



用于户外锂离子电池热管理的低成本柔性双模式相变材料研究

许勃文, 刘相霖, 李金宇, 孙艺萌, 孔祥飞

(河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300401)

摘要: 锂离子电池温度过高与过低均会导致性能衰减和安全隐患。柔性相变材料(PCM)具有高储热密度与良好形状适应性, 能维持电池温度稳定。但现有柔性PCM通常具有高吸收率, 难以满足户外电池全年热管理。为此, 本研究基于熔融共混法, 研制出辐射冷却PCM(PW/SEBS/ZnO), 并与常规柔性PCM(PW/SEBS/EG)自粘和, 形成柔性双模式PCM。该双模式PCM在辐射冷却侧具有0.86的高反射率, 在光热转换侧具有0.92的高吸收率, 具有172.5 J/g的高焓值, 且泄漏率低于0.85%。更重要的是, 双模式PCM成本低至21.2元/kg。进一步, 开展覆盖双模式PCM、覆盖柔性PCM、空白电池的对照实验。夏季工况, 覆盖双模式PCM的电池最高温度较空白组在充/放电过程降低了10.1°C/11.0°C, 而覆盖柔性PCM的电池最高温度升高了6.1°C/4.2°C。相应地, 覆盖双模式PCM的电池充/放容量较空白组提升3.9%/3.5%, 而覆盖柔性PCM的电池的充/放容量反而降低了2.0%/3.2%。冬季工况, 覆盖双模式PCM与覆盖柔性PCM的电池温度及性能接近。并且, 充/放电过程, 覆盖双模式PCM的电池平均温度较空白组提升了8.4°C/7.2°C, 相应的充/放容量较空白组提升19.5%/15.8%。双模式PCM为户外锂离子电池全年热管理提供有效解决方案。

关键词: 相变材料; 电池热管理; 辐射冷却; 光热转换

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0108

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-848-11

Research on low-cost flexible dual-mode PCM for thermal management of outdoor lithium-ion batteries

XU Bowen, LIU Xianglin, LI Jinyu, SUN Yimeng, KONG Xiangfei

(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Both excessively high and low temperatures in lithium-ion batteries (LIBs) can lead to performance degradation and safety hazards. Flexible phase change materials (PCMs) offer high heat storage density and good shape adaptability, which can help maintain the temperature stability of LIBs. However, existing flexible PCMs typically exhibit high absorptivity, making it difficult to meet the demands of year-round thermal management for outdoor batteries. Hence, this study developed a radiative cooling PCM (PW/SEBS/ZnO) based on a melt blending method, which was self-bonded with a conventional flexible PCM (PW/SEBS/EG) to form a flexible dual-mode PCM. The dual-mode PCM has a high reflectance of 0.86 on the radiative cooling (RC) side, a high absorptance of 0.92 on the

收稿日期: 2026-01-30; 修改稿日期: 2026-03-08。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52478086), 国家自然科学基金青年基金 (52508110), 河北省高等学校科学研究项目 (QN2025229, CXY2024026), 中央引导地方科技发展资金项目 (246Z4510G)。

第一作者: 许勃文 (1995—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为建筑热管理, E-mail: xubowen@hebut.edu.cn; 通信作者: 孔祥飞, 教授, 研究方向为建筑热能存储与调控、区域能源系统优化, E-mail: xfkong@hebut.edu.cn。

引用本文: 许勃文, 刘相霖, 李金宇, 等. 用于户外锂离子电池热管理的低成本柔性双模式相变材料研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 848-858.

Citation: XU Bowen, LIU Xianglin, LI Jinyu, et al. Research on low-cost flexible dual-mode PCM for thermal management of outdoor lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 848-858.

photothermal conversion (PC) side, a high enthalpy of 172.5 J/g, and a leakage ratio of less than 0.85%. More importantly, the cost of the dual-mode PCM is as low as 21.2 CNY/kg. Further, comparative experiments were conducted covering the dual-mode PCM, flexible PCM, and blank batteries. Under summer conditions, the maximum temperature of the battery covered with the dual-mode PCM was 10.1°C/11.0°C lower than that of the blank group during charge/discharge processes, whereas batteries covered with the flexible PCM exhibited maximum temperature increases of 6.1°C/4.2°C. Correspondingly, compared to the blank group, the charge/discharge capacity of the battery covered with the dual-mode PCM was improved by 3.9%/3.5%, while the charge/discharge capacity of the battery covered with the flexible PCM was reduced by 2.0%/3.2%. Under winter conditions, the battery temperature and performance of the dual-mode PCM and the flexible PCM were similar. Moreover, the average temperature of the battery covered with the dual-mode PCM was 8.4°C/7.2°C higher than that of the blank group, and the corresponding charge/discharge capacity was 19.5%/15.8% higher than that of the blank group. The dual-mode PCM provides an effective solution for the year-round thermal management of outdoor batteries.

Keywords: phase change material; battery thermal management; radiative cooling; photothermal conversion

锂离子电池(LIB)具有高能量密度、长循环寿命,已在建筑、汽车等领域被广泛应用^[1-2]。然而,LIB的最佳工作温度区间为20~40°C^[3-4]。偏离工作温度区间将会严重损害LIB的可靠性和安全性。例如,LIB在-10°C/-20°C下的可用能量仅为室温下的74%/60%。当环境温度低于-20°C时,LIB的使用寿命显著缩短^[5-7]。热管理技术是保障锂离子电池安全高效运行的关键^[8-9]。

对于户外LIB,难以采用主动手段降温或预热^[10],亟需被动热管理手段。相变材料(PCM)具有储热密度大、潜热段近似等温等优势^[11],可通过相变吸收/释放大热量以维持电池温度稳定,从而提升电池性能,是户外电池热管理的有效解决方案。需要指出的是,户外电池温度不仅受自身产热影响,还受外界环境,特别是太阳辐射影响。这表明用于电池热管理的PCM不仅应具备柔性以紧密贴合电池吸放热,更应在夏季反射太阳辐射,在冬季吸收太阳辐射。即用于户外LIB热管理的柔性PCM应能实现辐射冷却与光热转换的双模式切换。

现有柔性PCM通常以聚合物、交联结构、碳基多孔材料、气凝胶、相变纤维等作为柔性支撑材料^[12],以膨胀石墨^[13]、石墨烯纳米片^[14]、金属纳米颗粒^[15]等作为高导热添加剂。这导致常规柔性对太阳辐射的吸收率较高^[16-17]。例如,Kong等^[18]研制了

一种基于石蜡(PW)/热塑性弹性体(SEBS)/碳纳米管(CNT)的柔性相变材料,具有96.2%的光热转化能力。Yang等^[19]采用羟基氮化硼纳米片/氧化铜/聚乙二醇制备了柔性相变复合材料,光热转化效率达91.8%。高太阳辐射吸收率的柔性PCM会在夏季吸收太阳能升温,反而导致电池无法散热,造成安全隐患。针对柔性PCM在夏季高吸收率导致过热的问题,研究者开发了同时具备辐射冷却与光热转换功能的双模式柔性PCM。Liu等^[20]研制的双模式PCM通过翻转实现模式切换,制冷模式下可实现14.2°C的亚环境温度降,制热模式下升温达14.9°C。Kong等^[21]开发的柔性PCM兼具光热转换与辐射冷却双功能,焓值高达208.7 J/g。然而,这类一体化设计仍面临显著挑战。首先,辐射冷却层通常需要精密微纳结构以实现高太阳反射率和高红外发射率。其制备依赖静电纺丝、旋涂等复杂技术^[22],对设备和工艺控制要求高。其次,辐射冷却涂层的原材料较为昂贵,如原料聚二甲基硅氧烷(PDMS)成本高达500元/kg^[23]。尽管采用熔融共混法将PCM与反射填料复合的工艺简便,但现有材料的太阳反射率普遍偏低(0.4~0.6)^[24-25],难以满足夏季隔热需求。纳米氧化锌等氧化物可通过其尺寸与高折射率实现高效、广谱的光散射,进而反射绝大部分太阳辐射^[26]。但目前研究很少将纳米氧化物与PCM直

接复合以提升PCM反射率。

为此,本研究基于熔融共混法,研制出辐射冷却PCM(PW/SEBS/ZnO),并与光热转换PCM(PW/SEBS/EG)自粘和,形成柔性双模式PCM。该双模式PCM在辐射冷却侧具有0.86的高反射率,在光热转换侧具有0.92的高吸收率。更重要的是,双模式PCM成本低至21.2元/kg,与常规柔性PCM持平。进一步,开展对照实验,以验证双模式PCM的全年户外LIB热管理效果。

1 方法

1.1 双模式相变材料制备

双模式PCM一侧辐射冷却,一侧光热转换。其中,辐射冷却侧以石蜡(PW)为储热材料,以苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯(SEBS)为支撑骨架,以纳米氧化锌(ZnO)为提升太阳反射率的添加剂。光热转换侧同样采用PW和SEBS,并以膨胀石墨(EG)作为提升太阳吸收率的添加剂。所有原料均未经纯化直接使用,具体信息见表1。

如图1所示,双模式PCM具体制备过程如下:

(1) 将称量好的SEBS和PW置于烧杯,120℃油浴中加热,持续搅拌下形成均匀透明SEBS/PW。

(2) 将ZnO纳米颗粒加入SEBS/PW中,油浴搅拌2小时后,放置在模具并转移至真空干燥箱以去除表面气泡。

(3) 将EG颗粒加入SEBS/PW中,油浴搅拌

表1 材料的属性、成本和来源

Table 1 Properties, costs and sources of materials

材料	属性	成本	来源
苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯(SEBS)	—	15元/kg	科腾聚合物有限公司(美国)
石蜡(PW)	相变点 28℃	23元/kg	鼎辉控股(广州)有限公司
氧化锌(ZnO)	粒径 200 nm	23元/kg	佛山威讯达新材料科技有限公司
膨胀石墨(EG)	粒径 325 目	4元/kg	莱西鑫碳源商务区

2小时后,放置在模具并转移至真空干燥箱以去除表面气泡。

(4) 将干燥后的SEBS/PW/ZnO平铺在SEBS/PW/EG表面,由于两者具有相同的SEBS/PW基体,在热作用下发生分子链相互扩散与物理交联网络的重建,从而使两者自粘合得到双模式PCM。

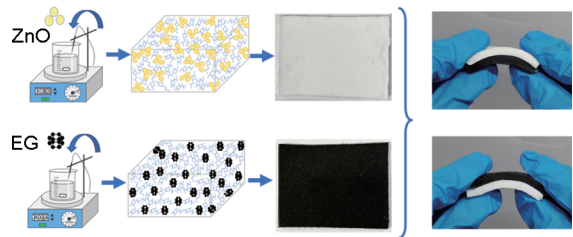


图1 双模式PCM的制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart of dual-mode PCM

1.2 材料性能表征

对双模式PCM的形貌、光学和热学性能进行了系统表征。各项测试所用仪器如表2所示。

表2 材料表征所用仪器

Table 2 Instruments for material characterization

测试类别	测试项目	设备型号与名称
形貌分析	微观形态	场发射扫描电子显微镜(SEM, JSM 7610F, 东京电子有限公司)
	反射率	紫外-可见-近红外分光光度计(UH5700, 日立)
光学性能	发射率	傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, VERTEX 80V, 布鲁克公司)
	吸收率	紫外-可见-近红外分光光度计(UH5700, 日立)
热学性能	热导率	热导率测试仪(南京大展机电技术研究所)
	相变点/焓值	差示扫描量热仪(DSC 25, 泰仪器公司)
	热稳定性	热重分析仪(TGA, 梅特勒托利多 TGA/DSC3+, 瑞士)

双模式PCM的反射率通过式(1)计算。

$$\bar{R}_{\text{sun}} = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sun}}(\lambda) \cdot R_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

其中, λ 为波长, $R_{\text{sun}}(\lambda)$ 为双模式PCM的反

射率, $I_{\text{sun}}(\lambda)$ 为AM 1.5全球太阳光谱。

双模式PCM的吸收率通过式(2)计算。

$$\bar{A}_{\text{sun}} = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sun}}(\lambda) \cdot [1 - R_{\text{sun}}(\lambda)] d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

其中, λ 为波长, $A_{\text{sun}}(\lambda)$ 为双模式 PCM 的吸收率, $I_{\text{sun}}(\lambda)$ 为 AM 1.5 全球太阳光谱。

双模式 PCM 的发射率通过式(3)和(4)计算。

$$\bar{E}_{\text{TIR}} = \frac{\int_{8\mu\text{m}}^{13\mu\text{m}} I_{\text{B}}(\lambda, T) \cdot [1 - R_{\text{TIR}}(\lambda)] d\lambda}{\int_{8\mu\text{m}}^{13\mu\text{m}} I_{\text{B}}(\lambda, T) d\lambda} \quad (3)$$

$$I_{\text{B}}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T} - 1)} \quad (4)$$

其中, $I_{\text{B}}(\lambda, T)$ 是温度为 T 的黑体辐射, $R_{\text{TIR}}(\lambda)$ 是大气窗口中双模式 PCM 的反射率, λ 是波长, h 是普朗克常数, K 是玻尔兹曼常数。

双模式 PCM 的焓值通过式(5)计算。

$$H = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot h_i) \quad (5)$$

其中, w_i 为第 i 层材料的质量分数; h_i 为第 i 层材料的焓值, J/g。

双模式 PCM 的热导率通过式(6)和(7)计算。

$$k = \frac{R_{\text{D-PCM}}}{D} \quad (6)$$

$$R = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{k_i} \right) \quad (7)$$

其中, $R_{\text{D-PCM}}$ 为双模 PCM 的热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; D 为双模 PCM 的厚度, m; d_i 为第 i 层材料的厚度, m; k_i 为第 i 层材料的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

$$C_0 = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot p_i) \quad (8)$$

$$C'_0 = \frac{1}{C_0} \quad (9)$$

其中, C_0 为双模式 PCM 的单位质量成本, 元/kg; w_i 为第 i 组分的质量分数; p_i 为第 i 种成分的价格, 元/kg; C'_0 是双模式 PCM 的单位成本质量, kg/元。

1.3 实验设置

本实验旨在验证双模式 PCM 相较常规柔性 PCM 对户外 LIB 热管理的效果。为此, 实验设置覆盖双模式 PCM 电池、覆盖柔性 PCM 电池、空白电池三个实验组, 开展夏季/冬季工况电池充电和放电实验。考虑到之前研究通常在柔性 PCM 中添加高导热高吸收材料, 柔性 PCM 采用与双模式 PCM 光热侧配比一致的 PW/SEBS/EG。两种 PCM 的厚度均为 1 cm。夏季工况实验在环境舱中进行, 光照强度和环境温度分别设置为 759.3 W/m^2 [27] 和 33.9°C [28]。冬季工况实验在温度设置为 -7.0°C 的冰箱中进行 [26], 光照强度设置为 470.6 W/m^2 [28]。采用

安装滤光片的氙灯模拟太阳光谱。电池与相变材料的初始温度为 20°C 。

实验原理如图 2(a) 所示。在夏季工况下, 双模式 PCM 的辐射冷却侧朝外以反射太阳辐射和发射红外辐射实现被动降温; 在冬季工况下, 光热转换侧朝外以吸收太阳辐射加热电池。在电池上侧表面布置 3 个热电偶, 分别标记为上、中、下, 并设置热电偶记录环境温度。实验平台搭建如图 2(b) 所示。实验平台由氙灯、环境舱、冰箱、电池测试系统 (CTS-5V30A/8H, 广东东莞科信电子科技有限公司)、数据记录仪 (安捷伦 34972, 精度: $\pm 0.1\%$)、照度仪、热电偶和计算机组成。充电过程以 3 A 恒流充电至截止电压 3.75 V 后转为恒压充电至电流降至 0.3 A; 放电过程以 3 A 电流放电至截止电压 2.5 V; 充放电方法与单独充、放电方法一致, 充、放电之间搁置 5 min 以平衡电位。电池具体参数如表 3 所示。

电池能量 (U) 由公式(10)得出:

$$U = \int_0^{Q_{\text{tot}}} V dQ \quad (10)$$

式中, Q 和 V 分别为实时容量和电池电压, Q_{tot} 为总的电池容量。

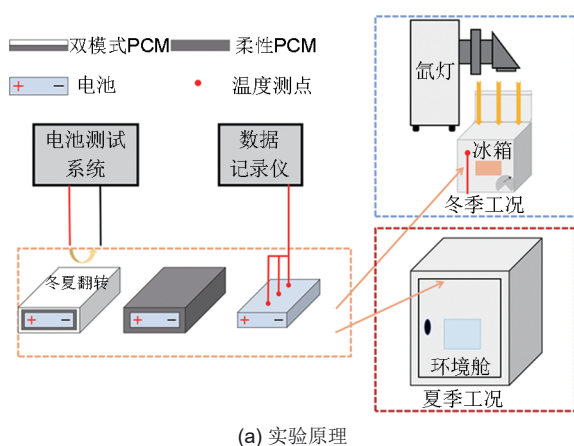
此外, 在开展电池充/放电实验前, 对电池进行了容量标定实验, 以确保电池量与电池交付规格书一致。采用 1C 的电流倍率对电池循环充放电 3 次, 取平均值作为电池的实测容量。标定实验的电流与电压曲线如图 2、图 3 所示。依据公式(10), 计算出电池平均充电容量为 2995 mAh, 与电池额定容量仅相差 0.17%, 证明实验所采用锂离子电池的标定参数可靠准确。

2 结果和讨论

2.1 材料表征结果

2.1.1 微观与宏观表征

为体现添加 ZnO 和 EG 后的 PCM 的外观/微观变化, 对 PW/SEBS 也进行表征。如图 4(a) 所示, 其外观呈现透明态, 微观结构表明 PW 与 SEBS 紧密融合。图 4(b) 展示了 PW/SEBS 在添加 ZnO 后的宏观与微观图像。可以发现, PW/SEBS 在添加 ZnO 后, 外观由透明变为白色。其微观图像显示, 纳米 ZnO 颗粒分布在 PW/SEBS 周围。这些分散的纳米 ZnO 颗粒引发米氏散射效应, 有助于增强太阳



(a) Experimental principle



(b) Summer experimental platform



(c) Winter experimental platform

图2 双模式PCM应用于电池热管理实验
Fig. 2 Application of dual-mode PCM in battery thermal management experiment

辐射的反射能力。此外,如图4(c)所示,PW/SEBS在添加EG后,表面呈现黑色。同时,EG颗粒分

表3 锂离子电池参数

Table 3 Lithium battery parameters

属性	参数
长/宽/高/mm	130/80/3
重量/kg	55
额定容量/mAh	3000
最大充放电倍率/C	2
标准电压/V	3.2
截止充电电压/V	3.65
截止放电电压/V	2.5
室温下内部电阻/mΩ	3

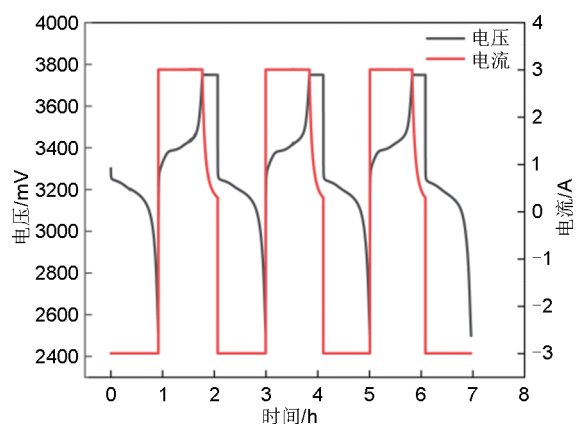


图3 标定实验的电流/电压曲线

Fig. 3 The current/voltage curve of the calibration experiment

散在周围,能够显著增强材料对太阳辐射的吸收能力。

2.1.2 光学参数表征

图5(a)展示了SEBS/PW添加了5%氧化锌后的反射率变化。可以发现,加入氧化锌后,SEBS/PW/ZnO在紫外线波段的反射率略微下降,但在可见光与近红外波段的反射率显著提升。这表明添加纳米氧化锌能有效提升SEBS/PW的反射率。图5(b)展示了0~20%氧化锌的反射率。可以发现,SEBS/PW/ZnO的反射率随氧化锌含量增加而先增后减。当氧化锌含量从0增加到12.5%时,反射率从0.48提升至0.86。继续增加氧化锌含量至20%,反射率反而下降至0.83。这可能是因为纳米氧化锌的积聚导致米氏散射效应失效。从提升反射率的角度,氧化锌含量为12.5%的SEBS/PW/ZnO被采用。

图6(a)展示了添加5%EG的PCM吸收率对比。可以发现,加入EG后,SEBS/PW在整个300~2500 nm波段的吸收率都大幅上升。这表明添加

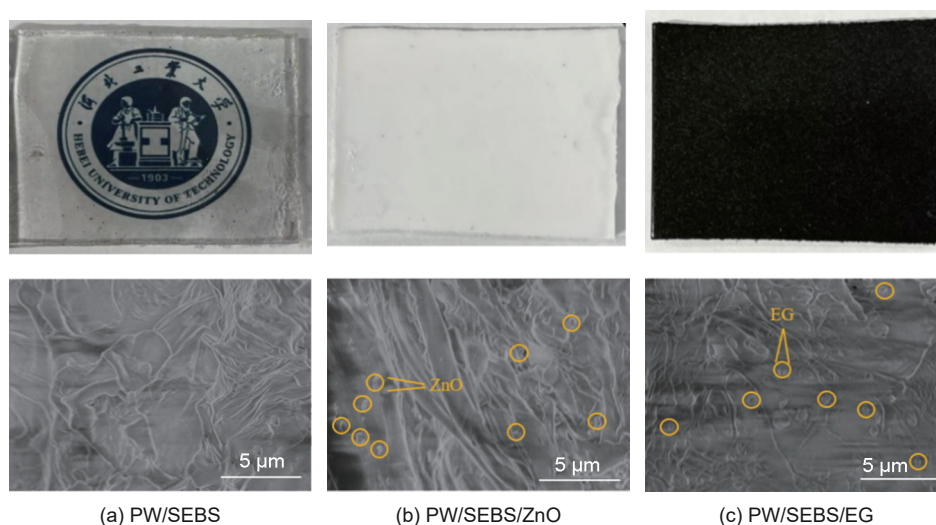


图4 双模式PCM的宏观和微观图像

Fig. 4 Macroscopic and microscopic images of dual-mode PCM

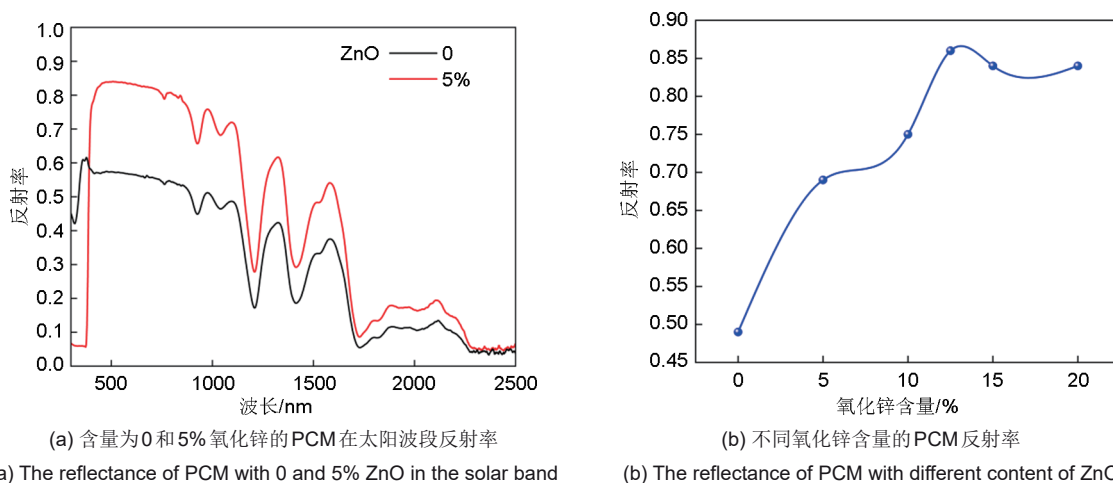
(a) 含量为0和5%氧化锌的PCM在太阳波段反射率
(a) The reflectance of PCM with 0 and 5% ZnO in the solar band(b) 不同氧化锌含量的PCM反射率
(b) The reflectance of PCM with different content of ZnO

图5 双模式PCM在辐射冷却侧的反射率

Fig. 5 Reflectance of dual-mode PCM on the radiation cooling side

EG能有效提升SEBS/PW的吸收率。图6(b)展示了0~10%EG的吸收率。可以发现, SEBS/PW/EG的吸收率随EG含量增加而先增加后趋于稳定。当EG含量达到2.5%时, 吸收率达到0.92。继续增加EG含量至10%, 吸收率的提升幅度仅为0.01。这可能是因为膨胀石墨在基体中已形成完整的光吸收网络, 对太阳辐射的吸收趋于饱和, 进一步提升含量对吸收率的增益不再显著。考虑到继续增加膨胀石墨对吸收率的提升较小但会造成焓值下降, 因而采用2.5%EG的SEBS/PW/EG。

基于上述分析, 本研究双模式PCM辐射冷却侧采用12.5%ZnO, 光热转换侧采用2.5%EG, 对应的发射率见图7。双模式PCM辐射冷却侧的发射

率为0.89, 光热转换侧的发射率为0.92。

此外, 双模式PCM的成本为21.2元/kg, 低于原材料石蜡的成本(23元/kg)。这是因为添加剂纳米氧化锌与膨胀石墨的价格低廉。

2.1.3 热学参数表征

图8(a)展示了PW/SEBS/ZnO与PW/SEBS/EG的DSC曲线。PW/SEBS/ZnO与PW/SEBS/EG的焓值分别是160.8 J/g和184.1 J/g。所制备的双模式PCM采用厚度相同的PW/SEBS/ZnO与PW/SEBS/EG自粘合形成, 焓值计算可得为172.5 J/g。这表明双模式PCM具有优异的储热能力。可以看出, 在PW/SEBS中加入氧化锌或膨胀石墨后熔化起止点和凝固起止点的变化较小。具体

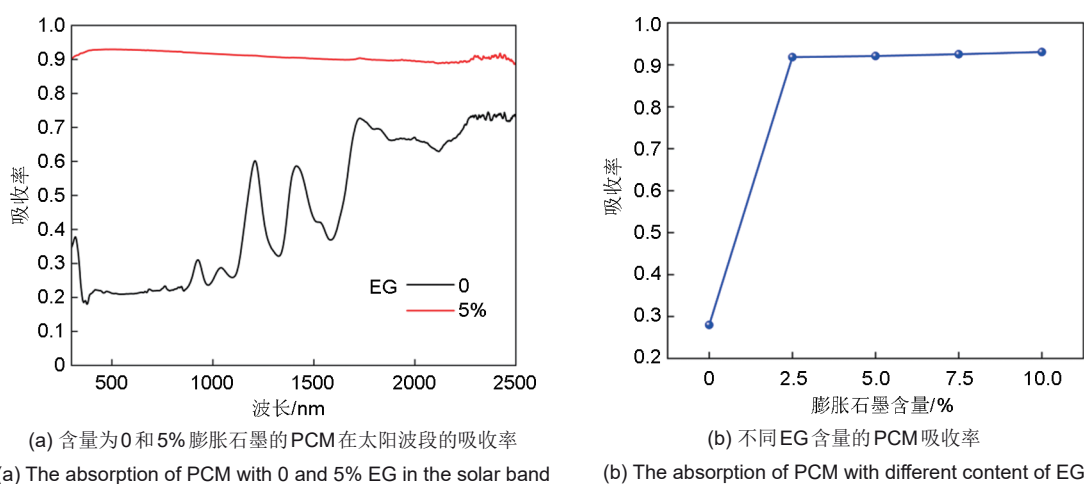


图6 双模式PCM的吸收率变化

Fig. 6 Absorption variations of dual-mode PCM

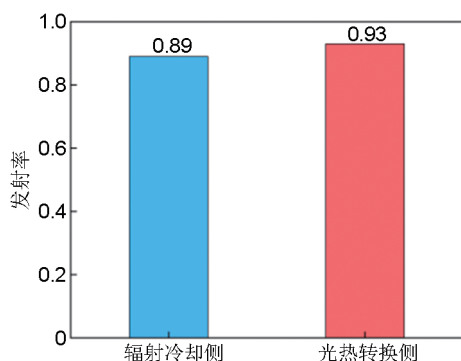


图7 双模式PCM的发射率

Fig. 7 Emissivity of dual-mode PCM

的相变点在表4列出。

如图8(b)所示, PW/SEBS, PW/SEBS/ZnO与PW/SEBS/EG的热导率分别是0.37 W/(m·K),

表4 RC-PCM与PC-PCM的相变点

Table 4 The phase transition points of RC-PCM and PC-PCM

样品	熔化/ $^{\circ}\text{C}$		凝固/ $^{\circ}\text{C}$	
	开始	结束	开始	结束
PW/SEBS	24.56	31.72	23.96	18.23
PW/SEBS/ZnO	27.16	31.51	22.84	17.65
PW/SEBS/EG	25.94	31.37	24.51	19.19

0.42 W/(m·K), 0.46 W/(m·K)。可以发现, 添加氧化锌或膨胀石墨可以提高PW/SEBS的热导率。这是因为填料在基体中形成了有效的热传导网络, 降低了界面热阻, 使复合材料整体导热性能得到提升。此外, 基于热导率公式, 双模式PCM的热导率为0.44 W/(m·K)。

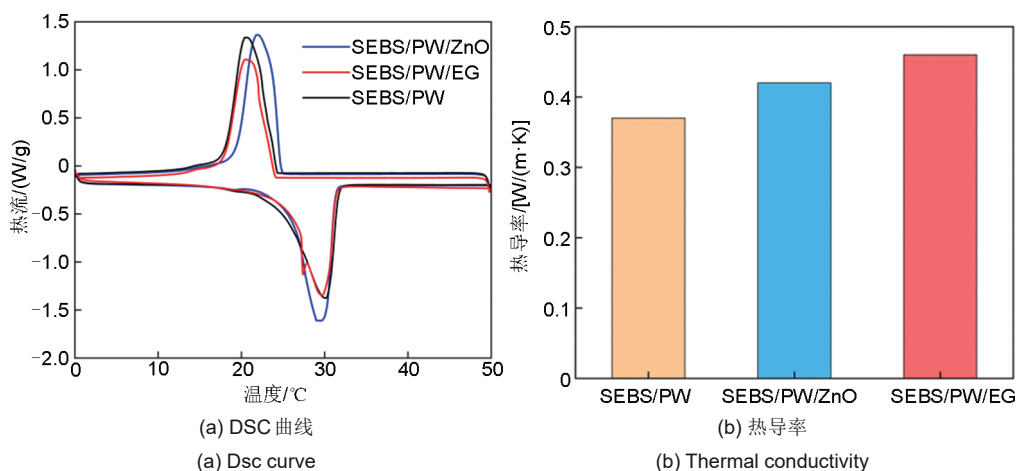


图8 双模式PCM的热学性能

Fig. 8 Thermal performance of dual-mode PCM

2.1.4 稳定性测试

图9展示了双模式PCM分别在辐射冷却侧朝下和光热转换侧朝下两种模式下的泄漏情况。将加热台温度设定为50℃, 持续加热16分钟后, 该双模式相变材料未出现明显泄漏, 形态也无显著变化。这一现象归因于SEBS作为其骨架支撑相, 可有效抑制石蜡的泄漏行为。双模式相变材料在辐射冷却侧朝下和光热转换侧朝下的泄漏率依次为0.85%和0.82%, 极为接近。

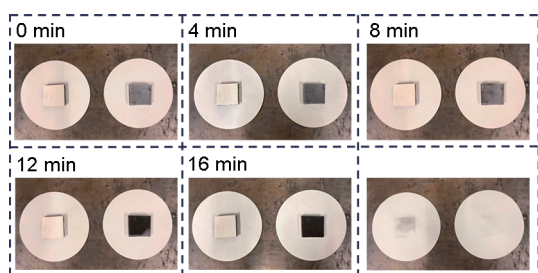


图9 双模式PCM的泄漏测试
Fig. 9 Leakage test of dualmode PCM

图10展示了SEBS/PW/ZnO和SEBS/PW/EG的热重分析曲线。两种材料的初始分解温度均为120℃, 在260℃左右均出现约70%的质量损失, 并在475℃时完全分解。由于相变材料的实际工作温度远低于其初始分解温度, 表明双模式PCM具备良好的热稳定性。

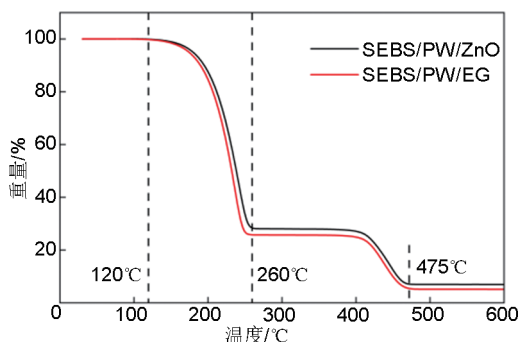
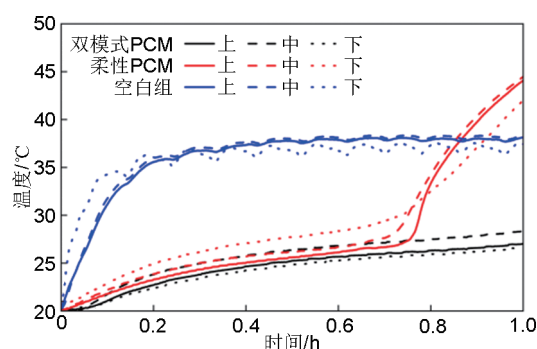


图10 SEBS/PW/ZnO和SEBS/PW/EG的热重曲线
Fig. 10 Thermogravimetric curves of SEBS/PW/ZnO and SEBS/PW/EG

2.2 夏季工况实验

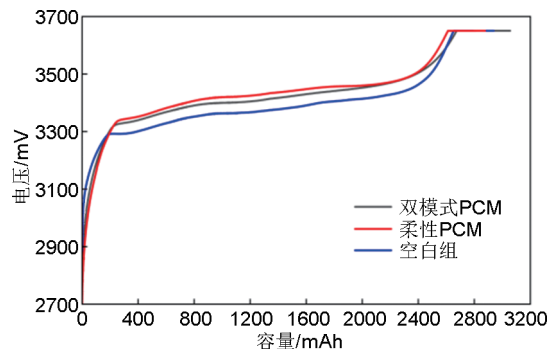
图11(a)为电池在夏季工况下充电过程的温度曲线。覆盖双模式PCM的电池升温远比空白组缓慢。双模式PCM最高温度仅28.3℃, 较空白组电池最高温度降低了10.1℃。这是因为双模式PCM的辐射冷却侧反射大部分太阳能, 并将潜热蓄存得

热, 从而抑制电池温度上升。相反, 覆盖柔性PCM的电池温度虽初始升温缓慢, 但在完全熔化后快速升温, 最高温度较空白组升高了6.1℃。这是因为柔性PCM对太阳光高吸收, 加剧了电池得热。图11(b)为电池在夏季工况下充电的容量-电压曲线。所有电池电压呈现先急速上升, 随后稳步上升, 最后维持恒定的趋势。由于覆盖双模式PCM的电池处于15~35℃的最佳工作温度区间^[29], 充电容量较空白组提高3.9%。而覆盖柔性PCM的电池最高温度达44.5℃, 导致电池较快进入截止电压并开始恒压充电, 限制了充电潜力, 其充电容量相较空白组降低2.0%。



(a) 温度曲线

(a) Temperature curve



(b) 容量-电压曲线

(b) Capacity-voltage curve

图11 夏季充电工况
Fig. 11 Charging conditions in summer

图12(a)为电池在夏季工况下放电过程温度曲线。覆盖双模式PCM的电池较空白组升温缓慢, 其最高温度仅27.2℃, 较空白组电池最高温度降低了11.0℃。相反, 覆盖柔性PCM的电池最高温度达42.5℃, 较空白组升高了4.2℃。图12(b)为电池在夏季工况下放电的容量-电压曲线。所有电池电压呈现先急速下降, 随后稳步下降, 最后快速下降

的趋势。覆盖双模式PCM的电池处于最佳工作温度,放电容量为2955.6 mAh,较空白组提高3.5%。而覆盖柔性PCM的电池最高温度超过最佳工作温度,放电容量为2759.4 mAh,较空白组降低3.2%。

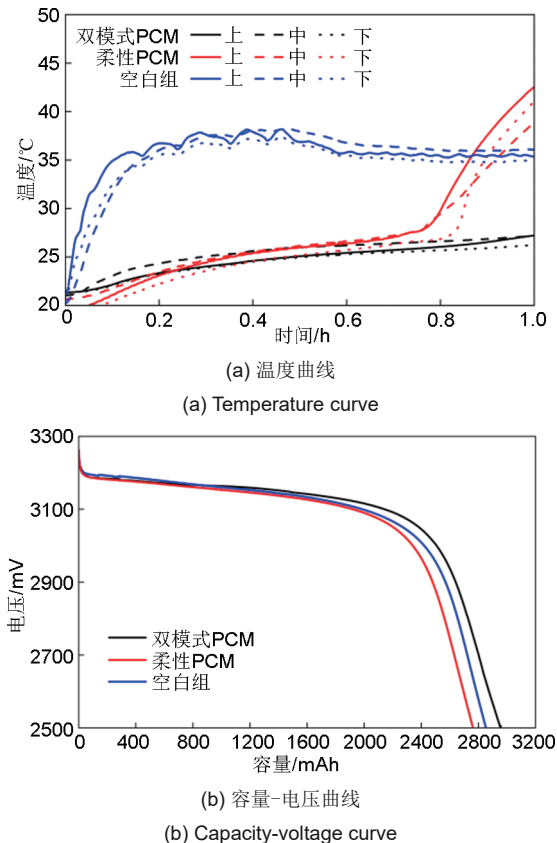


图12 夏季放电工况
Fig. 12 Discharging conditions in summer

2.3 冬季工况实验

图13(a)为电池在冬季工况下充电过程温度曲线。可以发现,覆盖双模式PCM与覆盖柔性PCM的电池均缓慢升温,二者平均温差仅0.3℃。这是因为双模式PCM光热侧与柔性PCM的吸收率一致且较高。相反,空白组电池温度迅速下降。双模式PCM平均温度为22.6℃,较空白组电池平均温度高8.4℃。图13(b)为电池在冬季工况下充电的容量-电压曲线。由于覆盖双模式PCM与覆盖柔性PCM的电池温度相近,其充电容量仅相差1.4%。而双模式PCM电池充电容量较空白组提高19.5%。这是因为空白组温度较低,电池内阻和极化电压较大,限制了充电潜力。

图14(a)为电池在冬季工况下放电过程温度曲

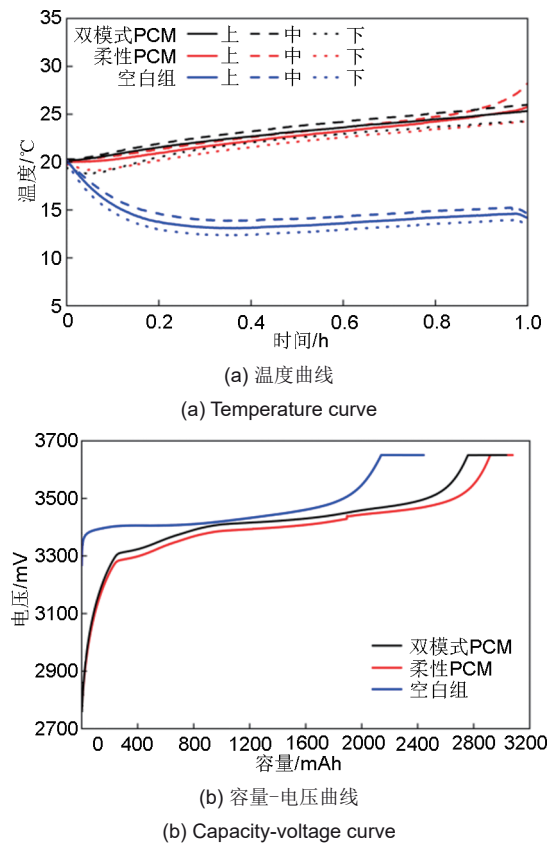


图13 冬季充电工况
Fig. 13 Charging conditions in winter

线。覆盖双模式PCM与覆盖柔性PCM的电池均缓慢升温,二者平均温差仅0.2℃。相反,空白组电池温度迅速下降。双模式PCM平均温度为22.6℃,较空白组电池平均温度高7.2℃。图14(b)为电池在冬季工况下放电的容量-电压曲线。由于覆盖双模式PCM与覆盖柔性PCM的电池温度相近,相应放电容量分别为2977.5 mAh与2988.4 mAh,仅相差0.4%。而双模式PCM电池放电容量较空白组提高15.8%。

本研究仍存在一些局限性。双模式柔性PCM的导热系数测得为0.44 W/(m·K),相对主流导热材料仍偏低。在电池高倍率充放电产生大量热量时,可能会限制电池散热,影响电池组温度均匀性。未来的工作将提升双模式柔性PCM的导热性能,并评估其阻燃特性及在热失控防护中的实际效果。

3 结论

双模式柔性PCM夏季辐射冷却,冬季光热转换,可全年户外电池热管理,但制备工艺复杂且成

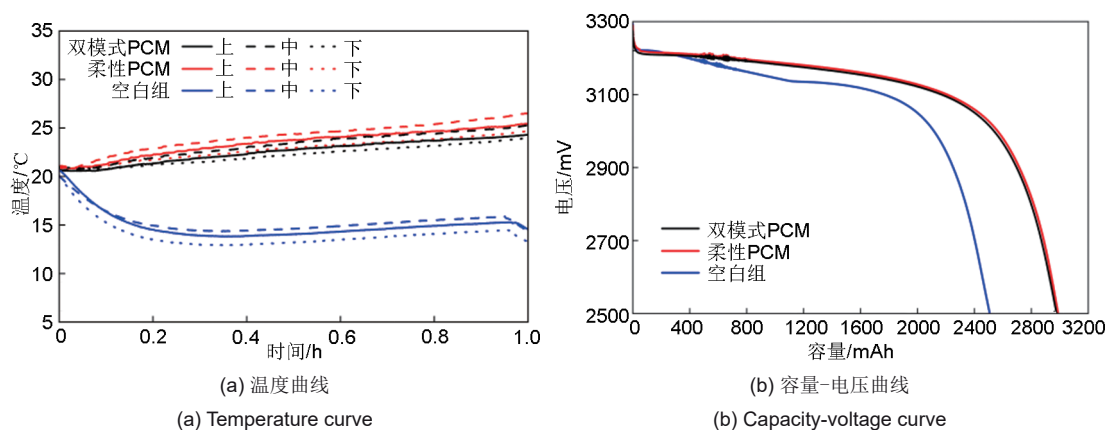


图14 冬季放电工况

Fig. 14 Discharging conditions in winter

本高。为此,本研究基于熔融共混法,制备出一种低成本、可规模化生产的双模式柔性PCM。其一侧为PW/SEBS/ZnO,用于辐射冷却;另一侧为PW/SEBS/EG,用于光热转换。通过与常规柔性PCM的对比实验,验证了双模式PCM的全年电池热管理效果,主要结论如下:

(1) 在PCM中添加纳米氧化锌可显著提升其在可见光与近红外光波段的反射率。当氧化锌含量从0增加至12.5%时,PCM反射率从0.48提升至0.86。此外,氧化锌含量增加至20%,PCM的反射率降低至0.83。这可能是因为过量纳米氧化锌聚积限制其Mie散射作用。

(2) 双模式PCM在辐射冷却侧的反射率0.86,发射率0.88;在光热转换侧的吸收率0.92。此外,双模式PCM具有172.5 J/g的高焓值,0.44 W/(m·K)的热导率,两侧泄漏率低至0.85%,形状适应性良好。更重要的是,双模式PCM制备工艺简单,成本仅21.2元/kg,低于原材料石蜡。

(3) 夏季工况,覆盖双模式的PCM电池在充/放电过程最高温度较空白组降低了10.1℃/11.0℃,而覆盖柔性PCM的电池最高温度较空白组升高了6.1℃/4.2℃。这是因为双模式PCM反射太阳辐射抑制电池升温,而柔性PCM因其高太阳吸收率反而加快电池升温。相应地,覆盖双模式PCM电池充/放电容量较空白组提升3.9%/3.5%,而覆盖柔性PCM的电池的充/放电容量反而降低了2.0%/3.2%。

(4) 冬季工况,双模式PCM可有效提高电池表面温度以改善电池充放电性能。充/放电过程,覆盖双模式PCM的电池平均温度较空白组提升了

8.4℃/7.2℃,相应的充/放电容量较空白组提升了19.5%/15.8%。此外,由于双模式PCM光热侧与柔性PCM的吸收率一致,电池温度与性能接近。

综上,本研究双模式PCM可全年改善户外电池性能,而常规柔性PCM在夏季会对户外电池性能造成负面影响。且双模式PCM较常规柔性PCM无成本增加,是户外电池热管理的有效技术方案。

参考文献

- [1] 章正哲,张恒运. 基于高效液冷技术的锂离子电池热管理研究进展[J]. 电源技术, 2025, 49(1): 14-25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2025.01.002.
- ZHANG Z Z, ZHANG H Y. Review on the thermal management of lithium ion batteries based on energy-efficient liquid cooling techniques[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(1): 14-25. DOI:10.3969/j.issn.1002-087X.2025.01.002.
- [2] 刘邦金,汪林威,吴月月,等. 锂离子电池热管理研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(12):4413-4431. DOI:10.11949/0438-1157.20240376.
- LIU B J, WANG L W, WU Y Y, et al. Advances in thermal management of lithium-ion batteries[J]. CIESC Journal, 2024, 75(12): 4413-4431. DOI:10.11949/0438-1157.20240376.
- [3] 潘涵婷,徐洪涛,许多,等. 低温条件下基于相变材料的锂离子电池保温特性分析[J]. 化工进展, 2024, 43(8): 4333-4341. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1185.
- PAN H T, XU H T, XU D, et al. Analysis of thermal insulation characteristics of lithium-ion batteries based on phase change materials under low temperature[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(8): 4333-4341. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1185.
- [4] TRIPATHI P M, MARCONNET A M. Effect of immersion cooling parameters on thermal and electrochemical response of a Li-ion cell[J]. Journal of Power Sources, 2025, 632: 236285. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.236285.
- [5] CHEN K, LUO J Y, HUANG Y Q. Impact of low temperature exposure on lithium-ion batteries: A multi-scale study of performance degradation, predictive signals and underlying mechanisms[J].

- Chemical Engineering Journal, 2025, 503: 158260. DOI: 10.1016/j.cej.2024.158260.
- [6] LI Z H, YAO N, YU L G, et al. Inhibiting gas generation to achieve ultralong-lifespan lithium-ion batteries at low temperatures[J]. Matter, 2023, 6(7): 2274-2292. DOI:10.1016/j.matt.2023.04.012.
- [7] 文楠, 周飞, 徐晓斌, 等. 电动车用锂离子电池组外部加热技术进展[J]. 电源技术, 2025, 49(2): 281-291. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2025.02.004.
- WEN N, ZHOU F, XU X B, et al. Progress of external heating technologies for lithium-ion battery packs for electric vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(2): 281-291. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2025.02.004.
- [8] 唐可鉴, 郑晓东, 刘永超, 等. 相变材料基混合电池热管理系统研究进展[J]. 金属功能材料, 2025, 32(4): 32-41.
- TANG K J, ZHENG X D, LIU Y C, et al. Research progress of phase change material-based hybrid battery thermal management system[J]. Metallic Functional Materials, 2025, 32(4): 32-41.
- [9] 刘仙鹤, 韩涛, 张飘飘, 等. 锂离子动力电池热管理技术研究综述[J/OL]. 电池工业, 1-10 [2025-12-26]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1448.TM.20250324.1828.004>.
- LIU X H, HAN T, ZHANG P P, et al. Review on thermal management technology of lithium-ion power battery[J/OL]. Chinese Battery Industry, 1-10 [2025-12-26]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1448.TM.20250324.1828.004>.
- [10] DILEEP H, DHANALAKOTA P, MAHAPATRA P S, et al. Performance assessment of a novel localized cooling system for battery thermal management at high ambient conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 266: 125756. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.125756.
- [11] 张新宇, 罗声豪, 吴颖欣, 等. 复合相变材料用于锂离子电池热管理和热失控防护研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(3): 1040-1053.
- ZHANG X Y, LUO S H, WU Y X, et al. Research progress of composite phase change materials for thermal management and thermal runaway protection of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(3): 1040-1053.
- [12] 董润锬, 师文钊, 刘瑾姝, 等. 柔性相变复合材料及其应用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(1): 179-190. DOI:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0003.
- DONG J K, SHI W Z, LIU J S, et al. Progress in flexible phase change composites and the applications[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(1): 179-190. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0003.
- [13] 程寒, 唐波, 包华阳, 等. 改善储能石蜡基相变材料导热性能研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(4): 45-50.
- CHENG H, TANG B, BAO H Y, et al. Research progress on improving the thermal conductivity of energy storage paraffin-based phase change materials[J]. New Chemical Materials, 2025, 53(4): 45-50.
- [14] BHARATHIRAJA R, RAMKUMAR T, SELVAKUMAR M, et al. Thermal characteristics enhancement of Paraffin Wax Phase Change Material (PCM) for thermal storage applications[J]. Renewable Energy, 2024, 222: 119986. DOI: 10.1016/j.renene.2024.119986.
- [15] MANOJ KUMAR P, SUDARVIZHI D, STALIN P M J, et al. Thermal characteristics analysis of a phase change material under the influence of nanoparticles[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 7876-7880. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.505.
- [16] CHEN X, LIN J J, FENG Y H, et al. Carbon-metal network boosting photon/phonon transport in photothermal phase change materials[J]. Carbon, 2025, 238: 120192. DOI: 10.1016/j.carbon.2025.120192.
- [17] LIN J H, OUYANG Y X, CHEN L, et al. Enhancing the solar absorption capacity of expanded graphite-paraffin wax composite phase change materials by introducing carbon nanotubes additives[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 30: 101871. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.101871.
- [18] KONG X F, LIU X, YUAN J J, et al. Composite phase change materials with thermal-flexible and efficient photothermal conversion properties for solar thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 78: 110027. DOI:10.1016/j.est.2023.110027.
- [19] YANG H Z, HE L L, LIU R, et al. Ultralight and flexible carbon-based phase change composites with high porosity for enhanced shape memory and photothermal conversion performance[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 244: 111816. DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111816.
- [20] LIU W W, DONG Y M, LI M Y, et al. Weather-adaptive Janus aerogel integrated with phase change materials enables dual-mode thermal regulation via radiative cooling and solar heating[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(7): e13665. DOI: 10.1002/adfm.202513665.
- [21] KONG X F, CUI B C, ZHAO Y K, et al. A novel flexible dual-mode phase change material for year-round energy saving[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 124: 116912. DOI: 10.1016/j.est.2025.116912.
- [22] 赵卓, 张健, 侯爱军, 等. 柔性辐射冷却材料设计与应用进展[J/OL]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 1-7[2025-12-26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5848.N.20251015.1101.002>.
- ZHAO Z, ZHANG J, HOU A J, et al. Design and application progress of flexible radiant cooling materials[J/OL]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 1-7[2025-12-26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5848.N.20251015.1101.002>.
- [23] LIU Y, LIU X, CHEN F, et al. Eco-friendly passive radiative cooling using recycled packaging plastics[J]. Materials Today Sustainability, 2023, 23: 100448. DOI:10.1016/j.mtsust.2023.100448.
- [24] YANG L Y, FENG C P, BAI L, et al. Flexible shape-stabilized phase change materials with passive radiative cooling capability for thermal management[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 131466. DOI:10.1016/j.cej.2021.131466.
- [25] KONG X F, FU Y, YUAN J J. Novel flexible phase change materials with high emissivity, low thermal conductivity and mechanically robust for thermal management in outdoor environment[J]. Applied Energy, 2023, 348: 121556. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121556.
- [26] YEPURI V, SIGAMANI S, SWAMINADHAM V. Sol-gel spin coating of ZnO thin films for hydrophobic and radiation resistant applications[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2025, 113(3): 708-716. DOI:10.1007/s10971-024-06652-x.
- [27] 资源环境科学数据平台[EB/OL]. <https://www.resdc.cn/Default.aspx>.
- Resource and Environmental Science Data Platform[EB/OL]. <https://www.resdc.cn/Default.aspx>.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [29] 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. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114171.