动力电池高温散热与低温预热技术综述

何伟明　任重　张景涵　沈安林　谢雨芯　武小花

（西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039）

【摘要】针对动力电池在高温、低温及冷热交替工况下存在的升温过高、温度不均匀、性能衰减等问题，阐述了电池产热机理与热特性，分析了电池在不同工况下的性能需求，系统梳理了空气冷却、相变材料冷却、间接式液冷、浸没式液冷、热管冷却等高温散热技术的原理，归纳了外部和内部低温预热技术及冷却-加热复合热管理方案的研究成果，在此基础上，结合现有研究进展，展望了高温冷却、低温预热和复合热管理技术的未来发展方向与应用前景。

关键词：动力电池　高温冷却　低温预热　复合热管理

中图分类号：U469.72；TM912.9　**文献标志码：**A　**DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20260202

Review on High-Temperature Cooling and Low-Temperature Preheating of Power Batteries

He Weiming, Ren Zhong, Zhang Jinghan, Shen Anlin, Xie Yuxin, Wu Xiaohua

(Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039)

【Abstract】To address the problems of excessive temperature rise, non-uniform temperature distribution and performance degradation of power batteries under high-temperature, low-temperature and alternating cold-hot operating conditions, the paper elaborates on the heat generation mechanism and thermal characteristics of batteries, analyzes the performance requirements under different operating conditions, and systematically reviews the principles of high-temperature heat dissipation technologies, including air cooling, phase change material cooling, indirect liquid cooling, immersion liquid cooling, and heat pipe cooling. The research progress on external and internal low-temperature preheating technologies as well as combined cooling-heating thermal management schemes is also summarized. On this basis, combined with existing research advances, the future development directions and application prospects of high-temperature cooling, low-temperature preheating and hybrid thermal management technologies are discussed.

Key words: Power battery, High-temperature cooling, Low-temperature preheating, Hybrid thermal management

【引用格式】何伟明, 任重, 张景涵, 等. 动力电池高温散热与低温预热技术综述[J]. 汽车工程师, 2026(9): 1-14.

HE W M, REN Z, ZHANG J H, et al. Review on High-Temperature Cooling and Low-Temperature Preheating of Power Batteries[J]. Automotive Engineer, 2026(9): 1-14.

1　前言

汽车行业向低碳化和电动化方向的快速转型对热管理系统的散热能力、低温响应速度和全温域控温精度提出了更高的要求。动力电池热管理系统（Battery Thermal Management System，BTMS）已不再仅仅是维持电池工作温度的辅助装置，而是深刻影响整车功率输出、安全边界、快充能力、服役寿命的关键子系统[1]。

电池温度控制问题具有显著的双向性：高温会加速副反应和材料老化，局部热点还会放大单体差异；低温则导致电解液传导和界面反应减缓，内阻升高，充电时的析锂风险随之增加[2-4]。从单体到模组以及电池包层面，极耳位置、接触传热、冷却边界及流量分配等因素会引起空间温差，因此需同时关注最高温度与温度一致性[5-6]。综合来看，BTMS不仅需在高温工况下及时散热、低温工况下快速加热，还应通过合理的热流组织有效控制电池包内部

温差。

针对上述问题，现有技术主要分为三条研究脉络：高温冷却热管理技术，涵盖空气冷却、相变材料（Phase Change Material，PCM）冷却、间接式液体冷却、浸没式液冷、热管冷却；低温预热热管理技术，依据加热位置可分为外部加热和内部加热；冷却-加热复合热管理技术，通过耦合多种传热机制，将冷却与低温加热功能集成为一体[7-8]。不同技术路线不仅在降温或升温速率上存在差异，还涉及能耗、质量、可靠性、寿命影响、控制复杂度等方面的综合平衡。

基于此，本文分析动力电池的产热机理和热特性，并按照上述技术脉络，系统综述动力电池热管理领域的研究进展。

2 动力电池热特性

动力电池的热特性首先体现为产热速率随运行工况动态变化。温度直接影响电池内部的电化学反应，过高、过低的工作温度以及电池包内单体间温差，均会造成电池性能下降和寿命衰减[2]。

高温对电池性能具有短期促进和长期损伤并存的双重效应。温度升高可降低瞬时阻抗并加快电化学反应，短期内有利于功率输出；但持续高温会加速固体电解质界面膜变化、电解液分解、活性材料损失，加快容量衰减和内阻增长[3,5]。当产热速率超过散热能力时，温度升高会诱发更多副反应并产生额外热量，形成“温度升高-诱发副反应-加剧产热”的正反馈恶性循环。若该过程未得到有效抑制，局部过热可能进一步发展为热失控。

低温环境下，电解液黏度升高，离子电导率和固相扩散速率降低，电荷转移与浓差极化加剧，表现为内阻增大、端电压下降及可用容量和功率衰减[4]。低温充电时，负极嵌锂动力学不足还会提高析锂风险，严重时可能形成锂枝晶，损害电池循环寿命与安全性。

与此同时，电池包内部温差会造成各单体电池的工作电流、荷电状态（State of Charge，SOC）、容量利用程度不一致，进而形成单体间的老化差异，而老化造成的内阻差异会进一步加剧电池包产热不均的问题。

因此，动力电池热管理系统需协同解决高温散热、低温加热及温度一致性控制问题。

3 高温冷却热管理技术

高温冷却热管理技术主要面向快充、高倍率放电和高温环境等工况。在方案比较中，除最高温度和电池包内部温差外，还需考虑压降、辅助功耗、系统质量及故障后的热安全性。

3.1 空气冷却

空气冷却依靠自然对流或强制对流将电池表面的热量带出模组，具有结构简单、质量轻、成本低及维护需求小等优点。由于空气的比热容和导热系数较低，其散热能力在高倍率充放电和快充工况下会受到明显限制，且单纯增大空气流量还会提高送风功耗。因此，空气冷却通常适用于热负荷相对较低、空间布置较为宽松或成本敏感的电池系统。

空气冷却性能与流道结构、入口条件等密切相关。Chen等[9]重新设计了空气流动路径，使电池最高温度和最大温差分别降低4.5 ℃和7.7 ℃，同时将送风功耗降低12%，其采用的平行式Z型流道空气冷却系统结构如图1所示[9]。针对单向气流易造成入口与出口区域温差累积的问题，Mahamud等[10]提出往复气流方法，通过周期性改变流向改善模组温度均匀性，为后续脉动气流和动态风道控制研究奠定了基础。Karimi等[11]从风机进出口布置、模组摆放形式、电芯非均匀间距等方面对强制风冷模块进行优化，仿真与试验结果的误差低于1%，验证了气流分配与电芯排布协同设计的必要性。Hasan等[12]进一步分析入口雷诺数和电芯间距的影响，结果表明，提高雷诺数虽能强化换热，也会增加风机功耗。

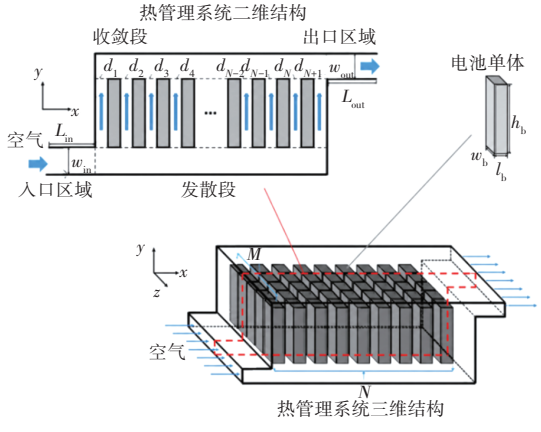


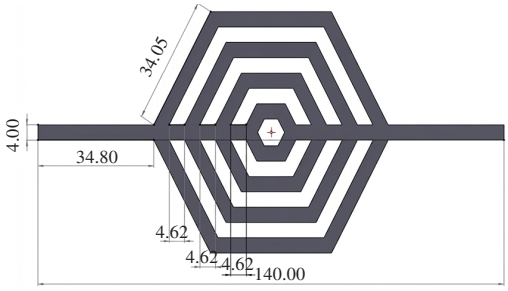
图1 平行式Z型流道空气冷却电池热管理系统结构示意

改善气流分配有助于降低电池最高温度和最大温差，但通过强化送风提升换热能力的同时，还需考虑由此引发的风机功耗增加问题。因此，空气冷却系统设计需兼顾散热效果、温度均匀性和送风能耗等方面。对于热负荷较高的电池系统，可根据实际温控需求考虑空气冷却与PCM冷却、液体冷却等方式的组合应用。

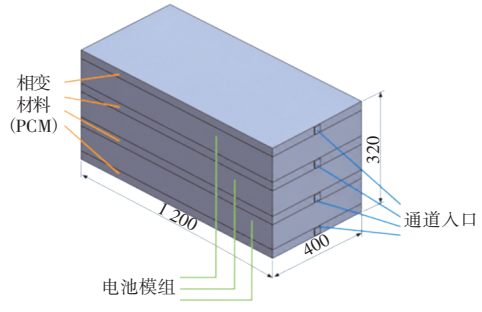
3.2 相变材料冷却

PCM冷却可借助材料固-液相变潜热吸收热量，从而缓解电池在短时高热负荷下的温度升高，并改善电池温度不均匀性。该散热方式属于被动热管理技术，工作过程无需风机、泵等持续驱动设备，与空气冷却、液体冷却、翅片、热扩散板等散热结构耦合后，可进一步提升系统散热能力与电池温度均匀性[13-14]。

PCM冷却的实际效果不仅受相变温度和潜热影响，还受循环稳定性、导热能力、封装结构约束，反复固-液相变可能引起热物性衰减和体积胀缩[15]。针对PCM冷却模块的耐久性问题，Lü等[16]通过长期循环机制评估了PCM模块及其对电池衰减的影响，结果表明，在工程应用中需同时考虑封装完整性和循环稳定性。为改善PCM导热能力，Zhao等[17]制备了低熔点金属合金/膨胀石墨/石蜡复合相变材料，将热导率提升至2.31 W/(m·K)，并在2C放电倍率下将模组最高温度和最大温差分别控制在41.1 ℃和1.1 ℃；PCM、金属泡沫、翅片的三重被动耦合结构使模组在3C放电倍率下的温差降低约75%[18]。在主动冷却耦合方面，Yao等[19]设计了蛛网状液冷通道与PCM复合热管理系统，在5C放电倍率下将电池模组最高温度控制在40 ℃以下，并可在-30 ℃环境下实现预热，其结构如图2所示[19]。



(a)蛛网状液冷通道结构示意



(b)PCM复合热管理系统示意

图2 蛛网状液冷与PCM复合的新型动力电池热管理系统

在材料性能强化与主动回路耦合方案之外，PCM研究已由常温短时热削峰扩展到电池包尺度与极端环境适配领域。Talluri等[20]以6 kW锂聚合物电池包为研究对象，在高于40 ℃热浸与低于-10 ℃冷浸条件下，对比分析了RT15、RT31及膨胀石墨类PCM热管理系统的性能，并利用单体试验校核模型，结果表明，相变温区与环境边界需协同匹配。

PCM方式主要通过储存电池产热来缓解短时温度升高。当材料完成相变并逐渐达到储热饱和状态后，单独使用PCM会导致持续控温能力下降，故需根据实际热负荷和工作时间，将PCM与主动冷却回路、导热增强结构、封装结构配合使用。

3.3 间接式液体冷却

间接式液体冷却通过冷板或冷却通道使冷却液与电池间接换热，利用液体较高的比热容和导热能力将电池产生的热量传出模组，其性能不仅与冷却液热物性有关，还受到冷板结构、流道布局、流量分配、接触热阻、泵功耗等因素影响[21]。在热负荷较高的工况下，液体循环冷却可为电池提供较为持续的散热。

间接式液冷的研究核心已由经验式流道设计转向温控效果、温度均匀性、流动阻力之间的多目标协同权衡。Yates等[22]对圆柱微通道冷却结构和常规通道冷却散热器进行了对比分析，结果表明，当质量流量超过5×10^{-5} kg/s时，两种结构均可抑制电池最高温度和最大温差。Jarrett等[23]以冷却板流道形状为变量，揭示了几何拓扑结构对温度场与流动阻力的耦合影响，为后续冷板结构优化提供了方法基础。此后，Sui等[24]采用多目标优化方法对混合歧管通道冷板进行结构优化，使电池最高温度控制在30.73~33.78 ℃、压降低于4.2 kPa。任峰胜等[25]进一步优化了拓扑结构，与传统直通道液体冷却板相比，电池平均温度、最高温度、最大温差分别降低0.86 ℃、0.89 ℃、1.12 ℃，在将电池温差维持在5 ℃以内的前提下实现压降降低56.7%。闵小滕等[26]提出圆柱电池的微通道波形扁管结构，在35 ℃、4×10^{-3} kg/s质量流量、1C放电倍率工况下，采用接触角大于40°的10通道扁管可将最高温度和最大温差分别控制在40 ℃以下和5 ℃以内。

上述结果表明，冷板流道的几何拓扑结构与流量分配会同时影响温度控制与压力损失。较紧凑或扰动较强的流道有助于降低局部热阻，但也可能增加压降和泵功耗。因此，评价间接式液冷结构性能时，需兼顾电池最高温度、温度均匀性、管路压降、辅助能耗等多项指标。典型液冷电池包三维结构及流道连接方式如图3所示[21]。

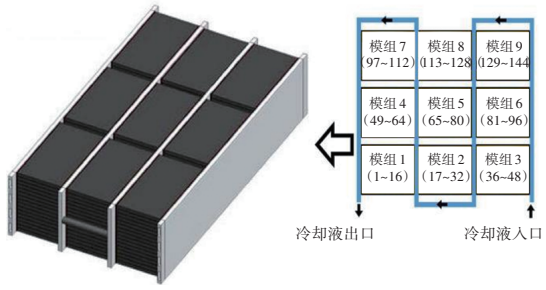


图3　液冷电池热管理系统三维结构及流道连接方式

3.4　浸没式液体冷却

浸没式液体冷却使电池直接与绝缘介电冷却液接触，从而减少冷板和界面材料形成的传热热阻，并扩大电芯表面的有效换热面积[27]。根据传热过程的不同，浸没式冷却可分为单相和两相系统：单相系统主要依靠冷却液的显热带走电芯热量，结构和控制相对简单；两相系统则可利用冷却液汽化过程中的潜热强化换热，但需同时考虑气泡成核与脱离、冷凝回流、压力控制等问题[27-29]。

为改善浸没工质在电芯间的流动状态与换热性能，现有研究分别从流量分配、流道结构、表面改性、多物理场耦合等方面展开分析。Tripathi等[30]建立了电化学-热-流场-力全耦合模型，用于分析浸没条件下电化学产热、流体换热、结构应力和性能衰减之间的交叉影响，结果表明，仅以热-流场优化难以完整评价系统。Zhong等[31]通过顺序导流改善了电芯间的流量分配。激光诱导石墨烯、蛇形通道等优化方案也被用于增强流道内流体局部扰动，以改善界面换热和温度均匀性[32-33]。这些工作推动设计变量由单一流速或导流件尺寸转向流量分配、热均匀性、电化学状态、机械可靠性的协同约束。

在结构强化的基础上，浸没式冷却系统的性能评价指标进一步由电池最高温度扩展至泵功耗与系统能效等维度。Wahab等[34]面向高倍率$LiFePO_4$电池包工况，将结构与流量优化、连接件电阻热、温度均匀性、冷却能耗纳入单相浸没系统评价指标，在8C放电倍率下将电池最高温度由57.56 ℃降至33.26 ℃，并将电池包内温差控制在5 ℃以内。冷却管耦合、翅片热管、介电液流道等复合结构也被用于拓展传热路径[35-36]。对于两相浸没过程，电池表面状态同样可能影响换热：Lyu等[37]考察了电池表面微观形貌对气泡成核和脱离行为的影响，为分析电池表面-冷却介质界面结构与沸腾换热能力之间的关系提供了参考。

不同电池类型与工况条件下的研究进一步表明，浸没式冷却系统的研究重心正从单一换热能力验证转向流量调控与系统效率优化。Li等[38]采用氟化液对18650电池组开展研究，在2C、3C充电时的冷却能耗分别为强制风冷条件下的16.47%、43.76%。针对单相浸没系统，Choi等[39]通过流道分区和石墨翅片改善换热效果，使3C充电倍率下的电池最高温度、最大温差、泵功耗均有所下降。王振宇等[40]在浸没箱体中设置流体缓冲区和导流孔，当采用15个直径为5 mm的导流孔时，电池最高温度和最大温差分别为29.74 ℃和0.97 ℃，六边形导流孔相较于圆孔可使两者分别进一步降低1.04%和16.49%。上述研究表明，直接接触是浸没式液体冷却的基础优势，而流场均匀性和辅助能耗是该技术工程化落地的关键。

在上述结构和能效优化的基础上，研究进一步向系统级验证与工程可行性评估拓展。Zha等[41]通过仿真和试验对比分析了滴淋接触冷却与浸没式接触冷却系统的性能差异，滴淋接触冷却系统结构如图4所示[41]。在冷却液总流量为560 mL/min、1C放电倍率条件下，滴淋接触冷却系统将模组最高温度控制在32.3 ℃，较浸没式冷却系统降低3.9 ℃，最大温差低于1.1 ℃，较浸没式冷却系统降低约4 ℃。

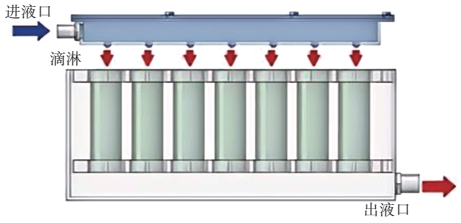


图4　滴淋接触冷却系统

浸没式液冷通过消除接触热阻、扩大换热面积，在高倍率工况下温控优势显著，但系统性能需权衡流道设计、工质特性与泵功耗。工质长期稳定性、材料相容性及密封可靠性是工程化应用的关键。

3.5　热管冷却

热管冷却利用封闭管壳内工质在蒸发段吸热汽化、在冷凝段放热凝结的特性，并借助毛细力或重力回流，将电芯局部热量传至远端散热界面。平板热管（Flat Heat Pipe，FHP）可增大与方形电芯的接触面积，并在无泵条件下完成热扩散，但热管本身仅负责转移热量，冷凝段仍需通过空气、液体或蒸发冷却将热量排出系统。其换热效果还受传热极限、安装方向、接触热阻、热管数量、冷凝端边界等因素影响[42-45]。

热管冷却的研究重心正由被动均热模式转向

冷凝端排热约束优化与主动回路耦合调控。Chavan等[42]利用热管实现电芯至冷板的低热阻热量输运，依托液冷回路完成系统最终排热，并通过集总参数模型和18650电芯台架试验，有效验证了结构的降温能力与轴向均温效果。Behi等[43]进一步将热管与强制风冷模块耦合，在钛酸锂（Lithium Titanate Oxide，LTO）电芯8C放电倍率工况下，将自然对流时56.8 ℃的最高温度降至37.8 ℃，最大降幅约33.4%，表明热管传热能力必须与冷凝端排热能力相匹配。对于脉动热管（Pulsating Heat Pipe，PHP），Li等[44]在25 ℃、2C放电倍率工况下，采用TiO_2纳米流体工质、铝均热板、风冷散热相结合的方案，使电池最高温度由39.9 ℃降至36.5 ℃，最大温差由3.02 ℃降至2.2 ℃。PHP冷却结构如图5所示[44]。

除冷凝端散热条件外，平板热管的安装方向、布置位置、布设数量同样会改变管内回流特性与电池模组传热路径。Su等[45]对容量为25 A·h的磷酸铁锂（Lithium Iron Phosphate，LFP）方形电池模组的试验表明，2根热管以侧卧方向布置于3个电芯之间时，在3C放电倍率下电池平均温度低于55 ℃，最大温差低于3 ℃。丹聃等[46]通过试验得到在25 W产热条件下，平板热管的扩散热阻为0.044 ℃/W，等效导热系数为650 W/(m·K)，多热源条件下电池表面最大温差低于4 ℃。上述研究表明，热管适合作为低驱动能耗的热扩散通道，但系统仍需协调蒸发段接触、工质回流、冷凝端排热能力、辅助部件能耗等机制，并需在目标工况下验证系统传热极限与长期可靠性。

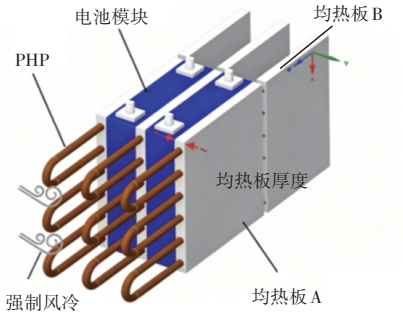


图5　PHP冷却结构示意

为进一步比较不同高温冷却方式在电池类型、研究方法、最高温度、温度均匀性等方面的差异，本文汇总了相关研究的关键参数，如表1所示。

表1　高温冷却热管理技术不同方式的关键参数

方式	改进方法	电池单体类型	容量/A·h	放电工况	研究方法	最高温度/℃	电芯间温差/℃
空气冷却	往复气流周期换向[10]	18650圆柱电池		7C	仿真	28.10	1.50
	四侧送风+非均匀间距[11]	锂离子电容单体		150 A	仿真+试验	28.50	5.50
相变材料冷却	低熔点金属合金/膨胀石墨/石蜡复合相变材料[17]	18650圆柱电池	3.4	2C	试验	41.10	1.10
	蛛网状液冷通道+PCM耦合[19]	LFP方形电池	15	5C	仿真	39.60	4.90
间接式液体冷却	拓扑优化液冷板[25]	锂离子电池			仿真		1.12
	10通道微小通道波形扁管[26]	18650圆柱电池		1C	仿真+试验	39.30	<5.00
浸没式液体冷却	导向顺序浸没冷却[31]	LFP方形电池	25	5C	试验	43.48	2.25
	单相浸没结构与流量协同优化[34]	LFP圆柱电池	2.5	8C	仿真（试验校核）	33.26	<5.00
	混合单相浸没+流道隔板+石墨翅片[39]	镍钴锰（NCM）软包电池	16	3C	仿真+试验	35.04	5.17
热管冷却	热管+强制风冷[43]	LTO方形电池		8C	仿真+试验	37.80	
	TiO_2纳米流体脉动热管+铝均热板+风冷[44]	LFP方形电池	23	2C	仿真+试验	36.50	2.20
	平板热管多热源均热[46]	模拟热源			试验		<4.00

4　低温预热热管理技术

低温预热热管理技术主要应用于寒区车辆停放后的起动工况、低温充电前的安全升温以及高功率输出前的电池性能恢复等场景[4,47]。本文根据热量产生位置将相关方法分为外部加热和内部加热两类。

4.1　外部加热

外部加热不改变电芯内部电化学结构，可利用电池包已有风道、液体回路、外贴发热部件等结构从电芯表面输入热量，具有良好的结构兼容性。由于热量需由电池表面向电芯内部传递，快速升温过程中易在电芯厚度方向形成温差。

4.1.1　热风加热

热风加热首先通过电阻加热器、热泵余热或独立热源提升空气温度，再经由风机和风道将热量输送至电池表面。该方案结构部件轻便，整体成本较低，并可与空气冷却共用通道，适用于中小型模组或系统改造空间有限的场景。

现有研究多围绕加热时间、气流均匀性、热源形式等参数展开热风加热性能的探索。Ji等对比分析多种低温加热策略后得出，在由电池自身供能的条件下，强制对流加热方案在提高可用输出功率后可将预热时间缩短至2 min以内，其对流热风加热系统结构如图6所示[48]。为减少热量损失，Lü等[49]采用封闭风道回收热量，并通过增加风机均化流场，在额定功率为180 W的镍铬合金加热丝和3台风机的配置下，模组最低温度达到10 ℃需12 min，电池平均温度和最大温差分别为13.44 ℃和3.48 ℃。除电阻式热源外，王发成等[50]对比分析了吹气、吸气与混合热风模式的预热性能，结果表明，吸气模式具备更优的换热效率与加热效果，进一步验证了气流方向不仅影响电池冷却均匀性，也会显著影响低温预热效率。此外，Li等[51]提出的氢微燃烧器空气预热器可通过挡板和翅片优化将出口气流温差控制在1.5 ℃以内，但该研究主要针对预热器开展仿真分析，尚缺少完整电池包实际验证。

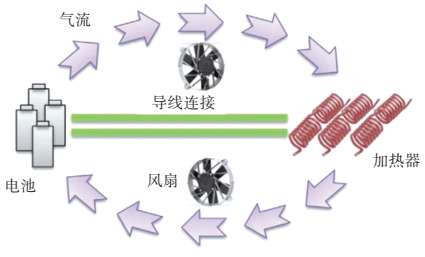


图6　对流热风加热系统结构示意

上述研究表明，热风加热可以利用已有风道完成预热，其加热效果与入口风温、流量分配、循环方式等密切相关。实际设计过程中，模组温差与风机、加热器的辅助能耗需与预热时间协同考量。对于封闭循环、余热回收、分区送风等技术方案，必须通过整包试验评估其实际应用收益。

4.1.2　间接式液体加热

间接式液体加热使水-乙二醇等工质在冷板、蛇形管或夹套中循环，热量经金属壁面与界面材料传至电芯。液体具有较高的体积热容与换热能力，并可复用车辆已有的泵、阀、冷板、冷却液加热器等结构，因而具备与现有液体热管理回路集成的基础。

现有研究不仅关注升温速率，也将充电时间、温度均匀性、压力损失等维度纳入评价指标。Liu等[52]通过液体加热模型实现了离线充电参数与充电控制的联合优化，提升了加热效率，结果表明，当电池包初始温度为-10 ℃时，先预热至1 ℃再充电可使总充电时间最短，SOC由4%充至80%的总时间和冷却液加热器能耗分别降低16%和15%，全程最大温差为6 ℃。针对冷板结构，Zhong等[53]以升温速率、温度均匀性、压力损失等参数为共同优化目标开展拓扑优化，仿真结果表明，与平行流道和蛛网状流道相比，结构优化后的电池平均升温率提升幅度超过7%，压降降低74.4%，最大温差控制在5 ℃以内。

上述研究表明，间接式液体加热需同时兼顾预热时间、后续充电性能、系统能耗等维度。入口温度、流量、流向、冷板结构等因素均会影响升温速率与温度均匀性，仿真优化结果需结合低温工质物性、歧管流量分配、结构制造公差、电池整包试验等进一步验证。

4.1.3　浸没式液体加热

浸没式液体加热使电芯直接接触绝缘介电工质，省去冷板与界面材料，并利用较大的接触面积向电芯传热。该方法可用于高功率或大体积电池包的快速预热，但系统需同时加热电芯和循环工质。低温下工质黏度变化、泵功耗、密封可靠性、材料相容性、介电性能稳定性等因素均可能影响系统加热能效和安全性。

浸没式加热的效果与入口温度、工质流量、回路布置等因素密切相关。Wang等[54]提出的浸没式加热系统结构如图7所示，通过仿真与试验验证了入口工质温度、流量、电芯间隙、电芯数量及进出口布置形式对预热性能的影响：结果表明，整包最大温差随流量和入口温度的升高而增大，且电芯数量对温度均匀性的影响最为显著。入口-出口布置形式、流量、电芯数量等因素均会影响电池温度均匀性。Bao等[55]的单相浸没试验表明，在50 ℃入口工质条件下，系统升温速率为1.63 ℃/min，工质流量对模组温差特性的影响高于对升温速率的影响，但在-25 ℃环境温度条件下，预热能耗超过试验电池包额定容量的80%。为降低能耗，Liu等[56]对比分析了4种方案，其中加热膜与FS49介电液协同热管理方案的升温速率为1.2 ℃/min，能耗为基准方案的46.98%，考虑析锂风险时，预热终止温度由追求最短充电时间工况下的15 ℃提升至25 ℃。

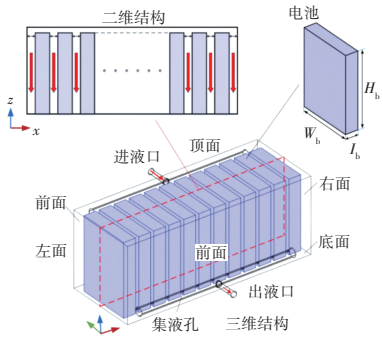


图7　浸没式液体预热系统结构示意

浸没式液体加热没有冷板和界面传热热阻，利用电芯与绝缘介电工质的直接大面积接触实现快速传热，适用于高功率或大体积电池包的快速预热。然而，该方案也引入了额外的技术约束：低温下工质黏度升高会增加泵功耗和流动阻力，且工质与电芯、密封材料、结构件的长期相容性以及介电性能的稳定性直接影响系统加热能效与使用安全性。因此，浸没式加热的评价需综合升温速率、温度均匀性、辅助能耗与长期可靠性等多维度指标。

4.1.4　电热元件加热

电热元件加热通过金属膜、聚酰亚胺柔性加热膜、加热带、正温度系数（Positive Temperature Coefficient，PTC）元件等方式将电能转化为热量，并将发热部件布置于电芯侧面、底部、端板或冷板位置。该方法具备响应快、结构紧凑、功率便于调节的优点，采用PTC元件时系统还具有一定的自限温能力，但局部热流密度过高易引发电池表面热点和电芯厚度方向温差问题，同时加热膜接触不良、脱黏、褶皱及绝缘老化等问题也会影响电池热管理系统的使用安全性。

单一外贴加热膜可快速输入热量，但功率提高后容易在加热膜与电芯接触区域形成较大的电芯厚度方向温差。Hailemichael等[57]将电阻加热膜与双向脉冲加热技术相结合，采用强化学习算法对加热膜电压与脉冲幅值进行同步优化，最优控制策略可实现阶段式供热调控，初期依靠加热膜实现电池快速升温，后期借助脉冲加热承接主要热负荷，在稳定升温速率的同时，有效降低电芯温度梯度，减小外部辅助电源的容量配置需求。针对双侧聚酰亚胺加热膜，Yang等[58]通过试验发现：电池温度由−10 ℃升至25 ℃时，在1 W、3 W、5 W加热功率下完成加热的时间分别为395 s、190 s、126 s；虽然5 W功率下加热时间最短，但最大温差达到8.5 ℃；先5 W后1 W的阶梯加热方案相较于恒定3 W方案缩短40 s，并将最大温差降低1.9 ℃。该方案的圆柱电池与加热膜布置如图8所示[58]。对于方形模组，Zhang等[59]对比分析了PTC布置在模组不同位置的加热策略，结果表明，布置在模组底部的加热策略所需时间较侧面加热缩短22%，布置位置对最大温差没有显著影响。

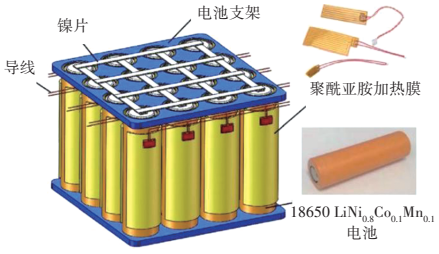


图8　圆柱锂离子电池及聚酰亚胺加热膜布置示意

上述研究表明，提高加热功率可缩短预热时间，但也可能增大电池内部或模组间的温差。需结合电芯几何形状、导热方向、安装位置等因素设计电热元件，并通过分段功率、闭环控制等策略限制局部热点。在长期使用中，粘接层热阻、传感器偏差、元件老化、绝缘状态等因素也需要加以考虑。

4.1.5　PCM辅助加热

PCM辅助加热通常将相变材料与加热膜等主动热源耦合，利用材料的显热和潜热特性储存、扩散并缓释热量，以减弱加热元件附近的局部热点并改善模组温度均匀性。其加热效果与相变温度、潜热、导热系数、材料厚度、初始热状态等因素有关。当车辆长时间冷浸且PCM完全凝固时，仍需要主动热源提供初始热量。

加热功率、PCM厚度、导热增强材料等因素均会影响PCM辅助加热系统的预热效果。E等[60]构建加热膜与PCM耦合系统：在常规方案中采用1 500 W/m^{2}的加热功率密度、40 W/m^{2}的功率密度差、12 mm电芯间距和5 mm PCM厚度时，最大温差约为4.40 ℃；在快速方案中，−20 ℃、−10 ℃、0 ℃环境下的预热时间分别为602 s、518 s、394 s，最大温差约为1.48 ℃。Liu等[61]采用石墨烯增强微胶囊PCM方案进行仿真分析，结果表明，质量分数为4%的石墨烯方案在升温速率和温度均匀性之间实现了良好平衡，当加热功率由20 W增至30 W时，相变过程缩短，但最大温差由3.36 ℃增至4.23 ℃，且该方案仍需试验验证。

上述研究表明，PCM可作为主动加热系统中均温和储热的组件。实际设计时，需根据目标温区选择相变温度和潜热特性，在提高导热能力的同时还需考虑附加质量、可燃性等因素。对于反复熔凝过

程,还需评估材料渗漏、体积变化、热物性衰减等维度,并协调加热功率、PCM厚度、预热时间、最大温差等性能指标。

4.2 内部加热

内部加热通过内置发热构件或电池自身阻抗在电芯内部产生热量,缩短热源到活性材料之间的传热路径,通常能够获得较快的升温速率。

4.2.1 内置集成加热元件

内置集成加热是在电芯制造阶段将高电阻金属箔或其他发热构件嵌入电极叠层,使电流在低温启动时流经发热构件并产生焦耳热,从而缩短热量向活性材料传递的路径。Wang等[62]在电芯内部布置绝缘镍箔并通过附加端子切换自加热回路,可使电池在-30 ℃环境下耗时约30 s升温至0 ℃,消耗的电量约占电池容量的5.5%,该结构如图9所示[62]。对于大尺寸车用电芯,多箔片和低热阻设计也被用于提高升温速率和改善电芯厚度方向的发热分布[63-64]。

除镍箔材料外,现有研究还对各类电池内置发热材料及其控制策略开展了广泛探索。Selinis等[65]将超细绝缘镍铬电阻丝嵌入石墨阳极,仿真与试验结果表明,材料线径、输入电流、对流换热边界等参数会影响升温速率与温度均匀性等性能。Longchamps等[66]将加热箔与微型场效应晶体管共同封装于电芯内部,免去电池专用高功率外部开关与重载线束的配置,可实现电池工作模式与加热模式的自由切换,该结构的最高升温速率约为60 ℃/min,温度每升高1 ℃消耗的能量占电池能量的0.138 %,并完成超过2 000次电池循环验证。上述研究表明,将发热构件、开关控制等结构与电芯共同集成具有一定可行性。

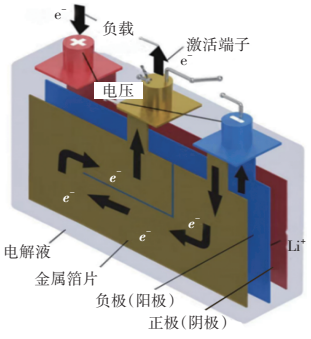


图9 低温自加热锂离子电池内置绝缘镍箔结构

内置加热能够缩短传热路径,可用于极低温快速起动,但会增加非活性质量、附加端子或电芯内部电子器件,并改变局部电流、应力和温度分布。实际工程应用中,该方案还需验证发热构件与极耳的连接可靠性、绝缘耐久性、局部热点、制造一致性、循环膨胀后的界面稳定性等。对于以电极尺度或仿真分析为主的方案,还需通过完整电芯和模组试验,对长期循环性能、滥用安全特性、批量制造可行性等指标开展系统性评价。

4.2.2 交流加热

交流加热在电池两端施加交变电流,利用欧姆阻抗和极化阻抗产生热量。当电池平均电流接近零时,可在SOC变化较小的情况下实现电芯内部升温。早期研究主要聚焦于可行工作频率和电流幅值,后续研究重心逐步转向能量约束条件与在线控制策略方向。Mohan等[67]采用模型预测控制算法优化双向工作电流,以能量消耗为优化目标,该算法使电池发热能量和外部储能器件尺寸均减少约20%,但升温时间相应增加。后续频域模型和热电耦合研究表明,工作频率、电流幅值、SOC、电池温度、老化状态等因素均会对电池产热效果与极化风险产生影响[68-71];变频交流加热策略可根据电池温度变化动态调整工作点,Boost与双向Buck-Boost拓扑结构为车载高频电流生成及能量回流提供了可行方案[72-74]。

总体而言,交流加热在保持SOC稳定方面具有优势,但其加热效率与安全性需在时变工况下进行多因素协同优化。

4.2.3 脉冲自加热

脉冲自加热通过间歇的大电流充放电或模组间能量交换产生热量,并在脉冲间隔内为浓差恢复和热扩散预留时间。Qu等[75]的试验表明,电池由-10 ℃加热至10 ℃时,脉冲自加热用时175 s,较直流加热缩短105 s。在模组一致性方面,陈泽宇等[76]建立电触发极速自加热模型并开展试验验证,结果表明,电池组由-20 ℃升温至20 ℃用时不超过270 s,电池组最大温差低于3.94 ℃,电池单体升温不均匀性与单体内阻标准差呈正相关,占空比对升温效果的影响幅度可达15%。因此,在脉冲加热控制策略中,需将脉冲峰值、占空比、脉冲方向、单体差异与极化效应、SOC漂移、器件损耗等多维度因素进行协同约束。

交流与脉冲加热的允许工作范围会随电池温度与老化状态变化。低温高SOC条件下,过大的负向极化会增加析锂风险;随着电池老化与阻抗谱变化,固定工作频率和电流幅值也可能不再适用。基

于电化学阻抗谱或弛豫时间分布方法识别可用加热范围，并结合SOC、健康状态（State Of Health，SOH）、电池温度等因素调整工作电流，有助于降低加热过程对电池寿命的影响[71,77-79]。加热控制系统还需设置端电压、极化电压、电池最高温度、温差、功率器件温度等参数约束，而不应仅以电池平均温度达到目标值作为停止条件。

内部加热通常具有较快的低温响应速度，外部加热则较容易与已有电池包结构结合。实际应用时，可根据环境温度、可用SOC、目标起动时间、电池老化状态等因素选择单一或组合模式。预热结束后可增设短时均温调控阶段，以有效避免电池平均温度达标但电芯局部区域温度仍然偏低的问题。

为比较不同低温加热方式在电池类型、升温速率、适用温区等方面的差异，本文汇总了相关研究的关键参数，如表2所示。

表2　低温加热热管理技术参数

方式	改进方法	电池单体类型	容量/A·h	研究方法	升温速率/℃·min^{-1}	试验温度范围/℃
外部加热	热风循环+电阻加热元件[48]	NCM 18650圆柱电池		仿真	28.2	−20~20
	液体浸没预热系统[54]	方形电池	50	仿真+试验	4.18	−28~25
	PTC膜侧面加热[59]	方形电池	50	试验	1.23	−20~10
	加热膜+PCM耦合[60]	NCM方形电池包	37	仿真+试验	3.99	−20~20
内部加热	镍箔自加热[62]	NCM软包电池	7.5	试验	60.0	−30~0
	高频交流+双向Buck-Boost拓扑[74]	LFP方形电池	50	仿真+试验	4.65	−20~0
	脉冲自加热[75]	钴酸锂（LCO）锂离子电池	2.0	试验	6.86	−10~10
	电触发极速自加热[76]	18650圆柱电池		仿真+试验	8.89	−20~20

5　冷却-加热复合热管理技术

车辆运行过程中，可能在冷浸起动、快充、高倍率放电、高温停放等工况间切换。因此，热管理系统需根据温度状态，在散热与预热间灵活切换。冷却-加热复合热管理技术通过复用换热界面、流道等传热结构，结合改变电流方向、调节工质温度、切换热源状态等参数，实现双向温度调控。现有研究涵盖热电制冷器（Thermo Electric Cooler，TEC）、浸没式回路、内置流道、双功能冷板、PCM复合式系统等多种技术方案。

TEC利用珀尔帖（Peltier）效应，通过改变直流电流方向切换器件的冷端和热端，从而在同一器件中实现冷却或加热功能。由液冷与可逆TEC组成的双主动系统在环境温度50 ℃、2C放电倍率条件下，可将电池最高温度由50 ℃降至42.32 ℃；反向通电后，在−20 ℃环境下可实现0.77 ℃/min的升温速率[80]。该方案具有可逆调温和分区控制的特点，但性能受热端散热和电流控制策略影响，模组尺度的能耗和长期可靠性仍需进一步验证。

浸没式回路方案使介电工质直接接触电芯表面，并通过切换入口温度，在同一腔体和回路中实现散热与预热功能。Choi等[81]在静态浸没系统中集成微通道和金属泡沫复合结构，快充工况下可将电池最高温度由50.9 ℃降至39.8 ℃，电池最大温差为6.4 ℃，优于传统强制浸没方案的9.6 ℃。Jiang等[82]针对30.7 kW·h电池包，在−20 ℃低温环境下采用上进下出的液体流向策略时，可将电池组最低温度加热至10 ℃，平均升温速率达1.04 ℃/min，且加热结束时电池组内最大温差控制在3.9 ℃。上述结果表明，大面积液体接触可兼顾散热与预热功能，换热效率高，但需权衡工质温控能耗与泵功耗。工程应用中可通过局部浸没、分区循环等策略降低辅助能耗。此外，还需关注介电液老化、密封兼容性及泄漏防护问题，并分别在高温条件下验证散热能力，低温条件下评估黏度对泵效率的影响，最终经整车试验确认可靠性。

内置流道式方案将铜管等换热构件嵌入电芯内部，通过切换管内工质温度或启用管内加热元件，使同一传热路径可分别服务于常温散热和低温预热工况。Zhang等[83]构建了内置铜管冷却加热复合结构，在常温冷却工况下可降低电芯最高表面温度；在−20 ℃环境、1C放电倍率条件下，采用3.70 W加热功率预热并同步加热，使电池放电容量提高约46%、初始放电电压提高约0.66 V。该结构缩短了电芯内部传热距离，但会占用部分内部空间并改变

电芯制造流程。工程应用中还需关注密封、绝缘、电解液相容性、循环膨胀后的结构可靠性等。

双功能冷板方案可在同一板内循环冷热工质,或通过集成电加热元件实现换热结构复用,同时能够沿用现有水-乙二醇换热回路。在45 ℃热工质、-30 ℃环境条件下,空腔冷板可在411 s内将电池温度提高至20 ℃,但加热结束时的电池最大温差达5.2 ℃,表明升温速率和温度均匀性需协同优化[84]。热管-液冷板-电加热复合结构通过面内传热方式改善电池温度分布,在高温工况下可将模组最高温度和最大温差控制在36.78 ℃和3.81 ℃,在-10 ℃环境下,最高升温速率可达1.55 ℃/min[85]。此类方案性能还受接触热阻、流动阻力、入口温度、工质流量、加热功率等因素影响。

PCM复合式热管理系统通过材料复合改性或与主动调温部件耦合,实现热削峰、热扩散、模式切换等功能。Cheng等[86]将石蜡、烯烃嵌段共聚物和膨胀石墨复合,构建了内层导电PCM和外层低导热PCM的双层结构。内层在低温下通过焦耳热的形式进行预热和保温,高温下利用相变材料潜热特性吸热,在-20 ℃环境下升温速率达20.2 ℃/min。Chung等[87]将热电模块(Thermo Electric Module,TEM)与多层PCM耦合设计,使系统达到50 ℃的时间由1 940 s延长至6 100 s,并使PCM吸热量提高7.6%~13.9%。该方案的H桥拓扑结构可实现TEM电流反向切换,具备可逆调温架构基础,但研究主要验证了冷却性能,预热效果仍需进一步实证。

综合上述研究可见,不同方案的实际效果与环境温度、热负荷、辅助能耗、结构可靠性等因素密切相关,具体设计时需结合电池包结构、集成空间、电芯类型及整车运行工况进行综合评估。

为进一步比较不同冷却-加热复合热管理技术在电池类型、研究方法、电芯间温差等方面的差异,本文汇总了相关研究的关键参数,如表3所示。

表3 冷却-加热复合热管理技术参数

方式	改进方法	电池单体类型	容量/A·h	研究方法	电芯间温差/℃	升温速率/℃·min^{-1}
TEC耦合	液冷+TEC,优化TEC布置[80]	软包电池	10	仿真+试验	冷却:<5.00 加热:<5.00	0.77
浸没式回路	集成微通道与金属泡沫复合结构强化传热[81]	方形电池	40	仿真+试验	冷却:5.00 加热:1.73	
冷板双向热管理	腔式冷板实现冷却与加热补偿[84]	LFP方形电池	23	试验	冷却:<8.90 加热:<5.20	
冷板与热管集成	热管+液冷板/电热膜集成,优化结构参数[85]	18650圆柱电池	2.9	仿真+试验	冷却:3.02 加热:<3.00	1.55
相变材料	高导热复合PCM双层结构,自预热、保温、散热一体化[86]	18650圆柱电池	3.2	试验		20.5

6 结束语

本文围绕动力电池在高温、低温及冷热交替工况下的性能需求,系统综述了电池热特性、高温冷却、低温预热及冷却—加热复合热管理技术。

在高温冷却方面:空气冷却结构简单,适用于中低热负荷场景;PCM具有短时削峰和均温作用,但持续散热能力有限;间接式液冷兼具性能、成本与成熟度优势,工程应用较广;浸没式液冷适用于快充和高热流密度条件,但受工质稳定性、材料相容性及密封可靠性等因素制约;热管冷却可在较低能耗下扩散局部热量,但需关注冷凝端散热能力、布置方向及其与电芯(或冷板)间的界面接触热阻。

在低温预热方面:外部加热易于集成,但受传热路径限制;内部加热可缩短传热路径、提高升温速率,但需关注析锂风险、局部过热及寿命衰减。

在冷却-加热复合技术方面:TEC可实现可逆调温,浸没式回路换热面积大,内置流道可缩短传热路径,双功能冷板兼容性较好,PCM复合结构兼具储热、削峰和均温功能。

对动力电池热管理系统的评价不应仅以电池最高温度为准,还需综合考察电池温度均匀性、安全性、辅助能耗、系统质量、寿命影响、模式切换性能、故障降级能力等多维度指标。

未来研究应从以下方面展开,从而推动热管理技术由单工况性能优化向安全、低耗和高可靠的系统协同设计转型:

a. 建立考虑电池老化参数漂移的电化学-热-流体多尺度模型,完善PCM、介电工质、密封、界面材料的长期可靠性评价;

b. 发展面向SOC、SOH和环境工况的自适应多目标控制策略；

c. 在快充、寒区起动、道路循环、热浸等复合场景下开展整车全寿命验证。

参 考 文 献

[1] VIKRAM S, VASHISHT S, RAKSHIT D, et al. Recent Advancements and Performance Implications of Hybrid Battery Thermal Management Systems for Electric Vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 90.

[2] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A General Energy Balance for Battery Systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.

[3] BANDHAUER T M, GARIMELLA S, FULLER T F. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(3): 1-25.

[4] JAGUEMONT J, BOULON L, DUBÉ Y. A Comprehensive Review of Lithium-Ion Batteries Used in Hybrid and Electric Vehicles at Cold Temperatures[J]. Applied Energy, 2016, 164: 99-114.

[5] WU W X, WANG S F, WU W, et al. A Critical Review of Battery Thermal Performance and Liquid Based Battery Thermal Management[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 262-281.

[6] FAYAZ H, AFZAL A, SAMEE A D M, et al. Optimization of Thermal and Structural Design in Lithium-Ion Batteries to Obtain Energy Efficient Battery Thermal Management System (BTMS): A Critical Review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 29(1): 61-66.

[7] BAMDEZH M A, MOLAEIMANESH G R. The Path from Conventional Battery Thermal Management Systems to Hybrid Battery Thermal Management Systems for Electric Vehicles, Opportunities and Challenges[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100.

[8] RANJBAR K J, MAHLOUJI T M, PAKZAD H, et al. Hybrid Battery Thermal Management Systems Based on Phase Transition Processes: A Comprehensive Review[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86.

[9] 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.

[10] MAHAMUD R, PARK C. Reciprocating Air Flow for Li-Ion Battery Thermal Management to Improve Temperature Uniformity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(13): 5685-5696.

[11] KARIMI D, BEHI H, AKBARZADEH M, et al. A Novel Air-Cooled Thermal Management Approach towards High-Power Lithium-Ion Capacitor Module for Electric Vehicles [J]. Energies, 2021, 14(21).

[12] HASAN H A, TOGUN H, ABED A M, et al. Thermal Performance Assessment for an Array of Cylindrical Lithium-Ion Battery Cells Using an Air-Cooling System[J]. Applied Energy, 2023, 346.

[13] KHATEEB S A, FARID M M, SELMAN J, et al. Design and Simulation of a Lithium-Ion Battery with a Phase Change Material Thermal Management System for an Electric Scooter[J]. Journal of Power Sources, 2003, 128(2): 292-307.

[14] HEKMAT S, MOLAEIMANESH G R. Hybrid Thermal Management of a Li-Ion Battery Module with Phase Change Material and Cooling Water Pipes: An Experimental Investigation[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166.

[15] SIDDIQUE A R M, MAHMUD S, HEYST B V. A Comprehensive Review on a Passive (Phase Change Materials) and an Active (Thermoelectric Cooler) Battery Thermal Management System and Their Limitations[J]. Journal of Power Sources, 2018, 401: 224-237.

[16] LÜ Y F, YANG X Q, ZHANG G Q. Durability of Phase-Change-Material Module and Its Relieving Effect on Battery Deterioration During Long-Term Cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179.

[17] ZHAO J J, CHEN Y, CHEN M Y. Battery Thermal Management with a Modified Metal Alloy/Expanded Graphite/Paraffin Composite Phase Change Material[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 113.

[18] KHABOSHAN H N, JALILIANTABAR F, ABDULLAH A A, et al. Improving the Cooling Performance of Cylindrical Lithium-Ion Battery Using Three Passive Methods in a Battery Thermal Management System[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 227.

[19] YAO F D, GUAN X, CHEN Q R, et al. Research on Thermal Management System of Lithium-Ion Battery with a New Type of Spider Web Liquid Cooling Channel and Phase Change Materials[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 81.

[20] TALLURI T, KIM T H, SHIN K J. Analysis of a Battery Pack With a Phase Change Material for the Extreme Temperature Conditions of an Electrical Vehicle[J]. Energies, 2020, 13(3).

[21] CHUNG Y, KIM M S. Thermal Analysis and Pack Level Design of Battery Thermal Management System with Liquid Cooling for Electric Vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 196: 105-116.

[22] YATES M, AKRAMI M, JAVADI A A. Analysing the Performance of Liquid Cooling Designs in Cylindrical

Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2019.

[23] JARRETT A, KIM I Y. Design Optimization of Electric Vehicle Battery Cooling Plates for Thermal Performance[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23): 10359-10368.

[24] 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.

[25] 任峰胜, 江艳红, 杨辉著. 液冷板流道拓扑优化设计及动力电池散热性能分析[J]. 制冷与空调, 2025, 25(2): 78-85.
REN F S, JIANG Y H, YANG H Z. Topology Optimization Design on Cooling Plates and Cooling Performance Analysis of Power Battery[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2025, 25(2): 78-85.

[26] 闵小滕, 唐志国, 高钦, 等. 基于微小通道波形扁管的圆柱电池液冷模组散热特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(3): 463-469.
MIN X T, TANG Z G, GAO Q, et al. Heat Dissipation Characteristic of Liquid Cooling Cylindrical Battery Module Based on Mini-Channel Wavy Tube[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(3): 463-469.

[27] GIAMMICHELE L, D'ALESSANDRO V, FALONE M, et al. Experimental Study of a Direct Immersion Liquid Cooling of a Li-Ion Battery for Electric Vehicles Applications[J]. International Journal of Heat and Technology, 2022, 40(1): 1-8.

[28] 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.

[29] 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.

[30] TRIPATHI P M, MARCONNET A M. Effect of Immersion Cooling Parameters on Thermal and Electrochemical Response of a Li-Ion Cell[J]. Journal of Power Sources, 2025, 632.

[31] 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.

[32] JUNG E, KONG D, KANG M, et al. Enhanced Immersion Cooling Using Laser-Induced Graphene for Li-Ion Battery Thermal Management[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 155.

[33] FEBRIYANTO R, ARIYADI H M, PRANOTO I, et al. Experimental Study of Serpentine Channels Immersion Cooling for Lithium-Ion Battery Thermal Management Using Single-Phase Dielectric Fluid[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97.

[34] WAHAB A, CIFTERLER N, AMJADY N, et al. Enhancing Energy and Thermal Efficiency of Single-Phase Liquid Immersion Cooling Systems for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 131.

[35] HUANG H, LI W, XIONG S S, et al. Single-Phase Static Immersion-Cooled Battery Thermal Management System with Finned Heat Pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254.

[36] 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.

[37] 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.

[38] 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.

[39] 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.

[40] 王振宇, 张振东, 盛雷, 等. 储能用锂离子电池浸没式热均衡性研究[J]. 低温与超导, 2025, 53(3): 45-52.
WANG Z Y, ZHANG Z D, SHENG L, et al. Research on Immersion Thermal Balance of Lithium-Ion Batteries for Energy Storage[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2025, 53(3): 45-52.

[41] ZHA Y F, HE S Q, MENG X F, et al. Heat Dissipation Performance Research between Drop Contact and Immersion Contact of Lithium-Ion Battery Cooling[J]. Energy, 2023, 279.

[42] CHAVAN U, PRAJAPATI O, HUJARE P. Lithium Ion Battery Thermal Management by Using Coupled Heat Pipe and Liquid Cold Plate[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 80: 382-388.

[43] HAMIDREZA B, MOHAMMADREZA B, DANIAL K, et al. Heat Pipe Air-Cooled Thermal Management System for Lithium-Ion Batteries: High Power Applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183.

[44] LI J J, CHEN M, QIAO L L, et al. Design Optimization and

Scenario Verification of Battery Thermal Management System for Pulsating Heat Pipe with Metallic Oxide Nanofluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279.

[45] SU Y H, ZHANG L, ZHOU Y X, et al. Thermal Management Performance of Flat Heat Pipe in Prismatic Battery Module[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279.

[46] 丹聃, 连红奎, 张扬军, 等. 基于平板热管技术的电池热管理系统实验研究[J]. 中国科学:技术科学, 2019, 49(9): 1023-1030.
DAN D, LIAN H K, ZHANG Y J, et al. Experimental Research on Battery Thermal Management System Based on Vapor Chamber Technology[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49: 1023-1030.

[47] HU X S, ZHENG Y S, HOWEY D A, et al. Battery Warm-up Methodologies at Subzero Temperatures for Automotive Applications: Recent Advances and Perspectives[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 77.

[48] JI Y, WANG C Y. Heating Strategies for Li-Ion Batteries Operated from Subzero Temperatures[J]. Electrochimica Acta, 2013, 107: 664-674.

[49] LÜ Y F, YANG X Q, ZHANG G Q, et al. Experimental Research on the Effective Heating Strategies for a Phase Change Material Based Power Battery Module[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 392-400.

[50] 王发成, 李春明, 郭强, 等. 动力电池组用空气自加热装置试验研究[J]. 电源技术, 2020, 44(7): 961-963.
WANG F C, LI C M, GUO Q, et al. Test of Air Self-Heating Device for Power Batteries[J]. Power Sources, 2020, 44(7): 961-963.

[51] LI J T, E J Q, DING J J, et al. Effect Analysis on the Low-Temperature Preheating Performance of a Novel Micro-Combustor Air Preheater for the Cold Start of the Li-Ion Battery Packs[J]. Energy, 2024, 312.

[52] LIU X J, HONG X H, JIANG X H, et al. Novel Approach for Liquid-Heating Lithium-Ion Battery Pack to Shorten Low Temperature Charge Time[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68.

[53] ZHONG Q, GARG A, GAO L, et al. Topology-Optimized Liquid Cooling Plates for Low-Temperature Battery Preheating: a Multi-Objective Thermal Management Strategy[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 67.

[54] WANG Y B, RAO Z, LIU S C, et al. Evaluating the Performance of Liquid Immersing Preheating System for Lithium-Ion Battery Pack[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 190.

[55] BAO J K, ZHOU Z F, WU W T, et al. Experimental Study on Liquid Immersion Preheating of Lithium-Ion Batteries under Low Temperature Environment[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 60.

[56] LIU X Y, LI Y, GAO S, et al. Efficient Cold-Starting Project with Mild Lithium Plating for Lithium-Ion Batteries Using Immersion Liquid Cooling at Low Temperatures[J]. Applied Energy, 2025, 384.

[57] HAILEMICHAEL H, AYALEW B. Combined Film and Pulse Heating of Lithium Ion Batteries to Improve Performance in Low Ambient Temperature[J]. IFAC-Papers OnLine, 2023, 56(3): 427-432.

[58] YANG W, ZHOU F, LIU Y C, et al. Preheating Performance by Heating Film for the Safe Application of Cylindrical Lithium-Ion Battery at Low Temperature[J]. Fire Technology, 2022, 59: 1115-1135.

[59] ZHANG J Y, HU R Q, HUANG H N, et al. Experimental Study on the Low-Temperature Preheating Performance of Positive-Temperature-Coefficient Heating Film in the Prismatic Power Battery Module[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258.

[60] E J Q, QIN Y S, ZHANG B, et al. Effects of Heating Film and Phase Change Material on Preheating Performance of the Lithium-Ion Battery Pack with Large Capacity under Low Temperature Environment[J]. Energy, 2023, 284.

[61] LIU Z R, GUO Y H, JIANG R, et al. Exploring a Preheating Strategy for Lithium-Ion Battery Pack Using Graphene-Enhanced Microencapsulated Phase Change Materials[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 104.

[62] WANG C-Y, ZHANG G S, GE S H, et al. Lithium-Ion Battery Structure That Self-Heats at Low Temperatures[J]. Nature, 2016, 529: 515-518.

[63] YANG X-G, LIU T, WANG C Y. Innovative Heating of Large-size Automotive Li-Ion Cells[J]. Journal of Power Sources, 2017, 342: 598-604.

[64] ZHANG G S, TIAN H, GE S H, et al. Visualization of Self-Heating of an All Climate Battery by Infrared Thermography [J]. Journal of Power Sources, 2018, 376: 111-116.

[65] SELINIS P, FARMAKIS F. Anode Electrode with Integrated Nichrome Resistance Wires as a Heating Element for Low-Temperature Lithium-Ion Cell Operation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 229.

[66] LONGCHAMPS R S, GE S H, TRDINICH Z J, et al. Battery Electronification: Intracell Actuation and Thermal Management[J]. Nature Communications, 2024, 15(1).

[67] MOHAN S, KIM Y, STEFANOPOULOU A G. Energy-Conscious Warm-up of Li-Ion Cells from Subzero

Temperatures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2954-2964.

[68] RUAN H J, JIANG J C, SUN B X, et al. A Rapid Low-Temperature Internal Heating Strategy with Optimal Frequency Based on Constant Polarization Voltage for Lithium-Ion Batteries[J]. Applied Energy, 2016, 177: 771-782.

[69] JIANG J C, RUAN H J, SUN B X, et al. A Low-Temperature Internal Heating Strategy without Lifetime Reduction for Large-Size Automotive Lithium-Ion Battery Pack[J]. Applied Energy, 2018, 230: 257-266.

[70] LI J Q, SUN D N, CHAI Z X, et al. Sinusoidal Alternating Current Heating Strategy and Optimization of Lithium-Ion Batteries with a Thermo-Electric Coupled Model[J]. Energy, 2019, 186.

[71] TANG G F, HU M H, CHEN L G, et al. A Variable-Frequency Self-Heating Strategy for Lithium-Ion Batteries Based on an Electrochemical Impedance-Thermal Coupling Model Applicable to a Wide Frequency Range[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58.

[72] SHANG Y L, ZHU C, LU G P, et al. Modeling and Analysis of High-Frequency Alternating-Current Heating for Lithium-Ion Batteries under Low-Temperature Operations [J]. Journal of Power Sources, 2020, 450.

[73] JOACHIM O, ANDREAS G, DANIEL M, et al. High Frequency Alternating Current Heating Method for Li-Ion Cells Based on Boost Converter Topology[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 53.

[74] CUI W, LI Y, MA Z Y, et al. Modeling and Research on High-Frequency AC Heating System for Lithium-Ion Battery Based on Bidirectional Buck-Boost Topology[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254.

[75] QU Z G, JIANG Z Y, WANG Q. Experimental Study on Pulse Self-Heating of Lithium-Ion Battery at Low Temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 696-705.

[76] 陈泽宇, 张渤, 熊瑞, 等. 动力电池低温极速自加热系统加热一致性及其影响因素的建模分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 226-236.
CHEN Z Y, ZHANG B, XIONG R, et al. Modeling Analysis of Heating Consistency and Influencing Factors of Low-Temperature Extreme-Speed Self-Heating System of Battery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (22): 226-236.

[77] HUANG R J, WEI G, WANG X Y, et al. A Non-Destructive Heating Method for Lithium-Ion Batteries at Low Temperatures[J]. Energy Storage Materials, 2024, 205.

[78] HUANG R J, WEI G, ZHOU X Y, et al. Targeting the Low-Temperature Performance Degradation of Lithium-Ion Batteries: A Non-Destructive Bidirectional Pulse Current Heating Framework[J]. Energy Storage Materials, 2024, 65.

[79] ZHUANG Z X, LI J, LUAN W L, et al. Distribution of Relaxation Times-Based Analysis of Aging Mechanisms and Prediction of Heating Domain for Alternating Current Pulse Self-Heating Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2024, 623.

[80] AN Z G, LIU H X, GAO W L, et al. Cooling and Preheating Performance of Dual-Active Lithium-Ion Battery Thermal Management System under Harsh Conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 242.

[81] CHOI H, KIM H, PARK P, et al. Development of a Mini-Channel and Metal Foam-Assisted Static Immersion Cooling and Preheating System for Electric Vehicle Battery Thermal Management[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 70.

[82] JIANG Z K, MA R X, HOU Z Y, et al. Experimental Investigation of a Vehicle-Scale Immersion Cooling Battery Thermal Management System for High-Energy-Density Battery Packs under Cooling and Heating Conditions[J]. Energy, 2026, 348.

[83] ZHANG Z B, YU W, LI H B, et al. Heat Transfer Characteristics and Low-Temperature Performance of a Lithium-Ion Battery with an Inner Cooling/Heating Structure[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219.

[84] WANG T, ZHANG X, ZENG Q L, et al. Bidirectional Heat Transfer Characteristics of Cavity Cold Plate Battery Thermal Management System: An Experimental Study[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225.

[85] WANG Z H, BAO R Q, ZHANG N J, et al. Performance Study and Optimization of Battery Thermal Management System for Integrated Cooling/Heating of Cylindrical Lithium-Ion Battery Modules[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 147.

[86] CHENG G, WANG Z Z, WANG X Z, et al. All-Climate Thermal Management Structure for Batteries Based on Expanded Graphite/Polymer Composite Phase Change Material with a High Thermal and Electrical Conductivity [J]. Applied Energy, 2022, 322.

[87] CHUNG S K, JO Y, BAIK S, et al. Enhanced Cooling Performance of Hybrid Battery Thermal Management System with Thermoelectric Modules and Multi-Layered Phase Change Materials[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 155.

（责任编辑　南　杉）

修改稿收到日期为2026年8月17日。