

方形锂离子电池新型液冷流道散热性能仿真分析

刘娜^{1*}, 刘煦杰¹, 孙明山², 姜月明¹, 孙壮¹, 黄靖斌¹

1. 山东建筑大学机电工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东睿冠电能热力有限公司, 山东 济南 250101

摘要:为提高方形锂离子电池散热性能,设计新型液冷流道结构,基于 Fluent 仿真软件构建电池生热与流体传热耦合模型,仿真分析新型液冷流道中冷却液流速、入口温度及流道厚度对冷却效果的影响。结果表明:新型流道使电池组最高温度降低 8.26 °C;流速增大,电池最高温度降低,电池温差变化不大,液冷流道压差明显增大;入口温度降低,电池组最高温度降低,温差在合理变化范围;流道厚度增大,电池组最高温度升高,压差减小,温差在合理变化范围。为实现更高效与更低能耗的协同目标,需在散热性能与泵功耗间寻求平衡,流速为 0.4 m/s、流道厚度为 3 mm 为较佳选择方案。

关键词:方形电池;锂离子电池;电池热管理;新型液冷流道;散热性能;数值模拟

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)03-0064-08

引用格式: 刘娜,刘煦杰,孙明山,等. 方形锂离子电池新型液冷流道散热性能仿真分析[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(3): 64-71.

LIU Na, LIU Xujie, SUN Mingshan, et al. Simulation analysis of heat dissipation performance of a new liquid cooling channel for square lithium-ion battery[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(3): 64-71.

0 引言

随着全球能源转型与双碳目标(碳达峰与碳中和)目标的推进,电动汽车以低碳环保的优势在交通领域广泛应用^[1]。锂离子电池能量密度高、循环寿命长,是电动汽车的核心动力源^[2]。锂离子电池的工作性能、安全性、寿命与工作温度密切相关,研究表明,电池温度偏离最佳工作区域 20~40 °C 时,电池容量衰减加速^[3],热失控风险显著升高,尤其在快速充放电或极端工况下,电池老化速度加快^[4]。在电动汽车及储能系统领域,高效的电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)使电池在最佳环境下工作,是保障电池安全运行的关键^[5]。

液冷技术通过冷却液与电池表面或内部流道的接触实现热量交换,具有热导率高、散热效率高、温度均匀、精准控温能力强等优势,成为近年来的主要研究热点^[6]。研究表明:将液冷板结构从传统单通道发展为多流道拓扑结构,结合流道截面优化,可显著提高换热效率并降低流道压降^[7-8]。但液冷系统依然面临流道制造工艺复杂、冷却液泄漏风险较高及流动效率降低等挑战^[9],目前对流道结构的研究主要聚焦于多目标优化,比如同时满足低能耗和高散热性能,以实现液冷技术的高效化与可持续化^[10]。

电池在 1 h 内充满或放完额定容量的速率为充放电速率 C ,充放电速率增大,电流增大,充放电时间缩短。近年来关于液冷系统优化设计的研究较多。Li 等^[11]研究表明,在液冷系统中,采用电池表面冷却、冷却液进出口设置为 3 个且冷却液流向交错的方法可使电池模块最高温度控制在 303.6 K 内,温差(电池最高温度与最低温度的差)为 2.3 K;单入口冷却液质量流量为 1.2 g/s 时,电池散热性能最优,满

收稿日期:2025-03-13

基金项目:交通行业重点实验室开放基金项目(JTZL2004)

第一作者简介:刘娜(1979—),女,山东潍坊人,工学博士,副教授,主要研究方向为车用动力系统热管理,E-mail:liuna7907@163.com。

足充电速率 $3C$ 下电池温度要求(充电速率 $3C$ 下要求电池模块最高温度为 313 K ,温差不大于 5 K)。Pu 等^[12]研究表明,对比传统底部冷却板,采用立体冷却板,冷却液质量流量减少 30 g/s ,流道压降降低 75.9% ,功耗仅为传统设计的 6% ,且最大温差不大于 5 K 。Zhang 等^[13]研究表明,采用电池底部与径向耦合的散热模型,在放电速率 $1C$ 、 $2C$ 时,电池最高温度分别降低 16.6% 和 32.0% ;冷却液体积流量为 0.25 L/min 时,电池最高温度从 $42.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $27.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差从 $19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Xiong 等^[14]研究表明,相同流道体积参数下,采用仿生蜘蛛网状流道结构的热交换器,电池组最高温度为 302.656 K ,温差为 3.726 K ,流道压降为 29.69 Pa ,各项性能均优于蜂窝状和螺旋结构流道结构的热交换器。Gao 等^[15]研究表明,相比无挡板、传统挡板、圆形孔挡板及鱼状孔挡板的流道结构,采用鱼鳞孔挡板结构,电池最高温度、温差、压降及电压偏差最高降低 10.1% 、 15.2% 、 25.8% 、 9.0% ,采用冷却液底部进-顶部出的结合预冷方式可进一步优化电池散热性能。Luo 等^[16]研究表明,采用混合扭曲带通道,在冷却液流速为 0.5 L/min 时电池最高温度为 $36.47\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差为 $1.81\text{ }^{\circ}\text{C}$;采用多孔结构替代混合扭曲带通道进行数值仿真验证,结果表明电池组最高温度为 $36.29\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差为 $2.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Gan 等^[17]研究表明,在冷却液流速为 5 L/min 时,对比蛇形液冷板、并行通道 1 液冷板、并行通道 2 液冷板,采用新型结构对称双螺旋通道液冷板的瞬态电池温差分别减少 0.67 、 0.85 、 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Mu 等^[18]研究表明采用仿生鱼鳞通道优化液冷系统后,电池最高温度降低 $1.61\text{ }^{\circ}\text{C}$,降幅为 10.8% ,温差减小 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$,降幅为 16.7% ,出口冷却液流速提高 2.72% ,流道压降减小 4.98% 。Xiang 等^[19]研究表明,对比传统并行流冷板,采用伪三维拓扑优化冷板设计结合强制冷却与相变材料,可明显提高电池组散热效率,降低流动功耗。Luo 等^[20]发现:方形螺旋环液冷板在放电速率 $2C$ 时,电池最高温度为 $33.63\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差为 $6.45\text{ }^{\circ}\text{C}$;支路通道宽度为 5 mm 时,温度均匀性更优,泵功耗低于蛇形冷板。

液冷系统通过冷却液在流道的流动实现散热功能,冷却液压降是影响液冷系统工作的重要因素,压降过高造成能量损失,压降过低导致冷却液换热效果不明显。为提高冷却系统的散热性能,本文中针对液冷系统的流道结构,以较低的电池最高温度和较小的温差为优化目标,同时考虑液冷流道压降的变化,对冷却液流速、入口温度、流道厚度开展多参数目标优化。

1 模型建立

1.1 几何模型

方形三元锂离子电池因独特的几何形状和性能特点,已成为提高汽车电池系统效率和安全性的主要技术方案^[21]。与传统圆形电池相比,方形电池结构更加稳定,能够有效减少碰撞或极端环境条件下的变形风险,降低安全隐患;方形电池安装和固定过程更加简便,能更好地适应复杂的车身结构设计,提高车辆安装效率和可靠性。本文中选用的方形三元锂电池单体长、宽、高分别为 148 、 27 、 98 mm ,液冷流道布置在两个电池单体之间。电池组及液冷板几何模型如图 1 所示。

为提高电池散热效果,且满足冷却液在流道的压降要求,改进液冷流道结构,增大流道与电池组的接触面积,设计新型流道结构示意图如图 2 所示。

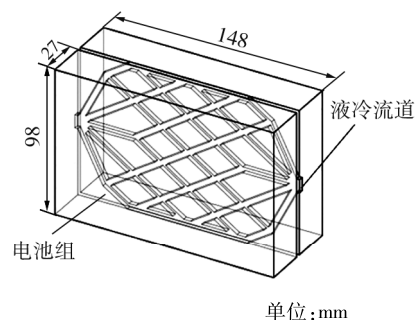
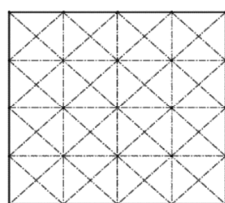
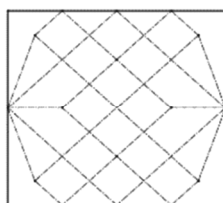


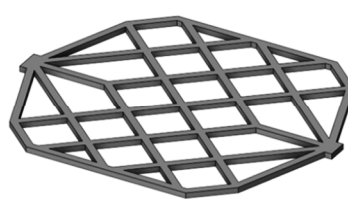
图1 电池组及液冷板几何模型



a) 矩形多区域网格划分



b) 新型流道中心线草图



c) 新型流道几何结构

图2 新型流道结构示意图

由图 2 可知:设计新型流道结构时,从流道与电池组的矩形接触面出发,将矩形面通过对角连线划分成多区域网格;选定一边的线连接中心为入口,对边的线连接中心为出口,去除与流向垂直的线条,设计新型流道中心线草图,并根据草图设计新型流道几何结构。

1.2 数值模型

为分析液冷流道中的冷却液流动带走的电池组热量,建立电池生热数值模型、流体数值模型,即电池组、液冷流道的温度场模型和液冷流道中的流场模型。模型材料包括冷却液和隔流道电池,其中,冷却液为质量分数为 50% 的乙二醇水溶液,具有较好的低温流动性和良好的热传导性,隔流道电池为方形磷酸铁锂电池,模型材料物性参数如表 1 所示。

表 1 模型材料物性参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	动力黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
方形磷酸铁锂电池	2 056	812	4.500, 0.780, 4.500 ^①	
质量分数为 50% 的乙二醇水溶液	1 069	3 494	0.419	0.003 15
铝	2 700	2 719	871.000	202.400 00

①分别为方形磷酸铁锂电池长、宽、高 3 个方向的导热系数。

1.2.1 电池生热模型与控制方程

Bernardi 电池生热方程是描述电池在充放电过程中产热行为的经典模型,该方程忽略电池内部辐射散热的影响,假设锂电池内部产热均匀、材料密度一致、电池的热物性参数不随电池的荷电状态变化^[22]。通过 Bernardi 方程描述电池生热模型,电池总产热量包括可逆反应热 φ (电池充电时 φ 为负,放电时 φ 为正) 和焦耳热 (不可逆热) 两部分,计算式^[23]如下:

$$\varphi = \theta_d dU_{oc}/d\theta_d, \quad (1)$$

$$Q = I[(U_{oc} - U) + \varphi]/V_{cell}, \quad (2)$$

式中: θ_d 为电池温度, $^{\circ}\text{C}$; U_{oc} 为电池开路电压, V ; $dU_{oc}/d\theta_d$ 为温度因数; Q 为电池单位体积放热量, W/m^3 ; I 为电池充放电电流, A ; V_{cell} 为电池单体体积, m^3 ; U 为电池工作电压, V ; U_{oc} 与 U 的差为电池内阻产生的热量。

本次选用的方形三元锂电池,额定容量为 $37 \text{ A} \cdot \text{h}$,额定电压为 3.65 V ,额定内阻为 $0.7 \text{ m}\Omega$,放电速率 1C 、 2C 对应的放电电流分别为 37 、 64 A ,根据式 (1) (2),可得 $\varphi = 0.051 4 \text{ V}$,放电速率 1C 、 2C 对应的单位体积放热量分别为 $7 780$ 、 $20 773 \text{ W}/\text{m}^3$ 。

1.2.2 流体模型与控制方程

冷却液为质量分数为 50% 的乙二醇水溶液,将其视为不可压缩的均匀质流体且物性参数恒定不变,雷诺数

$$Re = \{\rho_l\} \{v_s\} 2\{a\} \{b\} / [\{\nu\} (\{a\} + \{b\})], \quad (3)$$

式中: $\{\rho_l\}$ 为以 kg/m^3 为单位的冷却液密度 ρ_l 的数值, $\{v_s\}$ 为以 m/s 为单位的冷却液速度 v_s 的数值, $\{\nu\}$ 为以 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 为单位的冷却液动力黏度 ν 的数值, $\{a\}$ 、 $\{b\}$ 分别为以 m 为单位的流道截面长度 a 、宽度 b 的数值。

雷诺数可判断冷却液流动状态,冷却液最大速度为 $0.6 \text{ m}/\text{s}$,根据式 (3),可得最大雷诺数为 686.48 ,小于 $2 300$,判断流动状态为层流,流动过程满足质量守恒、动量守恒和能量守恒。

质量守恒方程为:

$$\nabla v_s = 0. \quad (4)$$

动量守恒方程为:

$$\rho_l \partial v_s / \partial t = \nabla p + \mu \nabla^2 v_s, \quad (5)$$

式中: t 为时间, s ; p 为冷却液压力, Pa ; μ 为冷却液法向速度, m/s 。

能量守恒方程为:

$$\rho_l c_l \partial \theta_l / \partial t + \nabla (\rho_l c_l v_s \theta_l) = \nabla (\lambda_l \nabla \theta_l), \quad (6)$$

式中: c_1 为冷却液比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; θ_1 为冷却液入口温度, K ; λ_1 为冷却液导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2 数值方法

2.1 边界条件设置

采用 Fluent 软件构建电池生热模型,设置电池模型为体积源项生热,初始环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,壁面对流换热系数为 $5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;电池生热模型中设置放电速率为 $2C$,对应单位体积放热量为 $20.773\text{ kW}/\text{m}^3$;设置流道内冷却液流动模型为层流模型,电池组与液冷流道耦合传热。模型边界条件示意如图 3 所示,图中蓝色线条代表液冷流道入口,红色线条代表液冷流道出口。

2.2 网格独立性验证

在进行网格独立性验证时,设置放电倍率为 $2C$,流道厚度为 3 mm ,流道入口边界条件为:冷却液流速为 0.5 m/s ,入口温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同网格数量下,电池最高温度、液冷流道压差(流道入口压力与出口压力的差)对比如表 2 所示。

由表 2 可知:电池最高温度变化率(当前网格数电池最高温度和上一个网格数电池最高温度的差和上一个网格数电池最高温度的比)分别为 2.70% 、 0.61% 、 0.20% 、 0.90% ,压差变化率(当前网格数压差和上一个网格数压差的差与上一个网格数压差的比)分别为 4.31% 、 15.82% 、 0.90% 、 0.21% 。

随着网格数增加,电池最高温度和压差的变化率逐渐降低;网格数从 2.6×10^5 增大至 1.2×10^6 时,电池最高温度变化率基本在 1% 以内,网格数增加对电池最高温度的影响较小;网格数从 6.3×10^5 逐步增大时,压差变化率减幅明显;当网格数达到 8.5×10^5 时,电池最高温度和压差的变化率均降至 1% 以下,计算结果趋于稳定,进一步增加网格数量对结果影响较小。网格数为 8.5×10^5 时满足网格独立性要求,在保证计算精度的同时兼顾计算效率。

2.3 模型误差分析

本文中采用等效热源的方式进行电池生热模型仿真,并与文献[23]试验结果对比。放电速率为 $2C$ 时,电池温度试验结果与电池生热模型仿真结果对比如图 4 所示。由图 4 可知:试验结果与仿真结果最大误差约在第 $1\ 300$ 秒处,此时误差为 4.2% ,符合误差分析不大于 5% 的要求。试验结果与仿真结果的误差可能是数值模拟仿真采用等效热源方式,温度分布主要与材料的热物性相关,试验结果主要受室温环境和电池内部(如内阻)的影响。

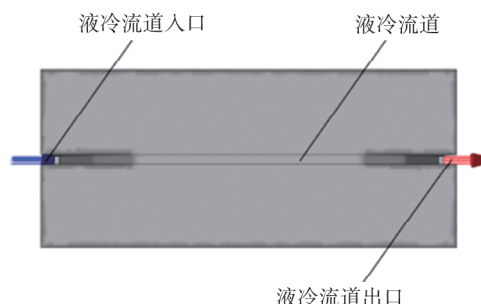


图3 模型边界条件示意图

表2 不同网格数量下电池最高温度、流道压差对比

网格数	电池最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	压差/ Pa
1.2×10^5	35.88	295.19
2.6×10^5	34.91	283.00
6.3×10^5	34.70	244.35
8.5×10^5	34.63	222.32
1.2×10^6	34.32	221.86

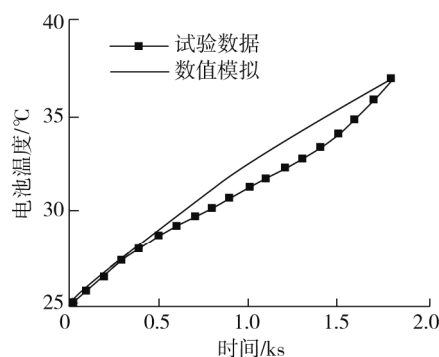


图4 电池温度试验结果与仿真结果对比

3 流道性能验证及各因素的影响

3.1 流道性能验证

为验证新型流道冷却性能,环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,采用 Fluent 软件,仿真对比原始电池组生热模型(简称原始流道)与新型流道电池组生热模型(简称新型流道)的电池组温度变化,结果如图 5 所示。由图 5 可知:布置新型流道后,电池组最高温度比采用原始流道降低了约 $8.26\text{ }^{\circ}\text{C}$,仿真结果表明新型流道结构可有效降

低电池组最高温度。

3.2 冷却液流速的影响

流速是液冷流动动态运行的核心调控参数,直接影响流道对流换热强度、流动阻力特性及系统能耗分布。在电池热管理系统中,流速增大,冷却液与流道壁面的强制对流换热效率提高,散热能力显著提高并抑制电池局部温升;随着流速增大,流道内压降呈非线性增长,导致泵功需求增加、能量损耗增大。结合热力学与流体力学耦合定量分析流速对传热效率的影响,在提高散热性能与降低泵功成本之间寻求最优平衡,为优化流速阈值与流道协同设计提供理论依据。

环境温度为 25 ℃,流道厚度为 3 mm,随着冷却液流速增加,电池最高温度、温差及流道压差的仿真分析结果如表 3 所示。由表 3 可知:随着流速增大,对流换热效果增强,电池最高温度从 35.02 ℃降至 34.68 ℃,温差基本稳定在 2.08 ℃±0.10 ℃,表明新型流道有较好的温度均衡能力;随着冷却液流速增大,压差随流速呈倍数激增,从 21.56 Pa 升至 390.09 Pa,符合压差与流速正相关的流动阻力规律。

表 3 电池最高温度、温差及流道压差随冷却液流速变化的仿真结果

流速/(m·s ⁻¹)	最高温度/℃	温差/℃	压差/Pa	流速/(m·s ⁻¹)	最高温度/℃	温差/℃	压差/Pa
0.1	35.02	2.08	21.56	0.4	34.72	2.08	190.15
0.2	34.78	2.08	60.33	0.5	34.63	2.06	222.32
0.3	34.79	2.16	116.25	0.6	34.68	2.09	390.09

不同冷却液流速下流道压力分布如图 6 所示。由图 6 可知:不同流速下,压力分布较均匀。结合表 3 和图 6 可知,压差不影响流道内冷却液压力分布均匀性。

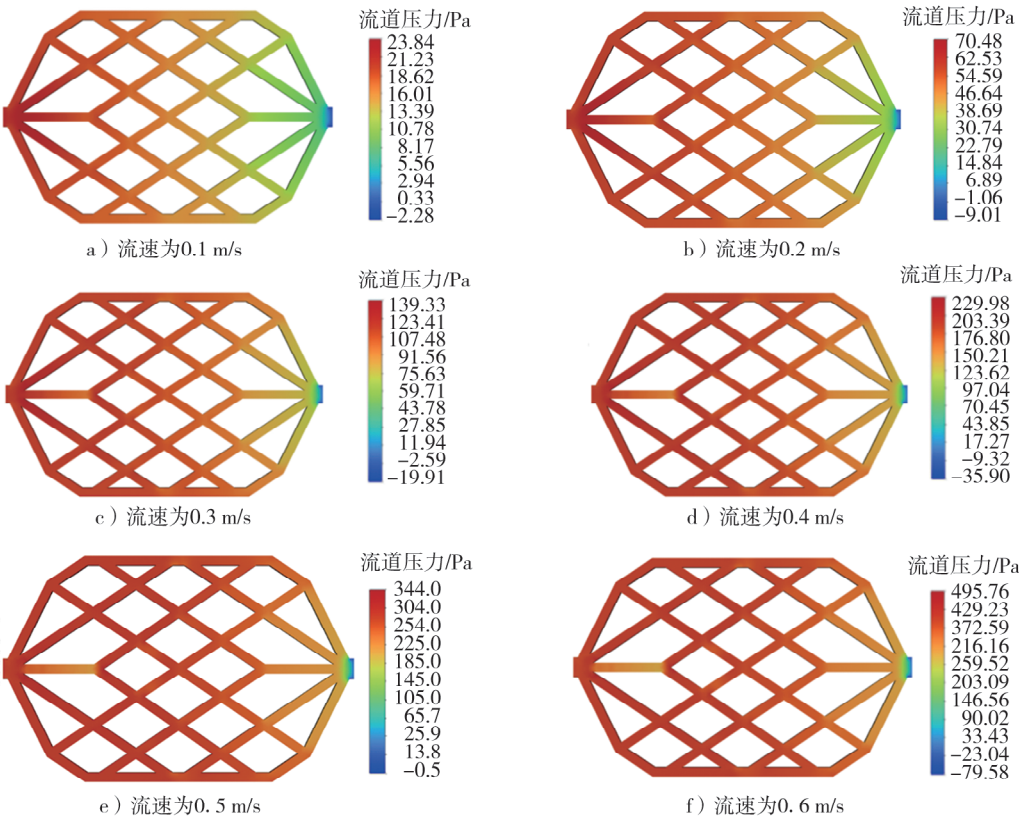


图 6 不同流速下流道压力分布图

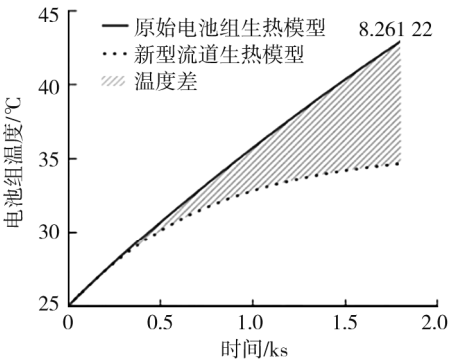


图 5 电池组温度变化曲线

3.3 冷却液入口温度的影响

冷却液温度是液冷系统中重要的参数,直接关系到冷却系统的温控性能。为分析冷却液温度对电池组温度的影响,以流道厚度为 3 mm、冷却液流速为 0.5 m/s 为参考模型,将冷却液入口温度从 25.00 °C 降至 10.00 °C,降温梯度为 5.00 °C,不同冷却液入口温度对应的电池组最高温度及温差如表 4 所示。由表 4 可知:冷却液入口温度从 25.00 °C 降低到 10.00 °C,电池组最高温度明显下降,降低了 9.76 °C,但温差上升 1.61 °C,电池仍在适宜工作温度范围。

表 4 不同冷却液入口温度对应的电池组最高温度及温差

冷却液入口温度/°C	电池组最高温度/°C	温差/°C
25.00	34.63	2.06
20.00	31.25	2.51
15.00	28.02	3.04
10.00	24.87	3.67

不同冷却液流速及入口温度下,电池最高温度及温差如表 5 所示。由表 5 可知:相比冷却液流速,冷却液入口温度对电池组最高温度的影响更明显;随着冷却液入口温度下降,温差增大,最大温差在 4 °C 以内。

表 5 不同冷却液流速及入口温度下,电池最高温度及温差

$\theta_l/^\circ\text{C}$	电池最高温度/°C						电池温差/°C					
	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$	$\{v_s\} =$
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
25	35.02	34.78	34.79	34.72	34.63	34.68	2.08	2.08	2.16	2.08	2.06	2.09
20	31.80	31.44	31.33	31.39	31.25	31.35	2.54	2.51	2.49	2.54	2.51	2.56
15	28.65	28.21	28.06	28.18	28.02	28.13	3.08	3.03	3.00	3.10	3.04	3.13
10	25.60	25.09	24.92	25.06	24.87	25.01	3.71	3.66	3.62	3.74	3.67	3.73

3.4 流道厚度的影响

流道厚度为新型流道重要结构参数,影响冷却性能。流道厚度分别为 2、3、4 mm 时,电池组最高温度、温差、流道压差的变化如表 6 所示,表中 $\{d\}$ 为以 mm 为单位的流道厚度 d 的数值。

表 6 不同流道厚度下,电池组最高温度、温差、流道压差的变化

$\{v_s\}$	电池组最高温度/°C			电池组温差/°C			流道压差/Pa		
	$\{d\} = 2$	$\{d\} = 3$	$\{d\} = 4$	$\{d\} = 2$	$\{d\} = 3$	$\{d\} = 4$	$\{d\} = 2$	$\{d\} = 3$	$\{d\} = 4$
0.1	34.90	35.02	35.13	2.17	2.08	2.08	29.90	21.56	20.12
0.2	34.51	34.78	34.90	2.15	2.08	2.09	86.57	60.33	55.06
0.3	34.38	34.79	34.85	2.14	2.16	2.10	156.02	116.25	105.31
0.4	34.30	34.72	34.84	2.14	2.08	2.12	242.66	190.15	170.76
0.5	34.27	34.63	34.79	2.14	2.06	2.13	347.49	222.32	212.85
0.6	34.33	34.68	34.82	2.16	2.09	2.15	469.29	390.09	380.18

由表 6 可知:1)随着流道厚度增大,电池组最高温度增大,流道压差减小;综合考虑各因素影响,选取流道厚度为 3 mm 时,可在压差尽量小的前提下,降低电池组最高温度。2)随着流速增大,电池组最高温度略微减小,压差明显增大;综合考虑各因素影响,选取流速为 0.4 m/s,此时压差增长幅度在 50%左右,同时可降低电池组最高温度。3)相比流速变化,电池组最高温度受流道厚度的影响更为明显。4)不同流速及流道厚度下,电池组温差变化不大,约为 $2.10\text{ }^\circ\text{C} \pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ 。

综合分析,流道厚度对电池组温差的均匀性影响较小,对电池组最高温度影响明显,在选择流道厚度及冷却液流速时,需考虑电池组最高温度与能耗的平衡,在电池组最高温度与温差尽可能小的前提下降低冷却液能耗,进一步优化流道结构参数。综合以上因素,流速为 0.4 m/s、流道厚度为 3 mm 为较佳方案。

4 结论

本文中针对方形锂离子电池,提出新型流道结构,通过数值仿真对电池散热性能进行分析和验证。

1) 对比原始流道,电池组生热模型采用新型流道后,电池组最高温度较传统结构降低了约 8.26 °C。

2) 冷却液流速、冷却液入口温度和流道厚度显著影响电池组散热性能。随着流速增大,流道压差变化明显增大,电池组最高温度减小,电池温差变化较小;相比流速,冷却液入口温度对流道冷却性能的影响更明显,入口温度减小,电池组最高温度明显降低;随着流道厚度增大,流道压差减小,电池组最高温度增大,电池组温差变化不大;在选择流速及流道厚度时需在提高电池散热性能与降低泵功成本之间寻求最优平衡。

3) 新型流道能够有效降低电池组最高温度,使温差保持在合理范围,为方形锂离子电池流道优化设计提供理论依据,并为后续的参数优化研究提供基础。

参考文献:

- [1] GHAREHGHANI A, RABIEI M, MEHRANFAR S, et al. Progress in battery thermal management systems technologies for electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 202: 114654.
- [2] KHAN S A, HUSSAIN I, THAKUR A K, et al. Advancements in battery thermal management system for fast charging/discharging applications[J]. Energy Storage Materials, 2024, 65: 103144.
- [3] AMER M M, SALEM M S, KANNAN A M, et al. Exploratory study on electric batteries thermal performance metrics and thermal management systems evaluation[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 110: 115282.
- [4] SAME J S, EL-TAYEB A, MOUKHTAR I, et al. Effect of thermal parameters on behaviour of a lithium-ion battery: simulation study[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(9): 220951.
- [5] 朱喜娇,严华夏. 电动汽车直冷电池热管理技术研究进展[J/OL]. 过程工程学报: 1-11. (2025-01-15) [2025-02-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.TQ.20250115.1352.008.html>.
- [6] 辛佳琦,万长东,朱珠. 动力电池液冷板换热技术研究现状[J]. 电源技术, 2024, 48(10): 1901-1907.
- [7] 张佩,杨柳青. 锂离子电池热管理技术研究进展[J]. 河南科技, 2024, 43(15): 81-84.
- [8] 刘邦金,汪林威,吴月月,等. 锂离子电池热管理研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(12): 4413-4431.
- [9] 王圣,李新,蒋维,等. 锂离子电池液冷热管理系统研究进展[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(5): 620-625.
- [10] 唐雁雁. 锂离子电池在电动汽车中的应用现状及发展综述[J]. 环境技术, 2023, 41(7): 94-100.
- [11] LI M, MA S M, JIN H, et al. Performance analysis of liquid cooling battery thermal management system in different cooling cases[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108651.
- [12] PU J H, LI R C, LI Y, et al. The novel stereoscopic cooling plate designs and performance analysis for battery thermal management systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124330.
- [13] ZHANG Y, WANG Z Q, ZOU S L, et al. A new bottom and radial coupled heat dissipation model for battery thermal management system[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258: 124794.
- [14] XIONG X, WANG Z H, FAN Y W, 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.
- [15] GAO Q, TIAN J, BAO C J, et al. Thermal-flow-electric coupling performance analysis of a liquid-immersed battery thermal management system[J]. Science China Technological Sciences, 2024, 68(1): 1120102.
- [16] LUO Y H, QIU X H, REN J S, et al. A channel with hybrid twisted tapes for immersion cooling battery thermal management system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 95: 112588.

- [17] GAN H L, TIAN J A, QIU H R, et al. Thermal performance of symmetrical double-spiral channel liquid cooling plate based battery thermal management for energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 263: 125399.
- [18] MU Y T, GAO K, LUO P, et al. Research on bionic fish scale channel for optimizing thermal performance of liquid cooling battery thermal management system[J]. Batteries, 2023, 9(2): 134.
- [19] XIANG X R, YANG R B, SUN H W, et al. Performance improvement of a hybrid battery thermal management system with pseudo-3D topology optimization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 240: 126632.
- [20] LUO W M, LI H N, CHU T Y, et al. A numerical study of battery thermal management system with square spiral ring-shaped liquid cooling plate[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 45: 102120.
- [21] 任璐. 动力电池性能提升途径及发展展望[J]. 科技创新与应用, 2019, 9(4): 50-51.
- [22] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.
- [23] 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.

Simulation analysis of heat dissipation performance of a new liquid cooling channel for square lithium-ion battery

LIU Na^{1*}, LIU Xujie¹, SUN Mingshan², JIANG Yueming¹,
SUN Zhuang¹, HUANG Jingbin¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Shandong Ruiguan Electric Energy Thermal Co., Ltd., Jinan 250101, China

Abstract: In order to improve the heat dissipation performance of square lithium-ion batteries, a new liquid cooling channel structure is designed. Based on Fluent simulation software, a coupled model of battery heat generation and fluid heat transfer is constructed. The influence of coolant flow rate, inlet temperature, and channel thickness on the cooling effect in the new liquid cooling channel structure is simulated and analyzed. The results show that the new flow channel reduce the maximum temperature of the battery pack by 8.26 °C. As the flow rate increases, the maximum temperature of the battery decreases, the temperature difference of the battery does not change much, and the pressure difference of the liquid cooling channel increases significantly. The inlet temperature decreases, the maximum temperature of the battery pack decreases, and the temperature difference is within a reasonable range of variation. As the thickness of the flow channel increases, the maximum temperature of the battery pack rises, the pressure difference decreases, and the temperature difference remains within a reasonable range of variation. To achieve the synergistic goal of higher efficiency and lower energy consumption, a balance needs to be sought between heat dissipation performance and pump functional consumption. A flow rate of 0.4 m/s and a channel thickness of 3 mm are the preferred options.

Keywords: square battery; lithium-ion battery; battery thermal management; new liquid cooled flow channel; thermal dissipation performance; numerical simulation

(责任编辑:胡晓燕)