

储热储冷多场景应用专刊



间接冷板与浸没式液冷在锂离子电池热管理中的研究进展

潘振飞¹, 黄沛丰², 罗伊默¹, 廖婉萱¹, 袁玲洁¹

(¹湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; ²湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 面对日益增长的锂离子电池热管理需求与热失控挑战, 液冷技术凭借卓越的散热性能已成为电池热管理的主流发展方向。本文系统综述了锂离子电池液冷技术的最新研究进展。首先, 针对间接冷板技术, 重点梳理了流道布局优化、仿生通道设计、拓扑优化及微通道等结构创新策略, 并分析了其与相变材料等结合的复合热管理系统在抑制热失控传播方面的研究成果。其次, 针对单相浸没液冷技术, 从冷却液的性能评估、系统结构的设计优化、传热机理, 以及热失控传播抑制四个关键维度进行了深入剖析。再次, 对于双相浸没液冷, 重点从气泡动力学视角阐释了相变传热机理, 并基于此给出了强化传热的指导原则。最后, 结合产业现状展望了技术发展趋势, 指出未来亟需系统揭示冷却液关键物性参数与电池热管理性能及热失控抑制能力之间的定量关系, 建立设计准则以指导兼具高性能与环保性的新一代工质开发; 同时, 应基于传热机理深化结构创新, 重点突破极端热滥用工况下的散热极限, 从而实现对热失控及热蔓延的高效抑制。

关键词: 锂离子电池; 间接冷板液冷; 浸没式液冷; 电池热管理; 热失控

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0104

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1023-16

Research progress on indirect cold plate and immersion cooling for lithium-ion battery thermal management

PAN Zhenfei¹, HUANG Peifeng², LUO Yimo¹, LIAO Wanxuan¹, YUAN Lingjie¹

(¹College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; ²State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In response to the increasingly stringent thermal management requirements and thermal runaway challenges associated with lithium-ion batteries, liquid cooling has emerged as a mainstream thermal management strategy due to its superior heat dissipation capability. This review systematically summarizes recent research progress in liquid cooling technologies for lithium-ion batteries. First, for indirect cold plate cooling, various structural innovation strategies, including flow-channel layout optimization, biomimetic channel design, topology optimization, and microchannel configurations, are systematically reviewed, with particular emphasis on hybrid thermal management systems coupled with phase change materials for suppressing thermal runaway propagation. Second, single-phase immersion cooling is critically analyzed from four key perspectives: coolant property evaluation, system structural

收稿日期: 2026-01-31; 修改稿日期: 2026-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52307240, 52577232, 52478089)。

第一作者: 潘振飞 (1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为电池热管理, E-mail: panzf1997@126.com; 通信作者: 罗伊默, 教授, 研究方向为分布式储能技术、光伏建筑一体化及电池热管理, E-mail: yimoluo@hnu.edu.cn。

引用本文: 潘振飞, 黄沛丰, 罗伊默, 等. 间接冷板与浸没式液冷在锂离子电池热管理中的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1023-1038.

Citation: PAN Zhenfei, HUANG Peifeng, LUO Yimo, et al. Research progress on indirect cold plate and immersion cooling for lithium-ion battery thermal management[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1023-1038.

and flow-channel optimization, heat transfer mechanisms, and thermal runaway mitigation. Third, for two-phase immersion cooling, phase-change heat transfer mechanisms are elucidated from the perspective of bubble dynamics, on the basis of which design principles for heat transfer enhancement are proposed. Finally, in light of current industrial development, future research directions are discussed. It is highlighted that a systematic understanding of the quantitative relationships between key coolant thermophysical properties, battery thermal management performance, and thermal runaway suppression capability is urgently required to establish unified design guidelines for the development of next-generation coolants with both high performance and environmental sustainability. Meanwhile, structural innovation guided by fundamental heat transfer mechanisms should be further advanced to overcome heat dissipation limits under extreme thermal abuse conditions, thereby enabling effective mitigation of thermal runaway and its propagation.

Keywords: lithium-ion battery; indirect cold plate cooling; immersion cooling; battery thermal management; thermal runaway

在“双碳”目标背景下, 高效可靠的储能技术已成为支撑新能源大规模并网与消纳的关键设施之一。锂离子电池凭借其高能量密度、高功率密度、无记忆效应及长循环寿命等优势, 已在电动汽车和电化学储能系统中得到广泛应用^[1]。然而, 锂离子电池的性能和寿命对温度高度敏感, 电池温度需要维持在 20~40℃ 范围内, 电池间的温差不能超过 5℃^[2]。温度过高或过低不仅会加速电池的性能衰退与容量衰减, 还可能诱发热失控等严重的安全事故。因此, 构建高效可靠的热管理系统是提升锂离子电池综合性能和运行安全性的关键技术环节。

目前, 针对锂离子电池的热管理需求, 已发展出多种冷却技术^[3], 包括空气冷却、相变材料(PCM)冷却、热管冷却和液冷等方式。空冷具有成本低、结构简单、重量轻和维护成本低等优点, 但散热能力不足和散热不均匀的弊端日益明显^[4]。相变冷却由于能够有效抑制短时热峰值并改善电芯温差得到广泛的关注, 但其导热率低、潜热容量有限, 难以支撑长时间高功率运行^[5]。热管是一种被动式冷却方式, 负责将热量定向传递, 具有优异的散热性能, 但热管制造成本高, 经济性较差, 并且需要与其他散热形式相结合, 造成系统复杂等问题^[6]。在各类电池热管理技术中, 液冷因其优良的导热性能及可精确调控的对流换热能力, 已成为动力电池与储能系统中应用最为广泛的冷却策略之一。根据冷却方式的不同, 液冷技术可进一步细分为间接冷板式、单相浸没式及双相浸没式三种主要

类型^[7]。

间接冷板与单相浸没液冷已在动力电池与储能系统中获得较为广泛的工程应用, 双相浸没液冷由于其优异的换热能力, 也正日益成为行业关注的焦点。据此, 本文聚焦于液冷技术, 将从冷却液的性能评估、系统结构的设计优化、传热机理, 以及热失控传播抑制等方面, 对锂离子电池间接冷板和浸没式液冷技术的研究进展及工程应用现状进行系统综述, 技术路线图如图 1 所示。本文旨在为电池热管理系统的优化设计与工程应用提供理论依据与技术参考。

1 液冷电池热管理技术简介

液冷电池热管理技术以冷却液为热交换介质, 依托对流换热原理, 通过在流道内或直接接触的形式循环流动与电池换热, 通过外部换热器将热量带出系统。同时可调控冷却液的温度、流速, 使电池工作温度维持在适宜温度内, 提升温度均匀性、避免局部热积聚。其技术特点和工作示意图分别如表 1 和图 2 所示。

2 间接冷板液冷

2.1 冷却液的性能评估

冷却液的选型与改性优化是提升热管理性能的核心, 特别是新型冷却液的开发已成为研究的热点。Liao 等人^[8]以铜水基纳米流体为冷却剂, 通过波纹扁管液冷电池热管理系统(BTMS), 提升

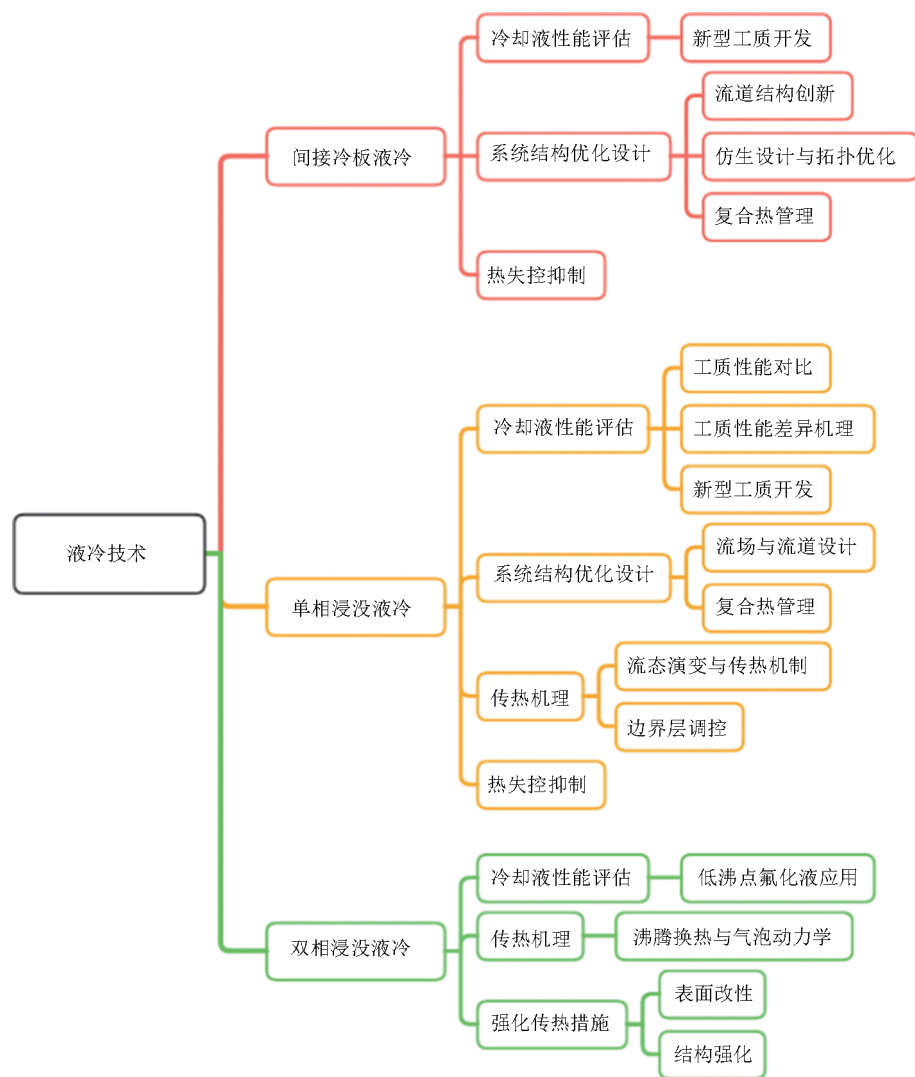


图1 技术路线图

Fig. 1 Technical route map

表 1 液冷技术

Table 1 Liquid cooling technology

液冷技术	间接冷板式	单相浸没式	双相浸没式
特点	经冷板、导热垫等介质间接换热	电池直接浸入绝缘冷却液换热	利用冷却液相变时的极高换热效率进行散热
优势	结构简单安全、维护便捷、适配性广	散热效率高、均温性好、换热面积大、响应快	散热效率最高、均温性优、适配宽温域
劣势	空间占比大、接触热阻大、均温性受接触效果限制	绝缘冷却液成本高、存在泄漏风险、维护成本高	系统结构复杂、成本高、密封要求严苛
换热系数 ^[9] /[W/(m ² ·K)]	500~1500	200~800	800~3000
使用场景与 工况条件	中高功率密度场景(如数据中心、动力电池), 热流密度较高但对绝缘无强制要求	超高功率密度或环境恶劣场景(如超算、户外设备), 需极致均温性和防护性	极端高热流密度场景(如AI芯片), 或追求极限散热能效(超低PUE)

18650 锂电池冷却效果与温度均匀性。Adhikari 等人^[10]利用数值模拟确定了 30% 浓度的乙二醇溶液为间接冷却的最优选择, 而 50% 浓度适配多数气候。

侯竣升等人^[11]制备氧化铝纳米流体并搭建测试平台, 2% 的质量分数在特定工况下使热源最高温降 1.6℃, 综合性能提升 10.4%。此外, 针对单一工

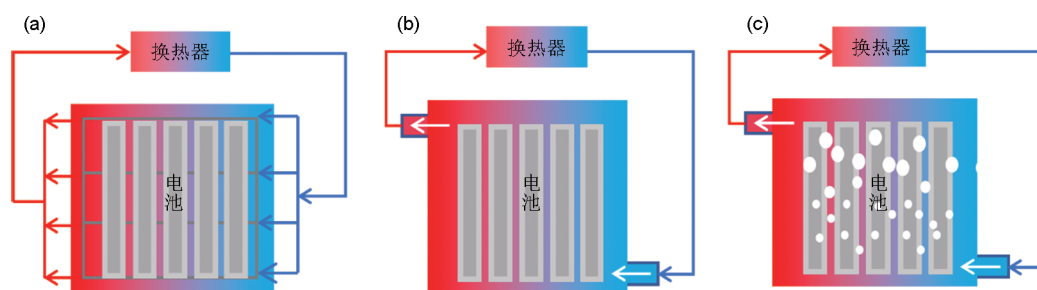


图2 液冷电池热管理技术示意图: (a) 间接冷板式; (b) 单相浸没式; (c) 双相浸没式

Fig. 2 Schematic diagram of liquid-cooled battery thermal management technology: (a) Indirect cold plate cooling; (b) Single-phase immersion cooling; (c) Double-phase immersion cooling

质的局限性, 曹嘉豪^[12]设计液冷与相变材料耦合系统, 优化后5C放电时最高温与最大温差分别下降9.1℃和4.7℃, 缩短了液冷运行时间。尽管上述研究表明通过冷却液改性策略可显著提升散热性能, 但不同冷却液在长期循环稳定性、兼容性及多工况适用性方面仍缺乏系统对比, 有待进一步深入研究。

2.2 系统结构的设计优化

间接冷板冷却的结构设计优化, 主要依托先进算法聚焦于冷板布局、仿生流道、拓扑结构及微通道设计, 并整合复合热管理技术。其核心目标在于协同提升散热效率与温度均匀性, 实现散热性能与系统功耗间的动态平衡。

2.2.1 布局优化设计

布局优化设计聚焦液冷系统结构与参数的精准调控, 以提升散热效率、温度均匀性并降低能耗。Sui等人^[13]提出混合歧管通道液冷板, 结合响应面法与NSGA-II算法优化, 提出混合歧管通道液冷板, 3C放电时最优结构使280 Ah LFP电池最高温 $\leq 45^\circ\text{C}$ 、压降 $< 4.2\text{ kPa}$, 双目标收敛性优异, 但高维精度易下降。Fu等人^[14]通过正交试验优化, 设计含蜂窝状翅片的液冷板, 将55 Ah软包锂电池最高温控制在 27.29°C 、压降降低53.71%, 计算量小却仅得局部最优。Shi等人^[15]采用多目标直接优化算法, 融合非等距通道冷板与被动流量调节结构, 较蛇形冷板最高温度下降 6.31°C 、温差下降 8.11°C , 适配强耦合结构, 但求解效率低。An等人^[16]通过热阻网络分析优化冷板布置, 降低了电池50%热阻使最高温度下降 5.25K , 适合系统级布局却难适配微观参数优化。整体来看, 响应面法+NSGA-II兼顾效率与双目标优化需求, 正交试验适合快速初筛, 直接优化适配复杂耦合结构, 热阻网络分析更侧重系统级布局, 需根据优化维度、复杂度选择适配方法。

2.2.2 仿生通道

仿生流道设计通过提取自然界高效传输系统的分形或网状生长机理, 将其转化为数学拓扑模型, 实现流道几何参数的精准迭代与构型定制, 从而在流阻最小化与热交换最大化之间寻得全局最优。Dong等人^[17]设计仿生荷叶脉络式通道冷板[图3(a)], 通过多步骤优化算法, 可大幅改善温差、换热系数与压降。Radman等人^[18]提出的融合多孔介质与闪蝶翅膀流道仿生冷却结构, 提升了系统的热均匀性并降低了压降。Liu等人^[19]提出仿生鲨鱼皮通道液冷板, 经试验与算法优化, 兼顾散热效果与低能耗。总体来看, 仿生通道设计实现了换热强化与能耗控制的协同提升, 为液冷系统结构创新提供了有效路径。

2.2.3 拓扑优化

聚焦电池非均匀产热痛点, 拓扑优化将热场分布作为硬性约束, 通过算法驱动生成高自由度的非直观流道构型。Huang等人^[20]基于非均匀热源开展拓扑优化, 较传统矩形通道冷板提升36%。Sun等人^[21]将拓扑优化液冷板[图3(b)]与复合相变材料结合, 搭配延迟冷却策略, 4C放电下电池温度较传统方案低5K, 4C放电能耗降低44.8%。Guo等人^[22]通过双目标拓扑优化获得多入口微通道结构, 冷却性能较直通道提升61.82%。Lin等人^[23]针对方形储能电池设计“根状分支”拓扑冷板, 努塞尔数(Nusselt number, Nu)提升15.6%~42.2%, 压降降低16.9%。总体而言, 拓扑优化设计突破了传统经验式流道设计的限制, 实现了在散热性能、温度均匀性与流动阻力之间的高效协同优化。

2.2.4 微通道

微通道设计通过结构优化与新型配置, 强化传热效果并控制流阻。An等人^[24]设计高度方向平行微

通道冷板, 结合模糊PID控制, 308.15K环境下模块温差仅0.7K, 平均SOC提升至94.2%。Mohapatra等人^[25]提出改进型迂回微通道冷板, 优化流动构型, 最大温升 $\leq 5.06\text{K}$, 温差 $\leq 1.545\text{K}$, 提升了电池模块温度控制效果。Huang等人^[26]以相变乳液为冷却液, 优化得到6通道微通道冷板[图3(c)], 2C放电时25%(质量分数)PCE的泵送功率较水冷降低24%, 提升不同放电率下冷却效率。

2.2.5 复合热管理

复合热管理以液冷为核心, 融合相变材料、隔热板等技术, 实现散热、温度均匀性与复杂工况适应性的全方位提升。Jiang等人^[27]提出复合相变材

料(CPCM)与液冷结合系统[图3(d)], 40℃环境下仅CPCM即可将5C放电电池表面温度控制在44℃内, 45℃环境下结合液冷使模块温差从5.30℃下降至2.95℃。Chen等人^[28]设计波形冷板与管式CPCM混合系统, 交叉流流向搭配0.05m/s流速, 使电池最高温度下降22.2%、温差下降16.8%。Fan等人^[29]集成无泄漏PCM与多级Y型分形网络液冷, 优化后电池最高温度降低2.72%, 液冷板压降降低95.61%, 极端高低温环境下均表现优异。这些多技术协同的热管理设计打破了单一冷却技术的性能边界, 为不同温区、不同充放电倍率的电池热管理提供了更具普适性的高效方案。

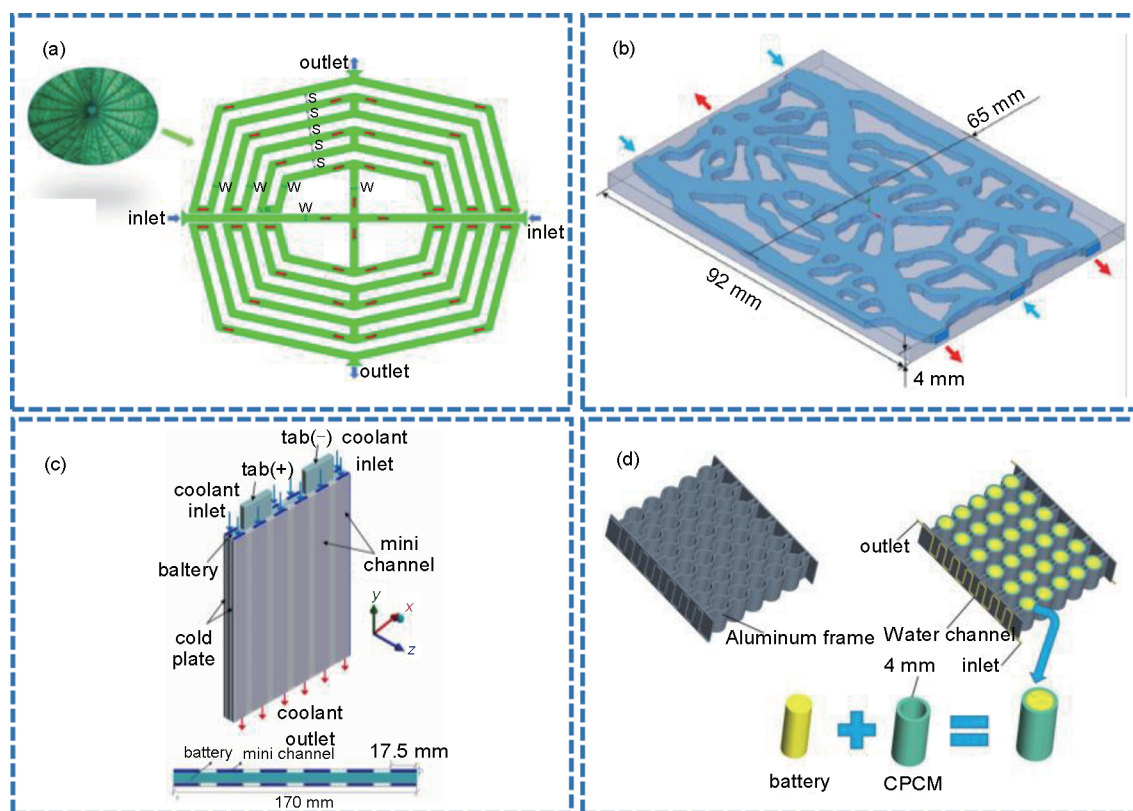


图3 (a) 仿生荷叶式冷板图^[17]; (b) TOCHS 三维结构图^[21]; (c) 六通道微通道冷板图^[26]; (d) 采用液冷辅助CPCM热管理的电池模块结构图^[27]

Fig. 3 (a) Bionic lotus leaf-type cold plate^[17]; (b) 3D structure diagram of TOCHS^[21]; (c) Six-channel microchannel cold plate^[26]; (d) Structure of battery module with liquid cooling-assisted CPCM thermal management^[27]

2.3 热失控传播抑制

在电池热失控传播抑制的技术研究中, 国内外学者围绕间接冷板展开多路径协同设计与优化, 通过冷板与各类功能材料、结构的组合创新, 大幅提升抑制效果并降低工程应用成本。

将冷板与PCM结合打造复合系统是研究的重

要方向, 冷板通过冷却液流动主动散热, PCM依托相变潜热被动蓄热吸能, 二者协同实现热失控传播抑制。Gong等人^[30]融合液冷、隔热板与PCM, 在流速0.048 m/s时可完全抑制热失控, 该混合系统较纯液冷还能降低23%冷却液流速, 实现了热失控传播的高效协同抑制。Liu等人^[31]提出微通道

冷板-PCM混合系统，该系统不仅能有效延缓并完全抑制热失控，其设计的半耦合结构在电池内部短路场景下，低流量条件可延缓相邻电池热失控521 s，高流量条件下更能直接完全阻断热失控传播。

冷板与阻燃、隔热类功能板材的组合应用，也是阻断电池间热量传递的有效路径。Han等人^[32]提出冷板-阻燃板-冷板的夹心式系统，在0.05 m/s流速下即可实现热失控传播的有效阻断，其中气凝胶与五垂直流道冷板的组合方案换热效果最佳，能从传递路径上高效阻隔电池间的热量传导。这些技术从不同路径针对性解决了电池热失控传播难题，大幅提升了动力电池和储能电池的安全性能，也为高能量密度电池的广泛应用奠定了坚实基础。

3 单相浸没式液冷

间接冷板液冷是当前应用最为广泛的电池热管理技术，但其在高热通量散热场景下的性能受限，特别是应对热失控的极端工况时。因此，探索具有

更高换热性能的直接接触式冷却方案已成为行业发展的必然趋势。

冷却液的热物性是决定浸没式热管理系统效率与安全性的核心要素，理想流体需在电气安全、传热效率、材料兼容性 & 环境友好性之间实现多维度的平衡。具体而言需要满足以下的条件^[33]：①首先，优异的电绝缘特性是前提条件，确保电池模组的电气安全。②在热力学性能方面，工质需具备高效的传热与流动能力。③除电热性能外，化学稳定性与材料兼容性直接决定了系统的可靠性与寿命。同时，出于对主动安全的考虑，冷却液应具备高闪点甚至不燃特性。④最后，环境适应性与经济可行性是工质大规模工程化应用的重要制约因素。目前应用于锂离子电池浸没冷却的介电流体主要可分为五大类^[34]：电子氟化液、碳氢化合物、酯类、硅油类和水基类，各类工质在黏度、导热系数、闪点及环境兼容性方面表现各异，其主要特点如表2所示，常见冷却液的热物性参数^[35-36]如表3所示。

表 2 冷却液种类及特点
Table 2 Coolant types and characteristics

冷却液种类	介绍	应用情况	特点
氟化液	氟碳化合物，主要包括氢氟醚和全氟聚醚等惰性液体	目前已广泛应用于数据中心服务器、超级计算机的散热，以及部分高性能电动超跑的电池热管理中。	绝缘性极佳，不易燃，安全性最高。黏度极低，流动性好。但成本极高。密度大，降低系统能量密度。
碳氢化合物	主要为矿物油和合成油，源自石油提炼或人工合成	技术最成熟，主要用于变压器绝缘散热，早期也被用于部分储能电站和电动汽车的油冷电机/电池中。	成本低廉，易获取。绝缘性能良好。闪点相对较低，存在火灾隐患。且黏度较大，会增加系统的泵送功耗。
酯类	包括合成酯和天然酯，属于有机酸与醇反应的产物	作为矿物油的环保替代品，逐渐在新型变压器和追求环保低碳的储能系统中得到应用。	生物降解性好，环境友好。闪点通常高于矿物油，耐高温安全性更好。但易发生水解反应。
硅油类	聚硅氧烷类液体	常用于高压电子设备、航天航空电子设备以及对宽温域稳定性要求极高的特种工业冷却场景。	温域极宽，在极低或极高温度下物性非常稳定。介电性能优异。但价格较贵，且润滑性能不如矿物油。
水基类	乙二醇水溶液以及去离子水等	当前绝大多数电动汽车采用的主流冷却介质，但仅限于间接冷板式冷却，不可直接接触电池极耳。	导热系数和比热容最高，传热能力最强。成本极低，技术成熟。但导电，存在电化学腐蚀风险。

液冷系统的最终表现不仅取决于冷却液的性能，更深度依赖于系统结构的设计优化。此外，深入理解工质在微观层面的传热机理，以及探索液冷在极端工况下对热失控传播的抑制作用，构成了当前学术界与工业界关注的四大核心研究要点。下文将围绕这四个维度，对锂离子电池浸没液冷技术的最新研究进展进行详细综述。

3.1 冷却液的性能评估

冷却液作为热量传递的直接载体，其热物性参数从根本上决定了浸没式液冷系统的换热极限、温度均匀性以及泵送功耗等综合性能指标。目前，学

术界主要围绕不同工质的性能差异、内在差异性机理及新型工质开发展开了深入探究。

在常规工质的性能对比与权衡方面，研究普遍发现高导热系数与低黏度是提升系统性能的关键。Gao等人^[37]在3 C放电倍率下比较了FC-3283、AC-100与矿物油的冷却效果，发现兼具较高比热容与导热系数的AC-100能显著降低电池运行温度。Abdel-Hafeez等人^[38]将研究范围扩展至去离子水、Novec-7000与硅油等多种介质，结果表明去离子水凭借极高的导热系数与比热容实现了最低的电池最高温度，而低黏度Novec-7000则在系统压降方

表 3 常见冷却液的热物性参数^[35-36]

Table 3 Physical properties of commonly-considered coolants^[35-36]

冷却液种类	冷却液	密度 /(kg/m ³)	导热系数 /[W/(m·K)]	比热容 /[J/(kg·K)]	动力黏度 /Pa·s	介电 常数	沸点 /℃	闪点 /℃	成本 /(美元/L)
氟化液	Noah3000A	1815	0.062	1177	0.0025	1.79	110	无	10~15
	Novec7300	1660	0.062	1140	0.0016	1.3	98	无	100~200
	Novec7500	1614	0.065	1128	0.0012	5.8	128	无	200~300
	JX-1	1850	0.065	960	0.0111	2	130	无	60~70
碳氢化合物	聚 α -烯烃	800	0.14	2241	0.0041	2.09	316	220	15
	导热油	852	0.126	1980	0.0161	2.23	351	193	1.8
	矿物油 1	920	0.13	1900	0.0515	2.35	218	>135	3.6
	矿物油 2	890	0.13	1460	0.0079	—	—	—	—
酯类	酯类	920	0.13	1907	0.0151	3.1	360	322	4.7
硅油类	硅油	930~970	0.15	1370	0.01~1	2.75	—	—	—
水基类	去离子水	998	0.574	4184	0.001	76	100	无	0.2

面表现最优。

为揭示冷却液性能差异的内在机理，Li 等人^[35]结合瞬态 CFD 与响应面方法建立了冷却性能预测模型，指出冷却液密度、导热系数与比热容的提高均有助于降低电池温度；而温度均匀性则同时受导热特性与流动状态控制。Zeng 等人^[39]基于 88 种介电工质的大规模参数寻优结果明确指出，黏度与导热系数是决定浸没冷却系综合性能的核心物性参数，其中黏度对电池最高温度、模组温差及系统压降均表现出最高敏感性。Liu 等人^[40]通过实验对比指出，基于 Mouromtseff 数的综合评价具有指导意义。

针对可持续发展需求，新型酯类等新型工质亦被广泛研究。Liu 等人^[41]发现天然酯在降低电池温度和温度均匀性方面与矿物油相当，其闪点高达 322℃，且具备更优的环保属性；但是天然酯的动力黏度约为矿物油的 3.75 倍，这意味着天然酯消耗更多的泵功。Cao 等人^[42]针对大容量储能电池簇的浸没式冷却模拟进一步放大了这一局限性：天然酯的动力黏度高达 70.5 mPa·s，远超传统的变压器油 (9.398 mPa·s) 和硅油 (5.1 mPa·s)。在 100 L/min 的体积流速下，天然酯系统的压降达到 470 Pa，明显高于变压器油的 415.8 Pa 和硅油的 425 Pa。同时，天然酯的高黏度会导致流场恶化与温差增大，此时低黏度的硅油或合成烃反而更具优势。Dai 等人^[43]提出利用超临界 CO₂ 作为新型冷却工质，相比传统最有效的矿物油，由于引发类似亚临界相变的“拟沸腾”效应，使其能够在极小的温差下吸收海

量的电池热量。它可将 *Nu* 提升 453.68%，性能评估标准 (PEC) 提升 3831.10%，同时电池温降上升 55.2%，功耗降低 88.60%。然而，由于需要营造高压环境，该技术的工程化仍面临严峻的物理与结构限制。

综上所述，未来研究趋势正由传统商用工质的性能对比逐步转向面向材料的定向设计，以实现低黏度与高导热特性的协同提升，同时兼顾成本可控性与环境友好性。

3.2 系统结构的设计优化

流道拓扑结构的创新设计与几何参数优化，旨在打破换热效率与流动阻力之间的制约关系，在大幅提升模组均温性的同时显著降低系统的泵功消耗。

3.2.1 微通道

微通道的设计理念能够有效地兼顾系统重量与系统的冷却性能。Luo 等人^[44]提出了微通道内置混合扭带引入旋流与射流机制 [图 4(a)]，显著增强了流道内的湍流混合，使得系统的冷却性能显著提升。Hussain 等人^[45]提出了一种新型通道状介电液浸没冷却系统，该设计通过构建受限流动通道强化了局部对流换热，有效解决了传统浸没方式中流体利用率低的问题。

3.2.2 流动拓扑

进出口位置拓扑与导流板能显著影响流体内部的速度场分布和换热状态。对于流向拓扑，You 等人^[46]证实 Z 型 (异侧进出) 布局能有效引导流体横掠圆柱电池表面，散热效果优于 U 型；而 Banerjee

和Nidhul^[47]则发现C型(同侧进出)布局在方形电池模组中实现了均温性与泵送功耗的最佳平衡。Li等人^[48]的研究表明,大型电池包宜采用双侧或分布式进液以消除长流程热积聚[图4(b)]。通过在流道内添加导流与流道分配板能够显著改变冷却液的流动路径与流态,从而强化局部换热。Jedari Salehzade等人^[49]的研究证实,矩形切割挡板能显著引导冷却液与电池表面充分换热,有效降低模组最高温度。在结构创新方面,Gao等人^[37]提出的仿生鱼形穿孔与阶梯式分层挡板[图4(c)],巧妙利用微射流效应与多脉冲协同策略,成功在提升散热性能的同时降低了泵功消耗。Zhou等人^[50]基于三维多目标优化方法设计了新型流道结构,结果表明该方法能够在提升热管理性能的同时有效抑制流动阻力增长,使优化结构的压降与热阻均显著降低。

3.2.3 复合热管理

此外,融合浸没冷却的复合热管理技术正逐渐成为研究热点,该类技术通过协同集成多种热管理方式的优势,展现出广阔的应用前景。其中包括直接浸没冷却与间接冷却的耦合方案^[51]、静态浸没与风冷的组合模式^[52]、动-静态浸没结合^[53]或和相变材

料^[54]等被动强化传热技术的协同应用。Hu等人^[51]提出了一种浸没与冷管耦合的复合热管理模式,在消除接触热阻的同时规避了传统强制浸没的高泵功消耗,使2 C放电下的最大温差显著降低24.2%。Suresh Patil等人^[52]提出了电池主体浸没式冷却与极耳强制风冷相结合的冷却结构,引入强制风冷进行极耳局部精准散热。结果表明,在3 C放电倍率下,该复合结构使极耳最高温度较自然对流降低了46.8%。在5 C放电测试中,该系统将最高温度维持在40℃以下。Bao等人^[53]创新性地采用双区设计模式[图4(d)],在静态区利用自然对流强化电池间温度均匀,而在动态区通过强制对流加速热量排出。数值模拟表明,在系统中合理布置导热翅片,可使模块最高温度和最大温差分别大幅降低57.76%和75%。Li等人^[54]设计了一种相变材料与浸没式液冷相耦合的复合结构。同时,对PCM封装方式及其与浸没液的热物性参数进行了深度寻优,优化后的结构使系统最高温度和温差分别下降了4.26%和10.8%。上述研究表明,浸没冷却通过与其他冷却方案的深度耦合,能有效突破传统单一冷却模式的热力学极限。

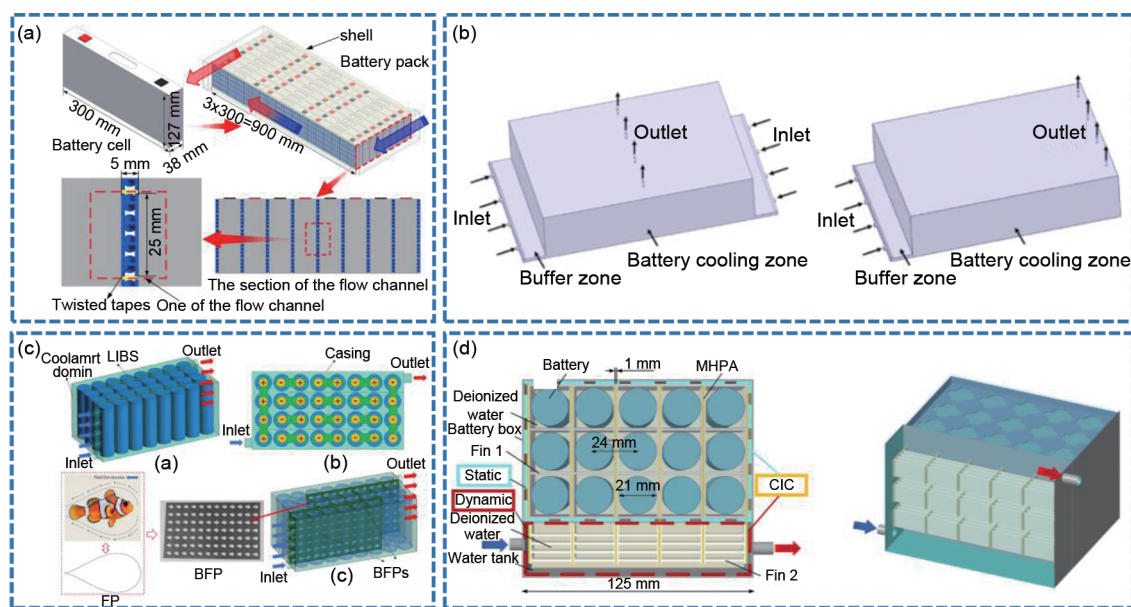


图4 (a) 微通道^[44]; (b) 进出口位置拓扑^[48]; (c) 仿生挡板^[37]; (d) 复合热管理^[53]

Fig. 4 (a) Microchannel^[44]; (b) Topology of inlet and outlet positions^[48]; (c) Bionic baffle^[37]; (d) Hybrid thermal management^[53]

3.3 传热机理

深入揭示冷却液在微观层面的传热机理,是建立高精度热模型与实现精准控温的理论前提。现有

研究主要从流态演变、结构效应及能量分配三个维度对此进行了理论分析。

首先,流态演变与主导传热机制的界定是研究

的核心, 浸没式系统的传热机制与流动状态高度耦合。Liu 等人^[55]基于无量纲参数分析指出, 低流速区域主要受自然对流支配; 随着流速增加, 强制对流效应逐渐增强并最终占据主导。Zhong 等人^[56]进一步利用 Gr/Re^2 准则量化了这一转变过程, 明确了混合对流与强制对流的主导区间。其次, 工质物性显著修正了上述流态演变规律。Liu 等人^[41]通过对比矿物油与天然酯发现, 黏度是决定低流速区传热机制的关键变量: 低黏度矿物油在极低雷诺数下即可受自然对流支配, 而高黏度天然酯在全测试范围内始终由强制对流主导。这表明选择冷却液时必须综合考虑其物性参数对流场结构的内在影响。

几何结构与流道配置直接调控热边界层与局部换热强度。在静态浸没场景下, Ma 等人^[57]指出液层厚度的增加会促使传热形式由单纯导热向自然对流转变, 虽增强了整体散热, 但加剧了热分布的不

均匀性。针对动态强制对流, Liu 等人^[58]建立了模组级 $Nu-Re$ 经验关联式, 研究证实流量提升对高放电倍率工况下的换热强化效果尤为显著。此外, 该研究还对比分析了直接液冷(含多种浸没式冷却方式)、间接液冷、风冷及 PCM 冷却等典型电池热管理系统(BTMS)的传热性能, 结果如图5所示。Mo 等人^[59]则解析了多进出口配置, 发现湍流工况下增加入口数量比改变出口数量更能显著提升换热系数(heat transfer coefficient)。

最后, 能量分配分析揭示了系统的热力学平衡特征。Wang 等人^[60]和 Cheng 等人^[61]的研究量化了热量流向, 结果一致表明: 系统产热主要由电池本体显热与冷却液吸热共同承担, 腔室散热占比极少。值得注意的是, 随着放电倍率的增加, 冷却液吸收热量比例显著上升, 且冷却剂类型对吸热效率具有决定性影响。

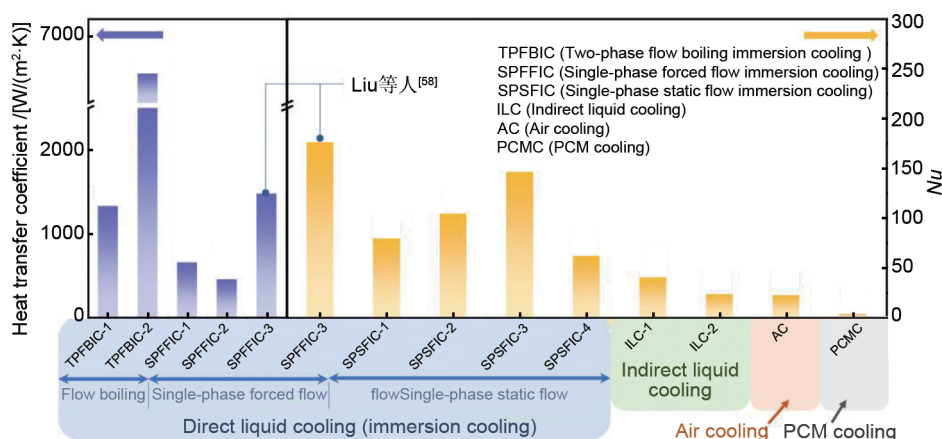


图5 不同冷却方式下电池热管理系统传热性能对比^[58]

Fig. 5 Comparison of heat transfer performance of BTMS with different cooling methods^[58]

因此, 未来的系统设计需在深刻理解上述机理的基础上, 结合冷却液物性优化流速范围与流道结构, 从而在降低泵功消耗与提升传热强化效果之间寻求最佳平衡。

3.4 热失控传播抑制

浸没冷却不仅能够有效抑制电池温升, 还在延缓热失控触发、削弱放热强度以及阻断热扩散路径等方面展现出独特优势。目前的研究主要关注于不同冷却剂、触发形式和电池类型下热失控特性。

首先, 在单体电池的热失控抑制机理方面, 多项研究证实了浸没冷却在降低峰值温度与抑制易燃产气方面的卓越性能。Liu 等人^[62]针对 LFP 电池针刺实验研究表明, 氟化液能显著降低热失控峰值温

度, 并将 H_2 、CO 等易燃气体削减 87% 以上, 成功将热失控后电池限制在“仅发烟、无起火”的安全范围内。Zhao 等人^[63]对 280 Ah 大型单体 LFP 进行了过热、过充、针刺和外部短路等滥用情况的实验。研究表明, 在过热和过充触发条件下, 分别将电池最高温度削减了 73.9% 和 70.2%, 将过充工况下的过渡阶段延长 5%。针刺触发下, 由于冷却液通过针孔浸入电池内部吸热, 阻止了电池爆炸危害。Li 等人^[64]研究了全浸没液冷对 LFP 过充热失控的抑制作用, 发现该技术通过高效吸热和快速冷却安全阀喷出物, 能在 1/3 C 倍率下完全阻断热失控, 最高温度限制在 110.45℃, 而在未浸没环境中, 电池温度高达 350℃; 在 1 C 和 3 C 高倍率下将峰值

温度控制在 200℃ 以内,显著延缓了内短路并降低了电池的综合危险性。

其次,在模组级热失控抑制方面,浸没冷却为高紧凑模组的安全设计提供了新思路。Zhang 等人^[65]的实验显示,浸没液体具有优越的热导率和比热容,能够在热失控事件中高效吸收和散热,浸没冷却能将阻断热蔓延的临界安全间距从自然对流下的 5.0 mm 显著压缩至 3.0 mm,相邻电池的峰值温度降低近 60%。在此基础上, Li 等人^[66]和 Bai 等人^[67]分别通过极限热滥用模型和动态冷却实验,验证了该技术在微小间距乃至大型储能电站场景下,均能实现对热蔓延路径的完全阻断,体现了其极致的安全防护能力。

针对冷却液特性与电池体系差异性,学者进行了深入的对比分析。Sheng 等人^[68]与 Liang 等人^[69]对比了碳氢基油、改性硅油及合成酯等介质,发现合成酯与改性硅油在维持液相冷却持续性及抑制峰值温度方面表现更优,而碳氢油则具备更佳的流动散热潜力。然而,浸没冷却的有效性也受限于电池化学体系。Hong 等人^[70]从冷却功率、传热功率和电池自产热功率的三维视角,揭示浸没冷却抑制热失控蔓延的边界条件。研究指出,当相邻电池的表面温度达到临界点时,只有当电池内部的产热功率与相邻电池间的传热功率之和小于冷却液的冷却功率时,热失控蔓延才能被成功抑制(如 LMO 和 LFP 电池)。相反,对于具有更高能量和更剧烈反应的 NCM 软包电池,其抑制效果仍面临挑战。

综上,浸没冷却可以显著削弱热失控强度并抑制模组级热蔓延,在大容量与高紧凑系统中展现出突出的安全优势,但浸没冷却对热失控抑制的传热机理仍不明确。

4 双相浸没式液冷

双相浸没液冷通过冷却液在电池表面的沸腾相变过程,可实现高效散热和更精准的冷却剂温度控制,其换热性能高度依赖于工质的热物性与沸腾表面的微观相互作用。因此,探究不同冷却液的冷却性能、揭示沸腾传热机理以及开发高效的换热强化手段,是当前该领域的研究核心。

4.1 冷却液的性能评估

低沸点氟化液是锂电池双相浸没冷却的优选介质,不同类型产品散热效率表现突出。Li 等人^[71]采

用 FS49 作为冷却液,在 1 C 充放电时模块温差仅 0.4℃ 和 0.3℃,较自然对流降低超 91%,25% 吸液芯填充率下系统质量能量密度提升 13.14%。Wang 等人^[72]选用 HFE-7000 时,5 C 放电时最高温度低至 35.10℃,饱和核态沸腾阶段热流密度为单纯对流的 5 倍。Li 等人^[73]为 4680 电池选用 SF33 作为冷却液,各放电倍率下电池温度稳定在 33~35℃,显著优于自然对流与强制风冷,且高倍率放电时温差更优。上述研究通过宏观实验证实了不同工质在抑制温升方面的有效性,然而,仅从宏观温控效果难以深刻解释沸腾换热的内在规律。

4.2 传热机理

双相沸腾传热是一种由液-汽相变驱动的高效热管理方式,已成为面临极端空间限制和严格热均匀要求的关键解决方案。沸腾过程在四个不同阶段展开^[74]:自然对流、核态沸腾、过渡沸腾和膜态沸腾,其物体表面过热度(ΔT_w)和气泡动力学与其热通量(q'')的关系如图 6 所示。①自然对流:在低表面过热度条件下,液体尚未发生相变,热量主要通过液体的自然对流与导热传递。②核态沸腾:随着表面过热度进一步升高,达到核态沸腾起始点(ONB)时,微观成核点开始产生气泡并周期性生长、脱离表面。该阶段由于气泡生成、增长与脱离引起的强烈微扰与液体再润湿效应,显著强化了局部对流换热与微尺度传热过程,通常表现出极高的传热系数。③过渡沸腾:当表面过热度进一步升高接近临界热通量(CHF)点时,气泡合并形成不稳定蒸汽覆盖区,导致液体再润湿受阻。④膜态沸腾:在更高表面过热度条件下,固体表面被连续稳定的蒸汽膜覆盖,液体与固体表面之间被蒸汽层隔离,导致传热性能显著恶化。

在双相浸没热管理系统的设计中,传热性能与安全边界可由 Rohsenow 关联式^[75]和 Zuber 理论模型^[76]主导,分别如式(1)和式(2)所示。 μ_l 与 $c_{p,l}$ 分别代表冷却液的动力黏度与定压比热容, h_{fg} 为汽化潜热, ρ_l 与 ρ_v 为气液两相密度, σ 为表面张力, Pr_l 为流体的普朗特数, g 为重力加速度, K 为几何与不稳定性常数。其中, C_{sf} 为表面-流体组合常数,反映了发热表面材料、粗糙度与特定流体润湿性的综合影响。上式在数学上论证了通过表面工程(C_{sf}),如通过在电池表面构建多孔涂层、微纳沟槽或仿生粗糙结构,可以有效增加汽化核心密度,强化换热

的有效性, 此外, 冷却液的热物性也是影响 q'' 和 q''_{CHF} 关键因素。

$$q'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_w}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3 \quad (1)$$

$$q''_{CHF} = K \cdot h_{fg} \rho_v^{1/2} [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (2)$$

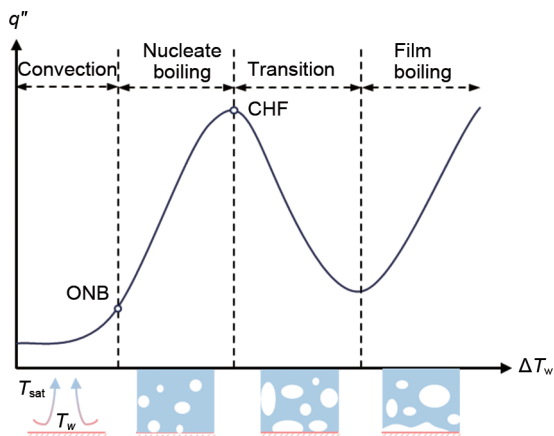


图6 典型池沸腾换热曲线和气泡动力学的示意图

Fig. 6 Typical pool boiling heat transfer curve and schematic diagram of bubble dynamics

综上所述, 理想的热管理策略应使系统稳定运行于完全发展的核态沸腾区间, 从而在相对较低的壁面和饱和温差条件下实现高热通量的高效移除, 而深入揭示微观层面的气泡动力学行为是了解换热规律的理论基础。Li 等人^[77]利用高速摄影技术对沸腾气泡动力学进行了可视化研究[图 7(a)]。结果表

明, 当电池表面温度突破冷却液沸点时, 传热机制由单相自然对流向核态沸腾转变。气泡的成核与脱离诱发的剧烈流体扰动显著强化了对流换热。此外, 随着充电速率的增加, 气泡的平均直径和逸出频率也随之增加。Wang 等人^[78]的可视化研究表明, 沸腾过程具有显著的区域选择性。气泡优先在导线连接及安全阀等粗糙表面成核, 随后在上升过程中发生聚合, 这有效地破坏了热边界层, 显著强化了对流换热。从上述研究可知, 汽化核心生成与脱落是决定换热性能的关键因素。然而, 目前在电池热管理领域中缺乏强化传热机理的量化模型。

4.3 强化传热措施

基于上述传热机理, 通过增加成核位点, 强化汽化核心生成与脱落过程, 是实现强化换热的有效途径。Lyu 等人^[79]发现无外壳锂电池表面粗糙度更高, 对比带外壳的光滑表面, 气泡生成的活性位点更多, 能促进气泡快速生成与脱落, 沸腾换热更均匀, 3 C 充放电温差低至 2.89℃ 和 2.67℃。Chen 等人^[80]在电池表面贴合超亲水性泡沫铜[图 7(b)], 借助毛细效应将液体输送至未浸没区域, 让更多表面区域具备气泡产生条件, 25% 浸没高度下较传统浸没冷却降温 5.2℃, 冷却剂用量减少 76.8%。Zhou 等人^[81]采用 CNT 巴基纸的纳米多孔结构, 既提供了高密度纳米级核化位点, 又通过强毛细效应加速气泡脱离后的液体补给, 使临界热流密度和换热系数较光滑 ITO 薄膜分别提升 74.2% 和 102%。

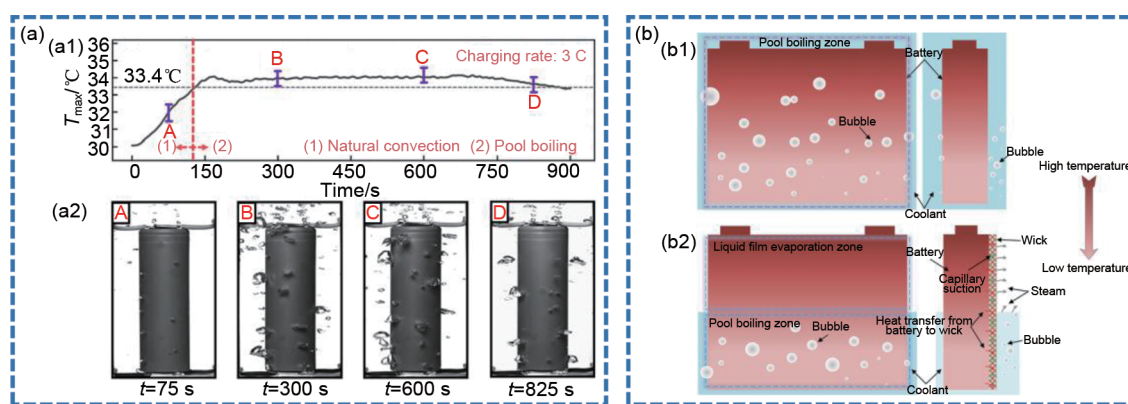


图7 (a) 气泡特性分析^[77]; (b) 强化换热措施^[80]

Fig. 7 (a) Bubble characteristic analysis^[77]; (b) Measures for enhanced heat transfer^[80]

5 市场应用

5.1 间接冷板液冷

凭借结构灵活、调控便捷及成本可控等显著优

势, 间接冷板液冷技术确立了在车用动力电池与储能领域的商业化主流地位, 是目前工程应用最为成熟的液冷方案。

在车载领域, 该技术贴合电池包紧凑布局特

点,可适配不同车型的热管理与安全需求,成为企业的首要选择。理想MEGA^[82]搭载的麒麟5C电池包采用“三明治夹心”间接冷板,结合PCM与隔热材料精准温控,热失控时能快速隔离热量;特斯拉Model 3^[83]通过底部集成式蛇形冷板,实现电芯与冷却液隔离散热,保障了电池控温均匀性与使用安全性。在电化学储能电站领域,湖南湘潭集装箱储能电站^[84]采用阵列式两相冷板,让电池充放电全周期舱内最大温差 $\leq 3^{\circ}\text{C}$,有效避免局部热积聚;GSL ENERGY^[85]160 kW/418 kWh液冷储能柜,依托间接冷板的冷热协同策略实现 -20°C 低温稳定运行。综上所述,间接冷板热管理技术正持续推动新能源汽车与储能系统向更高安全和更高性能方向发展,成为不可或缺的核心工程解决方案。

5.2 浸没式液冷

浸没式液冷技术在电池热管理领域的应用呈现出“高端向大众渗透,由车载向储能爆发”的发展趋势。起初,该技术主要应用于超跑与概念车型;随后,凭借其卓越的安全性,在大型储能电站中率先实现了规模化落地。

在车载领域,浸没式冷却技术经历了从高性能超跑向大众乘用车过渡的过程。早在2015年,Koenigsegg便推出插电式混合动力超跑Regera^[86]。该车型摒弃了传统水冷板的复杂管路,在简化结构的同时显著提升了电池对极高倍率充放电的散热能力。2020年^[87],Faraday Future与MIVOLT合作,针对FF 91豪华电动汽车开发了全浸没式电池冷却系统。该合作项目进一步证实,浸没式冷却在提升充电速率、优化冷却均温性、降低系统重量及成本方面具有显著优势。2022年^[88],TotalEnergies将浸没冷却技术应用于Volvo XC60插电式混合动力车,验证了介电流体在提升系统效率、安全性及延长电池寿命方面的潜力。进一步地,到2025年^[89],该公司将该技术集成至大众市场车型Renault Mégane E-Tech中,将充电时间缩减50%并提升6%的续航里程。相较于车载应用,储能电站虽对系统重量敏感度较低,但对安全性的要求极高。2023年3月^[90],南方电网梅州宝湖储能电站正式投入运行,成为全球首个百兆瓦级浸没式液冷储能电站。该电站预计每年可减少二氧化碳排放超过4.5万吨,兼具生态效益与示范意义。综上所述,浸没式冷却技术正在低成本化、安全化与规模化方

面取得突破性进展,特别是在储能领域与商用车领域展现出广阔的市场应用前景。

6 总结与展望

液冷技术被认为是锂离子电池系统实现高效率与高安全性的核心热管理手段。本文系统综述了间接冷板与浸没式液冷技术的发展脉络,并从冷却液的性能评估、系统结构的设计优化、传热机理,以及热失控传播抑制等维度归纳了最新研究成果。

间接冷板液冷凭借其成熟的工艺,已确立了当前主流热管理方案的地位。研究主要集中在突破传热性能瓶颈与提升安全极限两个方面。在结构设计上,正由传统的规则流道向智能化与仿生化演进,以实现综合性能的提升。此外,复合热管理结构设计可结合多种热管理方案的优势,显著提升了极端情形下的安全性,成为当前研究的热点。未来应聚焦于融合仿生学原理与智能拓扑优化进行结构创新,并深化复合热管理技术的协同应用,旨在最终实现高效散热与热失控抑制的双重目标。

单相浸没液冷具有广阔的应用前景,但目前尚在探索阶段。现有研究表明,该技术的推广主要受限于工质成本与性能的平衡:氟化液性能优异但昂贵;碳氢化合物作为当前最主流的介质,其综合性价比突出;如环境友好型合成酯等新型工质正成为热门研发方向。目前的研究重点在于通过系统结构的优化设计消除流动死区并增强换热性能,并致力于动/静态浸没系统下流动-传热特性的多物理场耦合研究,并证实了浸没冷却在抑制热失控传播方面的显著优势。未来的研究应进一步基于流热耦合换热机理进行结构创新和工质优选,重点强化极端热滥用工况下的有效散热能力,抑制热失控及热蔓延。

双相浸没液冷展现出应对极端热流密度的巨大潜力。当前研究指出,气泡动力学行为是决定其换热极限的关键微观机制,可通过增加成核位点等技术手段,强化汽化核心生成与脱落过程,实现强化换热。未来研究需从气泡动力学的定量调控出发,系统揭示成核位点密度、表面润湿性与微纳结构参数对气泡生成、合并与脱离行为的影响规律,并建立其与临界热流密度及换热系数之间的内在关联模型。

参考文献

- [1] 梁沁沁,韩方源,唐彬,等. 锂/钠电池热管理系统中液冷技术研究进

- 展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(1): 275-292.
- LIANG Q Q, HAN F Y, TANG B, et al. Research progress on liquid cooling for thermal management of lithium-and sodium-batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(1): 275-292.
- [2] 刘树宇, 罗丁. 均热板耦合热电制冷器的方形电池热管理系统数值研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(1): 266-274.
- LIU S Y, LUO D. Numerical investigation of flat battery thermal management system integrated with vapor chamber and thermoelectric coolers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(1): 266-274.
- [3] NASIRI M, HADIM H. Advances in battery thermal management: Current landscape and future directions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 200: 114611. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114611.
- [4] CHEN K, WU W X, YUAN F, et al. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern[J]. Energy, 2019, 167: 781-790. DOI:10.1016/j.energy.2018.11.011.
- [5] 金远, 韩甜, 韩鑫, 等. 锂离子电池热管理综述[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(S1): 23-30.
- JIN Y, HAN T, HAN X, et al. A review on thermal management techniques for lithium-ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(S1): 23-30.
- [6] WU W X, YANG X Q, ZHANG G Q, et al. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138: 486-492. DOI:10.1016/j.enconman.2017.02.022.
- [7] 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. DOI: 10.20168/j.1009-0029.2024.05.620.06.
- WANG S, LI X, JIANG W, et al. Research progress in thermal management system of lithium-ion battery on liquid cooling[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(5): 620-625. DOI: 10.20168/j.1009-0029.2024.05.620.06.
- [8] KOUCHEH A B, SHARBATI P, ÜNLÜ C, et al. Comprehensive evaluation of battery cooling mechanisms including two-phase immersion with 3 M[™] NOVEC[™] -7000 and 7100[J]. Energy Conversion and Management, 2026, 348: 120780. DOI:10.1016/j.enconman.2025.120780.
- [9] LIAO G L, WANG W D, ZHANG F, et al. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system based on nanofluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 118997. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.118997.
- [10] ADHIKARI N, BHANDARI R, JOSHI P. Thermal analysis of lithium-ion battery of electric vehicle using different cooling medium[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122781. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122781.
- [11] 侯峻升, 李栋宇, 黄磊, 等. 氧化铝纳米流体液冷电池热管理性能研究[J/OL]. 化工学报, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.1946.TQ.20251230.1957.004>.
- HOU J S, LI D Y, HUANG L, et al. Research on aluminum oxide nanofluid liquid cooling battery thermal management performance [J/OL]. CIESC Journal, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.1946.TQ.20251230.1957.004>.
- [12] 曹嘉豪. 液体冷却与相变材料耦合式电池热管理系统的性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- CAO J H. Performance investigation on liquid cooling and phase change material coupled battery thermal management system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [13] SUI Z G, LIN H S, SUN Q, et al. Multi-objective optimization of efficient liquid cooling-based battery thermal management system using hybrid manifold channels[J]. Applied Energy, 2024, 371: 123766. DOI:10.1016/j.apenergy.2024.123766.
- [14] FU L X, ZHANG Z D, SHENG L, et al. Pouch lithium-ion battery thermal management by using a new liquid-cooling plate with honeycomb-like fins[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 69: 105945. DOI:10.1016/j.csite.2025.105945.
- [15] SHI C W, XU J, GUO Z C, et al. Passive flow rate regulation and unequally spaced channel based battery thermal management system[J]. Energy, 2025, 320: 135331. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135331.
- [16] AN Z J, ZHAO S F, DU X Z, et al. Optimization design of lithium-ion battery thermal management system based on thermal resistance network analysis and cold plate arrangement[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 68: 104335. DOI:10.1016/j.tsep.2025.104335.
- [17] DONG H Y, CHEN X C, YAN S T, et al. Multi-objective optimization of lithium-ion battery pack thermal management systems with novel bionic lotus leaf channels using NSGA-II and RSM[J]. Energy, 2025, 314: 134226. DOI: 10.1016/j.energy.2024.134226.
- [18] RADMAN G, MOJRA A, SOLTANI M, et al. Bio-inspired porous channels for thermal management of lithium-ion batteries: The PorousMorphoGrid approach[J]. Energy Conversion and Management, 2026, 347: 120550. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120550.
- [19] LIU N, JIANG Y M, LIU X J, et al. Thermal performance analysis and structure optimization of bionic shark skin channel liquid cooling plate for lithium ion battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 127683. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127683.
- [20] HUANG Z H, PU J H, DING Z L, et al. Advanced thermal management of LiFePO₄ battery modules: A liquid cold plate design via non-uniform heat source topology optimization[J]. Journal of Power Sources, 2026, 663: 238938. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.238938.
- [21] SUN W, LI P, CHENG W M, et al. Novel hybrid thermal management system for cylindrical lithium-ion battery based on CPCM and topology-optimized liquid cooling[J]. Energy, 2025, 329: 136719. DOI:10.1016/j.energy.2025.136719.
- [22] GUO C, LIU H L, GUO Q, et al. Investigations on a novel cold plate achieved by topology optimization for lithium-ion batteries

- [J]. *Energy*, 2022, 261: 125097. DOI:10.1016/j.energy.2022.125097.
- [23] LIN X W, SHI M Y, ZHOU Z F, et al. Multi-objective topology optimization design of liquid-based cooling plate for 280 Ah prismatic energy storage battery thermal management[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 325: 119440. DOI:10.1016/j.enconman.2024.119440.
- [24] AN Z G, LI D L, ZHANG C J, et al. Behaviours of thermal management system with micro channels for cylindrical Lithium-ion cells under Fuzzy-PID control strategy[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121089. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121089.
- [25] MOHAPATRA J R, MOHARANA M K, PANCHAL S. Indirect liquid-cooled lithium-ion battery module with improved circuitous minichannel cold plate design: A numerical study involving the effect of different flow configurations[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2025, 150(21): 17841-17868. DOI: 10.1007/s10973-025-14647-1.
- [26] HUANG L, PIONTEK U, CHEN M B, et al. Thermal performance of cold plate based on phase change emulsion for Li-ion battery [J]. *Energy*, 2023, 282: 128743. DOI: 10.1016/j.energ.2023.128743.
- [27] JIANG G W, WEN H, PENG C Y. A novel battery thermal management based on composite phase change material with liquid-assisted cooling for different ambient temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 252: 123686. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.123686.
- [28] CHEN H F, WEI G S, XU L, et al. Performance study on a novel hybrid thermal management system for cylindrical lithium-ion battery pack based on liquid cooling and PCM[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 271: 126392. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126392.
- [29] FAN Y W, WANG Z H, YANG H N, et al. Performance analysis and optimized design of hybrid battery thermal management system integrating leak-free PCM with liquid cooling under extreme temperature conditions[J]. *Energy*, 2025, 341: 139404. DOI:10.1016/j.energy.2025.139404.
- [30] GONG J L, LI L, GONG J H. Hybrid cooling systems for suppressing thermal runaway propagation in a lithium-ion battery module[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 64: 103845. DOI:10.1016/j.tsep.2025.103845.
- [31] LIU Y, ZHOU Z F, WU W T, et al. Simulations on hybrid thermal management of mini-channel cold plate and PCM for lithium-ion batteries under discharging and thermal runaway conditions[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 60: 104837. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104837.
- [32] HAN X J, LI C R, LYU P Z, et al. Research on thermal runaway propagation of lithium-ion batteries based on cold plate cooling and flame-retardant materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 110: 115271. DOI:10.1016/j.est.2024.115271.
- [33] XIN Z C, TANG W Y, YAO W, et al. A review of thermal management of batteries with a focus on immersion cooling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 217: 115751. DOI:10.1016/j.rser.2025.115751.
- [34] 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.
- ZENG S H, WU W X, LIU J Z, et al. A review of research on immersion cooling technology for lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(9): 2888-2903.
- [35] LI W L, WANG Y W, WU W Y, et al. Analysis of immersion cooling performance for LiFePO₄ battery packs: Coolant effect and optimization[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 64: 103830. DOI:10.1016/j.tsep.2025.103830.
- [36] SHAH R, HUANG C, KARMAKAR G, et al. Potential of natural esters as immersion coolant in electric vehicles[J]. *Energies*, 2025, 18(15): DOI:10.3390/en18154145.
- [37] GAO Q, LU Y, LIU X D, et al. A novel pulse liquid immersion cooling strategy for lithium-ion battery pack[J]. *Energy*, 2024, 310: 133266. DOI:10.1016/j.energy.2024.133266.
- [38] ABDEL-HAFEEZ A M, EFFAT M B, HASSAN O, et al. Effect of intercell spacing and operating conditions on the performance of prismatic lithium-ion batteries cooled by dielectric immersion Fluids: A numerical study[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 211: 109680. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.109680.
- [39] ZENG Z, YUAN N L, SONG C Y, et al. Integrating CFD and data-driven techniques for the optimization of dielectric coolants in EV battery immersion cooling systems[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 162: 108591. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108591.
- [40] LIU Q, JU X, QU T, et al. Single-phase immersion fluid selection for Li-ion battery modules: From the viewpoint of heat transfer[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 118: 116265. DOI:10.1016/j.est.2025.116265.
- [41] LIU J H, CHEN H, YANG M J, et al. Comparative study of natural ester oil and mineral oil on the applicability of the immersion cooling for a battery module[J]. *Renewable Energy*, 2024, 224: 120187. DOI:10.1016/j.renene.2024.120187.
- [42] CAO X, SHI Q L, LIU Q, et al. Full-scale simulation of a 372 kW/372 kWh whole-cluster immersion cooling lithium-ion battery cluster and battery thermal management system design[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 63: 105377. DOI:10.1016/j.csite.2024.105377.
- [43] DAI H S, YANG C X, ZHANG F, et al. Transient heat dissipation performance investigation on the battery thermal management system based on S-CO₂ immersion cooling[J]. *Energy*, 2025, 318: 134656. DOI:10.1016/j.energy.2025.134656.
- [44] 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. DOI:10.1016/j.est.2024.112588.
- [45] HUSSAIN M, KHAN M K, PATHAK M. Thermal management of high-energy lithium titanate oxide batteries using an effective channeled dielectric fluid immersion cooling system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 313: 118644. DOI:10.1016/j.

- enconman.2024.118644.
- [46] YOU N, CHINNASAMY V, LEE M, et al. Correlation analysis between design parameters and cooling performance in 21700 battery module using immersion cooling[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 68: 104368. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.104368.
- [47] BANERJEE R, NIDHUL K. Effect of various dielectric fluids on temperature homogeneity of Li-ion battery pack in an energy efficient novel immersion cooling design[J]. Results in Engineering, 2025, 26: 104688. DOI:10.1016/j.rineng.2025.104688.
- [48] LI W L, WANG Y W, HE B, et al. Influence of structural parameters on immersion cooling performance of a 1P52S 280 Ah prismatic LiFePO₄ battery pack[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 261: 125185. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125185.
- [49] JEDARI SALEHZADEH F, HEYHAT M M. Direct and indirect cooling of lithium-ion batteries with new manifold designs[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 68: 104325. DOI:10.1016/j.tsep.2025.104325.
- [50] ZHOU R T, LUO Y H, ZHU C L, et al. Channel design for immersed battery thermal management system based on 3D topology optimization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 256: 128050. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.128050.
- [51] HU H S, XU J X, LI J Y, et al. Immersion coupled direct cooling with non-uniform cooling pipes for efficient lithium-ion battery thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 116: 116010. DOI:10.1016/j.est.2025.116010.
- [52] SURESH PATIL M, SEO J H, LEE M Y. A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113715. DOI:10.1016/j.enconman.2020.113715.
- [53] BAO R Q, WANG Z H, GAO Q J, et al. Dynamic-static composite immersion cooling for improving thermal equalization behavior in lithium-ion battery packs[J]. Energy, 2025, 330: 136774. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136774.
- [54] LI W H, LI A, YIN YUEN A C, et al. Optimisation of PCM passive cooling efficiency on lithium-ion batteries based on coupled CFD and ANN techniques[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 259: 124874. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.124874.
- [55] LIU J H, FAN Y N, XIE Q M. Feasibility study of a novel oil-immersed battery cooling system: Experiments and theoretical analysis[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 208: 118251. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.118251.
- [56] ZHONG K W, WANG C H, LUO Q Y, et al. Experimental study of a novel guided sequential immersion cooling system for battery thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124337. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.124337.
- [57] MA R X, XUAN W C, JIANG Z K, et al. Natural convection characteristics of novel immersion liquid applied to battery thermal management in static mode[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 101: 113927. DOI:10.1016/j.est.2024.113927.
- [58] LIU Q, LIU Y Y, ZHANG M J, et al. Comprehensive investigation of the electro-thermal performance and heat transfer mechanism of battery system under forced flow immersion cooling[J]. Energy, 2024, 298: 131404. DOI:10.1016/j.energy.2024.131404.
- [59] MO C M, YUEN A C Y, WU Y X, et al. Investigation on electro-thermal characteristics and heat transfer of immersion cooling for lithium-ion battery module at high-ambient temperature[J]. Journal of Power Sources, 2025, 645: 237238. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.237238.
- [60] WANG D, KONG D P, PING P, et al. Synthetic ester immersion cooling for lithium-ion batteries: A comparison of electro-thermal balancing under static and dynamic conditions and heat transfer analysis[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 141: 119072. DOI: 10.1016/j.est.2025.119072.
- [61] CHENG W M, CHEN M Y, OUYANG D X, et al. Investigation of the thermal performance and heat transfer characteristics of the lithium-ion battery module based on an oil-immersed cooling structure[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 79: 110184. DOI: 10.1016/j.est.2023.110184.
- [62] LIU X Y, LI Y, GAO S, et al. Suppression thermal runaway propagation of LiFePO₄ batteries during nail penetration test based on liquid immersion cooling[J]. Energy, 2025, 330: 136973. DOI:10.1016/j.energy.2025.136973.
- [63] ZHAO L H, SONG G H, YANG X L, et al. Experiments on the effects of liquid immersion cooling on the thermal runaway (TR) behaviors of 280 Ah lithium-ion batteries subjected to different TR-triggering conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 121: 116358. DOI:10.1016/j.est.2025.116358.
- [64] LI J X, OU J R, ZENG S H, et al. Immersion cooling enabled thermal runaway prevention in overcharged batteries: Mechanisms and metrics[J]. Applied Energy, 2025, 401: 126798. DOI:10.1016/j.apenergy.2025.126798.
- [65] ZHANG Z D, SHENG L, ZHANG H J, et al. Thermal runaway avoidance via liquid-immersion for cylindrical lithium-ion batteries: Experimental characterizations[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 217: 110047. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.110047.
- [66] LI X T, ZHOU Z Y, ZHANG M J, et al. A liquid cooling technology based on fluorocarbons for lithium-ion battery thermal safety[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 78: 104818. DOI:10.1016/j.jlp.2022.104818.
- [67] BAI P X, XU R C, LIU M Y, et al. Thermal runaway characteristics of LFP batteries by immersion cooling[J]. ACS Applied Energy Materials, 2023, 6(13): 7205-7211.
- [68] SHENG L, LAN H Y, TAO B J, et al. Experiments on liquid-immersed thermal runaway management for large energy-stored lithium-ion battery modules[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 68: 104347. DOI:10.1016/j.tsep.2025.104347.
- [69] LIANG C, LAI X, SHEN K, et al. Experimental study on immersion cooling for delaying thermal runaway propagation in lithium-ion battery modules[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2026, 206: 108333. DOI:10.1016/j.psep.2025.108333.

- [70] HONG Y, JIN C Y, CHEN S Q, et al. Experimental study of the suppressing effect of the primary fire and thermal runaway propagation for electric bicycle batteries using flood cooling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 435: 140392. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.140392.
- [71] LI Y, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Thermal management for the prismatic lithium-ion battery pack by immersion cooling with Fluorinated liquid[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257: 124453. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.124453.
- [72] WANG Y F, WU J T. Thermal performance predictions for an HFE-7000 direct flow boiling cooled battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 207: 112569. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112569.
- [73] LI C E, WANG Y H, SUN Z W, et al. Two-phase immersion liquid cooling system for 4680 Li-ion battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 97: 112952. DOI: 10.1016/j.est.2024.112952.
- [74] FAN S M, DUAN F. A review of two-phase submerged boiling in thermal management of electronic cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 150: 119324. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119324.
- [75] ROHSENOW W M. A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1952, 74(6): 969-975. DOI:10.1115/1.4015984.
- [76] ZUBER N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer[D]. Los Angeles: University of California, 1959.
- [77] LI Y, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Thermal management for the 18650 lithium-ion battery pack by immersion cooling with fluorinated liquid[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73: 109166. DOI:10.1016/j.est.2023.109166.
- [78] WANG Y H, LI C E, WEN X D, et al. Experimental studies on two-phase immersion liquid cooling for Li-ion battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108748. DOI:10.1016/j.est.2023.108748.
- [79] LYU P Z, XIAO Y L, FAN X L, et al. Effect of battery surface microtopography on immersion boiling thermal management for lithium-ion batteries[J]. *Renewable Energy*, 2026, 256: 124258. DOI:10.1016/j.renene.2025.124258.
- [80] CHEN K, TANG A K, PAN J, et al. Experimental study on heat transfer characteristics and capillary-assisted enhancement of dual-phase immersion battery thermal management system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 322: 119149. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119149.
- [81] ZHOU W B, MA H L, HU Y K, et al. Nucleate boiling enhancement of FC-72 on the carbon nanotube buckypaper for two-phase immersion cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 228: 125639. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125639.
- [82] 理想汽车. 理想 MEGA 搭载的麒麟 5C 电池,到底有多牛?[EB/OL]. [2023-11-22]. <https://www.lixiang.com/community/detail/article/1006191.html>.
- [83] TESLA. 特斯拉冷却系统总览[EB/OL]. [2026-01-17]. <https://service.tesla.com/docs/Model3/ServiceManual/2024/zh-cn/GUID-20303222-BAF1-4E9B-B559-62A3286559DC.html>.
- [84] 张雅新, 张泉, 姜旭静, 等. 集装箱式储能电站两相冷板液冷系统的温控效果研究[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(6): 1921-1928. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0029.
- ZHANG Y X, ZHANG Q, LOU X J, et al. Study on the temperature control effect of a two-phase cold plate liquid cooling system in a container energy storage power station[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(6): 1921-1928. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0029.
- [85] GSL ENERGY. GSL-bess80k208kwh / 261kwh / 418kwh liquid-cooled battery energy storage system(bess) | gsl energy[EB/OL]. [2025-07-03]. <https://www.gsl-energy.com/gsl-bess80k208kwh-261kwh-418kwh-liquid-cooled-battery-energy-storage-system-bess.html>.
- [86] REGERA. 800V battery pack[EB/OL]. [2026-01-30]. <https://www.koenigsegg.com/800v-battery-pack>.
- [87] FARADAY FUTURE. FARADAY future 与 mivolt (m&i materials) 合作,独家推出全浸没式电池冷却系统[EB/OL]. [2020-12-02]. <https://www.faradayfuturecn.com/cn/press-room/FF-partner-with-Mivolt>.
- [88] TOTALENERGIES. Immersion cooled battery technology for electric vehicles | projects | ricardo[EB/OL]. [2020-12-01]. <https://www.ricardo.com/en/projects/immersion-cooled-battery-technology-for-electric-vehicles>.
- [89] TOTALENERGIES. A world first: totalenergies lubrifiants integrated an immersion-cooled battery in the renault mégane e-tech[EB/OL]. [2025-03-03]. <https://lubricants.totalenergies.com/news-press-releases/world-first-totalenergies-lubrifiants-integrated-immersion-cooled-battery>.
- [90] 中国南方电网有限责任公司. 全球首个浸没式液冷电池储能电站投入运行[EB/OL]. [2023-03-15]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c27454797/content.html>.