, NARASIMHAN N L. Introducing new designs of minichannel cold plates for the cooling of lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 479: 228775.
- [18] 王新婷, 何臻明, 沈俊. 波纹流道动力电池冷板的多目标优化设计 [J]. *低温与超导*, 2023, 51(10): 35-40.
- WANG Xinting, HE Canming, SHEN Jun. Multi-objective optimization of the wavy channel cold plate for power batteries [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2023, 51(10): 35-40.
- [19] 余剑武, 陈亚玲, 范光辉, 等. 锂电池并行流道液冷板结构设计和散热性能分析 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(12): 2788-2795.
- YU Jianwu, CHEN Yaling, FAN Guanghui, et al. Structural design and thermal dissipation performance analysis of liquid cooling plates with parallel flow channels for lithium batteries [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(12): 2788-2795.
- [20] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [21] 李潇, 陈江英, 李翔晟. 基于新型流道液冷板的动力电池热管理性能 [J]. *电源技术*, 2020, 44(10): 1438-1442.
- LI Xiao, CHEN Jiangying, LI Xiangsheng. Study on thermal management performance of power batteries based on new flow passage liquid cooling plate [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(10): 1438-1442.
- [22] 陈昊鹏. 锂电池热电耦合特性分析与热行为仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [23] 刘鹤年. *流体力学* [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 118-120.
- [24] WANG Jianguo, LU Shuai, WANG Yingzhou, et al. Novel investigation strategy for mini-channel liquid-cooled battery thermal management system [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(3): 1971-1985.
- [25] 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(Part A): 108239.

(编辑 武红江)