



Advances in direct cooling battery thermal management technology for electric vehicles

Xijiao ZHU, Huaxia YAN*

School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract: With the intensification of the global energy crisis and environmental pollution issues, electric vehicles have become the future trend in automotive power due to their high energy efficiency and low emissions. The heat generated by batteries imposes limitations on their performance. Consequently, it is essential to gain a comprehensive understanding of the factors contributing to this heat generation and to devise and implement effective countermeasures. Addressing these issues is critical for optimizing battery performance and ensuring its safety. This review starts with a brief overview of the factors contributing to battery heat generation. It then delves into direct cooling battery thermal management technology, which utilizes the principle of refrigerant evaporation to absorb and dissipate heat effectively. This approach delivers superior cooling efficiency compared to traditional liquid and air cooling systems. Direct cooling systems are distinguished by their more compact design and faster response times, contributing to more effective thermal management and improved performance. By examining recent literature, this work provides a comprehensive review of the research developments concerning direct cooling systems. It includes an in-depth analysis of the structure design, cold plate design, and optimization strategies for various system parameters. It also highlights how the careful selection of refrigerant properties, along with precise adjustments to system parameters and cold plate configurations, can lead to significant enhancements in temperature uniformity under high-rate charge and discharge conditions. These improvements are crucial for extending the battery's operational lifespan and ensuring its safe and reliable performance. Future research efforts on direct cooling battery thermal management systems should prioritize two key areas: the optimization of the direct cooling plate system's design and parameters, and the development of new, highly efficient, and environmentally friendly refrigerants. Focusing on refining the structural design and operational parameters of direct cooling plates will help improve their performance and adaptability.

Key learning points:

- (1) Direct cooling battery thermal management is more compact and responsive than traditional systems.
- (2) This work reviews direct cooling systems, focusing on refrigerant selection, configuration, and innovative technologies.
- (3) Research on cooling plate design and system optimization drives thermal management toward greater efficiency and reliability.
- (4) Future optimization of direct cooling systems will focus on design, refrigerant choice, and control strategies to boost performance and meet user demands.

Keywords: electric vehicles; battery thermal management; direct cooling; cooling system optimization

收稿: 2024-08-08, 修回: 2024-12-23, 网络发表: 2025-01-15; Received: 2024-08-08, Revised: 2024-12-23, Published online: 2025-01-15

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(编号: 2022J05154); 集美大学引进高层次人才科研启动基金(编号: ZQ2020009)

作者简介: 朱喜娇, 硕士研究生, 研究方向为电池热管理, E-mail: 202312858002@jmu.edu.cn; 通讯联系人, 严华夏, 副教授, 研究方向为电池热管理, E-mail: yanhuaxia@jmu.edu.cn

引用格式: 朱喜娇, 严华夏. 电动汽车直冷电池热管理技术研究进展. 过程工程学报, 2025, 25(6): 533-543.

Zhu X J, Yan H X. Advances in direct cooling battery thermal management technology for electric vehicles (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2025, 25(6): 533-543, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.224250.

电动汽车直冷电池热管理技术研究进展

朱喜娇， 严华夏*

集美大学海洋装备与机械工程学院，福建 厦门 361021

摘 要：随着全球能源危机和环境污染问题的持续加剧，电动汽车因其高效、低排放等显著优势，成为未来动力汽车的发展趋势。然而，电池生热现象制约着电动汽车的使用性能，因此，深入探究电池生热成因并采取应对策略，对提高电池使用性能与安全性至关重要。本工作首先介绍了电池生热成因，鉴于电池生热对其循环寿命、能量效率及安全性能的直接制约，亟需研发针对性的热管理技术予以应对。直冷电池热管理技术利用制冷剂蒸发吸热原理，可实现高效冷却效率，相较于传统液冷和风冷系统，直冷系统具有结构更紧凑、响应速度更快的显著特征。通过梳理近期相关文献，本工作综述了直冷系统在结构设计、冷板设计及系统参数的优化等方面的研究进展。研究表明，通过合理配置冷媒属性、精准调节系统参数及优化冷板布置，可显著改善高倍率充放电工况下的电池温度均匀性，进而延长电池使用寿命并保障其安全可靠运行。未来研究可聚焦直冷电池热管理系统的结构和参数优化，以及高效环保的新型冷媒的开发。

要 点：

- (1) 相比传统热管理系统，直冷电池热管理结构紧凑、响应速度快。
- (2) 本工作从冷媒选择、系统配置及创新技术应用方面对直冷电池热管理系统展开综述。
- (3) 直冷板结构的改进与系统参数的优化研究，持续推动热管理技术向高效、可靠的方向发展。
- (4) 未来直冷系统优化将聚焦结构设计、冷媒选择和控制策略优化，以提升系统性能满足用户需求。

关键词：电动汽车；电池热管理；直冷；冷却系统优化

中图分类号：U469.72 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-606X(2025)06-0533-11

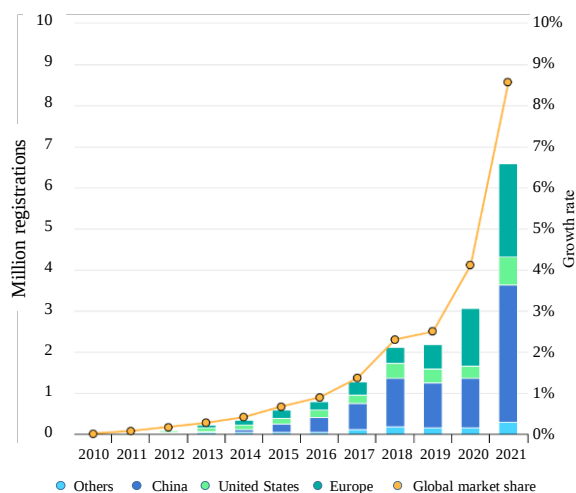
1 前 言

随着社会的快速发展，日益严峻的能源危机与环境污染已成为当今全球面临的主要问题^[1]，可持续发展战略正面临巨大挑战。化石能源在开采、运输、存储、使用等过程中均会对环境造成不同程度的污染，而传统燃油汽车对化石燃料的大量消耗更是加剧了这一问题。在“碳达峰、碳中和”的大背景下，寻找一种可持续的绿色能源替代传统化石能源迫在眉睫^[2]。电池作为替代传统化石燃料的可持续能源，在环境保护和减少污染方面已被广泛认可^[3]。相较于传统燃油汽车，电动汽车(Electric Vehicles, EVs)具有能量效率高、尾气排放少、运行噪音低^[4]等优点，在许多国家取得了快速发展。从环境保护的角度来看，汽车尾气排放是空气污染和温室气体的主要来源之一。电动汽车的零尾气排放特性显著降低了对空气质量的影响，并减少了温室气体排放。电动汽车能够将超过 60% 的电能转换为驱动动能，而汽油车仅 20% 左右，使得电动汽车更加节能。尽管电动汽车依赖于化石燃料发电厂的电力，但这些发电厂生产能源方面比汽车发动机效率更高^[5]。因此，电动汽车的使用有助于减少社会对石油的整体需求，缓解化石能源危

机，并减轻环境污染。

在国内外技术创新与各国政策利好的双重驱动下，电动汽车行业蓬勃发展，在消费者市场中广受欢迎。如图 1^[6]所示，不同国家及地区新能源汽车销售量逐年攀升，中国作为全球最大汽车制造国及全球第二大经济体，当前已经拥有成熟且完整的电动汽车产业体系，近年来电动汽车销量持续增长，国内汽车市场保持稳健发展，居于全球领先地位。随着新能源汽车销量的快速增长，消费者对电动汽车的续航能力、安全性和舒适性的要求也越来越高。为了满足这些需求，优化电池热管理技术成为各大车企研发的重点。从早期的被动冷却到现在的主动液冷，热管理技术的进步显著提升了电动汽车的综合性能，降低了使用成本，进一步加速了新能源汽车市场的扩张。为提升电动汽车使用性能，其动力核心电池的研究与开发受到各国政府、科学界及产业界的重点关注。

与此同时，现代电池技术在比能量和比功率方面取得显著进步，但动力电池组的发热问题也日益凸显^[7]。这种高产热率直接导致工作温度上升，对电动汽车电池系统构成了多维度影响，包括降低充放电效率、干扰电池内部的电化学反应机制、减少电池的可靠性和使用寿

图1 2022年全球新能源汽车销售对比^[6]Fig.1 Comparison of global sales of new energy vehicles in 2022^[6]

命,并对使用安全构成威胁^[8]。在众多待解难题之中,电池的热管理问题尤为紧迫,因为无论是温度过高还是过低,都会对电池的性能和耐用性产生不利影响,极端高温情况下还可能导致电池热失控,直接威胁到使用者的生命财产安全^[9,10]。先进的电池热管理系统对于维持电池组的最佳工作温度范围、提高续航能力、保障驾驶安全及延长电池使用寿命至关重要。因此,如何有效控制和优化电池的热环境,成为当前电动汽车技术革新的核心议题之一,对于维护整个行业健康发展和保护公共安全具有至关重要的作用。

本工作基于当前电池热管理(Battery Thermal Management System, BTMS)技术,对比分析了不同电池热管理技术的优缺点,并重点阐述了直冷技术的组成和设计改进办法,最后,指出了电池直冷技术的未来发展方向,旨在为电动汽车行业的技术进步和可持续发展提供参考。

2 电池热管理系统

锂离子电池最佳工作温度一般应在15~35℃范围内^[11],高温会导致电池的容量和功率下降^[12]。电池内活性物质在高温条件下失活,导致能量损失,这是电池容量衰减的主要原因。此外,高温作用下电池表面物质发生溶解引起电池自放电,电池内部导电性增强发生内部短路^[13]。当温度进一步升高至150~180℃时,会造成电池热失控(Thermal Runaway, TR),电池内部温度激增,热量沿电池逐个传播,固体电解质界面层分解,引起内部短路并释放不同气体,最终引起电池燃烧^[14]。此外,

低温也会显著影响电池的能量、充放电能力及循环寿命等^[8]。温度降低,电池的电解液黏度增大,造成电池内部化学反应速度减慢,输出功率降低。低温还可能导致电解液中形成锂枝晶,加剧副反应和内部短路的发生^[15]。当温度低于0℃时,锂离子电池的老化过程将大大加速。温度低于-10℃时,将导致更严重的功率和能量损失,而当温度下降到-40℃时,锂电池基本停止工作^[16]。除了高温和低温的影响外,电池组内温度均匀性也会对电池性能产生显著影响^[17],温度分布不均可能导致局部高温,高温区域电池容量和寿命迅速衰减,进而缩短电池模组的整体寿命^[18]。当电池高倍率运行时,单体电池内的温差不容忽视,通常认为需要控制在5℃以内。电池中极耳周围的温度往往高于其他部分,如果内部温差超过5℃,可能会导致电池容量衰减25%、功率下降10%^[19,20]。

综上所述,为了保证电池的最佳性能、最长寿命和使用安全性,电池热管理的目标可分为两方面:控制电池包的运行温度以及电池的温差。在电池温度较高时,需要进行有效的散热,以避免热失控发生;而在温度较低时,则需要加热以维持最佳的工作温度区间,并减小电池模组内部的温差,防止出现局部高温。

传统电池热管理包括空气冷却、液体冷却及相变材料(Phase Change Material, PCM)冷却等^[21]。每种技术各有优势,适用于特定的使用环境和条件。冷媒直冷技术作为一种新兴的电池热管理办法,近年来得到迅速发展。该技术充分利用了整车空调系统中制冷剂蒸发吸热的原理,将其引入电池内部蒸发器中,可达到冷却目的。以电池降温为例,制冷剂经过压缩机压缩为高温高压制冷剂蒸汽后,进入冷凝器中放出热量,经过膨胀阀节流降压为低温低压制冷剂液体,进入蒸发器及冷板中相变吸热,通过冷媒在相变过程中吸收大量热量,从而有效实现了电池温度的下降,图2展示了直冷系统的原理图。

电池在充放电过程中会产生热量,而在较高温度下电池单体的老化现象加快,因此电动汽车电池组几乎在所有工况下都需要冷却。与传统的热管理技术相比,制冷剂直冷电池热管理系统具有系统零部件少、对电池温度响应快,以及在热泵运行模式下可高效解决电池组的加热需求等优势^[22]。制冷剂直冷与传统电池热管理方式的对比已成为近年来的研究热点,尤其是在能效提升与冷却性能优化方面。表1对比了直冷系统与传统热管理方式的冷却性能,与液冷和风冷系统相比,直冷系统的结构更为紧凑且轻量化优势明显,能够更精准地控制电池平均温度,有效降低电池内部电阻,进而提升电池

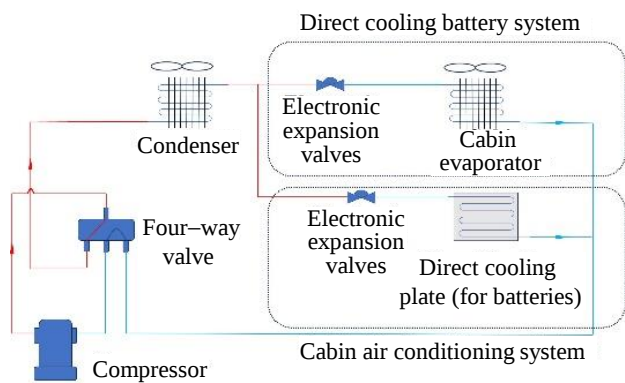


图2 直冷系统原理图

Fig.2 Principle diagram of the direct cooling system

容量。尤其在极端环境条件下,直冷系统能以更低的能耗维持电池组的温度^[24,26]。即便在制冷剂质量流量较低的情况下,直冷系统依然能保持电池组温度低于液冷系统。在高速行驶及长时间驱动耐久工况下,直冷系统对电池的温度降幅明显,不仅能有效改善电池组的温度均匀性,还可提高能效比并降低整车电能消耗。与风冷系统相比,直冷系统在高温环境下能确保电池温度稳定在35℃以下,且电池组内的温差不超过5℃,大幅优于风冷的温差^[31]。直冷系统利用沸腾相变传热原理,制冷剂在释放潜热后能迅速恢复换热状态,这是被动冷却的相变材料所无法比拟的。总体而言,直冷热管理系统在电池热管理方面提供了更优的解决方案,尤其是在温度控制精度、节能和系统响应速度方面。

3 直冷电池热管理系统设计改进

面对电池热管理的复杂性及其对电动汽车性能和安全性之深远影响,直冷技术凭借其卓越的冷却效率和快速响应特性,成为解决电池温度控制难题的有效途径。鉴于直冷系统在提高电池温度均匀性、延长电池寿命以及保障运行安全方面所展现出的巨大潜力,对其设计进行深入优化与改进成为当前研究的热点。本节将深入探讨直冷电池热管理系统的设计改进策略,包括系统和结构优化、冷板设计以及系统参数调控等方面,旨在揭示通过这些关键环节的优化,实现直冷技术在电动汽车热管理领域的高效应用与突破。

3.1 直冷电池热管理系统分类

直冷电池热管理系统根据制冷剂与电池接触方式可分为直接式直冷系统和间接式直冷系统。直接式直冷系统通过将电池浸入制冷剂中冷却电池,电池表面部分或全部浸没于冷媒中,当电池温度超过冷媒饱和温度时,冷媒吸热蒸发进而降低电池温度。由于电池与冷媒直接接触,不仅接触热阻显著降低、传热面积大幅增加,

且系统结构紧凑化设计实现了轻量化目标,在提升电池比能量的同时,展现出更高的冷却效率^[35]。然而,由于这种直冷系统部分浸没电池时,未浸没部分与空气换热会导致局部过热,恶化温度均匀性。增加制冷剂浸没高度能显著降低电池最高温度,尤其是在高放电倍率时更为明显,因此完全浸没是更优的选择^[36]。完全浸没式直冷电池热管理方式对电池模组的密封性要求较高,一旦发生泄露,处理过程较为复杂^[37],因此当前鲜有厂商实际使用。

间接式直冷系统中液态制冷剂在与电池组连接的冷却板中流动,通过对流传热与板和电池进行热交换,液态制冷剂蒸发成制冷剂蒸汽,在相变过程中会吸收大量热量^[38]。间接式直冷系统(以下简称直冷系统)结合了液冷系统与PCM的优势,具有换热效率高、系统原件数量较液冷系统少的显著特点,被视为是未来电池热管理方案之一。Zhang等^[39]研究证实,直冷系统(尤其是热泵型)能效高、灵活性强。Xu等^[40]设计的热泵集成式直冷热管理系统运用于电动汽车时,实现了电池侧和座舱侧之间的有效温度控制,对于不同的充放电电流,电池温度可以稳定控制在不同的设定值,温度波动最高不超过0.5℃;当系统与乘客舱耦合运行时,温度波动保持在0.25℃以内。Fang等^[41]设计了采用以R1233zd为制冷剂的两相直冷系统,可有效应对热负荷的突然增加。该系统具备与空调耦合、换热效率高、部件数量少等特点,实现了轻量化并降低了成本。目前,该技术已应用于宝马i8/X5、奔驰S400、比亚迪秦L DM-i、海豹06 DM-i等多款车型。

3.2 直冷板结构改进

作为制冷电池热管理系统中的核心组件,直冷板负责将电池热量传导至冷媒,其设计直接影响换热效率与温度均匀性。借鉴液冷系统的经验,直冷板的优化聚焦于结构与布局上,涉及流道流程、排布、尺寸及入口形状等方面,这些要素共同定义了与电池的接触面积,进而影响换热效能。

直冷板流道设计包括蛇形通道、发散通道、微通道、翅片冷板等多种结构形式,然而制冷剂在冷板内流动产生的复杂两相流会显著增加流动阻力,进而导致显著的压力降。基于流体力学原理,管路总长与局部阻力元件共同决定了压力损失,虽然流程数增多可以扩大传热接触面积,但达到一定阈值后,面积增加对传热性能提升边际效益递减,此时换热系数与温差成主导。单纯扩大面积对冷却效果的提升有限,需综合考虑多因素优化设计。杨子睿^[42]利用Fluent软件模拟对比了1, 2, 4, 8流程冷板性能,发现单流程压降最低但温差大,8流程温控较

表 1 直冷与常见电池热管理系统对比
Table 1 Comparison of direct cooling and common battery thermal management systems

BTMS comparison	Reference	Research method	Battery	Cooling plate & coolant	Major conclusion
Direct cooling vs. liquid cooling	Hong et al ^[23]	Experiment	60 prismatic cells	Microchannel direct cooling plate R134a	Same specification liquid cooling plate ethyleneglycol/water (50:50) The average temperature of batteries using direct cooling is 4.1℃ lower than liquid cooling. Under harsh environmental conditions, compared to liquid cooling, the battery capacity increases by 16.1%, and internal resistance decreases by 15.0% under direct cooling thermal management.
	Lian et al ^[24]	Experiment	170 Ah lithium iron phosphate battery	Microchannel direct cooling plate R134a	Same specification liquid cooling plate ethyleneglycol/water (50:50) With direct refrigerant cooling, the maximum temperature is controlled below 46℃ with a temperature difference less than 5℃. Compared to liquid cooling, energy savings of 40.4% and 56.8% were achieved at environmental temperatures of 38 and -20℃, respectively.
	Shan et al ^[25]	Experiment	16 sections of 25 Ah square batteries	Harmonic direct cooling plate R134a	Same specification liquid cooling plate unspecified With a smaller coolant mass flow rate in the direct cooling system, the highest cell temperature is 2.62℃ lower than liquid cooling.
	Zeng et al ^[26]	Numerical simulation	A power battery pack consisting of 16 modules with 96 cells connected in series	Power battery water cooling plate R134a	Same specification liquid cooling plate ethyleneglycol/water (50:50) For high-speed over-speed and drive endurance operating conditions, the cooling performance of each system was analyzed; the battery temperature decreased by approximately 10% during high-speed over-speed conditions and by approximately 16% during drive endurance conditions, compared to liquid cooling.
	Hu et al ^[27]	AMESim simulation	A battery pack with a total rated voltage of 370 V and a total capacity of 60 Ah	Direct cooling plate unspecified	Same specification liquid cooling plate unspecified The efficiency ratio of the vehicle's thermal management system with direct cooling is improved by 0.47 compared to liquid cooling, and overall electrical energy consumption is reduced by 3.1%.
	Cui et al ^[28]	Experiment	HNSAE22039 power battery	Direct cooling plate unspecified	Same specification liquid cooling plate unspecified Compared to the liquid cooling system, the direct cooling thermal management system has significant advantages in terms of system cost and weight reduction.
	Gao et al ^[29]	AMESim simulation	96 sections of 120 Ah square batteries	Parallel direct cooling plate R134a	Same specification liquid cooling plate coolant The two-phase region of the coolant within the direct cooling plate can reduce the maximum cell temperature by 28.3%, which is a 45.3% improvement over liquid cooling. Severe heat transfer deterioration and a significant temperature increase occur in the overheating zone. A decrease in coolant temperature leads to an increase in vertical temperature differences across the battery.
	Yang ^[30]	Experiment	16 sections of 25 Ah lithium iron phosphate cells	Harmonic direct cooling plate R134a air	At a 2C discharge rate, naturally cooled battery packs exceed the warning temperature of 40℃ by the end of discharge, while the average temperature of the battery pack using direct cooling is 39.6℃.
	Ouyang ^[31]	Fluent finite element software simulation	Lithium iron phosphate battery	Parallel direct cooling plate R134a air	Direct cooling ensures that the battery temperature does not exceed 35℃ and the temperature difference is no more than 5℃ at high temperatures of 40℃ and a vehicle speed of 120 km/h. The temperature difference for air cooling reaches about 15℃.
	Al-Zareer et al ^[32]	Comsol multiphysics simulation	12 Sony 18650 cylindrical cells	Immersion direct cooling R134a air	At a 5C discharge rate and with 80% of the battery surface covered by liquid R134a, the average battery temperature does not exceed 31℃, and the maximum temperature difference between individual cells is 1℃. Under the same conditions, air cooling results in surface temperatures exceeding 40℃.
Direct cooling vs. phase change materials	Van Gils et al ^[33]	Experiment	1Ah Sony US18500VR battery	Immersion direct cooling Novec7000 air	Boiling phase change heat transfer allows the battery to generate higher heat fluxes compared to traditional air cooling, reducing temperature differences and speeding up the cooling response.
	Park et al ^[34]	Ansys fluent 19.2 simulation	40 Ah lithium iron phosphate battery	Immersion direct cooling HFE-7000 paraffin, and graphite composite phase change material	Based on passive PCM cannot quickly recover solid-state heat absorption, whereas coolant releasing latent heat can rapidly resume heat exchange.

佳,但压力降超过0.1 MPa,系统负担重。4流程和2流程在温控上表现良好,尤其是4流程温差更小,利于均衡电池温度,综合表现最优。陈宇^[43]研究了3, 5, 7流程冷板,发现流程增加初期冷却效果明显,但随流道复杂度提升,压力损失加大,1200 s内温降依次为26.8, 24.2和22.8℃,3~5流程降温效果优于5~7流程冷板。此外,作者还比较了40~60 mm间距变化对冷却效率的影响,得出50 mm间距冷却效率最佳。Shen等^[44]的研究同样指出,两相介质中冷板结构调整导致压降大增,较窄的通道设计更利于传热。

为了探究降低冷板中流动阻力同时提高温度均匀性,研究人员进一步改进了冷板结构。沈华平等^[45]利用Fluent软件探究对比了蛇形、并行流道及其改进通道,蛇形流道冷却性能佳但温度均匀性差,改进结合蛇形与并行流道后,降温效果显著并优化了电池温度均匀性。Kong等^[46]提出了一种具有发散形通道的新型冷板,发散形通道具有更高的散热能力和更低的摩擦阻力,将其进一步改进为具有两个入口和一个出口的发散形通道,成功将压降降低7.2%,并将最大温差由3.99 K降至3.19 K。微通道板是指通道数较多的板,工质在多流道中流动。微通道板与其他冷却板相比,对流换热有效面积较大,可以提高换热量^[47],但由于其较为复杂的结构,微通道板的制造比较困难^[48]。结构的改进能够显著提升换热面积,Om等^[49]设计了三种排列方式的翅片冷板,包括内列、倾斜和百叶窗的翅片冷板,这些翅片冷板均能将电池的平均表面温度保持在允许的50℃以下。其他类型冷却板也已得到了广泛研究,路兴隆等^[50]提出了一种具有同心圆结构通道的冷板,可以通过优化环形通道数量、宽度及部分通道直化处理提高冷却性能。赵金辉等^[51]研究了不同流道截面(矩形、圆形、半圆形)对电池模组温度影响,结果显示,最高温度分别为24.14, 25.68, 22.80℃,纵向温差分别为14.58, 14.76, 13.30℃。由于半圆形流道接触面最大,能显著降低电池温度和温差,且在同流量下温控效果最佳。聂磊等^[52]使用蜂窝结构单面吹胀铝板作为冷板,相比传统设计,该冷板增大了传热面积,加速了对电池热需求的响应。

电动汽车的快速发展以及消费者对快速充电的需求日益增加,因此对电池热管理技术也提出了更高的要求。置于电池底部的冷板虽增强了散热,却加剧了电池高度方向的温差(垂直温差)。研究指出,通过适度调高蒸发压力,可有效降低电池内部的温差^[25,29]。针对电池垂直温差,增设直冷板两侧额外冷却结构,尤其在大倍率充放电时,双置直冷板策略扩大了直接接触面积,确保高功率场景下电池热管理需求能得到充分满足。

Park等^[34]对比了双层冷板与相变材料系统,前者在充放电循环中表现更优。赵金辉等^[51]对上下双置直冷板技术进行了仿真分析,结果表明相比于单直冷板,双置冷板可使电池最高温度下降32.99%,同时温度均匀性更好。姚薇^[53]提出的双冷板结构,有效改善了电池组均温性,并将温度控制在安全范围内。高帅等^[29]证实两侧增设冷板可显著降低垂直温差至5℃以内,并控制最高温度在40℃以内。杨鹏^[30]对比了主壁面与主壁面加侧壁面冷却系统,后者可使电池组平均温度下降4.48℃,温差减小5.19℃。

冷板是直冷式热管理系统的关键部件,可显著影响电池的换热效率及温度均匀性。增加冷板流程数可提高传热面积,但也会导致流动阻力和压降增大,温度均匀性减弱。改变冷板结构可优化温度一致性,特别是在电池两侧增设冷却结构,尤其是高倍率充放电时,采用多置直冷板策略增大冷却面积,能够显著降低电池最高温度并改善温度均匀性。因此冷板设计和布置改进在提升换热效率和温度均匀性方面需要综合考虑,以实现最佳冷却效果。

3.3 系统参数改进

直冷系统参数的恰当配置对电池性能表现、能效以及长期运行的可靠性有着全面影响。优化冷媒属性及其循环条件,调节膨胀阀开度和压缩机转速,不仅能加速热量交换过程,预防过热现象,减少因温度波动导致的电池性能衰退,还能通过提高系统整体能效,减少能源消耗,从而增加车辆行驶距离。合理的参数设置可使系统能迅速响应电池热状态的变化,增强对极端或快速变化环境条件的适应力,从而在保障安全的同时,提升用户体验,减轻对系统组件的磨损,减少了维护需求,从长远角度降低运行成本。

冷媒的选择直接影响系统的能效、环保性以及经济性。2016年《基加利修正案》将具有高全球变暖潜能值(Global Warming Potential, GWP)的氢氟碳化物(Hydrofluorocarbons, HFCs)纳入管控,意味着传统HFCs(如R134a)虽然臭氧消耗潜能值(Ozone Depletion Potential, ODP)为零,但由于高GWP而不再符合环保趋势,因此,开发和应用低GWP、低ODP的新型冷媒成为业界的研究重点^[54]。选择冷媒时,必须综合考虑其热力学特性、安全性和经济性。冷媒的沸点是决定其最低适用环境温度的关键因素,因为当外界温度低于这一沸点时,冷媒将无法正常工作。蒸发潜热是指冷媒在相变过程中吸收热量的能力,高蒸发潜热的冷媒能够在流经热源时更有效地传递热量,从而提高系统效率。饱和蒸汽压力对系统的工作压力有直接影响,过高的压力会增加

压缩机的能耗,导致成本上升;而过低的压力则可能使空气渗入系统,带来安全隐患。因此,选择合适的饱和蒸汽压力对平衡成本和安全至关重要。考虑到乘客会在封闭的车舱内驾驶,冷媒本身的安全性也尤为重要,选用的冷媒应无毒无害,即使发生泄漏也不会对人体造成伤害,避免潜在的危险事故。同时,冷媒的可燃性也是一个重要考量因素,在车辆出现故障情况下,冷媒应不易燃烧或爆炸,以确保车辆和乘员的安全。这些因素共同作用,有助于提升整个系统的性能和可靠性。

作为一种天然冷媒,与R134a相比,R290(丙烷)具有更低的GWP和较高的制冷性能。R290的比热容和导热性较高,使得它在对高效能要求较高的电动汽车电池冷却系统中具有一定的优势。然而,R290的易燃性一定程度上限制了其在电动汽车领域的应用。因此,对于电动汽车热管理系统而言,尽管R290在能效上表现较好,但其易燃性问题需要通过附加的安全设计加以解决。R134a虽然在能效上与R290相近,但其高GWP使得它在环保层面失去竞争力^[55]。R1234yf作为一种新型低GWP冷媒,近年来在汽车空调等领域获得广泛应用。R1234yf的GWP值远低于R134a,且不会破坏臭氧层,因此在环保方面具有较大优势。但R1234yf的制冷性能逊于R290,因此在要求较高制冷能力的场合,需要进一步优化系统设计^[56]。Ravikumar等^[57]通过实验充注R134a/R600a/R290混合冷媒在车载空调中,减少了对润滑油的依赖,优化了系统性能。刘敬辉等^[58]对比了R134a与R290/R600a(60%/40%)混合冷媒,发现系统性能系数(Coefficient of Performance, COP)提升了2%,制冷量增加了10%。冷媒的能效表现也是选型的重要考虑因素。Al-Zareer等^[59]研究表明,R290/R600a(60%/40%)混合冷媒的COP比R134a约高2%,制冷量增加约10%,适合作为汽车空调中R134a的高效替代。向工质中添加纳米颗粒作为一种增强沸腾传热及改变流动特性的无源强化传热技术,备受学者们的关注。Anand等^[60]将制冷剂HFE7000与不同比例的 Al_2O_3 纳米颗粒混合,增强了导热系数和黏度,降低了比热容。庞秋杏等^[61]研究了R134a- Fe_3O_4 纳米制冷剂在汽车空调冷凝器中的应用,发现换热量显著提升,液态纳米制冷剂的换热效果优于气态,且随纳米颗粒浓度的增加而提升。除物性参数外,直冷系统的表现还受制冷剂充注量的影响,合适的冷媒充注量可以确保系统在设计工况下高效运行,达到最佳的制冷效果,并延长设备的使用寿命。适当的冷媒充注量可以减少压缩机的负荷,防止过热和液击,提高系统的能效,降低能源消耗。Huang等^[62]试验发现,随着制冷剂充注量增加,COP呈现先增大后减小

的趋势。电池温降速度随制冷剂流量增加而加快,增强了温控效能。尤其是在冷板内增大制冷剂流量可显著提升介质流速,湍流强化了热量传递,使得电池降温更迅速,能在相同冷却时段内达到更低的温度,并缩短达到热平衡的时间。在直冷方式下,制冷剂的流量影响最为显著,其次为蒸发温度、电池初始温度及冷板出口过热度。膨胀阀开度增大或压缩机转速的提升,可促使制冷剂流量提升,蒸发压力与温度随之升高,系统制冷量得以增强。流量的提升虽然加强了电池模组的冷却,但也加剧了垂直温差,电池温度波动增大,流量至一定阈值时热特性趋于稳定。在恒定流量下,蒸发温度的下降会使电池最高温度渐次降低。制冷剂温度越低,电池降温速度越快,达到稳态时的温度也越低,但降温时长也相应增加。同时,制冷剂蒸发温度的设定决定了电池的最终温度,适度降温有利于温控,过度降温则可能损害温度均匀性。此外,降低直冷板出口过热度,提升蒸发温度,也能优化电池均温表现。

高帅等^[63]用AMESim软件对直冷系统进行建模,发现电子膨胀阀调节下2C充电末期电池最高温降为9.03%,温差 $<3^\circ\text{C}$ 。王肖军等^[64]将膨胀阀开度逐渐增大至46%时,电池的平均温度达到最低,在 35°C 环境条件下,当开度调至47%~56%时,仍可将电池温度维持在环境温度以下。赵冲^[65]研究指出,双热力膨胀阀冷却效率更高。Guo等^[66]设计的后置节流阀能有效调控高温环境下的舱内与电池的温度。杨鹏^[30]观察到,增大阀门开度可降低电池组的平均温度,但温差随开度增加,压缩机提速可以降低蒸发压力和温度,有利于制冷输出,但系统性能系数下降,需平衡参数以优化性能。李鑫盛等^[67]实验发现,在0.5C充电率、2400 r/min压缩机转速条件下,系统COP为5.83,电池温差为 1.90°C ,随压缩机转速和热负荷增加,电池温差最大为 3.99°C ,而COP随转速提升而下降。孙港国等^[68]通过仿真研究发现,当压缩机转速由1000 r/min升至2800 r/min时,电池温降 9.8°C ,车厢温降 8.8°C ;而当膨胀阀开度增加到50%时,电池温升 11.5°C ,车厢降温 5°C 。李亚胜^[69]指出,提升制冷剂流速能加速电池降温,增强温控效果。鲍文迪^[70]证实增加制冷剂流量可加速电池模组冷却,但过高的流量加剧了内部温差;而当流量超阈值后,电池温差对流量变化不再敏感。Shen等^[44]分析表明,蒸发温度决定了电池的最终温度,流量提升至一定水平后,电池热特性稳定。单春贤等^[25]的实验显示,环境温度变化直接影响制冷剂流量和蒸发温度,环境升温虽可使电池温度升高,但对蒸发温度的影响有限,反而增加冷板热负荷,导致直冷系统工作状态随热负荷的变化而变化。低热负荷时,制冷

剂可能未完全蒸发,进而影响冷却效率。为了解决大电池组直冷过程中的温度均匀性问题,Gillet等^[71]采用分液头配毛细管,精准分配制冷剂至多蒸发冷板,均衡制冷剂流量,以提升冷量分配一致性,显著降低了电池组的温差。张荣荣等^[72]在直冷板后增加一个降压装置,可改变直冷板的出口压力,减小直冷板出口过热度,从而提升电池冷却的蒸发温度,改善直冷方式的均温性。

直冷系统在电池热管理中的系统参数层面优化对于提升电池性能、能效、可靠性和用户体验至关重要。直冷系统的优化不仅仅依赖于冷媒的选择,还需要综合考虑制冷剂流量、蒸发温度、充注量等多个系统参数。在优化过程中,冷媒的选择应综合考虑其热物理性质、能效、环保性和安全性等多方面因素,选用低GWP和低ODP的新型冷媒可以有效满足环保要求并提升系统性能,合理的冷媒充注量能维持高效运行并延长设备寿命。通过控制制冷剂流量、蒸发温度及使用创新技术(如纳米颗粒添加剂和分液策略),可进一步增强冷却效果,缩小电池间温差,加快冷却响应,确保温度均匀性。综上所述,直冷系统的优化需综合考虑冷媒选择、系统配置及创新技术应用,以实现高效、环保和可持续的电池热管理。

4 未来展望

电动汽车市场的快速发展使得消费者对车辆性能的要求不断提高,尤其是在长续航、快速充电以及极端环境下的稳定性方面,市场和用户对电动汽车的期望日益严苛。为了满足这些需求,未来的电池热管理系统须具备适应多变的工作温度、快速充电时高效散热的能力,并能够兼顾制热性能,特别是在冬季无法依赖发动机余热的情况下,电动汽车的续航里程往往受到电加热的制约。因此,电池热管理系统不仅要优化制冷效果,还需在寒冷环境下利用热泵运行模式提供有效的制热能力^[73],从而确保电池的良好性能并延长使用寿命。

直冷系统因其高效的冷却性能而在电池热管理领域受到广泛关注。通过制冷剂相变吸收电池产生的热量,直冷系统能够显著提高电池组的冷却效率。然而,直冷系统的应用仍面临诸多挑战:在直冷系统中,冷板作为蒸发器工作时,其表面温度可能降至环境露点温度以下,从而引发冷凝水聚集问题,这对系统在密封封装设计及蒸发温度控制提出了更高要求;此外,制冷剂蒸发温度过低容易导致电池垂直温差过大^[29];同时,直冷板出口制冷剂的过热状态可能导致控温效果下降,从而使电池温度快速上升^[70]。这些问题在一定程度上限制了直冷系统在电池温控方面的整体性能。此外,现有的

控制策略在温度调节上仍存在一定困难,压缩机转速与温控系统之间的协调性较差,难以在不同工况下实现快速响应和稳定控制,这影响了系统的整体效能^[30]。

因此,如何优化温控策略、提升系统稳定性和响应速度,将成为未来研究的重要方向。为了进一步提升直冷系统的性能,未来的优化将集中于以下几个方面:

(1) 系统的结构与布局优化仍是提高冷却效率的关键。通过改进冷板的流道设计、尺寸和入口形状,确保液态制冷剂的均匀流动,减少局部过热现象,提高整体热交换效率,从而优化电池的温控效果。

(2) 系统参数的调整将继续作为提升系统性能的重要手段。选择具有高比热容和良好导热性的制冷剂,结合纳米颗粒增强沸腾传热或改善流动特性,有望有效提升冷却效果。同时,随着环保法规的逐步严格,低GWP和ODP的制冷剂成为研究重点,例如R1234yf等新型环保制冷剂已在汽车空调系统中得到应用,未来有望在BTMS中广泛应用。

(3) 强化冷媒流量、蒸发温度等参数的调控,以提升冷却响应速度和温度均匀性。创新技术如纳米颗粒添加剂和分液策略等,将有助于增强制冷剂的沸腾传热性能,加速冷却反应,缩小电池间的温差,从而确保电池在不同工作状态下的均温性。

(4) 调节膨胀阀开度、优化压缩机转速等技术,将进一步提高系统能效和温控精度,确保系统在不同工况下的稳定性和高效性。

未来直冷系统的优化将聚焦于结构设计、冷媒选择、控制策略以及创新技术的应用。通过全面提升系统性能,直冷技术有望更好地满足电动汽车在续航、充电速度和环境适应性等方面日益增长的需求,推动电池热管理技术的发展,并在提高电动汽车整体能效和用户体验方面发挥关键作用。

5 结语

直冷电池热管理因其优异的冷却效率和快速响应特性,易于实现模块化安装与升级,受到研究者和厂商青睐。本工作综述了直冷电池热管理及改进方式的研究进展,对比了直冷电池热管理与传统方式的热管理,着重讨论了系统改进设计的方向,包括系统、结构及系统参数改进优化,直冷系统优化需全局考量冷板设计、冷媒选择、系统配置与前沿技术融合,以满足电池热管理的高效性、环保性和可持续性发展。

但当前电动汽车直冷热管理系统的应用也面临诸多挑战,如电池直冷板与车舱换热器负荷相互影响、寒冷区域系统能效衰减以及外部换热器结霜、环保要求促

使业界探寻更具环境友好的制冷剂。随着电池技术的快速发展, 电池系统的能量密度和功率密度急剧增加。未来需要解决以上挑战以提高直冷热管理系统的冷却性能。

参考文献

- [1] Jilte R D, Kumar R, Ahmadi M H. Cooling performance of nanofluid submerged vs. nanofluid circulated battery thermal management systems [J]. *Cleaner Production*, 2019, 240: 118131.
- [2] 曹秉刚. 中国电动汽车技术新进展 [J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(1): 114–118.
Cao B G. Current progress of electric vehicle development in China [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(1): 114–118.
- [3] Subramanian M, Hoang A T, Kalidasan B, et al. A technical review on composite phase change material based secondary assisted battery thermal management system for electric vehicles [J]. *Cleaner Production*, 2021, 322(44): 129079.
- [4] Deng J, Bae C, Denlinger A, et al. Electric vehicles batteries: requirements and challenges [J]. *Joule*, 2020, 4(3): 511–515.
- [5] Kharabati S, Saedodin S. A systematic review of thermal management techniques for electric vehicle batteries [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 75: 109586.
- [6] IEA. Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales [EB/OL]. [2024-08-08]. <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>.
- [7] Wu C T, Wu L X, Qiu C H, et al. Experimental and numerical studies on lithium-ion battery heat generation behaviors [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 5064–5074.
- [8] Ouyang D X, Weng J W, Chen M Y, et al. Impact of high-temperature environment on the optimal cycle rate of lithium-ion battery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28: 101242.
- [9] Zhao G, Wang X L, Negnevitsky M. Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management [J]. *Iscience*, 2022, 25(2): 103744.
- [10] Mahamud R, Park C. Spatial-resolution, lumped-capacitance thermal model for cylindrical Li-ion batteries under high Biot number conditions [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(5): 2787–2801.
- [11] Kim J W, Oh J W, Lee H S. Review on battery thermal management system for electric vehicles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 192–212.
- [12] Feng X N, Ouyang M G, Liu X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review [J]. *Energy Storage Mater*, 2018, 10: 246–267.
- [13] 杨小钰, 马文斌, 谢松. 高温环境轻微过放电对锂电池老化行为的影响 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(12): 3903–3911.
Yang X Y, Ma W B, Xie S. Influence of slight over-discharge on the aging behavior of lithium-ion batteries under high temperature environment [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(12): 3903–3911.
- [14] 梅文昕, 段强领, 王青山, 等. 大型磷酸铁锂电池高温热失控模拟研究 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(1): 202–209.
Mei W X, Duan Q L, Wang Q S, et al. Thermal runaway simulation of large-scale lithium iron phosphate battery at elevated temperatures [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(1): 202–209.
- [15] 张蕾, 杨洋, 崔朝阳, 等. 环境温度对锂离子电池放电性能的影响 [J]. *电源学报*, 2023, 21(5): 207–213.
Zhang L, Yang Y, Cui C Y, et al. Effects of ambient temperature on discharge performance of lithium-ion battery [J]. *Journal of Power Supply*, 2023, 21(5): 207–213.
- [16] 朱建功, 孙泽昌, 魏学哲, 等. 车用锂离子电池低温特性与加热方法研究进展 [J]. *汽车工程*, 2019, 41(5): 571–581, 589.
Zhu J G, Shun Z C, Wei X Z, et al. Research progress on low-temperature characteristics and heating techniques of vehicle lithium-ion battery [J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(5): 571–581, 589.
- [17] 宋旭, 孙楠楠, 曹恒超, 等. 基于并联蛇形流道的动力电池冷媒直冷热管理系统研究 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(8): 2726–2736.
Song X, Sun N N, Cao H C, et al. Research on power battery thermal management system by direct refrigerant cooling using parallel serpentine flow paths [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(8): 2726–2736.
- [18] 徐海峰, 苏林, 盛雷. 液冷板电池组散热性能仿真及优化 [J]. *制冷技术*, 2019, 39(2): 23–28, 39.
Xu H F, Su L, Sheng L. Simulation and optimization of heat dissipation performance of liquid cooled panel battery pack [J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2019, 39(2): 23–28, 39.
- [19] Feng X N, Zheng S Q, Ren D S, et al. Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database [J]. *Applied Energy*, 2019, 246: 53–64.
- [20] Han X B, Lu L G, Zheng Y J, et al. A review on the key issues of the lithium-ion battery degradation among the whole life cycle [J]. *eTransportation*, 2019, 1: 100005.
- [21] Xu Y F, Zhang H Y, Xu X B, et al. Numerical analysis and surrogate model optimization of air-cooled battery modules using double-layer heat spreading plates [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 176: 121380.
- [22] Yang S C, Zhou S D, Zhou X A, et al. Essential technologies on the direct cooling thermal management system for electric vehicles [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(10): 14436–14464.
- [23] Hong S H, Jang D S, Park S G, et al. Thermal performance of direct two-phase refrigerant cooling for lithium-ion batteries in electric vehicles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: 115213.
- [24] Lian Y B, Ling H P, Song G, et al. Experimental investigation on a heating-and-cooling difunctional battery thermal management system based on refrigerant [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120138.
- [25] 单春贤, 杨鹏, 唐爱坤, 等. 电动汽车电池组冷媒直冷系统工作特性的试验 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(1): 30–37.
Shan C X, Yang P, Tang A K, et al. Experiment on operating characteristics of refrigerant direct cooling system for electric vehicle battery packs [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(1): 30–37.
- [26] 曾俊雄, 熊飞, 朱林培, 等. 液冷和冷媒直冷动力电池包冷却性能数值分析 [J]. *汽车工程学报*, 2020, 10(6): 436–442.
Zeng J X, Xiong F, Zhu L P, et al. Numerical analysis on performance comparison of liquid cooling and phase change cooling for lithium-ion battery pack [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2020, 10(6): 436–442.
- [27] 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 Y Z, Luo Y. 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.
- [28] 崔明璐, 王好成, 张向阳. 动力电池冷媒直冷热管理系统开发与验证 [C]//河南省汽车工程学会. 第十九届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集. 2022: 2. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.073511.
- Cui M L, Wang H C, Zhang X Y. Development and validation of refrigerant-based direct and indirect thermal management systems for power batteries [C]//Proceedings of the 19th Academic Symposium on Automotive Engineering and Technology, Henan Society of Automotive Engineering. 2022: 2. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.073511.
- [29] 高帅, 王俊博, 朱佳慧, 等. 制冷剂相态变化对动力电池直冷系统温控性能的影响分析 [J]. 制冷学报, 2023, 44(3): 58-66, 80.
- Gao S, Wang J B, Zhu J H, et al. Influence of refrigerant phase change on temperature control performance of direct cooling system for power batteries [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44 (3): 58-66, 80.
- [30] 杨鹏. 新能源汽车动力电池冷媒直冷热管理系统的设计与优化控制 [D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 11-14.
- Yang P. Design and optimization control of refrigerant direct cooling and thermal management system for power battery [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 11-14.
- [31] 欧阳东. 纯电动汽车热泵空调与电池交互热管理系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 49-52.
- Ouyang D. Integrated thermal management combined heat pump air conditioner with electric vehicle's battery pack [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 49-52.
- [32] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen M A. Heat and mass transfer modeling and assessment of a new battery cooling system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 765-778.
- [33] 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.
- [34] Park S, Jang D S, Lee D C, et al. Simulation on cooling performance characteristics of a refrigerant-cooled active thermal management system for lithium ion batteries [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 131-141.
- [35] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen M A. A thermal performance management system for lithium-ion battery packs [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 165: 114378.
- [36] 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.
- [37] Wang Y F, Li B, Hu Y L, et al. Experimental study on immersion phase change cooling of lithium-ion batteries based on R1233ZD (E)/ethanol mixed refrigerant [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 220: 119649.
- [38] Lu M Y, Zhang X L, Ji J, et al. Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101155.
- [39] Zhang Z Y, Wang J Y, Feng X, et al. The solutions to electric vehicle air conditioning systems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 443-463.
- [40] Xu N, Ye C Y, Hu Y J, et al. Decoupling control of an integrated direct cooling thermal management system for electric vehicles [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 160: 165-174.
- [41] Fang Y D, Ye F, Zhu Y, et al. Experimental investigation on system performances and transient response of a pumped two-phase battery cooling system using R1233zd [J]. Energy Reports, 2020, 6: 238-247.
- [42] 杨子睿. 基于制冷剂直冷方式的动力电池热管理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 39-44.
- Yang Z R. Study of battery thermal management based on direct [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 39-44.
- [43] 陈宇. 动力电池直液双冷热管理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022: 29-63.
- Chen Y. Research on direct-cooling and liquid cooling thermal management of power battery [D]. Changchun: Jilin University, 2022: 29-63.
- [44] Shen M, Gao Q. Structure design and effect analysis on refrigerant cooling enhancement of battery thermal management system for electric vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101940.
- [45] 沈华平, 竺玉强, 杨梓堃, 等. 锂离子电池模组液冷散热设计 [J]. 电源技术, 2022, 46(3): 271-275.
- Shen H P, Zhu Y Q, Yang Z Y, et al. Lithium-ion battery module liquid cooling heat dissipation design [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(3): 271-275.
- [46] Kong W, Zhu K J, Lu X P, et al. Enhancement of lithium-ion battery thermal management with the divergent-shaped channel cold plate [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103027.
- [47] Panchal S, Khasow R, Dincer I, et al. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 80-90.
- [48] Lai C G, Shan S M, Feng S, et al. Numerical investigations on heat transfer enhancement and energy flow distribution for interlayer battery thermal management system using Tesla-valve mini-channel cooling [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 280: 116812.
- [49] Om N I, Zulkifli R, Gunnasegaran P. Influence of the oblique fin arrangement on the fluid flow and thermal performance of liquid cold plate [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 12: 717-727.
- [50] 路兴隆, 张甫仁, 赵海波, 等. 基于同心圆结构的新型液冷板优化设计及其性能研究 [J]. 汽车工程, 2023, 45(11): 2058-2069, 2081.
- Lu X L, Zhang F R, Zhao H B, et al. Optimized design and performance study of new liquid cooling plate based on concentric circle structure [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11): 2058-2069, 2081.
- [51] 赵金辉, 姜冰, 钱鑫鑫, 等. 基于双置直冷板技术的动力电池热管理系统性能研究 [J]. 低温工程, 2023, 6: 50-57.
- Zhao J H, Jiang B, Qian X X, et al. Research on performance of thermal management system of power battery based on double direct cooling plate technology [J]. Cryogenics, 2023, 6: 50-57.
- [52] 聂磊, 王敏弛, 赵耀, 等. 纯电动汽车冷媒直冷电池热管理系统的实验研究 [J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 52-58.
- Nie L, Wang M C, Zhao Y, et al. Experimental study on direct refrigerant battery cooling system for electric vehicle [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(4): 52-58.
- [53] 姚薇. 基于直冷及相变材料散热的电池组热管理系统研究 [D].

- 杭州: 浙江大学, 2023: 77–83.
- Yao W. Research on battery pack thermal management system based on direct cooling and phase change material heat dissipation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023: 77–83.
- [54] 杨世春, 周思达, 张玉龙, 等. 车用锂离子电池直冷热管理系统用冷媒研究进展 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(11): 2123–2132.
- Yang S C, Zhou S D, Zhang Y L, et al. Review on refrigerant for direct-cooling thermal management system of lithium-ion battery for electric vehicles [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(11): 2123–2132.
- [55] 胡敏东, 王昶, 胡懿梵, 等. R290 替代 R134a 热泵热水器的性能分析与试验研究 [J]. 流体机械, 2014, 42(5): 67–70.
- Hu M D, Wang C, Hu Y F, et al. Performance analysis and experimental study on R290 substituting for R134a heat pump water heater [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(5): 67–70.
- [56] 薛相美, 肖震, 孙超, 等. 汽车空调系统中替代 R134a 的环保制冷剂的性能分析 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46(24): 101–104.
- Xue X M, Xiao Z, Sun C, et al. Performance analysis of environmentally friendly refrigerant replacing R134a in automobile air-conditioning [J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(24): 101–104.
- [57] Ravikumar T S, Lal D M. On-road performance analysis of HFC–134a/HC–600a/HC–290 refrigerant mixture in an automobile air-conditioning system with mineral oil as lubricant [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(8): 1891–1901.
- [58] 刘敬辉, 陈江平, 陈芝久. 碳氢制冷剂用于汽车空调的理论分析和实验研究 [J]. 化工学报, 2006, 57(9): 2048–2052.
- Liu J H, Chen J P, Chen Z J. Theoretical analysis and experimental study on hydrocarbons to replace R134a in car air conditioners [J]. CIESC Journal, 2006, 57(9): 2048–2052.
- [59] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen M A. Electrochemical modeling and performance evaluation of a new ammonia-based battery thermal management system for electric and hybrid electric vehicles [J]. Electrochimica Acta, 2017, 247: 171–182.
- [60] Anand R S, Jawahar C P, Solomon A B, et al. Heat transfer properties of HFE and R134a based Al_2O_3 nano refrigerant in thermosyphon for enhancing the heat transfer [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27(1): 268–274.
- [61] 庞秋杏, 王惜慧, 林裕旺, 等. R134a- Fe_3O_4 纳米制冷剂汽车空调冷凝器传热数值模拟 [J]. 科技创新与应用, 2019, 27: 32–36.
- Pang Q X, Wang X H, Lin Y W, et al. Numerical simulation of heat transfer in automotive air conditioning heat pump condenser with R134a- Fe_3O_4 nanorefrigerant [J]. Technology Innovation and Application, 2019, 27: 32–36.
- [62] Huang D Z, Zhang H Y, Wang X J, et al. Experimental investigations on the performance of mini-channel evaporator refrigeration system for thermal management of power batteries [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 130: 117–127.
- [63] 高帅, 王俊博, 朱佳慧, 等. 基于二次节流的电池直冷系统设计与分析 [J]. 低温与超导, 2023, 51(5): 56–63, 89.
- Gao S, Wang J B, Zhu J H, et al. Design and analysis of direct cooling system for power battery based on second-throttling [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2023, 51(5): 56–63, 89.
- [64] 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 X J, Zhang H Y, Huang X H, 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.
- [65] 赵冲. 基于直冷系统的新能源汽车动力电池热管理研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2020: 30–42.
- Zhao C. Research on thermal management of new energy vehicle power battery based on refrigerant-cooled system [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020: 30–42.
- [66] Guo J, Jiang F M. A novel electric vehicle thermal management system based on cooling and heating of batteries by refrigerant [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 237: 114145.
- [67] 李鑫盛, 贾腾, 赵耀, 等. 多箱电池包直冷热管理系统的实验研究 [J/OL]. 制冷学报, (2024–08–05)[2024–08–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20240513.1532.002.html>.
- Li X S, Jia T, Zhao Y, et al. Experimental research on direct cooling thermal management system for multi-box battery packs [J/OL]. Journal of Refrigeration, (2024–08–05) [2024–08–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20240513.1532.002.html>.
- [68] 孙港国, 魏名山, 郑思宇, 等. 纯电动汽车空调与电池综合热管理仿真研究 [J]. 制冷技术, 2022, 42(2): 12–18.
- Sun G G, Wei M S, Zheng S Y, et al. Simulation research on integrated thermal management of air-conditioning and battery for electric vehicles [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2022, 42(2): 12–18.
- [69] 李亚胜. 动力电池直冷系统冷板散热特性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 50–53.
- Li Y S. Research on the cooling performance of cooling plate in direct refrigerant cooling system of power battery [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 50–53.
- [70] 鲍文迪. 直冷式动力电池热管理性能分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2019: 23–46.
- Bao W D. Investigation on battery thermal management system (BTMS) with refrigerant-based direct cooling [D]. Changchun: Jilin University, 2019: 23–46.
- [71] Gillet T, Andres E, El-Bakkali A, et al. Sleeping evaporator and refrigerant maldistribution: an experimental investigation in an automotive multi-evaporator air-conditioning and battery cooling system [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 90: 119–131.
- [72] 张荣荣, 邹江, 孙祥立, 等. 降压装置对电动车动力电池制冷剂直接冷却系统的影响 [J]. 制冷学报, 2021, 42(3): 107–113, 158.
- Zhang R R, Zou J, Sun X L, et al. Influence of throttling device on refrigerant direct cooling system for power battery of electric vehicle [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(3): 107–113, 158.
- [73] Wang D D, Yu B B, Hu J C, et al. Heating performance characteristics of CO_2 heat pump system for electrical vehicle in a cold climate [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 85: 27–41.