



锂电池低温预热技术最新进展

石 鹏¹, 张伟杰¹, 张恒运^{1,2}, 赵宇含¹, 孙玉坤², 祝 成³, 冯文博⁴

(¹上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; ²国家市场监督管理总局重点实验室(储能与动力电池安全), 四川 宜宾 644005; ³四川赛科检测技术有限公司, 四川 宜宾 644000; ⁴内蒙古赛氮检测技术有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要: 锂离子电池正逐步成为世界新质生产力。然而, 低温环境会降低锂离子电池的充放电性能、功率输出和能量利用效率, 并加剧负极极化与析锂风险, 影响电动汽车、储能系统及低温装备的安全运行和使用寿命。本文系统梳理了锂离子电池低温预热技术的最新研究进展, 将预热方法划分为外部预热、内部预热和混合预热三类。外部预热技术结构安全性较高且比较成熟, 但也存在传热路径长、升温速度较慢和内外温差较大的问题。内部预热技术可以直接在电芯内部产生热量, 具有升温速度快、传热损失小等优势, 但需重点控制低温大电流作用下的过电压、析锂和寿命衰减风险。混合预热技术通过内部产热与外部预热协同, 或多种外部热源耦合, 可在升温速率、温度均匀性和能耗控制之间取得平衡, 是未来低温预热技术的重要发展方向。最后, 本文从能耗、集成简易程度、寿命与安全、整车和评价体系等方面展望了低温预热技术的发展趋势, 以期锂离子电池低温热管理系统的后续研究和工程应用提供参考。

关键词: 锂离子电池; 低温预热; 析锂; 温度均匀性; 升温速率; 预热时间

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0471

中图分类号: TM 912.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-16

Recent Advances in Low-Temperature Preheating Technologies for Lithium-Ion Batteries

SHI Peng¹, ZHANG Weijie¹, ZHANG Hengyun^{1,2}, ZHAO Yuhan¹, SUN Yukun², ZHU Cheng³,
FENG Wenbo⁴

(¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, 201620, China; ²Key Laboratory of Energy Storage and Power Battery Safety, State Administration for Market Regulation, Yibin 644005, Sichuan, China; ³Sichuan Saike Testing Technology Co., Ltd., Yibin 644000, Sichuan, China; ⁴Inner Mongolia Saike Testing Technology Co., Ltd., Ordos 017200, Inner Mongolia, China)

Abstract: Lithium-ion batteries are gradually becoming an important component of the world's new quality productive forces. However, low-temperature environments reduce the charge - discharge performance, power output, and energy utilization efficiency of lithium-ion batteries, while aggravating anode polarization and the risk of lithium plating, thereby affecting the safe operation and service life of electric vehicles, energy storage systems, and low-temperature equipment. This paper systematically reviews the latest research progress in low-

收稿日期: 2026-05-29; 修改稿日期: 2026-07-14。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52476079), 国家市场监督管理总局重点实验室(储能与动力电池安全)资助项目 (KLBS-KF2025B05)

第一作者: 石鹏 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车电池测控与热管理 E-mail: pengshi220626@sues.edu.cn; 通信作者: 张恒运, 教授, 研究方向为新能源汽车电池测控与热管理, 相变储能, 集成电路散热等, E-mail: zhanghengyun@sues.edu.cn。

引用本文: 石鹏, 张伟杰, 张恒运, 等. 锂电池低温预热技术最新进展[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(X): 1-16.

Citation: SHI Peng, ZHANG Weijie, ZHANG Hengyun, et al. Recent Advances in Low-Temperature Preheating Technologies for Lithium-Ion Batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(X): 1-16.

temperature preheating technologies for lithium-ion batteries and classifies these technologies into three categories: external preheating, internal preheating, and hybrid preheating. External preheating technologies feature relatively high structural safety and maturity, but still suffer from long heat transfer paths, slow heating rates, and large internal - external temperature differences. Internal preheating technologies can generate heat directly inside the cell, offering advantages such as rapid heating and low heat transfer loss; however. Nonetheless, the risks of overvoltage, lithium plating, and lifespan degradation under high-current conditions at low temperatures need to should be carefully controlled. Hybrid preheating technologies, through the synergy between internal heat generation and external heat supplementation or the coupling of multiple external heat sources, can achieve a balance among heating rate, temperature uniformity, and energy consumption control, making them an important development direction for future low-temperature preheating technologies. Finally, this paper forecasts the development trends of low-temperature preheating technologies in terms of energy consumption, integration feasibility, cycle life and safety, vehicle integration and evaluation framework, which can offer a reference for subsequent research and practical engineering implementation of lithium-ion battery low-temperature thermal management systems.

Keywords: lithium-ion battery; low-temperature preheating; lithium plating; temperature uniformity; heating rate; preheating time

随着新能源汽车、轨道交通及储能系统在寒冷地区的应用扩展,动力电池低温适应性受到关注。电池性能的影响因素包括温度、充放电倍率、荷电状态(SOC)以及电芯一致性等,其中温度是影响电池性能和安全的重要因素^[1-9]。相较于常温工况,低温环境会导致电池启动困难、功率下降、续航缩短和充电效率降低等问题^[9-11]。尤其是在零下环境直接进行大倍率充电时,负极极化加剧,析锂与不可逆衰减风险显著上升^[12-15]。因此,在低温启动前或充电前将电池温度提升至适宜区间,是保障动力性能、充电安全和寿命的重要前提。

低温对锂离子电池的不利影响并非由单一因素导致,而是电解液传输、界面反应和固相扩散等过程共同受限的结果^[9];阻抗分析表明,在低温及极端荷电状态下,电荷转移阻抗在总阻抗中的占比会显著增加,这是导致功率和能量下降的重要原因^[10],此外电池在低温使用过程中还存在膨胀问题^[16]。

近年来,低温预热研究呈现出系统化的趋势^[17],电池热管理技术正由单一冷却或加热方式向复合式、集成化方向发展,多技术耦合是提升电池温度控制和环境适应的重要方向^[18]。已有综述从外

部和内部加热分类、加热三角形评价、知识图谱分析及相变材料(PCM)在电池预热应用等角度总结了低温预热研究进展^[19-22]。

随着电池技术发展,低温预热技术的研究对象已由单体扩展至模组和电池包,评价重点也由单一升温能力转向升温速率、能耗、温度均匀性、寿命影响和安全风险的综合权衡。基于此,本文归纳当前电池低温预热技术,为后续研究设计与工程应用提供参考。图1(a)归纳了预热技术适用场合与选型,图1(b)(c)分别展示了外部预热与内部预热技术原理。

1 锂离子电池低温预热技术分类

1.1 外部预热技术

外部预热是指热量先在电芯外部产生,再通过导热、对流或相变储能等途径传递到电池内部。该类方法无需改变电芯内部结构,因此在工程实现和安全性方面具有较强吸引力。按照热源形式和传热媒介差异,可进一步分为液体预热、气体预热、PCM预热和电热器件预热。

1.1.1 液体预热

液体预热利用加热液、浸没液等作为热量载

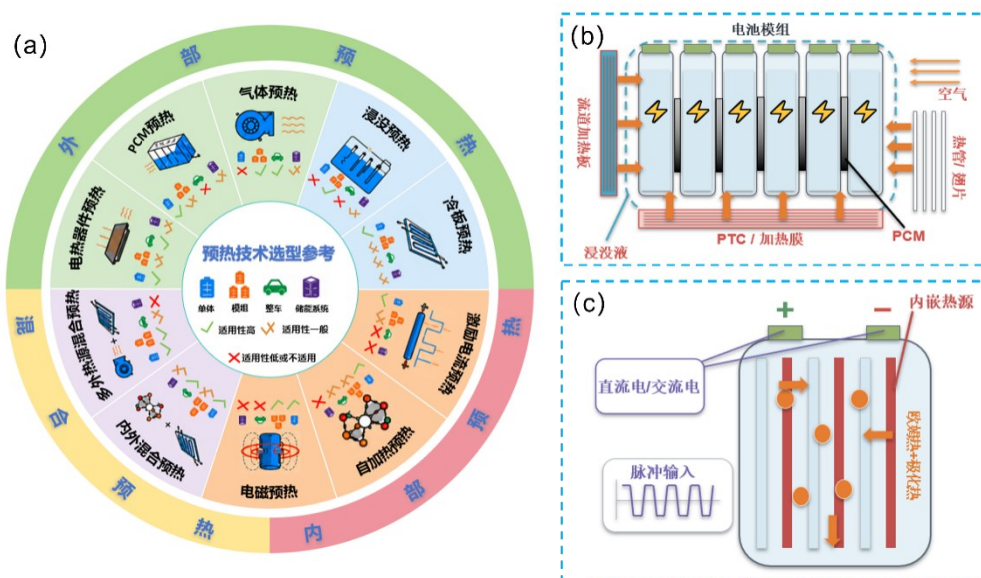


图1 (a)预热技术适用场合与选型参考图; (b)外部预热; (c)内部预热

Fig. 1 (a)Application scenarios and selection guide for low-temperature preheating technologies; (b)schematic diagram of external preheating; (c)schematic diagram of internal preheating

体, 通过循环换热将热量输送至电池模组或电池包。该方法在模组和电池包尺度上更容易兼顾升温速度与温度均匀性。如图2(a)所示, Zhang等^[23]以5颗方形72Ah磷酸铁锂动力电池模组为研究对象开展三维仿真并进行了实验验证, 采用电池大面贴合中空铝板, 中空铝板通导热液实现3分钟内快速低温预热。结果表明, 该方法在加热流体温度30℃、流速0.02m/s的情况下可在180s内将电池从-20℃加热到25℃。模组最大温差小于5℃, 最大温升速率可达39.58℃/min, 并指出管径对预热效果的影响很小。

Zhong等^[24]基于6颗方形磷酸铁锂电池模组开展拓扑优化, 结果显示双入双出结构可使平均加热

速率提升7%, 温差控制在5℃以内, 压降最大降低74.4%。刘霏霏等^[25]针对6.5Ah方形三元两电电池模组, 设计了一种翅片复合式预热传热板, 如图2(b)所示, 该结构由铝制传热板、圆翅、肋翅复合翅片外加8条并行流道所组成, 通过优化调节乙二醇水溶液预热液温度、入口流量、流道高度、复合翅尺寸等关键参数, 可在767s将电池模组温度由-10℃提升到22.4℃, 最大温差4.43℃。Yang等^[26]针对22Ah方形电池模组, 提出基于拓扑优化的双入三出液冷板, 如图2(c)所示, 通过数值模拟发现, 电池温度由-20℃上升到25℃仅需163s, 电池温度标准差0.82℃, 加热时间比直通道缩短15.81%, 温差降低14.47%~49.78%。

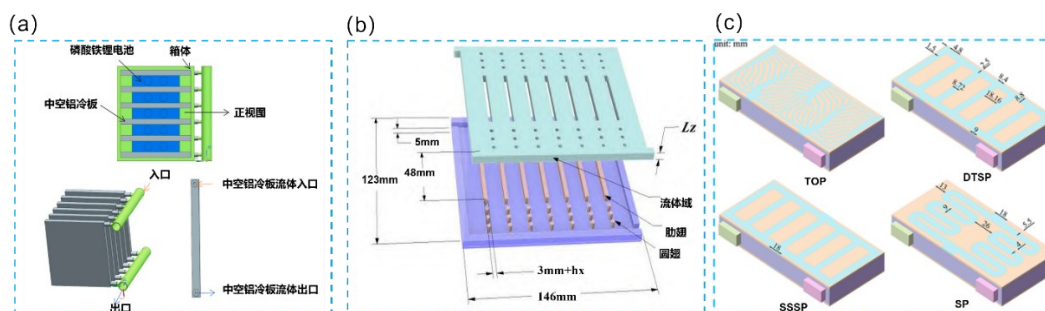


图2 (a)方形动力电池侧面液体间接预热模型结构图^[23]; (b)翅片复合式预热传热板^[25]; (c)拓扑优化液冷板^[26]

Fig. 2 (a)Model structure diagram^[23]; (b)schematic diagram of the composite finned preheating heat transfer plate^[25]; (c)schematic diagram of a topology-optimized liquid cooling plate^[26]

此外,邓家洪^[27]提出了一种液冷散热板将传统的单一散热路径升级为兼具散热与加热功能的热管理单元,散热板内沿板延伸方向设置有利于安装PTC发热体的腔体,腔体与流道间隔设置,腔体贯通基板两端,安装有PTC发热体,使得PTC加热与液冷集成于一体,简化了加热与液冷结构,降低了结构成本。

虽然浸没式冷却研究逐步增加^[28-29],而其预热性能缺少系统性研究。有鉴于此,Wang等^[30]采用绝缘硅油直接浸泡方形电池实现快速低温预热,如图3(a)。将温升速率、模组温差、单体温差、能量

密度等作为关键评价指标,为浸没式预热提供设计依据。仿真与实验结果表明,电池模组温度由 -28°C 上升到 25°C ,温升速率最高可达 $4.18^{\circ}\text{C}/\text{min}$,模组最大温差小于 4°C 。Liu等^[31]针对由24颗镍钴锰三元18650电池组成的模组,开发了一种基于精制液态烃混合物的两相浸没式预热系统,如图3(b)所示。利用矿物油相变沸腾强化预热,温升速率远高于单相的 $3.18^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。Bao等^[32]研究单相硅油浸没式循环预热,如图3(c)所示,电池模组最高温升速率为 $1.63^{\circ}\text{C}/\text{min}$,单体最大温差小于 4°C 、模组最大温差小于 6°C ,但能效仍有提升空间。

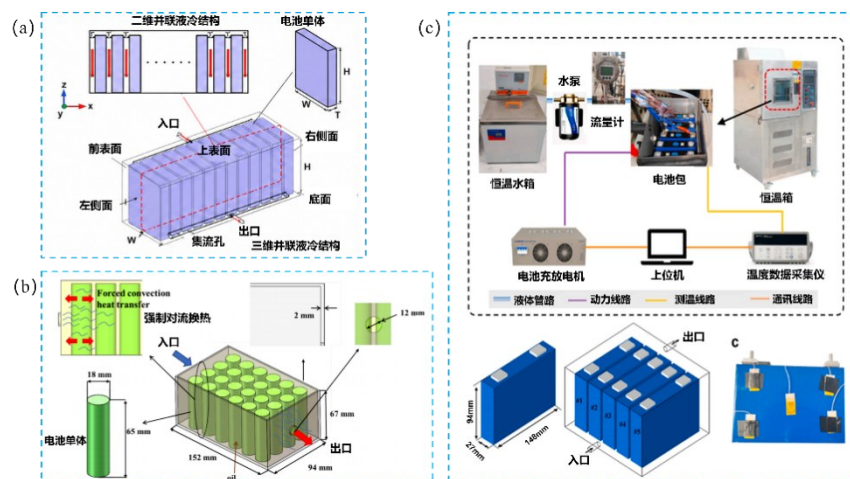


图3 (a)浸没式方形电池模组结构示意图^[30]; (b)浸没式圆柱电池模组结构图^[31]; (c)浸没式方形电池模组实验装置图^[32]

Fig. 3 (a)Schematic diagram of an immersion-type prismatic battery module^[30]; (b)schematic diagram of an immersion-type cylindrical battery module^[31]; (c)experimental setup of an immersion-type prismatic battery module^[32]

传统电动车低温预热技术难以兼顾电池温控与座舱舒适,往往优先保障电池动力而牺牲乘客体验,Guo等^[33]提出将制冷剂回路用于电池与座舱一体化热管理,利用高温制冷剂冷凝热为电池加热。仿真结果表明,环境温度为 0°C 时,电池可在15min内预热至 20°C ;环境温度为 7°C 时,预热时间缩短至9min,电池包最大温差约 1.2°C ,预热能耗占整车能耗的3.5%–5.2%。Liu等^[34]基于浸没式预热建立电化学-热-老化耦合模型,实验中电池模组由 -10°C 升至 15°C 需1250s,模组温差小于 1°C ,能耗仅为箱体加热膜方案的46.98%,同时有助于抑制析锂和容量衰减。

液体预热依靠液体介质较高的比热容和对流换热能力,适合模组和电池包尺度下的集中供热与均温控制,也便于与整车热管理系统耦合。其主要不

足是泵、管路、阀件、密封和绝缘设计增加了系统复杂度,同时还存在介质兼容性、泄漏风险和能效问题。

1.1.2 气体预热

气体预热通常以空气为介质,通过加热空气并与电池模组进行强制对流换热实现升温,早期研究和部分工程样机中应用较多。Song等^[35]验证了车载暖风式气体预热的可行性,结果表明低温行驶前空气加热可提升电池可用容量和续航表现。王发成等^[36]设计了一套电热丝加热空气再通过热风预热电池的纯气体预热装置。该电池组一共包含12块电池,各单体之间预留10mm间隙;整套加热过程耗时21分钟,可让电池组温度从 -15°C 稳步升至 0°C 。除了加装独立加热装置外,还可直接复用电动汽车原厂空调系统实现空气预热。Chen^[37]等,

依托空调系统搭载的4.5kW加热器对电池进行热风加温。经冬季实车测试验证,电池温度从 -5°C 提升至 5°C 共耗时24min。如图4所示,Xu等^[38]提出套筒式均热板与薄膜加热器耦合的空气预热系统。该方案通过均热板降低热阻并改善热量扩散,使20颗18650电池模组由 -20°C 升至 0°C ,温升速率达 $6.98^{\circ}\text{C}/\text{min}$,最大温差 2.91°C ;改进控制方案可进一步将温差降至 1.25°C 。

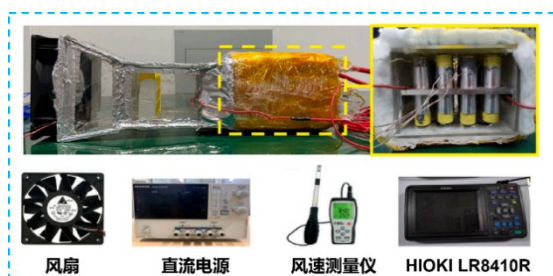


图4 空气冷却试验实验布置^[38]

Fig. 4 Experimental arrangement for air cooling test^[38]

气体预热结构简单、绝缘性好、维护方便且成本较低,可复用热风、电阻丝或车辆空调系统。但空气换热能力弱,预热时间较长、能效偏低,更适合作为低成本基础方案或与均热板、加热膜、液体回路等方式配合使用。

1.1.3 PCM 预热

PCM 预热是利用材料在相变过程中吸收和释放潜热的特性,实现电池保温、缓释热量和改善温度。Al-Hallaj等^[39]首次将PCM应用于电动汽车并验证了其可行性。结果表明,集成了PCM的电池具有更好的温度均匀性。Ling等^[40]通过实验研究PCM对低温下电池的预热和保温效应,实验表明PCM可通过储热保温改善锂电池低温工作环境,使 -10°C 下容量衰减降低76%,显著延长了电池寿命。Luo等^[41]制备了一种导电石蜡/膨胀石墨复合相变材料(CPCM)如图5(a)所示。在外部施加3.4V工作电压条件下,该材料可实现以 $13.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率对电池快速升温,同时电池整体最大温差仅为 3.3°C 。试验测试表明,这种CPCM加热温控技术能够从电池模块层级进一步拓展至大规模电池组系统,并且可覆盖 -40°C 至 50°C 超宽温区。

Luo等^[42]开发了一种不需要外接电源、由电池自身放电供给电池的预热系统。叠加电池在放电时

就存在的固有温升,该方法将电池从 -20°C 预热到 20°C 最大温升速率可达 $17.14^{\circ}\text{C}/\text{min}$,电池模组最大温差 3.58°C ,且能耗仅为电池总能量的4%–6%。He等^[43]提出基于过冷PCM的低温预热策略,并通过响应面法优化PCM材料类型、厚度和单体间隙。结果表明,较优方案可在约29s内将电池组由 5°C 预热至 20°C ,最大温差约 1.93°C ,但工程应用仍需进一步优化材料稳定性和结构封装。

单一PCM预热往往难以取得较好的预热效果,目前的发展趋势是将PCM和其他加热技术相结合。E等^[44]将加热膜与PCM结合,如图5(b)所示。在快速预热方案下使 -20°C 、 -10°C 和 0°C 工况的预热时间分别缩短至602s、518s和394s,单体间平均温差控制在 2°C 以内。Xu等^[45]提出柔性薄膜加热器与双层PCM结构,如图5(c)所示,在 -20°C 、1C放电条件下可使电池放电能量提高5.60%,50次低温循环后容量仍比裸电池高5.63%。

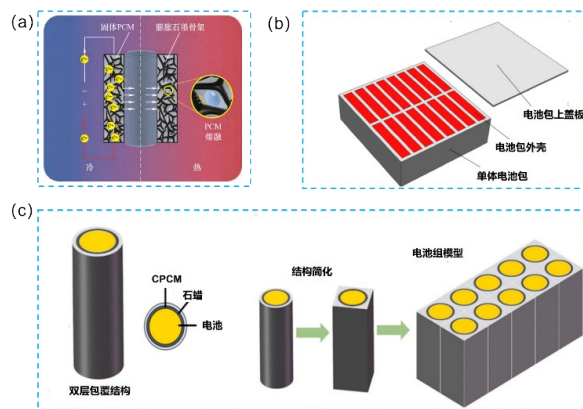


图5 (a)带有导电CPCM加热^[41]; (b)方形电池模组结构图^[44]; (c)圆柱电池模组结构图^[45]

Fig. 5 (a)Heating with conductive CPCM^[41]; (b) structural diagram of a prismatic battery module^[44]; (c) structural diagram of a cylindrical battery module^[45]

Choi等^[46]提出了一种基于聚合物电芯间换热器与PCM耦合的电池热管理系统。该系统以聚合物材料替代传统金属换热器降低质量,并在电池与换热器之间引入PCM,以弥补聚合物导热能力不足和改善热缓冲能力。虽然其升温速度略慢,但能够降低电池内部温差。在 -20°C 初始环境下,当电池最低温度升至 10°C 时,所需预热时间约为1180s,同时最终温差约为 6.3°C 。Liu等^[47]提出了一种石墨烯增强微胶囊相变材料,并将该材料加热膜、铝制外壳组合。研究表明,随着石墨烯含量增加,电池

组温差降低,但达到目标温度所需时间延长。在 -20°C 环境、20W加热功率条件下,石墨烯含量由0wt%增加至6wt%时,电池组最大温差由 4.91°C 降低至 3.03°C ,但电池由 -20°C 升至 10°C 的时间由1652s增加至2645s。

PCM预热的主要价值在于均温、保温和热缓冲,适合主动热源或导热增强材料配合使用。不足之处在于单一PCM导热系数较低、主动升温能力有限,还会增加系统质量、体积和封装复杂度。

1.1.4 电热器件预热

电热器件预热主要通过电加热板/膜、电阻材料、温度系数热敏电阻材料(PTC)、热电阻温控器(TEC)热管或热电器件等部件在外部产生热量,再经导热路径传递到电芯。该路线结构相对成熟且易于与模组壳体和热管理回路集成。

基于帕尔贴效应的TEC兼具加热与冷却功能,2003年首次有研究将帕尔贴效应应用于电动汽车乘员舱和电池舱热管理^[48-49]。在加热的工况下,前、后电池舱分别在20min内由 17°C 升至 37°C 和 29°C ,最大温差约为 8°C ,能耗约占总能量的2.5%。结果表明,该热电系统能够实现电池舱升温,该热电系统能够实现电池舱升温,但其加热效果逊于冷却效果。

相关研究表明,加热膜布置方式和隔热结构对外部电热预热效果影响显著,如图6(a)所示,柔性加热膜与PCM耦合可在 -20°C 下实现较快升温并降低温差,对于大尺寸方形电池,前表面加热配合隔热层可兼顾预热时间、能耗和温度均匀性^[50-52]。Yi等^[53]提出双面热电装置系统如图6(b)所示,通过切换TEC电流方向实现制冷与预热,在预热模式下可在约342s内将模组由 -20°C 升至 10°C ,加热效率达到1.83。

电热器件预热的优点是技术成熟、控制简单、布置灵活且易于与电池模组壳体集成。PTC具有自限温特性,柔性加热膜可提高贴合面积,热电器件则能够兼顾加热和冷却功能,但热量从电芯外部向内部传递,容易形成内外温差,若加热膜位置、功率密度或隔热结构设计不合理可能出现局部过热、温差过大等问题。

1.1.5 外部预热技术小结

表1可见,外部预热整体具有结构安全、工程实现难度较低等优势。其中,液体预热和电热器件

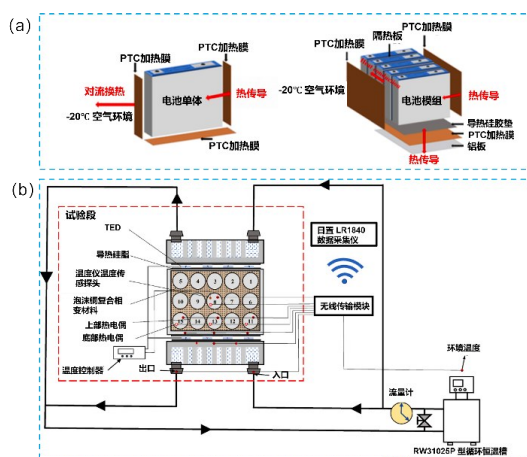


图6 (a)方形电池模组结构及PTC粘贴示意图^[51]; (b)基于双侧TEC技术的实验系统及热电偶布置位置示意图^[53]

Fig. 6 (a)Schematic diagram of the prismatic battery module structure and PTC attachment^[51]; (b) schematic diagram of experimental system and thermocouple position based on double-sided TEC techniques^[53]

预热应用基础较好,适合模组和电池包尺度。PCM更偏向均温和保温,气体预热则成本较低但升温较慢。

1.2 内部预热技术

该技术通过电流激励或内嵌热源,热量在电芯内部产生并用于升温,其核心优势在于传热路径短、向环境散热损失小,避免了“先热外壳、再热中心”的迟滞过程。从产热来源看,内部预热主要包括激励电流预热、自加热预热和电磁预热三类。

1.2.1 激励电流预热

激励电流预热是当前研究最充分的内部预热路线。该方法利用低温下电池内阻升高的特征,通过施加交流、脉冲电流、方波电流或多级激励电流,使电池在欧姆热和极化热作用下迅速升温。

在脉冲加热方面,Qu等^[54]对18650圆柱电池单体进行直流脉冲电流预热,实验表明电池温度由 -10°C 上升到 10°C 仅需要175s且表面温差小于 0.5°C 。设计合理的脉冲策略可在数百秒内完成低温预热,等效电路模型示于图7(a),该模型还可将容量衰减控制在较低水平^[55-56]。通过高频交流、多级交流或直流-交流混合策略可提升产热效率,通过温度、荷电状态(SOC)和端电压约束可降低超压和析锂风险^[57-59]。

Wang等^[60]验证了高频方波脉冲在低温条件下的适用性,在 3.6°C 、 2.5kHz 工况下加热速率约

表1 外部预热技术综合对比
Table 1 Comprehensive comparison of external preheating technologies

预热方法	预热效率/加热时间	能耗特征	温度均匀性	主要优点与不足
液体预热	通常为数分钟；优化液冷板、浸没式和制冷剂回路可实现较快升温。	需要泵、加热器或制冷剂回路供能；与整车热管理耦合可降低综合能耗。	较好，可通过流道、浸没介质和拓扑优化改善模组温差。	换热能力强、适合模组和电池包；但结构复杂，存在泄漏、绝缘、重量和维护风险。
气体预热	预热时间较长，多为十几分钟；强化流道或均热板后可改善。	空气换热能力弱，能效偏低。	整体均温性较好，但电芯升温滞后明显。	结构简单、成本低、绝缘性好；但升温慢，难以满足极寒和大容量电池包预热需求。
PCM 预热	主动升温能力有限；与其他预热技术耦合后可显著缩短预热时间。	可利用潜热储能和保温降低热损失减小能耗。	较好，适合改善电池间温差和预热后保温。	均温、保温和热缓冲能力强；但导热系数低、封装复杂，存在泄漏和相变稳定性问题。
电热器件预热	电热器件加热一般为数百秒，受功率密度和布置位置影响较大。	电能直接转化为热量；高功率可能增加能耗和过热风险。	取决于布置方式：单面或底部加热易产生表面-中心温差。	技术成熟、布置灵活、易工程化；但传热路径长，需优化加热位置、功率分配和隔热结构。

2℃/min，50次循环后容量保持率大于96%，阻抗无明显上升。Guo等^[61]提出梯级内部加热策略，根据实时温度和电压更新电流幅值，电池模组最大温差小于2.9℃，连续40次预热循环后容量无明显衰减。

近年来，微核高频脉冲加热技术受到关注，其利用低温下电池内阻较大的特点，通过电机控制器和电机绕组产生高频交变激励电流，使电流流经电池内阻产生焦耳热，从而实现电池自发热。及非凡等^[62]提出基于电驱系统高频注入的电池包快速加热控制算法，利用原有电驱系统硬件即可在电池侧产生幅值和频率可调的交变电流。在工程应用方面，长安/深蓝汽车提出的微核高频脉冲加热技术复用电驱系统作为激励源，在-30℃环境下电池温升速率可达4℃/min^[63]。

激励电流预热传热路径短、响应快，适合冷启动和低温快充前调温。但该方法会消耗电池剩余电量，低温大电流激励也可能带来过电压和析锂风险；由单体扩展至模组或电池包时，还需考虑电芯一致性、串并联拓扑和电池管理系统控制精度。

1.2.2 自加热预热

自加热预热通常是电池自放电或通过在电芯内部嵌入导电层、发热元件或专用电流通路，使电池在需要时形成可控内部热源。与普通电流激励相比，该方法可降低对复杂外部波形控制的依赖，并增强热源布局的针对性。Zhang等^[64]提出了一种基于PTC材料的电池包自加热预热方法。将PTC电阻带嵌入开槽铝板中布置于电芯之间，通过电池包自身放电为PTC供电。实验结果表明，在100%SOC条件下，电池包自加热可在34.2min内

由-39.4℃升至-20.7℃，并在48min内由-19.3℃升至-2.4℃。虽然会消耗约13%的电池包能量，但其放电容量比外部电源加热高6.981Ah。

自加热电池(SHLB)采用在电池内部嵌入发热元件的方式改变电池结构，以此实现内部加热，也被称作全气候电池(ACB)(Wang等^[65])，研究人员将带有两个极耳的镍箔作为发热元件置入电池内部，具体结构如图7(b)所示。结果表明，该电池从-30℃加热至0℃仅需29.6s，温升速率可达60℃/min，能耗为电池容量的5.5%；在-30℃环境下经过500次循环加热，容量损失不超过7.2%。不过，加热时镍箔内部温度上升速度远快于表面，内外最大温差可达30℃，会对电池的长期循环寿命产生不利影响。Yang等^[66]在此基础上开发了内置镍箔的全尺寸快速均匀自热方案，在电芯内部多层电极间嵌入多片绝缘镍箔作为第三端子，进一步缩短热传导距离，使40Ah大尺寸电池在26.8s内完成-30℃到0℃加热。该类结构升温效率高，但电芯内部结构改动可能带来制造难度和局部热集中风险。

Feng等^[67]将PTC材料引入20Ah软包电池自预热系统，如图7(c)所示，电芯在内部集成PTC加热薄膜，并利用材料电阻的温度响应实现自调节。试验结果表明电池平均温升速率高达41.94℃/min，达到热平衡时温差仅1.5℃，且加热后可长期维持在32℃左右。放电容量提升58.6%，充电时间缩短67.8%。Guan等^[68]提出一种完全依靠电池自身内阻产生焦耳热的预热方法，让电池自己以多阶段恒流放电加热到目标温度，采用SOC感知型多目标优化内部预热策略，温度每升1℃更新一次放电能

流。相比传统恒流预热，时间缩短 54.2~158.7s，最大温升速率 0.28℃/s，20 次循环容量损失仅 6.35%~6.95%。

自加热预热可在电芯内部形成接近热源本体的发热路径，升温优势明显，还可摆脱外部电源依赖。但其通常需要改变电芯结构或增加内部器件，其未来应用仍取决于结构安全性、制造成本和长期循环可靠性。

1.2.3 电磁预热 电磁预热是利用外加交变电磁场在电芯内部诱发涡流损耗或其他电磁热效应，以非接触方式实现快速升温。

Jiang 等^[69]提出低功率电磁感应加热的新方法，如图 7(d)所示，通过交变磁场使得电池内部集流体

产生涡流，并由焦耳热直接加热电池。实验表明电池温度由 0℃ 上升到 30℃ 仅需约 25 秒，且温差小于 6℃。实测能效比 (COP) 约为 0.792，具有较高的效率，优于传统金属加热膜和 PTC 加热。

Xiong 等^[70]提出基于无线能量传输系统的高频交流内部预热方法如图 7(e)所示。利用无线充电系统的电磁耦合过程获得高频正弦交流电，并输入电池，使电池通过内部阻抗产生焦耳热实现低温快速预热。实验表明，在 3C 电流下电池模组由 -10℃ 上升到 0℃，仅需 142s，平均速率 8.5℃/min，温差小于 2.5℃。并且在范围 SOC 均可稳定加热，连续 200 次循环预热，容量几乎无衰减。

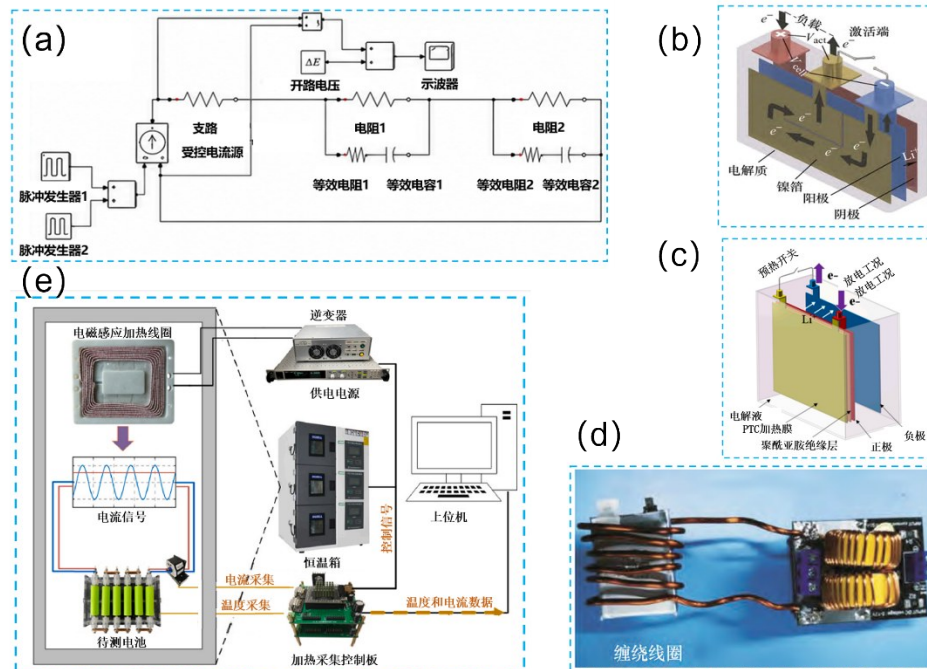


图 7 (a) 等效电路模型^[65]; (b) SHLB 电池结构原理图^[65]; (c) 内部嵌入 PTC 材料的方形电池^[67]; (d) 感应加热线圈布置图^[69]; (e) 无线能量传输实验装置^[70]

Fig. 7 (a)Equivalent circuit model^[65]; (b)schematic diagram of the SHLB structure^[65]; (c)prismatic battery internally embedded with PTC material^[67]; (d)Layout diagram of the induction heating coil^[69]; (e)wireless energy transfer experimental setup^[70]

相比导线直接注流，电磁预热具有非接触和快速响应优势，热量可在集流体或电芯内部导电结构中产生。若与无线充电系统或高频交流电路复用，还可提升系统集成度。但性能高度依赖线圈布置、磁场分布和电磁兼容设计，在大尺寸电池包中仍需解决磁场均匀覆盖、能量利用率和局部涡流热问题。

1.2.4 内部预热小结

表 2 对内部预热技术进行了综合对比。内部预热的突出特点是热量直接在电芯内部产生，因而升温响应快、传热损失小，适合极寒条件下快速启动或充电前调温。

1.3 混合预热技术

混合预热通过内部产热与外部补热协同，或耦

表2 内部预热技术综合对比

Table 2 Comprehensive comparison of internal preheating technologies

具体方法	预热效率/加热时间	能耗特征	温度均匀性	主要优点与不足
激励电流预热	通常可在数百秒内完成预热，交流、脉冲和多级电流策略升温较快。	消耗电池SOC，能量利用率较高，但需严格限制电压、电流和SOC边界。	单体尺度较好；模组尺度受电芯一致性和串并联拓扑影响。	传热路径短、响应快；但低温大电流可能导致过电压、过极化、析锂和寿命衰减。
自加热预热	内嵌镍箔或PTC可实现数十秒至数十分钟预热，升温潜力高。	依赖电池自身放电或内部发热元件，通常会消耗一定SOC。	多热源均布时较好；热源集中时可能形成局部热点。	冷启动能力强、无需外部热源；但改变电芯结构，加大了制造难度，并且影响寿命。
电磁预热	可实现快速响应，部分研究达到数十秒至数分钟级升温。	整体能耗偏低但取决于线圈和磁场耦合效率。	受磁场分布影响，设计合理时较均匀。	非接触、响应快、集成潜力高；但电磁兼容、局部涡流热和大尺寸电池包均匀覆盖仍需验证。

合多种外部热源，以弥补单一方案难以同时满足快速升温、均温和低能耗的不足，但其结构集成和控制策略更复杂。

1.3.1 内外混合预热技术

内外混合预热通常将电池内部产热与外部热源耦合，以缓解外部预热电芯升温慢和内部预热边缘区域偏冷的问题。Qin等^[71]提出将双向脉冲电流与外部液体循环相结合的电池快速预热方法，并搭建了实验平台如图8(a)所示。该方法利用脉冲电流在电池内部产生热量以提高升温速率，同时通过外部液体循环和加热板向电池边缘区域补充热量。结果表明该方法可在300s内将电池模组由-20℃加热至6℃，最大温差控制在1℃以内，温度均匀性较单脉冲加热提高约11倍。

Liang等^[72]提出基于Z形弯折平板微热管阵列

的电池模组预热系统。其预热过程采用分阶段充电策略，电池温度低于0℃时仅进行360W外部加热，升至5℃后进行0.1C充电并继续外部加热，升至15℃后充电倍率提高至0.5C，高于15℃后关闭外部加热并转入1C充电。实验结果表明，该系统在-20℃、-10℃和0℃环境中均可实现约1℃/min的升温速率，温差均控制在5℃以内。如图8(b)所示，Li等^[73]基于多尺度电化学-热耦合CFD模型，提出了混合脉冲策略，将脉冲内部加热与外部电加热膜相结合。结果表明，相比单一脉冲预热，混合脉冲策略可使升温速率提高超过1.5倍，能耗降低近60%，电芯尺度最大温差约为3.5℃，电池模组通过增加加热膜数量可将最大温差由11.7℃降至5.3℃。

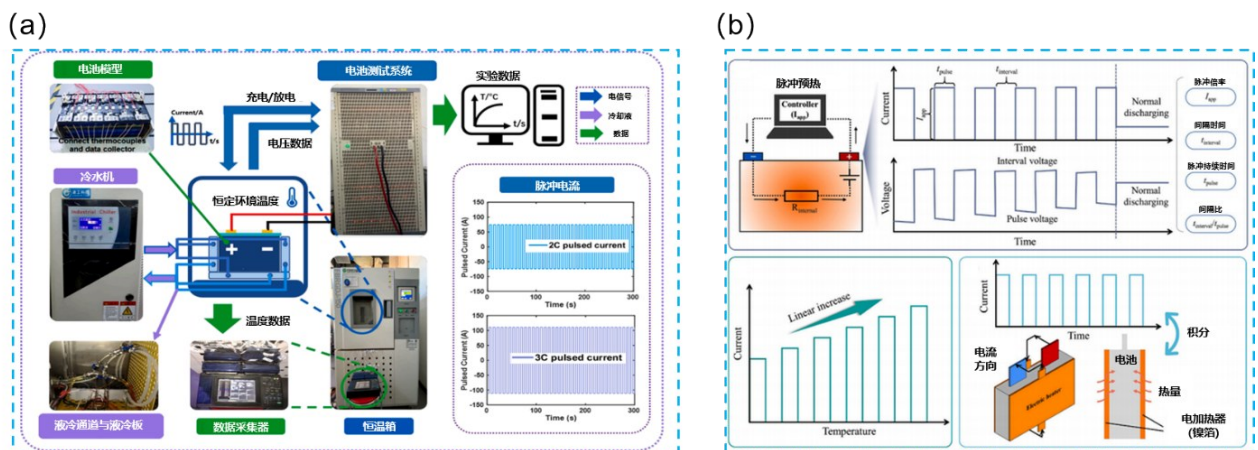


图8 (a)实验平台布置图^[71]; (b)脉冲加热与电加热相结合的混合预热策略^[73]

Fig. 8 (a)Experimental platform configuration^[71]; (b)hybrid preheating strategy integrating pulse heating and electric heating^[73]

Zhang等^[74]针对50Ah刀片电池提出PTC加热膜与脉冲电流耦合策略，可在280s内将电池由

-20℃预热至5℃，温差为2.03℃，COP达0.8281，但仍需实验验证。Parra-Panchi等^[75]指出

外部表面加热与电池放电协同可缩短 7% - 21% 的升温时间, 并避免低 SOC 下电压提前截止。Hailemichael 等^[76]采用强化学习的方法优化加热膜电压和脉冲电流幅值, 为内外混合预热控制提供了新思路。

内外混合预热的优势在于利用内部产热提高电芯升温速度, 并通过外部预热结构改善表面和边缘区域温度。其不足在于需要同时协调电流激励、外部热源、SOC、温度阈值和充电策略; 若控制模型不准确, 仍可能带来析锂、过热或能耗增加问题。总体来看, 内外混合预热是综合性能较优的发展方向, 但需要依托可靠的控制策略。

1.3.2 多外热源混合预热技术

多外热源混合预热技术通过耦合多种外部热管理方式, 弥补单一外部预热在升温速率、温度均匀性或能耗控制方面的不足。多外热源预热通常不需要改变电芯内部结构, 也避免了低温大电流充放电带来的析锂和寿命衰减风险, 具有较好的安全性和工程适用性。TEC 与液冷板、加热膜及 PCM 等外部结构耦合, 是多外热源混合预热的重要形式。Pan 等^[77]构建了 TEC-液冷板耦合的方形电池模组预热系统如图 9(a) 所示, 利用底部 TEC 向电池底部传热, 同时通过顶部 TEC、换热翅片和电子风扇加热空气, 使 4 个方形电池组成的模组在 824s 内由 -5℃ 升至 5℃。Wang 等^[78]则将 TEC、加热膜和石墨-PCM 复合夹层结合, 在 -15℃ 环境下可使模组在 600s 内升至约 2℃, 并将最大温差由 6.9℃ 降低至约 2.4℃。总体来看, TEC 耦合预热有利于提升升温能力和均温效果, 但仍需优化 TEC 布置、运行电流和多热源功率分配。

Huang 等^[79]比较了纯 PCM、热管-空气辅助 PCM 以及热管-液体辅助 PCM 三种圆柱电池热管理系统。结果表明, 热管-液体辅助 PCM 系统在 3C 放电条件下可将电池模组最高温度控制在 50℃ 以内, 并在循环过程中保持较稳定的温度变化。说明热管与 PCM 及液体冷却耦合能够有效缓解单一 PCM 热积累问题。An 等^[80]提出面向 26650 圆柱电池模组的蜂窝式复合热管理系统, 该结构在水流通道上集成了加热原件, 将传统的单一散热路径升级为兼具散热与加热功能的智能热管理单元, 如图 9(b) 所示。预热过程采用脉宽调制加热策略, 通过周期性加热与停歇兼顾升温速率和温度均匀性。结

果表明, 在 -15℃ 环境下, 电池模组可在 361s 内升温至 10℃, 最大温差为 4.51℃, 调整策略后预热时间可缩短至 347s, 最大温差为 4.81℃。针对于 26650 圆柱电池极寒条件下的预热问题, Li 等^[81]提出液体加热与 PCM 耦合预热方法。该系统以乙二醇水溶液作为主动加热介质, 通过铜管向电池模组传热, 同时利用 PCM 的潜热储热能力, 在加热系统关闭后继续维持电池温度。结果表明, 在连续液体加热条件下, 电池模组可在 -30℃、-20℃ 环境下分别于 7.6min、5.8min 内升至 20℃。进一步提出间歇式加热策略可使电池工作温度维持在约 28 到 31℃ 之间。在 -30℃ 环境下, 间歇加热策略将能耗降低 74.54 kJ, 系统效率提高 35.94%, 而电池容量仅损失约 0.8%。

Xu 等^[82]提出集成仿生头叶形鳍片、PCM 和加热膜的方形电池模组冷热一体化热管理系统。该系统以 8 个 50Ah 三元方形电池组成的模组为对象, 在电池之间布置 1mm 厚 PCM 片, 并在模组两侧设置仿生鳍片结构。低温预热时, 通过贴附于铝壳两侧的加热膜提供外部热源。结果表明, 在 -5℃ 条件下, 加热膜可在 440s 内将电池模组平均温度升至 20℃。经过 160s 静置均温后, 模组温差可降低至 1.2℃。在新能源汽车实车应用层面, Chen 等^[83]提出双向液体加热预热系统, 通过上下双向液体加热增大换热面积并改善温度梯度。-40℃ 环境下, 该系统可显著提高电池最低温度, 但若预热时间过长, 最高温度可达 70.75℃, 存在过热风险; 将预热时间缩短至 8min 后, 最高温度降至 40.65℃, 热安全性明显改善。Ren 等^[84]将聚酰亚胺电加热膜、U 形微热管阵列、保温材料和风冷组件集成于同一模组, 包覆保温材料后, -20℃ 下模组升温速率由 0.078℃/min 提高至 0.378℃/min。随着加热功率由 13W 增加至 32W, 预热至 0℃ 的时间由 59min 缩短至 26min, 但最大温差升至约 6℃。如图 9(c) 所示, Luo 等^[85]提出集成热电元件、CPCM 和液冷板的电池冷热一体化热管理系统。将电池嵌入由石蜡和膨胀石墨组成的 CPCM 框架中, 并在铝框架两侧布置 TEC 和液冷板。结果表明, 在 -10℃ 环境下, 当 TEC 预热电流为 5A 时, 电池组最低温度可在 2240s 内升至 20℃, 最大温差约为 2.59℃, 从 -20℃ 加热到 20℃ 所需时间增加了 3800s。

多外热源混合预热不改变电芯内部结构, 安全

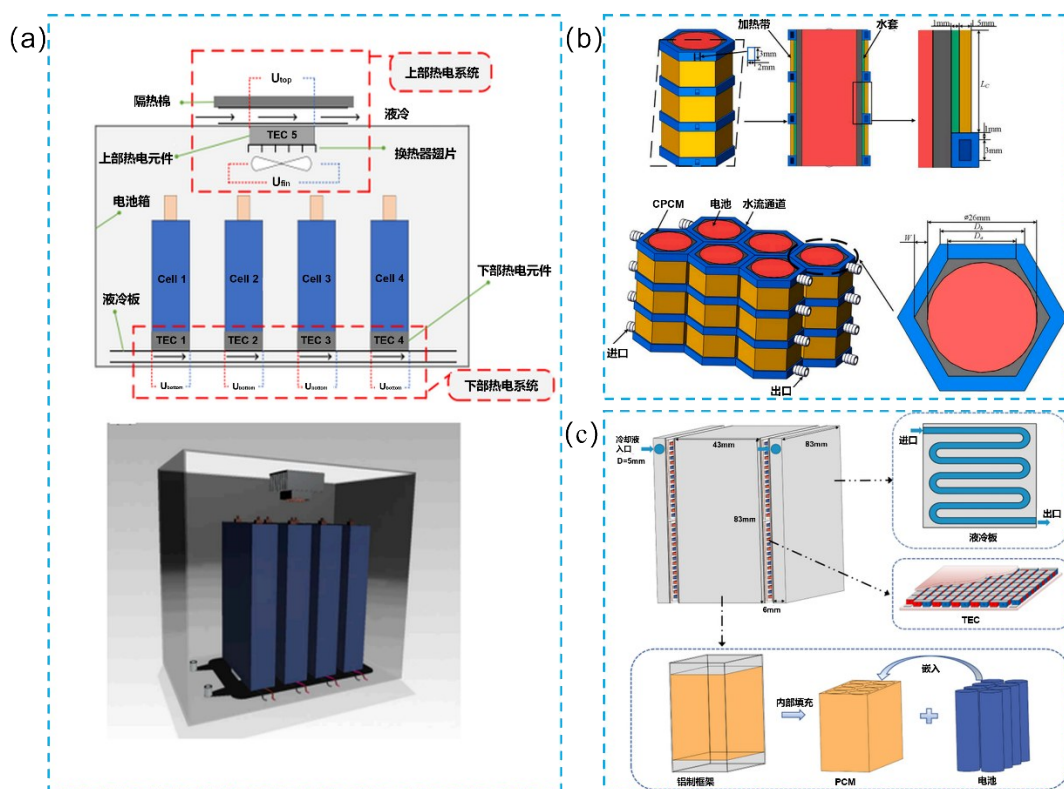


图9 (a) 电热管理系统示意图^[77]; (b) 圆柱电池及蜂窝电池模组模型^[80]; (c) 圆柱电池预热系统三维结构图^[85]

Fig. 9 (a) Schematic diagram of the thermoelectric thermal management system^[77]; (b) model of a cylindrical battery and honeycomb battery module^[80]; (c) three-dimensional structural schematic of the cylindrical battery preheating system^[85]

性和工程兼容性较好，也有助于降低低温大电流带来的析锂和寿命风险。但其部件数量多，结构、密封、绝缘、质量、成本和控制复杂度较高，热源匹配不当仍可能造成局部过热或能耗增加。

1.3.3 混合预热技术小结

表3对比了两种混合预热方式，二者能够结合

不同热源的优势，在升温速率、能耗和温度均匀性之间取得较好平衡。内外混合预热可同时改善电芯和边缘区域温度，多外热源混合预热则有利于提升系统均温能力和工程安全性。

表3 混合预热技术综合对比

Table 3 Comprehensive comparison of hybrid preheating technologies

预热方法	预热效率/加热时间	能耗特征	温度均匀性	主要优点与不足
内外混合预热	通过内部产热和外部补热协同，可在数百秒内完成低温预热。	可降低能耗或SOC消耗，但控制变量增多。	较好，可缓解“表面热、中心冷”的问题。	综合性能较均衡；但需协调电流激励、外部热源、切换温度和安全边界。
多外热源混合预热	通常为数百秒至十几分钟；在极寒或TEC系统中可能更长。	可利用保温结构降低热损失，但辅助部件能耗不可忽略。	较好，多热源和均热结构有助于降低模组温差。	不改变电芯结构、安全性较高、兼容性好；但系统部件多，成本、体积、质量和控制复杂度较高。

2 不同低温预热技术的综合对比

综合上述研究可见，不同低温预热技术不存在绝对最优方案，其性能差异主要取决于电池尺度、初始温度、目标温度、SOC状态和热管理结构。

所以进行比较时应从能耗、温升速率或预热时间、温度均匀性集成简易性、寿命和安全等维度综合判断，不能仅以单一温升速率作为评价标准。

在能耗方面，内部激励和自加热路线响应快，但需要消耗电池电量；外部预热热量需经过外部结

构传递, 需要考虑热损失和辅助部件能耗。液体预热和多外热源混合预热适合车辆集成, 可借助整车热管理系统减少能耗; 气体预热由于介质换热能力较弱, 能效相对受限。温升速率方面, 自加热、激励电流和电磁预热整体最快, 更适合极寒环境下的快速冷启动; 液体预热和电热器件温升速率适中, 但工程可控性较好; 气体预热通常较慢; PCM单独预热能力有限, 但与主动热源耦合后可显著改善预热和保温效果。温度均匀性方面, 液体预热、内外混合预热和多外热源混合预热温度更均匀; 单一外部电热器件若布置不合理, 易出现表面温度高、中心温度低的问题; 内部自加热若热源集中, 也可能形成局部过热。

从寿命与安全角度看, 不同预热技术对电池影响不同。外部预热不直接施加大电流, 对电化学体系扰动较小, 可通过升温降低内阻和极化, 改善低温容量、功率输出和充电接受能力, 但需避免表面过热、内外温差过大。内部预热升温快, 但在低温、高SOC或大电流条件下易引发、析锂、内阻增长和容量衰减; 自加热和内嵌热源需关注局部热集中及可靠性。混合预热可兼顾升温速率和均温效果, 但需合理控制功率分配、切换温度和安全边界, 在提升预热效果的同时也许控制系统的复杂程度。

从实际应用看, 对于新能源汽车和储能系统, 液体预热、多外热源混合预热更容易与现有空调系统和电池包结构结合。PTC加热膜、电加热板等电热器件结构简单、控制方便。激励电流预热和内外混合预热升温速度较快, 更适合极寒启动和低温快充前预热, 但这类方法与电池电化学过程联系更紧密。PCM更适合作为保温、均温和热缓冲材料使用。气体预热成本低、结构简单, 但换热能力有限, 更适合作为辅助预热方式。自加热和电磁预热具有较高的快速升温潜力, 但在整车尺度方面还需要更多研究。

3 未来优化方向

低温预热技术正在储能系统和整车热管理协同优化阶段演进。后续研究应同时考虑能耗、温度均匀性、温升速率、寿命衰减、安全性和工程适用性。基于现有研究进展, 未来可从以下几个方面进一步优化。

对于激励电流预热、自加热预热和内外混合预热而言, 预热策略设计不能停留在热响应层面, 而是应该关注电池技术发展带来的加热需求变化^[86-88]。将考虑电化学模型、热-力-老化模型耦合效应, 在保证电池不析锂、不过热、不过度膨胀的前提下, 提高预热效率。对于柔性加热膜、PTC、热管、仿生鳍片和拓扑优化液冷板这类结构已经出现协同趋势^[89]。未来研究应从材料性能展示进一步转向结构-材料一体化设计, 重点解决导热增强、绝缘安全和成本可控等问题。对于PCM及其复合结构而言, 后续研究需要兼顾潜热储能、导热增强和系统重量之间的矛盾^[90]。

近年来, 氟代醚、氟代烃及弱溶剂化电解液等受到关注, 新型氟代烃电解液技术让锂离子在极低温下依然能快速移动, 可与预热技术相结合, 进一步提升电池在低温环境下的性能, 其可降低溶剂化/去溶剂化能垒、改善界面膜组成并提升低温离子传输能力, 从而拓宽电池低温工作窗口^[91-92]。此类电解液与预热技术结合后, 有望降低目标预热温度, 缩短预热时间, 减少预热能耗, 并改善低温充电性能, 但也需要根据新型电解液的特性, 优化预热的控制策略。

4 结 论

本文对电池低温加热技术最新进展和预热方式的适用场合进行了全面的总结和分析, 结论如下。

(1) 外部预热通过液体、气体、PCM和电热器件等方式由外向内传热, 对电芯结构改动小, 整体安全性较高, 适合模组和电池包尺度应用。但受传热路径限制, 易出现中心升温滞后、预热时间较长和内外温差较大的问题。

(2) 内部预热包括激励电流、自加热和电磁预热, 热量直接在电芯内部或导电结构中产生, 升温速度快, 适合极寒启动和低温充电前调温。但其与电化学状态耦合紧密, 需重点控制过电压、过极化、析锂和寿命衰减风险。

(3) 混合预热技术可以弥补单一预热方式的不足。内外混合预热能够同时改善电芯内部和边缘区域的温度分布, 多外热源混合预热则可在不改变电芯结构的前提下, 提高系统的均温能力和热安全性。总体来看, 混合预热更容易在升温速率、温度均匀性和能耗之间取得平衡, 是低温预热技术的重要

要发展方向。

(4) 综合来看, 低温预热技术不存在适用于所有场景的单一最优方案, 应结合电池类型、模组结构、初始温度、目标温度、SOC、能耗和安全要求进行选型。未来需建立统一的能耗、温升速率、温度均匀性、寿命衰减和安全风险评价体系, 推动该技术在新能源汽车、储能系统和高寒地区装备中的应用。

参考文献

- [1] Deng J, Bae C, Denlinger A, et al. Electric vehicles batteries: requirements and challenges[J]. *Joule*, 2020, 4(3): 511-515.
- [2] Zhao G, Wang X L, Negnevitsky M. Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management[J]. *iScience*, 2022, 25(2): 103744.
- [3] Okubo M, Ko S, Dwibedi D, et al. Designing positive electrodes with high energy density for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(12): 7407-7421.
- [4] 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.
- [5] Wang Q, Jiang B, Li B, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 106-128.
- [6] Zhang X H, Li Z, Luo L A, et al. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles[J]. *Energy*, 2022, 238: 121652.
- [7] Wang Z C, Du C Q. A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110685.
- [8] Hwang F S, Confrey T, Reidy C, et al. Review of battery thermal management systems in electric vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 192: 114171.
- [9] Lin H P, Chua D, Salomon M, Shiao H C, Hendrickson M, Plichta E, Slane S. Low-temperature behavior of Li-ion cells[J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2001, 4(6): A71-A73.
- [10] Zhang S S, Xu K, Jow T R. Electrochemical impedance study on the low temperature of Li-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 49(7): 1057-1061.
- [11] Zhang S S, Xu K, Jow T R. Charge and discharge characteristics of a commercial LiCoO₂-based 18650 Li-ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(2): 1403-1409.
- [12] Li Z, Huang J, Liaw B Y, Metzler V, Zhang J. A review of lithium deposition in lithium-ion and lithium metal secondary batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 254: 168-182.
- [13] Senyshyn A, Muhlbauer M J, Dolotko O, Ehrenberg H. Low-temperature performance of Li-ion batteries: The behavior of lithiated graphite[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 282: 235-240.
- [14] Waldmann T, Hogg B I, Wohlfahrt-Mehrens M. Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells: A review[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 384: 107-124.
- [15] Ouyang M, Chu Z, Lu L, Li J, Han X, Feng X, Liu G. Low temperature aging mechanism identification and lithium deposition in a large format lithium iron phosphate battery for different charge profiles[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 286: 309-320.
- [16] Suo Y H, Jia Q N, Lin M J, et al. Electrochemical-thermal-mechanical coupling analysis of lithium-ion batteries under fast charging[J]. *International Journal of Energy Research*, 2024, 2024: 1667398.
- [17] 李嘉鑫, 李鹏钊, 王苗, 等. 锂离子电池热管理技术研究进展[J]. *过程工程学报*, 2023, 23(8): 1102-1117.
Li J X, Li P Z, Wang M, et al. Research progress of thermal management technology for lithium-ion batteries[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2023, 23(8): 1102-1117.
- [18] 朱喜娇, 严华夏. 电动汽车直冷电池热管理技术研究进展[J]. *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[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2025, 25(6): 533-543.
- [19] Wu S J, Xiong R, Li H L, Nian V, Ma S X. The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101059.
- [20] Ruan H J, Varela Barreras J, Steinhardt M, Jossen A, Offer G J, Wu B. The heating triangle: A quantitative review of self-heating methods for lithium-ion batteries at low temperatures[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 581: 233484.
- [21] Wang Y Z, Liu Q, Hao S L, Cheng L Q, Zhang W, Han K, Wang E H, Ouyang M G, Lu L G, Li X X. Low temperature heating methods for lithium-ion batteries: A state-of-art review based on knowledge graph[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 213: 115389.
- [22] Cai S W, Zhang X L, Ji J. Recent advances in phase change materials-based battery thermal management systems for electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108750.
- [23] Zhang C, Huang J, Sun W, Xu X, Li C, Li Y. Research on liquid preheating performance for battery thermal management of electric vehicles at low temperature[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105497.
- [24] Zhong Q, Garg A, Gao L, Garg A, Panda B, Wei K. Topology-optimized liquid cooling plates for low-temperature battery preheating: A multi-objective thermal management strategy[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 67: 104149.
- [25] 刘霏霏, 田信云, 邹鹏志, 等. 锂离子电池复合翅片式预热结构设计及性能分析 [J/OL]. *西南交通大学学报*, 2025: 1-11[2025-11-27].
Liu F F, Tian X Y, Zou P Z, et al. Structural Design and Performance Analysis of Composite Fin Preheating for Lithium-ion Battery [J/OL]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2025: 1-11[2025-11-27].
- [26] Yang T, Liu H, Li H, Ding A, Ji Y. Enhancement of integrated

- preheating and cooling performance of liquid-based battery thermal management by topology optimization[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 66: 104074.
- [27] 邓家洪. 一种动力电池 PTC 加热液冷板: CN201921160899.8[P]. CN210224227U[2026-06-25].
- DENG J H. A PTC heating liquid cooling plate for power battery: CN201921160899.8[P]. 2020-03-31.
- [28] Zhang Q Q, Zhang W, Wang S Y, et al. Thermal management of lithium-ion batteries: from single cooling to hybrid cooling[J]. *RSC Advances*, 2026, 16: 2555-2584.
- [29] 曾少鸿, 吴伟雄, 刘吉臻, 等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(9): 2888-2903.
- Zeng S H, Wu W X, Liu J Z, et al. A review of research on immersion cooling technology for lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(9): 2888-2903.
- [30] Wang Y, Rao Z, Liu S, Li X, Li H, Xiong R. Evaluating the performance of liquid immersing preheating system for lithium-ion battery pack[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 190: 116811.
- [31] Liu X, Wang Y, Zhang L, et al. A Battery Thermal Management System Integrating Immersion Preheating and Immersion Cooling[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(48): 48143-48153.
- [32] Bao J, Zhou Z, Wu W T, Wei L, Lyu J, Li Y, Huang H, Li Y B, Song Y. Experimental study on liquid immersion preheating of lithium-ion batteries under low temperature environment[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 60: 104759.
- [33] Guo J, Jiang F. A novel electric vehicle thermal management system based on cooling and heating of batteries by refrigerant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 236: 114145.
- [34] Liu X, Li Y, Gao S, Zhou Z, Wu W T, Wei L, Lyu J, Li Y B, Song Y. Efficient cold-starting project with mild lithium plating for lithium-ion batteries using immersion liquid cooling at low temperatures[J]. *Applied Energy*, 2025, 384: 125510.
- [35] Song H S, Jeong J B, Lee B H, et al. Study on the effects of preheating a battery in a low-temperature environment[C]//2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul: IEEE, 2012: 1198-1201.
- [36] 王发成, 张俊智, 王丽芳. 车载动力电池组用空气电加热装置设计[J]. *电源技术*, 2013, 37(7): 1184-1187.
- Wang F C, Zhang J Z, Wang L F. Design of Air Electric Heating Device for Vehicle Power Battery Pack[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2013, 37(7): 1184-1187.
- [37] Chen P, Lu Z K, Ji L M, et al. Design of the control scheme of power battery low temperature charging heating based on the real vehicle applications[C]//2013 IEEE International Conference on Information and Automation. Yinchuan: IEEE, 2013: 105-110.
- [38] Xu X B, Zhu J J, Zhang H Y, et al. Low cost energy-efficient preheating of battery module integrated with air cooling based on a heat spreader plate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 232: 121024.
- [39] Al-Hallaj S, Selman J R. A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2000, 147(9): 3231-3236.
- [40] Ling Z, Wen X Y, Zhang Z G, et al. Warming-up effects of phase change materials on lithium-ion batteries operated at low temperatures[J]. *Energy Technology*, 2016, 4(9): 1071-1076.
- [41] Luo M Y, Song J Q, Ling Z Y, et al. Phase change material coat for battery thermal management with integrated rapid heating and cooling functions from -40 °C to 50 °C[J]. *Materials Today Energy*, 2021, 20: 100652.
- [42] Luo M Y, Lin X M, Feng J X, et al. Fast self-preheating system and energy conversion model for lithium-ion batteries under low-temperature conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 565: 232897.
- [43] He S H, Xiong B Y, Lei H, et al. Optimization of low-temperature preheating strategy for Li-ion batteries with supercooling phase change materials using response surface method[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 142: 106635.
- [44] E J, Qin Y, Zhang B, Yin H, Tan Y. 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*, 2024, 288: 129280.
- [45] Xu X B, Wen N, Gong Z, Wang X, Shen J, Song Z, Zhou F. Performance of preheating and insulation structure for lithium-ion batteries based on flexible heaters and double-layer phase change materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127188.
- [46] Choi H, Hong J, Lee S, et al. A novel battery thermal management system for cooling/preheating utilizing a polymer intercell heat exchanger with phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 122248.
- [47] Liu Z, Guo Y, 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: 114609.
- [48] Salameh Z M, Alaoui C. Modeling and simulation of a thermal management system for electric vehicles[C]//IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Roanoke, VA, USA: IEEE, 2004: 887-890.
- [49] Alaoui C, Salameh Z M. A novel thermal management for electric and hybrid vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(2): 468-476.
- [50] 武小兰, 刘洋, 白志峰, 王峥, 郭桂芳, 张锦华. 低温下锂离子电池组预热结构设计与数值分析[J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*, 2025.
- Wu X L, Liu Y, Bai Z F, Wang Z, Guo G F, Zhang J H. Structural design and numerical analysis of preheating structure for lithium-ion battery pack at low temperature[J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2025.
- [51] Talele V, Morali U, Patil M S, Panchal S, Mathew K. Optimal battery preheating in critical subzero ambient condition using different preheating arrangement and advance pyro linear thermal insulation[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 42: 101908.
- [52] Zhang J Y, Hu R Q, Huang H N, Zhang R L, Zhang G Q, Shao D, Wang X Y, Wen Y L, Luo J. 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: 124798.
- [53] Yi Z Z, Wei P, Zhang H Y, Sun H T, Zeng S Z, Yu H. Wide range temperature thermal performance of power battery module with double-sided thermoelectric device system with high energy efficiency[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 227: 120375.
- [54] 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.
- [55] Wu X, Cui Z, Chen E, Du J. Capacity degradation minimization oriented optimization for the pulse preheating of lithium-ion batteries under low temperature[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101746.
- [56] Tang A, Gong P, Huang Y, Xiong R, Hu Y, Feng R. Orthogonal design based pulse preheating strategy for cold lithium-ion batteries[J]. *Applied Energy*, 2024, 355: 122277.
- [57] Shang Y L, Liu K L, Cui N X, et al. A compact resonant switched-capacitor heater for lithium-ion battery self-heating at low temperatures[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(7): 7134-7144.
- [58] Zhang L, Fan W, Wang Z, Li W, Sauer D U. Battery heating for lithium-ion batteries based on multi-stage alternative currents[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101885.
- [59] Guo S, Yang R, Shen W, Liu Y, Guo S. DC-AC hybrid rapid heating method for lithium-ion batteries at high state of charge operated from low temperatures[J]. *Energy*, 2022, 238: 121809.
- [60] Wang C, Tang Q, Sun T, Feng X, Shen K, Zheng Y, Ouyang M. Application of high frequency square wave pulsed current on lithium-ion batteries at subzero temperature[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 633: 236413.
- [61] Guo S, Xiong R, Wang K, Sun F. A novel echelon internal heating strategy of cold batteries for all-climate electric vehicles application[J]. *Applied Energy*, 2018, 219: 256-263.
- [62] 及非凡,陈子豪,李艳君. 基于电驱系统高频注入的电动汽车电池包快速加热控制算法[J]. *电工技术学报*, 2024.
- Ji F F, Chen Z H, Li Y J. Rapid heating control algorithm for electric vehicle battery packs based on high-frequency injection of electric drive system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(20): 6316-6327.
- [63] 新华网. 长安原力技术正式发布[EB/OL]. (2022-12-07)[2026-06-25].
- Xinhua News Agency. Changan Force technology officially released[EB/OL]. (2022-12-07)[2026-06-25].
- [64] Zhang C N, Jin X, Li J Q. PTC self-heating experiments and thermal modeling of lithium-ion battery pack in electric vehicles [J]. *Energies*, 2017, 10(4): 572.
- [65] Wang C Y, Zhang G, Ge S H, et al. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures[J]. *Nature*, 2016, 529(7587): 515-518.
- [66] 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.
- [67] Feng J, Yu A, Zhang L, Liu F, Zhan Z. Adaptive self-preheating lithium-ion battery system based on positive temperature coefficient material at sub-freezing temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127319.
- [68] Guan K, Huang Z, Liu Y, et al. A state-of-charge-aware internal preheating strategy for Li-ion batteries at low temperatures[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108585.
- [69] Jiang Z Y, Qu Z G, Wang Q. Experimental and numerical investigation of fast preheating of lithium ion pouch cell via low-power inductive heating in cold climate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 214: 124381.
- [70] Xiong R, Zhang K, Qu S, Tian J, Shen W. A fast pre-heating method for lithium-ion batteries by wireless energy transfer at low temperatures[J]. *eTransportation*, 2023, 16: 100227.
- [71] Qin Y D, Xu Z C, Xiao S R, Gao M, Bai J, Liebig D, Lu L G, Han X B, Li Y L, Du J Y, Ouyang M G. Temperature consistency-oriented rapid heating strategy combining pulsed operation and external thermal management for lithium-ion batteries[J]. *Applied Energy*, 2023, 335: 120659.
- [72] Liang L, Zhao Y H, Diao Y H, Ren R Y, Zhu T T, Li Y. Experimental investigation of preheating performance of lithium-ion battery modules in electric vehicles enhanced by bending flat micro heat pipe array[J]. *Applied Energy*, 2023, 337: 120896.
- [73] Li W Z, Bao Z M, Gao Q C, Du Q, Jiao K. Investigation of novel pulse preheating strategies for lithium-ion batteries at subzero temperature based on a multi-level CFD platform[J]. *eTransportation*, 2024, 19: 100307.
- [74] Zhang T Y, Wang Y F, Yu Y L, Chen L, Tao W Q. Multi-objective optimization of hybrid preheating strategies for lithium-ion batteries in low temperature[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 109: 115187.
- [75] Parra-Panchi G, Nasrollahzadeh H, Wu X Y, Fowler M, Rangom Y. Thermal system simulation of heating strategies for 21700 lithium-ion battery modules under cold-start conditions[J]. *Batteries*, 2025, 11(11): 425.
- [76] Hailemichael H, Ayalew B. Combined film and pulse heating of lithium ion batteries to improve performance in low ambient temperature[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2023, 56(3): 427-432.
- [77] Pan Y T, Tang A K, Liu Z Y, Shan C X. Experimental analysis of power battery preheating system based on thermoelectric elements[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 230: 120860.
- [78] Wang Y C, Xu X B, Huang W J, Kong J Z, Wang Q Z, Zhou F, Wei H Y. A versatile battery thermal management system based on thermoelectric devices for preheating and cooling[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 211: 109700.
- [79] Huang Q Q, Li X X, Zhang G Q, Zhang J Y, He F Q, Li Y. Experimental investigation of the thermal performance of heat pipe assisted phase change material for battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 1092-1100.
- [80] An Z G, Zhang C J, Luo Y S, Zhang J Y. Cooling and preheating

- behavior of compact power lithium – ion battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 226: 120238.
- [81] Li K X, Zhang J S, Yao X L, Huang Z Z, Li W L, Ju X, Xu C. Energy-efficient intermittent liquid heating of lithium-ion batteries in extreme cold using phase change materials[J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(11): 3450-3464.
- [82] Xu X B, Chen X, Shen J J, Kong J Z, Zhang H Y, Zhou F. Thermal management system for prismatic battery module with biomimetic cephalofoil fin and film heater[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 227: 120379.
- [83] Chen S Q, Zhang G X, Wu C J, Huang W S, Xu C S, Jin C Y, Wu Y, Jiang Z, Dai H F, Feng X N, Wei X Z, Ouyang M G. Multi-objective optimization design for a double-direction liquid heating system-based Cell-to-Chassis battery module[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122184.
- [84] Ren R Y, Zhao Y H, Diao Y H, Liang L. Experimental study on preheating thermal management system for lithium-ion battery based on U-shaped micro heat pipe array[J]. *Energy*, 2022, 253: 124178.
- [85] Luo D, Wu Z H, Yan Y Y, Sun Z Y, Yang L, Cao B Y. Performance analysis of a battery thermal management system combining thermoelectric, composite phase change material, and liquid cooling under extreme operating conditions[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 95: 112679.
- [86] 李雨佳, 欧阳权, 刘灏仪, 等. 基于支持向量机与改进高斯过程混合模型的车用电池容量预测方法[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(1): 87-96.
- Li Y J, Ouyang Q, Liu H Y, et al. Vehicle battery capacity prediction based on hybrid model of support vector machine and improved Gaussian process[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(1): 87-96.
- [87] 朱建功, 戴海峰, 王学远, 等. 从电池管理到电化学数字电源[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(1): 3-22.
- Zhu J G, Dai H F, Wang X Y, et al. Battery management towards the digitalized electrochemical power source[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(1): 3-22.
- [88] 金建新, 虞儒新, 刘刚, 等. 锂离子电池健康状态估算方法研究进展[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(1): 33-48.
- Jin J X, Yu R X, Liu G, et al. Research progress on state-of-health estimating method for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(1): 33-48.
- [89] 邹慧明, 唐启航, 杨天阳, 等. 电动汽车热管理技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2022, 43(3): 15-27.
- Zou H M, Tang Q H, Yang T Y, et al. Research progress of thermal management technology for electric vehicles[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(3): 15-27.
- [90] Mo C M, Xie J K, Zhang G Q, et al. All-climate battery thermal management system integrating units-assembled phase change material module with forced air convection[J]. *Energy*, 2024, 294: 130642.
- [91] MA P, XUE C, WANG K H, et al. Molecular structure optimization of fluorinated ether electrolyte for all-temperature fast-charging lithium-ion battery[J]. *ACS Energy Letters*, 2024.
- [92] ZHANG G Z, CHANG J, WANG L G, et al. A monofluoride ether-based electrolyte solution for fast-charging and low-temperature non-aqueous lithium metal batteries[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1081.