

储热储冷多场景应用专刊



石墨烯-碳化海绵/石蜡复合相变材料:热特性及其在电池热管理中的应用

连 毅¹, 黄沛丰², 罗伊默¹, 潘振飞¹

(¹湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; ²湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 针对传统相变材料热导率低、易泄漏及低温环境下缺乏主动调温能力等问题, 本工作开发了一种新型石墨烯-碳化海绵/石蜡(CF-rGO/PW)复合相变材料, 对其热导率、相变潜热等关键热特性参数进行了实验测量与分析。在此基础上, 构建了采用该材料的电池模组三维耦合热模型。在不同放电倍率下, 电池最高温度的仿真与实验结果误差不超过2%, 验证了模型的可靠性。基于该模型, 进一步探究了其在电池热管理中的应用效果, 分析了恒定倍率放电、频繁充放电及热滥用触发工况下模组的温度演化规律。结果表明, 在2 C与3 C工况下, 采用复合相变材料可使电芯最高温度降低约5~15℃, 并将最大温差控制在1.5℃以内。在频繁充放电条件下, 瞬态温度波动幅值较空气冷却平均降低约23%, 在相变温区内降低程度提高至36%。在热滥用工况下, 相较于无阻隔结构的电池模组, 复合相变材料-电池模组中的高温区域仅发生在触发电芯及其相邻电芯, 且相邻电芯到达温度峰值的时间延迟了约300 s, 同时后排电芯温升不明显。可见, 本工作开发的新型复合相变材料显著提升了电池模组的热稳定性与安全性。

关键词: 复合相变材料; 电池热管理; 多工况数值分析; 热滥用

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0085

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-701-12

Graphene-carbonized foam/paraffin composite phase change material: Thermal characteristics and application in battery thermal management

LIAN Yi¹, HUANG Peifeng², LUO Yimo¹, PAN Zhenfei¹

(¹College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; ²State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: To address the issues of low thermal conductivity, leakage during melting, and the lack of active temperature regulation under low-temperature conditions in conventional phase change materials (PCMs), a novel graphene-carbonized sponge/paraffin (CF-rGO/PW) composite phase change material was developed. Its key thermophysical properties, including thermal conductivity and latent heat of phase change, were experimentally measured and analyzed. Based on these results, a three-dimensional coupled thermal model of a battery

收稿日期: 2026-01-27; 修改稿日期: 2026-02-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52307240, 52577232)。

第一作者: 连毅 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为复合相变材料电池热管理, E-mail: lianyyi111@hnu.edu.cn; 通信作者: 罗伊默, 教授, 研究方向为分布式储能技术、光伏建筑一体化及电池热管理, E-mail: yimoluo@hnu.edu.cn。

引用本文: 连毅, 黄沛丰, 罗伊默, 等. 石墨烯-碳化海绵/石蜡复合相变材料:热特性及其在电池热管理中的应用[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 701-712.

Citation: LIAN Yi, HUANG Peifeng, LUO Yimo, et al. Graphene-carbonized foam/paraffin composite phase change material: Thermal characteristics and application in battery thermal management[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 701-712.

module incorporating the composite material was established. The simulated maximum battery temperature under different discharge rates agreed well with experimental results, with an error of less than 2%, verifying the reliability of the model. Using this model, the thermal management performance of the composite material was further investigated under constant-rate discharge, frequent charge-discharge, and thermal abuse triggering conditions. Results show that under 2 C and 3 C discharge conditions, the incorporation of the composite phase change material reduces the maximum cell temperature by approximately 5—15°C and limits the maximum temperature difference to within 1.5°C. Under frequent charge-discharge conditions, the average transient temperature fluctuation amplitude decreases by about 23% compared with air cooling, and the reduction increases to 36% within the phase change temperature range. Under thermal abuse conditions, compared with the battery module without a barrier structure, the high-temperature region in the composite phase change material-battery module is confined to the triggered cell and its immediate neighbor. The peak temperature of the neighboring cell is delayed by about 300 s, and the rear cells exhibit only a slight temperature rise as well. These results demonstrate that the developed composite phase change material significantly enhances the thermal stability and safety of battery modules.

Keywords: composite phase change materials; battery thermal management; multi-condition numerical analysis; thermal abuse

随着零碳建筑以及可再生能源的日益普及, 高效储能技术在保障电力系统稳定性和可靠性方面发挥着关键作用。在各种储能技术中, 锂离子电池以其能量密度高、循环寿命长、响应速度快等特点得到了广泛的应用^[1]。然而, 锂离子电池的热安全问题是限制其进一步应用的重要因素。在电池工作过程中, 过高的温度会加速副反应, 诱发电解液分解, 导致容量快速衰减甚至引发热失控, 最终缩短电池的使用寿命。而低温会增加内阻, 阻碍锂离子扩散, 显著降低电池的充放电效率和整体性能^[2]。研究表明, 锂离子电池的最佳工作温度范围为 25~40°C^[3]。为了使电池在工作中保持在最佳的温度范围, 电池热管理系统的研究受到广泛关注。

目前, 电池热管理冷却技术主要包括空气冷却、液体冷却、相变材料(PCM)冷却和热管冷却等^[4]。其中, 相变材料因其潜热储热能力和优异的温度调节特性, 在被动热管理领域受到广泛关注^[5]。然而, 传统的相变材料存在热导率低、在熔融状态下容易泄漏等问题, 限制了其在实际工程中的应用。此外, 若要保持热管理系统在低温下的温控能力, 通常还需集成预热装置, 而这进一步增加了系统的成本^[6]。

近年来, 为了抑制电池温升以及改善电池组的

温度一致性, 有关复合相变材料(CPCM)电池热管理系统的研究主要包括以下两个方面^[7]。其一, 聚焦于相变材料自身热特性参数的优化分析。Jiang 等人^[8]的研究发现, 复合相变材料的热导率从 0.2 W/(m·K)增加到 0.4 W/(m·K)时, 电池在放电结束时的最高温度下降 1.1°C, 而热导率从 0.4 W/(m·K)增加到 1.0 W/(m·K)时, 最高温度仅下降 0.29°C。这表明当 CPCM 热导率达到一定值时, 锂电池的温度上升速率几乎保持不变。罗昭顺^[9]通过仿真分析了相变材料导热系数对电池散热性能的影响, 并进一步研究了维持电池在常规工况及高温工况下正常运行所需的最低潜热值。结果表明, 当相变材料的导热系数约为 1 W/(m·K)、潜热不低于 225 J/g 时, 可有效满足电池的散热需求; 并且探索了相变材料与主动散热方式的协同应用, 以解决其被动散热能力受限的问题^[10]。Ling 等人^[11]研究提出了 PCM 结合强制空气冷却的混合系统, 结果表明相比纯空气冷却, 峰值温度明显降低, 但在高倍率工况下仍受限于空气换热能力。Wang 等人^[12]的数值研究表明, 液冷可在 PCM 完全熔化后持续带走热量, 显著改善高倍率工况下的温控能力。Wu 等人^[13]分析了复合相变材料与热管耦合系统的冷却效率与结构参数

影响。可见, 现有研究多集中于固定倍率条件下复合相变材料与空气冷却、液冷或热管的协同控温性能评估以及参数的影响分析, 而针对变倍率运行工况及极端热滥用情形下, 复合相变材料结构本身对热传播路径和热扩散行为的影响仍缺乏系统研究。

因此, 如图1所示, 本团队开发了一种兼具高导热性、电热性及良好的循环稳定性的石墨烯-碳化海绵/石蜡(CF-rGO/PW)复合相变材料, 并通过

实验验证了其在高温与低温工况下的双向热管理能力。在此基础上, 建立了复合相变材料与电池单体到模组尺度的三维耦合热模型, 评估了在恒定倍率、频繁充放电以及外部热滥用触发等多工况下的控温特性与热扩散行为, 分析其温度调节能力与安全防护潜力。本研究可为复合相变材料在储能电池热管理领域的结构设计与热安全性评估提供理论参考与模型支撑。

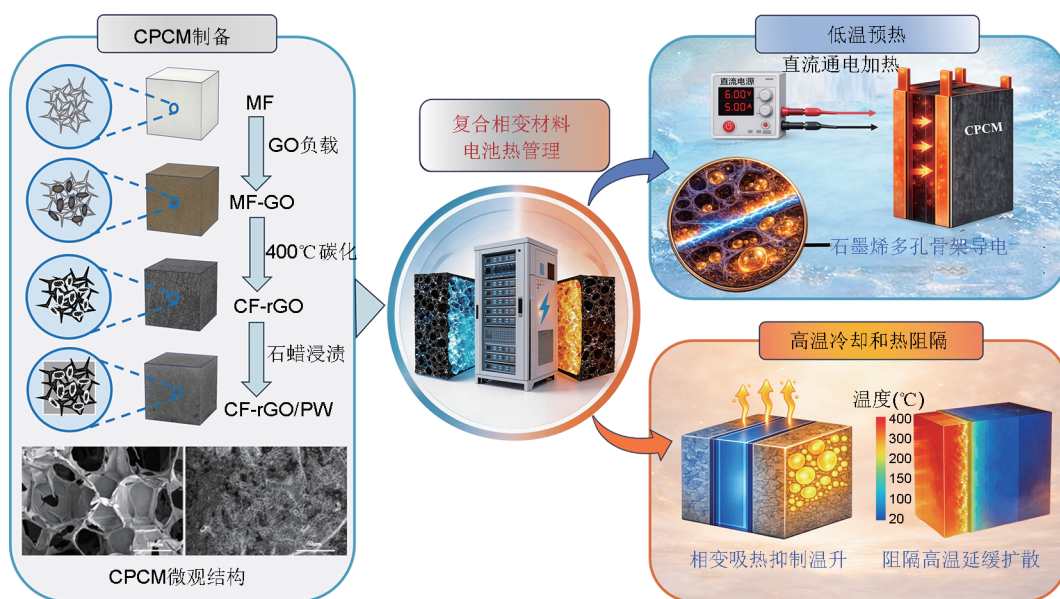


图1 石墨烯-碳化海绵/石蜡复合相变材料在电池热管理中的应用

Fig. 1 Schematic illustration of the application of graphene-carbonized foam/paraffin composite phase change material in battery thermal management

1 模型建立与验证

本研究所采用的相变储热材料为石蜡(PW, 东莞盛邦, 相变温度约 35°C), 多孔骨架材料为三聚氰胺海绵(MF, 上海倍优)负载还原氧化石墨烯(rGO, 苏州碳丰), 经 400°C 高温碳化两小时得到石墨烯-碳化海绵多孔导热骨架(CF-rGO), 复合相变材料(CPCM)采用真空浸渗法制备, 使熔融石蜡充分填充于碳化多孔骨架中形成石墨烯-碳化海绵/石蜡(CF-rGO/PW)复合相变材料。图2(a)给出了CF-rGO多孔骨架材料的SEM图像, 可以看到碳化后的骨架仍保留着多孔结构, 石墨烯以膜状附着在骨架上。图2(b)展示了CF-rGO/PW复合相变材料的SEM图像, 可以观察到石蜡充分浸入CF-rGO多孔骨架中。

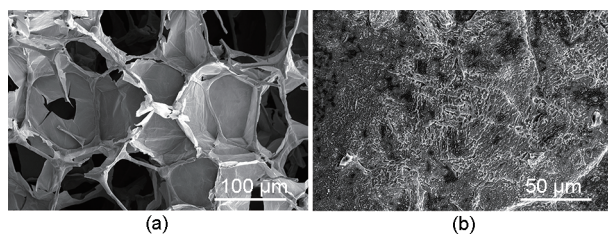


图2 SEM图像: (a) CF-rGO多孔骨架的SEM图; (b) CF-rGO/PW复合相变材料的SEM图

Fig. 2 SEM images: (a) SEM image of CF-rGO porous skeleton; (b) SEM image of CF-rGO/PW composite phase change material

1.1 热特性参数获取与模型搭建

1.1.1 CF-rGO/PW复合相变材料热特性

对石墨烯-碳化海绵/石蜡(CF-rGO/PW)复合相变材料的热特性进行了测试。图3(a)给出了CF-rGO/PW与石蜡的DSC曲线, 两种材料分别以

5°C/min的升温速率从0°C升温至90°C,其中曲线下方面积代表材料的相变潜热,而相变起始与结束温度则按标准采用外推起始温度和外推终止温度,由基线与峰两侧切线的交点确定^[14],其数值见图3(b)。

由图3(b)可知,PW的相变起始与结束温度分别为34.4°C和43.5°C,而CF-rGO/PW则为33.7°C与48.5°C。结合图3(a)可知,PW在加热过程中的主峰更尖锐且峰值更高,说明其相变速率较快;而CF-rGO/PW复合材料的峰形更为宽缓、峰值降低,

这说明引入石墨烯-碳化海绵骨架后,多孔材料的毛细作用力延缓了石蜡的熔化,相变过程被拉宽^[15]。材料吸热过程更加平稳,有利于降低瞬时能量波动。图3(b)显示PW的相变潜热为257.2 J/g,而CF-rGO/PW为254.8 J/g,两者差异较小,经质量称量统计,石蜡为主要储热组分,碳化海绵/rGO骨架仅起支撑和导热增强作用,质量占比仅为1%,表明引入骨架对相变潜热影响不大,材料仍保持良好的储能能力。

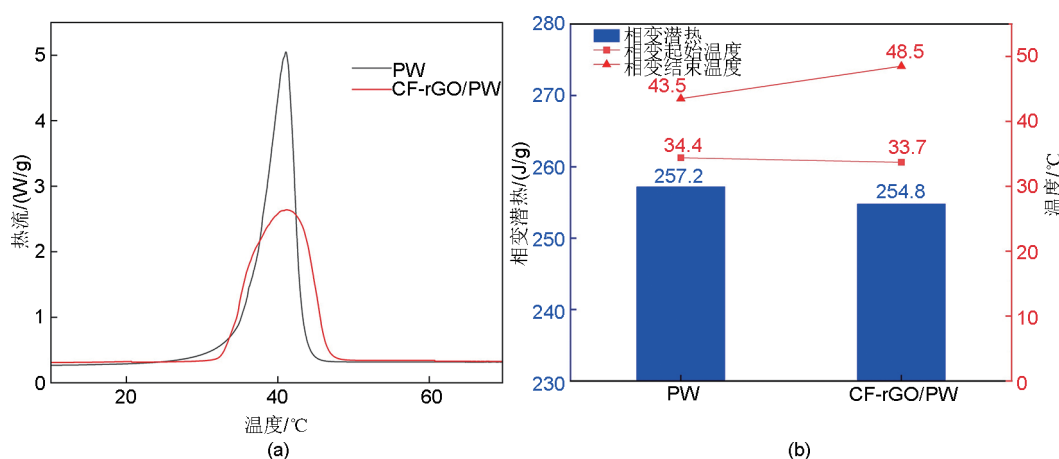


图3 CF-rGO/PW复合相变材料的DSC测试结果: (a) DSC曲线; (b) 相变潜热及相变温度

Fig. 3 DSC test results of the CF-rGO/PW composite: (a) DSC curve; (b) Phase change latent heat and phase change temperature

使用热导率测试仪对纯石蜡以及CF-rGO/PW复合相变材料的导热系数进行了测试,纯石蜡的导热系数为0.20 W/(m·K),而CF-rGO/PW复合材料提升至0.4312 W/(m·K),导热能力显著增强。这主要得益于碳化海绵的三维多孔导热结构与石墨烯共同构建了更连续的热传导路径。总体来说,复合相变材料相比石蜡的导热系数提升显著,缩短了相变材料达到平衡温度的时间,有利于对电池的温度进行控制。

1.1.2 物理模型

本工作在Fluent平台上建立了采用CF-rGO/PW复合相变材料的电池模组三维耦合热模型,并采用实验数据验证了模型的准确性。本工作选用合肥国轩高科动力能源有限公司生产的27 Ah磷酸铁锂方形储能电芯作为研究对象。根据产品规格书,电芯标称容量为27 Ah,标称电压为3.2 V,电芯在25°C条件下的最大持续放电倍率为6 C。电性能及物性参数均来源于厂家产品规格书,并作为数值模

型与热仿真边界条件的基础输入参数。

图4给出了复合相变材料-电池模型几何结构示意图和实物图。为降低计算复杂度并提高数值计算的稳定性,在模拟过程中作出如下合理假设:

- (1) 复合相变材料为均质介质,其热物性参数在空间上均匀分布,且导热系数具有各向同性特征;
- (2) 在相变过程中,复合相变材料的体积变化可忽略不计;
- (3) 温度变化对材料密度及热导率的影响不予考虑;
- (4) 复合相变材料内部的热传递过程以热传导为主,忽略热辐射的影响。

模拟所需的相关物性参数取值列于表1中。

1.2 控制方程和边界条件

1.2.1 控制方程

本工作对复合相变材料-电池耦合热模型的热管理性能进行模拟仿真,下面介绍该过程所涉及的

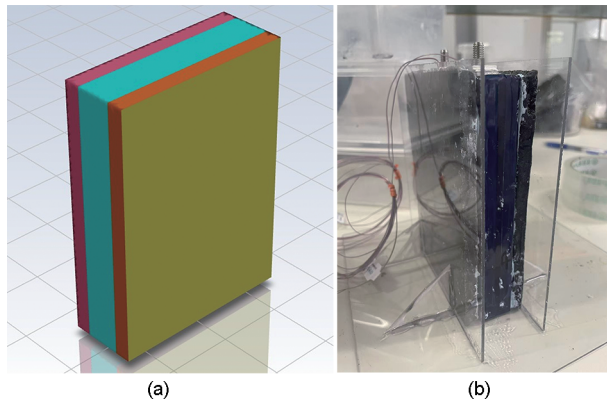


图4 复合相变材料-电池结构: (a) 几何结构示意图; (b) 实物图

Fig. 4 Composite phase change material-battery structure: (a) Schematic diagram of geometric structure; (b) Real picture

表1 储能电池和复合相变材料的物性参数

Table 1 Thermophysical properties of the energy storage battery and the CPCM

项目	参数名称	数值
储能电池	尺寸/mm	140×100×20
	密度/(kg/m ³)	2143.7
	比热/[J/(kg·K)]	1023.6
	热导率/[W/(m·K)]	13.2 _x , 3.7 _y , 9.6 _z
	尺寸/mm	140×100×9
复合相变材料	密度/(kg/m ³)	760
	比热容/[J/(kg·K)]	2000
	热导率/[W/(m·K)]	0.43
	潜热/(J/g)	254.8
	相变温度/℃	33.7/48.5

主要方程。

Bernardi生热模型能够较好地描述电池在正常运行工况下的生热特性,已被广泛应用于电池热管理数值模拟研究中^[16]。采用Bernardi生热模型对电池的生热过程进行描述,方程表示为:

$$Q = I_L^2 R_0 + I_L T \frac{\partial V_{OCV}}{\partial T} \quad (1)$$

式中, Q 为电池单位体积生热率, W/m^3 ; I_L 为电池充放电过程中的电流, A ; R_0 为电池的电阻, Ω ; T 为电池的温度, K ; $\frac{\partial V_{OCV}}{\partial T}$ 为电池的温熵系数, V/K 。本工作在此基础上,通过用户自定义函数(UDF)实现生热项的动态加载,以满足不同运行工况下的热分析需求。

当电池与复合相变材料耦合应用于热管理系统

中时,电池在充放电过程中产生的热量主要通过三种途径进行分配:一部分用于电池及复合相变材料自身的显热升温,一部分通过复合相变材料的相变过程以潜热形式被吸收,另一部分则通过电池模组与外界环境之间的换热过程传递至环境中。因此,在电池充放电过程中,复合相变材料的热响应过程可划分为以下三个阶段:

(1) 相变前阶段:复合相变材料尚未发生相变,主要通过吸收显热实现温度升高;

(2) 相变阶段:复合相变材料发生相变,通过吸收相变潜热有效延缓电池温度的上升;

(3) 相变后阶段:复合相变材料相变过程结束,再次以显热形式吸收热量,温度继续升高。

复合相变材料的控制方程如下:

$$\rho_{CPCM} \frac{\partial H}{\partial T} = k_{CPCM} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$H = h + \Delta H \quad (3)$$

$$h = \int_{T_0}^T C_{p,CPCM} dT \quad (4)$$

$$\Delta H = \alpha \beta \quad (5)$$

$$a = \begin{cases} 0, & T < T_1 \\ \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}, & T_1 < T < T_2 \\ 1, & T > T_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, ρ_{CPCM} 是复合相变材料的填充密度, kg/m^3 ; k_{CPCM} 是复合相变材料的热导率, $W/(m \cdot K)$; H 是复合相变材料的总焓值,由复合相变材料的显热焓 h 和复合相变材料的潜热焓 ΔH 组成, J/g ; $C_{p,CPCM}$ 是复合相变材料的比热容, $J/(kg \cdot K)$; α 是PCM的液相分数; β 是相变焓, J/g ; T_1 与 T_2 分别为相变起始与结束温度, K 。

1.2.2 初始条件与边界条件

假设系统初始时刻温度均匀,复合相变材料处于固态,其初始条件定义为:

$$T(x, 0) = T_0 \quad (7)$$

$$a(x, 0) = 0 \quad (8)$$

式中, T_0 为环境温度,默认为 $25^\circ C$,即 $298K$ 。

电池与CPCM接触界面的传热方程如下:

$$-k_{b,y} \frac{\partial T_b}{\partial n} = -k_{CPCM} \frac{\partial T_{CPCM}}{\partial n} = h_c (T_b - T_{CPCM}) \quad (9)$$

式中, T_b 为电池在接触面的温度, T_{CPCM} 为复合相变材料在接触面的温度, K ; $k_{b,y}$ 为电池在法向 y 方向上的热导率, k_{CPCM} 为复合相变材料的热导率, $W/(m \cdot K)$; h_c 为电池与复合相变材料之间的界面换

热系数,用以表征接触热阻, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。上式表明,在电池与复合相变材料接触界面处,法向热流密度在两侧保持连续;同时,界面热流密度与两侧温度差成正比,其中比例系数为界面换热系数 h_w 。该边界条件考虑了非理想接触情况下的接触热阻效应,界面温度存在不连续。

对于电池与复合相变材料与环境的接触面有:

$$-k_{b,z} \frac{\partial T_b}{\partial n} = h_w (T_b - T_0) \quad (10)$$

$$-k_{\text{cpcm}} \frac{\partial T_{\text{cpcm}}}{\partial n} = h_w (T_{\text{cpcm}} - T_0) \quad (11)$$

式中, h_w 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $k_{b,z}$ 为电池在法向 z 方向上的热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

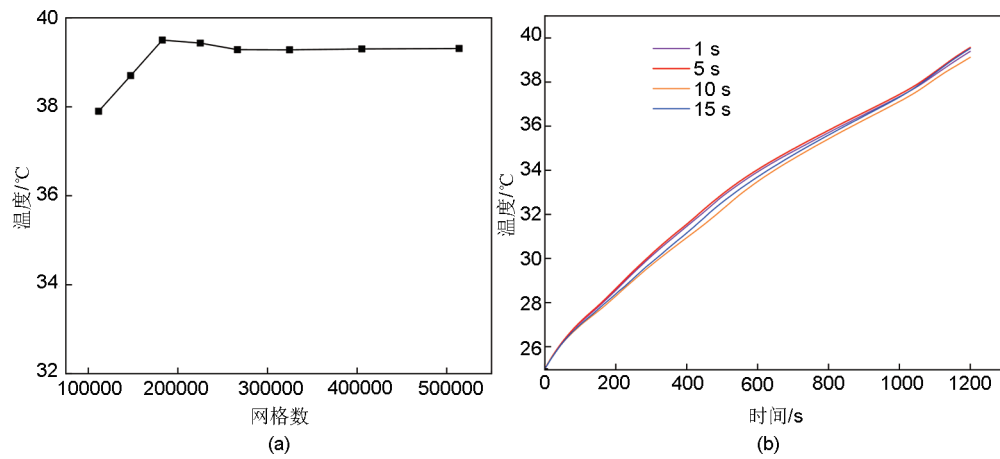


图5 网格无关性与时间步长无关性验证: (a) 不同网格数量下的电池最高温度; (b) 不同时间步长下的电池温度演化曲线

Fig. 5 Grid independence and time-step independence validation: (a) Maximum battery temperature under different mesh densities; (b) Battery temperature evolution under different time step sizes

1.3.2 模型验证

如图6所示,本研究搭建了复合相变材料与单体电池耦合系统的实验平台,实验采用恒温箱实现环境温度调控,通过充放电循环仪对电池施加不同放电倍率工况,同时在电芯主表面及侧面中心位置布置K型热电偶,利用温度记录仪实时采集电池表面温度数据,获得不同放电倍率及不同热管理工况下的温度演化过程。考虑到测量误差的影响,本工作对温度测量不确定性进行了评估。温度误差主要来源于热电偶本体精度、采集系统分辨率以及热电偶与电池表面接触热阻等因素。综合估算K型热电偶在本实验温区内的测量误差为 $(\pm 0.5 \sim 1.0)^\circ\text{C}$,采集系统误差约为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,温度测量的不确定度控制在 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 以内,能够满足电池温升及温差分析的精度要求。此外,为降低随机误差的影响,每组工况均重复开展3次独立实验,并对测量结果取平均值

1.3 无关性分析和模型验证

1.3.1 无关性分析

模型的网格质量和时间步长设置对仿真结果具有显著影响。网格尺寸过大或时间步长过长会降低计算精度,而过细的网格划分或过小的时间步长则会显著增加计算成本,延长仿真时间。因此,合理选择网格数量和时间步长对于兼顾计算精度与计算效率具有重要意义。图5中给出了在3 C放电倍率工况下,不同网格数量及不同时间步长条件下电池表面最高温度随时间变化的对比结果。综合考虑计算精度与仿真效率,最终选取网格数量为324712,时间步长为5 s,用于后续数值模拟。

作为最终数据,以提高实验结果的稳定性与可靠性。

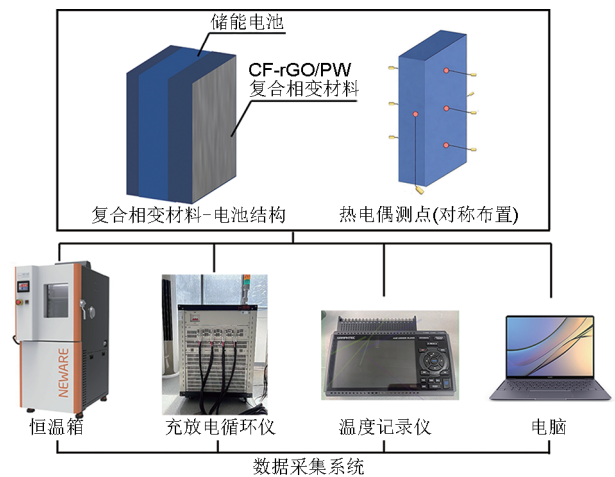


图6 实验测试平台
Fig. 6 Experimental testing platform

由于电池内部温度在实验过程中难以直接、准确测量, 本工作选取实验中电池正反两面中心点测得的最高温度与数值模拟结果进行对比验证。如图7所示, 在1 C、2 C和3 C放电工况下, 仿真结果与实验结果具有较好的一致性, 最大相对误差不超过2%, 验证了所建立的三维热耦合模型的准确性。

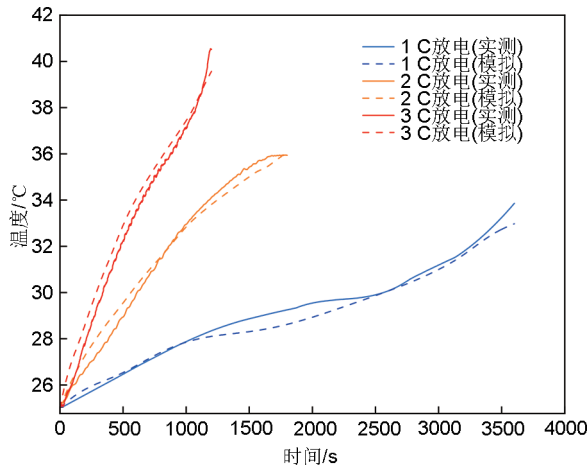


图7 不同放电倍率下电池表面最高温度的仿真结果与实验结果对比

Fig. 7 Comparison of simulated and experimental results of the maximum battery surface temperature at different discharge rates

2 CPCM-电池模组热管理性能

上文通过模型验证, 证明了所设定参数条件下复合相变材料-电池模型的准确性与可靠性。本部分在此基础上, 进一步开展复合相变材料与电池模组在不同运行工况下的热性能分析。研究对象为两组5S电池模组, 其中一组模组中在相邻电芯之间设置复合相变材料隔层, 且在模组首尾两端分别布置一块厚度为9 mm的复合相变材料, 以增强整体热管理性能; 另一个模组为对照组, 五个单体电池以9 mm的间距并列排列, 仅通过对流换热方式对电池进行散热。

2.1 不同放电倍率下的电池温升情况

本节基于所建立的CPCM-电池模组, 对不同放电倍率工况下电池模组的温升进行对比分析, 重点研究了电芯最大温升和电芯温度一致性, 从而评估复合相变材料在不同倍率条件下的热管理性能。

为定量表征电池模组内各电芯之间的温度一致性, 引入电芯最大温差作为评价指标, 其定义如下:

在同一时刻, 电池模组内所有电芯最高温度之间的最大差值, 即:

$$\Delta T_{\text{cell}} = \max(T_i) - \min(T_i) \quad (12)$$

其中, T_i 表示第 i 个电芯在当前时刻的最高温度。电芯最大温差能够直观反映电池模组内温度分布的均匀程度。电芯最大温差越小, 说明模组内各电芯的热环境一致性越好, 有利于提升电池组的循环寿命和运行安全性。因此, 在不同充放电倍率条件下对电芯最大温差的演化规律进行分析, 对于评估热管理系统的有效性具有重要意义。

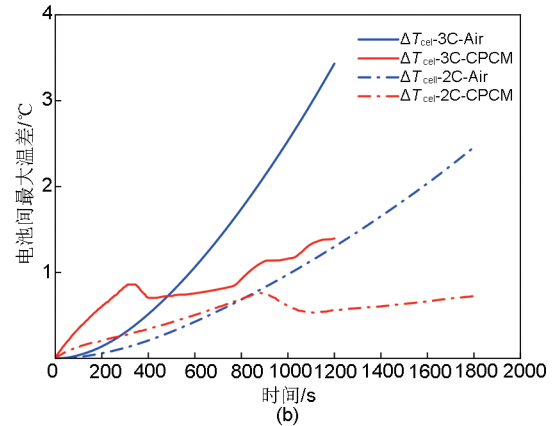
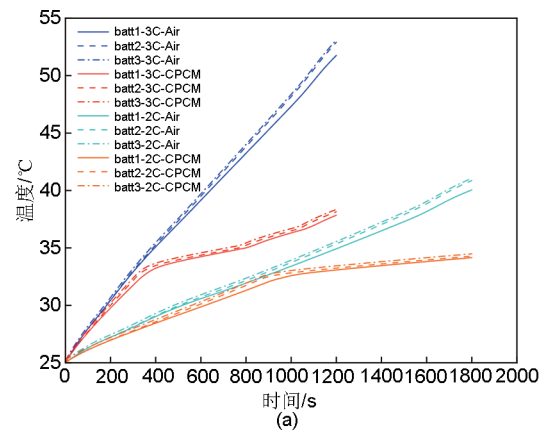


图8 不同放电倍率下CPCM和空气冷却的性能对比: (a) 各电芯最高温度; (b) 电芯最大温差

Fig. 8 Performance comparison between CPCM and air cooling at different discharge rates: (a) Maximum temperature of each cell; (b) Maximum temperature difference among cells

图8(a)给出了在2 C与3 C放电倍率条件下, 采用空气冷却(Air)和相变冷却(CPCM)两种热管理方式时, 电池模组内各单体电芯温度随时间的变化规律。图中“batt1-3C-Air”等图例用于区分不同电芯位置、放电倍率及热管理方式。其中, “batt1”表示电池模组中的第1个电芯, “3 C”表示放电倍

率为3 C, “Air”表示采用空气冷却方式, “CPCM”表示采用复合相变材料热管理方式。可以看出,在相同倍率条件下,采用空气冷却下电芯温度随时间呈近似线性快速上升。在3 C放电工况下,空气冷却条件下电芯最高温度最终达到52.89℃,而相变冷却下最高温度仅为38.14℃,相较Air工况降低了14.75℃。在2 C工况下,空气冷却下电芯最高温度约为40.86℃,而相变冷却工况下最高温度仅为34.28℃。对比不同放电倍率可发现,在空气冷却条件下,由2 C提升至3 C后,电芯最高温度增加了12℃;而在相变冷却条件下,该增幅仅为3.86℃,表明复合相变材料能够有效削弱倍率升高带来的额外热量。

图8(b)给出了不同倍率与热管理方式下电池模组内电芯最大温差 ΔT_{cell} 的变化过程。在3 C-空气冷却工况下,电芯最大温差随时间持续增大,最终达到3.59℃,表现出明显的温度不一致性。相比之下,在3 C-相变冷却工况下,初期热扩散路径尚未建立,温差快速形成并进入短暂平台;随后CPCM进入相变温区,等效热容增大、热量分配更加均匀,使电芯间升温速率差异减小,最大温差下降;相变结束后均温能力减弱,边界散热差异再次累积,温差缓慢增加,但模组内电芯最大温差被有效控制控制在1.5℃以内。在2 C工况下,空气冷却条件下电芯最大温差峰值约为2.45℃,而相变工况下降低至0.72℃,始终保持在较低水平。

综合来看,在2 C和3 C倍率工况下,复合相变材料热管理均可使电池模组电芯最高温度控制在40℃以内,同时将模组内电芯最大温差控制3℃以内。尤其在高倍率工况下,CPCM对抑制温度快速上升和改善温度一致性的作用更加显著。

2.2 频繁充放电工况下的温度响应行为

频繁充放电工况是储能电池参与电网调频的典型运行模式^[7]。在该工况下,电池需根据电网自动发电控制信号在短时间尺度内频繁切换充放电状态,以实现功率的快速调节。本工作在数值模拟中通过UDF引入时变电流载荷,实现充放电电流的动态控制。该载荷曲线参考PJM电力市场公开的RegD调频信号构建,具有正负电流高频切换和功率快速波动特征,能够反映储能电池在实际调频场景下的动态运行行为^[8]。如图9所示,在频繁充放电工况下,电池电流在正负区间内快速振荡,荷电

状态在一定范围内小幅波动而不发生深度充放电,使得电池产热呈现瞬态特征,从而对热管理系统的动态响应能力提出更高要求。因此,此类高频、变倍率运行方式常被用于评估电池热管理策略在实际工况下的适应性与稳定性。

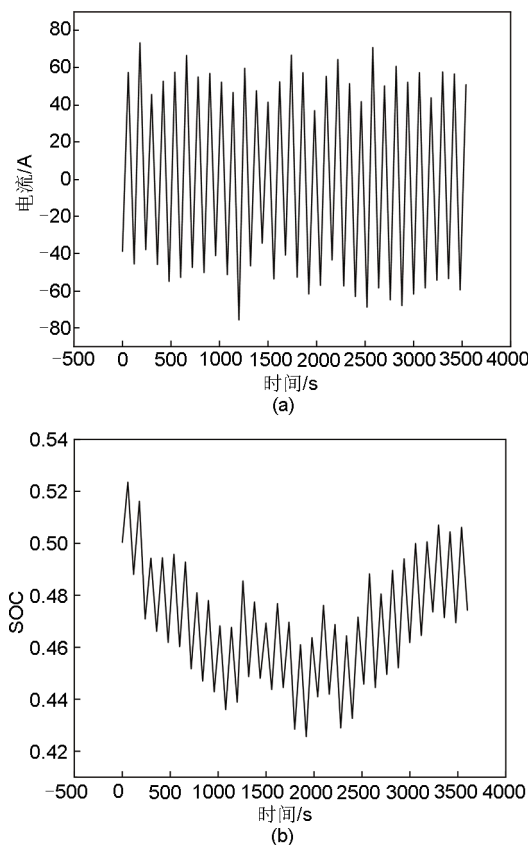


图9 频繁充放电工况:(a) 电流变化曲线;(b) SOC变化曲线

Fig. 9 Time histories of current and state of charge (SOC) under frequent charge-discharge conditions: (a) Current profile under frequent charge-discharge conditions; (b) SOC variation under frequent charge-discharge conditions

如图10所示,在频繁充放电工况下,电池产热呈现明显的瞬态特征。在仅采用空气冷却条件下,电池表面最高温度整体随时间持续上升,仿真末期最高温度达到50℃以上,且不同电池之间的温差逐渐增大,表明单一对流冷却难以有效应对频繁充放电工况下的周期性产热。引入复合相变材料后,电池温升得到明显抑制。当温度进入相变区间后,复合相变材料通过相变吸热显著降低了电池温升速率,使电池表面最高温度在主要波动阶段稳定在37~40℃范围内。在仿真末期,相比Air工况,

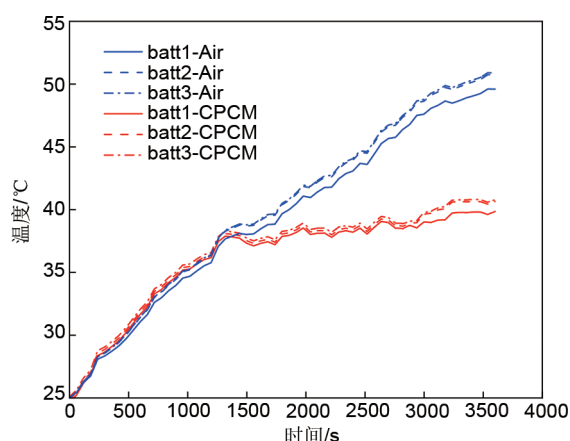


图10 频繁充放电工况下模组各电芯最高温度随时间的变化曲线

Fig. 10 Evolution of the maximum temperature of individual cells in the battery module under frequent charge-discharge conditions

CPCM 工况下电池表面最高温度降低 12~14℃, 表明复合相变材料在频繁充放电工况这种高频、变倍率运行条件下, 能够有效削峰抑制温升。

为定量表征频繁充放电工况下电池热响应的瞬态特性, 本工作引入瞬态温度波动幅值 ΔT_{fre} 作为评价指标, 选取 120 s 时间窗口^[19], 对每个时刻, 用三块电池中表面温度最高的那块作为模组代表温度 $T_{\text{max}}(t)$; 计算模组表面最高温度在窗口内的最大值与最小值之差。

$$\Delta T_{\text{fre}}(t) = \max(T_{\text{max}}) - \min(T_{\text{max}}) \quad (13)$$

图 11 展示了频繁充放电工况下瞬态温度波动幅值随时间的变化曲线。在 Air 工况下, 电池温度

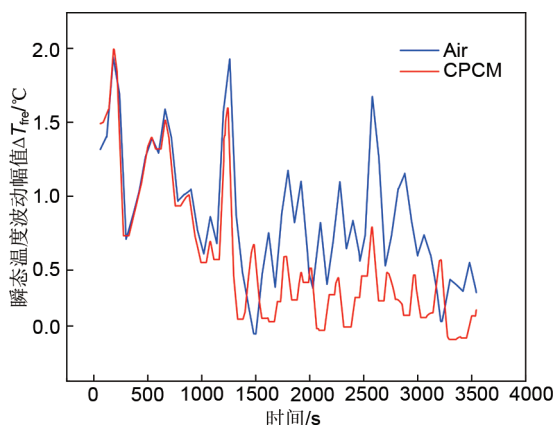


图11 频繁充放电工况下瞬态温度波动幅值随时间的变化曲线

Fig. 11 Transient temperature fluctuation amplitude versus time under the frequent charge-discharge condition

的平均瞬态波动幅值约为 0.87℃, 最大波动幅值约为 1.95℃。相比之下, 在 CPCM 工况下, 平均波动幅值降低至约 0.67℃, 较空气冷却降低约 23%, 表明复合相变材料能够有效削弱电流快速波动所引起的温度起伏。统计结果表明, 在相变阶段内, Air 工况下电池温度的平均瞬态波动幅值约为 0.74℃, 最大波动幅值约为 1.93℃; 而在 CPCM 工况下, 平均波动幅值进一步降低至约 0.48℃, 最大波动幅值约为 1.71℃。在相变温区内, 瞬态温度波动削弱幅度提高至约 36%, 这表明复合相变材料能够有效削弱电流快速波动所引起的瞬态温度起伏, 提升电池模组在高频变倍率工况下的热稳定性。

3 CPCM-电池模组热阻隔性能

为研究复合相变材料-电池模组在极端异常工况下的热响应特性, 本工作在正常运行工况的基础上进一步设置了热滥用工况。考虑到实际应用中电池过热事故往往由局部异常加热引发, 如外部热源作用或邻近电芯传热等, 本工作采用外部加热方式对第一个电芯进行定向加热, 以模拟局部热滥用条件。

当目标电芯温度达到热滥用触发阈值 160℃ 时, 在电芯体积热源中叠加反应放热项以表征副反应快速增强过程^[20]; 当温度升至上限 600℃ 后, 反应放热项被切断以避免非物理持续放热。反应放热项采用温度触发型表达式, 热源幅值参考文献[21]中磷酸铁锂电芯热滥用实验测量值进行设定。

3.1 热滥用条件下的温度响应行为

如图 12 所示, 在热滥用触发过程中, 电池模组整体温度场呈现出明显的非均匀分布特征, 高温区域主要集中于受热电芯及其相邻区域, 且随时间表现出由局部向外扩展的趋势。如图 12(a)所示, 在未设置阻隔结构的条件下, 外部加热作用于目标电芯后, 高温区域迅速在电芯内部形成, 并沿电芯厚度方向迅速蔓延, 电芯整体温度在短时间内显著升高。模拟后期, 高温区域几乎覆盖整个电芯体积, 等温线分布密集, 表明电芯内部及其与外界之间存在较大的瞬态热通量。

如图 12(b)所示, 在 CPCM 阻隔条件中, 电芯周围设置的复合相变材料层形成了热阻结构, 使得高温区域的扩展受到明显限制。热滥用触发后, 高

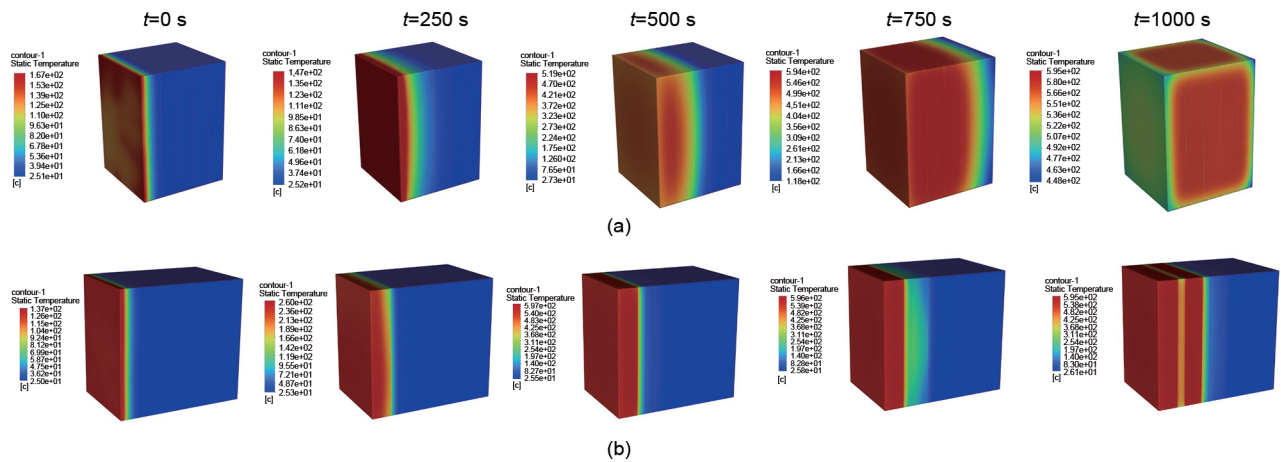


图12 热滥用下电池模组温度云图: (a) 无阻隔; (b) CPCM阻隔

Fig. 12 Temperature contours of the battery module under thermal abuse: (a) Without barrier; (b) With CPCM barrier

温区域主要发生在受热电芯内部,其向相邻电芯及模组其他区域的传播速率较为缓慢。云图中电芯与周围结构之间形成了较为清晰的温度梯度带,这表明热量在传播过程中受到了结构的阻隔作用。

3.2 热滥用条件下的温度分布特征

如图13所示,在热滥用触发条件下,各电芯的温度呈现出明显的时序性和空间差异性。图13(a)展示了在未设置阻隔结构的情况下电池模组的温升情况,电芯依次迅速升温,700 s内均达到峰值。图13(b)展示了在有CPCM阻隔的情况下电池模组的温升情况,其中, battX-1表示电池X中被施加外部热流的一侧, battX-2则为远离热流

的一侧。受外部加热影响的目标电芯(电池1)温度最先快速上升,其温度曲线在80 s内由环境温度快速提升至200℃以上,并在350~400 s时进入剧烈升温阶段,最终峰值温度达600℃。与触发电芯相邻的电芯(电池2)在250 s后才出现明显升温,其温升速率较电池1显著降低,且达到高温区间的时间明显推迟,峰值发生时间延迟了约300 s。随着距离热源位置进一步增加,电池3的热响应更为缓慢,在整个1000 s仿真周期内,其最高温度变化维持在50~150℃区间,并未进入剧烈升温阶段。而最末端电芯(电池4与5)仅缓慢升温,不存在热量快速累积的现象。电池组内电芯的最大温差达500℃以上。

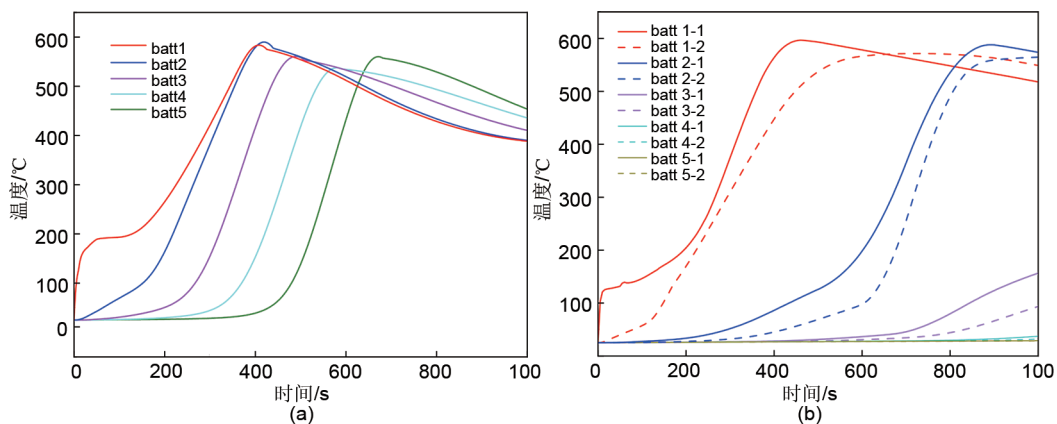


图13 热滥用下电池模组温升情况: (a) 无阻隔; (b) CPCM阻隔

Fig. 13 Temperature rise of the battery module under thermal abuse: (a) Without barrier; (b) With CPCM barrier

4 结论

本工作基于实验与数值模拟相结合的方法,研

究了石墨烯-碳化海绵/石蜡(CF-rGO/PW)复合相变材料(CPCM)在储能电池模组下的热管理性能及热安全特性,主要结论如下:

(1) 恒倍率放电下的控温与均温性能: 在 3 C 工况下, CPCM-电池模组最高温度较空气冷却降低约 15℃, 电芯最大温差由约 3.6℃ 降至 1.5℃ 以内; 在 2 C 工况下亦表现出类似趋势, 说明该 CPCM 显著抑制了电池温升并改善了温度一致性。

(2) 频繁充放电工况下的瞬态热响应: CPCM-电池模组在高频、变倍率下长时运行, 各电池最高温度保持在 40℃ 以内, 相比空气冷却降低约 15℃, 全时段平均温度波动降低约 23%, 在进入相变温区后降低程度进一步提升至 36%, 表现出 CPCM 对动态热扰动具有显著缓冲作用。

(3) 热滥用下的热传播与阻隔行为: 在局部加热触发条件下, 无阻隔结构的电池模组的高温区域迅速由触发电芯向相邻电芯扩展, 相邻电芯温度快速升温, 呈现明显的热蔓延趋势。而在 CPCM-电池模组中, 相邻电芯升温速率显著降低, 表现出显著的热蔓延抑制特性。

(4) 热滥用下的温度分布特征: 在无阻隔结构的电池模组中, 高温区域在约 700 s 内迅速由触发电芯扩展至整个模组。而在 CPCM-电池模组中, 高温仅发生在触发电芯及其相邻电芯, 相邻电芯温度峰值出现时间滞后约 300 s, 后排电芯温升不明显, 模组中电芯最大温差超过 500℃。

综上, CF-rGO/PW 复合相变材料在储能电池模组尺度下可实现温升抑制、均温改善、瞬态热扰动缓冲及热扩散延缓等多重热管理效应, 对提高储能系统的运行稳定性与安全性具有应用潜力。后续工作可进一步开展热滥用实验验证, 探索不同触发方式对热传播行为的影响。未来可结合主动散热方式开展混合热管理策略研究, 在更大规模储能系统中进行模块级验证, 为工程应用提供设计依据。

参考文献

- [1] MAMA M G, SOLAI E, CAPURSO T, et al. Comprehensive review of multi-scale lithium-ion batteries modeling: From electro-chemical dynamics up to heat transfer in battery thermal management system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 325: 119223. DOI:10.1016/j.enconman.2024.119223.
- [2] WANG G L, GU L, LI Y, et al. Optimization of guide plates and orifice plates on thermal management of battery energy storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 253: 123794. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123794.
- [3] HANNAN M A, AL-SHETWI A, BEGUM R A, et al. The value of thermal management control strategies for battery energy storage in grid decarbonization: Issues and recommendations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 124223. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124223.
- [4] YOUSSEF R, KALOGIANNIS T, BEHI H, et al. A comprehensive review of novel cooling techniques and heat transfer coolant mediums investigated for battery thermal management systems in electric vehicles[J]. *Energy Reports*, 2023, 10: 1041-1068. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.07.041.
- [5] ALI KHAN S, HUSSAIN I, THAKUR A K, et al. Advancements in battery thermal management system for fast charging/discharging applications[J]. *Energy Storage Materials*, 2024, 65: 103144. DOI:10.1016/j.ensm.2023.103144.
- [6] JIANG K, LIAO G L, E J Q, et al. Thermal management technology of power lithium-ion batteries based on the phase transition of materials: A review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101816. DOI:10.1016/j.est.2020.101816.
- [7] PAL R K, PAW J K S, GANESAN P, et al. Modeling and simulation of phase change material-based passive and hybrid thermal management systems for lithium-ion batteries: A comprehensive review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 116: 116011. DOI:10.1016/j.est.2025.116011.
- [8] JIANG G W, WEN H, PENG C Y. A novel battery thermal management based on composite phase change material with liquid-assisted cooling for different ambient temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 252: 123686. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.123686.
- [9] 罗昭顺. 双层相变材料在锂离子电池热管理系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
LUO Z S. Application of double-layer phase change material in thermal management system of lithium ion battery[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [10] ZHAO Y Z, ZHANG X L, YANG B, et al. A review of battery thermal management systems using liquid cooling and PCM[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109836. DOI: 10.1016/j.est.2023.109836.
- [11] LING Z Y, WANG F X, FANG X M, et al. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 403-409. DOI:10.1016/j.apenergy.2015.03.080.
- [12] WANG R, LIANG Z, SOURI M, et al. Numerical analysis of lithium-ion battery thermal management system using phase change material assisted by liquid cooling method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122095. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122095.
- [13] WU X H, WANG K, CHANG Z J, et al. Experimental and numerical study on hybrid battery thermal management system combining liquid cooling with phase change materials[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 139: 106480. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106480.
- [14] BORCHERS A, PIELER T. Programming pluripotent precursor cells derived from xenopus embryos to generate specific tissues and organs[J]. *Genes*, 2010, 1(3): 413-426. DOI: 10.3390/genes

- 1030413.
- [15] FAN R J, ZHENG N B, SUN Z Q. Enhanced photothermal conversion capability of melamine foam-derived carbon foam-based form-stable phase change composites[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 263: 115693. DOI:10.1016/j.enconman.2022.115693.
- [16] BÖHM K, ZINTEL S, GANNINGER P, et al. Exploring the impact of state of charge and aging on the entropy coefficient of silicon-carbon anodes[J]. *Energies*, 2024, 17(22): DOI:10.3390/en17225790.
- [17] SHI Y Y, XU B L, WANG D, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: Joint optimization for superlinear gains[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 2882-2894. DOI:10.1109/TPWRS.2017.2749512.
- [18] ZHANG Y C, ANVARI-MOGHADDAM A, PEYGHAMI S, et al. Novel frequency regulation scenarios generation method serving for battery energy storage system participating in PJM market[J]. *Energies*, 2024, 17(14): DOI:10.3390/en17143479.
- [19] WANG B Y, CHEN Z Y, ZHANG P H, et al. The lithium-ion battery temperature field prediction model based on CNN-Bi-LSTM-AM [J]. *Sustainability*, 2025, 17(5): 2125. DOI:10.3390/su17052125.
- [20] LI A, YUEN A C Y, WANG W, et al. Thermal propagation modelling of abnormal heat generation in various battery cell locations[J]. *Batteries*, 2022, 8(11): DOI:10.3390/batteries8110216.
- [21] GOLUBKOV A W, SCHEIKL S, PLANTEU R, et al. Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes-impact of state of charge and overcharge[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(70): 57171-57186.