

基于三层流道结构的三元方形电池模块单相循环浸没热管理仿真分析

王项如¹, 王 同²

¹安徽新富新能源科技股份有限公司, 安徽 安庆

²上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年8月3日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月3日

摘 要

随着全球能源转型的加速, 锂离子电池在电动汽车、可再生能源存储系统等领域得到了广泛应用。然而, 锂离子电池在充放电过程中会产生热量, 若热量不能及时散发, 会导致电池温度升高, 进而影响电池性能和寿命。本文提出了一种基于三层流道结构的单相循环浸没热管理系统, 并与传统的底部液冷板冷却方式进行了对比研究。通过建立三维模型并利用ANSYS Fluent进行数值仿真, 分析了在0.5 C、1 C、1.5 C充放电倍率下, 两种冷却方式对电池模组的温度分布、温升速率、最大温度以及冷却液压力分布的影响。结果表明, 浸没冷却方式由于冷却液直接接触电池表面, 具有更高的冷却效率和温度均匀性, 在1 C充放电倍率下, 最高温度为28.12°C, 显著低于底部液冷板冷却的32.96°C。此外, 浸没冷却在不同充放电倍率下均能有效降低电池组最高温度, 且压降较小, 冷却效率更高。

关键词

锂离子电池, 浸没式冷却, 液冷板冷却, 三维建模, 数值仿真

Simulation Analysis of Single-Phase Immersion Thermal Management for Ternary Square Battery Modules Based on a Three-Layer Channel Structure

Xiangru Wang¹, Tong Wang²

¹Anhui XMAX New Energy Technology Co., Ltd., Anqing Anhui

²School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 3rd, 2025; accepted: Aug. 27th, 2025; published: Sep. 3rd, 2025

文章引用: 王项如, 王同. 基于三层流道结构的三元方形电池模块单相循环浸没热管理仿真分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 1-10. DOI: 10.12677/mos.2025.149579

Abstract

With the acceleration of the global energy transition, lithium-ion batteries have been widely adopted in fields such as electric vehicles and renewable energy storage systems. However, heat is generated during the charging and discharging processes of lithium-ion batteries. If this heat cannot be dissipated in a timely manner, it will lead to an increase in battery temperature, thereby affecting battery performance and lifespan. This paper proposes a single-phase circulating immersion thermal management system based on a three-layer channel structure and conducts a comparative study with the traditional bottom liquid cooling plate cooling method. By establishing a three-dimensional model and performing numerical simulations using ANSYS Fluent, the effects of the two cooling methods on the temperature distribution, temperature rise rate, maximum temperature, and coolant pressure distribution of the battery module are analyzed under 0.5 C, 1 C, and 1.5 C charging/discharging rates. The results demonstrate that the immersion cooling method, due to the direct contact between the coolant and the battery surface, exhibits higher cooling efficiency and temperature uniformity. At a 1 C charging/discharging rate, the maximum temperature under immersion cooling is 28.12°C, significantly lower than the 32.96°C observed with the bottom liquid cooling plate. Furthermore, immersion cooling effectively reduces the maximum temperature of the battery pack across different charging/discharging rates while maintaining a lower pressure drop and higher cooling efficiency.

Keywords

Lithium-Ion Battery, Immersion Cooling, Liquid Cooling Plate Cooling, Three-Dimensional Modeling, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源转型的加速以及对清洁能源的日益依赖,锂离子电池作为一种高效、可充电的储能技术,在电动汽车(EV)、可再生能源存储系统以及便携式电子设备等多个领域得到了广泛应用。其具有能量密度高、自放电率低、循环寿命长等诸多优势[1],为现代科技的发展和人们的日常生活带来了极大的便利。然而,锂离子电池在充放电过程中,电极材料与电解液之间的电化学反应会产生热量。电池内部的热量产生率与充放电倍率、电池的化学体系、结构以及环境温度等因素密切相关。一般来说,较高的充放电倍率会导致电池内部热量产生速率加快,若热量不能及时散发,电池温度会迅速上升。而电池温度的升高又会反过来影响电池的电化学反应动力学过程,加速电池内部副反应的发生,导致电池的内阻增加、容量衰减加速,同时还会降低电池的充放电效率。此外,当电池温度过高时,会导致容量退化,温差过大会导致放电状态不均匀,从而缩短锂离子电池的寿命[2]。锂离子电池的最佳工作温度范围为 25°C~40°C,电池组内部温差应小于 5°C [3]。因此,有效的电池冷却技术对于保障锂离子电池的安全、可靠运行以及充分发挥其性能至关重要。

为了确保锂离子电池在安全的温度范围内运行,需要对其实施有效的热管理。现在新能源汽车常用的热管理冷却策略包括空气冷却[4][5],液体冷却[6]和相变材料(PCM)冷却[7]。空气冷却系统的特点是简单,成本低,易于维护。然而,空气的低导热系数和比热容导致在降低电池组最高温度和保持电池模块

[8]内温度均匀性方面性能不佳。由于材料本身的潜热容量较高,PCM 冷却达到了较高的冷却效率。然而,PCM 较差的导热系数和结构稳定性限制了 PCM 冷却技术的可扩展性[9] [10]。液体冷却,利用具有高传热系数和比热容的冷却剂,是现代电池热管理系统(BTMS)中最广泛使用的冷却方法之一。根据冷却剂是否直接接触电池,液体冷却可分为间接接触式和浸没式(直接接触式)液体冷却。间接接触式液体冷却是当前电动汽车电池热管理系统中普遍采用的散热方案。间接接触式液冷的冷却性能一般取决于电池形状[11]、冷却板结构[12] [13]、冷却剂流量[14]等因素。然而,在间接接触式液体冷却系统中,传热过程中遇到的多重热阻显著降低了传热效率。此外,在传热过程中,冷却液温度沿流动方向升高,导致电池组内温度均匀性降低。浸没冷却系统则不需要复杂的管道布置和散热器结构,电池直接浸没在冷却液容器中,系统结构相对简单。这种简单的结构设计使得整个电池系统的体积和重量可以得到有效控制,有利于提高电池系统的能量密度和空间利用率,尤其适用于对空间和重量要求较高的电动汽车等应用场景。

为了解决底部液冷板冷却不均匀这个问题,本文提出了一种由 5 节 116 Ah 方壳电池基于三层流道结构的三元柱形电池模块单相循环浸没热管理系统。采用 Space Claim 建立数学模型,并采用 Fluent 对电池模组分别以 0.5 C、1 C、1.5 C 倍率放电的散热性能进行了数值仿真分析,并进一步分析了电池组在浸没冷却和底部冷却情况下的温度分布、流量分配和压力分布情况,为方壳电池的浸没式冷却系统设计提供参考。

2. 模型与方法

2.1. 仿真三维模型

本文所提出了一种基于三层流道结构的三元柱形电池模块单相循环浸没热管理系统,其结构如图 1 所示,主要由五块 116 Ah 锂电池组成的串联电池模组、箱体、上盖、防爆阀等组成,本研究设计的冷却系统中,上箱盖与下箱体均采用透明亚克力材料制成,其透明特性便于实时观察冷却剂在箱体内的流动情况,从而实现对冷却过程的可视化监测。固定密封框与电池表面通过粘接方式固定,并与箱体内表面共同构成三条独立的流动通道,确保冷却液能够充分流经电池表面,减少温度分层现象,实现高效的热交换。冷却液经由下部入口进入箱体后,在电池底部呈“S”型流动路径,随后在电池上部以“倒 S”型路径流动,最终从电池末端位置流向箱体上部出口排出,形成独特的三层流动模式。浸没冷却的流体在电池组内的流动可通过设计三层流道实现更均匀的速度分布,避免死区(流动停滞区域),从而减少局部过热。通过交替改变流动方向,增强冷却液的湍流效应,提升对流换热效果。此外,固定密封框架不仅为电池提供了稳定的支撑,还保持了电池之间的适当间隙,有效减少了冷却液的总体积需求。同时,该框架结构对电池起到了约束作用,防止电池在长期运行过程中因温度升高而发生膨胀或变形,从而保障了电池系统的结构稳定性和可靠性。

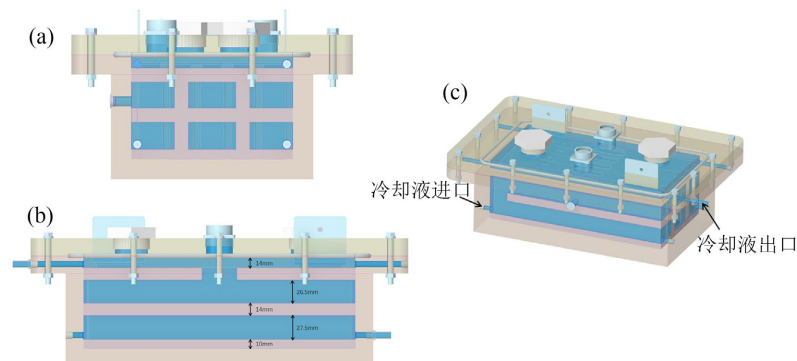


Figure 1. Structural diagram of the battery module (Immersion cooling)
图 1. 电池模组结构示意图(浸没冷却)

如图 2 所示, 展示了一种基于底部液冷板冷却的电池冷却模组, 该模组主要由电池模组与液冷板组成。底部液冷板冷却是一种间接接触式液冷方式, 其工作原理是通过液冷板内部冷却液的流动, 吸收并带走电池模组在运行过程中产生的热量, 从而实现对电池的有效冷却。在该设计中, 通过设计液冷板的几何参数和冷却通道的布局, 以优化冷却液的流动特性和热交换效率。通过精确控制冷却液的流动路径和速度, 可以确保电池模组在不同工作条件下均能保持适宜的温度, 从而提高电池的性能和寿命。

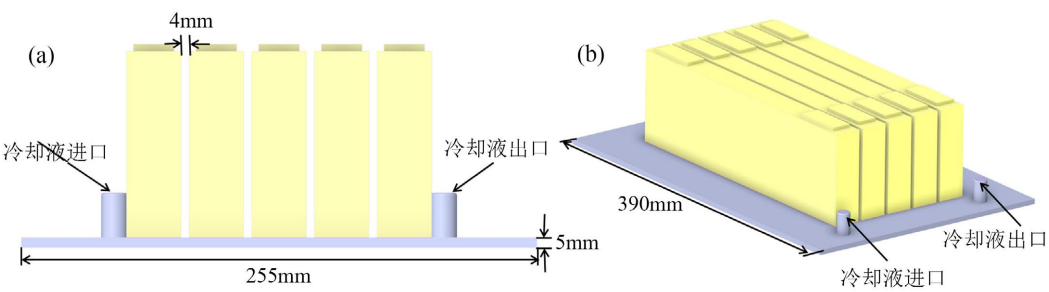


Figure 2. Structural diagram of the battery module (Bottom liquid cooling plate cooling)
图 2. 电池模组结构示意图(底部液冷板冷却)

2.2. 电池产热模型和液体流动模型

本研究采用五块 116 Ah 的三元锂离子电池, 其具体的参数如表 1 所示, 锂离子电池在工作过程中会产生热量, 这种现象在高倍率放电或充电时尤为明显。电池内部产热有四个主要的热源: 电池内部化学反应的反应热 Q_r 、电解质分解产生的副反应热 Q_s 、电池内阻产生的焦耳热 Q_j 和由极化反应产生的极化热 Q_p 。则锂离子电池的总产热量 Q 为:

$$Q = Q_r + Q_s + Q_j + Q_p \quad (1)$$

而电池产热主要由电池内阻产生的焦耳热和电池可逆反应的反应热两部分组成。

根据 Bernardi 提出的电池生热速率模型, 则电池的产热速率为

$$q_v = \frac{1}{V_{cell}} \left(I^2 R + IT_{cell} \frac{\partial E}{\partial T} \right) \quad (2)$$

其中, q_v 为电池的生热速率, I 为充放电电流, R 为电池内阻, V_{cell} 为电池的体积, T 为电池的温度, $\frac{\partial E}{\partial T}$ 表示温度系数, E 为电动势。

Table 1. Parameters of lithium-ion batteries
表 1. 锂离子电池参数

参数	数值
容量	116 Ah
尺寸(长 × 宽 × 高)	300 mm × 92 mm × 27 mm
重量	1750 g
阳极材料	石墨
阴极材料	NCM532
上截止电压	4.2 V
下截止电压	2.75 V

在进行流体仿真之前, 需要对流体进行以下假设:

- (1) 层流且不可压缩流体
- (2) 冷却液在流道中均匀流动, 物理性质是恒定不变的
- (3) 不考虑热辐射

基于以上假设, 冷却液的连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程, 表达式为:

$$\nabla \left(\rho_l \vec{v} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_l \left(\vec{v} \nabla \vec{v} \right) + \nabla p = \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (4)$$

$$\rho_l c_l \left(\vec{v} \nabla T_l \right) = \lambda_l \nabla^2 T_l \quad (5)$$

其中, ρ_l 为冷却液的密度, c_l 为冷却液的比热容, λ_l 为冷却液的导热系数, T_l 为冷却液的温度, μ 为冷却液的动力粘度, p 为冷却液的压力。

3. CFD 仿真模型

本文主要采用 Solidworks 进行三维建模, 利用 SpaceClaim 进行抽取流体域、冷却液进出口的设置、干涉检查、共享设置等前处理部分, 然后将模型导入 ANSYS Fluent 中进行浸没式冷却和底部液冷板冷却电池模组散热的数值仿真分析。

3.1. 网格划分

在 SpaceClaim 软件中完成前处理工作后, 将处理好的模型导入 ANSYS Fluent Meshing 中进行网格的划分。在 ANSYS Fluent 中, 网格划分是数值模拟过程中的一个关键步骤, 它直接影响到模拟结果的准确性、计算效率和稳定性。然后, 系统会根据几何模型和局部尺寸设置生成面网格。面网格是构成三维体网格的基础, 其质量直接影响到体网格的生成和最终的模拟精度。若面网格质量大于 0.2, 则需要添加改进表面网格部分。将模型在 Space Claim 中设置冷却液的进口和出口分别定义为速度入口和压力出口。根据几何模型的不同部分, 可以创建不同的网格区域。这些区域可以有不同网格尺寸和类型, 以适应不同的几何特征和流动条件。本文主要分为流体和固体两种区域。对于边界层流动特性的区域, 可以添加边界层网格。边界层网格通常更细, 能够更精确地模拟近壁区域的流动行为, 本文模型添加 3 层的边界层数。最后, 基于面网格和边界层网格, 设置体网格类型为多面体网格, 生成三维体网格, 此模型的体网格数量为 415536, 网格质量较好, 如图 3 所示。

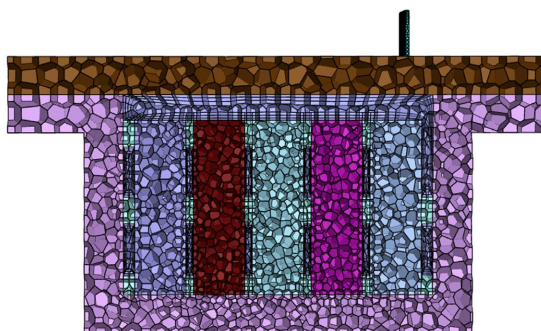


Figure 3. Mesh division diagram of the battery module (Immersion cooling)
图 3. 电池模组网格划分示意图(浸没冷却)

3.2. 求解条件设置

在完成网格划分之后, 进入 ANSYS Fluent 求解模式中。在模型部分选用能量方程和标准 κ - ε 模型方法, 其控制方程如式 6 和式 7 所示。然后定义流体和固体材料的属性, 如流体的黏度、密度、导热系数和比热容, 固体的导热系数、密度和比热容等, 本文设置了四种材料的属性, 分别为电池、铝、冷却液(水和乙二醇混合液)和亚克力, 其具体的物理参数如表 2 所示。材料属性设置完成后, 进行计算域的边界条件的设置。冷却液进口流速设置为 1.4 m/s, 冷却液进口温度和环境温度设置为 25℃, 出口处则以环境压力作为出口压力, 设置为 0 Pa。固体与空气的对流换热系数设置为 5 W·m⁻²K⁻¹。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(v_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon + G_k + G_b \quad (6)$$

其中, k 是湍动能, v_i 是速度分量, μ 是流体的动力粘性系数, μ_t 是湍流粘性系数, σ_k 是湍动能方程的普朗特数, P_k 是由于平均速度梯度产生的湍动能, ε 是湍流耗散率, G_k 是由于浮力产生的湍动能, G_b 是由于体积力产生的湍动能。

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(v_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_3 G_b \frac{\varepsilon}{k} \quad (8)$$

其中, ε 是湍流耗散率, σ_ε 是湍流耗散率方程的普朗特数, C_μ 、 C_1 、 C_2 、 C_3 为标准 κ - ε 模型对应的经验常数。

为了精确评估锂离子电池在不同工作条件下的热特性, 本研究采用混合脉冲功率特性(HPPC)实验方法测定电池的内阻参数。同时, 通过熵热系数实验获取电池的熵热系数。这些实验数据将被整合到一个数学模型中, 即式(2), 该模型用于描述电池的热行为。进一步地, 将该关系式引入到生热速率的计算公式中, 以建立生热速率与时间的函数关系。该表达式将作为电池内部热源项的关键参数, 用于计算流体动力学(CFD)模拟中。为了实现这一目标, 将编写的自定义函数(UDF)程序, 该程序将生热速率表达式嵌入到 ANSYS Fluent 软件中。通过这种方式, 可以在模拟过程中动态地考虑电池内部的热生成效应, 从而提高模拟的准确性和可靠性。

Table 2. Physical parameters of various materials

表 2. 各材料的物理参数

材料	密度(kg·m ⁻³)	比热容(J·kg ⁻¹ K ⁻¹)	导热系数(W·m ⁻¹ K ⁻¹)	黏度(kg·m ⁻¹ s ⁻¹)
电池	2348	1150	23.29 (x, z 轴) 0.851 (y 轴)	
铝	2719	871	202.4	
冷却液	1057.6	3485	0.419	3.39e-05
亚克力	1200	1464	0.19	

4. 结果讨论

本研究在环境温度为 25℃ 的条件下, 对电池模块进行 0.5 C、1 C、1.5 C 速率的充放电循环, 以水乙二醇混合溶液作为冷却介质进行浸没冷却和底部液冷板冷却数值仿真模拟, 两种冷却方式的冷却剂进口流量均设置为 3 L/min, 冷却剂进口温度均设置为 25℃。

4.1. 浸没冷却和底部液冷板冷却的温度分布对比

图 4 为 1 C 倍率进行充放电循环的两种冷却方式的温度分布对比图, 从图中可以看出, 两种不同的冷却方式对电池组的温度分布有着显著的影响。

图 4 中的(a)为浸没冷却方式的电池组的温度云图, 由于冷却液直接接触电池的所有表面, 冷却效率较高, 能够更有效地降低电池组的整体温度。从图中可以看出, 温度分布较为均匀, 最高温度为 28.12℃, 温度较高区域主要分布在电池中心位置。这表明浸没冷却能够有效地将热量从电池组中带走, 保持电池组的温度在一个较低且均匀的水平。然而, 图 4 中的(b)为底部液冷板冷却方式的电池组的温度云图, 温度分布不如浸没冷却均匀, 最高温度达到 32.96℃。冷却液仅通过液冷板与电池底部接触, 冷却效率相对较低, 尤其是在高倍率充放电工况下, 难以满足电池快速散热的需求。底部液冷板冷却在靠近液冷板的区域换热效率较高, 电池温度较低, 而在电池的顶部区域存在冷却不足的情况, 导致远离液冷板的区域温度较高。

浸没冷却的冷却液通常具有较高的导热系数, 且通过强制流动在电池表面形成更均匀的流体边界层, 对流换热系数较高。液冷板冷却的冷却液在狭窄的液冷板通道内流动, 虽然可通过设计提高流速以增强换热, 但是热量仍需通过电池材料传导至接触面, 存在额外的热阻, 对流换热系数较低, 而电池材料的各向异性导热特性会导致温度梯度增大。

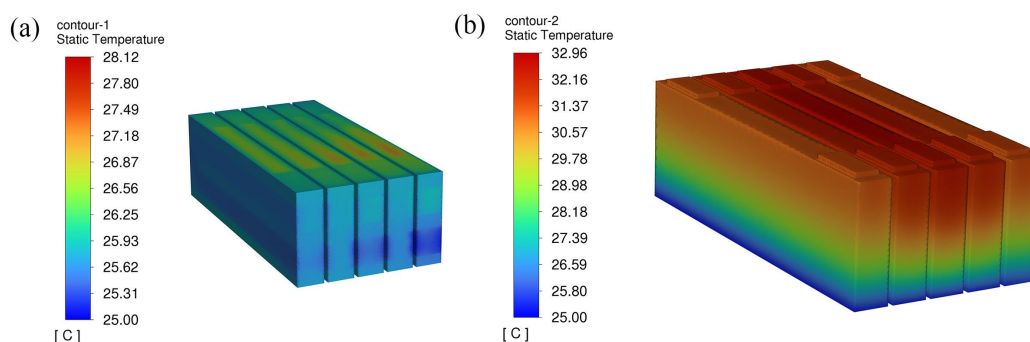


Figure 4. Temperature contour of the battery module: (a) Immersion cooling; (b) Bottom liquid cooling plate cooling
图 4. 电池模组温度云图: (a) 浸没式冷却; (b) 底部液冷板冷却

4.2. 浸没冷却和底部液冷板冷却的温升速率对比

根据图 1 和图 2, 将靠近冷却液进口的电池设定为 1 号电池, 依次将其余电池设定为 2 号电池、3 号电池、4 号电池和 5 号电池。从图 5 中可以看出, 浸没冷却下电池的温度上升速率相对较慢。浸没冷却方式能够更有效地从电池中移除热量, 保持电池温度在一个较低的增长速率。相比之下, 底部液冷板冷却的温度上升速率较快。这可能是因为底部液冷板冷却的接触面积有限, 导致热量移除效率不如浸没冷却。

由图 5(a)中可以看出, 浸没冷却下电池之间的温度差异较小。不同电池的温度曲线非常接近, 表明冷却效果在电池之间分布均匀。温度均匀性有助于提高电池组的整体性能和可靠性, 因为电池之间的温度差异会影响它们的充放电速率和容量。

而从图 5(b)中可以看出, 在底部冷却电池组中, 电池之间的温度差异较大。不同电池的温度曲线显示出更明显的差异, 表明冷却效果在电池之间分布不均匀。电池 2、电池 3 和电池 4 相比于其余两块电池温度高, 这种不均匀的冷却效果可能导致中间区域的电池比其他电池更热, 从而影响电池组的整体性能和寿命。在极端情况下, 局部过热的电池可能会损坏, 影响整个电池组的可靠性。

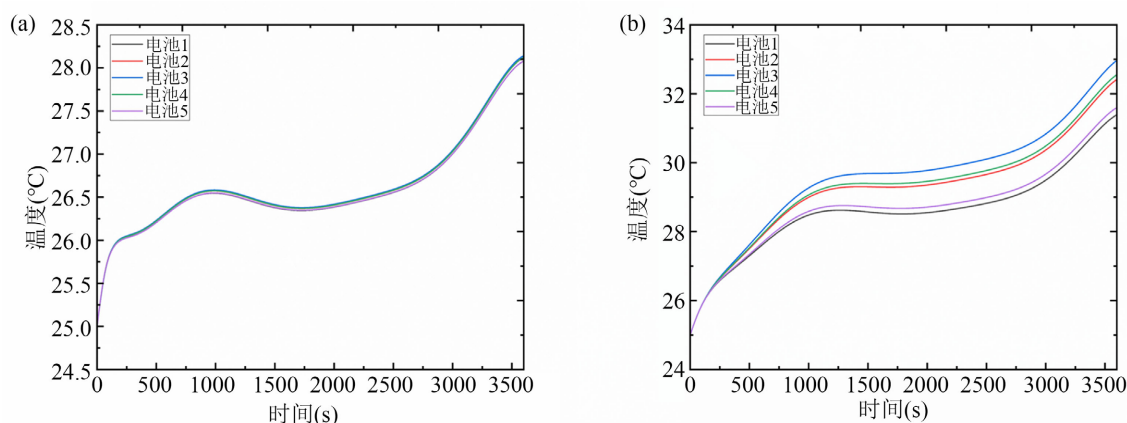


Figure 5. Temperature curve of the battery module: (a) Immersion cooling; (b) Bottom liquid cooling plate cooling
图 5. 电池模组温度曲线: (a) 浸没式冷却; (b) 底部液冷板冷却

4.3. 浸没冷却和底部液冷板冷却的单体电池最大温度对比

在锂离子电池的充放电过程中,随着充放电倍率的增加,电池内部的发热量相应增加,进而导致电池表面温度的升高。图 6 展示了在不同充放电倍率(0.5 C、1 C、1.5 C)条件下,采用浸没冷却方式和底部液冷板冷却方式时电池组的最高温度变化情况。

在底部液冷板冷却方式下,电池组在 0.5 C、1 C、1.5 C 充放电倍率下的最高温度分别为 27.17°C、32.97°C 和 36.36°C。而在浸没冷却方式下,相应的最高温度分别为 25.71°C、28.14°C 和 29.8°C。与底部液冷板冷却相比,浸没冷却方式在上述三种充放电倍率下,电池组的最高温度分别降低了 1.46°C、4.83°C 和 6.56°C。可以看出,在不同的充放电速率下,两种冷却方式的冷却效果是不同的,并且充放电倍率越大,差异越明显。

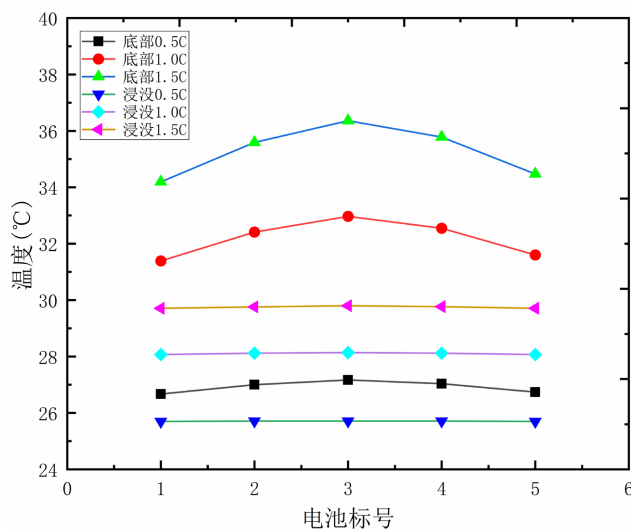


Figure 6. Maximum temperature of the battery cell
图 6. 电池单体最高温度

4.4. 浸没冷却和底部液冷板冷却的冷却液压力分布对比

在冷却液进口流量为 3 L/min 条件下的进出口压差进行了对比分析。仿真结果显示,在浸没冷却条件

下, 冷却液进出口的压差值为 5218.64 Pa, 而在底部液冷板冷却条件下, 冷却液的进出口压差值显著增加至 23918.90 Pa。与浸没冷却相比, 底部液冷板冷却的压差增大了 18700.26 Pa。

由图 7 可知, 基于三层流道结构的浸没冷却方式的压力梯度相对较小, 底部区域压力较大, 越靠近顶部的区域, 压力越小, 且压力变化较为平缓。这是由于浸没冷却中冷却液与电池的接触面积较大, 导致压力分布较为均匀。由于浸没冷却方式的压力梯度较小, 所以压力损失相对较小, 这有助于提高冷却液的流动效率, 减少能量消耗。然而, 底部液冷板冷却的压力梯度较大, 冷却液进口处的压力最大, 冷却液的压力随着流道长度的增加而减小, 压力变化较为剧烈。这是由于流道长度较长, 冷却液在流道中流动的时间较长, 能量消耗较多, 压力损失相对较大, 导致压力变化较大。

浸没冷却的核心在于流道结构的低阻力设计的流动形态, 通过增大水力直径、缩短流动路径、降低流速, 显著减少了压力损失。而底部液冷板冷却因狭窄流道内的湍流效应和复杂流动结构, 导致压差大幅增加。

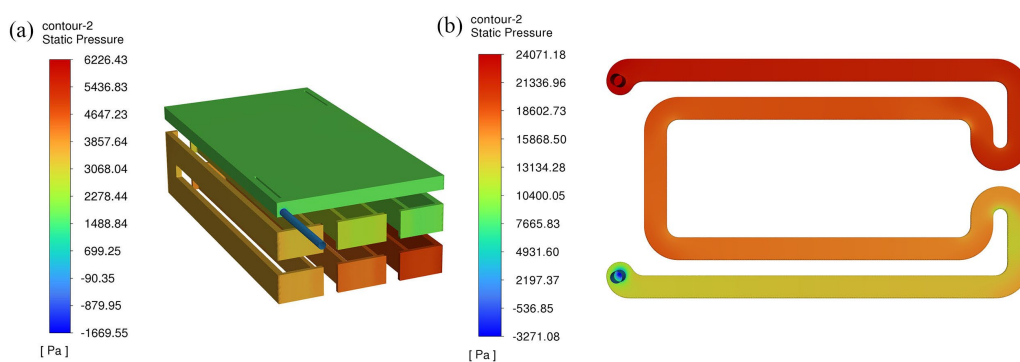


Figure 7. Pressure distribution diagram of the coolant: (a) Immersion cooling; (b) Bottom liquid cooling plate cooling
图 7. 冷却液压力分布图: (a) 浸没式冷却; (b) 底部液冷板冷却

5. 结论

本文采用了 ANSYS Fluent 对 5 节 116 Ah 平行并列分布的锂离子电池分别在基于三层流道结构的浸没冷却方式和底部液冷板冷却方式下, 不同充放电倍率(0.5 C、1 C、1.5 C)进行散热仿真分析。可以得到以下结论。

本研究利用计算流体动力学(CFD)软件 ANSYS Fluent, 对由五节容量为 116 安时(Ah)的锂离子电池组成的电池组进行了散热性能的仿真分析。这些电池以平行并列的方式分布, 并分别采用了两种不同的冷却策略: 基于三层流道结构的浸没冷却方式和底部液冷板冷却方式。仿真分析包括了不同的充放电倍率条件, 包括 0.5 C、1 C 和 1.5 C。可以得到以下结论。

(1) 浸没冷却方式由于其冷却液与电池表面直接接触, 展现出较高的冷却效率和温度均匀性, 最高温度约为 28.12℃。相比之下, 底部液冷板冷却方式由于仅在电池底部进行接触换热, 导致温度分布不均, 最高温度可达 32.96℃。

(2) 在相同充放电倍率条件下, 浸没冷却相较于底部液冷板冷却, 能够更有效地控制锂离子电池温度上升速率, 实现更均匀的温度分布, 从而提高电池组整体性能和可靠性。

(3) 在不同充放电倍率下, 浸没冷却相较于底部液冷板冷却显著降低电池组最高温度, 差异随着充放电倍率增加而增大, 浸没冷却具有更优的热管理性能。

(4) 在 3 L/min 流量下, 浸没冷却的进出口压差为 5218.64 Pa, 远低于底部液冷板冷却的 23918.90 Pa, 表明浸没冷却能更有效地降低压力损失, 提高冷却效率。

参考文献

- [1] Longchamps, R.S., Yang, X. and Wang, C. (2022) Fundamental Insights into Battery Thermal Management and Safety. *ACS Energy Letters*, **7**, 1103-1111. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c00077>
- [2] Zhang, G., Ge, S., Xu, T., Yang, X., Tian, H. and Wang, C. (2016) Rapid Self-Heating and Internal Temperature Sensing of Lithium-Ion Batteries at Low Temperatures. *Electrochimica Acta*, **218**, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.117>
- [3] Lyu, Y., Siddique, A.R.M., Majid, S.H., Biglarbegian, M., Gadsden, S.A. and Mahmud, S. (2019) Electric Vehicle Battery Thermal Management System with Thermoelectric Cooling. *Energy Reports*, **5**, 822-827. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.016>
- [4] Fan, Y., Bao, Y., Ling, C., Chu, Y., Tan, X. and Yang, S. (2019) Experimental Study on the Thermal Management Performance of Air Cooling for High Energy Density Cylindrical Lithium-Ion Batteries. *Applied Thermal Engineering*, **155**, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.157>
- [5] Yang, N., Zhang, X., Li, G. and Hua, D. (2015) Assessment of the Forced Air-Cooling Performance for Cylindrical Lithium-Ion Battery Packs: A Comparative Analysis between Aligned and Staggered Cell Arrangements. *Applied Thermal Engineering*, **80**, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.049>
- [6] Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M. and Li, C. (2023) An Up-To-Date Review on the Design Improvement and Optimization of the Liquid-Cooling Battery Thermal Management System for Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, **219**, Article ID: 119626. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>
- [7] Luo, J., Zou, D., Wang, Y., Wang, S. and Huang, L. (2022) Battery Thermal Management Systems (BTMs) Based on Phase Change Material (PCM): A Comprehensive Review. *Chemical Engineering Journal*, **430**, Article ID: 132741. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132741>
- [8] Chen, K., Chen, Y., She, Y., Song, M., Wang, S. and Chen, L. (2020) Construction of Effective Symmetrical Air-Cooled System for Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, **166**, Article ID: 114679. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114679>
- [9] Lv, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Z. and Yang, C. (2016) Experimental Study on a Novel Battery Thermal Management Technology Based on Low Density Polyethylene-Enhanced Composite Phase Change Materials Coupled with Low Fins. *Applied Energy*, **178**, 376-382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.058>
- [10] Zhu, G., Zou, M., Luo, W., Huang, Y., Chen, W., Hu, X., *et al.* (2024) A Polyurethane Solid-Solid Phase Change Material for Flexible Use in Thermal Management. *Chemical Engineering Journal*, **488**, Article ID: 150930. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150930>
- [11] Chen, X., Shen, J., Xu, X., Wang, X., Su, Y., Qian, J., *et al.* (2024) Performance of Thermal Management System for Cylindrical Battery Containing Bionic Spiral Fin Wrapped with Phase Change Material and Embedded in Liquid Cooling Plate. *Renewable Energy*, **223**, Article ID: 120087. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120087>
- [12] Zuo, W., Zhang, Y., E, J., Li, J., Li, Q. and Zhang, G. (2022) Performance Comparison between Single S-Channel and Double S-Channel Cold Plate for Thermal Management of a Prismatic LiFePO₄ Battery. *Renewable Energy*, **192**, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.116>
- [13] Zhang, Y., Zuo, W., E, J., Li, J., Li, Q., Sun, K., *et al.* (2022) Performance Comparison between Straight Channel Cold Plate and Inclined Channel Cold Plate for Thermal Management of a Prismatic Lifepo₄ Battery. *Energy*, **248**, Article ID: 123637. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123637>
- [14] Huo, Y., Rao, Z., Liu, X. and Zhao, J. (2015) Investigation of Power Battery Thermal Management by Using Mini-Channel Cold Plate. *Energy Conversion and Management*, **89**, 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.015>