

基于STAR-CCM+电池模组散热研究

刘 威, 安明宇, 张洋海

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年9月3日; 录用日期: 2025年9月13日; 发布日期: 2025年10月10日

摘 要

本研究以3.7 V/156 Ah三元锂离子电池为对象, 建立多尺度电热耦合产热模型: 先由HPPC实验获取各向异性热物性与熵热系数, 再经稳态温升验证, 误差 < 5%。继而构建含4串1并电芯与U型液冷板(50%乙二醇, 25°C入口)的模组, 利用STAR-CCM+模拟55°C环境1.0 C放电工况。无液冷时模组峰值温度达132°C, 从而触发热失控; 引入液冷后, 5 L/min流量下峰值降至65.2°C, 降幅50.6%。流量 > 2 L/min时边际温降由3.7°C递减至0.4°C, 呈现显著效益递减。据此确定2 L/min~3 L/min为冷却性能与泵功的最优平衡区间, 为高能量密度电池系统的安全-能效协同设计提供定量准则。

关键词

U型冷板, STAR-CCM+, 锂离子电池, 热管理

Heat Dissipation Study of Battery Modules Based on STAR-CCM+

Wei Liu, Mingyu An, Yanghai Zhang

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

Received: September 3, 2025; accepted: September 13, 2025; published: October 10, 2025

Abstract

This study presents a multiscale electrothermal coupling model for quantifying heat generation in a 3.7 V/156 Ah ternary lithium-ion cell. First, anisotropic thermophysical properties and the entropy-heating coefficient are extracted from HPPC tests. Then, steady-state temperature-rise validation is performed with an error margin of 5%. Next, a module comprising four cells in series and one cell in parallel, integrated with a U-shaped liquid-cooling plate containing 50% ethylene glycol at an inlet temperature of 25°C, is constructed and analyzed in STAR-CCM+ under an ambient temperature of 55°C and a discharge protocol of 1.0 C. Without active cooling, the module's peak temperature

reaches 132°C, triggering thermal runaway. When liquid cooling is activated at 5 L/min, the peak temperature falls to 65.2°C, corresponding to a 50.6% reduction. Beyond 2 L/min, the marginal temperature drop diminishes from 3.7°C to 0.4°C, indicating diminishing returns. Consequently, the flow rate range of 2 L/min~3 L/min is identified as the optimal trade-off between cooling effectiveness and pumping power. This provides quantitative design guidelines for the safety-energy efficiency collaborative design of high-energy-density battery systems.

Keywords

U-Shaped Cold Plate, STAR-CCM+, Lithium-Ion Battery, Thermal Management

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

可再生能源系统的快速发展使三元锂离子电池成为商用车和电网级储能的核心组件，这得益于其高能量密度(>200 Wh/kg)和高功率特性[1]。然而，运行过程中不可逆的焦耳热、可逆熵变热及极化损耗等多热源耦合效应，带来了严峻的热管理挑战[2] [3]。散热不足可能引发热失控(TR)，在高温环境下风险尤为突出[4]。被动风冷受限于空气的低导热性，难以满足高能量密度电池需求，将导致容量加速衰减(50°C下>15%)并在超过 80°C时使热失控概率激增 300%以上[5]。为突破此瓶颈，主动液冷技术凭借冷却液的高导热性(如 50%乙二醇水溶液， $\lambda \approx 0.35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)和优化的冷板设计，成为实现高效散热、保障电池在 15°C~35°C 安全窗口运行的关键解决方案[6]。

全球范围内，Bernardi [7]等人开创的电化学-热耦合模型为现代冷却策略奠定了理论基础。随后欧美日的研究聚焦流道结构优化(如 U 型路径、微通道) [8] [9]，多物理场仿真证实流量与间距是热均一性的关键决定因素——特斯拉的蛇形冷板设计便实现了 $\Delta T < 2^\circ\text{C}$ 的突破[10]。中国学者取得显著进展：清华大学通过冷板参数优化使模组峰值温度降低 15%~20%，宁德时代(CATL)、比亚迪(BYD)等企业则针对高倍率场景部署乙二醇冷却系统[11]。尽管成果丰硕，但现存研究仍存在三大空白：1) 极端工况(>50°C)下冷却效率边际效益的量化；2) U 型流道热均匀性分析；3) 大容量三元电池(≥ 150 安时)多尺度热源模型的实验验证。

针对上述不足，本研究对 156 安时的三元电池(3.7 V, 209.8 Wh/kg)展开实验-模拟联合攻关。首先通过混合脉冲功率特性(HPPC)测试(-10°C至 50°C环境，10%~90%荷电状态)，建立融合各向异性热物性参数与熵变系数的多尺度产热模型，实验验证预测误差 < 5%。随后构建四串联电池模组与 U 型流道冷板(318 × 148 × 20 mm³，间距 27 mm)，采用 STAR-CCM+模拟严苛工况(55°C环境，1.0 C 放电倍率)。通过评估冷却液流量(1 L/min~5 L/min，25°C入口)的热抑制效能与流量依赖性边际效益，为重载应用场景的节能化热管理系统设计提供核心理论支撑。

2. 产热模型构建

2.1. 实验数据采集

为开展电池热管理仿真分析，首先对电池热物性参数(热导率、比热容、密度等)进行采集，参数信息汇总于表 1。为保障仿真结果的一致性与对比清晰性，本次仿真假设电池所有表面的对流换热系数相同，以此构建基础条件，便于后续直观呈现自然冷却与液冷工况下的热特性差异。

Table 1. Thermal properties parameters
表 1. 热物性参数

	密度 kg/m ³	比热容 J/(kg·K)	导热系数 W/(m·K)
电芯	2345	979.6	X = 1.21 Y = 17.45 Z = 17.45
正极耳	2719	871	202.4
负极耳	8978	381	387

本研究聚焦大容量三元锂离子动力电池热特性研究，以标称电压 3.7 V、额定容量 156 Ah 的方形铝壳电池为对象，该电池采用轻量化设计(质量 2.75 kg，能量密度达 209.8 Wh/kg)，封装尺寸 148 mm × 78 mm × 103 mm，对应体积能量密度 431.5 Wh/L，工作电压区间为 2.8 V~4.3 V，具备优异的功率密度特性与宽温域适应性。其高容量特性使其在商用车动力系统(96 串构型可构建 600 V/93.6 kWh 储能单元)及电网侧储能场景展现出显著应用潜力。鉴于三元锂电池对温度的敏感性，推荐配套液冷温控系统以保障其运行可靠性。

研究通过多维度实验构建电池热特性基础数据库：首先利用混合功率脉冲特性(HPPC)测试平台，在 10%~90% SOC 区间(间隔 10%)、-10℃~50℃环境温度(间隔 10℃)条件下，系统研究电池动态内阻响应特性，基于电压瞬态响应曲线解析，建立包含欧姆极化、浓差极化与电化学极化的多尺度内阻模型；其次采用准静态法开展高精度熵热系数测定，在 5%~95% SOC 区间(间隔 5%)测量开路电压温度系数 (dU_{oc}/dT)，明确熵热系数随荷电状态变化规律。在此基础上，整合欧姆热($Q_{ohm} = I^2 R$)、可逆反应热 ($Q_{rev} = IT dU_{oc}/dT$)及极化热($Q_{pol} = I\eta$)等多热源机制，构建电池产热耦合模型。经稳态温升实验验证，模型预测值与实测数据平均误差小于 5%，为后续热仿真分析提供高置信度参数输入。

2.2. 实验数据分析

基于实验实测数据，选取 55℃工况作为特征分析点，经数据处理与曲线拟合后，获得的电池产热曲线如图 1 所示。

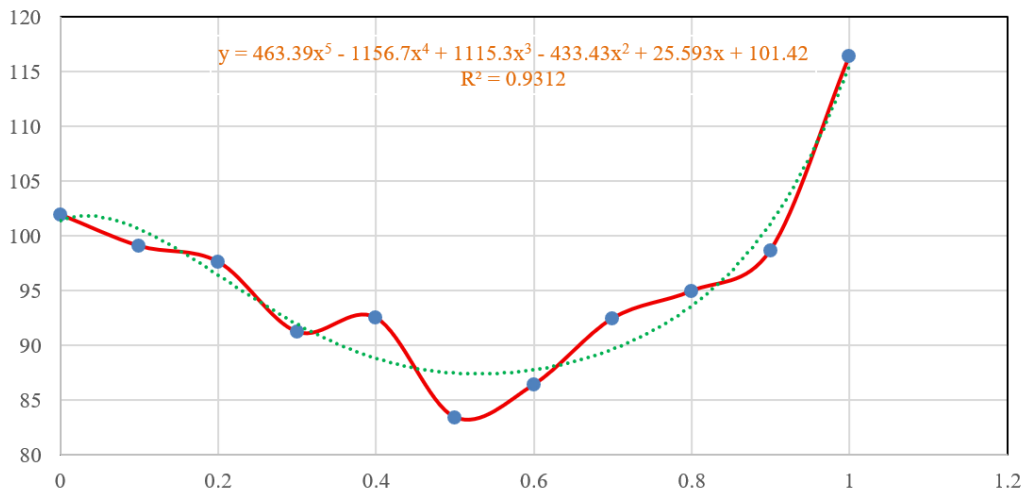


Figure 1. Fitting equations and curves
图 1. 拟合方程和曲线

根据图 1 得到生热拟合曲线为:

$$y = 463.39x^5 - 1156.7x^4 + 1115.3x^3 - 433.43x^2 + 25.593x + 101.42$$

其中 y 为电池根据实验数据得到的生热率 q , x 为 soc 的变化。

在电池热分析领域, 目前被广泛采用的产热模型是由美国加州大学伯克利分校 Bernardi 团队提出的均匀产热模型。该模型基于电池内部产热过程呈稳定均匀分布的理论假设, 其经典理论计算表达式为:

$$q = \frac{I}{V} \left[(U - E) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (1)$$

公式 1 中, $I(U-E)$ 为不可逆热, 主要源自电荷传输过程中的电阻损耗; $-ITdU/dT$ 为电池的可逆反应热, 反映了电化学反应过程中的吸放热效应; q 为单位体积生热速率; E 为工作电压; U 为开路电压; V 为电池活性区域的体积; T 为绝对温度; dU/dT 是电压温度系数, 它的数值非常小, 在工程应用中常被简化处理。

基于 Bernardi 产热模型, 借助实验数据开展回归分析, 构建电池生热速率与荷电状态(SOC)的函数关联。具体操作中, 于 10%~90% 的 SOC 区间实施等间隔采样, 将开路电压 $U(\text{SOC})$ 、内阻 $R(\text{SOC})$ 以及熵热系数 $(\partial U/\partial T)(\text{SOC})$ 等关键参数代入模型完成计算, 最终通过拟合得到生热速率 q 随 SOC 变化的特征曲线。经分析可知:

- 1) 当 SOC 处于小于 20% 以及大于 80% 的区间时, 受极化效应加剧影响, 电池生热速率呈指数增长态势;
- 2) SOC 在 30%~70% 范围时, 产热表现相对平稳, 平均生热密度约为 $1.5 \times 10^4 \text{ W/m}^3$;
- 3) 充放电过程中的可逆热效应, 在 SOC 为 50% 附近出现极性反转情况。该 q -SOC 关系曲线为后续热管理系统的优化设计提供了关键的数据支撑。

3. 数值仿真

3.1. 模型

本研究构建的电池模组模型, 由四块串联电池(并行)与液冷板组成, 如图 2 所示, 用于模拟电池热管理过程, 探究液冷散热对电池热特性的影响。

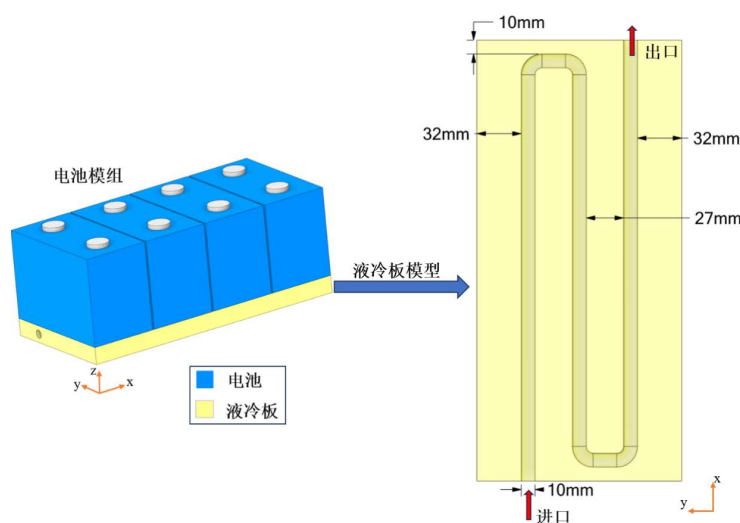


Figure 2. Battery module model diagram

图 2. 电池模组模型图

简化后的电池尺寸为 148 mm × 78 mm × 103 mm，电池及极耳的具体参数如表 2 所示，两相邻电池单体的间距为(液冷板的厚度) 2 mm，该液冷板的外形尺寸为 318 mm × 148 mm × 20 mm，液冷板进出水口尺寸为 10 mm。液冷板流道为 U 型结构，冷却液从底部“进口”流入，经 U 型流道换热后，从顶部“出口”流出。流道关键尺寸：两侧边距液冷板边缘 32 mm，流道间距 27 mm，进出口距边缘 10 mm，该布局保障冷却液与电池底面充分换热，均衡热传递效率。液冷板材质为常规 3003 铝合金，冷却介质为 50% 乙二醇水溶液，具体参数见表 2。

Table 2. Battery model parameter table
表 2. 电池模型参数表

参数类别	参数名称	数值
电池参数	额定容量/(A·h)	156
	长 × 宽 × 高/(mm)	148 × 78 × 103
	质量 m/(g)	2750
	密度 kg/m ³	2345
	比热容 c ₁ /[J/(kg·K)]	979.6
	导热率 λ ₁ /[W/(m·K)]	λ _x = 1.21, λ _y = 17.45, λ _z = 17.45
	额定电压 U/(V)	3.7
正极耳	密度(kg·m ⁻³)	2719
	比热容 c ₁ /[J/(kg·K)]	871
	导热率 λ ₁ /[W/(m·K)]	202.4
负极耳	密度(kg·m ⁻³)	8978
	比热容 c ₁ /[J/(kg·K)]	381
	导热率 λ ₁ /[W/(m·K)]	387
50%乙二醇参数	密度(kg·m ⁻³)	782.8
	导热系数 λ ₂ /[W·(m·K) ⁻¹]	0.1312
	比热容 c ₂ /[J/(kg·K)]	1970
	运动粘度(cSt)	6.051

3.2. 控制方程

锂离子电池的工作过程是一个传热传质过程，伴有热量的产生与耗散。液冷板和电池表面与外界的换热可由牛顿冷却定律解释：

$$q = hA(T_{\text{battery}} - T_{\text{liquid}}) \tag{2}$$

公式(2)中， h 是电池模组与浸没液之间的对流换热系数， A 表示物体表面的热交换面积， T_{battery} 是电池模组表面温度， T_{liquid} 是冷却液温度。

液冷板内冷却液的动量方程由 Navier-Stokes 方程描述为：

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} \tag{3}$$

公式(3)中, $\vec{u}=(u,v,w)$ 为速度向量, u 、 v 、 w 依次为流体在 x 、 y 、 z 方向的速度分量, ρ 为流体的密度, p 为压力, μ 为动力粘度, $\vec{g}=(g_x, g_y, g_z)$ 为重力加速度矢量。

液冷板里冷却液的能量控制方程为:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (4)$$

公式(4)中, C_p 中是浸没液的定压比热容, T 是温度, q_v 是单位体积内的热源项。

液冷板里冷却液的动量控制方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

公式(5)中, ρ 表示流体密度, t 表示时间, $\vec{v}$ 表示流体速度矢量, $\nabla \cdot$ 表示散度运算符。

3.3. 数值分析

采用 STAR-CCM+ 软件对 CAD 模型进行网格划分和数值求解。其中, 电池与液冷板的小侧面为自由对流边界条件, 依据盛雷所使用的方法测量获得该电池模组的大对流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。流体的边界条件为质量流量进口和压力出口, 模型初始温度和环境温度均为 55°C 。经计算, 仿真中液冷板内部的最大雷诺数小于 280, 流动状态为层流, 并采用 SIMPLEC 算法进行求解。网格划分如图 3 所示。

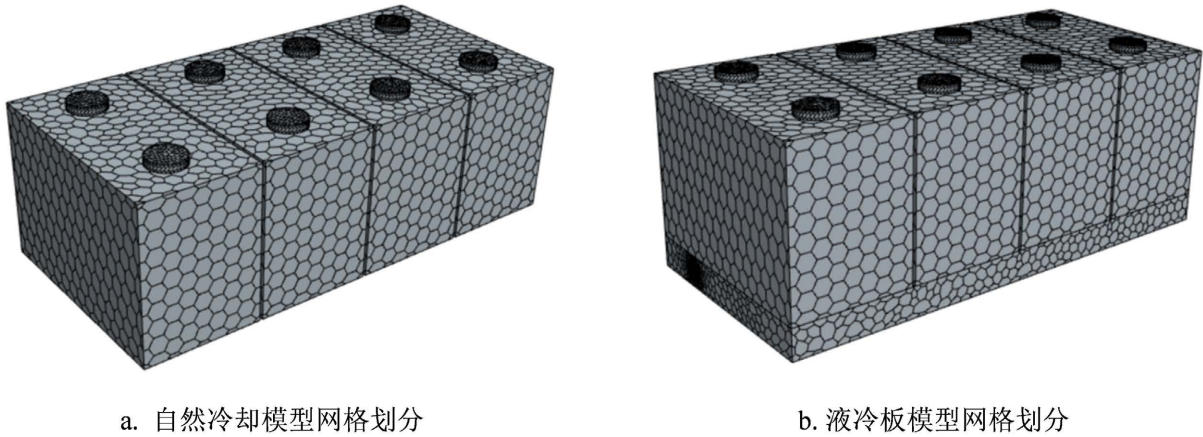


Figure 3. Grid division

图 3. 网格划分

选取电池在 55°C 情况下以 1.0 C 放电, 时间步长为 1.0 s 。冷却液进口温度为 25°C , 电池模组与外界的大对流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 进口流量分别为 $1 \text{ L}/\text{min}$ 、 $2 \text{ L}/\text{min}$ 、 $3 \text{ L}/\text{min}$ 、 $4 \text{ L}/\text{min}$ 、 $5 \text{ L}/\text{min}$ 进行工况模拟。

由图 4 和图 5 可得, 电池模组在有无液冷板及不同流量下放电结束时的温度标量场差异明显。自然冷却工况下, 电池模组温度最高; 相比自然冷却工况, 液冷板使得电池模组温度显著下降。

这是由于自然冷却依靠空气自然对流实现散热, 空气导热系数低(约 $0.023 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、热传递能力弱。电池工作产热后, 热量需先通过热传导至表面, 再经空气对流散发到环境。且 55°C 环境温度高、电池产热快, 空气无法及时带走热量, 导致热量在模组内持续累积, 使温度不断攀升至较高水平, 出现

“自然冷却工况下温度最高”的现象。液冷板引入冷却液强制对流换热，借助 50%乙二醇水溶液，它较高的导热系数(远高于空气，50%乙二醇水溶液导热系数约 $0.35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)与流动特性，强化热传递；液冷板通过金属基板快速吸收电池传导的热量，硅胶垫等辅助材料也可优化接触热阻，加速热传递；在对流换热环节，冷却液在流道内流动时，持续与液冷板进行对流换热，将热量携带至外部散热器散发。循环流动的冷却液能持续带走热量，大幅提升散热效率，使电池模组热量及时排出，温度显著下降。

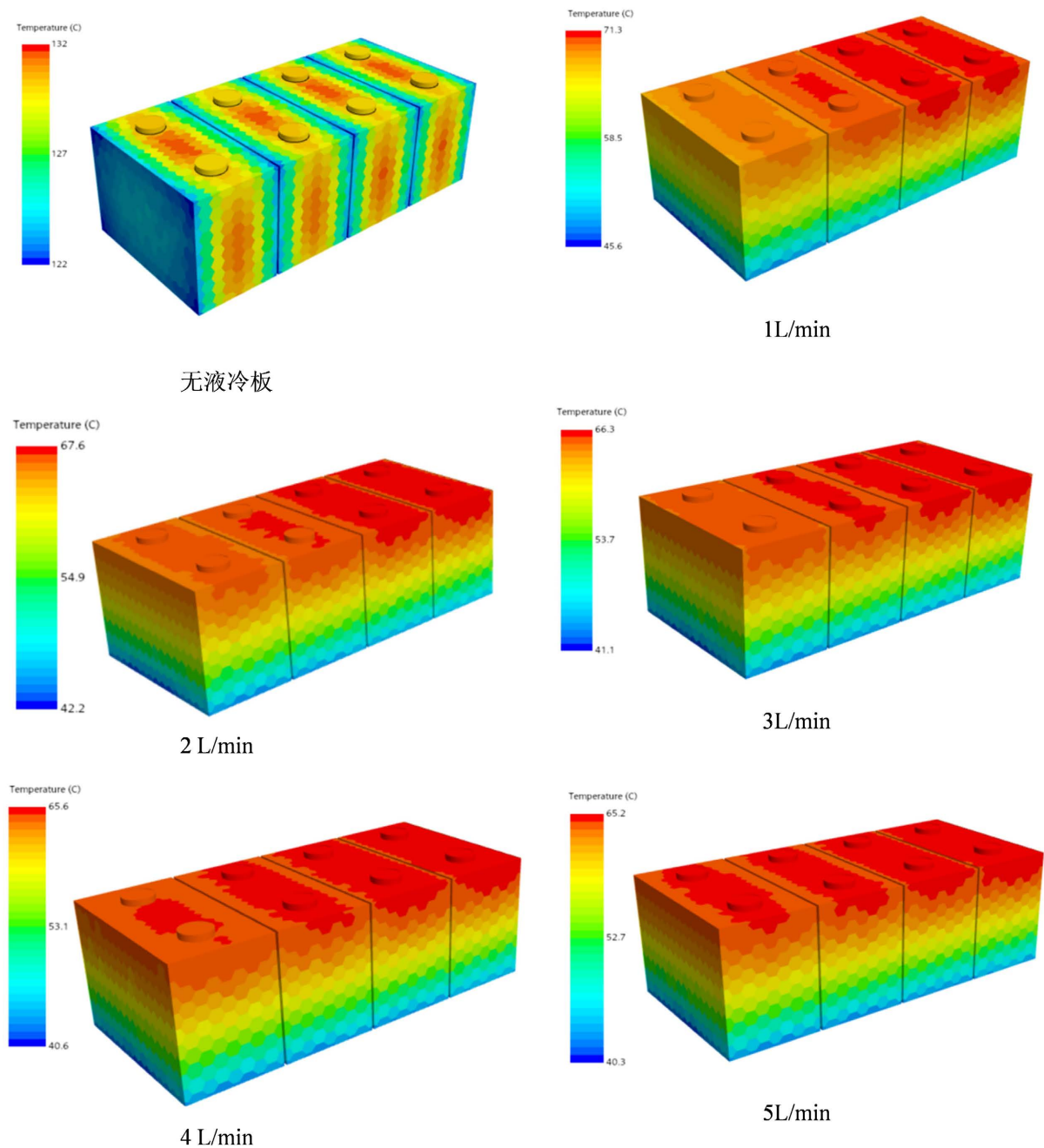


Figure 4. Scalar field of battery module temperature at different flow rates at the end of discharge
图 4. 放电结束时不同流量下电池模组温度标量场

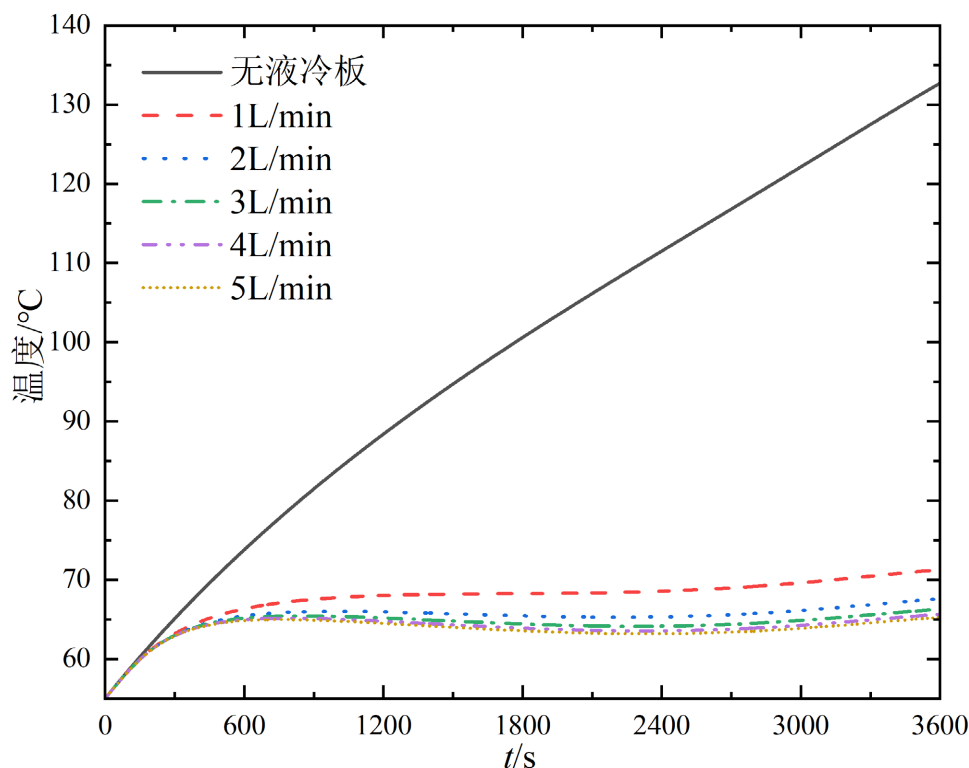


Figure 5. Comparison of maximum temperature of battery modules with and without liquid cooling plates

图 5. 有无液冷板电池模组最高温度对比图

Table 3. Maximum temperature of battery module

表 3. 电池模组最高温度

名称	无液冷板	1 L/min	2 L/min	3 L/min	4 L/min	5 L/min
电池模组最高温度(°C)	132	71.3	67.6	66.3	65.6	65.2

结合表 3 可明显得出, 液冷板对电池模组热管理效果显著, 液冷板对于电池模组的效果显著高于自然冷却的效果。无液冷板时, 电池模组最高温度达 132℃, 加入液冷板后, 随着冷却液流量从 1 L/min 提升至 5 L/min, 电池模组最高温度逐步降低, 1 L/min 流量下为 71.3℃, 相比无液冷板降低约 46.0%; 2 L/min 时降至 67.6℃, 降低约 48.8%; 3 L/min 达 66.3℃, 降低约 50.0%; 4 L/min 时为 65.6℃, 降低约 50.3%; 5 L/min 时降至 65.2℃, 降低约 50.6%。可见, 液冷板能大幅降低电池模组温度, 提升热安全性与稳定性, 且流量越大降温效果越明显, 但流量提升带来的降温边际效益递减。

由图 6 可得, 电池模组最高温度先快速上升, 后缓慢上升。随着冷却液流量的增加, 电池模组最高温度逐渐降低, 升温阶段(0 s~600 s 左右), 所有流量曲线均快速上升, 因为初始阶段电池产热速率大于散热速率。进入缓升阶段(600 s 后), 在低流量时(1 L/min), 曲线持续缓升, 因冷却液流量小, 单位时间带热量少, 电池产热逐渐超过散热能力, 温度缓慢累积上升(最终接近 72℃)。在中高流量(2 L/min~5 L/min), 先进入平台期(温度短暂稳定), 后小幅缓升。1 L/min→2 L/min, 降温 3.7℃ (71.3→67.6); 4 L/min→5 L/min, 仅降温 0.4℃ (65.6→65.2)。流量提升的降温增益随流量增大而减小, 流量提升带来的降温边际效益递减。因此不同冷却液流量下, 电池模组温度曲线呈现“先快速升温、后依流量分化”的规律: 低流量因散热不足持续升温, 中高流量先平衡后缓升; 流量与降温幅度、温度稳定性正相关。

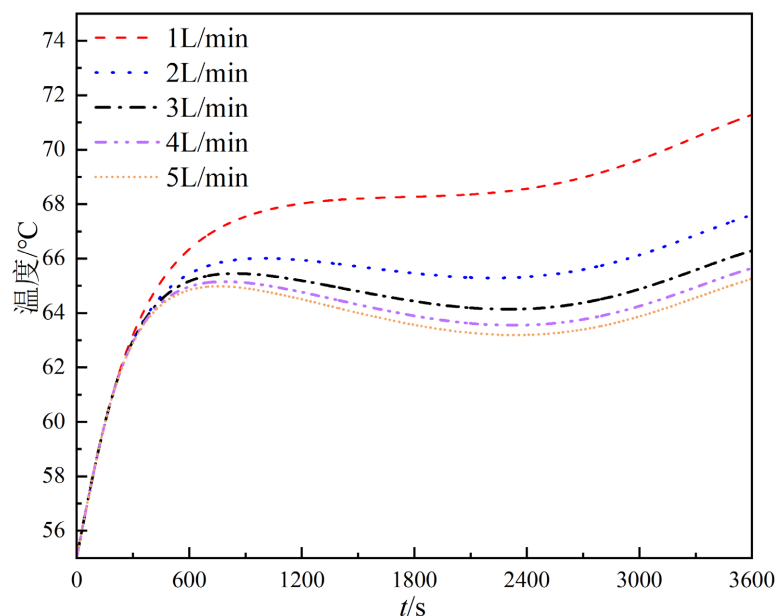


Figure 6. Graph showing changes in maximum battery module temperature under different flow rates
图 6. 不同流量下电池模组最高温度变化图

4. 结论

本研究以 156 Ah 方壳三元锂离子电池为对象, 通过 HPPC 实验构建了误差小于 5% 的电化学 - 热耦合产热模型, 并基于 STAR-CCM+ 仿真分析了 55℃ 高温下 U 型液冷板的散热性能。结果表明, 无冷却时电池模组峰值温度高达 132℃, 存在热失控风险; 引入液冷后, 在 5 L/min 流量下峰值温度降至 65.2℃, 降幅达 50.6%。研究进一步发现, 冷却液流量超过 2 L/min 后边际效益显著递减, 据此确定 2 L/min~3 L/min 为冷却性能与泵功成本的最优平衡区间, 为高温工况下电池热管理系统的设计提供了关键定量依据。

参考文献

- [1] 董浩, 王影, 鲁春驰, 等. 一步法制备钛酸锂复合电极及其性能研究[J]. 化学工业与工程, 2024, 41(3): 154-160.
- [2] 叶文, 盛雷, 齐丽娜. 方形硬壳锂离子电池产热性能的实验量化分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(1): 45-50+63.
- [3] 晏裕康. 两轮电动车锂离子动力电池的充电方法研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2022.
- [4] 杨龙. 基于[EMIM][BF4]阻燃低温混合离子液体设计及超级电容器的储能应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [5] 黄钦. 相变材料耦合液冷板电池热管理系统的性能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2024.
- [6] 刘栩文. 发动机 ECU 控制器热仿真优化与液冷技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2025.
- [7] Bernardi, D., Pawlikowski, E. and Newman, J. (1985) A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of the Electrochemical Society*, **132**, 5-12. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>
- [8] Jarrett, A. and Kim, I.Y. (2011) Design Optimization of Electric Vehicle Battery Cooling Plates for Thermal Performance. *Journal of Power Sources*, **196**, 10359-10368. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.090>
- [9] 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>
- [10] Zhou, R., Chen, Y., Zhang, J. and Guo, P. (2023) Research Progress in Liquid Cooling Technologies to Enhance the Thermal Management of Libs. *Materials Advances*, **4**, 4011-4040. <https://doi.org/10.1039/d3ma00299c>
- [11] Jin, L.W., Lee, P.S., Kong, X.X., Fan, Y. and Chou, S.K. (2014) Ultra-Thin Minichannel LCP for EV Battery Thermal Management. *Applied Energy*, **113**, 1786-1794. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.013>