

4680型锂电池复合热管理系统换热特性研究

袁逸斌, 王 波*

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年7月12日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月14日

摘 要

4680型锂离子电池具有容量大和能量密度高等优点, 但其尺寸大, 产热量高, 易产生严重温升, 面临安全性与性能退化等挑战。本文针对4680型锂离子动力电池设计了一种热管-间接液冷复合热管理系统, 通过电池单体产热试验对电池产热模型进行了验证, 并利用数值模拟探究了复合热管理系统换热特性与放电倍率、环境温度和冷却液流速之间的关系, 讨论了冷却液流速对热管理系统经济性的影响。结果表明, 在各种模拟工况下复合热管理系统均能将电池组温度有效控制在40°C以下, 但在高放电倍率下电池组内部无法保持良好的温度均匀性。提高冷却液流速有利于增强电池组整体换热能力, 但受到电池内温度梯度影响, 提升效果存在上限, 而且高流速会导致泵功需求增加, 影响系统经济性, 综合考虑热管理性能与能耗成本, 冷却液最佳流速为0.5 m/s。

关键词

4680电池, 热管, 电池热管理, 数值模拟

Study on the Heat Transfer Characteristics of a Composite Thermal Management System for 4680 Lithium-Ion Batteries

Yibin Yuan, Bo Wang*

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 12th, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 14th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 袁逸斌, 王波. 4680 型锂电池复合热管理系统换热特性研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 83-94.
DOI: 10.12677/mos.2025.148550

Abstract

The 4680-type lithium-ion battery offers advantages such as high capacity and high energy density. However, due to its large size and high heat generation rate, it is prone to significant temperature rise, posing challenges in safety and performance degradation. Therefore, a hybrid thermal management system combining heat pipes and indirect liquid cooling is designed for 4680-type lithium-ion power batteries. The heat generation model of the battery is validated through experimental measurements on the battery cell. Numerical simulations are conducted to investigate the relationship between the heat transfer performance of the hybrid system and discharge rate, ambient temperature, and coolant velocity. Additionally, the effect of coolant velocity on the economic performance of the thermal management system is analyzed. The results indicate that the hybrid thermal management system can effectively maintain the battery pack temperature below 40°C under all simulated conditions. However, at high discharge rates, the battery pack fails to maintain good temperature uniformity. Moreover, although increasing coolant velocity enhances the heat dissipation capacity of the pack, the benefit is constrained by internal temperature gradients within the battery cell. Additionally, higher flow velocity leads to increased pump power consumption, affecting economic efficiency. Considering both thermal performance and energy cost, a flow rate of 0.5 m/s is determined to be optimal.

Keywords

4680 Battery, Heat Pipe, Battery Thermal Management, 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

随着全球对环境保护和可持续发展的关注不断加深,新能源汽车产业正迎来高速发展期[1]。动力电池作为新能源汽车的核心部件因其具有高能量密度、高使用寿命和高安全性等特点[2]成为了重要研究对象。4680 型锂离子动力电池作为大圆柱电池与传统 18650、21700 电池对比,具有更高的能量密度和充放电功率,有利于提高整车的续航并降低制造成本。锂离子动力电池的最佳工作温度区间为 20°C~40°C,然而高倍率的充放电使电池产生大量热量,过高的温度会破坏电池内部的化学平衡,若缺少有效的热管理导致散热不足,会有引发热失控的风险[3]。因此对于 4680 电池,需要实施稳定有效的热管理方案。

电池热管理技术可分为主动式和被动式,主要包括相变材料(PCM)冷却[4] [5]、浸没式液冷[6] [7]、热管冷却[8] [9],强制风冷[10]和间接液冷[11] [12]。其中热管因具有传热效率高、等温性好和使用寿命长等优点近年来得到广泛研究。然而作为一种被动式热管理技术依赖材料的导热和空气的对流换热,在高温环境或大功率工况下散热能力有限。因此通常会与主动式相结合,提高系统的适用性,实现更高效的热管理。王悦齐等[13]设计了一种平板热管与风冷的锂离子电池组复合热管理系统,使用数值模拟对其散热特性进行研究,发现经过优化后的复合热管理系统在航空器高空巡航工况的环境温度下,其散热性能与液冷相当,但能耗和重量低于后者。程金鹏[14]设计了 4 种不同流道的热管与间接液冷复合热管理系统,研究其在不同放电倍率下对电池温度的控制能力,并通过多目标优化发现当冷却液流速为 0.3657 m/s,冷却液温度为 29.9291°C 时,具有较好的冷却效果。金志浩等[15]对比了风冷、热管、热管-风冷和热管

液冷四种热管理系统在不同放电倍率和环境温度条件下的散热性能。研究发现复合热管理系统散热性能与单风冷和单热管系统有至少 10℃ 以上的差距, 热管-液冷系统散热表现最佳, 电池最高温度在不同工况下都能控制在 40℃ 以下。Abbas 等[16]在热管-间接液冷系统的基础上加入石蜡相变材料, 对比电池在不同排列方式下的温度变化, 发现错列布置时电池组最高温度更低, 温度均匀性更好。Lu 等[17]提出了一种将振荡热管技术与液体冷却技术相结合的新型电池热管理系统, 研究发现当充液率为 26.1% 时, 热管启动性能最佳。将石墨烯纳米流体用作冷却剂时, 电池组的平均温度从 52.2℃ 下降到 47.9℃。研究验证了复合热管理系统在提升电池热性能方面的有效性, 为新能源汽车热管理系统的设计与优化提供了具有应用前景的解决思路。

综上所述, 复合热管理系统在提升电池模组散热性能及温度均匀性方面展现出良好潜力, 但当前相关研究主要集中于方形电池、以及 18650、21700 等中小型圆柱形锂离子电池, 对于 4680、4695 等大圆柱电池的热管理特性探究仍相对有限。为研究大圆柱动力电池组产热特性, 本文针对 4680 型锂离子电池设计了一种热管-间接液冷复合热管理系统, 通过数值模拟方法研究环境温度、放电倍率和冷却液流速对热管理系统换热性能的作用机制, 旨在为 4680 型锂离子动力电池构建与其产热特性相匹配的高效热管理方案。

2. 模型建立

2.1. 电池产热模型

测试选用的电池型号为 Tesla 4680 型锂离子动力电池, 表 1 显示了电池各项参数, 根据 Bernardi 方程可知, 电池产热源项主要包括极化热、焦耳热和可逆反应热。可逆反应热可通过测量电池熵热系数后计算获得, 极化热和焦耳热与电池极化内阻和欧姆内阻有关, 将两项内阻合并为直流内阻, 如式(1)所示。本文通过 HPPC 测试(混合脉冲功率特性)和开路电压法分别测量了电池在不同 SOC 下的直流内阻和熵热系数, 测试设备电压精度 $\pm 0.2\%$, 温度误差 $\pm 0.2\% + 0.7^\circ\text{C}$, 恒温箱温度稳定性为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 数据如表 2 和表 3 所示。考虑到电压精度对熵热系数测量误差的影响, 本文采用文献[18]所使用的定熵热系数计算方法确定熵热系数, 通过将各 SOC 段熵热系数数值平均, 获得在整个 SOC 段的平均熵热系数, 具体计算公式如式(2)所示, 经计算平均熵热系数为 -0.11 mV/K 。直流内阻数据通过 Matlab 进行曲线拟合, 最终以 UDF 的形式将产热模型输入 Ansys Fluent 进行数值模拟。图 1 为电池单体在不同放电倍率下数值模拟和实验的温度变化对比, 电池单体温度分布见图 2。电池整体温度在放电结束达到最大值, 数值模拟结果与实验吻合度较高。

$$q_v = \frac{I}{V_b} \left(U_0 - U - T_b \frac{dU_0}{dT_b} \right) = \frac{1}{V_b} \left(I^2 R_b - IT_b \frac{dU_0}{dT_b} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dT_{ave}} = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} \frac{dU}{dT_i} \quad (2)$$

式中 q_v 为电池单位体积生热率, 单位 W/m^3 ; V_b 为电池体积, 单位 m^3 ; U_0 为电池开路电压, 单位 V ; U 为电池工作电压, 单位 V ; I 为电流(充电时 $I < 0$, 放电时 $I > 0$); T_b 为电池温度, 单位 K ; R_b 为电池直流内阻, 单位 Ω ; dU_0/dT_b 为电池熵热系数, 单位 V/K 。

Table 1. Battery parameters

表 1. 电池参数

参数	数值
高度(mm)	80

续表

直径(mm)	46
电池容量(Ah)	21.77
工作电压(V)	2.5~4.2
密度(kg/m ³)	2670
比热容(J/(kg·K))	879
轴向导热系数(W/(m·K))	42.5
径向导热系数(W/(m·K))	1.29

Table 2. Battery direct current resistance**表 2.** 电池直流内阻

SOC	内阻(mΩ)
1	8.22
0.9	6.82
0.8	6.77
0.7	7.18
0.6	7.01
0.5	7.18
0.4	7.05
0.3	7.18
0.2	7.77
0.1	11.36

Table 3. Battery entropic coefficient**表 3.** 电池熵热系数

SOC	熵热系数(mV/K)
1	-0.131
0.9	-0.094
0.8	-0.045
0.7	0.062
0.6	0.052
0.5	-0.063
0.4	-0.128
0.3	-0.152
0.2	-0.176
0.1	-0.306
0	-0.172

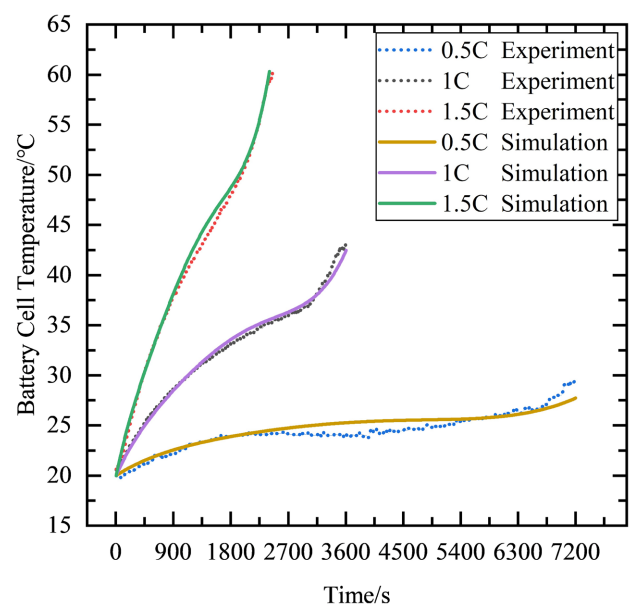


Figure 1. Temperature variation of the battery cell in experiments and numerical simulations
图 1. 电池单体实验与数值模拟温度变化

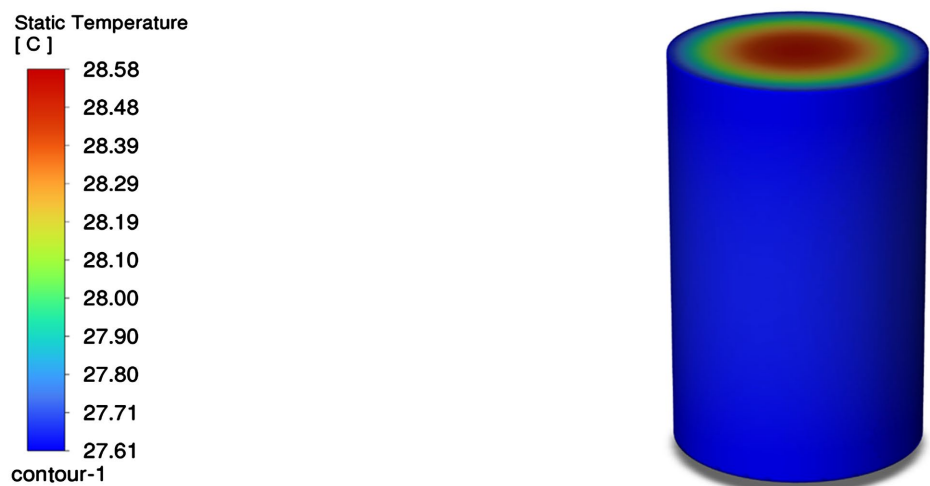


Figure 2. Temperature distribution contour of the battery cell
图 2. 电池单体温度分布云图

2.2. 电池组模型

测试电池组由 20 颗 4680 电池以 4×5 结构交错排列，以 10 并 2 串的方式布置，每串容量约为 230 Ah。每 2 排电池之间设置 3 根扁平热管用于电池侧向散热。热管与电池接触部分作为蒸发段，为了解决热管冷凝段散热问题，对冷板进行弯曲处理，使其部分与水平方向垂直，热管具体参数在表 4 中可见。由于电池轴向导热系数高于径向，因此将冷板水平部分布置于电池底部，便于热量传热。冷板材料为铝，内部设置 8 条自上而下，截面为 $3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 相互间隔 3 mm 的 L 型流道，并选择液态水作为冷却液，模型如图 3 所示。

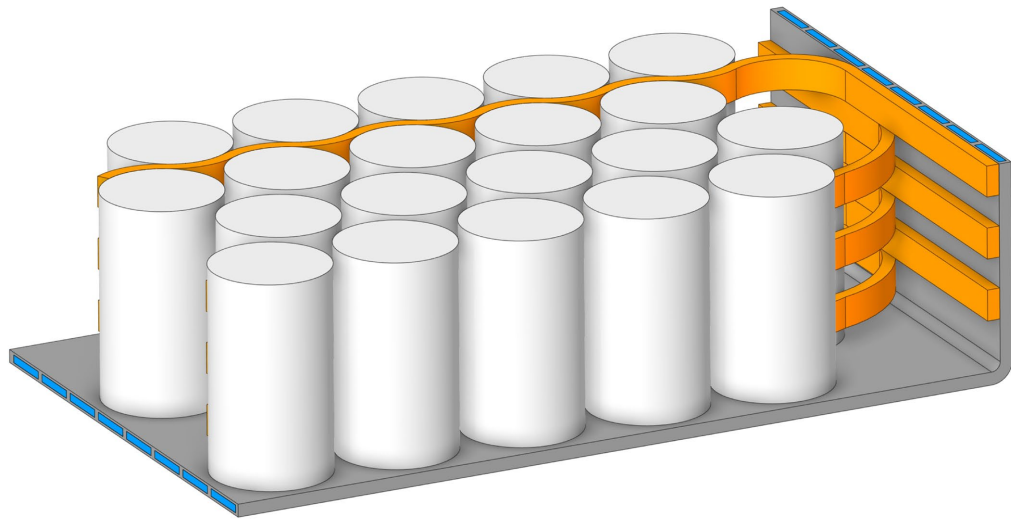


Figure 3. Thermal management system model
图 3. 热管理系统模型

Table 4. Heat pipe parameters
表 4. 热管参数

参数	数值
高度(mm)	12
厚度(mm)	5
长度(mm)	435.5
密度(kg/m ³)	8978
比热容(J/(kg·K))	381
等效导热系数(W/(m·K))	1800

2.3. 控制方程

在建立电池组控制方程模型时，由于实际电池模组在结构、材料物性和传热等方面存在一定复杂性，为了保证一定精度的前提下提高数值模拟的计算效率，对电池组中流体域和固体域做出以下假设，以实现模型的数学简化和工程适用性。

固体域能量方程：

- (1) 将电池假设为圆柱体，忽略正、负极耳。
- (2) 电池密度、比热容，导热系数为定值不随时间发生变化。
- (3) 电池导热系数为各向异性。
- (4) 忽略电池的外部热辐射和内部接触热阻。

$$\rho_b c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \tag{3}$$

式中 ρ_b 为电池平均密度，单位 kg/m³； c_p 为电池加权平均比热容，单位 J/(kg·K)； T 为电池温度，单位 K； λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为导热系数，单位 W/(m·K)； t 为时间，单位 s； q_v 为电池单位体积生热率，单位 W/m³。

流体域控制方程假设：

- (1) 假设冷却液为不可压缩流体。
- (2) 冷却液物性参数不随时间发生改变。
- (3) 假设冷却液与冷板直接无滑移。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{V}_l) = 0 \quad (4)$$

由于不可压缩, 方程可化简为:

$$\nabla \cdot \vec{V}_l = 0 \quad (5)$$

式中 $\vec{V}_l$ 为流体速度矢量, 单位 m/s。

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho_l \vec{V}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{V}_l \vec{V}_l) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_l \nabla \vec{V}_l) + \vec{F} \quad (6)$$

能量方程:

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} + \vec{V}_l \cdot \nabla T_l = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda_l}{\rho_l c_{p,l}} \nabla T_l \right) \quad (7)$$

式中 $\vec{F}$ 为体积力; ρ_l 为液体密度, 单位 kg/m^3 ; p 为压力, 单位 N/m^2 ; μ_l 为冷却液动力粘度, 单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; T_l 为冷却液温度, 单位 K ; λ_l 为冷却液导热系数, 单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $c_{p,l}$ 为冷却液定压比热容, 单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

2.4. 模型设置

使用 Ansys Fluent Meshing 进行网格划分, 体网格类型为 ploy-hexcore, 为确保仿真结果的数值精度和可靠性, 本文进行了网格无关性分析。分别构建了网格数量为 483,126、846,313、1,004,507 和 1,568,320 四种网格模型, 在 1 C 工况下电池组最高温度分别为 25.74℃、25.73℃、25.89℃和 25.87℃。对比发现, 当网格数达到 100 w 后温度变化趋于稳定, 因此考虑计算精度, 选择网格数量为 1,568,320 的高精度网格。仿真软件使用 Ansys Fluent 进行瞬态仿真, 考虑到不同流速工况下雷诺数 $\text{Re} > 5000$, 因此湍流模型选择 k- ϵ 模型, 同时开启能量方程, 重力加速度方向为 Y 轴反方向, 数值为 -9.81 m/s^2 。自然对流换热系数通常为 $5\sim 10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ [19], 因此将壁面换热系数设置为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。连续性方程、动量方程和湍流方程残差设置为 1×10^{-4} , 能量方程残差设置为 1×10^{-6} , 时间步长设置为 5 s, 迭代步数 60 步。

3. 结果与讨论

3.1. 模拟工况设置

针对热管-间接液冷复合热管理系统在不同放电倍率、冷却液流量以及环境温度等条件下电池温度变化进行了研究。在 Fluent 中设置 0.5 C、1 C 和 1.5 C 放电倍率, 探究每种放电倍率在 20℃和 30℃环境温度以及 0.1 m/s~1.5 m/s 流速下电池温度变化规律。冷板入口段设置为速度入口, 出口段设置为压力出口, 出口压力为大气压, 冷却液温度设置为恒定 20℃。

3.2. 放电倍率

放电倍率是影响电池温度特性的重要因素。图 4 为不同环境温度下, 热管-间接液冷复合热管理系统电池最高温度随冷却液流速变化曲线。从图中可以看出在 4680 电池组在 0.5 C、1 C 和 1.5 C 放电工况下, 最高温度随放电倍率增大而上升, 随冷却液流速增加而逐渐下降, 且电池最高温度始终保持在 40℃

以下(最高 32.82°C)。温均性是衡量动力电池热管理系统性能的重要指标之一, 通过分析电池组最高温度与平均温度之间的差值, 可以一定程度上反映其温度变化情况, 进而评估热管理系统的均温能力。结合图 5 电池组平均温度随冷却液流速变化曲线可以发现, 在不同环境温度下, 电池组平均温度与最高温度之间的差值随放电倍率的增大而上升。 20°C 环境温度时, 三种放电倍率下最大差值分别为 0.63°C 、 2.04°C 和 4.03°C , 上升幅度逐级增大。最大差值为 4.18°C 出现在 30°C 1.5C 工况下, 该工况是本次模拟中散热压力最大的工况。由此可见, 电池组的温均性会受到电池放电倍率和环境温度的影响, 在散热压力较低的工况下, 电池组能保持良好的温度分布, 随着散热压力的上升, 电池组内温度差异逐渐增大。

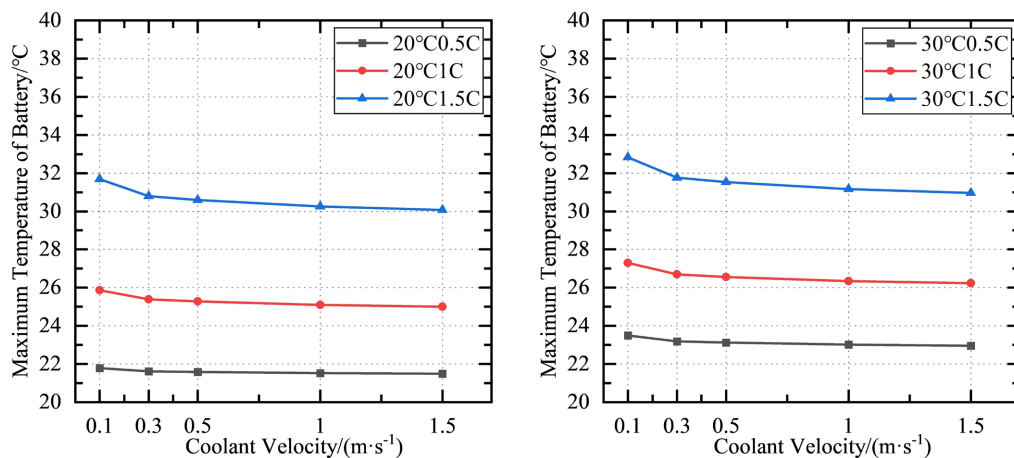


Figure 4. Maximum temperature variation of the battery with coolant velocity

图 4. 电池组最高温度随冷却液流速的变化规律

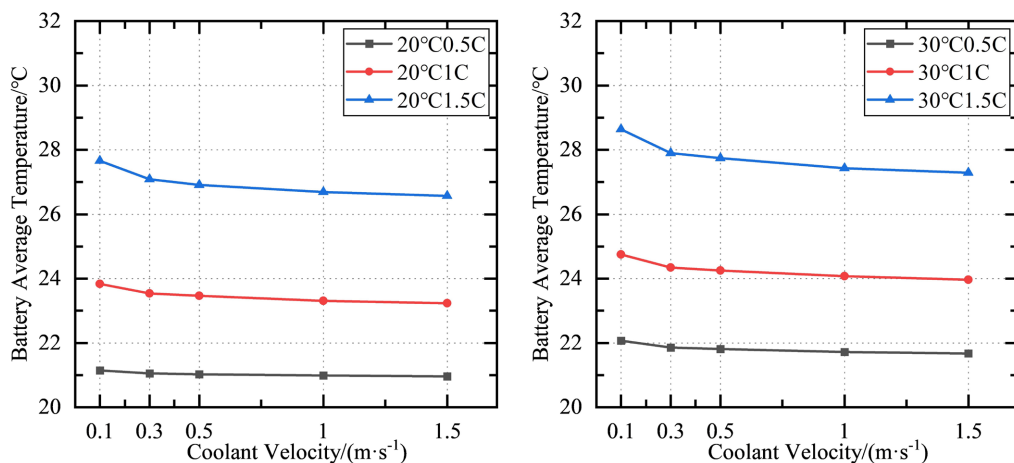


Figure 5. Average temperature variation of the battery with coolant velocity

图 5. 电池组平均温度随冷却液流速的变化规律

3.3. 热管换热

在热管理系统中, 冷板通常作为主要换热部件, 吸收和导出电池所产生的热量。然而, 仅依赖底部冷板进行冷却, 难以充分应对电池在侧向产生的热量, 尤其是在电池导热各向异性较强的情况下。为此, 在热管理系统中引入热管结构, 并将其布置于电池侧面, 以增强侧向热量的转移能力。通过图 6 可以发现热管两端的温差随环境温度的升高而增大, 由于提高环境温度与放电倍率增大了电池组整体所需的换

热量, 根据热管等效导热系数计算公式(8)可知, 热管的换热量升高, 热管两端的温差也随之增大。而当环境温度稳定, 随着冷却液流速的升高, 由于换热能力的提高使得电池组整体温度下降, 热管两端温差也随着下降, 并逐渐稳定。

$$\lambda_{hp} = \frac{Q_{hp} \left(\frac{1}{2} l_e + l_i + \frac{1}{2} l_c \right)}{A \Delta T_{hp}} \quad (8)$$

式中 λ_{hp} 为热管等效导热系数, 单位 $W/(m \cdot K)$; Q_{hp} 为热管热流量, 单位 W ; l_e 、 l_i 、 l_c 分别为热管蒸发段、绝热段和冷凝段长度; 单位 m ; A 为热管截面积, 单位 m^2 。

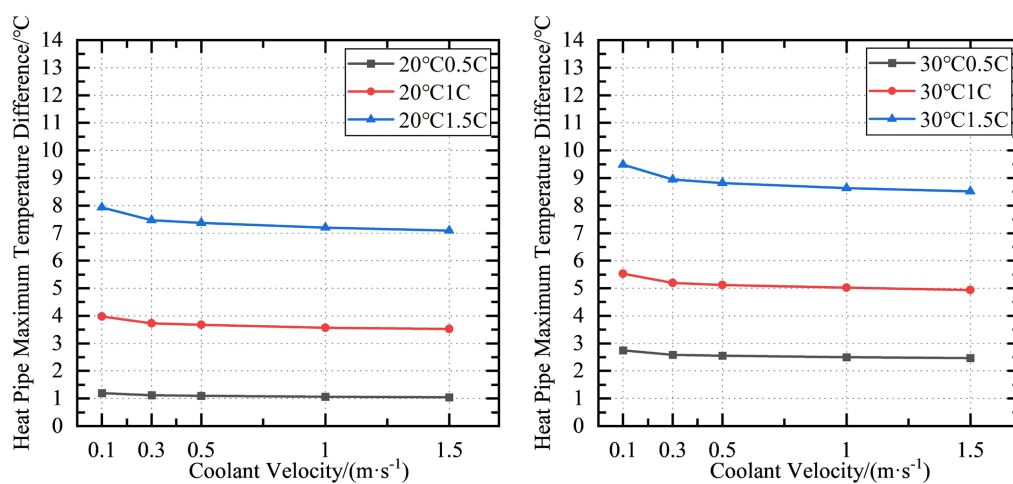


Figure 6. Maximum temperature difference variation of the heat pipes with coolant velocity

图 6. 热管最大温差随冷却液流速的变化规律

3.4. 电池温差

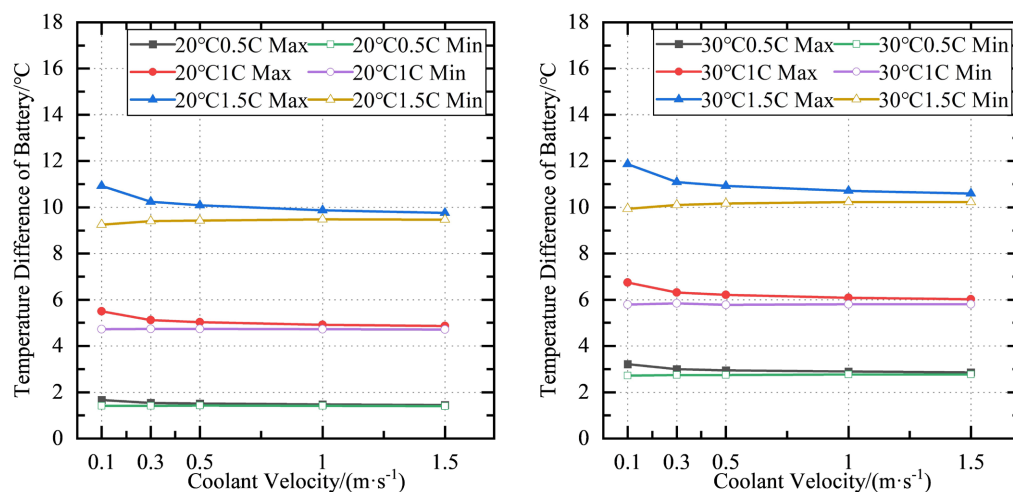


Figure 7. Maximum and minimum temperature difference variation of the battery with coolant velocity

图 7. 电池组最大与最小温差随冷却液流速的变化规律

图 7 为电池组最大温差和电池单体最小温差随冷却液流速变化曲线, 电池组温差最小值为 $20^{\circ}C$ 0.5 C 工况下 $1.67^{\circ}C$, 同时该工况下电池单体最小温差为 $1.41^{\circ}C$, $20^{\circ}C$ 1.5 C 工况下分别为 $10.92^{\circ}C$ 和 $9.25^{\circ}C$,

温差最大值出现在 30°C 1.5C 工况下 11.87°C , 该工况下电池单体最小温差为 9.94°C , 电池组温度分布见图 8。值得注意的一点: 随着放电倍率的升高, 电池组最大温差和最小温差呈逐级上升, 在相同放电倍率下, 电池最大温差随流速增加逐渐下降, 且下降幅度逐渐减小; 最小温差则与之相反, 呈上升趋势, 且两者逐渐接近。造成这种现象是由于电池导热系数较低所导致的, 受到内部卷绕工艺的影响, 电池单体在各个方向上的导热系数存在差异, 从 4680 电池参数表可以发现电池径向导热系数远低于轴向, 这使电池单体内部产生温度梯度, 因此虽然流速上升, 提高了冷板的换热效率, 降低了电池组整体温差, 但由于电池单体导热系数较低, 即使冷板换热能力提高, 热量仍然难以有效传递到冷板。电池单体与冷板接触部分温度下降较快, 另一端由于无法及时散热, 导致单体温差增大。

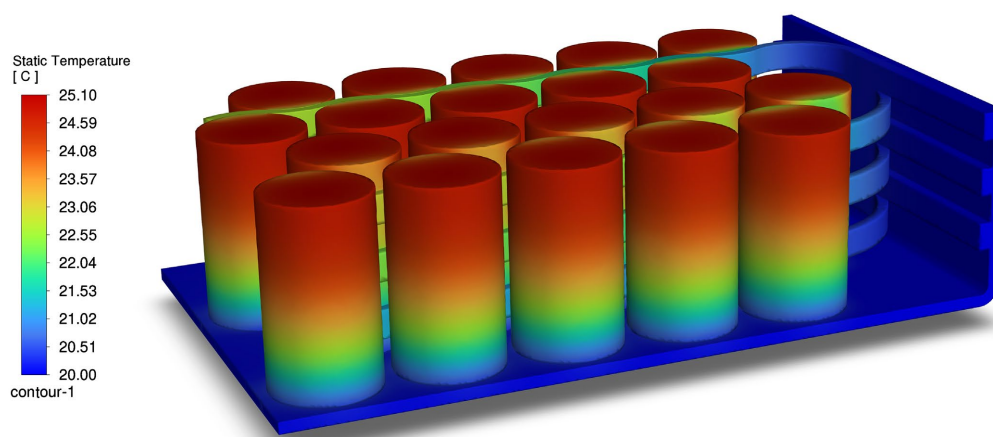


Figure 8. Temperature distribution contour of the battery

图 8. 电池组温度分布云图

3.5. 冷却液流速分析

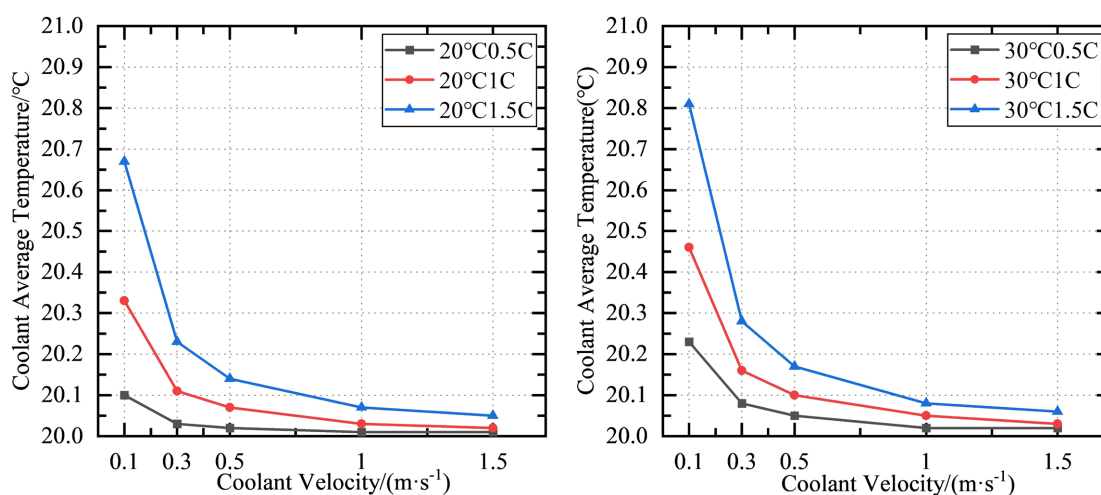


Figure 9. Average temperature variation of the coolant with coolant velocity

图 9. 冷却液平均温度随冷却液流速的变化规律

通过上述分析可以发现, 冷却液流速的增加能提高冷板的换热效率, 从而降低电池组温度。但似乎这种方式带来的温度变化有一定限制, 随着流速的增高, 对电池组温度影响逐渐减小, 而流速的增加也

伴随系统能耗的提高, 因此找到流速与能耗对电池组温度影响的平衡点, 对提高热管理系统总能效至关重要。图 9 为冷却液平均温度随冷却液流速变化曲线, 可以发现冷却液平均温度随流速增加呈下降趋势, 当流速达到 0.5 m/s 后冷却液平均温度下降变缓, 与电池组平均温度变化曲线相似。

根据式(9)可知, 冷却液温差不会随着流速增加而变为零, 冷却液平均温度随着流速的增加而逐渐接近初始温度, 流速对温度的影响逐渐减小。当冷却液流速到达一定值, 冷却液平均温度下降幅度变小, 而维持流动所需的功耗仍然增加。继续提高流速带来的温度降低已经不足以抵消额外能耗时, 系统的总能效下降。为了保持电池组能在合适温度下工作的同时, 减少热管理系统的额外能耗, 认为将冷却液流速维持在 0.5 m/s 为最佳流速, 此时系统具有较高的能量利用率。

$$\Delta T_l = \frac{Q}{\rho_l u A_c c_{p,l}} \quad (9)$$

式中 Q 是热流, 恒定不变; u 是冷却液的流速; $c_{p,l}$ 是冷却液的比热容; A_c 为流道截面。

3.6. 模拟可靠性讨论

鉴于实际工况下对电池组产热进行实验测量的复杂性与局限性, 已有研究普遍采用间接验证与文献对比的方式对电池模组产热进行准确性论证。肖咏坤[20]和叶立等[21]均通过对电池单体实验数据进行拟合验证, 再将参数迁移至组级模型中, 来间接评估电池组模型的可靠性。张浩等[22]对电池组分别进行实验与仿真, 两种方法电池温度变化趋势基本一致, 温度误差最大值为 2.7℃。陈旭等[23]通过文献对比确认模型最大相对误差小于 5%, 验证了模型的可靠性。

综上所述, 以上方法已广泛应用于锂离子电池热管理研究中。基于物理机理的数值模拟能够有效反映电池组装后复杂的热耦合效应, 因此被认为是一种具有较高可信度的验证手段。

4. 结论

本文设计了一种适用于大圆柱电池的新型热管-间接液冷复合热管理系统, 通过数值模拟探究了在不同环境温度、放电倍率和冷却液流速的情况下热管理系统的温度特性。研究结果如下:

(1) 电池组整体温度均匀性会随电池放电倍率和环境温度的提升而变差, 其中 1.5 C 放电倍率下电池最大温差达到了 10.92℃和 11.87℃, 平均温度与最高温度之间的差距从 20℃ 0.5 C 工况下的 0.63℃, 上升到 30℃ 1.5 C 工况下的 4.18℃。

(2) 热管两端温差随环境温度和放电倍率升高而增大, 这是由于提升环境温度与放电倍率增大了电池组整体换热量, 增加了热管的热负荷。当放电倍率和环境温度一定时, 热管两端温差随冷却液流速的升高而下降, 并逐渐趋于一稳定值。

(3) 在相同环境温度和放电倍率条件下, 由于受到电池导热系数的影响, 冷却液流速对电池组温度影响随流速变化逐渐减小。0.1 m/s~0.5 m/s 时冷板换热能力的上升对电池组温度有显著的控制作用, 随着流速的持续上升, 效果逐渐减小。为提高系统整体能量利用率, 减小维持流速带来的能耗, 认为将冷却液流速维持在 0.5 m/s 为最佳流速。

参考文献

- [1] 李洪庆, 谭玲玲, 康凯. 中国新能源汽车动力电池行业发展研究[J]. 汽车工业研究, 2025(1): 1-6.
- [2] 周豪慎. 为绿色能源赋能: 动力电池和储能电池的发展与创新[J]. 科学通报, 2025, 70(9): 1115-1117.
- [3] 冯爽, 许立坤, 胡帛涛, 等. 三元锂离子电池热扩散行为研究[J]. 电源技术, 2025, 49(2): 355-360.
- [4] Luo, X., Guo, Q., Li, X., Tao, Z., Lei, S., Liu, J., *et al.* (2020) Experimental Investigation on a Novel Phase Change

- Material Composites Coupled with Graphite Film Used for Thermal Management of Lithium-Ion Batteries. *Renewable Energy*, **145**, 2046-2055. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.112>
- [5] 黄司露, 陈昊, 师欣媛, 等. 基于相变材料与液冷的锂离子电池复合热管理系统研究[J]. 电气工程学报, 2025, 20(3): 242-249.
- [6] Li, C., Wang, Y., Sun, Z., Wen, X., Wu, J., Feng, L., *et al.* (2024) Two-Phase Immersion Liquid Cooling System for 4680 Li-Ion Battery Thermal Management. *Journal of Energy Storage*, **97**, Article ID: 112952. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112952>
- [7] Tong, B., Shi, J., Cao, M., Xuan, W., Chen, J., Jin, K., *et al.* (2025) Comprehensive Comparison Study on Battery Thermal Management Modules with Indirect and Direct Liquid Cooling. *Applied Thermal Engineering*, **268**, Article ID: 125945. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125945>
- [8] Wang, Y., Mu, X., Xie, Y., Li, W., Dan, D., Qian, Y., *et al.* (2023) A Coupled Model and Thermo-Electrical Performance Analysis for Flat Heat Pipe-Based Battery Thermal Management System. *Applied Thermal Engineering*, **233**, Article ID: 121116. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121116>
- [9] 马浩然, 毕崑, 李佳辉, 等. 基于平板热管的动力电池散热性能研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2024, 38(3): 39-45.
- [10] Suo, Y., Tang, C. and Yang, H. (2023) Optimization Design of the Forced Air-Cooled Battery Thermal Management System with a Stepped Divergence Plenum. *Journal of Energy Storage*, **73**, Article ID: 108904. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108904>
- [11] 王旭, 万新宇. 新能源汽车锂电池组液冷特性研究[J]. 电工电气, 2024(12): 1-8, 21.
- [12] 肖立辉, 李湘怡, 管雨豪, 等. 汽车动力电池液冷板流道设计与散热研究[J]. 内燃机与配件, 2024(20): 12-14.
- [13] 王悦齐, 钱煜平, 谢翌, 等. 平板热管式锂离子电池热管理系统仿真分析研究[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 177-188.
- [14] 程金鹏. 热管-液冷式车用锂离子电池热管理系统研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [15] 金志浩, 袁奇, 韩振南, 等. 扁平热管和液冷复合锂电池热管理性能分析[J]. 化学工程, 2023, 51(12): 41-45.
- [16] Abbas, S., Ramadan, Z. and Park, C.W. (2021) Thermal Performance Analysis of Compact-Type Simulative Battery Module with Paraffin as Phase-Change Material and Flat Plate Heat Pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **173**, Article ID: 121269. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121269>
- [17] Lu, H., Kadirgama, K. and Noor, M.M. (2025) Experimental Study on a Hybrid Battery Thermal Management System Combining Oscillating Heat Pipe and Liquid Cooling. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, **23**, 299-324. <https://doi.org/10.32604/fhmt.2024.059871>
- [18] 栗欢欢, 竺玉强, 王效宇, 等. 熵热系数取值方式对锂离子电池热模型精度的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(5): 1-8.
- [19] 潘双全. 基于复合相变材料与液冷耦合的锂电池热管理系统控温性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2024.
- [20] 肖咏坤. 基于液冷的 21700 锂离子电池散热结构设计与冷却性能分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [21] 叶立, 时安宁, 贺军成, 等. 电动汽车大功率直流充电热管理系统设计[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(6): 629-637, 658.
- [22] 张浩, 翟介华, 孙伟, 等. 基于热管-风冷耦合散热的电池热管理实验及仿真研究[J]. 石化技术, 2025, 32(3): 369-371.
- [23] 陈旭, 韩新月. 基于相变材料和均热板的液冷电池热管理研究[J]. 低温与超导, 2025, 53(3): 37-44, 52.