

浸没液体冷却技术在动力电池热管理中的应用研究进展

朱剑杰¹ 庄园¹ 欧阳洪生^{1,2} 卢永杰¹ 严昱昊¹ 吴曦蕾¹ 叶恭然¹ 张灿灿³
吴玉庭³ 韩晓红¹

(1 浙江大学制冷与低温研究所 浙江省制冷与低温技术重点实验室 杭州 310027;

2 含氟温室气体替代及控制处理国家重点实验室 浙江省化工研究院有限公司 杭州 310023;

3 北京工业大学强化传热与节能教育部重点实验室 传热与能量转换北京市重点实验室 北京 100124)

摘要 电池热管理系统是纯电动汽车非常重要的组成部分。随着液体浸没技术在电子设备领域的成功应用,该技术在电池热管理系统中的应用也越来越受到重视。动力电池浸没液冷技术是将电池直接浸没于绝缘流体中,通过对流换热或相变传热来带走电池的热量。从动力电池热管理角度出发,分析了温度对电池性能的影响以及采用不同电池热管理系统的优势和存在的局限性,尤其阐述了采用浸没式电池热管理系统的重要性。在此基础上,详细综述了液体浸没式电池热管理系统目前主要存在的关键技术问题及相关研究进展,包括冷却液的选择、模组设计、寿命和安全性研究等方面。最后概述了部分厂商进行探索或示范性工作所开发的动力电池浸没液冷产品。

关键词 动力电池; 电池热管理; 浸没液冷; 冷却液; 模组设计

中图分类号: TB61¹; TM912; TQ051.5

文献标识码: A

The State of the Art of Immersion Liquid Cooling Technology for Power Battery Thermal Management Applications

Zhu Jianjie¹ Zhuang Yuan¹ Ouyang Hongsheng^{1,2} Lu Yongjie¹ Yan Yuhao¹
Wu Xilei¹ Ye Gongran¹ Zhang Cancan³ Wu Yuting³ Han Xiaohong¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, 310027, China; 2. State Key Lab for Fluorine Greenhouse Gases Replacement and Control Treatment, Zhejiang Research Institute of Chemical Industry, Hangzhou, 310014, China; 3. MOE Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

Abstract The battery thermal management system is a very important component of pure electric vehicles. With the promising application of liquid immersion technology in the field of electronic equipment, its application in battery thermal management systems has also received increasing attention. Power battery immersion liquid cooling technology is to directly immerse the battery in an insulating fluid and remove the heat from the battery through convection heat transfer or phase change heat transfer. From the perspective of power battery thermal management, the impact of temperature on battery performance and the advantages and limitations of using different battery thermal management systems are comparatively analyzed in this work, and the importance of an immersed battery thermal management system is explained. On this basis, the current key technical issues and related research progress of the liquid immersed battery thermal management system are reviewed in detail, including coolant selection, module design, life and safety research. Finally, the power battery immersion liquid cooling products developed by some manufacturers for exploration or demonstration work are introduced.

Keywords power battery; battery thermal management; immersion liquid cooling; coolant; module design

基金项目: 国家自然科学基金(52076185)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(No.52076185).) 收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-01-26; 录用日期: 2024-01-29

为了应对能源危机,减少碳排放,我国提出了“2030 年达到碳达峰,2060 年达到碳中和”的目标。在此背景下,近年来我国新能源汽车发展迅速,纯电动汽车由于具有高效能和低污染的优势,其市场更是呈现强势增长态势。图 1 所示

为 2017—2022 年纯电动汽车销量占比情况,2022 年纯电动汽车占中国新能源汽车销量的 78%^[1]。动力电池是电动汽车的关键部件之一,为了满足当前电动汽车的高运行需求,动力电池必须具有足够高的比功率和比能量密度,目前锂

锂离子电池由于具有能量密度高、循环性能好、无记忆效应以及环境较友好等特点^[2],已经广泛应用于电动汽车动力电池等储能系统中,其中以三元锂电池和磷酸铁锂电池为主^[3]。然而,锂离子电池的性能受工作温度的影响很大,过高的温度会造成电池循环寿命下降^[4],严重时甚至会引发热失控;而过低的温度则会降低电池容量^[5],研究表明,锂离子电池的最佳工作温度为 15~35 ℃^[6]。因此,必须对锂离子电池系统采取有效的热管理手段,确保电池在合理的温度范围内运行,以达到改善电池性能、延长循环寿命和提高整车安全性能的目的。

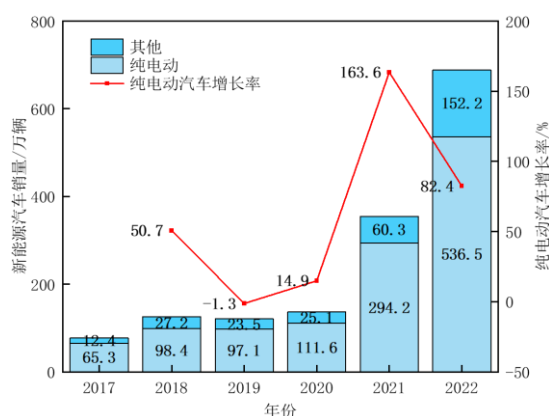


图 1 2017—2022 年纯电动汽车销量占比情况^[1]

Fig.1 Sales proportion of pure electric vehicles from 2017 to 2022^[1]

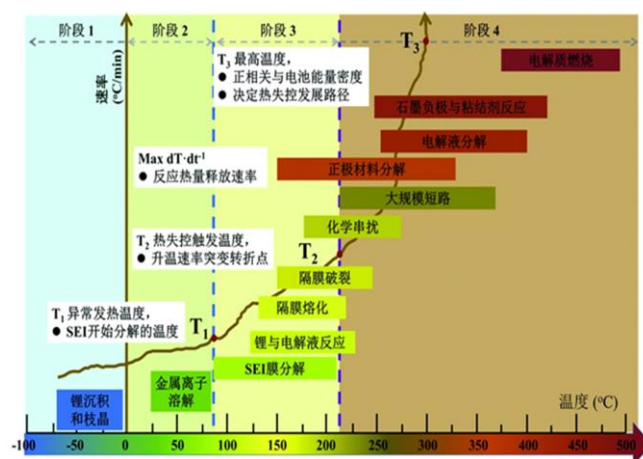
本文从锂离子电池的温度特性出发,分析了高温、低温以及温差对锂离子电池的影响,并评价了目前主要的电池热管理系统。然后从冷却液选择、电池模组设计等方面展开,综述了国内外浸没式电池热管理系统 (battery thermal management system, BTMS) 的研究进展,给未来浸没式电池热管理系统的设计提供一定的参考。

1 电动汽车电池热管理

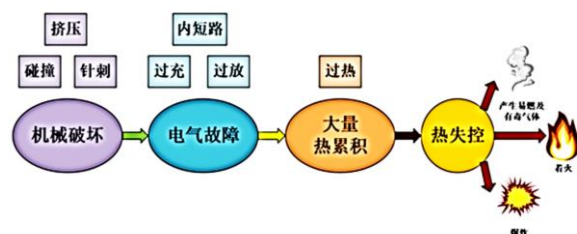
1.1 温度对锂离子电池的影响

锂离子电池的性能及寿命受其工作温度的影响很大。温度过高或过低均会对锂离子电池的使用造成不同程度的不良影响,此外锂离子电池组内的温差也是影响电池组性能的关键参数之一。

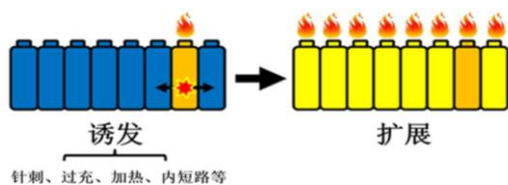
高温对电池的影响主要表现为循环容量衰减加快^[4]、放电容量的下降^[7-8]、加剧自放电现象^[9]以及提高热失控 (thermal runaway, TR) 的风险^[10-11]。P. Ramadass 等^[4]的实验结果表明,在室温和 45 ℃ 环境下,索尼 18650 锂离子电池在经历了 800 次循环充放电后,容量分别损失了 30% 和 36%,而 55 ℃ 环境下的电池在经历了 490 次循环充放电后,容量损失高达 70%。当热量持续累积,电池温度超过一定值,就有可能引发热失控。图 2(a)所示为锂离子电池热失控机理及流程。热失控的诱因主要包括机械破坏、电气故障和热的大量累积^[12],其中大量热累积是引发热失控的直接原因(图 2(b))。由于锂电池能量密度高,当单体电池发生热失控将极有可能引发相邻电池的热失控,并且燃烧速度极快,若有人被困车中,危险性远高于传统燃油车^[13]。



(a)锂离子电池热失控机理及流程^[14]



(b)热失控原因及危害



(c)单体电池热失控引发相邻单体的热失控^[15]

图 2 锂离子电池热失控

Fig.2 Lithium-ion battery thermal runaway

低温对电池的影响主要表现为析锂^[16-18]、充放电容量下降^[19]、可接受充放电倍率下降^[20]、使用寿命下降。A. Senyshyn 等^[4]在 230~320 K 的环境温度范围内,对正极材料为 LiCoO₂ 的 18650 圆柱锂电池进行了放电实验,结果发现在 260~320 K 的温度区间,电池的放电容量变化较小,但是当温度低于 260 K 时,随着环境温度的降低,电池放电容量将显著降低。G. Nagasubramanian 等^[21]研究表明,与 25 °C 环境温度相比,在 -40 °C 环境温度下,电池的功率密度和能量密度分别只有 1.25% 和 5%。

电池组温差对电池组的影响主要表现为电池组内单体电池老化不均匀^[22]、电池组容量降低。Zhou Long 等^[23]建立了一个由 96 个电池串联而成的电池组,当电池组内的温差达到 8 °C 以上时,电池模组的容量会迅速下降。清华大学欧阳明高院士团队^[24],研究了温度不均匀性对电池模组的影响,实验表明,当电池组内的最大温差增大至 5 °C 时,电池组的容量将衰减 1.5%~2%。

1.2 电池热管理系统

考虑到温度对电池性能的影响,目前研究人员正在积极有效地开发电池热管理系统。电池热

管理系统的主要作用为: 1) 确保电池在合理温度范围内工作; 2) 减少电池间的温差; 3) 消除或降低电池组热失控风险^[25]。

根据不同的冷却形式,电池热管理系统可以分为如下几类: 1) 风冷系统,其优势在于低成本、设计简单、质量轻、易于维护且无泄漏问题,但当环境温度过高/低或电池大功率充放电时,将无法满足温度控制需求^[26]; 2) 热管冷却系统,通过热管内工质的气液相变带走热量。拥有优秀的冷却性能,但目前还处于实验阶段^[27]。3) 制冷剂直接冷却系统,通过制冷剂直接流入电池模组冷却板带走热量。其优势在于冷却能力优秀、响应迅速,但其与车载空调系统之间复杂的耦合关系,加大了结构设计和控制的难度^[28]。4) 冷板液冷系统,通过在电池模组冷却板中冷却液的流动带走热量。拥有较好的冷却性能^[29],但需考虑冷却液泄漏风险^[30]。5) 复合冷却系统,是指将多种电池热管理手段耦合的冷却系统,能够对不同的冷却手段取长补短,以达到更好的冷却性能,但同时结构会更加复杂。在复合冷却系统中,具有代表性的是基于相变材料 (phase change material, PCM) 的复合电池热管理系统,因为单独使用 PCM 的电池热管理系统虽然能够有效提高电池模组均温性^[31],但是当相变潜热耗尽,其热管理效果急剧下降,因此在实际使用中需要结合其他冷却方式^[32-33],例如 PCM 耦合热管系统、PCM 耦合冷板系统等。6) 浸没式液体冷却系统是将电池完全浸没于绝缘且不易燃的冷却液中,利用冷却液的循环流动或气液相变过程,迅速带走电池产生的热量,浸没液冷技术作为一项新兴技术,具有散热效率高,温度均匀性好等优势,是解决电动汽车电池热管理问题的一种具有潜力的方案^[34],同时浸没液冷技术在数据中心^[35]、储能电站^[36]也受到广泛关注。表 1 所示为上述电池热管理系统的应用及研究。

表 1 各种热管理系统的应用及研究			
Tab.1 Application and research of various thermal management systems			
热管理系统	应用车型	作者	研究内容
风冷	雷诺 ZOE EV(2016)	Zhao Gang 等 [37]	对风冷电池热管理系统进行整理回顾
	丰田 Prius Prime (2017)		电池组形状对散热的影响
	大众 IDR (2018)	D. Kang 等[38]	
热管冷却	—	Zhang Qiang 等 [39]	采用喷雾冷却对扁平热管冷凝段进行冷却
		A. Alihosseini 等[40]	利用冷却水来为热管冷凝段进行冷却
		K. Shah 等[41]	将热管置于中空圆柱电池内部以提高单体电池均温性
直冷	宝马 i8 (2017) 比亚迪海豚 (2021)	Wang Zhengkun 等[42]	选用 R134a 制冷剂设计了一种直冷系统
		胡远志等[43]	优化设计了一种满足夏季制冷工况电池直冷的集成式热管理系统
		王肖军等[44]	研究制冷剂充注量、膨胀阀开度对直冷系统散热的影响
冷板液冷	特斯拉 Model 3 (2014)	E. Bulut 等[45]	研究冷却板的宽度、高度和入口质量流量对电池组散热的影响
	奥迪 e-tron (2020)	M. Tousi 等[46]	在冷却液中加入 AgO 纳米流体, 并寻找最佳纳米流体体积分数
浸没式	迈凯伦 SpeedTail ^[47]	Le Qin 等 ^[49]	多通道浸入冷却结构
	行竞科技 Miss R ^[48]	Liu Yanhui 等 [50]	浸没液冷与风冷的对比
	Faraday FF91	Liu Jiahao 等 ^[51]	静止和流动情况下电池组散热情况
复合冷却	—	储志亮等 ^[52]	热管耦合风冷
		陈忱等 ^[53]	PCM 耦合热管
		G. Srivastava 等 ^[54]	研究 PCM 层厚度对电池组散热能力的影响
		Peng Peng 等 ^[55] 杨梓堃等 ^[56]	在 PCM 中加入延伸石墨烯来提高其散热性能 PCM 耦合冷板液冷

2 浸没式电池热管理系统

液体浸没式电池热管理系统是将电池完全浸没于绝缘冷却液中, 利用冷却液的循环流动或气液相变迅速带走电池产生的热量, 主要具有以下优势: 1) 提升电池模组的温度均匀性。由于所有电池浸没于液体中, 相比冷板液冷, 进一步降低了接触热阻^[22], 换热更充分。2) 简化系统设计并降低系统复杂性^[57], 有利于提高电池包集成效率。Wu Shangquan 等^[58]设计了一种浸没

液冷电池热管理系统, 该系统采用圆柱电池且电池间距仅为 0.2 mm, 电池包的质量集成率以及体积集成率分别高达 91%和 72%, 是相同布置下间接式冷板冷却系统的 1.1 倍和 1.5 倍。3) 部分冷却液有阻燃效果, 能够降低热失控风险, 提高电池模组的安全性^[59]。行竞科技对比了采用浸没液冷和非浸没液冷的电池组的针刺热失控实验, 发现在浸没液冷电池系统中, 仅被穿刺的

电池发生了爆炸,并未发生链式反应而导致热失控蔓延^[48](图3)。4)降低电动汽车电池的生命周期成本和碳足迹。L. Lander 等^[60]指出,相比空气冷却,浸没液冷的电池生命周期成本可以降低 27%,碳足迹可以减少 25%。

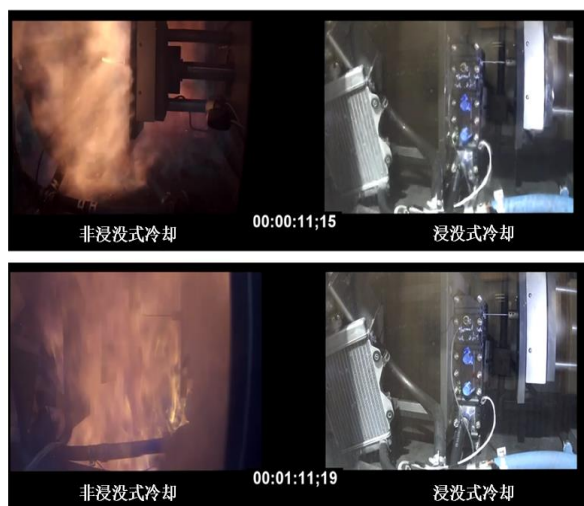


图3 浸没液冷与非浸没液冷电池组穿刺实验对比^[48]
Fig.3 Comparison between immersion and non-immersion liquid-cooled battery pack puncture experiments^[48]

根据冷却液是否在电池组正常工作温度范围内发生相变,可将液体浸没式电池热管理系统分为单相浸没和两相浸没电池热管理系统。相比两相浸没系统,单相浸没系统不涉及气液相变,系统内压力变化小,其模组整体设计难度较低,是目前主流的研究方向;两相浸没系统冷却效果通常优于单相浸没^[61],可满足电池组在高充放电倍率时的热管理需求。考虑到未来电池模组能量密度的持续提升及电池快充技术的进一步发展,用于电池热管理的两相浸没系统也得到密切关注。一般而言,对于液体浸没式电池热管理系统,其所涉及的关键技术问题主要包括冷却液选择、单相或两相浸没式电池模组设计以及浸没式电池模组的寿命和安全性研究等,如图4所示。

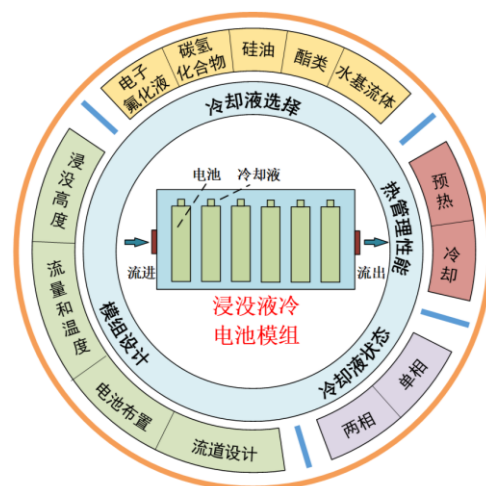


图4 浸没式电池热管理系统研究
Fig.4 Research on immersion battery thermal management system

2.1 冷却液的选择

浸没式电池热管理系统中,冷却液的物性是影响电池组散热的重要参数,对冷却液的物性有严格的要求: 1) 为了防止电池在冷却液中进行短路,需要选择绝缘性能优秀的冷却液,主要包括击穿电压、体积电阻率、饱和含水量等参数; 2) 由于主要依靠冷却液的循环流动或气液相变迅速带走热量,因此需要选择黏度小、导热系数大、比热容大的冷却液^[62],保证系统的冷却效果; 3) 为了减轻电池热管理系统在电池包的质量占比,还要尽可能选择密度小的冷却液; 4) 还需考虑冷却液与电池组的材料兼容性问题,以避免电池因长期浸泡而出现问题,造成安全事故; 5) 冷却液对环境要友好,即冷却液的零臭氧损耗潜值(ozone depletion potential, ODP)和全球变暖潜值(Global Warming Potential, GWP)要低。

对于浸没式电池热管理系统,常用的冷却液包括电子氟化液、碳氢化合物、硅油、酯类物质等(表2)。曾少鸿等^[63]总结分析了这些常用冷却液的物性,并指出电子氟化液和合成碳氢化合物是目前相对使用成熟的冷却液。此外,目前也有研究人员尝试使用水基流体(离子水、水与乙二醇溶液等)作为冷却液。但需要注意的是,直接使用这些水基流体可能会引起短路。因此在使用时,研究人员会对整个电池进行涂层密封^[64]或通过结构设计将电池极耳与水基流体分隔^[65]。

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

冷却液种类	说明	举例	特点
电子氟化液	分为全氟碳类氟化液（PFC，包括全氟烷烃、全氟烯烃、全氟胺、全氟聚醚、全氟酮等）与氢氟醚类（HFE）氟化液等 ^[66]	SF33 ^[67] Novec-7000 ^[68] D-1 ^[61]	1) 优秀的电绝缘性；2) 理想的化学惰性、热稳定性以及良好的材料相容性；3) ODP 和 GWP 低，对环境友好；4) 目前价格较昂贵，使用成本较高；5) 密度比水高 30%~60%，会增加系统质量。
碳氢化合物	来源于石油、天然气、煤干馏产物等,也可用合成的方法制得	矿物油 AmpCool AC-100 ^[69]	1) 使用成本较低；2) 密度为水的 80%~90%，有利于减轻系统质量；3) 存在燃烧风险。
硅油	一种不同聚合度链状结构的聚有机硅氧烷	二甲基硅油 二乙基硅油 苯甲基硅油	1) 使用成本较低；2) 密度比水略小，有利于减轻系统质量；3) 黏度相对较大，流动会消耗更多的泵功。
酯类	可分为合成酯和天然酯	MIVOLT-DF7 ^[70]	1) 使用成本较低；2) 密度比水略小，有利于减轻系统质量；3) 用于浸没液冷电池热管理系统的研究较少。

2.2 浸没式电池模组设计

2.2.1 单相浸没式电池模组设计

针对单相浸没系统,已有部分研究人员通过与其他冷却方式进行对比的形式初步探究了其相应的散热效果。S. Hemavath 等^[71]对比了浸没式（酯类）和自然对流条件下电池的温度变化。结果发现,当环境温度为 25℃,放电倍率为 3C 时,自然对流条件下电池表面最高温度为 52℃,而浸没式条件下为 32℃。P. Dubey 等^[72]对比了浸没式（NOVEC-7500）与冷板式（体积分数为 50%的乙二醇水溶液）电池热管理系统的热管理性能,研究发现在高充放电倍率下,浸没式电池热管理系统中的电池模组有着更低的温升和更小的温差,如在 2C 放电时,浸没式相比于冷板式系统电池模组最高温度低约 20℃,最大温差低约 7.3℃。E. Solai 等^[73]实验研究了 Chemours 公司生产的 CFX70（沸点为 70.6℃）对 8 节 18650 圆柱电池的浸没式液冷效果。G. Pulugundla 等^[74]将 1 节以 3C 倍率放电的 21700 圆柱锂电池浸没在非导电液体中(浸没高度 90%,流量为 0.1 L/min),并与冷板冷却（水/乙二醇溶液,流量为 0.25 L/min）方案对比,放电终止时,

采用浸没液冷的电池温度在 43℃范围内而冷板冷却的电池温度却达到了 60℃;此外,由于冷板仅布置在电池一端,导致电池垂直方向温差较大,整体的温度均匀性不如浸没式液体冷却。G. Satyanarayana 等^[75]对 20 节 10 Ah 锂离子电池组采用不同的冷却方式进行了对比研究,结果表明,在 3C 放电速率下,采用自然风冷、强制风冷以及浸没液冷的电池模块最高温度分别为 83.92、47.13、42.66℃。

研究单相浸没系统冷却性能的影响因素,并在此基础上对整体系统进行合理的设计和优化,不仅能够提高整体系统的热管理性能,而且可以减轻电池模组质量,减少电池热管理系统运行能耗,更好地满足电动汽车轻量化和低能耗的需求,这对于推动单相浸没式电池热管理系统的应用具有重大意义。目前关于单相浸没系统的研究主要集中在电池浸没高度、冷却液进口流量和温度、电池的间距和排布、增加流道设计、复合冷却电池热管理系统开发等方面。

电池浸没高度影响着冷却液的用量与系统

的质量,也影响着冷却液与电池之间的换热效果。Wang Haitao 等^[76]以 5 个容量为 10 Ah 的软包电池为研究对象,将其浸没在变压器油中,实验发现,电池的最高温度和最大温差与电池浸没高度负相关。Liu Qian 等^[77]将 7 个电池串联并浸没在变压器油中,在环境温度为 25 ℃时,通过实验发现随着浸没高度的升高,电池模组的温升和温差降低。一般而言,为了更好的热管理性能,在

进行单相浸没式电池模组设计时均要求电池完全浸没。

冷却液进口流量和温度影响着模组的温度场和系统能耗。因此,合理控制冷却液进口流量和温度,从而以最小的系统能耗完成热管理目标是重要的研究内容。表 3 对部分研究人员的相关研究成果进行了一定的总结归纳。

表 3 冷却液进口流量和温度的研究
Tab.3 Study of coolant inlet flow and temperature

研究人员	冷却液	电池	结果
R. D. Jilte 等 ^[78]	氧化铝纳米流体	7 节 18650 圆柱电池	数值模拟结果显示,冷却液进口温度从 30 ℃增至 35 ℃且电池以 2C 倍率进行放电,电池的最高温度会明显升高;在相同条件下,冷却液静止时的电池温升远高于冷却液流动时的电池温升。
Wang Yanfeng 等 ^[79]	Novec-7000	60 节(5 并 12 串)圆柱电池	数值模拟结果显示,冷却液不发生沸腾情况下,当冷却液进口温度为 25 ℃和 27 ℃时,电池的最高温度分别约为 31.5 ℃和 32.5 ℃。
Liu Jiahao 等 ^[80]	变压器油	1 节 18650 圆柱电池	实验结果显示,在冷却液进口温度为 15 ℃的条件下,当冷却液流量在 3~50 mL/min 的范围内,电池的最高温度可以始终控制在 35 ℃以下。增大流量可以降低电池最高温度,但是当流量超过 15 mL/min 时,降温效果将逐渐减弱。
Huang Chu 等 ^[81]	酯类	4 节圆柱电池	数值模拟结果显示,当冷却液在进口温度为 301.15 K 且质量流量从 0.003 kg/s 升至 0.045 kg/s 时,电池模组的温升可从 3.9 ℃降至 1.5 ℃。
K. V. Jithin 等 ^[82]	去离子水,矿物油,AC-100	4 节圆柱电池	数值模拟结果显示,当质量流量为 0.05 kg/s 时,进口温度为 301.15 K 条件下,3 种冷却液均能使 2C 倍率放电的电池温升小于 5 ℃;黏度大的流体虽然可通过增大流量增强散热效果,但额外的寄生功耗(伴随黏度大的流体增大流量流动时受到的摩擦增大所带来的功耗)不容忽视。

电池的间距和排布,会影响冷却液在电池模组内的流场分布,从而影响模组的换热效果。此外,电池间距还影响冷却液的用量和电池模组体积。因此,探究满足电池模组热管理性能的最小间距和最佳电池排布方式尤为重要。S. Park 等^[83]以 88 节圆柱电池模组为研究对象,矿物油为冷却介质,仿真研究了模组在不同电池间距条件下的散热效果,研究发现,电池间距小的系统功耗更少,并且利于减轻电池组的质量。Wang Yabo

等^[84]研究了电池间距(1、2、4、6、8 mm)对换热效果的影响。结果表明,间距为 1 mm 时换热效果较差。这是由于换热流体的黏度较大,使其在较小的电池间距内流动困难,从而削弱了换热流体与电池之间的热量传递;当间距为 2 mm 时,换热效果有较大提升,但再增大间距换热效果几乎不会提升,这是因为随着电池间距的增大,电池箱体内初始的冷流体容量越多,从而使得冷热流体的置换时间越长。Liu Jiahao 等^[85]也以间距

为变量，并得到了类似的结论，即在一定范围内增大间距能提高换热效果，且提升量会越来越低。不同于电池间距，郭豪文^[86]选用国产 D-1 型电子氟化液，通过实验和数值模拟的方法，研究了针对圆柱电池的排布方式（叉排、顺排）对电池包散热性能和温度场均匀性的影响规律，结果表明，由于叉排对冷却液的流动造成了较大的扰动，使得叉排的换热效果要稍好于顺排。

另外增加流道设计可以提高系统的换热能力和减少冷却液用量。Zha Yunfei 等^[87]提出一种新型的多孔出口管的滴落接触冷却系统，如图 5(a)所示，该设计减少了冷却液用量并提高了热管理性能。M. Larrañaga-Ezeiza 等^[88]加入了限制流道的结构（图 6(a)），引导冷却液流过每一个电池表面，通过该方法减轻了所需流体的质量，并提高了系统的体积能量密度。刘倩等^[89]则提出一种棋盘拓扑分流结构的浸没式冷却方法（图 6(b)）。王宁等^[90]设计了 3 种不同冷却液分布器的电池箱，分别为单管、双管、盘型，并发现双管型分布器的电池箱最优，使模组内各电池最高温度相对于单管型和盘型，分别降低 1.98 °C 和 0.78 °C。此外，H. Choi 等^[91]设计了一种带通隔板和石墨翅片的浸没式结构，以提高电池模组底部的冷却效率，具体结构如图 7 所示。

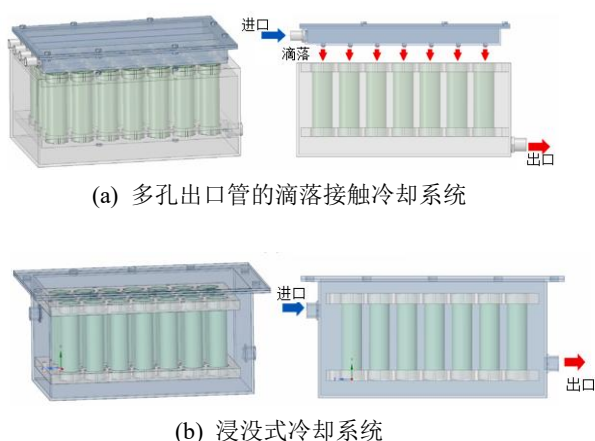
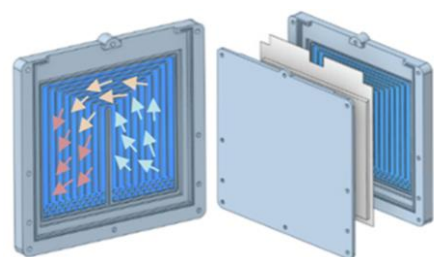
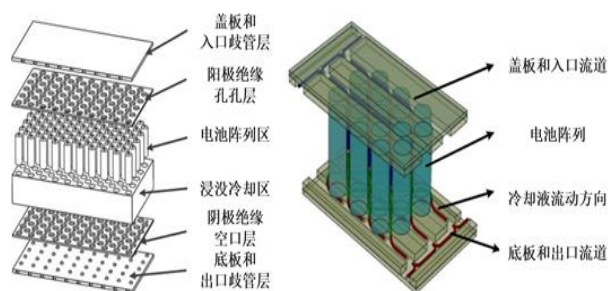


图 5 优化的浸没式冷却系统^[87]

Fig.5 Optimized immersion cooling system^[87]



(a) 注重电池表面冷却的流道^[88]



(b) 棋盘拓扑分流结构^[89]

图 6 流道设计

Fig.6 Flow channel design

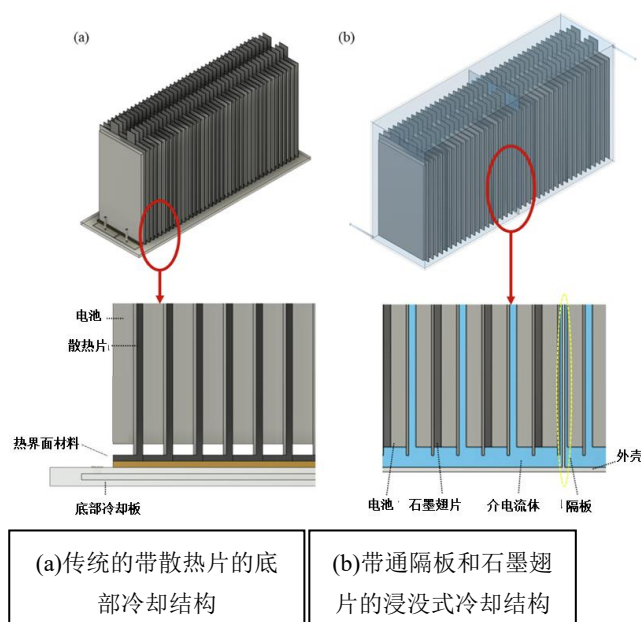


图 7 带翅片的浸没式结构^[91]

Fig.7 Immersion structure with fins^[91]

包含单相液体浸没的复合冷却电池热管理系统也受到了研究人员的关注。Wang Zengpeng 等^[92]提出了浸入式耦合直接冷却方法（将电池浸入固定流体中并接入制冷剂直接冷却管，如图 8(a)所示），通过数值和实验方式探讨了 2C 放电速率和 25 °C 环境条件下电池模块的传热特性和影响因素，结果表明，与单独浸入式冷却相比，

浸入式耦合直接冷却方法将最佳工作时间（35 °C 以下）延长了 45.7%。M. S. Patil 等^[93]设计了一种新型复合浸没式液体冷却技术，即将 14 节软包电池主体部分浸没在冷却液中，而电池极耳则采用强制风冷进行散热（图 8(b)），结果显示在 3C 放电倍率下，与自然对流散热相比，新型冷却方式的正极极耳的温度可以降低 46.8%；与使

用水/乙二醇溶液的间接式液体冷却相比，电池模组最高温度降低了 9.3%。Zhao Luyao 等^[94]将风冷与浸没液冷结合，减少了冷却液的用量（图 8(c)）。这些复合冷却系统虽然能够提高系统的冷却能力以及减小系统功耗，但也需注意会使系统的结构更加复杂。

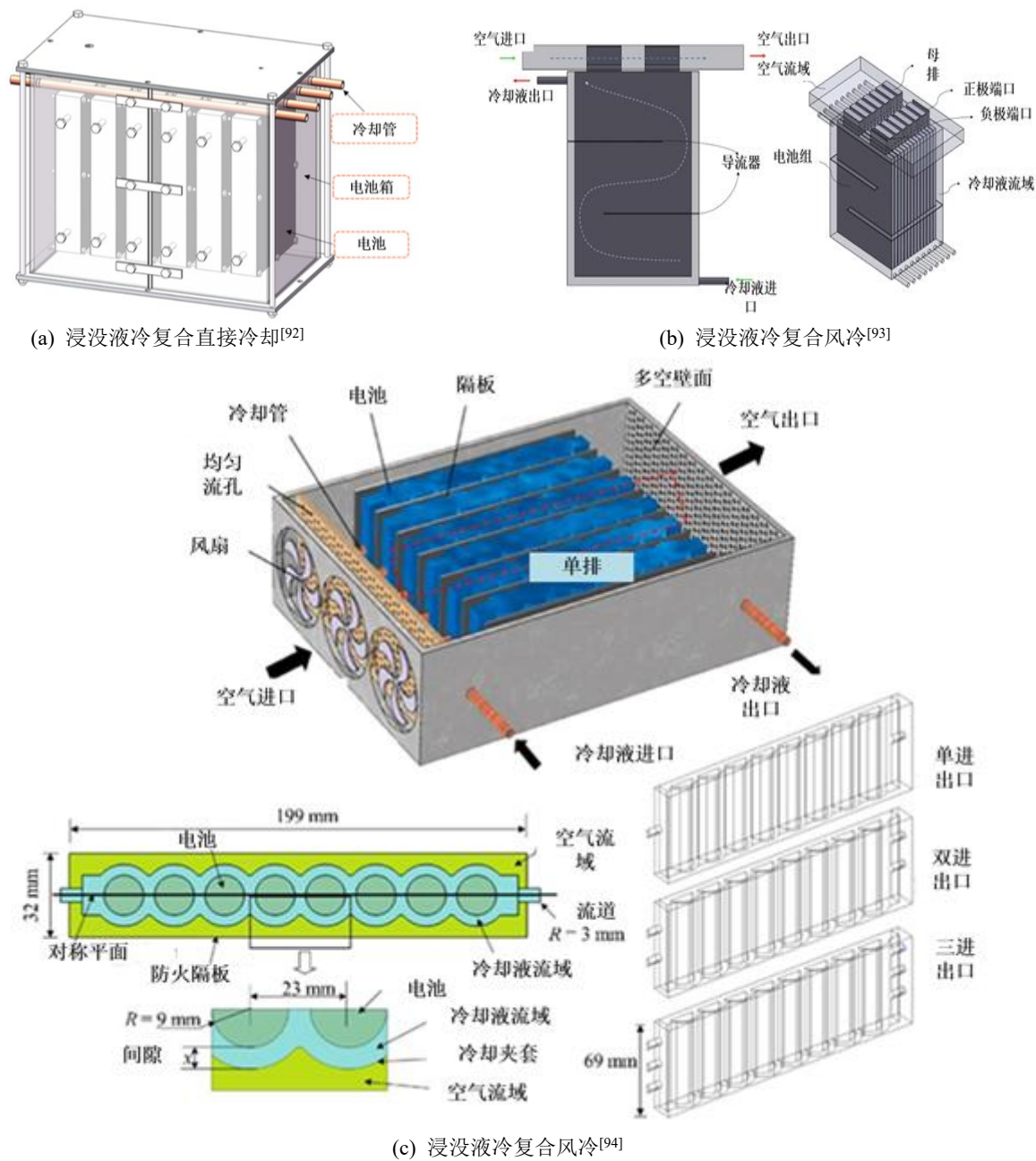


图 8 包含浸没液冷的复合冷却电池热管理系统

Fig.8 Composite cooled battery thermal management systems with immersion liquid cooling

2.2.2 两相浸没式电池模组设计

两相浸没系统主要依靠绝缘冷却液的相变过程带走热量，因此冷却效果要明显优于单相浸

没,可以满足较高能量密度电池组在高充放电倍率下的热管理需求,即在将电池组的最高温度控制在冷却液沸点附近的同时能够保持电池组极高的温度均匀性。Wang Yuhang 等^[95]对比了自然对流、强制对流、矿物油浸没和 SF33 浸没(沸点 33.4 °C) 4 种条件下电池模组放电的温升表现,在 4C 放电倍率下,各条件下电池模组最高温度分别为 69.3、44.2、42.1、34.4 °C。Li Yang 等^[96]将 1 节 18650 圆柱锂电池浸没在 Chemours-SF33(沸点 33.4 °C)工程流体中,通过实验发现当电池以 7C 倍率放电时,电池温度也始终被控制在 34.5 °C 以下。Li Yang 等^[97]后续又通过实验对比了 6 种不同型号的电池在自然对流和两相浸没液冷的散热表现,发现在 3C 倍率充电,自然对流条件下,6 种电池中有 4 种电池的最高温超过了 40 °C,而在两相浸没条件下,6 种电池的最高温均未超过 34 °C。H. Hirano 等^[98]以 10 个串联的方块电池为研究对象,将该对象完全浸没在 Novec-7000(常压沸点 34 °C)和 Novec-649(常压沸点 49 °C)中,在经历 5 次 10C 的充放电循环过程中,电池最高温度始终被控制在冷却液的沸点附近。R. W. Van Gils 等^[99]将 1 节圆柱电池浸没在 Novec-7000 氟化液中,在以 5A 电流放电的过程中,电池温度升高约 5 °C,而空气自然对流冷却条件下的电池温度上升约 20 °C。这些学者的研究成果充分证实了两相浸没系统超高的散热能力,是未来解决电动汽车超级快充以及高能量密度电池组散热问题的潜在方案。目前关于两相浸没系统的研究主要集中在电池浸没高度、电池间距、相变过程的可视化研究等方面。

与单相浸没系统类似,电池浸没高度同样会对两相浸没系统的冷却性能和系统质量产生影响。M. Goodarzi 等^[100]选用制冷剂(R141b,沸点 32 °C)为冷却液,研究了冷却液浸没高度对电池组温度的影响,研究发现电池不完全浸没会导致单个电池内部温度差距加大。M. Al-Zareer 等^[101]将混合动力汽车中的燃料丙烷作为冷却介质,以 9 节呈方型分布的 18650 圆柱电池为研究

对象,通过 COMSOL 有限元仿真软件研究了液态丙烷浸没电池的高度(5%~30%)与模组内压力(850 kPa 和 1000 kPa)对电池组最高温和电池两端温差的影响,结果表明液态丙烷的浸没高度越高,相同充放电条件下,电池最高温和两端温差就越低;增大模组内压力也可以降低电池两端温差,但是不可避免的会带来最高温的增加。李小青等^[102]选择丙烷作为冷却液,利用仿真手段,从丙烷浸没电池的高度着手研究,在 25 °C 和 40 °C 两种环境温度下,以 7.5C 的充放电倍率先对电池充电 300 s,之后放电 300 s,并记录充放电过程中的电池最大温差和最高温度,结果发现丙烷浸没电池高度越高,电池最高温度越低。一般而言,为了更好的热管理性能,在进行两相浸没系统设计时同样建议电池完全浸没。

电池间距影响着两相浸没系统的冷却液用量和冷却性能。M. Al-Zareer 等^[103]将 18 节圆柱形电池浸没在液态丙烷中,探究了不同电池间距下的热管理性能,结果发现较大的电池间距能够降低电池的最高温度,但也会增加电池之间的温差,因此建议在进行两相浸没系统设计时需要进一步考虑电池间距的选择。

相变过程的可视化研究是了解两相浸没系统传热机理和进行两相浸没系统强化换热的基础。N. P. Williams 等^[104]观察了两相浸没系统中的沸腾现象,发现气泡首先从电池的电极产生,且这些产生的气泡能够搅动电池的热边界层从而进一步提高传热速率。Li Yang 等^[105]以 18650 圆柱形锂离子电池为对象可视化研究了两相浸没系统的气液相变过程,图 9 所示为高速摄像机拍摄得到的结果,通过分析指出气泡的脱离能够破坏靠近电池表面的停滞液体热边界层,导致强烈的液体扰动,该扰动可以增强换热,从而阻止了相变阶段电池温度的进一步升高。姜威等^[106]通过可视化的实验发现相变过程中气泡成核主要发生在电池的粗糙表面上,而光滑表面由于成核位点的缺乏无法发生气液相变,因此提出表面强化的手段来增加成核位点,从而起到强化换热的效果。

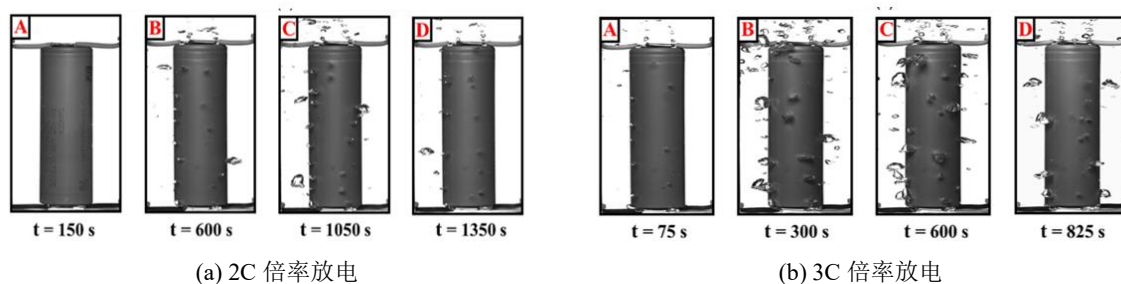


图 9 气液相变过程^[105]

Fig.9 Gas-liquid phase change process^[105]

2.3 寿命和安全性

电动汽车电池的使用寿命和安全性是备受关注的问题。由于可以为电池模组提供更好的温度均匀性,浸没式电池热管理系统可以提升电池组的使用寿命。此外,浸没式电池热管理系统对单体电池热失控以及热失控的蔓延有抑制作用,可以提高电池模组安全性。但一旦发生冷却液渗入电池的情况反而有可能加快该电池的容量衰减,造成不良影响。

D. Koster 等^[107]对比了风冷电池热管理系统和浸没式电池热管理系统的电池组循环寿命。结果表明,在 600 次循环时,风冷电池组相对容量已经比浸没式电池组容量小了 3.3%。经过推测,当电池组容量衰减为初始的 75%时,由于浸没条件下更均匀的温度分布,浸没式电池组可以多循环 275 次。另外在实验过程中还发现浸没式电池组有几个电池容量衰减较快,研究认为冷却液渗入电池内部是可能的原因之一。

李雨泽^[59]通过不同 SOC (state of charge) 的锂电池在液体浸没环境下的热失控实验,分析锂电池发生热失控的特征参数,验证了液体浸没对锂电池热失控抑制的有效性。实验发现,锂电池与冷却液体所接触部分的温度比在大气环境中热失控时的电池温度有显著降低,并且可以减少 CO 等有毒气体的产生。Wu Shangquan 等^[58]设计了一个包含 840 节圆柱锂电池的电池模组,在冷却液静止时,对其中一节电池进行 5 次热失控实验。结果表明,5 次实验均未引发其他电池的热失控,验证了浸没式电池热管理系统可以抑制热失控的蔓延。此外,Zhou Haikuo 等^[108]也发现

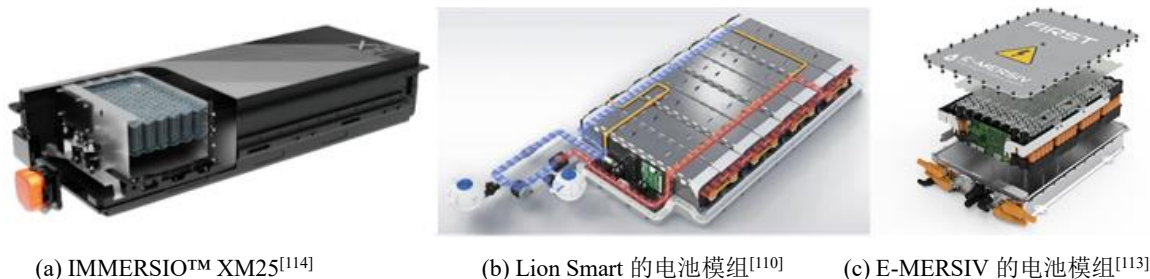
实验所选择的冷却液 Novec-649 能有效抑制热失控蔓延。

2.4 浸没液冷电池热管理的应用

将液体浸没技术应用于电池热管理无疑是一种大胆的尝试,目前已经有厂商开发了采用浸没式电池热管理技术的新能源汽车或电池模组。

迈凯伦 Speedtail 采用轻质绝缘油作为浸没式电池热管理系统的冷却液,以满足功率质量比为 5.2 kW/kg 的电池的散热需求^[47]。台湾行竞科技所研发的电动超级跑车 Miss R 也选择了液体浸没技术,通过将电池组浸泡在 3M Novec-7200 中,来解决车辆在高功率运行时的电池散热问题^[109] (图 10(a))。为了能够最大化的提高汽车底盘的能量密度,德国的 Lion Smart 公司则研发了一款使用 3M 氟化液作为冷却介质的液体浸没式电池模组 (图 10(b))^[110]。美国法拉利未来推出的 Faraday FF91 则选择了 MIVOLT 提供的冷却液^[111]。此外,芬兰技术公司 Moveko Tech Oy,开发了全球首款低于 120 V 直流的高功率传动系统,该电池系统也采取了液体浸没技术^[112]。法国的 E-MERSIV 公司研发出一款 50 kW · h 的液体浸没式电池模组 (图 10(c)),在 10 min 内就能将电量从 20%充至 80%而不发生超温。当其中某块电池发生热失控温度达到 400 °C 时,周围电池的最高温度也只有 100 °C,可以有效阻断热失控的传播^[113]。

可以看到,为了解决电池在高功率运行时的散热问题以及提高系统安全性,是这些厂商选择液体浸没电池热管理系统的原因之一。



(a) IMMERSIO™ XM25^[114]

(b) Lion Smart 的电池模组^[110]

(c) E-MERSIV 的电池模组^[113]

图 10 浸没液冷电池模组

Fig.10 Immersion liquid-cooled battery module

3 结论

本文分析了温度对动力电池性能的影响以及采取不同电池热管理系统所存在的优势和局限性,并在此基础上系统地综述了液体浸没式电池热管理系统的相关研究。

在冷却液选择方面,电子氟化液、碳氢化合物、硅油、酯类这类介电流体更受关注。但需注意到如果能对电池导电部分进行密封或绝缘处理,一些非介电液体如水也有作为冷却液的潜力。在模组设计方面,对于单相浸没系统,电池浸没高度、冷却液进口流量和温度、电池间距和排布方式是影响单相浸没系统冷却性能和系统能耗的重要变量。另外,为了进一步提高单相浸没系统的换热性能,可以从增加流道设计或复合冷却系统开发等方面进行考虑。对于两相浸没系统,电池浸没高度、电池间距是关键影响因素,对相变过程进行可视化研究是了解两相浸没系统传热机理和进行两相浸没系统强化换热的基础。在寿命和安全性研究方面,浸没式电池热管理系统能够有效提高电池组使用寿命,且对抑制热失控扩散有明显效果,可以有效降低热失控风险;此外,目前缺少各类冷却液与电池模组的材料兼容性问题研究,这些潜在的兼容性问题极有可能会对系统的寿命和安全性造成影响。

本文受浙江省自然科学基金(LZ19E060001)项目资助。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LZ19E060001).)

参考文献

[1] 我国新能源汽车产销连续 8 年全球第一[EB/OL].

(2023-01-24) [2023-05-25].https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/24/content_5738622.htm.(China's new energy vehicle production and sales for 8 consecutive years first in the world[EB/OL]. (2023-01-24) [2023-05-25].https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/24/content_5738622.htm.)

[2] GOODENOUGH J B, PARK K S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(4): 1167-1176.

[3] 郑雪芹. 2022 年我国动力电池装车量 294.6GWh[J]. 汽车纵横, 2023(2): 114-115. (ZHENG Xueqin. China's power battery loading capacity was 294.6GWh in 2022[J]. Auto Review, 2023(2): 114-115.)

[4] RAMADASS P, HARAN B, WHITE R, et al. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures Part I. Cycling performance[J]. Journal of Power Sources, 2002, 112(2): 606-613.

[5] SENYSHYN A, MÜHLBAUER M J, DOLOTKO O, et al. Low-temperature performance of Li-ion batteries: The behavior of lithiated graphite[J]. Journal of Power Sources, 2015, 282: 235-240.

[6] CHEN Dafen, JIANG Jiuchun, KIM G H, et al. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94: 846-854.

[7] 孙智鹏, 陈立铎, 徐梓荥, 等. 锂离子电池典型温度与倍率放电特性分析[J]. 电源技术, 2020, 44(8): 1090-1092. (SUN Zhipeng, CHEN Liduo, XU Zijian, et al. Analysis of typical temperature and rate discharge characteristics of Li-ion batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(8): 1090-1092.)

[8] 林涛, 赖沛恒, 李丽雅, 等. NCR18650A 电池的充放电温度特性与管理[J]. 新能源进展, 2020, 8(6): 455-461.

- (LIN Tao, LAI Peiheng, LI Liya, et al. NCR18650A battery charging and discharging temperature characteristics and management[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2020, 8(6): 455-461.)
- [9] 王恩童, 刘宗锋, 卢纪丽, 等. 电动汽车锂电池自放电行为的温度特性[J]. *电源技术*, 2019, 43(8): 1319-1321. (WANG Entong, LIU Zongfeng, LU Jili, et al. Temperature characteristics of self-discharge behavior of lithium battery in electric vehicles[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(8): 1319-1321.)
- [10] 格桑多吉, 谢永亮. 不同正极材料锂电池火灾危害性分析[J]. *制冷与空调(四川)*, 2023, 37(1): 52-59. (GESANG Duoji, XIE Yongliang. Analysis of fire hazards of lithium batteries with different cathode materials[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2023, 37(1): 52-59.)
- [11] 王皆佳, 贾君瑞, 赵彤, 等. 锂离子动力电池热失控特性实验研究[J]. *电子设计工程*, 2023, 31(5): 111-115. (WANG Jiejia, JIA Junrui, ZHAO Tong, et al. Experimental research on thermal runaway characteristics of Li-ion power battery[J]. *Electronic Design Engineering*, 2023, 31(5): 111-115.)
- [12] FENG Xuning, OUYANG Minggao, LIU Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review[J]. *Energy Storage Materials*, 2018, 10: 246-267.
- [13] 王浩名, 王书琪, 李琰. 新能源电动汽车事故处置方法探讨[C]//2022 年度灭火与应急救援技术学术研讨会论文集. 2022: 128-130. (WANG Haoming, WANG Shuqi, LI Yan. Discussion on new energy electric vehicle accident disposal methods[C]//*Proceedings of the 2022 Annual Symposium on Fire Suppression and Emergency Rescue Technology*. 2022: 128-130.)
- [14] LYU Peizhao, LIU Xinjian, QU Jie, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 31: 195-220.
- [15] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 北京: 清华大学, 2016. (FENG Xuning. Thermal runaway initiation and propagation of Lithium-ion traction battery for electric vehicle: test, modeling and prevention[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.)
- [16] 李奇松, 陈荣, 李慧芳. 阻抗分析法在锂离子电池析锂阈值检测中的应用[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(4): 1278-1282. (LI Qisong, CHEN Rong, LI Huifang. Application of impedance analysis in the detection of lithium evolution threshold of lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(4): 1278-1282.)
- [17] CHU Zhengyu, FENG Xuning, LU Languang, et al. Non-destructive fast charging algorithm of lithium-ion batteries based on the control-oriented electrochemical model[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 1240-1250.
- [18] WALDMANN T, HOGG B I, KASPER M, et al. Interplay of operational parameters on lithium deposition in lithium-ion cells: systematic measurements with reconstructed 3-electrode pouch full cells[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, 163(7): A1232.
- [19] SMART M C, RATNAKUMAR B V, WHITCANACK L D, et al. Improved low-temperature performance of lithium-ion cells with quaternary carbonate-based electrolytes[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 119: 349-358.
- [20] WU Weixiong, MA Ruixin, LIU Jizhen, et al. Impact of low temperature and charge profile on the aging of lithium-ion battery: Non-invasive and post-mortem analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 170: 121024.
- [21] NAGASUBRAMANIAN G. Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2001, 31(1): 99-104.
- [22] WU Weixiong, WANG Shuangfeng, WU Wei, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 182: 262-281.
- [23] ZHOU Long, ZHENG Yuejiu, OUYANG Minggao, et al. A study on parameter variation effects on battery packs for electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 364: 242-252.
- [24] FENG Xuning, XU Chengshan, HE Xiangming, et al. Mechanisms for the evolution of cell variations within a $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2/\text{graphite}$ lithium-ion battery pack caused by temperature non-uniformity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205: 447-462.
- [25] RUGH J P, PESARAN A, SMITH K. Electric vehicle battery thermal issues and thermal management techniques (presentation)[R/OL]. (2013-07-01)[2023-09-10]. <https://www.osti.gov/biblio/1089051>.

- [26] 许炫皓, 李军. 车用锂离子电池热管理研究进展[J]. 汽车文摘, 2022(10): 30-35. (XU Xuanhao, LI Jun. Research progress on thermal management of automotive lithium-ion batteries for vehicles[J]. Automotive Digest, 2022(10): 30-35.)
- [27] KUMAR R, GOEL V. A study on thermal management system of lithium-ion batteries for electrical vehicles: a critical review[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 71: 108025.
- [28] GAO Yuan, GAO Qing, ZHANG Xuewen. Study on battery direct-cooling coupled with air conditioner novel system and control method[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 70: 108032.
- [29] KARTHIK A, KALITA P, CUI Xujian, et al. Thermal management for prevention of failures of Lithium ion battery packs in electric vehicles: a review and critical future aspects[J]. Energy Storage, 2020, 2(3): e137.
- [30] LIU Huaqiang, WEI Zhongbao, HE Weidong, et al. Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 304-330.
- [31] 肖鑫, 冯泽, 王云峰, 等. 有机相变材料强化及耦合优化电池热管理系统的研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3795-3811. (XIAO Xin, FENG Ze, WANG Yunfeng, et al. Recent progress in enhancement of physical properties of organic phase change materials and optimization of coupling thermal management of batteries[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3795-3811.)
- [32] MOUSAVI S, SIAVASHI M, ZADEHKABIR A. A new design for hybrid cooling of Li-ion battery pack utilizing PCM and mini channel cold plates[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 197: 117398.
- [33] LIU Huaqiang, AHMAD S, SHI Yu, et al. A parametric study of a hybrid battery thermal management system that couples PCM/copper foam composite with helical liquid channel cooling[J]. Energy, 2021, 231: 120869.
- [34] ROE C, FENG Xuning, WHITE G, et al. Immersion cooling for lithium-ion batteries—A review[J]. Journal of Power Sources, 2022, 525: 231094.
- [35] 吴曦蕾, 杨佳亮, 郭豪文, 等. 数据中心浸没式液体冷却系统的发展历程及关键环节设计[J]. 制冷与空调(北京), 2022, 22(11): 61-74. (WU Xilei, YANG Jialiang, GUO Haowen, et al. Development history and design of key links in immersion liquid cooling system for data center[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2022, 22(11): 61-74.)
- [36] 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[J]. 电世界, 2023, 64(2): 62. (China Southern Power Grid Company Limited. The world's first submerged liquid-cooled battery energy storage power station put into operation[J]. Electrical World, 2023, 64(2): 62.)
- [37] ZHAO Gang, WANG Xiaolin, NEGNEVITSKY M, et al. A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2021, 501: 230001.
- [38] KANG D, LEE P Y, YOO K, et al. Internal thermal network model-based inner temperature distribution of high-power lithium-ion battery packs with different shapes for thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101017.
- [39] ZHANG Qiang, CAO Ganglin, ZHANG Xiongwen. Study of wet cooling flat heat pipe for battery thermal management application[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119407.
- [40] ALIHOSSEINI A, SHAFARAEI M. Experimental study and numerical simulation of a Lithium-ion battery thermal management system using a heat pipe[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102616.
- [41] SHAH K, MCKEE C, CHALISE D, et al. Experimental and numerical investigation of core cooling of Li-ion cells using heat pipes[J]. Energy, 2016, 113: 852-860.
- [42] WANG Zhengkun, WANG Yanan, XIE Zongfa, et al. Parametric investigation on the performance of a direct evaporation cooling battery thermal management system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 189: 122685.
- [43] 胡远志, 罗毅. 纯电动汽车制冷工况下电池直冷优化设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(2): 123-133. (HU Yuanzhi, LUO Yi. Optimal design of battery direct cooling of pure electric vehicles under refrigeration conditions[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(2): 123-133.)
- [44] 王肖军, 张恒运, 黄兴华, 等. 基于微小槽道的冷媒直冷电池热管理系统性能研究与优化[J]. 过程工程学报, 2023, 23(1): 154-162. (WANG Xiaojun, ZHANG Hengyun, HUANG Xinghua, et al. Research and

optimization on battery thermal management system with refrigerant cooling based on mini-channels[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023, 23(1): 154-162.)

[45] BULUT E, ALBAK E İ, SEVILGEN G, et al. A new approach for battery thermal management system design based on Grey Relational Analysis and Latin Hypercube Sampling[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101452.

[46] TOUSI M, SARCHAMI A, KIANI M, et al. Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical Li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102910.

[47] McLaren Speedtail: 'Albert' model revealed as swansong nears[EB/OL]. (2021-08-05)[2023-05-18]. <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/first-official-pictures/mclaren/speedtail-bp23/>.

[48] XING Mobility[EB/OL].[2023-06-22]. <https://www.xingmobility.com/>.

[49] LE Qin, SHI Qianlei, LIU Qian, et al. Numerical investigation on manifold immersion cooling scheme for lithium ion battery thermal management application[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 190: 122750.

[50] LIU Yanhui, ALDAN G, HUANG Xinyan, et al. Single-phase static immersion cooling for cylindrical lithium-ion battery module[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 233: 121184.

[51] LIU Jiahao, FAN Yining, WANG Jinhui, et al. A model-scale experimental and theoretical study on a mineral oil-immersed battery cooling system[J]. Renewable Energy, 2022, 201: 712-723.

[52] 储志亮, 陶汉中, 李艳南, 等. 热管和风冷结合的动力电池组热管理系统[J]. 电源技术, 2023, 47(2): 250-255. (CHU Zhiliang, TAO Hanzhong, LI Yannan, et al. Thermal management system of battery combining of heat pipes and air-cooling[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(2): 250-255.)

[53] 陈忱, 孙俊俊, 朱庆勇. 石蜡/膨胀石墨复合相变材料耦合热管电池热管理性能研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10478-10484. (CHEN Chen, SUN Junjun, ZHU Qingyong. Battery thermal management performance of paraffin/expanded graphite composite phase change

materials coupling heat pipe[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10478-10484.)

[54] SRIVASTAVA G, NANDAN R, DAS M K. Thermal runaway management of Li ion battery using PCM: a parametric study[J]. Energy Conversion and Management: X, 2022, 16: 100306.

[55] PENG Peng, WANG Yiwei, JIANG Fangming. Numerical study of PCM thermal behavior of a novel PCM-heat pipe combined system for Li-ion battery thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 118293.

[56] 杨梓堙, 竺玉强, 王亚平, 等. 基于 PCM-液冷复合的锂离子电池热管理研究[J]. 电源技术, 2022, 46(12): 1388-1392. (YANG Ziyin, ZHU Yuqiang, WANG Yaping, et al. Thermal management of lithium-ion battery based on PCM-liquid cooling coupling[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(12): 1388-1392.)

[57] DENG Yuanwang, FENG Changling, JIAQIANG E, et al. Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: a review[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 10-29. [58] WU Shangquan, LAO Li, WU Lin, et al. Effect analysis on integration efficiency and safety performance of a battery thermal management system based on direct contact liquid cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117788.

[59] 李雨泽. 浸没方式下液体抑制锂电池热失控技术研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022. (LI Yuze. The study of thermal runaway inhibition of lithium-ion battery by liquid immersion method[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2022.)

[60] LANDER L, KALLITSIS E, HALES A, et al. Cost and carbon footprint reduction of electric vehicle lithium-ion batteries through efficient thermal management[J]. Applied Energy, 2021, 289: 116737.

[61] 吴曦蕾, 刘滢, 倪航, 等. 不同电子氟化液对浸没式相变冷却系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2021, 42(4): 74-82. (WU Xilei, LIU Ying, NI Hang, et al. Effect of different electronic cooling liquid on the performance of immersion phase change cooling system[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(4): 74-82.)

[62] 霍宇涛, 饶中浩, 刘新健, 等. 基于液体介质的电动汽车动力电池热管理研究进展[J]. 新能源进展, 2014,

- 2(2): 135-140. (HUO Yutao, RAO Zhonghao, LIU Xinjian, et al. Research development of battery thermal management system based on liquid medium[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2014, 2(2): 135-140.)
- [63] 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 Shaohong, WU Weixiong, LIU Jizhen, 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.)
- [64] LI Xixi, HUANG Qiqiu, DENG Jian, et al. Evaluation of lithium battery thermal management using sealant made of boron nitride and silicone[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 451: 227820.
- [65] LUO Mingyun, CAO Jiahao, LIU Ninghui, et al. Experimental and simulative investigations on a water immersion cooling system for cylindrical battery cells[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 803882.
- [66] 2022 年中国氟化液（氟化冷却液）行业现状及前景分析，数据中心液冷方案带动冷却液需求「图」[EB/OL].(2023-03-30)[2023-08-09].
<https://www.huaon.com/channel/chemical/880650.html>. (Analysis of the current situation and prospect of China's fluorinated liquid (fluorinated coolant) industry in 2022, and the demand for coolant driven by liquid cooling solutions for data centers[EB/OL].(2023-03-30)[2023-08-09].
<https://www.huaon.com/channel/chemical/880650.html>.)
- [67] Opteon SF33 specialty fluid technical information [Z/OL]. [2023-08-28]. <https://www.opteon.cn/-/media/file/s/opteon/opteon-sf33-specialty-fluid-technical-bulletin.pdf?rev=67b973acd80745ea841f750921f743f5>.
- [68] 3M Novec-7000 engineered fluid[Z/OL]. [2023-08-28]. https://multimedia.3m.com.cn/mws/media/121372O/3m-novec-7000-engineered-fluid-tds.pdf&fn=3M%20Novec%207000%20Engineered%20Fluid%20TDS%20Heat%20Transfer_FINAL_R3.pdf.
- [69] SUNDIN D W, SPONHOLTZ S. Thermal management of Li-ion batteries with single-phase liquid immersion cooling[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2020, 1: 82-92.
- [70] DF7 - a new, immersive approach to cooling electrical systems[Z/OL]. [2023-08-28]. https://mivolt.com/wp-content/uploads/2021/10/MIVOLT-DF7-Brochure_Mar23.pdf.
- [71] HEMAVATHI S, SRINIVAS S, PRAKASH A S. Performance evaluation of a hydrostatic flow immersion cooling system for high-current discharge Li-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108560.
- [72] DUBEY P, PULUGUNDLA G, SROUJI A K. Direct comparison of immersion and cold-plate based cooling for automotive Li-ion battery modules[J]. *Energies*, 2021, 14(5): 1259.
- [73] SOLAI E, GUADAGNINI M, BEAUGENDRE H, et al. Validation of a data-driven fast numerical model to simulate the immersion cooling of a lithium-ion battery pack[J]. *Energy*, 2022, 249: 123633.
- [74] PULUGUNDLA G, DUBEY P, WU Zenan, et al. Thermal management of lithium ion cells at high discharge rate using submerged-cell cooling[C]//2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). Chicago, IL, USA:IEEE, 2020: 1-5.
- [75] SATYANARAYANA G, RUBEN SUDHAKAR D, MUTHYA GOUD V, et al. Experimental investigation and comparative analysis of immersion cooling of lithium-ion batteries using mineral and therminol oil[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120187.
- [76] WANG Haitao, TAO Tao, XU Jun, et al. Thermal performance of a liquid-immersed battery thermal management system for lithium-ion pouch batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46: 103835.
- [77] LIU Qian, SUN Chen, ZHANG Jingshu, et al. The electro-thermal equalization behaviors of battery modules with immersion cooling[J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121826.
- [78] JILTE R D, KUMAR R, AHMADI M H. Cooling performance of nanofluid submerged vs. nanofluid circulated battery thermal management systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118131.
- [79] WANG Yanfeng, WU Jiangtao. 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.
- [80] LIU Jiahao, FAN Yining, XIE Qimiao. Feasibility study of a novel oil-immersed battery cooling system: Experiments and theoretical analysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 208: 118251.

- [81] HUANG Chu, ZHU Haixi, MA Yinjie, et al. Evaluation of lithium battery immersion thermal management using a novel pentaerythritol ester coolant[J]. *Energy*, 2023, 284: 129250.
- [82] JITHIN K V, RAJESH P K. Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188: 122608.
- [83] PARK S, JUNG D. Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 227: 191-198.
- [84] WANG Yabo, RAO Zhao, LIU Shengchun, et al. Evaluating the performance of liquid immersing preheating system for Lithium-ion battery pack[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 190: 116811.
- [85] LIU Jiahao, MA Qingwen, LI Xianbin. Numerical study on heat dissipation performance of a lithium-ion battery module based on immersion cooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 66: 107511.
- [86] 郭豪文. 纯电动汽车浸没式液体冷却电池包的模拟与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. (GUO Haowen. Simulation and experimental study of immersed liquid cooling battery pack for electric vehicle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.)
- [87] ZHA Yunfei, HE Shunquan, MENG Xianfeng, et al. Heat dissipation performance research between drop contact and immersion contact of lithium-ion battery cooling[J]. *Energy*, 2023, 279: 128126.
- [88] LARRAÑAGA-EZEIZA M, VERTIZ G, ARROIABE P F, et al. A novel direct liquid cooling strategy for electric vehicles focused on pouch type battery cells[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216: 118869.
- [89] 刘倩, 石千磊, 李凯璇, 等. 锂离子电池结合棋盘拓扑分流结构的浸没冷却热管理研究[J]. *发电技术*, 2021, 42(2): 218-229. (LIU Qian, SHI Qianlei, LI Kaixuan, et al. Research on immersion cooling thermal management of lithium ion battery combined with checkerboard topology diversion structure[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(2): 218-229.)
- [90] 王宁, 王凌云, 刘世桐, 等. 基于 CFD 的单相浸没式液冷电池箱结构设计和仿真优化[J]. *中国高新科技*, 2023(7): 24-26. (WANG Ning, WANG Lingyun, LIU Shitong, et al. Structure design and simulation optimization of single-phase immersion liquid cooling battery box based on CFD[J]. *China High-Tech*, 2023(7): 24-26.)
- [91] CHOI H, LEE H, KIM J, et al. Hybrid single-phase immersion cooling structure for battery thermal management under fast-charging conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 287: 117053.
- [92] WANG Zengpeng, ZHAO Rijong, WANG Shouzheng, et al. Heat transfer characteristics and influencing factors of immersion coupled direct cooling for battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106821.
- [93] PATIL M S, 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.
- [94] ZHAO Luyao, LI Wei, WANG Guoyang, et al. A novel thermal management system for lithium-ion battery modules combining direct liquid-cooling with forced air-cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 232: 120992.
- [95] WANG Yuhang, LI Chaoen, WEN Xiaodong, et al. Experimental studies on two-phase immersion liquid cooling for Li-ion battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108748.
- [96] LI Yang, ZHOU Zhifu, HU Leiming, et al. Experimental studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 34: 102034.
- [97] LI Yang, BAI Minli, ZHOU Zhifu, et al. Experimental study of liquid immersion cooling for different cylindrical lithium-ion batteries under rapid charging conditions[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 37: 101569.
- [98] HIRANO H, TAJIMA T, HASEGAWA T, et al. Boiling liquid battery cooling for electric vehicle[C]//2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing:IEEE, 2014: 1-4.
- [99] VAN GILS R W, DANILOV D, NOTTEN P H L, et al. Battery thermal management by boiling heat-transfer[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 79: 9-17.
- [100] GOODARZI M, JANNESARI H, AMERI M. Experimental study of Li-ion battery thermal management

based on the liquid-vapor phase change in direct contact with the cells[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106834.

[101] AL-ZAREER M, DINCER I, ROSEN M A. Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 363: 291-303.

[102] 李小青, 陈善飞. 基于沸腾冷却的动力电池热管理仿真研究[J]. *化学工程*, 2022, 50(9): 43-47. (LI Xiaoqing, CHEN Shanfei. Simulation research on thermal management of power battery based on boiling cooling[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2022, 50(9): 43-47.)

[103] AL-ZAREER M, DINCER I, ROSEN M A. A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 187: 191-204.

[104] WILLIAMS N P, TRIMBLE D, O'SHAUGHNESSY S M. Liquid immersion thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles: an experimental study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108636.

[105] LI Yang, BAI Minli, ZHOU Zhifu, 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.

[106] 姜威. 非稳态工况电池组浸没式流动沸腾热管理传热特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023. (JIANG Wei. Heat transfer characteristics of unsteady-state battery thermal management with immersion flow boiling[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.)

[107] KOSTER D, MARONGIU A, CHAHARDAHCHEK D, et al. Degradation analysis of 18650 cylindrical cell battery pack with immersion liquid cooling system. Part 1: Aging assessment at pack level[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106839.

[108] ZHOU Haikuo, DAI Chaohua, LIU Yang, et al. Experimental investigation of battery thermal management and safety with heat pipe and immersion phase change liquid[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 473: 228545.

[109] 1000 千瓦功率的电动车 Miss R[J]. *高科技与产业化*, 2018(5): 9. (1000 kW electric vehicle Miss R[J]. *High-Technology & Industrialization*, 2018(5): 9.)

[110] LION Smart - LION light battery: lithium-ion cell technology[EB/OL]. [2023-06-22]. <https://lionsmart.com/en/lion-light-battery-en/>.

[111] MIVOLT liquid immersion cooling fluids[EB/OL]. [2023-05-04]. <https://mivoltcooling.com/>.

[112] Moveko – 电动传动系统和充电基础设施[EB/OL]. [2023-05-18]. <http://www.moveko.fi/>.

[113] Home-E-mersive[EB/OL]. [2023-08-10]. <https://e-mersiv.com/>.

[114] XINGMobility. IMMERSIO™ XM25: The world's first production-ready immersion-cooling battery system [EB/OL]. [2023-08-28]. <https://www.xingmobility.com/en/products/>.

通信作者简介

韩晓红, 女, 教授, 博士生导师, 浙江大学制冷与低温研究所, (0571)87953944, E-mail: hanxh66@zju.edu.cn。研究方向: 高热流散热技术(主要指热管散热、微通道散热及浸没液体冷却技术)、动力电池浸没液冷热管理技术、制冷剂替代技术、制冷剂泄漏与回收及再利用技术。

About the corresponding author

Han Xiaohong, female, professor/doctoral advisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, 86-571-87953944, E-mail: hanxh66@zju.edu.cn. Research fields: high heat flux heat dissipation technology (mainly heat pipe heat dissipation, microchannel heat dissipation and immersion liquid cooling technology), immersion liquid cooling of power battery, refrigerant replacement technology, refrigerant leakage, refrigerant recovery, recycling and reclamation.