

文章编号:1671-6833(2026)03-0134-09

基于液冷的特种车辆电池流道结构优化设计

张博强¹, 郭晓静¹, 田华良², 张美玥¹, 李家澳¹, 宋珂³

(1. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州新大方重工科技有限公司, 河南 郑州 450064; 3. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要:特种车辆在复杂工况下的运行过程中, 电池过热问题是制约其性能与安全性的关键因素之一。基于动静脉毛细血管具有营养物质输送能力的启发, 设计了一种新型血管仿生流道结构, 利用计算流体力学数值计算方法对电池模组进行瞬态模拟, 并借助试验平台对仿真模型进行初步验证, 实现不同结构方案的对比分析, 深入探究液冷板散热效果及压力损失与结构参数、冷却介质、放电倍率和环境温度之间的关联特性, 并基于正交试验实现液冷板结构优化设计。结果表明: 新型流道相较于平行流道结构, 其散热性能得到有效提升, 压力损失降低 40.7%; 冷却介质的物性参数直接影响着其散热性能和压力损失, 质量流量入口流速增加可提升冷板散热效果, 在流速 30 L/min 后随着持续增加改善效果受限; 在 38 °C 至 70 °C 工作环境温度下, 电池模组最高温度在 45 °C 左右, 表面温差小于 2 °C, 均处于合理范围内。本研究有助于推动不同环境下特种车辆电池热管理技术的应用, 为提高电池包温度均匀性和冷却速率、降低能耗的研究提供数据支撑。

关键词: 电池热管理; 散热效果; 压力损失; 流道结构; 正交试验设计

中图分类号: TM912

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.03.025

特种车辆主要用于桥梁、隧道、水利等领域专用设备的运输, 其电驱动系统集成度高, 常处于高温、高海拔等恶劣条件下, 需要适应高低温等复杂运行工况, 导致电池在工作中面临着严重的散热问题, 而电池温度过高也会对材料性能造成影响^[1]。为了实现复杂环境下特种车辆的行驶安全性, 需要合理设计电池冷却结构, 将电池温升温度控制在合理范围内, 因此动力电池的温度控制显得尤为关键^[2]。特别是对于电驱动的特种车辆来说, 电池的热管理系统是亟待解决的主要问题之一^[3]。

液冷板为锂离子电池最有效的冷却方式之一^[4-5]。使用不同类型的液体冷却系统, 并对冷却结构进行优化设计, 能够有效提升液冷板的冷却性能和均温性^[6-7]。Park^[8]研究发现, 通过调整导流板角度、开通风口, 能够显著减少电池的温度升高及其温度差异。Mondal 等^[9]通过向冷却液中添加固体颗粒, 可以有效提升其导热系数。郭茶秀等^[10]研究了电池间距、对流换热系数和 PCM 导热率对热管理系统的影响。吴怡逸等^[11]分析了不同冷却液对

冷板的流动规律和换热特性, 研究了入口流速对综合散热性能的影响。杨孝才等^[12]研究了热管理系统操作参数对质子交换膜燃料电池冷却效果的影响。此外, 为提高液冷板冷却性能, 有学者提出了多种新型流道结构, 如新波形微流道结构^[13]、双螺旋流道结构^[14]、对称蛇形流道结构^[15]、带迂回的双环状矩形流道^[16]、仿叶脉流道结构^[17]、双层树状通道结构^[18]、双层叶状流道^[19]、仿生鱼骨流道^[20]、蜘蛛网散热结构^[21]和工字形流道结构^[22]等。

目前, 液冷技术多是针对低容量电池模组的研究, 主要集中在常温环境下在乘用车电动汽车的应用方面, 而对于使用大容量电池并容易在极端环境条件下工作的特种车辆研究相对较少。此外, 液冷系统主要是基于液冷板实现的, 而液冷板的冷却效率直接取决于内部流道结构^[23-24]。因此, 本文旨在解决复杂工况下, 现有流道结构冷却液流动压差大、传热不均匀等综合性能差的问题。受到液冷板内部通道功能与毛细血管的养分输送原理相同的启发, 首次提出了一种增设倾斜夹角的新型仿生血管流道结

收稿日期: 2025-11-10; 修订日期: 2025-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072265); 河南省重点研发专项(231111241100)

作者简介: 张博强(1979—), 男, 河南信阳人, 河南工业大学教授, 博士, 主要从事智能网联汽车、新能源汽车技术等方面的研究, E-mail: zhangboqiang@haut.edu.cn。

引用本文: 张博强, 郭晓静, 田华良, 等. 基于液冷的特种车辆电池流道结构优化设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2026, 47(3): 134-142. (ZHANG B Q, GUO X J, TIAN H L, et al. Design of battery channel structure for special vehicles based on liquid cooling[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(3): 134-142.)

构,并对比分析了 3 种流道结构的散热效果变化和压力损失。此外,研究了流道结构参数对流道特性的影响,分析了冷却介质、放电倍率及环境温度与优化后的仿生流道结构散热性能的关联特性。研究结果可为探索散热均匀、冷却速率更快和压损更低的电池组热管理系统提供参考。

1 几何模型

1.1 电池包几何模型

选取磷酸铁锂方形电池作为研究对象。电芯与底部液冷板内部结构设计如图 1 所示,电池模组采用 1P48 S 的组合形式,由 48 个锂离子电池单体串联组成,标称容量为 228 Ah,额定电压为 154.6 V,单体电池结构参数尺寸为 54 mm × 174 mm × 204 mm。液冷板采用底部布置的方式对电池模组进行冷却,通过导热材料实现冷却液与电池模组的热量交换。液冷板中心流道宽度为 40 mm,其两侧流道宽度 W 呈对称结构,流道深度 D ,流道间隔 20 mm,壁厚 T 为 1 mm。

1.2 流道结构模型

直角转弯是液体流动中最为常见的流道结构形式^[25],如图 2 所示。由图 2 可知,冷却液在直角转弯处有较大的局部压力损失,且速度方向发生了巨大变化,产生明显的涡旋。而增设倾斜角的结构在拐弯处,其局部压力损失和涡旋问题都得到了极大的改善。为此,本文在平行流道结构的基础上,首次提出增设倾斜角来降低冷却液流动过程中的压力损失。

此外,在考虑倾斜角的基础上,受动静脉毛细血

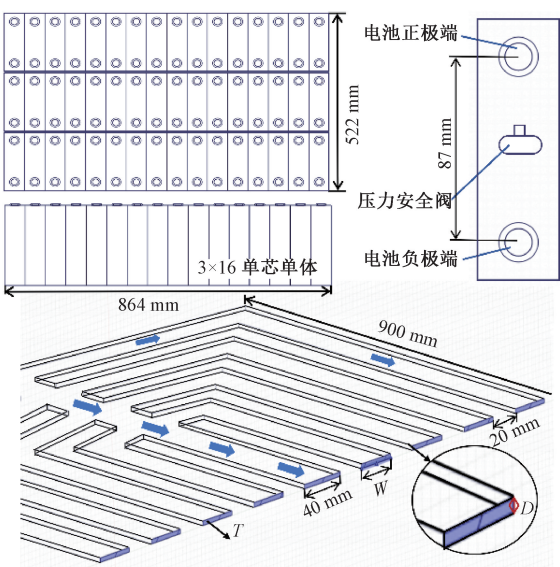


图 1 电池包结构参数

Figure 1 Battery pack structure parameters

管结构具有营养物质输送能力均匀的启发,基于毛细血管的通道结构,提出了一种仿生血管散热流道结构,液冷板内部通道功能与血管的养分输送原理相同,冷却液流经管道从而吸收电池产生的热量。3 种液冷流道结构如图 3(a)、(b)、(c) 所示。

2 数值模型与计算方法

2.1 单体电池生热模型

电池生热速率是电池热管理中评价和分析的重要指数。电池结构、使用条件、电流密度及环境温度等都会对电池的生热速率产生影响^[26-27]。

因此,为描述电池在充放电过程中的热效应,本文基于 Bernardi 公式^[28]进行单体电池产热量的计

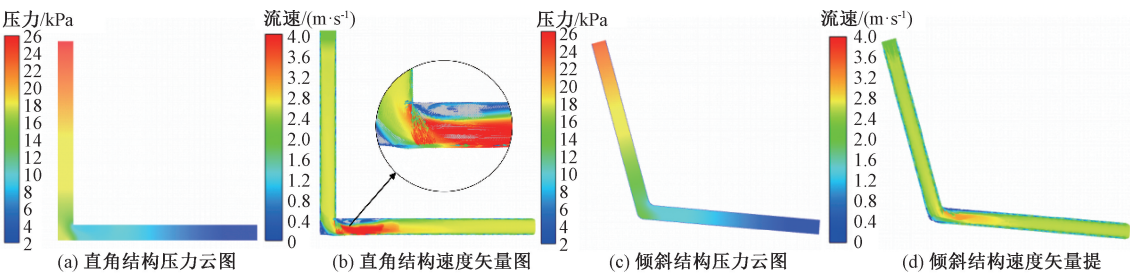


图 2 转弯结构数值仿真云图

Figure 2 Numerical simulation of turning structures

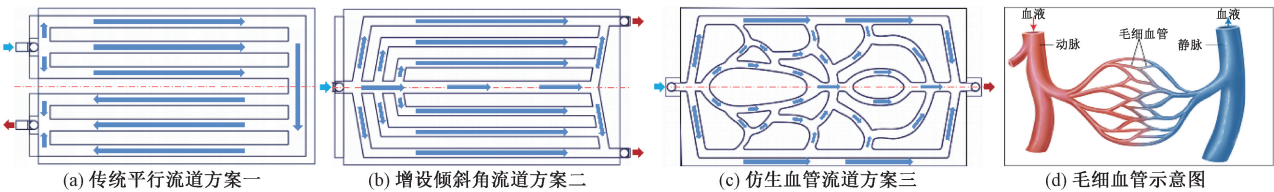


图 3 底部液冷板结构

Figure 3 Bottom liquid-cooling plate structure

算,公式为

$$q = \frac{I}{V} \left[I(R_j + R_p) + T \frac{dU_{oc}}{dT} \right]. \tag{1}$$

式中: q 为单体电芯生热速率; I 为电池工作电流; V 为电池体积; R_j 为电池欧姆电阻; R_p 为电池的极化内阻; U_{oc} 为开路电压; T 为电池平均温度。

在式(1)中, R_j 、 R_p 以及熵热系数 $\frac{dU_{oc}}{dT}$ 为关键参数,会受到电池型号、工作温度和电量状态(SOC)的影响,本文熵热系数取值 0.005 V/K。

2.2 热物性参数

液冷板冷却液选用水和乙二醇按照质量比为 1 : 1 进行混合,结构材料为 3003 铝合金,电池的导热系数呈现各向异性,本次仿真分析所需的不同部件材料的热物性参数如表 1 所示。

表 1 电池相关部件热物性参数

Table 1 Thermal and physical characteristics of battery			
部件	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
电芯	2 218	1 051	厚度方向为 1.4,高度、宽度方向为 21.5
冷却液	1 071	3 486	0.419
液冷板	2 730	893	155

2.3 边界条件及参数设置

在进行计算流体动力学(CFD)模拟时,需要根据实验数据合理确定边界条件,以确保模拟结果的精确性。对于电池组的流场分析,需要对各边界进行命名,这有助于后续模拟计算的顺利进行^[29]。

在本研究中,电池模组仿真分析在求解器 STARCCM+中进行,导入电池模组物理模型后,设置边界条件及相关参数。本次分析采用 50% 浓度的乙二醇溶液作为冷却液,冷却液初始温度为 20 ℃,入口边界条件为 mass-flow-inlet 进口,冷却液质量流量为 15 L/min,流道出口为压力出口,表面压力设置为 0 Pa,冷却液与冷板之间为对流换热,锂离子电池组与环境之间采用自然对流,传热系数设置为 2 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$),电池模组初始环境温度为 38 ℃。利用求解器对电池模组进行瞬态求解,松弛因子为默认值,时间步长为 1 s,总步数为 3 600。

2.4 网格独立性验证

本次分析采用多面体网格对电池包模型进行网格划分,在电池包模组外侧建立空气域以保证计算收敛,其中电芯作为发热源,其网格尺寸大小为空气域网格的 50%,液冷板网格尺寸大小为空气域网格尺寸大小的 40%,并对液冷板出入口处网格进行加密处理,其边界层数设为 3,网格划分如图 4(a)所示。

为确保计算结果准确性,对网格进行独立性验证至关重要,为此,本次计算采用 949 899, 1 117 208, 1 498 056, 1 992 727 和 3 304 742 共 5 个不同尺寸大小下的网格单元数量对电池组在 1C 放电倍率下进行分析计算。图 4(b)为网格独立性验证。由图 4(b)可知,当网格单元数达到 1 498 056 时,随着网格单元数量继续增大,电池包模组最高温度和平均温度几乎并无变动。因此,为了提高计算效率,减少计算时间,本次分析网格单元数选取 1 498 056 进行计算,既能保证计算准确性,又能满足计算需求。

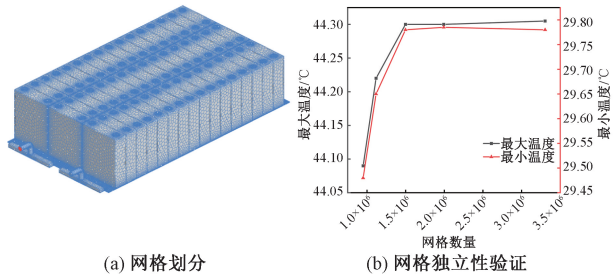


图 4 网格独立性验证

Figure 4 Grid independence verification

2.5 实验验证

考虑到仿真结果的准确性和可靠性,对电池模组进行放电温度性能的测试。本次实验所使用设备以及实验过程如图 5 所示,包括动力电池充放电机、步入式环境箱、新能源冷水机以及电池模组,分别负责设定不同环境温度、执行充放电操作以及提供冷却液等实验条件。在设定的 38 ℃ 环境温度下,分别采用 1C 电池放电倍率和 10 L/min、15 L/min 的冷却液流速进行放电实验。并对电池包模组最高温度数据进行监测,基于实验数据将数值模拟计算结果与实验数据进行对比。



图 5 电池实验平台设备

Figure 5 Battery test platform equipment

实验与仿真结果如图 6 所示,由于电池内阻与实际产品内阻的差异,单体电池仿真数据与实验结果最大相差 0.43 ℃,误差为 3.05%,满足小于 5%要求,表明本次数值模拟分析所用电池包仿真模型能够很好地预测电池包散热情况。

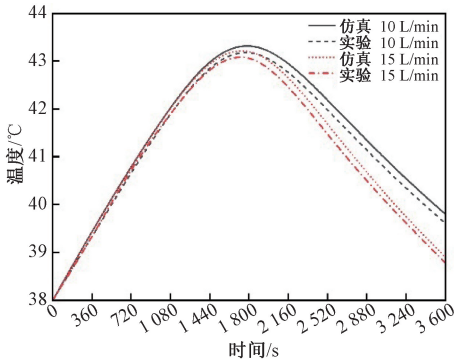


图 6 实验验证
Figure 6 Experimental verification

3 结果与分析

本研究以磷酸铁锂电池为研究对象,从结构参数、冷却介质、放电倍率和环境温度 4 个方面分析了其对液冷板冷却性能及压力损失的影响,并基于正交试验对液冷板结构进行优化设计。

3.1 3 种结构方案温升特性对比

为探究不同流道结构与电池包散热效果的关系,本文针对采用 3 种流道结构的电池包在 1C 放电倍率工况下,对图 3(a)、(b)、(c) 电池内部的最高温度、平均温度以及压降进行数据监测,如图 7 所示。

在电池包 1C 倍率放电情况下,由于电芯单体继续产热,电池组最高温度随着放电工况的进行持续上升。由图 7(a) 可知,平行流道结构 1 800 s 后最高温度呈下降趋势,即电芯单体的产热速率与液冷板冷却速率在该点达到平衡状态,而增设倾斜角流道和仿生流道在 1 080 s 后就呈现下降趋势,放电完成后,3 种流道下的最高温度分别维持在 38.90,

38.06,37.17 ℃。由图 7(b) 可知,随着冷却介质流经管道,3 种结构下的电池模组平均温度均呈持续下降的趋势,在放电完成后,3 种流道下的平均温度分别维持在 32.58,32.82,31.85 ℃。由图 7(c) 可知,放电结束后,3 种方案在冷却液流动过程中产生的压力损失分别为 28.3,12.6,18.1 kPa,方案一平行流道由于出入口在一侧,其压力损失较大及能耗较高,而另外两种方案压力损失较小。

综上所述,仿生流道散热结构相较于传统平行流道在电池模组温度性能、冷却速率和压力损失上均得到了较大改善,其中最高温度降低了 1.73 ℃,平均温度降低了 0.97 ℃,压力损失降低了 40.7%。

3.2 不同结构参数对电池温升特性的影响

考虑液冷板流道结构深度和宽度对冷却性能的影响,本文分别选取 4 种流道宽度和流道深度结构尺寸,并选取电池模组 Z 方向上的截面,如图 8 所示,分析结构参数对液冷板冷却性能的影响。

不同结构参数下电池包温度分布如图 9 和图 10 所示。由图 9 和图 10 可知,流道宽度分别选取 21,27,31,33 mm 4 种结构尺寸,其平均温度和最高温度随着流道宽度的增大而降低,并且电池模组 Z 方向上截面的温差随之降低。此外,当流道深度分别选取 2.5,3.0,3.5,4.0 mm,可知随着流道深度尺寸的增加,电池组最高温度和平均温度逐渐增大,而温差呈现随之减小的情况。

3.3 正交试验设计

根据液冷板的结构特点,选择流道宽度 W 、流道深度 D 以及倾斜角度 α 这 3 个关键结构参数作为可变因素,对温度特性的影响规律进行分析;以电池组的最大温度和平均温度作为优化目标,设计 3 因素 4 水平正交实验,共生成 16 组试验方案。

表 2 为液冷板结构参数变化水平,并根据 16 组试验建立电池包三维模型,探究 3 个关键参数对仿生液冷板结构冷却性能的影响效果,并找出所对应的最优结构参数。

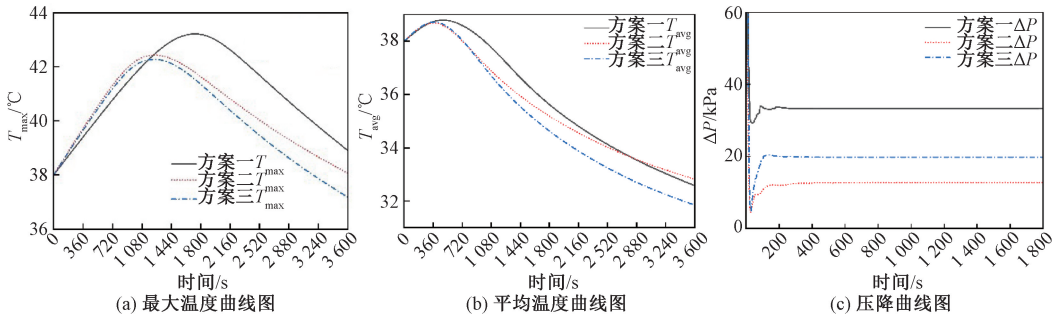


图 7 3 种流道结构数值模拟曲线图

Figure 7 Numerical simulation curves of three runner structures

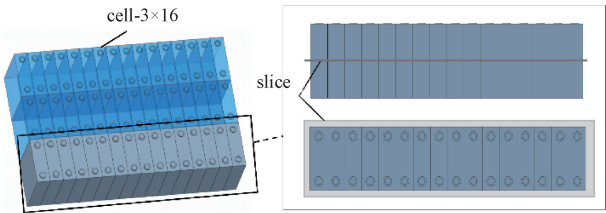


图 8 截面位置示意图

Figure 8 Section position diagram

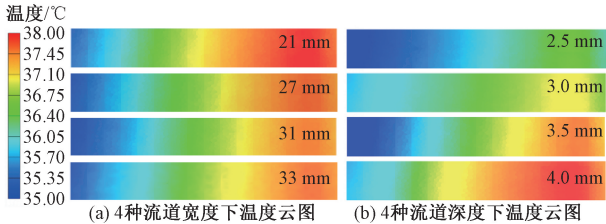


图 9 不同结构参数下电池包温度场分布

Figure 9 Temperature field distribution of different structural parameters

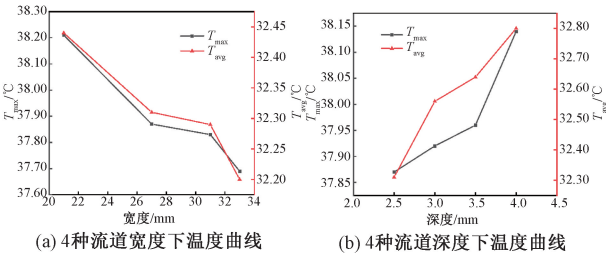


图 10 不同结构参数下电池包温度曲线图

Figure 10 Temperature profiles with different structural parameters

表 2 液冷板结构参数变化水平表

Table 2 Levels of change in structural parameters			
水平	W/mm	D/mm	$\alpha/^{\circ}\text{C}$
L1	21	2.5	95
L2	27	3.0	100
L3	31	3.5	105
L4	33	4.0	110

为了得出各参数对于仿生液冷板在冷却过程中的影响程度,通过计算各参数水平平均值以及所对应的极差进行分析,结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,倾斜角度 α 对仿生液冷板的冷却性能影响最为显著,即 3 个关键参数对仿生液冷板冷却性能的影响程度依次是倾斜角度 α 、流道深度 D 、流道宽度 W 。此外,根据极差分析后得出的最优组合为流道宽度为 33 mm,流道深度为 2.5 mm,倾斜角度为 105° 。将结构参数优化后的液冷板模型集成到电池包中,并对其进行数值模拟分析,可知电池模组最大温度值为 36.38°C ,相较于

优化前降低了 0.79°C ,平均温度为 31.51°C ,相较于优化前降低了 0.51°C ,电芯表面温差降低 0.54°C 。

表 3 正交试验表及结果分析

Table 3 Orthogonal experiment level grouping table				
序号	W/mm	D/mm	$\alpha/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$
1	21	2.5	110	37.85
2	21	3.0	105	37.91
3	21	3.5	100	38.05
4	21	4.0	95	38.19
5	27	2.5	105	37.17
6	27	3.0	110	37.8
7	27	3.5	95	37.93
8	27	4.0	100	38.14
9	31	2.5	100	37.69
10	31	3.0	95	37.83
11	31	3.5	110	37.95
12	31	4.0	105	37.28
13	33	2.5	95	37.72
14	33	3.0	100	37.34
15	33	3.5	105	37.44
16	33	4.0	110	38.02
k1	38.00	37.63	37.92	
k2	37.76	37.72	37.81	
k3	37.69	37.84	37.45	
k4	37.63	37.91	37.91	
极差	0.37	0.28	0.47	

3.4 冷却介质对电池温升特性的影响

在新型液冷板结构优化后的基础上,分别选取 10,15,20,30,40,50 L/min 的冷却液流速,探讨质量流量流速对电池包温升特性的影响。电池模组的温度场云图如图 11 所示,可知随着冷却液流速的增大,电池包的温度得到有效降低。在计算分析过程中,对电芯单体内部的最高温度和平均温度进行数据监测,结果如图 12 所示。

由图 12(a)可知,随着质量流量入口流速的增大,电池模组的最高温度逐渐降低。在 10 L/min 至 30 L/min 流速下,变化趋势较为明显,电池模组放电完成后最高温度分别为 37.18, 36.38, 36.07, 35.58°C ;在流速 30 L/min 之后的变化过程中,变化趋势不显著;在 50 L/min 时,最高温度为 35.15°C ,仅比入口流速为 30 L/min 时少了 0.43°C 。这是因为冷却液在流道入口段局部传热系数高,沿着流动方向逐渐降低并趋于稳定。由图 12(b)可知,电池模组的平均温度在质量流量流速 30 L/min 之后,随着入口流速增加,温度下降趋势逐渐缓慢。显然,增

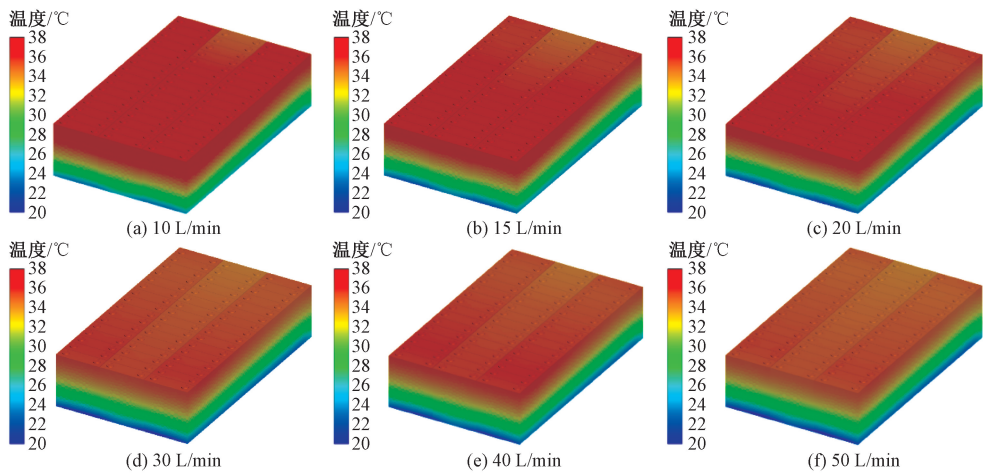


图 11 不同质量流量下电池包温度云图

Figure 11 Battery pack temperature cloud at different mass flow rates

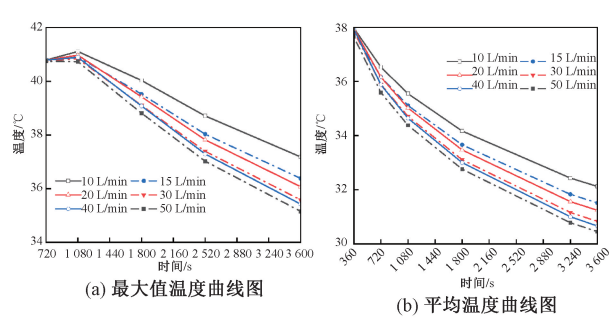


图 12 不同质量流量下电池包温度曲线图

Figure 12 Temperature profile of battery pack at different mass flow rates

加质量流量入口流速可以显著改善电池模组的冷却效果,但进一步地增加入口流速时,其改善效果逐渐减小。

选取质量流量入口流速为 30 L/min,参考 Fu 等^[30]的研究,分析碳氢化合物(PAO 和 AC-110)、脂类(DF-7)、硅油(Si-oil)和水基液(W-E)5种冷却液对电池包温升特性的影响。本文水基液选用的是体积分数为 50%的乙二醇溶液,冷却液的物性参数如表 4 所示。根据表 4 的物性参数进行仿真参数设置,进行不同冷却介质下的电池包仿真分析,对计算过程中的电池模组温度和冷却液出入口压降进行数据监测,结果如图 13 和图 14 所示。

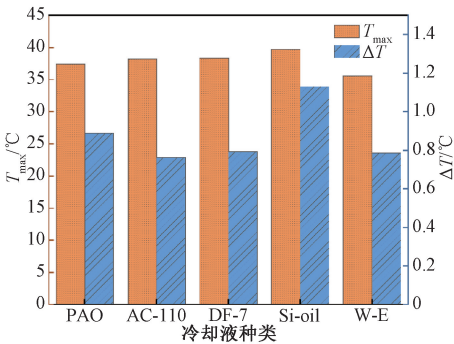


图 13 不同冷却介质下电池包温度变化图

Figure 13 Temperature change diagram of battery pack with different cooling media

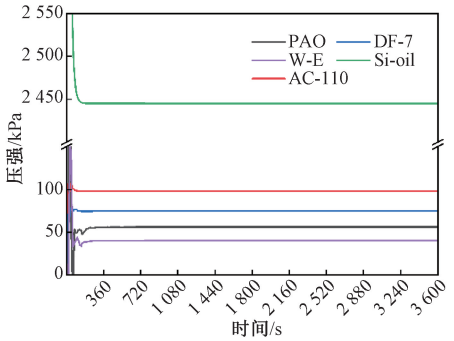


图 14 不同冷却介质下液冷板压降变化图

Figure 14 Variation diagram of pressure drop of liquid cooling plate with different cooling media

表 4 不同冷却介质物性参数

Table 4 Physical parameters of different cooling media

类型	冷却介质	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	动力黏度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
碳氢化合物	PAO	800	2 241	0.14	0.004 08
	AC-110	820	2 060	0.14	0.020 17
酯类	DF-7	920	1 907	0.13	0.015 09
硅油	Si-oil	970	1 370	0.15	0.964 37
水基液	W-E	1 071	3 486	0.42	0.003 15

由图 13 可知,在 5 种冷却介质中,W-E 的冷却性能最好,电池包最大温度和表面温差最小,分别为 35.58 ℃和 0.78 ℃。这是因为 W-E 是一种水基流体,具有更高的比热容和导热系数,可以带走更多的热量,而 Si-oil 的冷却性能最差是因为其动力黏度较大,流动性能差。4 种介质(硅油除外)冷却下,电芯表面温差均未超过 1 ℃,这表明在不同冷却介质下,新型流道结构散热效果相对均匀。

由图 14 可知,Si-oil 的动力黏度最大,在冷却剂流经管道时,黏度较高的冷却液会导致较高的流动阻力。由于动力黏度值的影响,硅油的压降整体较大,但其余 4 种的压降在可接受范围内,其中水基液的压降最小,为 40.3 kPa。因此,在选择冷却介质时,应该考虑冷却液的动力黏度参数,这影响到液冷板的能耗损失。

3.5 不同工作条件对电池温升特性的影响

质量流量入口温度为 20 ℃,从放电倍率和环境温度两个方面分析不同条件下电池模组的温升特性,结果如表 5 所示。

表 5 不同条件下电池包温度值

Table 5 Battery temperature with different conditions

温度/℃	放电倍率	$T_{max}/℃$	$\Delta T/℃$
38	0.5C	28.96	0.70
	1C	35.58	0.79
	1.5C	45.08	0.92
	2C	57.13	1.07
50	1C	39.70	1.23
60	1C	43.14	1.60
70	1C	45.58	1.96

环境温度为 38 ℃,电池模组在较低放电倍率(0.5C、1C 和 1.5C)下工作时,其最高温度不超过 45.08 ℃,电池表面温差小于 1 ℃;当在较高放电倍率(2C)下工作时,电池的最高温度已高于 50 ℃,工作环境开始恶化。此外,在不同放电倍率下,电池包表面温差出现持续增长的情况,在 2C 放电倍率下,温差为 1.07 ℃,属于可接受范围。

放电倍率为 1C 时,在环境温度 38~70 ℃之间运行,电池模组最高温度小于 46 ℃,表面温差小于 2 ℃;液冷板在 70 ℃环境温度下,电池模组最高温度在 45 ℃左右,均处于合理范围内。但随着环境温度继续增加,电池模组最高温度可能会高于 50 ℃,此时需要从多方面因素改善冷却的初始条件来达到降低温度的目的。

4 结论

(1)相同条件下,仿生血管流道散热结构相较

于传统平行流道结构,最高温度和平均温度分别降低了 1.73 ℃和 0.97 ℃,电芯表面温差降低了 0.86 ℃,冷却液流动压力损失降低了 40.7%,液冷板冷却速率、散热性能及能耗损失均得到很大改善。

(2)流道结构宽度对液冷板的冷却性能影响最大,其次分别是流道深度和倾斜角度。优化后的液冷板在流道宽度为 33 mm、流道深度为 2.5 mm 和倾斜角度为 105°时,冷却效果最好,其最高温度为 36.38 ℃,平均温度为 31.51 ℃,分别降低了 0.79 ℃和 0.51 ℃,电芯表面温差降低了 0.54 ℃。

(3)增加质量流量入口流速可以显著降低电池模组温度和温差,但当入口流速增加到 30 L/min 之后,改善效果减弱。因冷却液 W-E 更高的比热容和导热系数,其冷却性能最好,Si-oil 较高的动力黏度致其压力损失较大。

(4)低放电倍率(0.5C、1C 和 1.5C)工作下,环境温度为 38 ℃时,电池模组最高温度不超过 45.08 ℃,表面温差小于 1 ℃;而在 2C 放电倍率下,电池模组表面温差虽为 1.07 ℃,但其最高温度已高于 50 ℃,工作环境开始恶化。1C 放电倍率下,在 38~70 ℃之间,电池模组最高温度小于 46 ℃左右,表面温差小于 2 ℃,均处于合理范围内。

参考文献:

[1] FENG X N, ZHENG S Q, REN D S, et al. Key characteristics for thermal runaway of Li-ion batteries[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 4684-4689.

[2] 何闯, 赵钦新, 梁志远. 具有扰流结构的风冷型锂电池包热管理系统优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(1): 90-97.

HE C, ZHAO Q X, LIANG Z Y. Performance optimization of air-cooled lithium battery pack thermal management system with turbulence structure[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(1): 90-97.

[3] 黄瑞, 舒雷, 陈俊玄, 等. 特种车辆电池热管理设计与实验研究[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(7): 30-36.

HUANG R, SHU L, CHEN J X, et al. Design and experimental study of battery thermal management for special vehicles[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(7): 30-36.

[4] AN Z G, ZHANG C J, LUO Y S, et al. Cooling and pre-heating behavior of compact power Lithium-ion battery thermal management system[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 226: 120238.

[5] JIN L W, LEE P S, KONG X X, et al. Ultra-thin

- minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1786–1794.
- [6] SAMEER MAHMOUD N, MOHAMMAD JAFFAL H, ABDULNABI IMRAN A. Performance evaluation of serpentine and multi-channel heat sinks based on energy and exergy analyses[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 186: 116475.
- [7] HUANG Y Q, MEI P, LU Y J, et al. A novel approach for lithium-ion battery thermal management with streamline shape mini channel cooling plates[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113623.
- [8] PARK H. A design of air flow configuration for cooling lithium-ion battery in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 239:30–36.
- [9] MONDAL B, LOPEZ C F, MUKHERJEE P P. Exploring the efficacy of nanofluids for lithium-ion battery thermal management[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 779–794.
- [10] 郭茶秀, 魏金宇. 电池排布方式对 21700 锂电池相变热管理系统的影响[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 91–97.
- GUO C X, WEI J Y. Influence of different arrangement on phase change thermal management system of 21700 lithium battery[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 91–97.
- [11] 吴怡逸, 王杰, 周小淞. 大功率半导体发光二极管液冷板散热性能分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(27): 11632–11638.
- WU Y Y, WANG J, ZHOU X S. Heat dissipation performance analysis of high-power LED liquid-cooled cold plate[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(27): 11632–11638.
- [12] 杨孝才, 贾秋红, 屈翔, 等. 操作参数对质子交换膜燃料电池冷却效果分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2022, 43(4): 53–59.
- YANG X C, JIA Q H, QU X, et al. Analysis of cooling effect of operating parameters on proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2022, 43(4): 53–59.
- [13] 李君浩, 任晓龙, 杨炯, 等. 锂电池冷板新波形微流道传热特性研究及结构优化[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(11): 14–26.
- LI J H, REN X L, YANG J, et al. Research on heat transfer characteristics and structural optimization of new waveform microchannels for lithium-ion batteries cooling plates[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(11): 14–26.
- [14] 张斌洋, 任晓龙, 赵江铭, 等. 锂离子电池双螺旋结构流道液冷板数值优化[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(10): 3545–3555.
- ZHANG B Y, REN X L, ZHAO J M, et al. Numerical optimization of a liquid cooling plate with double helix flow channel for lithium-ion battery[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(10): 3545–3555.
- [15] 孔为, 金劲涛, 陆西坡, 等. 对称蛇形流道锂离子电池冷却性能[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(7): 2258–2265.
- KONG W, JIN J T, LU X P, et al. Study on cooling performance of lithium ion batteries with symmetrical serpentine channel[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(7): 2258–2265.
- [16] SIRUVURI S D V S S V, BUDARAPU P R. Studies on thermal management of lithium-ion battery pack using water as the cooling fluid[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 29: 101377.
- [17] 李志强, 孙广强, 巴义春, 等. 锂离子电池仿生叶脉流道冷板散热研究[J]. *低温与超导*, 2023, 51(8): 69–75.
- LI Z Q, SUN G Q, BA Y C, et al. Research on heat dissipation of lithium-ion battery pack based on bionic leaf vein channel cold plate[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2023, 51(8): 69–75.
- [18] FAN Y W, WANG Z H, FU T, 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.
- [19] DENG T, RAN Y, ZHANG G D, et al. Novel leaf-like channels for cooling rectangular lithium ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150: 1186–1196.
- [20] 李仁帅, 付婷, 张峰, 等. 仿生鱼骨流道液冷电池热管理系统性能研究[J]. *低温工程*, 2024(4): 40–46.
- LI R S, FU T, ZHANG F, et al. Research on heat management system of bionic fish bone flow[J]. *Cryogenics*, 2024(4): 40–46.
- [21] 刘显茜, 曹军磊, 李文辉, 等. 蜘蛛网流道冷板冷却液对向流锂离子电池散热分析[J]. *材料导报*, 2024, 38(4): 14–19.
- LIU X X, CAO J L, LI W H, et al. Analysis of lithium-ion battery heat dissipation with coolant counter current in spider web channel cooling plate[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(4): 14–19.
- [22] 何平, 卢浩, 范益伟, 等. 工字形流道液冷板式换热器用于电池热管理的数值研究[J]. *制冷学报*, 2023, 44(5): 78–87.
- HE P, LU H, FAN Y W, et al. Numerical investigation of battery thermal management using liquid-cooling plate exchanger with I-shaped flow channel[J]. *Journal of Re-*

frigeration, 2023, 44(5): 78–87.

[23] WANG Y C, XU X B, LIU Z W, 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.

[24] 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.

[25] 蔡保全. 某装备液压集成块流道液流特性分析及优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

CAI B Q. Analysis and optimization design of liquid flow characteristics in the channel of hydraulic manifold block of an equipment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[26] 陈皓, 赵福云, 谭志成, 等. 锂离子电池液冷管路优化[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(5): 44–51.

CHEN H, ZHAO F Y, TAN Z C, et al. Optimization of liquid cooling pipeline for lithium-ion batteries[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2023, 37(5): 44–51.

[27] 薛超坦. 基于液冷的纯电动汽车锂电池热管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 25–30.

XUE C T. Research on thermal management of lithium battery for pure electric vehicle based on liquid cooling [D]. Changchun: Jilin University, 2017: 25–30.

[28] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1984, 132(1): 5–12.

[29] LIU Z, ZHAO H X, QIU Y, et al. Numerical analysis of topology-optimized cold plates for thermal management of battery packs[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 238: 121983.

[30] FU P, FANG L W, JIAO S Y, et al. Numerical simulation of immersed liquid cooling system for lithium-ion battery thermal management system of new energy vehicles [J]. Energies, 2023, 16(22): 7673.

Design of Battery Channel Structure for Special Vehicles Based on Liquid Cooling

ZHANG Boqiang¹, GUO Xiaojing¹, TIAN Hualiang², ZHANG Meiyue¹, LI Jiaao¹, SONG Ke³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou New Dafang Heavy Industry Science & Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450064, China; 3. School of Automotives Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Battery overheating is one of the key issues to the performance and safety of special vehicles operating with complex conditions. To address this, inspired by the nutrient delivery capabilities of arterial and venous capillaries, in this study a novel vascular biomimetic flow channel structure was designed. Using computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation methods, transient simulations of the battery module were conducted, and a preliminary validation of the simulation model was performed using an experimental platform. A comparative analysis of different structural schemes and an in-depth exploration of the relationship between the heat dissipation effect of the liquid-cooled plate, pressure loss, structural parameters, cooling media, discharge rates, and environmental temperatures were all conducted. And based on orthogonal experimental design, an optimized design of the liquid-cooled plate structure was achieved. The results indicated that the novel channel structure significantly enhanced cooling performance compared to parallel channel structures, achieving a 40.7% reduction in pressure loss. The physical properties of the cooling medium directly affected its cooling performance and pressure loss, and increasing the inlet flow rate of the mass flow improved the cooling effect of the cold plate, though the improvement become limited after a flow rate of 30 L/min. With working environment temperatures ranging from 38℃ to 70℃, the maximum temperature of the battery module remained around 45℃, with a surface temperature difference of less than 2℃, all within a reasonable range. This study contributed to advancement of battery thermal management technology in special vehicles with various environmental conditions, providing data support for studies aimed at improving battery pack temperature uniformity and cooling rates while reducing energy consumption.

Keywords: thermal management; heat dissipation effect; pressure loss; flow channel structure; orthogonal experimental design