

DOI: 10.11949/0438-1157.

低温环境下电池热管理的实验研究

李耀辉, 刘璐璐, 周守军, 田永生, 王驰骋, 汪嘉一

(山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 针对锂离子电池低温环境下电化学性能衰减及析锂风险, 构建基于复合相变材料 (CPCM) 与“四段式”烧结热管耦合的模拟电池热管理实验系统。在不同放电倍率 (1C、2C、3C) 及环境温度 (-5°C 、 -10°C 、 -15°C) 下, 测试系统的高温散热、低温静置保温及预热性能。结果表明: 放电阶段各倍率下电池最高温度均未超过 45°C ; 低温静置阶段, 高倍率放电后 CPCM 发生明显相变, 显著延缓电池降温。热管传热方向逆转导致电池降温速度快于 CPCM, 形成明显温差。预热实验中, 35°C 为最佳预热温度, 继续升温缩短时间有限但能耗增加。对比纯热管系统, 由于 PCM 未达 23°C 相变温度, 仅提供有限显热缓冲, 对升降温速率影响不显著。该耦合系统在不同放电倍率及低温环境下均表现出良好的控温与保温能力。

关键词: 低温预热; 相变; 烧结管式热管; 电池热管理; 传热; 对流

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-11

Experimental study on battery thermal management in low-temperature environments

LI Yaohui, LIU Lulu, ZHOU Shoujun, TIAN Yongsheng, WANG Chicheng, WANG Jiayi

(School of Thermal Engineering, Shandong University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: To address the electrochemical performance degradation and lithium plating risks of lithium-ion batteries operating in low-temperature environments, a battery thermal management simulation experimental system coupled with composite phase change materials (CPCMs) and four-stage sintered heat pipes was established. The high-temperature heat dissipation, low-temperature static thermal insulation, and preheating performances of the system were tested under various discharge rates (1C, 2C, and 3C) and ambient temperatures (-5°C , -10°C , and -15°C). The experimental results indicate that the maximum battery temperature remains below 45°C at all tested discharge rates during the discharging process. In the low-temperature static stage, the CPCM undergoes substantial phase transition after high-rate discharge, which effectively delays the battery temperature drop. The reversed heat transfer direction of the heat pipes accelerates the battery cooling rate compared with the CPCM, resulting in a notable temperature difference between them. Preheating experiments verify that 35°C is the optimal preheating temperature. Further temperature elevation only achieves a marginal reduction in preheating time while increasing energy consumption. In comparison with the pure heat pipe system, the PCM with a phase transition temperature of 23°C fails to reach its phase change state under the working conditions, providing only limited

收稿日期: 2026-05-06 修回日期: 2026-06-19

通信作者: 田永生 (1986—), 男, 博士, 讲师, tianyongsheng18@sdjzu.edu.cn

第一作者: 李耀辉 (2003—), 男, 硕士研究生, lyh1736648039@163.com

基金项目: 山东建筑大学博士基金项目 (XNBS1837)

引用本文: 李耀辉, 刘璐璐, 周守军, 田永生, 王驰骋, 汪嘉一. 低温环境下电池热管理的实验研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-11

Citation: LI Yaohui, LIU Lulu, ZHOU Shoujun, TIAN Yongsheng, WANG Chicheng, WANG Jiayi. Experimental study on battery thermal management in low-temperature environments[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-11

sensible heat buffering and exerting no significant influence on heating and cooling rates. The proposed coupled system demonstrates excellent temperature regulation and thermal insulation performance across different discharge rates and low-temperature operating conditions.

Keywords: low-temperature preheating; phase change; sintered tubular heat pipe; battery thermal management; heat transfer; convection

引 言

在全球应对气候变化与推动能源结构转型的宏观背景下,能源危机与环境污染的双重压力正加速全球交通产业的电气化转型,以锂离子电池为动力核心的电动汽车已成为主要发展路径之一^[1-2]。锂离子电池凭借其高能量密度、长循环寿命及低自放电率等综合优势,在电动汽车和电化学储能领域得到了广泛应用^[2-3]。然而,其电化学性能、循环寿命及运行安全性对工作温度表现出极强的敏感性,这已成为制约其进一步推广的关键瓶颈^[4]。

研究表明,锂离子电池的适宜工作温区通常为20~40℃,其最高温度应严格控制在50℃以下,且电池模组内部各单体间的最大温差不宜超过5℃^[5-6]。在高温或高倍率工况下,电池内部剧烈的电化学反应与欧姆热效应会产生大量热量,若不能及时散失,将加速电池容量衰退,甚至引发固体电解质界面膜分解、隔膜熔融等热失控链式反应,导致起火、爆炸等灾难性后果^[7-8]。而在低温环境中,电解液黏度剧增、离子电导率呈指数级下降,导致电池内阻显著升高、可用容量和功率大幅衰减,且低温充电过程易诱发负极析锂,生成的锂枝晶可能刺穿隔膜,引发严重安全隐患^[9-10]。此外,Liu等^[11]的研究进一步揭示,电池模组内单体间的不一致性及热梯度会加剧并联支路电流分布不均,从而加速电池包的局部老化和整体性能衰退。因此,开发一种能够适应宽温域、全气候工况的高效电池热管理系统,对于保障电动汽车的动力性能、续航里程及运行安全具有至关重要的意义^[12-13]。

针对锂离子电池的热管理问题,国内外学者已围绕多种冷却与加热策略展开了广泛探索。根据传热介质和驱动方式的不同,电池热管理系统可分为主动式系统(如风冷、液冷)和被动或半被动式系统(如基于相变材料、热管的冷却)^[14,24-25]。传统主动式热管理方案如风冷与液冷,虽能实现基本的散热需求,但普遍存在冷却效率有限、系统结构庞杂、寄生功耗较高及温度均匀性不佳等固有缺陷^[5,15]。近

年来,基于相变材料的被动式热管理技术因其储能密度高、无需外部能量输入及优异的均温特性,已成为研究热点^[9,15]。该技术利用相变材料在固-液相变过程中吸收或释放大潜热而自身温度保持近似恒定的特性,可在电池高倍率放电时有效平抑其温升^[5,16]。Wang等^[16]通过数值模拟证实,选用与电池适宜温区相匹配的相变材料可显著优化电池模组的热行为。然而,纯相变材料本征导热系数极低,严重限制了其储/放热速率^[2,17]。为克服此瓶颈,研究者通常向其中添加膨胀石墨、金属泡沫等高导热填料以制备复合相变材料,利用其高导热骨架网络可显著强化相变材料基体的等效导热性能^[2-3,17,26,30]。

尽管复合相变材料在一定程度上改善了导热能力,但在持续高倍率充放电循环工况下,其储热容量终将趋于饱和,若所吸收的热量无法被及时导出,系统仍面临热量积聚的风险^[5,9]。为此,将具有超高等效导热系数的热管与复合相变材料相耦合的复合热管理策略被提出^[5-6,9,27,31,33]。在该耦合系统中,热管作为高效传热元件,利用内部工质的蒸发-冷凝相变循环实现热量的高效定向运输^[6]。Wu等^[5]的实验研究验证了热管辅助复合相变材料系统在高放电倍率下的温控有效性及均温优越性。Jiang与Qu^[9]则通过数值建模深入揭示了热管-复合相变材料耦合系统在充放电循环中的动态热响应机制,指出热管可在静置阶段有效回收复合相变材料的相变潜热,从而确保系统在长周期循环中的热稳定性。Gao等^[18]的模拟研究也证实,相较于纯相变材料系统,将热管与相变材料耦合的方案能显著降低电池组在高倍率放电下的最高温度,降幅可达34.9%。

针对低温环境下的预热问题,现有技术主要分为外部加热和内部加热两类^[19]。外部加热法(如利用空气、液体介质或正温度系数热敏电阻加热)结构简单但效率偏低且易产生较大温度梯度^[19-20]。内部加热法(如脉冲加热、交流自加热)虽能实现更高的升温速率和更好的温度均匀性,但控制复杂,对电池长期寿命的影响尚需深入验证^[20]。Jiaqiang

等^[21]提出了一种将加热膜与相变材料相结合的耦合预热方案,在-15℃环境下仅用约10分钟即可将电池包预热至适宜温度。这些研究表明,将主动预热与被动保温功能相结合是提升电池低温性能的有效途径。

综合上述研究现状,尽管现有工作在电池散热与低温预热方面已取得丰硕成果,但关于热管-复合相变材料耦合电池热管理系统的研究仍存在关键科学问题与技术瓶颈亟待解决。尤其低温环境适用性与保温机制研究不足。现有研究多集中于常温及高温工况下的散热性能评价^[15,9,16,32],对低温环境下电池的保温及预热需求关注较少。特别是在经历不同放电倍率后,如何利用复合相变材料储存的相变潜热来延缓电池静置温降过程,其蓄-释热动力学特性与保温效能之间的定量关系尚不明晰^[22-23]。此外,多功能一体化热管理结构设计有待完善。多数研究将散热与预热功能分开设计,缺乏一种能够将“主动预热”、“高效散热”与“静置保温”功能有机统一的一体化热管理结构^[21, 23]。如何优化热管与复合相变材料的空间布局及传热路径,以实现不同工况下的模式灵活切换,是提升系统全气候适应性的关键。

本文设计并构建了一套基于复合相变材料与“四段式”烧管式热管耦合的模拟电池热管理实验系统。该系统采用分离式结构设计,将复合相变材料与电池电极物理隔离,在提升电气安全性的同时,也为热管的创新应用提供了结构基础。通过对传统热管蒸发段进行功能分区,旨在实现高温散热、静置保温与低温预热功能的集成^[24-25]。通过系统性实验,探究该耦合系统在宽温域及变工况条件下的热管理性能。以期开发适用于宽温域、全天候运行电动汽车的高效、可靠电池热管理系统提供理论依据与工程参考。

1 实验设置

1.1 模拟电池模块

在圆柱形锂离子电池中不同位置的产热量是不同的,由于电池内的化学反应主要在电极处产生,因此电极是主要的发热来源。同时,从安全性角度考虑,有研究采用电加热模拟电池的方式来实现更高倍率的充放电操作,且已有相关研究证明了该方法的可行性。因此本实验以圆柱形锂离子电

池(18650电池)为模型将电加热棒放置在金属外壳内,在电极处置入电加热棒,通过调节供电电压以模拟电池在不同充放电倍率下的放热情况,并在金属外壳与加热棒的接触表面间填涂导热硅脂,以减小接触热阻强化传热。

锂离子电池的发热包含不可逆热(欧姆内阻热、极化内阻热)和可逆热(化学反应热),在缺少实际测试结果的情况下难以确定准确的功率值。但根据Chen等^[28]的研究,化学反应热在放电过程中存在先吸热后放热的趋势,其中不可逆热占据主导地位并一直维持在稳定的放热状态,因此可以通过电流和内阻计算内阻热,来作为电池产热的参考功率。锂电池的发热功率 P 由公式(1)求得:

$$P = Q^2 C^2 R \#(1)$$

式中, P 为电池发热功率,W; Q 为电池容量,Ah; C 为电池充放电倍率; R 为电池内阻, Ω 。

电池发热功率 P 作为电池整体的发热功率,与实验采用的模拟电加热相匹配。本文分别在1C、2C、3C的放电倍率下进行了实验研究,为了确保仿真的可靠性,通过实验测试了模拟电池不同充电倍率下的温度曲线,并与Chang等^[29]文章中提到的同规格锂电池在1C、2C、3C倍率的实验数据进行了对照修正,如图1所示,仿真功率测试的升温曲线与已有研究的实际电池升温曲线吻合,使用仿真功率来代替同规格锂离子电池实际放电功率来进行实验是合理的。

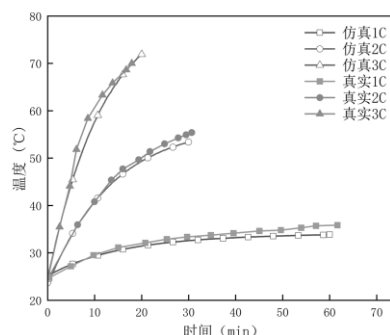


图1 25℃时电池仿真升温对比图

Fig.1 Comparison chart of battery simulation temperature rise at 25℃

1.2 复合相变材料(CPCM)

本实验所需复合相变材料(CPCM)选用23℃石蜡/膨胀石墨(EG)复合的粉末状相变材料,膨胀石墨既能增加相变材料(PCM)的导热性,也能利用吸

附性限制熔化后的石蜡流动,减少液态石蜡的泄漏^[33]。利用模具和液压装置将粉末材料的尺寸压制与电池模块相同的厚度,并由DSC差示扫描量热

仪和Hot Disk热常数分析仪测试压制后的CPCM热物性参数,DSC曲线如图2所示。

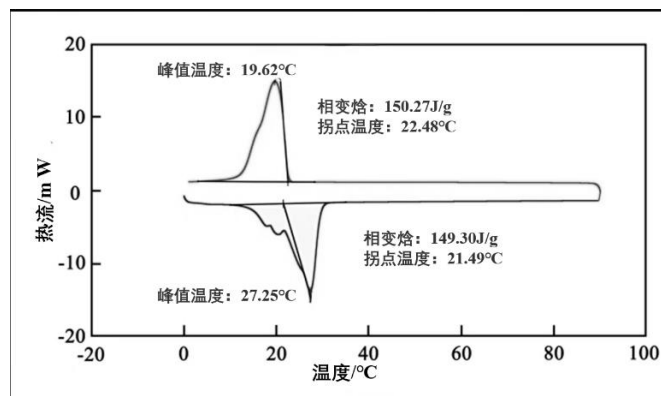


图2 CPMP的DSC曲线

Fig.2 DSC curve of CPMP

本实验中的热管(HP)采用“四段式”烧结热管,烧结热管是一种高效散热元件,其核心工艺是通过粉末冶金技术在热管内壁形成多孔毛细结构,以实现高效的液体相变传热。外壳材质为铜,充装工质为水,充液率约为46%;热管外部尺寸为 $\pi \times 180 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,内壁为烧结毛细层,是由铜粉烧结而成的多孔结构。将传统的热管蒸发区段分为蒸发1段和2段,预热模式下应用蒸发2和蒸发1段之间的热量传热。散热模式应用蒸发1段与冷凝段之间的热量传递。保温模式,应用热管的热量传递可逆性。其中,蒸发2段的受热面积和受热功率可根据实际需求调整设计,实现快速预热且低能耗。同时,依据蒸发1段与电池单元相接触的受热面设计热管内充液率,优化预热模式下电池单元的预热效果和效率。上端(冷凝段)嵌入复合相变材料层内部,中上部位设置于绝热区,中下部位(蒸发一段)穿插贴合于电池基座,下端(蒸发二段)敷设电加热。

本实验采用CPCM与烧结热管(STHP)结合的分离式热管理方式,将CPCM紧贴或包裹在到HP冷凝段表面,通过HP将电池热量传递给CPCM,利用相变潜热被动式的对电池进行热管理(如图3所示)。分离式不仅降低了用电安全隐患,CPCM远离电池也能降低其中积累的热量对BTMS性能的影响。将CPCM用特定模具压制成型,使两块CPCM与一根热管的冷凝段相接触。CPCM和STHP、STHP和模拟电池紧密固定,辅助性使用了导热硅脂,强化三者间的热量交换。此外,STHP裸露的部

分作为绝热段处理,在CPCM与STHP的绝热段外部包裹珍珠棉保温材料。

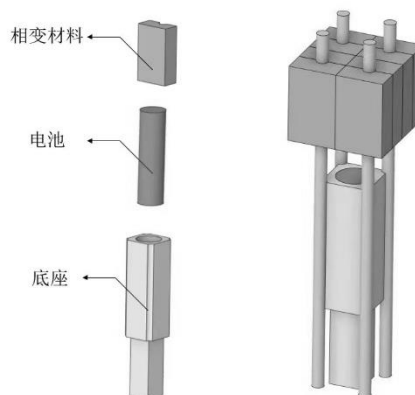


图3 实验电池及CPCM与STHP组合示意图

Fig.3 Schematic diagram of the experimental battery and the combination of CPCM and STHP

为测试热管性能将实验热管与纯铜管放置在恒温水浴加热,热管蒸发段浸没在水中加热,冷凝段暴露于空气中自然冷却,水浴温度分别设置为30°C、40°C、50°C、60°C和70°C,如图4所示,在30°C恒温水浴加热条件下,热管蒸发段受热后,其冷凝段温度从22°C上升至29.5°C所需时间为34秒;而纯铜管达到平衡温度所需时间较热管到达对应温度所需时间多出74秒。热管依靠内部工质的蒸发—冷凝相变循环与蒸汽的定向输运,实现了热量从蒸发段到冷凝段的快速传递,其等效热扩散率远高于纯铜管。且在相同的加热与自然对流冷却条件下,纯铜管冷凝段温度最高达到28.5°C,低于水浴温

度 1.5℃,且未能达到热管所实现的 29.5℃。同时,在热管达到热平衡的同一时刻,热管冷凝段温度较纯铜管高出 2.2℃。热管凭借相变传热机制,其轴向温差小,冷凝段温度更接近于热源温度。该结果表明,在相同的边界条件下,热管具有更强的均温能力与热量输送能力。其余水浴温度数据见表 1。

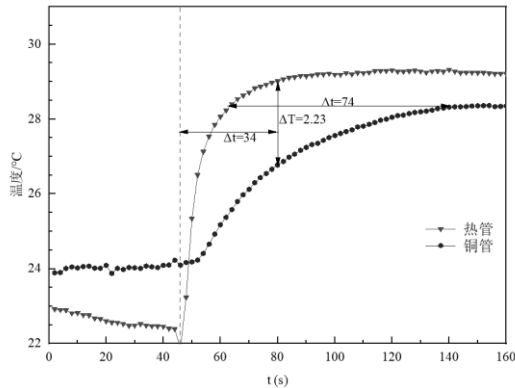


图4 30℃水浴加热热管与铜管对比图

Fig.4 Comparison diagram of heat pipes and copper pipes heated in a 30℃ water bath

表 1 水浴加热数据

	40℃	50℃	60℃	70℃
温差	6.85	17.58	18.12	23.2
时间差	89	77	68	63
铜管最高温	32	34.7	42.2	47

1.3 实验系统与工况

搭建的模拟电池热管理实验系统如图所示。实验系统主要设备包括:实验电池、直流稳压电源、温度数据采集仪等,下表 2 列出了各设备的详细参数。



① 实验箱 ② 计算机 ③ 温度控制器
④ 直流稳压电源 ⑤ 数据采集系统 ⑥ 冰柜

图5 实验系统

Fig.5 Experimental system

表 2 实验设备的参数

Table 2 Parameters of experimental equipment

名称	项目	参数
实验箱	尺寸(内部)	120×100×240 mm ³
	型号	MAISHENG MP2205D
	输出电压	0~220 V
	输出电流	0~5 A
直流稳压电源	误差	± 0.1%
	型号	Fluke 2638A/60
数据采集仪	温度范围	-270 °C~400 °C (T)
	误差	± 0.15 °C (T)
T型热电偶	温度范围	-200 °C~350 °C
	误差	± 0.5 °C

对于电池的低温环境工作场景,通常是将温度维持在 0~20℃范围内,以保证电池一定程度的正常工作性能。通过保温可使电池能够在低温环境下维持其正常工作性能并延长工作时间。同时,在保温目标温度附近可保持电池的使用性能。本文从电池最佳工作温度 25℃开始,测试了不同放电倍率和低环境温度下的电池温度变化,并以 10℃为电池保温目标,进行了相关实验研究。

本研究开展的 CPCP-SHP 的实验时分别在 1C、2C、3C 共 3 种放电倍率和 -5℃、-10℃、-15℃ 三种温度工况下进行实验,观察电池放电过程和静置过程中的温度变化。实验中,以电池最佳工作温度 25℃作为初始状态,实验流程如下:

(1)将实验装置放置在恒温室内,使模拟电池和 CPCP 达到热平衡,温度稳定至 25℃。

(2)电加热棒接入电源开始分别模拟放电发热

(3)放电结束后,将实验装置转移至冰柜低温环境,采集各工况下模拟电池的降温速度以及温度值。

(4)测试结束后重复步骤(1)~(3),完成其他环境温度和放电倍率的散热或预热测试。

1.4 实验误差分析

实验误差的来源主要以实验测量设备参数和发热装置控制参数为主,其中测量设备的误差主要包括温度数据采集仪的测量误差±0.15℃和 T 型热电偶的测量误差±0.5℃两部分,发热装置控制参数为直流稳压电源的电压输出精度±0.1%。温度综合测量误差和直流稳压电源误差值分别按下两式计算:

$$\sigma = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \# (2)$$

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{精度} \% (3)$$

式中, σ 为综合实验误差; u_1 、 u_2 为不同测量设备的标定误差; $\Delta_{\text{仪}}$ 为设备仪器的精度换算误差。各类参数的实验误差分析结果如表3所示。

表3 实验误差分析

Table 3 Analysis of experimental errors

参数	测量仪器	误差
模拟电池的表面温度	T型热电偶、数据采集系统	$\pm 0.519^\circ\text{C}$
相变材料的表面温度	T型热电偶、数据采集系统	$\pm 0.519^\circ\text{C}$
电热棒的电压	直流稳压电源	$\pm 0.22\text{V}$

参考国家标准对B类不确定度评定标准,由电压传递引起的不确定度及电池表面总不确定度计算公式分别如下:

$$u_U = \Delta T^* \frac{\Delta P}{P} \quad (4)$$

$$u_T = \sqrt{u_{\text{means}}^2 + u_U^2} \quad (5)$$

式中, u_U 为电压传递造成的不确定度; ΔT 为电池表面温升; $\frac{\Delta P}{P}$ 为加热功率相对误差; u_T 为电池表面总不确定度; u_{means} 为测量设备不确定度。

最终计算得电压传递不确定度为 $\pm 0.24^\circ\text{C}$, 电池表面温度的总不确定度为 $\pm 1.14^\circ\text{C}$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 不同放电倍率的温度变化

结合图6分析可知,在放电阶段,基于相变材料耦合热管(PCM-HP)的热管理系统展现出显著的高温抑制效果。借助STHP的高导热输运特性与CPCM的高效潜热吸收能力,电池组温度在放电全程均被控制在适宜工作区间,所有测试工况下最高温度均未超过 45°C ,其中3C放电倍率下电池最高温度为 41°C 。在放电结束后的低温静置阶段,PCM-HP热管理策略可有效延缓电池温度衰减过程;CPCM所蓄存的热量被重新利用于后续电池保温,体现了较好的节能效益。

在1C低放电倍率工况下,因电池产热功率有限,温升幅值较小,电池温度仅略高于CPCM相变温度(23°C),未能充分激发CPCM的高潜热蓄热能力。相应的,低温静置期间温度响应曲线未呈现明显的相变平台特征。然而,得益于CPCM较高的显热比热容,电池降温速率仍得到一定程度缓解。在环境温度分别为 -5°C 、 -10°C 及 -15°C 时,1C放电结束后电池温度降至 10°C 所经历的时间依次为 3570 s、

3142 s 与 2714 s。

当放电倍率提升至2C及以上时,放电阶段电池温升速率显著增大,产热量促使CPCM温度大幅超越相变点。进入低温静置阶段后,PCM-HP热管理系统展现出明显的降温延缓,温度响应曲线出现清晰的相变稳定期。如图7与图8所示,在 -5°C 环境温度条件下,2C与3C放电后温度降至 10°C 所需时间分别为 4464 s 与 4790 s,相较于1C工况分别延长 894 s 与 1220 s,平均降温时间延长幅度分别为 24.90% 与 34.17%。而在 -10°C 与 -15°C 环境温度下,降温时间分别较1C延长 602 s、1088 s 以及 564 s、922 s。此外,由图可见,放电结束后熔化态CPCM首先经历显热释放阶段,导致静置初期电池温度较快下降;当温度降至约 23°C 时,温度曲线进入平稳区,表明CPCM进入潜热释放阶段,相变过程中较大的相变潜热有效维持了电池温度的相对稳定;随着温度缓慢降至约 21°C ,潜热释放过程基本结束,CPCM再次转入显热放热阶段,电池降温速率二次加快。因此,高倍率放电后电池降温过程整体呈现出“快—慢—快”的三阶段特征。其中,在 -5°C 、 -10°C 及 -15°C 环境温度下,3C放电倍率对应的温度平稳期持续时间分别为 1798 s、1200 s 与 600 s。

进一步分析不同低温环境对保温性能的影响可知,环境温度的降低显著加速了静置期电池的降温过程。尽管如此,PCM-HP热管理仍能有效减缓电池降温幅度,展示出一定应用优势。在1C放电倍率下,因CPCM蓄热量相对有限,保温性能随环境温度下降而衰减较为突出:在 -10°C 与 -15°C 环境下,PCM-HP热管理系统将电池温度维持在 10°C 以上的时间分别为 3142 s 与 2714 s,较 -5°C 环境分别缩短 11.98% (524 s) 与 23.97% (856 s)。在2C与3C倍率下,由于CPCM发生了不同程度的熔化,所蓄积的潜热在一定程度上补偿了环境温度降低带来的散热加剧,保温性能的下降幅度相对1C工况放缓。具体而言,2C倍率下 -10°C 与 -15°C 环境的降温时间分别为 3744 s 与 3278 s,较 -5°C 环境分别减少 720 s 与 1186 s;而在3C高倍率下,电池高生热量促使CPCM熔化程度更高,蓄存热量更为充裕,因而 -10°C 与 -15°C 环境下电池降温时间分别达到 4230 s 与 3636 s,保温效果依然显著。相变材料最典型的特征是在相变过程中,温度几乎保持不变,形成一个“平台”。如图6在 -5°C 低温环境下,三种倍率平台持续时间分别为 1318 s、1846 s 和 2176 s。2C相较于1C平台持

续时间增加了528s,3C相较于2C平台持续时间增加了330s,由此可以看出随着放电倍率的不断提高,电池和CPCM的温度不断升高,CPCM的熔化程度不断上升,CPCM积蓄的潜热量不断增加,CPCM逐渐接近完全融化。不同低温环境下不同倍率实验数据见表4。

表4 低温环境下不同倍率数据汇总表

Table 4 Summary of data at different magnification ratios in low-temperature environment

放电倍率-低温环境	电池降温时间(s)	相变平台时长(s)
1C - (-5℃)	3570	1318
1C - (-10℃)	3142	1074
1C - (-15℃)	2714	996
2C - (-5℃)	4464	1846
2C - (-10℃)	3744	1452
2C - (-15℃)	3278	1240
3C - (-5℃)	4790	2176
3C - (-10℃)	4230	2024
3C - (-15℃)	3636	1044

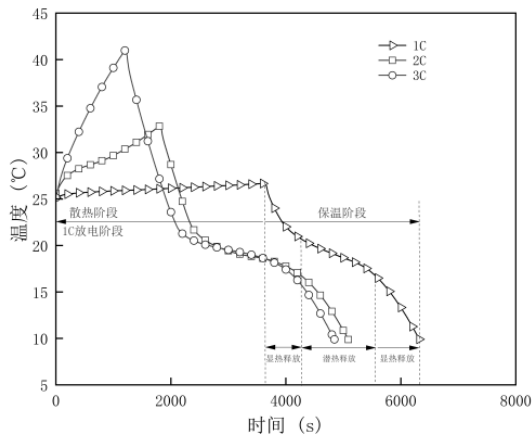


图6 -5℃时不同倍率下电池温度

Fig.6 Battery temperature at different rates at -5℃

2.2 低温环境电池与CPCM的温度差异

除电池温度外,复合相变材料CPCM的温度也是实验过程中需要关注的问题之一。

为了揭示不同环境温度下电池与PCM之间的热耦合作用机制,图9~11分别展示了1C/2C/3C放电倍率时,电池与PCM中心温差(ΔT)在不同环境温度下随时间的变化曲线。在静置阶段,由于STHP传热方向逆转,重力作用转变为传热阻力,热管热阻增大、传热效率下降,从而使电池降温速度快于CPCM,形成显著的温度梯度,温差先上升后下降的趋势,最大温差 ΔT_{max} 随环境温度的降低而显著增

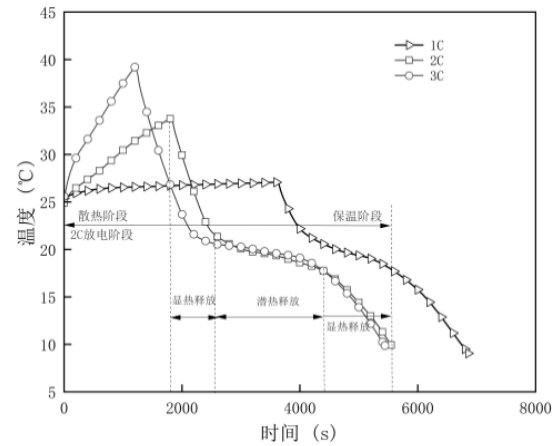


图7 -10℃时不同倍率下电池温度

Fig.7 Battery temperatures at different rates at -10℃

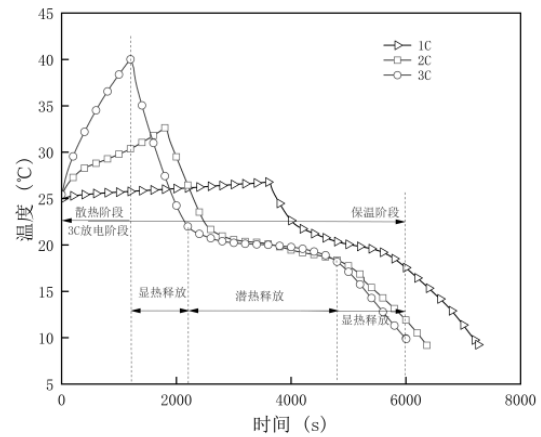


图8 -15℃时不同倍率下电池温度

Fig.8 Battery temperature at different rates at -15℃

大。同时,PCM与电池温差能够被热管理系统控制在5℃以内。

由图9还可看出在静置冷却阶段随着相变材料开始释放潜热,相变材料温度进入平台期电池与PCM的温差逐渐增大,待PCM潜热释放完毕温差随之缩小。

在电池静置阶段,依据牛顿冷却定律,更低的环境温度(如-15℃相较于-5℃)显著增大了系统与环境的初始换热温差,从而大幅提升了初始热流密度。此时,PCM正处于凝固放热阶段,通过释放相变潜热来补偿系统向环境散失的热量。形成“强化换热”与“潜热补偿”的动态平衡过程,导致电池与PCM之间形成了显著的瞬态温度梯度。环境温度越低,初始热驱动力越强, ΔT_{max} 的峰值也随之升高。随后由于PCM的潜热容量有限,在更强的换热驱动力(即更低的环境温度)作用下,其潜热被更快地耗尽。当PCM完全凝固后,其作用退化为仅依靠显热

的普通固态材料,丧失了恒温调节能力。

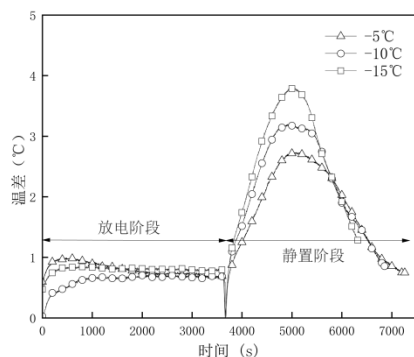


图9 1C倍率不同温度下CPCM与电池的温差

Fig.9 Temperature difference between CPCM and the battery at different temperatures under a 1C rate.

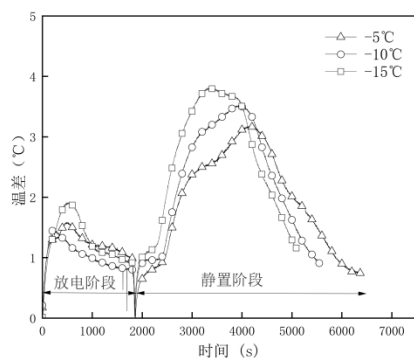


图10 2C倍率不同温度下CPCM与电池的温差

Fig.10 Temperature difference between CPCM and the battery at different temperatures under a 2C rate.

在3C/-15℃工况下,电池初始温度与-15℃的环境温度温差高达60℃。巨大的温差导致初始热流密度极高,PCM的凝固过程变得极不稳定。这种强烈的热冲击会扰动整个系统的热平衡,造成温度曲线的波动。强热冲击导致PCM在冷却过程中,当实际结晶温度低于其理论凝固点时,仍保持液态发生过冷现象,导致PCM低于凝固点后仍不释放潜热。同时,PCM过冷(低于凝固点)后,一旦触发凝固,会因突然释放大量潜热导致温度短暂回升,产生再辉现象。过冷/再辉现象使得PCM自身温度出现剧烈振荡。同时,电池热响应相对于PCM的滞后,其次传感器在强瞬变条件下的动态响应限制,也会导致温差 ΔT 的波动。综合作用下,使得温差曲线呈现出锯齿状波动如图11。

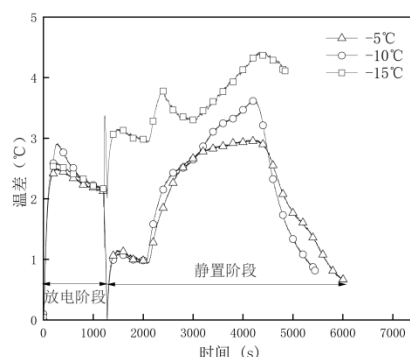


图11 3C倍率不同温度下CPCM与电池的温差

Fig.11 Temperature difference between CPCM and the battery at different temperatures under a 3C rate.

2.3 低温环境电池预热效果研究

锂离子电池在低温环境下会出现电化学性能衰减与安全风险,同时低温环境会导致电池电解液黏度显著增加,离子电导率呈指数级下降。还会使电解液离子电导率下降、电池内阻升高,造成可用容量与功率的显著衰减;而且,低温充电过程存在析锂风险,可能引发隔膜刺穿及热失控,这决定了充放电前对其进行预热是必要的热管理策略。

本研究设置了一组电池预热实验,即在-10℃的低温环境下分别以20℃、25℃、30℃、35℃及40℃,5个加热温度对实验装置进行预热。如图12所示,电池由-10℃加热至15℃所需时间分别为4958s、1744s、1278s、978s及798s。随着加热温度的升高,升温时间呈非线性递减趋势。当加热温度从20℃提升至25℃时,升温时间由4958秒骤降至1744秒,降幅达64.8%;此后升温时间随加热温度升高的递减速率逐渐放缓,从35℃提升至40℃时,升温时间仅缩短180秒,降幅为18.4%。35℃恰好位于这一递减曲线的“拐点”之后。继续提高加热温度对缩短升温时间的效果已经十分有限,但加热系统所需承受的热负荷及能量消耗仍持续增加。因此将加热温度定为35℃最为合适。如图12将加热温度设定为20℃,在加热时间经过2600s时电池温度首次升至13.75℃,继续加热至3400s电池温度达到14.45℃,再加热1600s电池温度维持在14.9℃左右,此时继续加热电池温度已无明显上升。在此加热温度下与-10℃的低温环境仅有30℃的温差,电池吸收的热量与电池向低温环境的散热量达到动态热平衡,使得电池温度不再继续上升。

将纯热管系统与PCM-热管系统以-10℃低温

环境, 35℃加热温度进行比较。如图13可以看到两个系统的温度曲线接近, 在整个实验周期内, PCM温度始终未达到其相变温度23℃, PCM处于固态仅相当于一个附加显热容, PCM始终停留在固态显热吸热阶段。虽然PCM的存在使系统总热容增大, 但增量有限因此对升降温速率的影响并不显著。在PCM-热管系统中, PCM仅作为一个附加的显热容, 在降温阶段释放其储存的显热, 对电池起到一定的热缓冲作用。但由于PCM未发生相变, 其释放的仅是显热而非潜热, 因此缓冲效果有限, 仅表现为降温速率略缓。

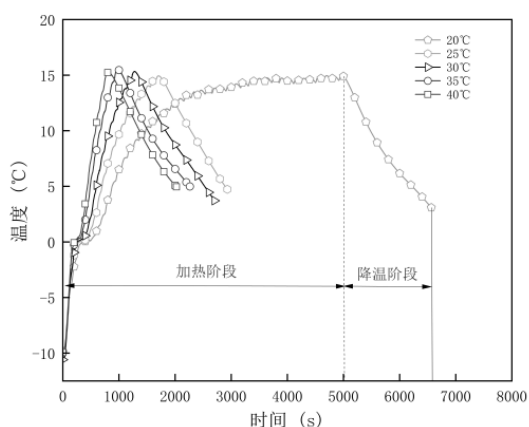


图12 不同预热温度下温度曲线

Fig.12 Temperature curves at different preheating temperatures

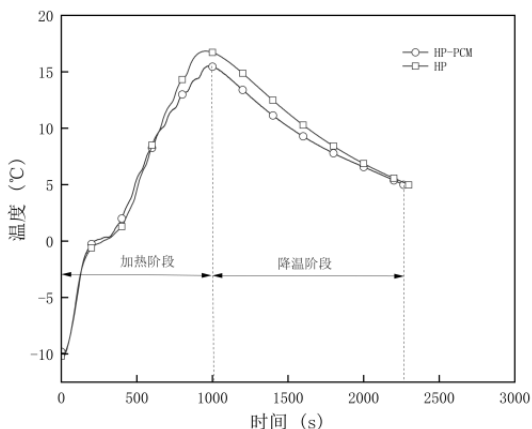


图13 35℃下有无PCM温度曲线

Fig.13 Temperature curves with and without PCM at 35℃

3 结论

本研究针对锂离子电池在低温环境下性能衰减显著的问题, 设计并构建了一种基于复合相变材料(CPCM)与“四段式”热管耦合的模拟电池热管理

实验系统。通过在不同放电倍率及不同环境温度下开展系统性实验, 旨在探究该耦合系统对电池温度的调控能力, 尤其是在低温静置阶段对降温过程的减缓效果及其保温机制, 对结果分析后得到的主要结论如下。

(1) 通过将传统热管蒸发段划分为两个功能区段, 实现了高温散热、低温预热与静置保温三种工况模式的灵活切换。放电阶段(1C~3C)电池最高温度均低于45℃, 有效抑制了高倍率放电下的温升风险。

(2) 低温静置阶段, CPCM的相变行为与系统热响应之间存在密切耦合关系。电池降温过程呈现“快速降温-相变恒温-二次快降”的三阶段特征。高倍率放电后, 复合相变材料蓄积大量相变潜热, 相变平台持续时间随放电倍率升高而延长。这表明CPCM在相变过程中发挥了显著的恒温调节作用, 有效延缓了电池的低温衰减过程。

(3) 静置阶段热管传热方向逆转导致电池降温速度快于CPCM, 二者之间形成显著温差, 且环境温度越低温差峰值越大; 高倍率(3C)低温(-15℃)工况下CPCM出现过冷/再辉现象。上述结果揭示了热管反向传热工况下的性能局限性。

(4) 在-10℃环境下的预热实验中, 综合考虑加热效率与能耗, 确定35℃为最优加热温度; 对比纯热管系统, 因CPCM始终未达到23℃相变温度, 仅提供有限的显热缓冲, 对升降温速率影响不显著。

综上所述, 该耦合系统在低温环境下具备良好的热管理性能。但管反向传热衰减机制, CPCM的长期循环稳定性及其与热管的界面热阻演变规律亦有待进一步研究。

参考文献

- [1] Rashidi S, Karimi N, Sunden B, et al. Progress and challenges on the thermal management of electrochemical energy conversion and storage technologies: Fuel cells, electrolyzers, and supercapacitors [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, **88**: 100966.
- [2] Jie L, Zhang J K, Fan Y, et al. A review of composite phase change materials used in battery thermal management systems[J]. Journal of Energy Storage, 2025, **112**: 115579.
- [3] 朱信龙, 王均毅, 潘加爽, 等. 集装箱储能系统热管理系统的现状及发展[J]. 储能科学与技术, 2022, **11**(1): 107-118.
Zhu X L, Wang J Y, Pan J S, et al. Present situation and development of thermal management system for battery energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, **11**(1): 107-118.
- [4] 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.
- [5] Wu W X, Yang X Q, Zhang G Q, et al. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, **138**: 486–492.
- [6] Alihosseini A, Shafaei M. Experimental study and numerical simulation of a Lithium-ion battery thermal management system using a heat pipe[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, **39**: 102616.
- [7] Feng X N, Lu L G, Ouyang M G, et al. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module[J]. *Energy*, 2016, **115**: 194–208.
- [8] Kong D P, Wang G Q, Ping P, et al. Numerical investigation of thermal runaway behavior of lithium-ion batteries with different battery materials and heating conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **189**: 116661.
- [9] Jiang Z Y, Qu Z G. Lithium-ion battery thermal management using heat pipe and phase change material during discharge-charge cycle: a comprehensive numerical study[J]. *Applied Energy*, 2019, **242**: 378–392.
- [10] Kuznetsov G V, Kravchenko E V. Evaluation of the limiting conditions for operation of a large electrochemical energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **65**: 107384.
- [11] Liu X H, Ai W L, Naylor Marlow M, et al. The effect of cell-to-cell variations and thermal gradients on the performance and degradation of lithium-ion battery packs[J]. *Applied Energy*, 2019, **248**: 489–499.
- [12] Shabani B, Biju M. Theoretical modelling methods for thermal management of batteries[J]. *Energies*, 2015, **8**(9): 10153–10177.
- [13] 施尚, 余建祖, 陈梦东, 等. 基于泡沫铜/石蜡的锂电池热管理系统性能[J]. *化工学报*, 2017, **68**(7): 2678–2683.
- Shi S, Yu J Z, Chen M D, et al. Battery thermal management system using phase change materials and foam copper[J]. *CIESC Journal*, 2017, **68**(7): 2678–2683.
- [14] Kim J, Oh J, Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **149**: 192–212.
- [15] Mane N S, Said Z, Almuzaiqer R, et al. Hybrid phase change material techniques for battery thermal management in electric vehicles: a comprehensive review and bibliometric analysis[J]. *Energy Reports*, 2025, **14**: 4415–4436.
- [16] Wang H C, Guo Y H, Ren Y, et al. Investigation of the thermal management potential of phase change material for lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, **236**: 121590.
- [17] Seraji P, Shahbazi H, Ncube M K, et al. Stabilizing lithium superoxide formation in lithium-air batteries by Janus chalcogenide catalysts[J]. *Nano Energy*, 2025, **134**: 110510.
- [18] Gao C, Sun K, Song K W, et al. Performance improvement of a thermal management system for Lithium-ion power battery pack by the combination of phase change material and heat pipe[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, **82**: 110512.
- [19] Lv Y F, Luo W M, Li C C, et al. Experimental and numerical simulation study on the integrated thermal management system for electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **70**: 107895.
- [20] 陈华富. 基于复合相变材料的锂离子电池低温热管理系统性能及结构优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- Chen H F. Performance and structural optimization of low-temperature thermal management system for lithium-ion batteries based on composite phase change materials[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [21] 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**: 129280.
- [22] Abd H M, Khalifa A H N, Hamad A J. Experimental comparison of the Li-ion battery thermal management systems using a new hybrid model of flat heat pipe coupled with phase change materials [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, **84**: 110963.
- [23] Hu Z M, Peng Y Z, Lv Y F, et al. Battery thermal management under all-climate conditions based on phase change materials and heat pipes: a numerical simulation study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, **268**: 125913.
- [24] Liu F F, Lan F C, Chen J Q, et al. Experimental investigation on cooling/heating characteristics of ultra-thin micro heat pipe for electric vehicle battery thermal management[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, **31**(1): 53.
- [25] Cheng J P, Shuai S L, Zhao R C, et al. Numerical analysis of heat-pipe-based battery thermal management system for prismatic lithium-ion batteries[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, **14**(8): 081008.
- [26] Dong T, Peng P, Jiang F M. Numerical modeling and analysis of the thermal behavior of NCM lithium-ion batteries subjected to very high C-rate discharge/charge operations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **117**: 261–272.
- [27] Zhao H W, Su H, Yang S Y, et al. Thermal management of 500 Ah large-capacity lithium-ion battery and module with composite phase-change materials and heat pipes: an experimental and simulation study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, **125**: 116862.
- [28] 陈万宇, 毛征宇, 常利军, 等. 方型锂电池模组热特性实验与仿真研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, **37**(7): 184–191.
- Chen W Y, Mao Z Y, Chang L J, et al. Experimental and simulation research on thermal characteristic of square lithium battery modules[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, **37**(7): 184–191.
- [29] Chang L J, Chen W Y, Mao Z Y, et al. Experimental study on the effect of ambient temperature and discharge rate on the temperature field of prismatic batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **59**: 106577.
- [30] 朱先宇, 孙钱行, 周守军, 等. 复合相变材料耦合微槽平板热管的电池热管理实验研究[J]. *化工学报*, 2025, **76**(6): 2652–2666.
- Zhu X Y, Sun Q X, Zhou S J, et al. Experimental study on battery thermal management of composite phase change materials coupled with micro grooves flat heat pipes[J]. *CIESC Journal*, 2025, **76**(6): 2652–2666.
- [31] Zhu X Y, Zhou S J, Wang C C, et al. Experimental study on battery thermal management of CPCM coupled with micro-grooves flat heat pipe at low temperature[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, **269**: 126123.
- [32] Zhou S J, Wang C C, Tian Y S, et al. Numerical study on the heat dissipation characteristics of the circulation in a composite thermal management system[J]. *Energy Technology*, 2026, **14**(2): e202502153.
- [33] 杜江龙, 杨雯棋, 黄凯, 等. 复合相变材料/空冷复合式锂离子

电池模块散热性能[J]. 化工学报, 2023, **74**(2): 674–689.

Du J L, Yang W Q, Huang K, et al. Heat dissipation performance

of the module combined CPCM with air cooling for lithium-ion
batteries[J]. CIESC Journal, 2023, **74**(2): 674–689.