

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250316001

双相变温度梯度宽温域锂电池热管理实验研究

王铁营¹ 刘松松¹ 苏远翔¹ 刘圣春¹ 石千磊² 徐超² 廖子轩¹

(1 天津商业大学机械工程学院 天津 300134; 2 华北电力大学能源动力与机械工程学院 北京 102206)

摘要 提出了一种基于石蜡/膨胀石墨/竹炭复合双层相变材料的锂离子电池被动热管理新方法。为解决现有相变材料温控范围有限的问题,构建了双相变温度(30 °C/50 °C)梯度结构,并结合膨胀石墨的高导热性与竹炭的多孔吸附特性,开发了具有双相变温度调控功能的复合相变体系。实验结果表明:在40 °C环境温度和5 C大倍率工况下,采用双层相变材料的电池组温升(43.3 °C)比无相变材料组(69.6 °C)降低37.8%;在低温环境(-10 °C和0 °C)下,双层相变材料通过相变潜热释放与孔隙储热协同作用,拓宽了电池有效工作温度范围。该复合相变体系通过双相变机制实现了宽温域(-10~40 °C)的智能热管理,为电池热安全调控提供了创新解决方案,具有显著的工程应用价值。

关键词 双相变材料;电池热管理;石蜡/膨胀石墨/竹炭;宽温域调控

中图分类号:TB61⁺1;TM912

文献标识码:A

Experimental Study of Dual-PCM Gradient Thermal Management for Lithium-Ion Batteries with Wide Temperature Ranges

Wang Tieying¹ Liu Songsong¹ Su Yuanxiang¹ Liu Shengchun¹ Shi Qianlei² Xu Chao² Liao Zixuan¹

(1. School of Mechanical Engineering Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China; 2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China)

Abstract In this study, a new method for passive thermal management of lithium-ion batteries based on paraffin/expanded graphite/bamboo charcoal composite bilayer phase-change materials is proposed. To solve the problem of the limited temperature-control range of existing phase-change materials, a dual phase-change temperature (30 °C/50 °C) gradient structure is constructed, and a composite phase-change system with dual phase-change temperature regulation is developed by combining the high thermal conductivity of expanded graphite with the porous adsorption properties of bamboo charcoal. Based on these the results, at 40°C ambient temperature and under 5C large multiplication rate working conditions, the temperature increase of the battery constructed using the double-layer phase-change material was 37.8% lower than that of the battery constructed using the non-phase-change material group (43.3 °C vs. 69.6 °C, respectively); at low temperatures (-10 °C and 0 °C), the double-layer phase-change material extended the battery's effective working temperature range through the synergistic effects of the latent heat release of the phase change and heat storage in the pores. The composite phase-change system realized intelligent thermal management across a broad temperature spectrum (-10 - 40 °C) via the dual-phase-change mechanism, providing an innovative solution for the thermal safety regulation of batteries, which has significant engineering application value.

Keywords dual-layer phase change material; battery thermal management; paraffin/expanded graphite/bamboo charcoal; broad-spectrum temperature regulation

电动汽车和储能系统在缓解环境压力和自然资源短缺方面受到广泛关注^[1]。锂离子电池因其高能量、高功率密度、更长的循环寿命、最小的自放电率、

高稳定性和安全特性而被广泛用于电力驱动和储能系统^[2-3]。然而,锂离子电池的性能和安全性对工作温度具有很高的要求^[4]。锂离子电池的可接受工作

基金项目:国家自然科学基金(52206274,52476085)和国家重点研发计划(2022YFE0207600)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52206274 & No. 52476085) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFE0207600).)

收稿日期:2025-03-16;修回日期:2025-04-14;录用日期:2025-04-15

温度范围为 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5],最佳温度范围为 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6]。电池在充放电过程中产生的热量若无法有效逸散,将导致温度升高^[7],若温度升高没有正确地消散至周围环境中,这种温度升高会引发热失控,从而导致灾难性的损坏^[8]。温度管理成为现代电池技术中关键问题之一。

传统的热管理方法(如风冷和液冷)存在结构复杂、体积较大和效率有限的缺点^[9]。相变材料(phase change material, PCM)由于其在相变过程中能够吸收或释放大潜热,成为一种潜力巨大的热管理材料^[10]。其中固-液相变材料因其具有高能量储存密度被广泛应用于电池热管理^[11]。固液相变材料包括无机相变材料和有机相变材料,有机相变材料具有高潜热、较低的过冷度和较低的腐蚀性,是储热和管理应用的首选^[12]。通过将PCM嵌入电池组或其周围组件中,充放电或高温工作条件下产生的热量将被PCM吸收,随后在放电或低温期间释放,从而有效调节温度波动并减少电池上的热应力^[13]。然而,有机相变材料固有的局限性,如低导热率、相变温度范围小和泄漏问题,激发了对改性和增强相变材料性能的深入研究^[14-16]。石蜡(paraffin, PA)具有潜热高、化学性质稳定、成本低等优点,在储能领域得到了广泛应用^[17-18]。然而,石蜡的液体泄漏、低导热性和不良的机械性能需要得到解决^[19]。目前,相变材料可以通过加入各种导热添加剂来提高其导热性,例如碳基材料^[20]、金属泡沫^[21-22]和纳米颗粒填料^[23]。Yao Yuanpeng等^[24]制备了金属泡沫/石蜡复合材料并进行了详细的实验研究,分析了孔隙率和孔隙密度对复合材料相变过程的影响。结果表明,泡沫铜可以加速相变过程,影响PA的热扩散速率和温度平衡,提高热管理效率。P. K. S. Rathore等^[25]研究了以不同质量分数的膨胀石墨(expanded graphite, EG)作为支撑结构的定型相变材料(shape-stabilized phase change material, SSPCM)的热物理性质。泄漏测试表明,EG质量分数为7%的SSPCM能够在相变温度以上无泄漏,并且在1 000次热循环后也表现出良好的稳定性。EG等多孔材料利用毛细管力将相变材料吸附在微孔中,这样相变材料即使在熔化后也不会泄漏。近年来,生物炭如竹炭(bamboo charcoal, BC),因其丰富的孔隙结构、制备工艺简单而受到许多研究者的青睐。Yue Xianfeng等^[26]采用真空浸渍法将石蜡与竹粉、竹炭、活性炭混合制备3种稳定的复合相变材料,导热系数比纯石蜡提高2.17倍。Huo Yingjie等^[27]从竹子中制备了一系列含十八醇的生物衍生多孔碳,制备了复合相变材料,并研究了复合材料的热

性能、光吸收和稳定性。上述研究表明,PA可以作为理想的相变材料,EG和BC可以作为良好的封装材料,但现有的研究一般是单相变温度,有关双相变温度对电池控温性能影响的研究较少。

本研究选择2种相变温度不同的PA($30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$)作为相变材料,通过添加EG和BC制备了2种不同相变温度的复合相变材料,对其热物理性能进行表征,将其应用于锂离子电池热管理。研究了在不同环境温度下,不同的充放电倍率下,双层相变材料对电池控温性能的影响,为锂离子电池热管理提供了一种新的方案。

1 实验

1.1 材料与仪器

石蜡(粉末,300目,熔点 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$),中国东莞凯旋塑料科技有限公司;竹炭(300目)和膨胀石墨(蠕虫状),中国河南丽泽生物科技有限公司提供;磷酸铁锂电池(耐杰,型号:18650),马鞍山弓平贸易有限公司;K型热电偶(开普森粘贴式,K型),盐城迪克维测控系统有限公司。

差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC)(TAQ20, USA),美国TA Instruments公司;模组电池高低温试验台(ZXGDW-010L),东莞志翔实验设备有限公司;电池测试仪(BTS-5V 60 A),深圳市新威尔电子有限公司;数据采集仪器(DAQ6510),美国Tektronix公司。

1.2 双层相变材料的制备及表征

相变材料和基体比例如表1所示,将称量好的石蜡、竹炭、膨胀石墨放入离心管中,在混匀仪上以 80 r/min 的速度混合2 h,待完全混匀后,得到复合相变材料A1(相变温度约为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$)和A2(相变温度约为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$)。采用差示扫描量热法(DSC, TAQ20, USA)在氮气环境下,以 $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的升温速率,研究了A1(升温区间为 $15\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$)、A2(升温区间为 $30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)的相变特性。

表1 相变材料和基体比例

Tab.1 Phase change material to matrix ratio

| 样品 | PA-30/g | PA-50/g | EG/g | BC/g |
|----|---------|---------|------|------|
| A1 | 1.5 | 0 | 1 | 0.5 |
| A2 | 0 | 1.5 | 1 | 0.5 |

1.3 电池的温控性能分析

将制备的A1、A2两种材料用塑料管封装在磷酸铁锂电池表面,其中相变温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的A1封装在内

层,相变温度为 50 °C 的 A2 封装在外侧,如图 1 所示。选取电池表面从正极到负极依次为 1、2、3 点,将 K 型热电偶用热熔胶粘贴在 3 个点上,用来测试电池的温度变化情况,将含有 A1 和 A2 这 2 种材料的电池命名为 BEPCM (采用 PCM 封装的电池, battery encapsulated with PCM)。为了对比温度变化情况,设置不添加 A1、A2 的锂离子电池进行同样标准测试,将其命名为 LIB (锂离子电池, lithium-ion battery)。选取的磷酸铁锂电池的直径为 18 mm,长度为 65 mm,额定电压为 3.2 V,额定容量为 1.8 Ah。

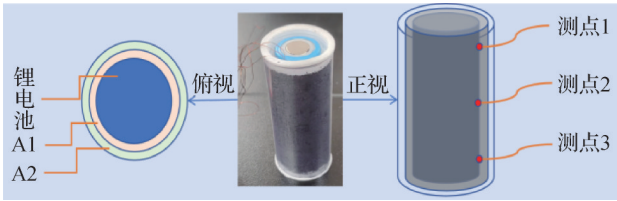


图 1 电池结构及测点示意图

Fig.1 Schematic diagram of battery structure and measurement points

实验系统如图 2 所示。模组电池高低温实验台用于为电池提供稳定的环境温度。在每次测试前,环境温度设置为 1 h,以确保电池内部温度均衡。校准环境温度,以尽量减少误差。电池测试仪被用于测量电池模块的充放电过程。数据采集仪器与 K 型热电偶配合使用。实验台搭建好以后,设定环境温度为 -10、0、25、30、35、40 °C,LIB 和 BEPCM 放入恒温箱预热 1 h,使电池内部温度均衡,在每种环境温度下分别以 1~5 C 的充放电倍率对电池充电和放电。在每次充电或放电循环之后,电池需要 1 h 的休息期以确保电解质中的离子平衡和电池温度的恢复。

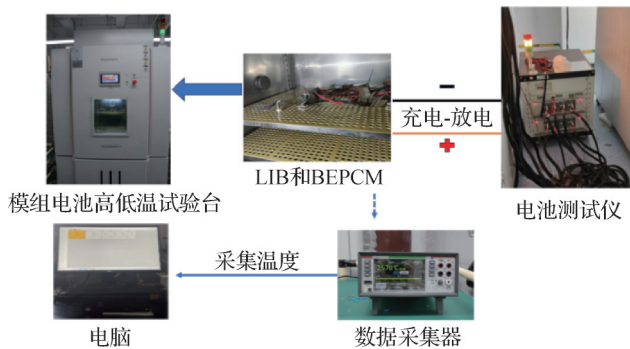


图 2 电池模块温度记录平台和充放电测试系统

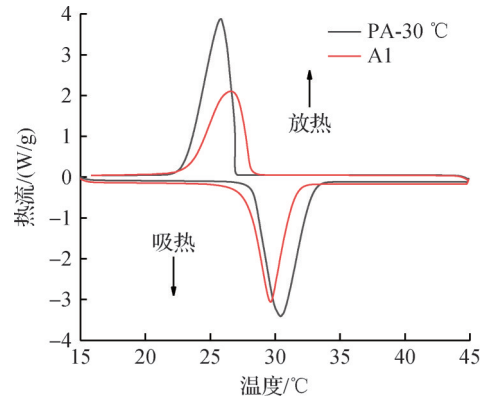
Fig.2 Temperature recording platform and charge/discharge test system of battery module

2 结果与分析

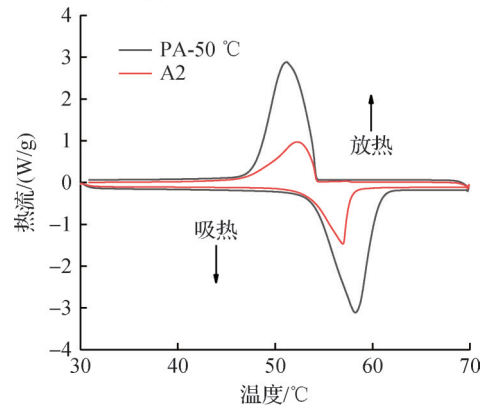
2.1 DSC 分析

图 3 所示为 2 种石蜡以及 2 种复合材料 A1、A2 的

DSC 曲线,图中的正流部分对应于材料的放热凝固过程,图中的负流部分对应于材料的吸热熔化过程。表 2 为 PA-30、PA-50、A1、A2 的相变结果,与 PA-30 和 PA-50 相比,加入竹炭和膨胀石墨后,A1 和 A2 的潜热降低。这是因为 A1 和 A2 的潜热主要来自石蜡,在 A1 和 A2 中石蜡所占的质量分数仅为纯石蜡的 1/2,所以相变潜热会远低于 PA-30 和 PA-50。



(a) PA-30 °C、A1 的 DSC 曲线



(b) PA-50 °C、A2 的 DSC 曲线

图 3 PA-30 °C、A1 和 PA-50 °C、A2 的 DSC 曲线图

Fig.3 DSC curves of PA-30 °C, A1 and PA-50 °C, A2

表 2 相变结果

Tab.2 Phase transition result

| 样品 | 相变开始温度/°C | | 相变结束温度/°C | | 潜热/(J/g) |
|-------|-----------|-----------|-------------|-------|----------|
| | 熔化/冻结 | 熔化/冻结 | 熔化/冻结 | 熔化/冻结 | |
| PA-30 | 28.4/26.9 | 33.0/22.9 | 188.1/184.1 | | |
| A1 | 28.0/28.1 | 31.6/23.6 | 97.3/92.9 | | |
| PA-50 | 53.8/54.2 | 60.9/47.3 | 235.6/231.2 | | |
| A2 | 53.2/54.3 | 59.6/46.8 | 110.5/108.4 | | |

2.2 有无相变材料及不同测试点对电池温度的影响

图 4 所示为环境温度为 25 °C 时,1 C 充放电倍率下 LIB 和 BEPCM 的充放电过程中的温度变化情况。

由图4可知,1 C充放电过程中,LIB的最高温度为33 °C,BEPCM的最高温度为28.5 °C,温度低于LIB的温度。这是因为内层相变材料A1开始相变,吸收了电池的热量从而降低电池的表面温度。同时,可以观察到1 C充放电时,2组电池点3的温度最高,点1温度最低,表明2组电池的负极的温度最高,正极的温度最低,且电池温度从正极到负极呈梯度上升。说明电池内部发热速率不均匀,这是因为在磷酸铁锂电池的充放电过程中,负极通常是由石墨等材料组成,石墨的电导性较好,但其离子扩散速度较慢,在快速充电或放电过程中,负极会经历较大的电流密度和更强的热量产生。正极材料通常是磷酸铁锂,这种材料的导电性和离子迁移速率较低,因此在充电和放电过程中,正极产生的热量较少。电解液和隔膜主要起到离子导电的作用,虽然它们本身不直接参与电化学反应产生热量,但其作为热的传导媒介,会从负极和正极接收到热量,从而使中间部分的温度保持在一个介于正极和负极之间的中等水平。这种温度分布和梯度变化主要由电池内阻、电流分布以及热传导效应共同作用的结果。

2.3 环境温度对电池温度的影响分析

2.3.1 25 °C、30 °C下电池温度分析

图5(a)、(b)所示为环境温度25 °C时,BEPCM和LIB在1~5 C的充放电倍率下的时间温度变化情况,取3个点位的平均值作为电池整体温度。可以看出锂离子电池在充放电倍率分别为1、2、3 C时,LIB放电温度逐渐增大,并且均大于内层相变材料A1的相变温度,此时内层的相变材料开始相变降低电池的热量。在4、5 C放电时,LIB的温度均大于外层相变材料的相变温度(50 °C),此时内层相变材料已经完全相变,外层相变材料也开始相变。而在1 C充电时,LIB的温度刚刚超过内层材料的相变温度,此时内层相变材料不能完全相变,只能略微降低电池的温度,甚至可能会影响电池的散热,这也是1 C有材料的锂电池放电温度高于2、3 C有材料的锂电池放电温度的原因。而2、3、4、5 C的充电过程,LIB的温度更高,此时内层相变材料相变程度逐渐加深,BEPCM温度开始降低,当温度达到内层材料的相变结束温度时,内层材料不再发挥作用,外层材料达不到相变温度,此时外层材料会阻碍电池散热,导致在5 C充电时,BEPCM温度略高于4 C充电时BEPCM的温度。

图5(c)、(d)所示为环境温度为30 °C时的锂电池充放电的温度变化情况。当环境温度为30 °C时,电池所处环境已经超过内层相变材料的相变开始温

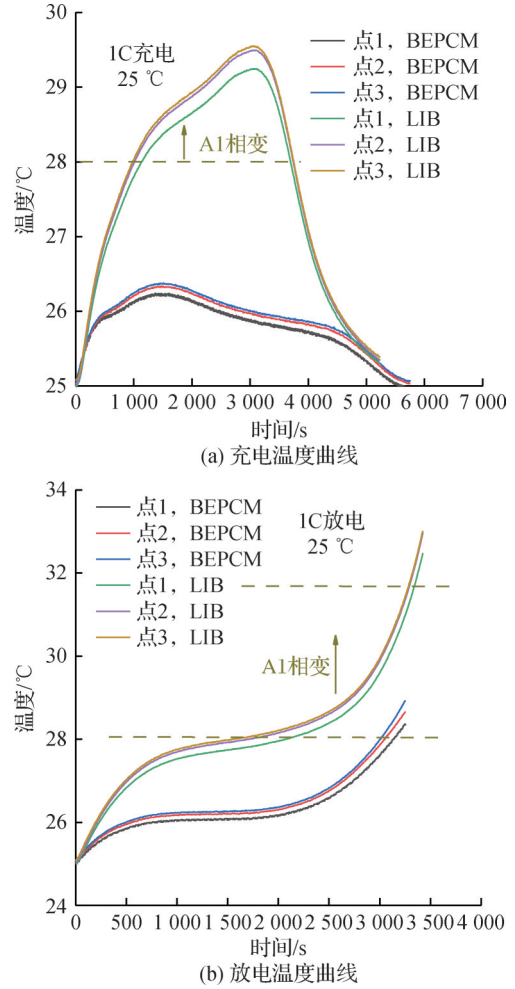


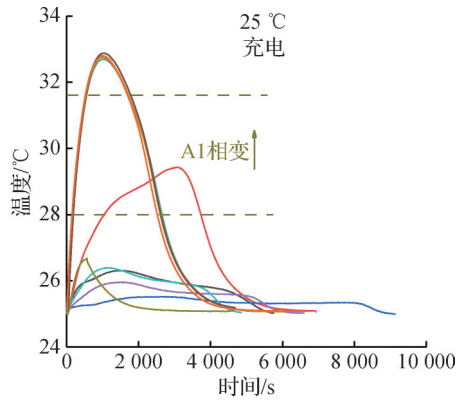
图4 25 °C时1 C充放电温度曲线

Fig.4 1 C Charge/discharge temperature curve at 25 °C

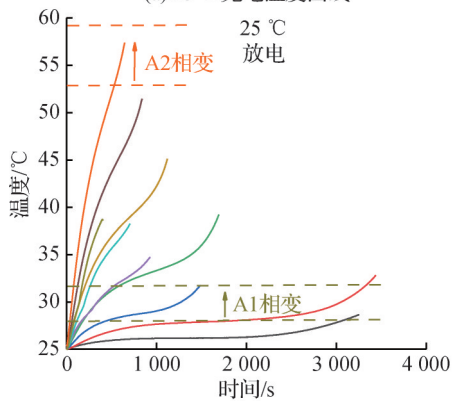
度,此时内层相变材料已经开始发生相变,但相变不完全,随着电池温度升高,内层相变材料继续相变先带走部分热量,直至内层完全相变。在1 C充放电时,LIB表面温度最高为35.3 °C,内层相变材料可以完全相变,BEPCM降温后为32.5 °C。而在2、3 C充放电时,LIB最高温度分别为41.9 °C和48.8 °C,BEPCM的最高温度分别为34.8 °C和37.8 °C,由于LIB的最高温度未达到外层相变材料的相变温度,此时电池温度的降低完全依赖于内层相变材料。当充放电速率升至4、5 C时,LIB的最高温度分别为55.6 °C和61.6 °C,此时双层相变材料均完全相变,将BEPCM温度降至环境温度。

2.3.2 35 °C、40 °C下电池温度分析

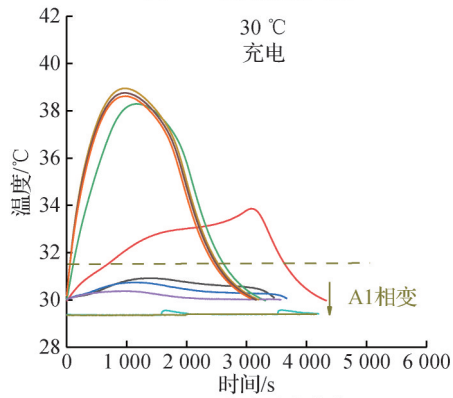
图6(a)、(b)显示了环境温度为35 °C下的充放电温度情况,在环境温度下此时内层相变材料完全相变,1、2 C时LIB的最大温度均未达到外层材料的相变温度,3、4、5 C时LIB的最大温度超过外层材料的相变温度,随着充放电速率的增大LIB的表面最高温度逐渐增大,此时外层相变材料相变程度不断加深,



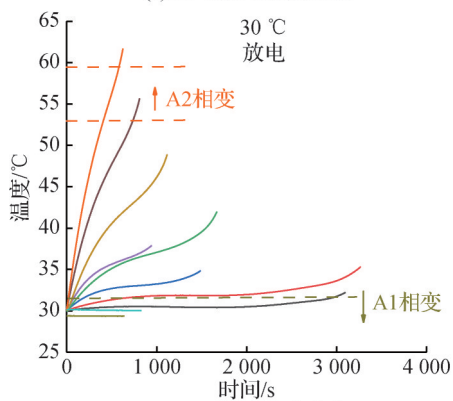
(a) 25 °C 充电温度曲线



(b) 25 °C 放电温度曲线



(c) 30 °C 充电温度曲线

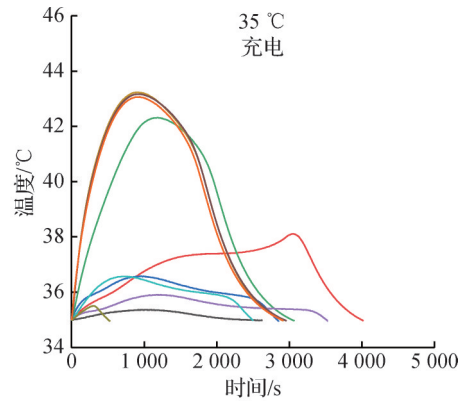


(d) 30 °C 放电温度曲线

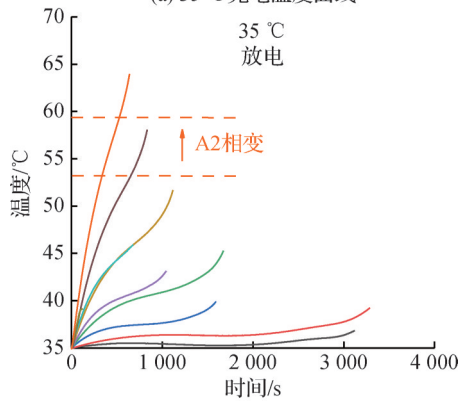
1 C 2 C 3 C 4 C 5 C
BEPCM ——— LIB ———

图5 25、30 °C时1~5 C充放电温度曲线

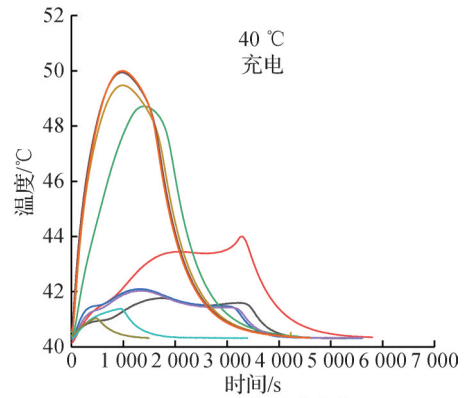
Fig.5 1~5 C Charge/discharge temperature curve at 25 °C and 30 °C



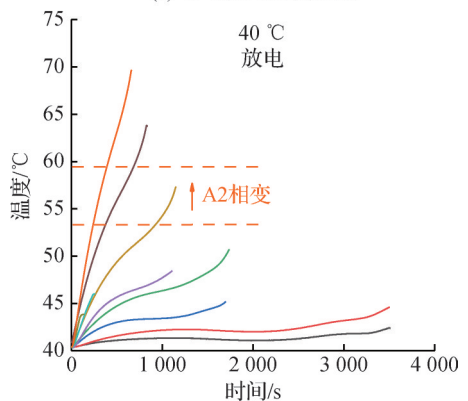
(a) 35 °C 充电温度曲线



(b) 35 °C 放电温度曲线



(c) 40 °C 充电温度曲线



(d) 40 °C 放电温度曲线

1 C 2 C 3 C 4 C 5 C
BEPCM ——— LIB ———

图6 35、40 °C时1~5 C充放电温度曲线

Fig.6 1~5 C Charge/discharge temperature curve at 35 °C and 40 °C

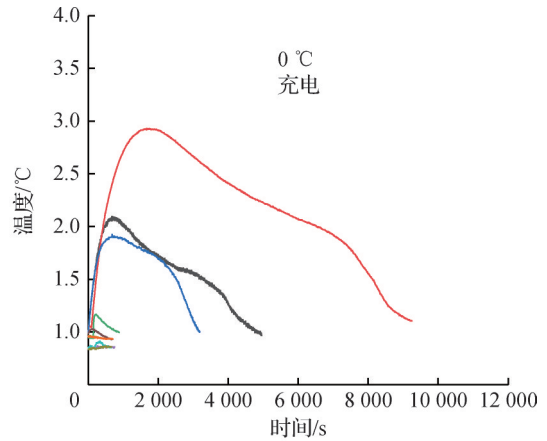
3、4 C时 BEPCM 最高温度分别为 43.1、45.9 °C,而在 5 C 时 BEPCM 最高温度为 39.4 °C,造成该现象的原因是,5 C 充放电时相变材料对温度的响应比 3、4 C 时迅速且充分。图 6(c)、(d)显示了环境温度为 40 °C 时,LIB 和 BEPCM 在 1~5 C 的充放电速率下的温度变化。此时环境温度远超内层材料的相变温度,内层材料无法相变,外层相变材料随着电池温度的升高逐渐开始相变,降低电池温度。在 5 C 放电时 LIB 温度高达 69.6 °C,而 BEPCM 温度仅为 43.3 °C。证明外层相变材料能够有效降低电池高倍率充放电的温度,防止热失控。

2.3.3 -10、0 °C 下电池温度分析

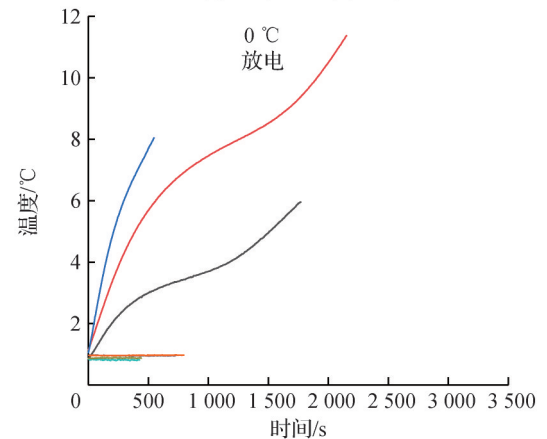
图 7(a)、(b)所示为 LIB 和 BEPCM 在 0 °C 时 1~5 C 充放电的温度变化。可以看出,在以 1、2 C 充放电时 LIB 的最高温度可达 11.5 °C, BEPCM 的最高温度为 6.2 °C。此时相变材料均未发生相变, BEPCM 的散热无法依靠材料相变吸收,但双层相变材料的导热和热容量较大,能够增强电池的散热,降低 BEPCM 的温度。而 LIB 会因为热量的集中导致温度迅速升高。当 LIB 和 BEPCM 以 3~5 C 充放电时,充放电时间很短,且 BEPCM 和 LIB 的温度基本与环境温度一致。结合图 7(c),在 3~5 C 时 LIB 和 BEPCM 的充电容量约为 0 Ah(额定容量为 1.8 Ah),说明此时电池无法进行充放电,所测的温度为环境温度。同样地,结合图 7(d)、(e)、(f),在环境温度为 -10 °C 充放电时, BEPCM 和 LIB 仅在 1 C 时能够充放电,且 BEPCM 的充电容量为 0.8 Ah, LIB 的充电容量仅为 0.6 Ah。2~5 C 充放电时电池的温度等于环境温度,电池的充电容量约为 0 Ah,电池无法充放电。

2.4 充放电速率对电池温度的影响分析

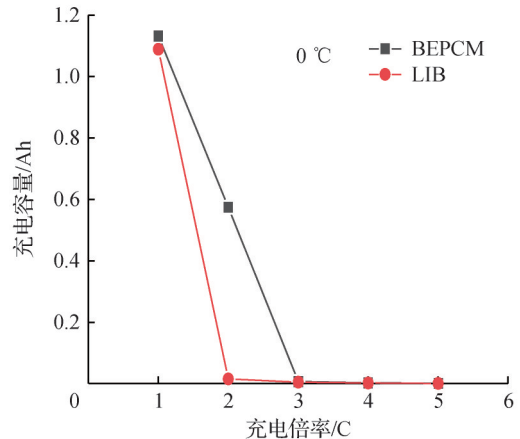
图 8 所示为 1 C 和 5 C 充放电倍率下 BEPCM 和 LIB 在 -10~40 °C 环境温度区间内充放电过程中的最高温度变化。从整体趋势看,环境温度升高,两者最高温度均上升,且 5 C 倍率下的最高温度显著高于 1C 倍率下的最高温度,表明高倍率充放电会加剧发热。对比 2 种电池,1 C 倍率时, LIB 的最高温度全程高于 BEPCM; 5 C 倍率下,低温时 LIB 的温度更高,高温时 BEPCM 温度反超。说明充放电倍率对电池温度影响显著,且不同对象在不同条件下的热性能表现有所差异。在高倍率充放电时,2 种电池的热特性不仅受自身材料影响,还与环境温度密切相关,在不同环境温度下,两者内部的热传导、化学反应等机制发生变化,导致温度表现出现差异。在图 8(b)中,5 C 充放电倍率下环境温度为 30 °C 时, BEPCM 的最高温度呈下降趋势。这可能是由于在该温度下, BEPCM 的双



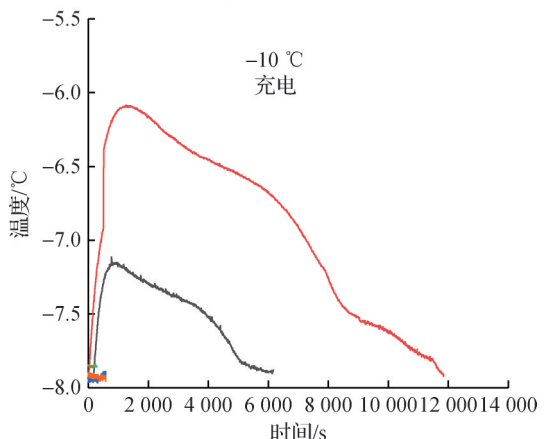
(a) 0 °C 充电温度曲线



(b) 0 °C 放电温度曲线



(c) 0 °C 时充电容量



(d) -10 °C 充电温度曲线

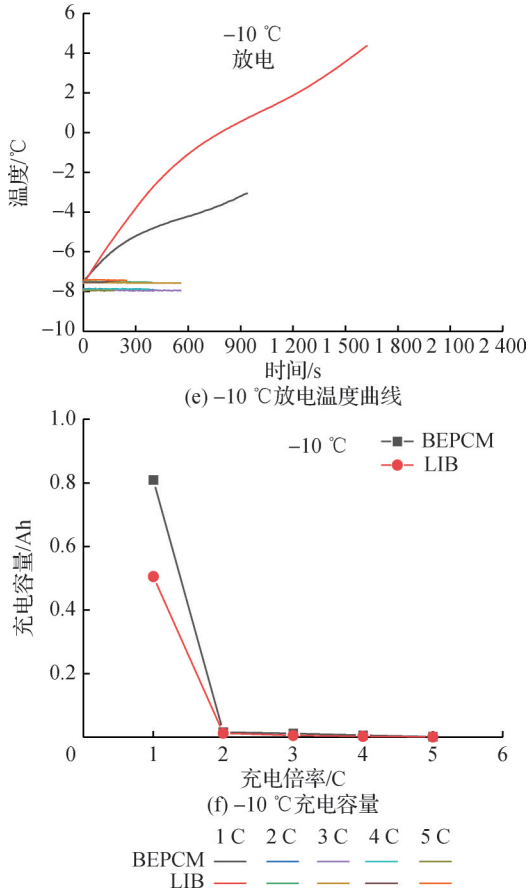


图7 -10、0 °C时1~5 C充放电温度曲线及充电容量

Fig.7 1~5 C charging and discharging temperature curve and charging capacity at 10 °C and 0 °C

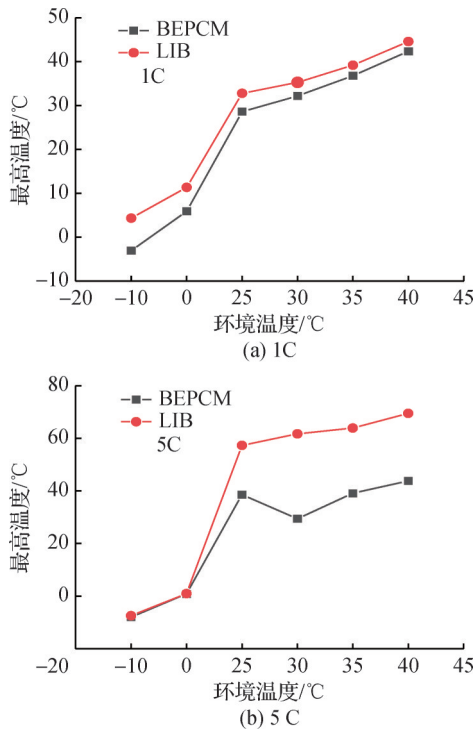


图8 1、5 C时不同环境温度下充放电的最高温度

Fig.8 Maximum temperature of charging and discharging at different ambient temperatures at 1 C and 5 C

层相变材料均开始发挥作用,吸收电池的热量,使 BEPCM 的温度降至环境温度。

3 结论

本研究提出了一种基于双层相变材料的锂离子电池热管理方案,旨在通过结合不同相变温度的石蜡(30 °C和 50 °C)、膨胀石墨和竹炭,优化电池在不同环境温度和充放电倍率下的热稳定性与性能,得到如下结论:

1) 双层相变材料系统通过梯级相变机制,在环境温度为-10~40 °C、充放电倍率为1~5 C工况下,双层相变材料可智能调节电池温度7.9%~51.3%。

2) 在40 °C环境温度和5 C大倍率工况下,采用双层相变材料的电池组温升(43.3 °C)比无相变材料组(69.6 °C)降低37.8%。

3) 在低温环境下,0 °C、1~2 C充放电, BEPCM 最高温比 LIB 低5.3 °C; -10 °C、1 C时, BEPCM 充电容量比 LIB 高0.2 Ah,提升了电池低温适应性。

本文受天津市自然科学基金项目(23JCZDJC00250)资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Tianjin Municipality (No. 23JCZDJC00250).)

参考文献

[1] DAI Xinyi, PING Ping, KONG Depeng, et al. Heat transfer enhanced inorganic phase change material compositing carbon nanotubes for battery thermal management and thermal runaway propagation mitigation [J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 89: 226-238.

[2] LYU Peizhao, LIU Xinjian, QU Jie, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage[J]. Energy Storage Materials, 2020, 31: 195-220.

[3] 朱剑杰, 庄园, 欧阳洪生, 等. 浸没液体冷却技术在动力电池热管理中的应用研究进展[J/OL]. 制冷学报, 2024: 1-18. (2024-08-27). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZLXB20240826001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (ZHU Jianjie, ZHUANG Yuan, OUYANG Hongsheng, et al. Research progress on application of immersion liquid cooling technology in thermal management of power battery [J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-18. (2024-08-27). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZLXB20240826001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.)

[4] SHEN Junjie, CHEN Xing, XU Xiaobin, et al. Thermal performance of a hybrid cooling plate integrated with microchannels and PCM[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121917.

- [5] VÄYRYNEN A, SALMINEN J. Lithium ion battery production[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2012, 46: 80–85.
- [6] CHEN Kai, CHEN Yiming, LI Zeyu, et al. Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 393–401.
- [7] CHOMBO P V, LAOONUAL Y. A review of safety strategies of a Li-ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 478: 228649.
- [8] KONG Lingxi, LI Chuan, JIANG Jiuchun, et al. Li-ion battery fire hazards and safety strategies [J]. *Energies*, 2018, 11(9): 2191.
- [9] RANJBAR KERMANI J, MAHLOUJI TAHERI M, PAKZAD H, et al. Hybrid battery thermal management systems based on phase transition processes: a comprehensive review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 86: 111227.
- [10] 刘仲康, 张冠华, 孙玥. 基于复合相变材料的锂离子电池控温性能[J/OL]. *新能源进展*, 2024: 1–8. (2024–12–30). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNYJ20241226003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (LIU Zhongkang, ZHANG Guanhua, SUN Yue. Temperature control performance of lithium ion battery based on composite phase change materials[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1–8. (2024–12–30). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNYJ20241226003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.)
- [11] LUO Jie, ZOU Deqiu, WANG Yinshuang, et al. Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): a comprehensive review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 132741.
- [12] XUE Fei, QI Xiaodong, HUANG Ting, et al. Preparation and application of three-dimensional filler network towards organic phase change materials with high performance and multi-functions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 419: 129620.
- [13] LANDINI S, LEWORTHY J, O'DONOVAN T S. A review of phase change materials for the thermal management and isothermalisation of lithium-ion cells[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 25: 100887.
- [14] ZHAO Xiangyu, LEI Ke, WANG Shuo, et al. A shape-memory, room-temperature flexible phase change material based on PA/TPEE/EG for battery thermal management [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 463: 142514.
- [15] YANG Z L, WALVEKAR R, WONG W P, et al. Advances in phase change materials, heat transfer enhancement techniques, and their applications in thermal energy storage: a comprehensive review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 87: 111329.
- [16] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. *制冷学报*, 2016, 37(1): 52–59. (TAO Wenbo, XIE Ruhe. Research and development of organic phase change materials for cool thermal energy storage [J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(1): 52–59.)
- [17] WANG Xiaonan, LI Wengui, LUO Zhiyu, et al. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: design, characteristic, performance and application [J]. *Energy and Buildings*, 2022, 260: 111923.
- [18] GULFAM R, ZHANG P, MENG Z. Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials—A review[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 582–611.
- [19] HUANG Danyuan, WANG Zhibin, SHENG Xinxin, et al. Bio-based MXene hybrid aerogel/paraffin composite phase change materials with superior photo and electrical responses toward solar thermal energy storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 251: 112124.
- [20] LIN Y, JIA Y, ALVA G, et al. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2730–2742.
- [21] LI Junwei, ZHANG Hengyun. Thermal characteristics of power battery module with composite phase change material and external liquid cooling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 156: 119820.
- [22] 朱孟帅, 张华, 闫勤学, 等. 泡沫金属填充率对相变材料强化换热的机理研究[J]. *制冷学报*, 2021, 42(5): 127–133. (ZHU Mengshuai, ZHANG Hua, YAN Qinxue, et al. Study on the effect of foamed metal copper filling ratio on the enhanced heat transfer mechanism of phase change materials [J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(5): 127–133.)
- [23] BASHAR M, SIDDIQUI K. Experimental investigation of transient melting and heat transfer behavior of nanoparticle-enriched PCM in a rectangular enclosure [J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 18: 485–497.
- [24] YAO Yuanpeng, WU Huiying. Thermal transport process of metal foam/paraffin composite (MFPC) with solid-liquid phase change: an experimental study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115668.
- [25] RATHORE P K S, SHUKLA S K. Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: a state of the art review [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 236: 110799.
- [26] YUE Xianfeng, ZHANG Rong, JIN Xiaobei, et al.

Bamboo-derived phase change material with hierarchical structure for thermal energy storage of building[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62: 106911.

- [27] HUO Yingjie, YAN Ting, PAN Weiguo. Efficient solar thermal storage of foamy bamboo charcoal-based composite phase change materials [J]. Solar Energy, 2024, 268: 112269.

通信作者简介

刘圣春,男,教授,天津商业大学机械工程学院,13920682426,

E-mail:liushch@tjcu.edu.cn。研究方向:相变储能及新能源利用;电池热管理;自然工质替代技术;制冷系统节能技术。

About the corresponding author

Liu Shengchun, male, professor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, 86-13920682426, E-mail: liushch@tjcu.edu.cn. Research fields: phase change energy storage and renewable energy utilization; battery thermal management; natural refrigerant alternative technologies; energy-efficient refrigeration system technologies.