

相变材料电池组热管理性能及影响因素研究

蒋若曼^{1,2}, 胡微勇^{1,2}, 潘锁柱^{1,2*}, 崔光宇^{1,2}, 郝子赫^{1,2}, 暴秀超^{1,2}, 王得鹏³

¹西华大学汽车与交通学院, 四川 成都

²汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都

³四川新能源汽车创新中心有限公司, 四川 宜宾

收稿日期: 2026年2月19日; 录用日期: 2026年3月12日; 发布日期: 2026年3月20日

摘要

本文采用FLuent软件搭建了相变材料(PCM)电池组仿真模型, 研究了PCM电池组的散热性能及其关键影响因素。研究表明: 相比于自然对流冷却, 在1C、2C、3C放电倍率下, PCM冷却可使电池组最高温度分别降低3 K、8 K和6 K; 在放电结束后的冷却阶段, 电池组最高温度虽逐步降低, 但PCM凝固明显滞后, 最终液相率仅从1.0降至0.75左右, 潜热恢复速率很缓慢。2C放电倍率下, 单体电池间距从1 mm增加到6 mm, 电池组最大温差从8.40 K下降到了3.58 K, 降幅高达57.4%; 单体电池间距的增加, 使得电池组最高温度降低, 但同时导致系统总质量增加13.47%、体积能量密度下降25.79%。另外, 电池组最高温度随熔点的升高而上升; 导热系数从0.21 W/(m·K)提升至4.21 W/(m·K), 电池组最高温度降低7 K; 增大PCM潜热可降低电池组的最高温度。研究结果阐明了关键因素对PCM热管理系统性能的影响规律, 可为锂离子电池组热管理系统的设计与优化提供理论依据。

关键词

相变材料, 锂离子电池组, 热性能, 影响因素

Research on Thermal Management Performance and Influencing Factors of Phase Change Material Battery Pack

Ruoman Jiang^{1,2}, Weiyong Hu^{1,2}, Suozhu Pan^{1,2*}, Guangyu Cui^{1,2}, Zihe Hao^{1,2}, Xiuchao Bao^{1,2}, Depeng Wang³

¹School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu Sichuan

²Vehicle Measurement, Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

³Sichuan New Energy Vehicle Innovation Center Co., Ltd., Yibin Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 蒋若曼, 胡微勇, 潘锁柱, 崔光宇, 郝子赫, 暴秀超, 王得鹏. 相变材料电池组热管理性能及影响因素研究[J]. 交叉科学快报, 2026, 10(2): 493-508. DOI: 10.12677/isl.2026.102062

Abstract

This paper develops a simulation model of phase change material (PCM) battery pack using Fluent software and employs it to investigate the PCM battery pack's thermal performance along with its key influencing factors. The results show that compared to natural convection cooling, PCM cooling can reduce the maximum temperature of the battery pack by 3 K, 8 K and 6 K at discharge rates of 1C, 2C and 3C, respectively. In the cooling stage after discharge, the maximum temperature of the battery pack gradually decreases, but PCM solidification exhibits obvious hysteresis. The liquid fraction finally drops only from 1.0 to approximately 0.75, indicating a significantly slow latent heat recovery rate. At 2C discharge rate, when the inter-cell spacing increases from 1 mm to 6 mm, the maximum temperature difference within the battery pack decreases from 8.40 K to 3.58 K, representing a significant reduction of 57.4%. With the increase of cell spacing, the maximum temperature of the battery pack decreases, while the system mass increases by 13.47% and the volumetric energy density decreases by 25.79%. The maximum temperature of the battery pack increases with the rise of PCM melting point. When the thermal conductivity is increased from 0.21 W/(m·K) to 4.21 W/(m·K), the maximum temperature of the battery pack decreases by 7 K. Additionally, increasing the latent heat of the PCM also contributes to a reduction in the battery pack's maximum temperature. The findings elucidate the influence patterns of key factors on the performance of PCM-based thermal management systems, which can provide a theoretical basis for the design and optimization of thermal management systems in lithium-ion battery packs.

Keywords

Phase Change Materials, Lithium-Ion Battery Packs, Thermal Performance, Influencing Factor

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锂离子电池具有能量密度大、功率密度高、寿命长、环保等优点[1]-[3], 广泛应用于电动汽车、电动工具和航空航天等领域[4]。近年来, 锂离子电池已成为新能源汽车的关键部件, 市场占有率显著提升[5]。然而, 电池温度过高会导致电池寿命缩短、内部结构损坏, 甚至发生热失控等现象[6]。相关研究表明, 锂离子电池温度在 25°C~50°C 范围内, 且电池模组内最大温差在 5°C 以内, 其循环性能与工作寿命才能达到较佳状态[7]-[9]。另外, Grandjean 等[10]研究发现, 当环境温度高于 20°C 时, 电池的最高温度或升温速率随着放电/充电电流的增加而增加。较大的放电电流会导致较高的发热率和快速温度升高, 这可能会引起锂离子电池的严重安全问题[11]。因此, 需高度重视锂离子电池温度过高、热失控等风险的防控工作[12]。

热管理系统是防范电池过热风险的核心技术手段, 其可确保电池在充放电过程中处于较优温度区间, 进而提升电池的工作效率与循环寿命。合理设计与优化锂离子电池热管理系统, 对实现电池高效、安全的散热需求具有重要的工程意义。锂离子电池热管理系统需满足两大核心要求: 其一, 保障电池单体及模组在适宜的温度范围内运行; 其二, 调控电池模组的温度分布, 降低模组内部温差[13]。

相变冷却是电池热管理的关键技术之一,近年来被广泛应用于锂离子电池的热管理系统。相变冷却是利用相变材料(PCM)的潜热特性,于相变温度区间内发生固-液相变,吸收大量热量且自身温度基本保持恒定。无风扇、泵体等动力部件,相比于主动散热(液冷/风冷)无能量消耗,可适配低功耗需求的电池热管理系统。PCM 电池热管理系统不仅能将电池组温度稳定在更合适的工作区间范围内,还可以有效抑制局部热点,提升温度均匀性。因此,PCM 电池热管理系统近年来受到了国内外学者们的广泛关注。Verma 等[14]通过数值模拟方法研究了不同厚度的 PCM 层(3 mm, 7 mm, 9 mm, 12 mm)对电池组散热性能的影响,研究表明 3 mm 厚 PCM 层的电池组散热性能更优,可将电池最高温度降至 305 K。Li 等[15]模拟分析了单体电池间距对 PCM 电池组热管理性能的影响,发现电池模块的温差会随单体电池间距增大呈逐渐上升趋势。

鉴于此,为了阐明 PCM 电池组的散热性能以及关键因素对其性能的影响规律,本文以 PCM 电池组为研究对象,采用 Fluent 软件建立了 PCM 电池组仿真模型,并开展了以下研究工作。(1) 在 1C、2C、3C 放电倍率下,对比分析了 PCM 散热与自然对流散热的热管理性能;(2) 分析了 3C 放电倍率下,PCM 电池组放电与冷却恢复阶段的电池组最高温度和液相率的变化规律;(3) 在 2C 放电倍率下,研究了单体电池间距对 PCM 电池组散热性能的影响规律;并对不同单体电池间距下 PCM 电池组的系统总质量、体积能量密度与最高温度进行了权衡分析与熵权-TOPSIS 综合排序;(4) 基于 3C 放电倍率,分析 PCM 自身性质对电池组散热性能的影响规律。

2. PCM 电池组仿真模型的建立

2.1. 锂离子电池生热机理

锂离子电池在充放电过程中由于电化学反应、离子迁移、电阻损耗等多个因素共同作用会产生热量[16],深入了解电池生热机理有助于精准评估电池热管理的需求和设计。相关研究表明,锂电池内部产热主要包含以下几个部分:电池内部化学反应产生的化学反应热 Q_r 、欧姆热 Q_j 、副反应热 Q_s 和极化热 Q_p 构成。其中,副反应热可忽略不计。总的产热量 Q 可以表示为[17][18]:

$$Q = Q_r + Q_j + Q_p \quad (1)$$

即:

$$Q = IT \frac{dE}{dT} + I^2 R_j + I^2 R_p \quad (2)$$

式中, $\frac{dE}{dT}$ 为温度影响系数,本文中 $T \frac{dE}{dT}$ 取为 11.06 mV [19], E 为电池电动势; U 为电池工作电压。 I 为电池充放电电流, T 为电池温度, R_j 为电池欧姆内阻, R_p 为电池极化内阻。

基于以上公式,可以得到电池的单位产热率为[20]:

$$q = \left(IT \frac{dE}{dT} + I^2 (R_j + R_p) \right) \frac{1}{V} \quad (3)$$

式中, V 为电池体积(m^3)。

2.2. 单体电池生热模型建立

选取 21700 型锂离子电池为研究对象,单体电池直径为 21 mm,高 70 mm,表 1 为松下 21700 型锂电池具体参数。电池的热物性参数如表 2 所示。采用混合动力脉冲能力特性实验测试方法(HPPC 实验)测试锂电池单体电池的内阻。测试工况为环境温度 25℃,放电倍率为 1C、2C、3C,分别测试电池 SOC(荷

电状态)分别为 0.8、0.6、0.4、0.2、0 时的脉冲响应。实验流程如图 1 所示。实验测得不同放电倍率下内阻随 SOC 变化情况如图 2 所示。



Figure 1. Experimental procedure flowchart
图 1. 实验流程图

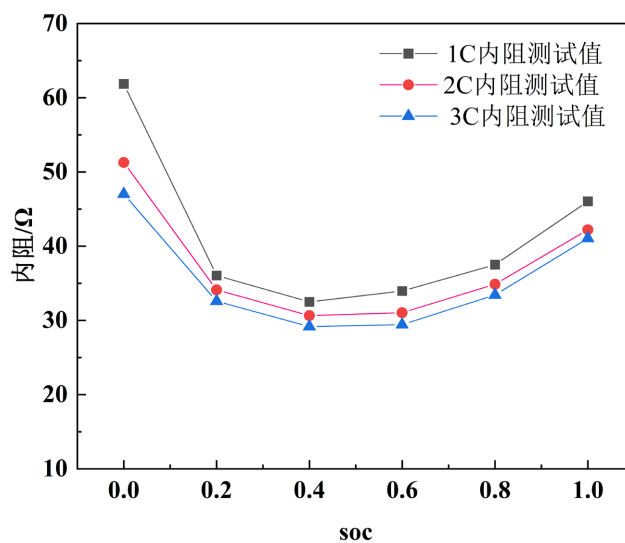


Figure 2. Battery internal resistance at different discharge rates
图 2. 不同放电倍率下的电池内阻

Table 1. Specific parameters of Panasonic 21700 lithium-ion battery
表 1. 松下 21700 型锂电池具体参数

参数	数值
产品型号	NCR 21700T
额定容量	4800 mAh
电压	3.7 V
重量	69 g
尺寸	21 mm × 70 mm

Table 2. Thermal properties parameters of lithium-ion batteries [21]
表 2. 锂电池的热物性参数[21]

参数	数值
密度(kg/m ³)	2846
比热容(J/(kg·K))	885
轴向导热系数(W/(m·K))	24.2
径向导热系数(W/(m·K))	0.9

将实验测得电池内阻数据导入 Matlab 软件进行读取与分析, 使用多项式响应面拟合方法构建电池内阻的近似模型公式; 基于该公式编写热源程序, 并将其加载至 Fluent 软件中, 作为单体电池的动态生热源。图 3 为 1C 放电倍率的 UDF 热源程序, 2C 和 3C 放电倍率采用同样的方法编写热源程序。

```
#include "udf.h"

DEFINE_SOURCE(cell_source, cell, thread, dS, eqn)
{
    real source=0, ts, tem;
    real SOC, T;
    // #if !RP_HOST
    ts = RP_Get_Real("flow-time");
    tem = C_T(cell, thread);
    SOC = 1 - ts / 3600;
    T = tem - 273.15;
    /* 计算源项, 根据给定公式 */
    source = (4.7*4.7*(105.2035 - 249.3904*SOC - 2.4954*T +
    639.8626*SOC*SOC + 0.1757*SOC*T + 0.0302*T*T -
    660.7641*SOC*SOC*SOC - 2.0923*SOC*SOC*T +
    0.0541*SOC*T*T + 226.7103*SOC*SOC*SOC*SOC +
    3.9511*SOC*SOC*SOC*T
    - 0.0909*SOC*SOC*T*T)/1000 + 4.7*0.01116)/0.000024245;
    /* 返回计算的源项 */
    return source;
}
```

Figure 3. UDF heat source program for 1C discharge
图 3. 1C 放电时的 UDF 热源程序

2.3. PCM 电池组实体模型的建立

利用 Spaceclaim 软件建立 PCM 电池组三维实体模型, 并将其导入 Fluent meshing 中进行网格划分。PCM 电池组实体模型的整体尺寸为 71 mm × 117 mm × 70 mm, 模组由 15 个圆柱单体电池以 3 × 5 阵列空间排布, 如图 4 所示。单体电池之间间距为 d (mm), 电池距边缘的距离为 D (mm), 本文中 D 设定为 2 mm。PCM 在各单体电池间隙之间均匀分布, PCM 热物性参数如表 3 所示。PCM 电池组几何模型和网格模型如图 5 所示。

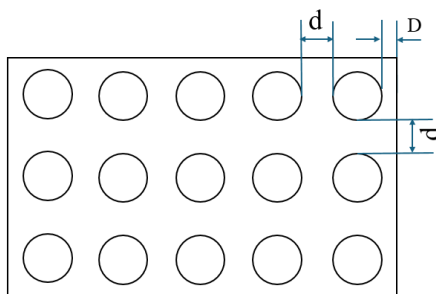


Figure 4. The battery cells are arranged with uniform spacing
图 4. 电池组均匀排布间距

Table 3. PCM material properties [22]**表 3.** PCM 物性参数[22]

参数	数值
密度(kg/m ³)	840
比热容(J/(kg·K))	2000
导热系数(W/(m·K))	0.21
潜热(kJ/kg)	215
相变温度(°C)	37

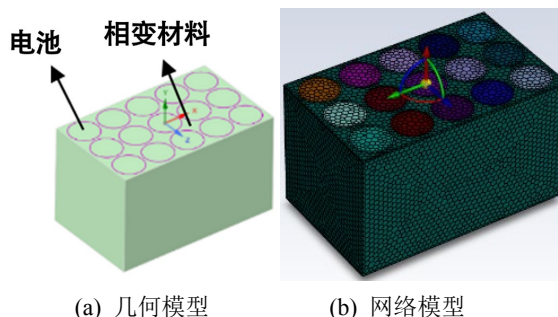


Figure 5. PCM battery pack geometric model and mesh model
图 5. PCM 电池组几何模型和网格模型

2.4. 相变冷却电池组仿真条件设置

(1) 检查网格模型质量：首先对导入 Fluent 的相变电池组模型的网格质量进行检查，确保没有负体积网格的出现。

(2) 确定物理模型：选择能量方程(Energy)和 Solidification/Melting 模型。

(3) 设置材料物性参数：固体域设置锂电池的密度、比热容和导热系数等参数。流体域设置 PCM 的密度、比热、导热系数、动力粘度、相变潜热、相变温度等物理性参数。

(4) 设置电池内热源：将之前编写好的 UDF 电池内热源程序加载到 Fluent 中，为每个单体电池配置独立 UDF 动态生热源。

(5) 设置边界条件：对于整个计算模型，PCM 外壁面是无滑移静止壁面，与空气存在对流换热。设置电池和 PCM 互相接触的壁面是耦合(Coupled)壁面条件。

(6) 确定求解器及求解算法：选择压力基求解器和 Simple 求解算法。

(7) 设置初始条件：设置整个模型的初始温度等于环境温度(25°C)，对整个计算域初始化并开始计算。

2.5. 步长无关性验证

仿真结果的精度受时间步长设置影响显著。步长过大可能导致计算结果失真，而步长过小则会增加不必要的计算成本。为确保仿真结果的准确性，需进行步长无关性验证。

在环境温度 25°C、1C 放电倍率条件下，对 21700 单体电池分别选取了时间步长为 20 s、10 s、5 s、2 s、1 s 和 0.5 s 的六种方案(对应总步数分别为 180、360、720、1800、3600 和 7200 步)进行分析，以对不同步长下单体电池放电结束时表面平均温度的差异。

仿真结果如图 6 所示，由图 6 可知，当仿真步数超过 3000 步后，电池表面平均温度受步长变化的影响趋于稳定。因此，综合计算效率与精度考虑，最终确定在 1C、2C、3C 放电倍率的模拟仿真中，采用时间步长为 1 s，时间步数分别对应为 3600 步、1800 步、1200 步进行计算。

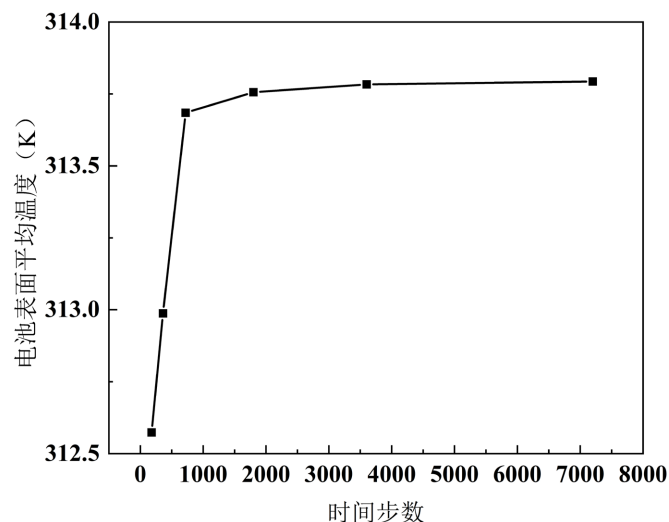


Figure 6. Battery temperature at different time steps

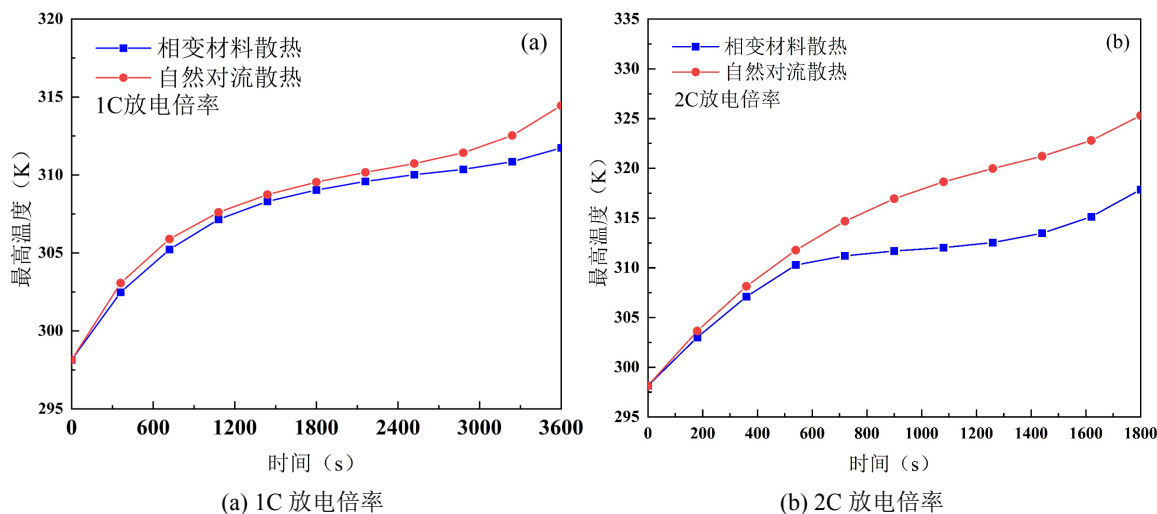
图 6. 不同时间步数下的电池温度

3. 仿真结果分析

3.1. 相变散热与自然散热性能对比

图 7(a)~(c)分别为 1C、2C 和 3C 放电倍率下, 分别采用 PCM 冷却与自然对流冷却的电池组放电过程的最高温度。

由图 7 可见, 在各放电倍率下, 相变冷却电池组最高温度都显著低于自然对流冷却。放电结束时刻, 自然对流冷却下, 1C、2C、3C 放电倍率对应的电池组最高温度分别约为 314 K、325 K、337 K; 而 PCM 冷却下, 相同放电倍率的电池组最高温度分别约为 311 K、317 K、330 K。相较于自然对流冷却, PCM 冷却可使电池组最高温度分别降低 3 K、8 K、7 K。这一结果充分体现了 PCM 优异的控温能力。另外, 同一放电倍率下, 放电初期两种散热方式的电池组最高温度曲线差值较小, 随放电时间延长, 该差值呈逐渐扩大的趋势。这是由于放电初期 PCM 尚未进入固-液相变阶段, 其潜热能力未发挥, 仅依靠显热吸热, 因此两种散热方式的温度差异较小; 随着放电持续进行, 电池产热持续累积, PCM 逐步发生相变并吸收大量热量, 显著控制了电池组温度的升高, 因此两种散热方式的最高温度曲线差值逐渐增大。



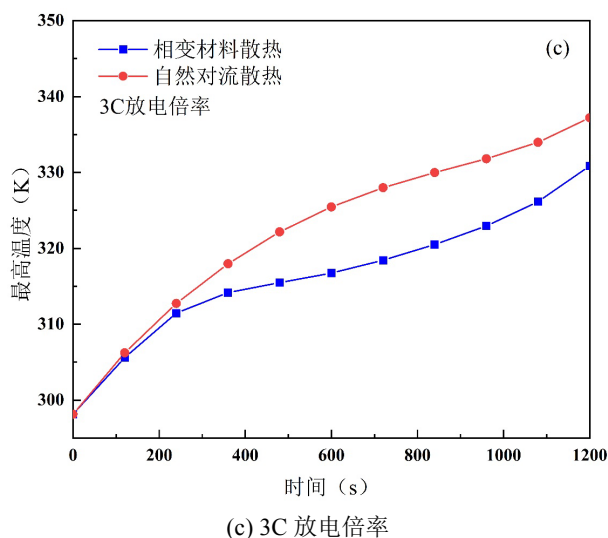


Figure 7. The maximum temperature of the battery pack at different discharge rates.
图 7. 不同放电倍率下电池组的最高温度

由图 7 还可以发现, 放电中后期, 两种散热方式的最高温度曲线差值随放电倍率增加而增大。以放电时长为 50% 的时刻为例, 1C、2C 和 3C 放电倍率下, 两种散热方式温度曲线差值分别为 0.51 K、5.26 K、8.71 K, 呈逐渐增大的趋势。这是由于, 随着放电倍率的增加, 产热量逐渐增大, 自然对流散热速率增加较为缓慢, 而 PCM 可在相变温度区间内发生固-液相变, 持续吸收大量热量, 提高散热速率, 快速降低电池组温度, 表现为电池组最高温度曲线上上升较为缓慢。因此, 随着放电倍率的增加, 两种散热方式的散热性能差异越显著。

3.2. 放电与冷却恢复阶段分析

基于前文研究, PCM 对电池组控温具有显著作用。为深入评估 PCM 电池组在高倍率放电下的热饱和与热恢复特性, 本研究在 3C 放电倍率工况(即 1200 s 恒流放电)结束后, 增设 3600 s 自然冷却恢复阶段, 将总仿真时长延长至 4800 s。在 Fluent 中对电池组整体最高温度进行监测, 并提取中间单体电池壁面处的液相率变化, 监测结果如图 8 所示。其中, 图 8(a)为液相率演变曲线, 图 8(b)为最高温度演变曲线。0~1200 s 为 PCM 电池组放电阶段, 1200~4800 s 电池停止放电, 为冷却阶段。

由图 8 可发现, 在放电初期(0~600 s), 电池电化学反应产生大量热量, 使得电池组最高温度快速升高; 热量迅速传递至 PCM, 驱动 PCM 发生固-液相变, 液相率由 0 快速上升至 1.0, 表明 PCM 已完全熔化为液态, 其相变潜热储能能力耗尽, PCM 开始进入热饱和状态。

在放电中后期(600~1200 s), PCM 液相率稳定维持在 1.0 的平台段, 热饱和状态持续。此时, PCM 无法继续通过相变吸收热量, 电池组散热机制由“相变潜热主导”转变为“液态 PCM 显热换热、导热与自然对流共同主导”。由于 PCM 导热系数较低, 电池组产生的热量通过 PCM 难以快速向外传递, 导致电池内部热量持续累积, 与放电初期相比, 图 8(b)中可明显观察到电池组最高温度的上升速率显著加快。

放电结束后(1200 s 以后), 电池停止产热, PCM 电池组进入冷却恢复阶段。此时, 电池组内部累积的热量主要通过液态 PCM 的导热与表面自然对流换热逐步向外界空气传递。但受限于 PCM 较低的导热能力, 热量向外耗散速率缓慢。值得注意的是, 放电结束后液相率并未立即下降, 而是维持 1.0 一段时间, 直至约 3600 s 才开始从 1.0 缓慢下降, 最终降至 0.75 左右, 整个冷却过程历时 3600 s, PCM 仅凝固了约 25%。这一现象表明, PCM 的凝固与潜热恢复过程存在明显滞后性, 其相变储能能力无法快速再生,

也从侧面反映出纯 PCM 导热能力弱、热恢复速率慢的固有局限性。

综上分析可知,PCM 可快速熔化并吸收大量热量,对电池放电过程的温升起到良好抑制作用;但 PCM 完全熔化后即进入热饱和状态,失去潜热调控能力,加之自身导热性能较差,导致电池组温度上升速率显著加快。进入冷却阶段后,电池温度逐渐下降,但 PCM 存在明显的凝固滞后现象,潜热能力恢复缓慢。因此,易达到热饱和、潜热能力失效快、导热性能差、热恢复速率慢,是 PCM 在电池热管理应用中的主要不足。

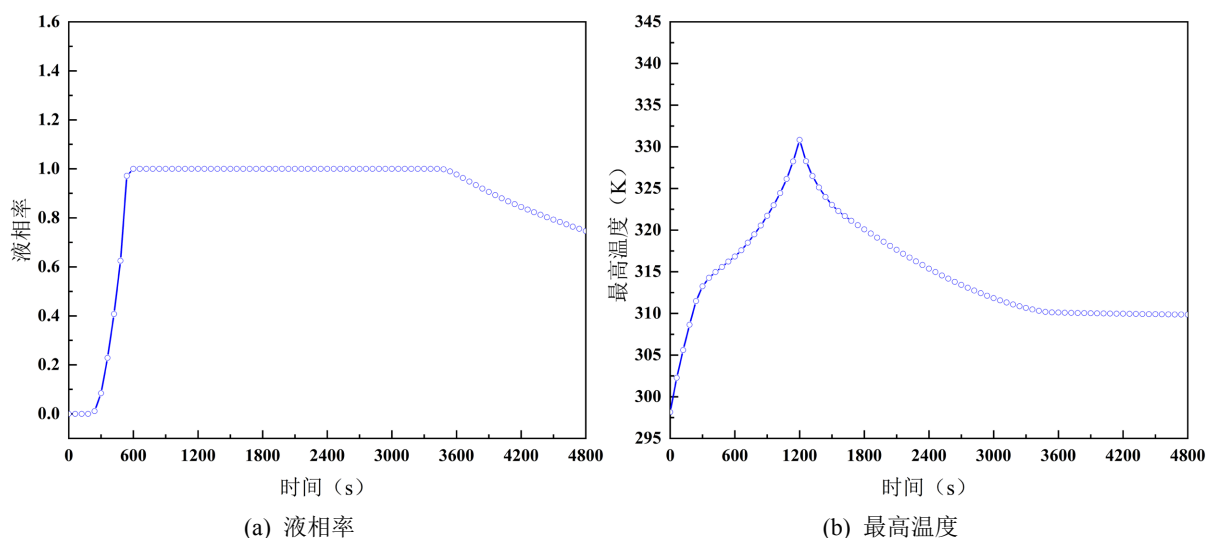


Figure 8. Liquid fraction and maximum battery module temperature during discharge and cooling stages

图 8. 放电和冷却阶段的液相率和电池组最高温度

3.3. 单体电池间隙对电池组散热性能的影响

电池间距是影响电池组热管理性能的关键因素。为此,本文在 25℃ 环境温度、2C 放电倍率下,针对单体电池间距 $d = 1\text{ mm}$ 、 $d = 2\text{ mm}$ 、 $d = 3\text{ mm}$ 、 $d = 4\text{ mm}$ 、 $d = 5\text{ mm}$ 、 $d = 6\text{ mm}$ 开展了仿真研究,分析不同电池间距对电池组散热性能的影响规律。

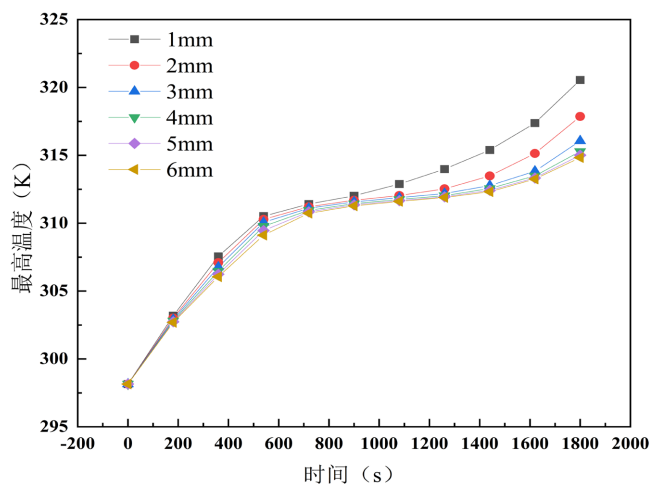


Figure 9. Maximum temperature of battery packs with different spacing

图 9. 不同间距的电池组最高温度

图 9 为不同单体电池间距下，电池组最高温度随时间的变化曲线。由图 9 可发现，单体电池间距越小，电池组的最高温度上升速率越快、放电结束后的温度越高。单体电池间距由 1 mm 增加至 6 mm，放电结束时电池组最高温度由 320 K 降到了 314 K，温度降低达 6 K。这一现象在图 10 所示的 1 mm 和 6 mm 间距下电池组温度分布云图也得到了认证。这一现象是由于电池单体间距增大，不仅让各单体电池表面的 PCM 包裹层更厚，也使电池间填充的 PCM 量更多，因此 PCM 整体热容与储热能力提升，进而能吸收更多热量，有效抑制电池的温升。同时，PCM 电池组在小间距下，PCM 层比较薄，模组中间区域的 PCM 吸收热量后会快速熔化、液相率骤升并达到热饱和状态，失去温度缓冲能力，最终造成电池组最高温度急剧上升；而在大间距下，由于更多的 PCM 嵌入在电池组之间，热量可被更均匀、持续地吸收，从而显著改善电池组的散热性能。

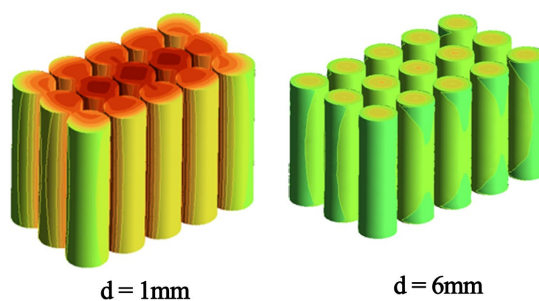


Figure 10. Temperature distribution contour maps of battery packs with different spacing
图 10. 不同间距的电池组温度分布云图

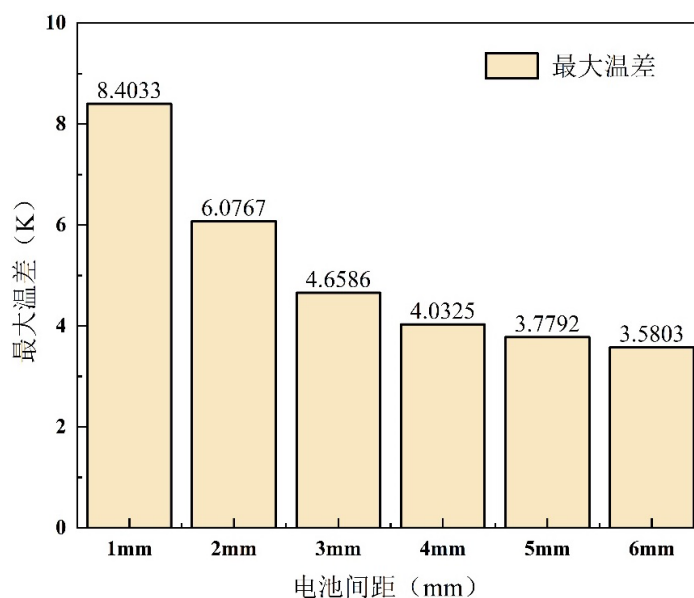


Figure 11. Maximum temperature difference in battery packs with different spacing
图 11. 不同间距的电池组最大温差

图 11 为不同单体电池间距下，电池组的最大温差。由图 11 可发现，随着单体电池间距增加，电池组最大温差呈显著下降的趋势。单体电池间距从 1 mm 增加到 6 mm，电池组最大温差从 8.40 K 下降到了 3.58 K，降幅高达 57.4%。另外，从图 11 中还可以看到，当单体电池间距由 1 mm 增大至 3 mm 时，最大温差从 8.40 K 降至 4.65 K，降幅接近 45%，而当单体电池间距由 3 mm 增大至 6 mm 时，最大温差从 4.65

降至 3.58 K, 降幅仅 23%。这表明单体电池间距增加到一定值时, 最大温差降低的趋势明显减缓。这一现象是由于随着电池间距的增大, PCM 的填充量也随之增加, 储热能力提升。更充足的 PCM 能够更均匀地传导电池表面的热量, 避免热量过度集中在模组局部区域, 从而有效缩小了电池模组内的温度差异。但 PCM 因其固有的导热系数偏低, 导致了其热传导能力较为有限, 此时进一步增加电池间距, 不仅无法实现热量的快速传递与扩散, 反而会造成热量堆积, 这一现象在一定程度上抵消了间距增大所带来的 PCM 储热能力提升的控温优势, 最终导致电池组最大温差的降低趋势明显放缓。综上所述, 增大电池间距虽可降低电池组最大温差, 但过度增加间隙不仅无法持续提升相变冷却系统的热管理性能, 还会导致系统体积和重量增加。

3.4. PCM 电池组综合性能权衡分析和熵权 TOPSIS 分析

本节基于数值模拟与理论计算, 系统分析了不同单体电池间距下 PCM 电池组的最高温度、系统总质量及体积能量密度的变化规律。采用熵权 - TOPSIS 多准则决策方法, 在热安全与系统综合性能之间寻求较优的单体电池间距方案。

图 12 为不同单体电池间距下, PCM 电池组的最高温度、系统总质量和体积能量密度对比。由图 12 可以看出, 随着电池间距从 1 mm 增加至 6 mm, 电池组最高温度呈持续下降趋势, 由 320.5 K 降至 314.8 K, 降幅达 5.7 K。然而, 系统总质量随间距增大呈线性上升趋势, 由 1.188 kg 增加至 1.348 kg, 增幅达 13.47%。与此同时, 在电池总能量(266.4 Wh)保持不变的前提下, 模组体积增大直接导致体积能量密度由 487.7 Wh/L 持续下降至 361.9 Wh/L, 降幅达 25.79%。

综合来看, 增大电池间距虽可显著降低电池组最高温度、强化散热效果, 但同时带来了系统质量上升与体积能量密度大幅下降的代价。各指标间存在明显的权衡关系, 难以实现单一指标最优。因此, 必须在热安全、轻量化与能量密度之间进行综合权衡, 选取综合性能较优的设计方案。

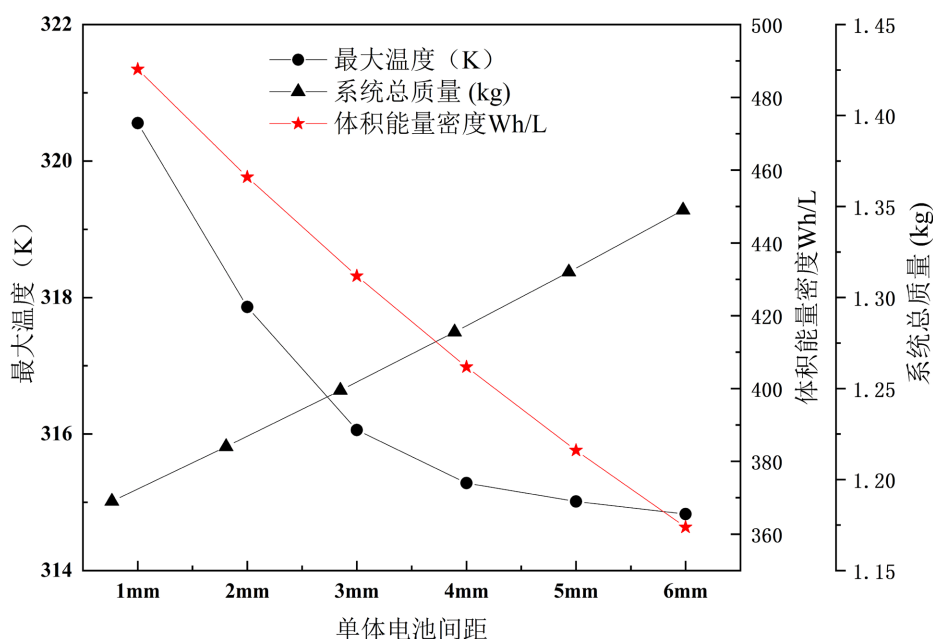


Figure 12. Performance of PCM-equipped battery modules under different cell spacings

图 12. 不同单体电池下的 PCM 电池组性能

上述结果表明, 热安全性能的提升是以牺牲系统轻量化与能量密度为代价的, 三者之间存在显著冲

突。为在热安全、轻量化与能量密度之间获取较优的单体电池间距，采用熵权 - TOPSIS 法对 6 组方案进行多准则决策分析。为避免主观赋权带来的偏差，本研究采用熵权法对各指标进行客观赋权，结果如表 4 所示。其中体积能量密度权重最高(39.25%)，系统总质量次之(35.28%)，最高温度权重最低(25.47%)。TOPSIS 综合评价结果如表 5 所示。

综合分析表明，2 mm 间距方案既可将电池组最高温度有效控制在 50℃ 以内，又可避免因间距过大造成的质量剧增与能量密度骤降，能够在热安全、系统轻量化与能量密度之间实现较好的平衡。

Table 4. Indicator weights calculated by the entropy weight method

表 4. 熵权法计算的各指标权重

指标	信息熵值 e	信息效用值 d	权重系数 w
体积能量密度	0.8201	0.1799	39.2466%
系统总质量	0.8382	0.1618	35.2840%
最高温度	0.8832	0.1168	25.4694%

Table 5. Comprehensive evaluation results of different battery spacing schemes based on TOPSIS

表 5. 不同电池间距方案的 TOPSIS 综合评价结果

单体电池间距(mm)	正理想解距离 D+	负理想解距离 D-	相对接近度 C	排序结果
1	0.134	0.361	0.730	2
2	0.106	0.291	0.734	1
3	0.156	0.234	0.601	3
4	0.225	0.185	0.451	4
5	0.294	0.146	0.332	5
6	0.361	0.134	0.270	6

3.5. PCM 性质对电池组散热性能的影响

本节在环境温度 25℃，3C 放电倍率、单体电池间距 $d=5$ mm 的条件下，研究了 PCM 的熔点、导热系数、和潜热对电池组散热性能的影响。

图 13 为不同 PCM 熔点下，电池组放电过程的最高温度。由图 13 可见，在放电过程的前 200 s 内，不同熔点的温度曲线几乎重合。另外，随着 PCM 熔点的升高，电池组的最高温度增大，熔点从 303.15 K 升高至 315.15 K，放电结束时电池组最高温度从 321 K 增加至 327 K，电池组最高温度上升了 6 K。这是由于放电初期电池产热较少，温度较低，所有 PCM 均未达到相变熔点，仅依靠显热方式吸收热量，因此熔点高低对电池温升无显著影响。当放电进入中后期，最高温度曲线开始出现明显分化，熔点越低的 PCM (如 303.15 K) 越早进入相变潜热吸热阶段，通过吸收大量热量来延缓电池温升，其温度曲线的上升斜率显著变缓；而熔点越高的 PCM (如 315.15 K) 则越晚进入相变潜热吸热阶段，电池温度在更长时间内仅靠显热吸热控制，温升速率较快，最终导致放电结束时的最高温度较高。这一规律表明，PCM 的熔点直接决定了潜热控制温度的发生时机，熔点越低，控温介入越早，电池组的最终温度也越小。

由图 13 还可发现，在放电后期(1100 s 以后)，高熔点 PCM 对应的温升曲线表现出更为平缓的上升趋势。这是由于，低熔点 PCM 因相变启动早，在放电中前期液相率已处于较高水平，意味着其潜热能力被快速消耗，冷却能力随之衰减，导致温升速率在后段有所回升。相反，高熔点 PCM 相变相对于低熔点更晚，因此液相率更低，在放电后期还能有相对更多的 PCM 存在，使温升曲线在后期相对较为平缓。

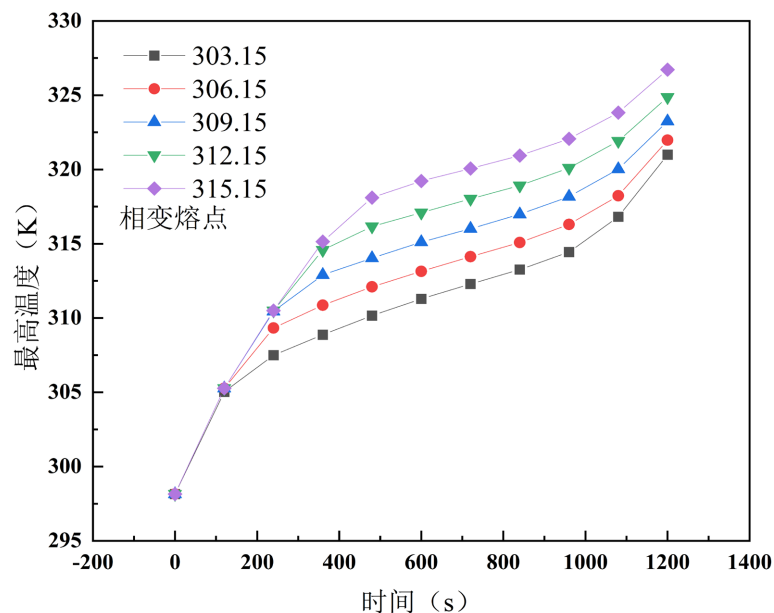


Figure 13. The effect of PCM melting point on the maximum temperature
图 13. PCM 熔点对最高温度的影响

图 14 为不同 PCM 导热系数下, 电池组放电过程的最高温度。由图 12 可以发现, 导热系数增加, 电池组最高温度显著下降, 最高温度升高速率显著变缓。导热系数从 $0.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $4.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 放电结束后的电池组最高温度由 323 K 下降到 316 K , 温度下降达 7 K 。这是由于在导热系数较低时, PCM 内部的热量传导效率较低, 电池产生的热量难以快速扩散至整个 PCM, 因此在电池表面容易形成局部高温区, 此时提升导热系数, 能够显著加快热量在 PCM 中的传导速率, 使更多 PCM 参与热量的吸收, 从而更高效地缓冲电池产热带来的温升, 因此电池组最高温度出现大幅下降, 温升曲线也更平缓。

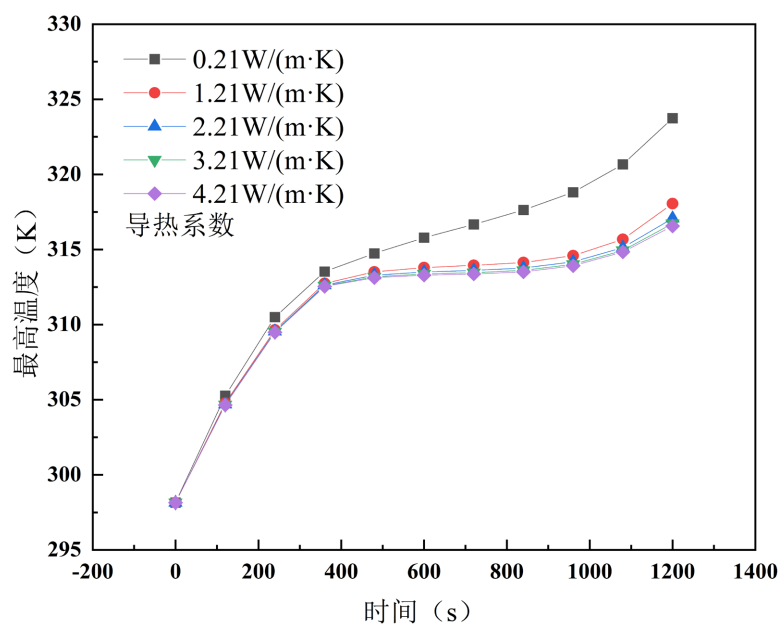


Figure 14. The effect of thermal conductivity on the maximum temperature
图 14. 导热系数对最高温度的影响

图 15 为不同 PCM 潜热下，电池组放电过程的最高温度。由图 15 可以发现，在放电开始的前 400 s 内，不同 PCM 潜热下的温度曲线基本重合，这是因为在放电初期，电池产热较少，PCM 未发生相变，此时 PCM 仅以固态形式通过显热方式吸收热量，不同潜热的 PCM 在固态下的显热比热容较为接近，因此这一阶段的热量吸收效率差异很小，导致不同 PCM 潜热的温度曲线高度接近。

另外，自放电 400 s 起至放电结束，随着 PCM 潜热从 185 J/g 增大至 265 J/g，电池组的最高温度曲线呈现下移现象，放电结束后的最高温度为 322 K 左右，相较于潜热为 185 J/g 时，电池组最高温度下降约 3 K。这是由于，随着放电持续进行，电池产热不断累积，低潜热 PCM 的热量存储容量会更快耗尽，剩余热量只能依赖显热传导导出，导致电池温度加速上升；而高潜热 PCM 则能吸收更多热量，维持相对平缓的温度增长趋势。

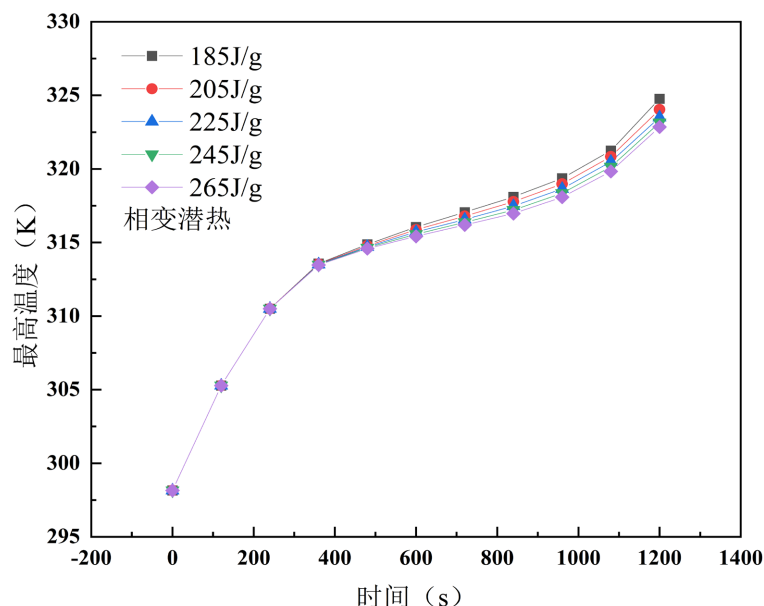


Figure 15. The effect of latent heat of phase transition on the maximum temperature
图 15. 相变潜热对最高温度的影响

4. 结论

本文采用 Fluent 软件建立了 PCM 电池组仿真模型，比较了 PCM 冷却和自然对流冷却下电池组的散热性能，分析了 PCM 电池组放电过程和放电结束后的冷却恢复过程，并研究了单体电池间距和 PCM 性质对电池组散热性能的影响规律。主要结论如下：

1) 在电池组周围均匀布置 PCM 可以有效降低电池组的最高温度。在 1C、2C 和 3C 放电倍率下，放电结束后，相对于自然对流冷却，PCM 冷却可使电池组温度分别降低约 3 K、8 K 和 6 K。

2) PCM 可显著降低电池组最高温度，但完全熔化后即进入热饱和状态，失去持续控温能力，并且 PCM 凝固存在滞后，冷却全过程液相率仅由 1.0 降至 0.75 左右，仅凝固约 25%，潜热储能能力恢复缓慢。

3) 单体电池间距增加可显著提高电池组的散热性能。间距从 1 mm 增加至 6 mm，放电结束时电池组最高温度由 320 K 降至 314 K，温度降低达 6 K，电池组最大温差从 8.40 K 下降到了 3.58 K，降幅高达 57.4%。

4) 随着单体电池间距的增加，电池组最高温度逐渐降低，热安全性能得到提升，但同时导致系统总

质量增加 13.47%、体积能量密度下降 25.79%。

5) PCM 的熔点降低、导热系数增大、潜热升高均会降低电池组的最高温度。

基金项目

四川省中央引导地方科技发展专项项目(2025ZYD0063)。

参考文献

- [1] Ali, A.O., Abdelrehim, O., Saafan, M.M., Elmarghany, M.R. and Hamed, A.M. (2025) Comprehensive Review of Battery Management Systems for Electric Vehicles: Thermal Management, Charging Strategies, and Emerging Technologies. *Journal of Power Sources*, **658**, Article ID: 238269. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238269>
- [2] Takiso, T.A. and Yu, J. (2025) Research Progress on the Optimization of Thermal Management Systems for Lithium-Ion Batteries in New Energy Vehicles. *Journal of Energy Storage*, **134**, Article ID: 118144. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118144>
- [3] Wu, M. (2022) Multi-Objective Optimization of U-Type Air-Cooled Thermal Management System for Enhanced Cooling Behavior of Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Energy Storage*, **56**, Article ID: 106004. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106004>
- [4] 徐志龙, 田玉冬, 李静红, 等. 电动汽车动力电池的发展与温度管理现状[J]. 汽车电器, 2018(3): 1-3.
- [5] Yang, Z., Huang, H. and Lin, F. (2022) Sustainable Electric Vehicle Batteries for a Sustainable World: Perspectives on Battery Cathodes, Environment, Supply Chain, Manufacturing, Life Cycle, and Policy. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1002/aenm.202200383>
- [6] He, L., Jing, H., Zhang, Y., Li, P. and Gu, Z. (2023) Review of Thermal Management System for Battery Electric Vehicle. *Journal of Energy Storage*, **59**, Article ID: 106443. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>
- [7] 刘奇. 基于相变材料的锂离子电池热管理系统性能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [8] 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]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [9] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J. and Chen, C. (2012) Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, **208**, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>
- [10] Grandjean, T., Barai, A., Hosseinzadeh, E., Guo, Y., McGordon, A. and Marco, J. (2017) Large Format Lithium Ion Pouch Cell Full Thermal Characterisation for Improved Electric Vehicle Thermal Management. *Journal of Power Sources*, **359**, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.016>
- [11] Gümüşsu, E., Ekici, Ö. and Köksal, M. (2017) 3-D CFD Modeling and Experimental Testing of Thermal Behavior of a Li-Ion Battery. *Applied Thermal Engineering*, **120**, 484-495. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.017>
- [12] 邵丹, 骆相宜, 钟灿鸣, 等. 动力锂离子电池安全性研究的进展[J]. 电池, 2020, 50(1): 83-86.
- [13] 杨梓堙. 基于复合相变材料与液冷结合的车用锂离子电池模组散热性能研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [14] Verma, A., Shashidhara, S. and Rakshit, D. (2019) A Comparative Study on Battery Thermal Management Using Phase Change Material (PCM). *Thermal Science and Engineering Progress*, **11**, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.003>
- [15] Li, Y., Du, Y., Xu, T., Wu, H., Zhou, X., Ling, Z., et al. (2018) Optimization of Thermal Management System for Li-Ion Batteries Using Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, **131**, 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.055>
- [16] Sato, N. (2001) Thermal Behavior Analysis of Lithium-Ion Batteries for Electric and Hybrid Vehicles. *Journal of Power Sources*, **99**, 70-77. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(01\)00478-5](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(01)00478-5)
- [17] Tousi, M., Sarchami, A., Kiani, M., Najafi, M. and Houshfar, E. (2021) Numerical Study of Novel Liquid-Cooled Thermal Management System for Cylindrical Li-Ion Battery Packs under High Discharge Rate Based on AgO Nanofluid and Copper Sheath. *Journal of Energy Storage*, **41**, Article ID: 102910. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102910>
- [18] 高卫林. 血管型相变液冷复合式锂电池组热管理性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [19] Pesaran, A., Keyser, M. and Burch, S. (1999) An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs. National Renewable Energy Laboratory.
- [20] Bernardi, D., Pawlikowski, E. and Newman, J. (1985) A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of The*

Electrochemical Society, **132**, 5-12. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>

- [21] 吴启超. 圆柱形电池单体温度状态及其对电池性能的影响研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [22] Liao, G., Jiang, K., Zhang, F., E, J., Liu, L., Chen, J., *et al.* (2021) Thermal Performance of Battery Thermal Management System Coupled with Phase Change Material and Thermoelectric Elements. *Journal of Energy Storage*, **43**, Article ID: 103217. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103217>