

强制风冷与浸没式液冷对电池热管理性能影响的对比研究

吴胜浩, 杨英英*, 李帅军, 罗文欣, 王兰馨, 任 燕, 武卫东, 张 华

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年9月14日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年10月20日

摘 要

电池热管理对锂离子电池系统的安全与高效运行至关重要。本研究基于CFD仿真方法, 针对高能量密度电池的散热需求, 系统比较了强制风冷与浸没式液冷两种热管理方案的性能差异。仿真结果显示, 初始风冷方案效果欠佳, 电池组最高温度达38.45℃, 最大温差为10.96℃。经参数优化后, 最高温度降至32.77℃, 最大温差缩小至5.89℃, 但仍难以满足长期运行要求。转而采用浸没式液冷方案后, 系统性能显著提升。在矿物油、AmpCool AC-110和HFE-7100三种冷却工质中, HFE-7100表现最优, 可将电池最高温度控制在26.18℃, 最大温差仅为1.11℃。研究表明, 浸没式液冷技术能够有效克服风冷系统的散热局限, 为高能量密度电池热管理系统设计提供了重要理论支撑和实践依据。

关键词

储能电池, 热管理, 强制风冷, 结构优化, 浸没式液冷

Comparative Study on the Impact of Forced Air Cooling and Immersion Liquid Cooling on Battery Thermal Management Performance

Shenghao Wu, Yingying Yang*, Shuaijun Li, Wenxin Luo, Lanxin Wang, Yan Ren, Weidong Wu, Hua Zhang

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

Received: September 14, 2025; accepted: September 22, 2025; published: October 20, 2025

*通讯作者。

文章引用: 吴胜浩, 杨英英, 李帅军, 罗文欣, 王兰馨, 任燕, 武卫东, 张华. 强制风冷与浸没式液冷对电池热管理性能影响的对比研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(10): 223-234. DOI: 10.12677/mos.2025.1410619

Abstract

Thermal management is crucial for the safe and efficient operation of lithium-ion battery systems. This study employs CFD simulation methods to systematically compare the performance differences between forced air cooling and immersion liquid cooling to address the heat dissipation requirements of high-energy-density batteries. Simulation results indicate that the initial forced air cooling solution performed inadequately, with the maximum battery pack temperature reaching 38.45°C and the maximum temperature difference amounting to 10.96°C. After parameter optimization, the maximum temperature was reduced to 32.77°C, and the maximum temperature difference was narrowed to 5.89°C. However, these results still fell short of meeting the requirements for long-term operation. Upon switching to the immersion liquid cooling solution, the system performance improved significantly. Among the three cooling mediums tested—mineral oil, AmpCool AC-110, and HFE-7100—HFE-7100 demonstrated the best performance, maintaining the maximum battery temperature at 26.18°C and limiting the maximum temperature difference to just 1.11°C. The study confirms that immersion liquid cooling technology effectively overcomes the heat dissipation limitations of air cooling systems, providing critical theoretical support and practical insights for the design of thermal management systems for high-energy-density batteries.

Keywords

Energy Storage Battery, Thermal Management, Forced Air Cooling, Structural Optimization, Immersion Liquid Cooling

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

温度是决定储能系统安全、效能及寿命的关键因素，在高温、高倍率等苛刻工况下，电池产热急剧增加，若热量无法及时导出，易引发局部过热与温度分布不均，导致电池性能衰减甚至诱发热失控，这对锂离子电池热管理系统的性能提出了极大的挑战。因此，发展高效、均匀的热管理系统已成为储能热安全领域的核心课题。

当前，锂离子电池热管理主要冷却方式包括相变材料冷却[1]、空气冷却[2] [3]和液体冷却[4] [5]等。其中，空气冷却与液体冷却在实际应用中较为广泛。空气冷却是利用空气作为冷却介质，通过对流换热将电池产生的热量带走，从而控制电池温度的一种简单热管理方式。该系统具有成本低、能耗小、结构轻便和维护简便等优点，可分为自然风冷与强制风冷两种形式，后者因具备强制对流条件，其换热性能通常优于前者。然而，受空气本身导热系数低与比热容小的限制，风冷系统的散热能力存在明显瓶颈。为改善其性能，研究者采取了提高进口风速[6] [7]、优化电池排列间距与流道结构[8]-[10]、加装导流板[11]等措施，这些方法在一定程度上提升了风冷的冷却效果。相比之下，液体冷却凭借冷却介质优异的热物理性质，成为一种更具潜力的热管理方案。液体冷却可分为间接液冷(如冷板式)和直接浸没式液冷两种。相比于间接液冷，浸没式液冷使电池直接与冷却液接触，可实现更大换热面积和更均匀的温度分布，从而显著提升热管理性能。

而目前针对浸没式液冷和风冷的性能对比研究，主要集中于将浸没式液冷与基础风冷或自然风冷进行对比，未能充分体现其在应对高发热量场景下相较于经过深度优化的强制风冷方案的性能优势。例如

Chen [12]等人对直接风冷、直接液冷、间接(夹套)液体和翅片冷却四种冷却方式的冷却性能进行比较,结果表明风冷系统需要比其他方法多 2~3 个能量级来保持相同的平均温度。Cheng [13]等人将浸没式液冷与自然空冷进行对比,同时使用了甲基硅油、白油、变压器油三种冷却液,结果表明与自然对流冷却(70.5℃)下电池模组最高温度相比,三种冷却液对应的最高温度分别降低了约 25%、33%和 35%。综上所述,现有研究缺乏对传统强制风冷方案经过充分优化后的性能差距量化分析,从而难以令人信服地揭示浸没式液冷在极限性能上的真正优势。

对此,本文针对强制风冷与浸没液冷的热管理性能对比,运用 ANSYS Fluent 软件开展了系统性研究和分析。首先,对强制风冷系统进行多参数优化,包括调整电池间距、优化风速和加装导流挡板等策略,使得强制风冷达到最优的冷却效果。在此基础上,进一步构建浸没式液冷仿真模型,选取矿物油、AmpCool AC-110 和 HFE-7100 三种典型冷却工质进行对比测试。研究结果可充分证明,相比于传统风冷,浸没式液冷在高能量密度电池热管理中具备极佳的优越性与应用潜力。

2. 锂离子电池模型的建立

2.1. 锂离子电池包模型及工作参数

如图 1 所示,本研究以 24 块 205 Ah 方形磷酸铁锂电池组成的模组为对象,采用 8 行 × 3 列的排布。电池单体行间距 10 mm,列间距 15 mm;模组边缘与箱体间距为:行方向 30 mm,列方向 60 mm。模组两侧设置半径为 100 mm 的圆柱形进出口,整体尺寸为 669 mm × 562 mm × 220 mm (长 × 宽 × 高)。电池具体参数见表 1。通常情况下,锂电池可接受的工作温度范围是-20℃~60℃,最佳范围是 15℃~35℃,电池模组温度差应控制在 5℃ 范围内[14]。

在保证锂离子电池计算准确性的前提下简化计算,对锂离子电池做出如下假设:

- 1) 将锂离子电池看作等效热物性均质的长方体,其内部均匀发热;
- 2) 忽略温度对热物性参数的影响,热物性参数始终保持一致,锂离子电池导热系数是各向异性,密度、比热容均为各向同性。

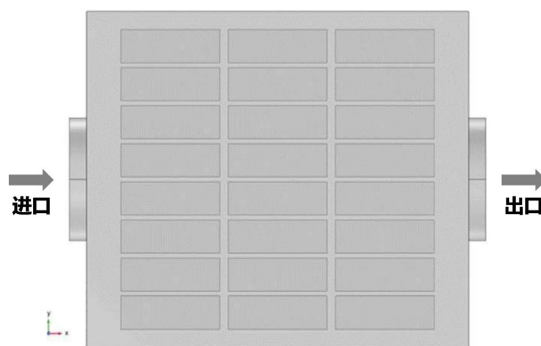


Figure 1. Lithium-ion battery pack model
图 1. 锂离子电池包模型

Table 1. Basic parameters of prismatic lithium iron phosphate (LFP) battery cell
表 1. 方形磷酸铁锂电池单体基本参数[15]

项目名称	数值	单位
标称电压	3.2	V
标称容量	205	Ah

续表

工作电压范围	2.5~3.65	V
尺寸(长/宽/高)	173/54/200	mm
平均密度	1984	kg/m ³
平均比热容	990	J/(kg·K)
导热系数(x/y/z)	0.377/22.3/22.3	W/(m·K)

2.2. 单体锂离子电池产热模型

电池在充放电的过程中会产生大量的热量，这些热量伴随着电能和化学能的转化与传递产生。电池所产生的热量可以分为[16]：反应热 Q_R 、欧姆热 Q_J 、极化热 Q_P 和副反应热 Q_S 四个部分，总热量 Q 可表示为：

$$Q = Q_R + Q_J + Q_P + Q_S \quad (1)$$

反应热是指在氧化还原反应过程中伴随产生的热量，因为氧化还原反应具有可逆性，所以反应热也具有可逆性。

$$Q_R = nFT \frac{\partial E}{\partial T} \quad (2)$$

式中， n 为传递电子物质的量，单位是 mol； F 为法拉第常数，单位是 C/mol； T 为锂离子电池温度，单位是 K； E 为锂离子电池电动势，单位是 V。

欧姆热 Q_J 是指电池本身内阻所产生的热量，极化热 Q_P 可等效为极化内阻产生的热量。副反应热 Q_S 是指电池内部材料在过充、过放过程中发生分解产生的热量，一般情况下电池的副反应热很小，可以忽略不计。 Q_J 与 Q_P 可表示为：

$$Q_J = I^2 R_J t \quad (3)$$

$$Q_P = I^2 R_P t \quad (4)$$

式中， I 为锂离子电池电流，单位是 A； R_J 为欧姆内阻，单位是 Ω ； R_P 为极化内阻，单位是 Ω ； t 为放电/充电时间，单位是 s。

由于电芯内部产热机制较为复杂，本研究采用了由 Bernardi 等人提出的基于电池内部物质均匀发热的假设对电池产热速率模型进行简化计算，这也是目前估算电池产热最常用的方法之一。对于电池的放电过程，我们将其产热速率简化为以下公式，单位为 W/m^3 ：

$$q = \frac{1}{V} (Q_I + Q_R) = \frac{1}{V} \left(I^2 R - IT \frac{dU_{OCV}}{dT} \right) \quad (5)$$

式中，公式中的 Q_I 代表不可逆反应热，其中包括欧姆热 Q_J 和极化热 Q_P ； Q_R 则表示是可逆热，也就是电化学反应释放出来的反应热，可逆热部分的正负号分别表示充电放电过程； V 为锂离子电池体积，单位是 m^3 ； Q_I 为不可逆热，单位是 W； Q_R 为可逆热，单位是 W； I 为流经锂离子电池电流，单位是 A； T 为锂离子电池温度，单位是 K； R 为锂离子电池内阻，单位是 Ω 。

由于电池冷却后温差浮动小，忽略温度变化对内阻的影响，取锂离子电池平均内阻为 $0.135 \text{ m}\Omega$ ； $\frac{dU_{OCV}}{dT}$ 为温熵系数，当放电倍率固定为常数时，取值为 0.22 mV/K 。计算出在 1 C 放电倍率时锂离子电池发热功率为 $10,242 \text{ W/m}^3$ 。

2.3. 单体锂离子电池产热模型

在本研究中，锂离子电池包的传热过程主要分为两种形式：热传导和热对流。在初始状态时，锂离子电池温度与环境温度一致为 T_0 ，可表示为：

$$t = 0, T(x, y, z) = T_0 \quad (6)$$

锂离子电池内部是热传导，可用非稳态傅里叶定律进行表示：

$$\rho_l C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_l \nabla T) + q \quad (7)$$

式中， ρ_l 为锂离子电池平均密度，单位是 kg/m^3 ； C_p 为锂离子电池定压比热容，单位是 $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ ； λ_l 为锂离子电池导热系数，单位是 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

锂离子电池与流体区域的接触面为对流换热。锂离子电池单体壁面流体传热可表示为：

$$-\lambda_l \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{fluid}} (T - T_{\text{fluid}}) \quad (8)$$

式中， h_{fluid} 为电池包内部流体的对流换热系数，单位是 $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ； T_{fluid} 为流体温度，单位是 K 。电池包外边界为自然对流条件，空气的自然对流换热系数取值为 $6 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ；电池包底部为绝热环境。

2.4. 网格划分及无关性验证

如图 2(a)所示为锂离子电池包模型及网格划分。为保证计算精度与效率的平衡，进行了网格无关性验证。以 1 C 倍率放电 3600 s (电池包温度达最高)时的最高温度为评判指标，网格数对最高温度的影响结果如图 2(b)所示。温度变化范围为 $38.16^\circ\text{C} \sim 38.60^\circ\text{C}$ ，各组网格计算结果误差均小于 5% ，满足计算要求。最终选取总数为 $134,423$ 的网格模型开展后续研究，该方案在保证精度的同时显著提升了计算效率。

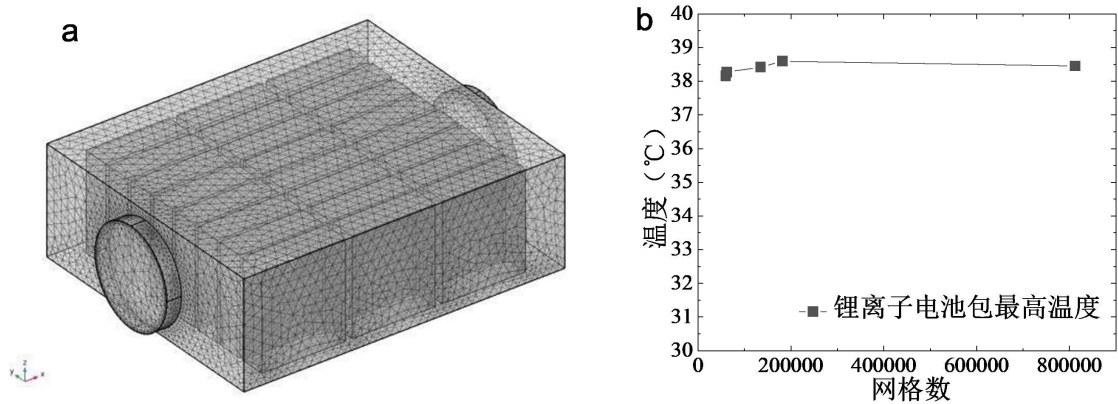


Figure 2. (a) Battery pack model and mesh generation; (b) Grid independence verification

图 2. (a) 电池包模型及网格划分; (b) 网格无关性验证

3. 模拟结果与分析

3.1. 强制风冷

3.1.1. 未优化强制风冷热仿真分析

本节对储能锂离子电池包在强制风冷下的热行为进行了仿真研究。模拟条件为 1 C 放电、环境温度 25°C 、进口风速 8 m/s ，采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型并考虑外壁面自然对流。

图 3(a)呈现了电池最高、最低温度随时间的变化。放电初期(1800 s 内), 电池温度缓慢上升, 仍处于允许范围内。到 2700 s 时, 最高温度达 35.51℃, 已超出最佳工作范围。放电结束时(3600 s), 最高温度升至 38.45℃, 最大温差达 10.96℃, 两者均超过最佳工作限值和允许温差上限。表明冷却气流仅能部分带走热量, 剩余热量持续积累导致温度不断上升。图 3(b)显示 3600 s 时各电池平均温度, 第三列明显高于第一列。主要原因在于进口区域空气温度低、流速高, 换热效果好; 而流至出口区域时, 空气吸热后温度升高、冷却能力下降, 加之气流分布变差, 导致该区域冷却不足、温度偏高, 形成明显温度梯度。

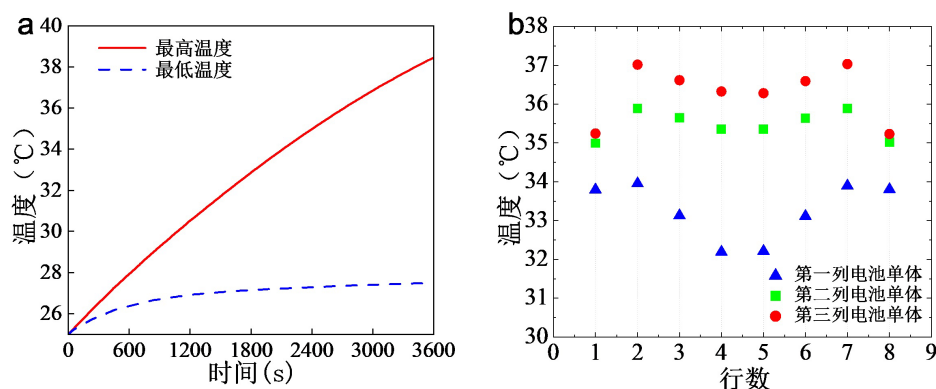


Figure 3. (a) Maximum and minimum temperature curves of the battery module; (b) Average temperature distribution of lithium-ion batteries at 3600 seconds

图 3. (a) 电池模组最高、最低温度曲线; (b) 3600 s 时锂离子电池平均温度分布

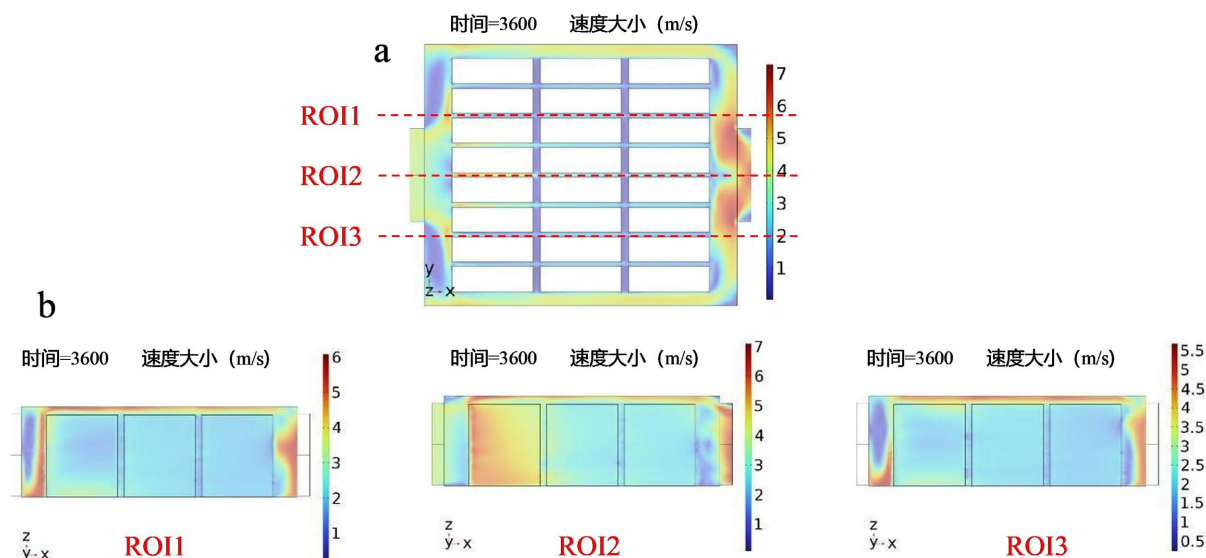


Figure 4. (a) Lithium-ion battery pack XOY-plane velocity distribution diagram; (b) Velocity distribution diagrams at ROI1, ROI2, and ROI3 cross-sections

图 4. (a) 锂离子电池包 XOY 面速率分布图; (b) ROI1、ROI2、ROI3 截面速率分布图

图 4(a)展示了电池包 XOY 截面处的速率分布。可以看出, 第四和第五行电池间隙处气体流速较高, 对流换热系数大, 冷却效果较好; 第二、三行和第六、七行电池间隙流速较低, 对流换热较弱, 冷却效果较差; 第一行和第八行电池靠近壁面, 由于间隙较宽、流动阻力小, 流速较大, 换热较强, 冷却效果也较好。图 4(b)为平行于流动方向的三个截面 ROI1、ROI2 和 ROI3 处的流速分布。电池包上部区域流速较

快,大量气流未经充分换热便从上流道逸出,导致冷却空气利用效率低。ROI2 截面靠近进口,电池间隙内流速较高;而远离进口的 ROI2 和 ROI3 截面流速显著降低。综上,电池模组内空气流速分布与流量分配对温度均匀性具有重要影响,电池内部结构是气流组织的主导因素。因此,应对电池包进行结构优化,改善内部流场,使电池组工作在适宜温度范围、温差处于允许限度的环境内,从而保障系统安全稳定运行。

3.1.2. 电池间距对冷却效果的影响

由上文分析可知,当气体流入锂离子电池之间的间隙后,流速出现明显下降,导致电池包后部区域气流速度较低,冷却效率随之降低。电池的行间距大小将直接影响内部气体的流速与分布均匀性,进而对电池包的整体冷却性能产生重要影响。为确定最优行间距 D_y ,本文选取 10 mm、12 mm、14 mm、16 mm、18 mm 和 20 mm 共六种不同尺寸进行数值模拟分析。

图 5 展示了不同行间距下锂离子电池在 3600 s 时的温度分布。模拟结果表明,行间距对电池包的冷却性能与温度均匀性具有显著影响。当行间距为 10 mm~16 mm 时,靠近进口的前两列电池因流速较高,冷却效果较好;其中 10 mm 间距因流道狭窄、流动阻力大,严重阻碍气流向后流动,导致出口附近的第三列电池冷却不足。当间距增大至 18 mm 和 20 mm 时,流阻虽减小,但气流速度下降过多,整体对流换热能力减弱,造成电池整体温度普遍升高。

为深入研究,选取冷却效果较好的 12 mm、14 mm 和 16 mm 三组行间距,重点分析冷却效率较低的第二、三列电池在放电结束时的平均温度分布,结果如图 6 所示。分析可知:随着行间距增大,第一行和第八行电池的冷却效果有所下降。这是由于行间距扩大优化了内部流道阻力分布,使更多冷却气流被分配至中央主流道,导致电池包两侧壁面附近流道的空气流量相对减少,对流换热强度减弱,从而降低了冷却效果;第二行和第七行电池的温度受行间距变化影响较小;中间区域电池则因气流分布更均匀,平均温度随行间距增大而明显降低。

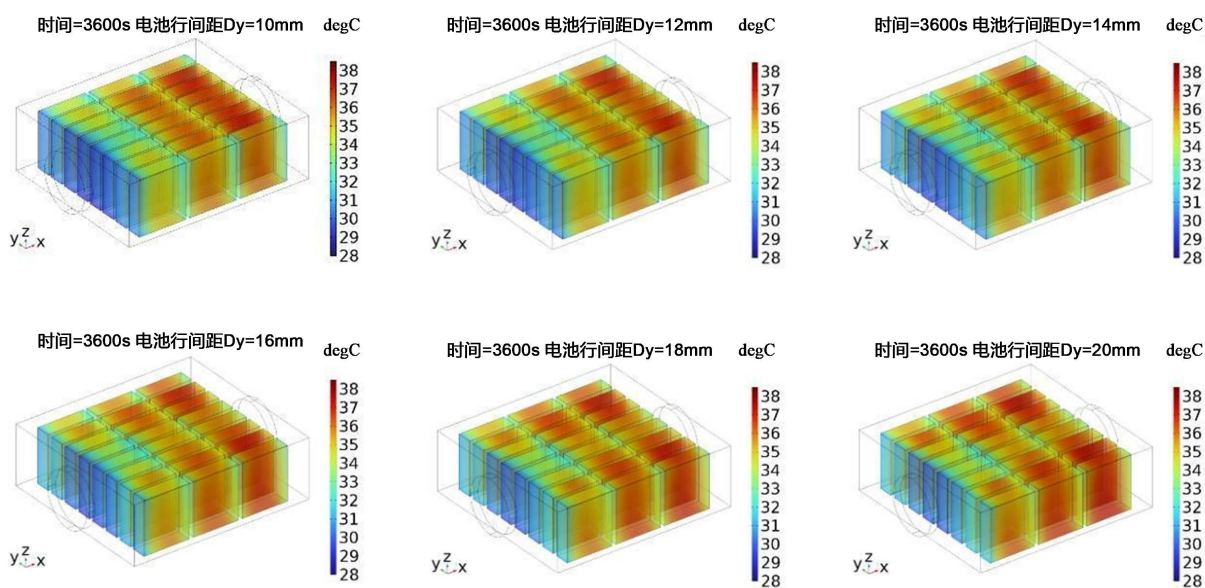


Figure 5. Temperature contour plots of the lithium-ion battery pack at different D_y values

图 5. 不同 D_y 时锂离子电池包温度云图

综合来看,调整行间距对电池最高温度的影响有限,但却是改善温度均匀性的关键措施。本研究最终确定 14 mm 为最优行间距。该间距既避免了间距过小(如 10 mm)造成的出口区域冷却不足,又防止了

间距过大(如 18 mm、20 mm)导致的整体换热能力下降,从而实现更合理的气流组织分布。在此优化方案下,电池最高温度为 38.17℃,最大温差显著降至 9.32℃。然而,该结果仍未能满足电池最佳工作温度区间和温差上限要求,因此仍需进一步优化。

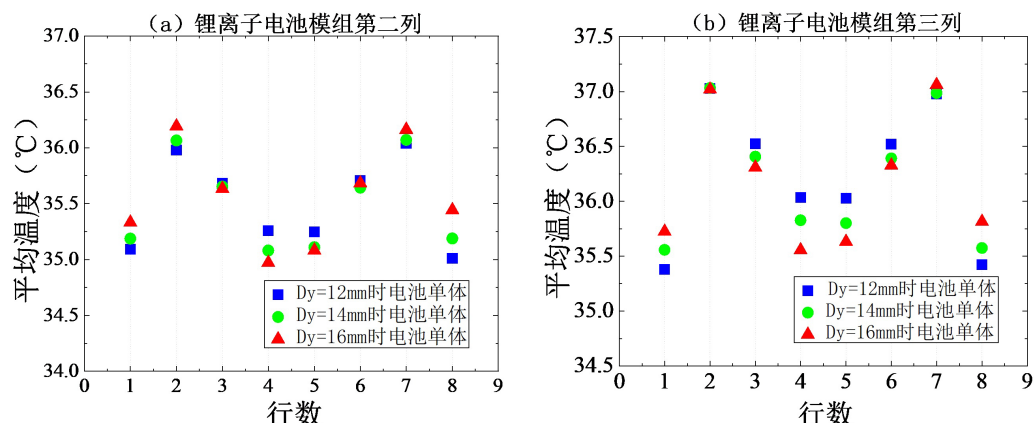


Figure 6. Average temperature distribution of the second and third columns of batteries at the end of discharge
图 6. 第二、三列电池在放电结束时的平均温度分布

3.1.3. 空气流速对冷却效果的影响

风速是影响电池包冷却效果的关键因素。增大风速能加强电池表面的散热,提高冷却效率,但风速过高会增加能耗,且对进一步提升冷却效果作用有限。因此,需要在散热和经济性之间找到合适的入口风速。

图 7 展示了 3600 s 时电池包最高温度及最大温差随风速的变化曲线。从图 7(a)可以看出,随着风速提高,电池最高温度逐渐下降,但降温速率趋于平缓,表明继续增大风速对进一步降低最高温度的效果有限。图 7(b)表明电池包最大温差随风速增加而逐渐减小,反映出温度均匀性随风速提升得到改善。由图可知,当风速为 18 m/s 时,最高温度为 34.80℃,最大温差为 7.98℃,已低于 35℃的最高允许温度。而当风速为 16 m/s 时,最高温度为 35.33℃,最大温差为 8.28℃,最高温度接近最佳温度上限,但仍存在较大的温差,因此还需进一步对其结构进行优化。综合考虑冷却性能与能耗经济性,本文选择 16 m/s 作为后续研究的测试风速,该风速可在满足电池包温度控制要求的同时,避免因风速过高而造成不必要的能量浪费。

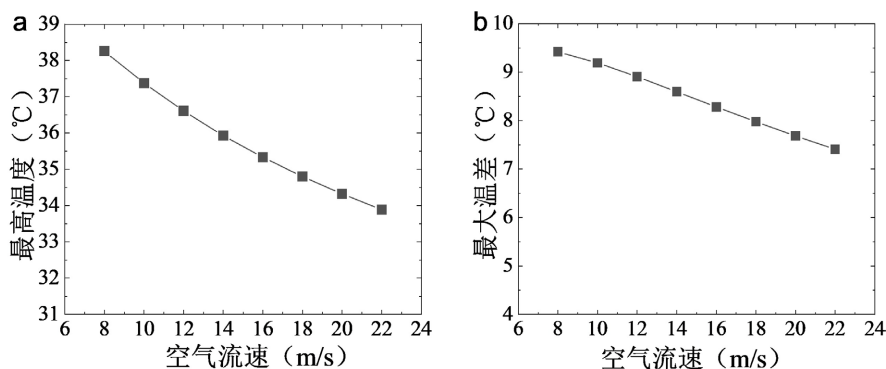


Figure 7. Maximum temperature and maximum temperature difference of batteries under different wind speeds
图 7. 不同风速下锂离子电池最高温度和最大温差

3.1.4. 电池包结构对冷却效果的影响

由上文分析可知,冷却气流进入电池包后,大部分气体直接从电池组与箱体侧壁之间的较大间隙流过,另有部分气流经上部流道逸出,未能充分参与电池散热,导致电池包中部区域冷却效果较差。该流动分布不均问题不仅降低了电池组的整体散热效率,同时也造成了冷却气流的能量浪费。

为改善内部流场分布、提升冷却均匀性,本文首先将电池模组与箱体侧面的间距由初始的 30 mm 减小至 14 mm,使其与电池行间的间距(Dy)保持一致。而为解决较多气体直接流入电池包上部空间的问题,本研究通过在电池包上部加装挡板(30 mm),引导气流更均匀地流向电池模组。不同数量挡板时电池包温度分布如图 8 所示。首先,在电池模组前部设置单块挡板。模拟结果显示(图 8(a)),该方案下电池模组最高温度为 34.10℃,温差为 7.30℃。与无挡板结构相比,最高温度降低 0.07℃,温差减小 0.12℃,表明其对温度均匀性有一定改善,但对最高温度的抑制效果有限。因为部分气流仍可越过单块挡板进入上部空间,导致冷却效果未达预期。为进一步优化,增设了两块挡板。从图 8(b)可见,电池最高温度降至 33.26℃,温差为 6.60℃,较高单挡板方案分别降低 0.84℃和 0.70℃,显示出更好的均温与冷却效果。如图 8(c)所示,当在上部区域布置三块挡板时,最高温度进一步降至 32.81℃,温差为 6.00℃,均温性能显著提升。

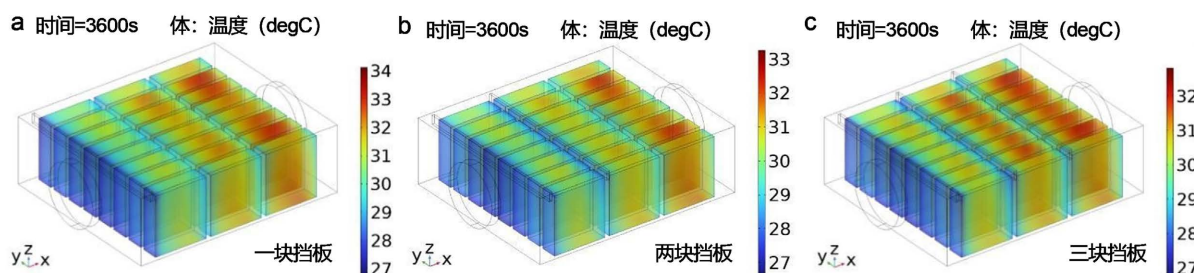


Figure 8. Temperature distribution contour plots of the battery pack with different numbers of baffles

图 8. 不同数量挡板时电池包温度分布图

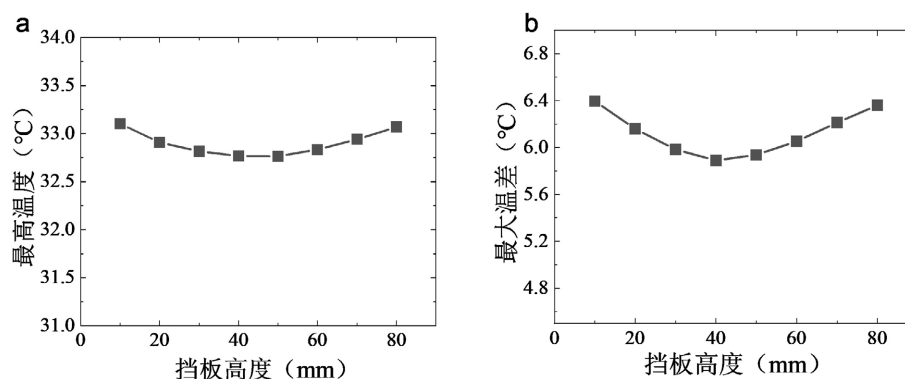


Figure 9. Curves of maximum temperature and maximum temperature difference versus baffle height at the end of discharge

图 9. 放电结束时最高温度和最高温差随挡板高度的变化曲线

为确定最优挡板高度,本文对比分析了 10 mm~80 mm 范围内八种不同高度的影响。图 9 展示了 3600 s 时电池包最高温度与最大温差随挡板高度的变化关系。模拟结果显示,随着挡板高度增加,电池包最高温度和最大温差均呈现先下降后上升的趋势。当挡板高度为 50 mm 时,电池包最高温度达到最低值 32.76℃;而在 40 mm 高度下,最大温差取得最小值 5.89℃。考虑到此时电池最高温度已处于最佳工作范围内,温度均匀性成为优化散热性能的关键指标。因此,本文以降低温差为主要目标,最终选择 40 mm

挡板为最优方案。在该方案下，电池包最高温度为 32.77℃，最大温差为 5.89℃，在有效控制温度水平的同时显著提升了模组内的温度均匀性。

3.2. 浸没式液冷

基于前述研究，强制风冷方案虽经结构优化可将电池最高温度控制在最佳区间，却始终无法满足模组对温度均匀性的苛刻要求($\Delta T > 5^{\circ}\text{C}$)。为进一步突破电池热管理中的均温性瓶颈，本研究采用浸没式液冷技术，利用其高导热性、大热容量与对流换热能力强等特性，构建高效热管理方案，以实现 对电池温度的精准控制。

3.2.1. 冷却液的选择及其热物性参数

浸没式液冷通过将电池完全浸没于冷却液中，构建了均匀高效的热传输路径，可显著提升散热效率。而冷却液作为该系统的核心，其物化性质直接决定了热管理的性能与安全性。

理想冷却液需同时满足多重严格标准：一是高绝缘性(低电导率)，防止漏电风险；二是优越的热物理性能(高导热系数与比热容)，保障散热效率；三是高安全性(高闪点/不燃性)，抑制热失控蔓延。此外，还需兼顾工作温域、材料兼容性、粘度及环保性等因素。

本研究选取了三种冷却液进行比较分析，其热物理性质如表 2 所示：

Table 2. Physical properties of the coolant [17]

表 2. 冷却液的物性参数[17]

参数	矿物油	HFE-7100	AmpCool AC-110
20℃时的密度(kg/m ³)	924.1	1370.2	1600
导热系数(W/(m·K))	0.13	0.062	0.23
比热容(J/(kg·K))	1900	1255	1170
20℃时的运动粘度(10 ⁻⁶ m ² /s)	56	0.27	1.18
沸点(℃)	>218	61	135

矿物油和 AmpCool AC-110 均属于碳氢化合物类冷却液。矿物油导热性能良好、成本较低且介电常数小，是一种常用的介电流体。AmpCool AC-110 不含硫和金属杂质，可生物降解，环境友好，更具可持续性优势。HFE-7100 属于电子氟化液，具有低臭氧消耗潜能(ODP)和较低的全球变暖潜能(GWP)，同时具备良好的材料兼容性、高安全性、低介电常数和优异的冷却性能，因而受到广泛关注。

3.2.2. 仿真模型与初始条件

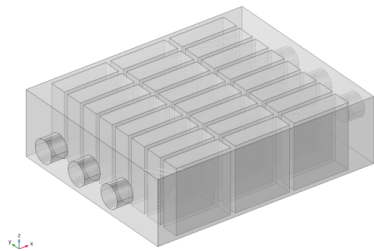


Figure 10. Lithium-ion battery pack immersion cooling model diagram
图 10. 锂离子电池包浸没式冷却模型图

如图 10 所示, 电池模组采用八行三列排布, 行间距为 14 mm, 列间距为 15 mm。电池包 y 方向侧壁与电池间距为 14 mm, x 方向壁面距离为 70 mm。进出口管道半径为 30 mm, 长度为 80 mm。锂离子电池完全浸没于冷却液中, 冷却液以 1 m/s 的速度、25℃的初始温度流入。电池包及内部流体初始温度均为 25℃, 与环境温度一致。电池包顶部及侧壁考虑自然对流, 对流换热系数设为 $6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 底部设为绝热边界条件。

3.2.3. 不同冷却液冷却电池包热仿真分析

图 11 展示了采用三种不同冷却液时锂离子电池包最高温度随时间的变化曲线。从图中可以看出, 以 HFE-7100 作为冷却液时散热效果最佳, 而矿物油的冷却性能相对较差。

采用矿物油时, 电池温升呈现先快后缓趋势, 1980 s 时达到 30.01°C 后基本达到热平衡, 最终最高温度为 30.58°C , 最大温差 4.73°C 。使用 AmpCool AC-110 冷却液时, 电池在 1650 s 前快速升温至 29.00°C , 最终温度 29.40°C , 最大温差 3.84°C , 其冷却性能与均温性优于矿物油。而 HFE-7100 表现最为优异, 系统在 720 s 内迅速达到稳定状态, 最高温度始终维持在 26.18°C , 最大温差仅 1.11°C , 展现出卓越的热管理能力。这是由于 HFE-7100 具有极低的动力粘度($0.27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)和较高的导热系数($0.062 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 因此展现出优异的流动传热能力, 从而及时带走电池热量。

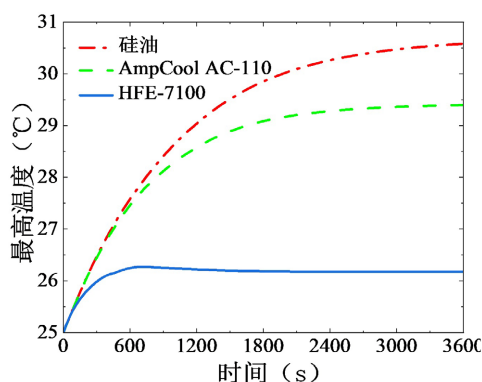


Figure 11. Maximum temperature of the lithium-ion battery pack with different coolants
图 11. 锂离子电池包在不同冷却液时的最高温度

综上所述, 浸没式液冷系统表现出优良的冷却性能和温度均匀性。相较于未经优化的原始强制风冷方案(最高温度 38.45°C , 最大温差 10.96°C), 其温控性能实现跨越式提升; 即便与经过结构优化的强制风冷最佳方案(最高温度 32.77°C , 最大温差 5.89°C)相比, 本系统仍展现出显著优势: 采用 HFE-7100 工质时, 电池最高温度可降低至 26.18°C ; 最大温差更是仅有 1.11°C 。该系统能够将电池最高温度稳定控制在 35°C 以下, 且模组最大温差可维持在 $1^\circ\text{C}\sim 2^\circ\text{C}$ 的极低范围内, 完全满足锂离子电池包对工作温度及温差控制的苛刻要求, 其综合热管理效果显著优于强制风冷系统。

4. 结论

本研究基于 CFD 仿真技术, 对储能电池包强制风冷进行结构优化与参数调整, 并将最优强制风冷方案与浸没式液冷方案作对比研究, 主要结论如下:

- 1) 对于强制风冷, 电池行间距是影响温度均匀性的关键因素, 本研究得出 14 mm 为最优行间距, 可有效组织气流分布, 此时电池最高温度为 38.17°C , 最大温差为 9.32°C 。
- 2) 增大风速可有效降低强制风冷热管理中电池的最高温度并改善温度均匀性, 但在实际使用中需综

合冷却性能与能耗经济性。本研究得出 16 m/s 为最优风速, 此时电池最高温度为 35.33℃, 最大温差为 8.28℃。

3) 通过减小电池模组与侧壁间距至 14 mm 并加装三片 40 mm 高导流挡板, 有效优化了内部流场分布。该组合措施使冷却气流更均匀地流经电池表面, 将系统最高温度降至 32.77℃, 最大温差缩小至 5.89℃, 显著提升了冷却效率与温度均匀性。

4) 浸没式液冷方案展现出卓越的热管理性能, 其中 HFE-7100 冷却工质表现最优, 放电结束时可将电池最高温度控制在 26.18℃, 最大温差为 1.11℃, 完全满足锂离子电池对工作温度及温差控制的严格要求。相较于强制风冷, 最高温度和最大温差分别降低了 6.59℃和 4.78℃, 综合性能显著优于强制风冷方案。

基金项目

上海市启明星项目(A类), 项目编号: 240A2705900。

参考文献

- [1] 唐可鉴, 郑晓东, 刘永超, 等. 相变材料基混合电池热管理系统研究进展[J]. 金属功能材料, 2025, 32(4): 32-41.
- [2] 聂芬. 风冷式锂离子电池组热管理系统冷却特性分析及优化[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [3] 刘剑, 于立博, 吴振兴, 等. 基于风冷的锂离子电池充放电设备热特性影响研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 914-923.
- [4] 吴成会, 梁才航. 基于浸没式冷却的锂离子电池实验研究[J]. 电源技术, 2023, 47(11): 1409-1413.
- [5] 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.
- [6] 任诗皓, 田嘉荣, 陈捷超, 等. 锂离子电池组风冷性能综合传热分析[J]. 电源技术, 2021, 45(9): 1129-1132.
- [7] Singh, L.K., Mishra, G., Sharma, A.K. and Gupta, A.K. (2021) A Numerical Study on Thermal Management of a Lithium-Ion Battery Module via Forced-Convective Air Cooling. *International Journal of Refrigeration*, **131**, 218-234. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.07.031>
- [8] 时天禄, 安周建, 刘在伦. 基于风冷散热的锂电池热管理数值模拟研究[J]. 电源技术, 2021, 45(7): 885-889.
- [9] Zhang, F., Wang, P. and Yi, M. (2021) Design Optimization of Forced Air-Cooled Lithium-Ion Battery Module Based on Multi-Vents. *Journal of Energy Storage*, **40**, Article 102781. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102781>
- [10] Wankhede, S., Pingale, A.D. and Kale, A. (2025) Experimental Investigation on Thermal Management of Lithium-Ion Battery Pack for Formula Student Electric Vehicle Using Air-Cooling System. *Energy Storage and Saving*, **4**, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.11.008>
- [11] Yue, M., Chen, J.W., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., et al. (2018) Effects of the Different Air Cooling Strategies on Cooling Performance of a Lithium-Ion Battery Module with Baffle. *Applied Thermal Engineering*, **144**, 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.064>
- [12] Chen, D., Jiang, J., Kim, G., Yang, C. and Pesaran, A. (2016) Comparison of Different Cooling Methods for Lithium Ion Battery Cells. *Applied Thermal Engineering*, **94**, 846-854. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015>
- [13] Cheng, W., Chen, M., Ouyang, D., Weng, J., Zhao, L. and Chen, Y. (2024) Investigation of the Thermal Performance and Heat Transfer Characteristics of the Lithium-Ion Battery Module Based on an Oil-Immersed Cooling Structure. *Journal of Energy Storage*, **79**, Article 110184. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110184>
- [14] 曾少鸿, 吴伟雄, 刘吉臻, 等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 2888-2903.
- [15] 马菁, 段志勇, 孙勇飞, 等. 基于热管的储能锂电池散热特性数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6737-6746.
- [16] Sato, N. (2001) Thermal Behavior Analysis of Lithium-Ion Batteries for Electric and Hybrid Vehicles. *Journal of Power Sources*, **99**, 70-77. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(01\)00478-5](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(01)00478-5)
- [17] Gao, Q., Lei, Z., Huang, Y., Zhang, C. and Chen, Y. (2024) Performance Investigation of a Liquid Immersion Cooling System with Fish-Shaped Bionic Structure for Lithium-Ion Battery Pack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **222**, Article 125156. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125156>