

## 循环充放电下锂电池组相变材料热管理研究

何润楠, 易升林, 周于帅, 朱承志\*

重庆科技大学安全科学与工程学院 重庆

**【摘要】** 本文通过 CC-CV 充电曲线与电池发热 UDF 算法建立 4S4P 电池模组 (14.4 V/19.6 Ah) 的数值模型, 系统研究了不同横向间距下锂电池组循环充放电下相变材料 (PCM) 的相变演化规律与热响应特性。研究结果表明, 增大间距可显著降低峰值温度, 并推迟 PCM 液化起始时间。同时, 二次放电过程中电池温升速率随间距减小而显著上升, 最大增幅达 34%, 较大间距可有效抑制第二轮循环的峰值温度, 并缩短超温运行时间。

**【关键词】** 锂电池; 充放电研究; 相变材料; 热管理

**【基金项目】** 重庆科技大学硕士研究生创新计划项目“非均匀复合相变材料的电池热管理研究” (YKJCX2420722)

**【收稿日期】** 2025 年 7 月 15 日      **【出刊日期】** 2025 年 8 月 16 日      **【DOI】** 10.12208/j.sdr.20250149

### Study on thermal management of battery packs using phase change materials under cyclic charge–discharge conditions

*Runnan He, Shenglin Yi, Yushuai Zhou, Chengzhi Zhu\**

*School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing*

**【Abstract】** This study numerically investigates the phase change evolution and thermal response characteristics of phase change materials (PCM) in a lithium-ion battery pack under cyclic charge and discharge conditions, specifically focusing on a 4S4P battery module (14.4 V/19.6 Ah) with varying lateral spacings. This was achieved by establishing a numerical model utilizing CC-CV charging curves and a battery thermal UDF algorithm. The research findings indicate that increasing the spacing significantly reduces the peak temperature and postpones the initiation of PCM liquefaction. Concurrently, the battery temperature rise rate during the second discharge process markedly increases with decreasing spacing, with a maximum increment of 34%. Larger spacings effectively suppress the peak temperature in the second cycle and shorten the duration of operation above optimal temperatures.

**【Keywords】** Lithium-ion battery; Charge–discharge; PCM; Thermal management

随着化石能源枯竭与环境问题加剧, 电动汽车作为清洁能源载体已成为交通转型核心。锂离子电池因高能量密度和长寿命被广泛应用, 但运行中易出现局部过热, 热点区域限制系统性能并带来安全隐患<sup>[1]</sup>。在高速率充放电等严苛工况下, 电池温度迅速升高, 可能触发热失控, 导致起火或爆炸等严重安全事件<sup>[2]</sup>。因此, 电池热管理系统 (Battery Thermal Management System, BTMS) 在设计中如何有效控制峰值温度并实现热场均匀分布, 已成为提升系统

性能与运行安全的关键技术挑战。

传统 BTMS 技术如风冷<sup>[3,4]</sup>、液冷<sup>[5,6]</sup>及热管<sup>[7,8]</sup>虽可实现有效温控, 但依赖泵、风机等外部设备, 增加系统复杂性与整车重量。相比之下, 被动冷却系统结构简洁、无需外部能耗, 尤以基于相变材料 (PCM) 的热管理技术最具潜力。该技术通过固-液相变过程吸收/释放潜热, 有效维持温度稳定, 具备结构紧凑与良好温度均匀性等优势, 已成为近年来研究焦点<sup>[9]</sup>。

作者简介: 何润楠 (2001-) 男, 硕士研究生, 重庆沙坪坝, 研究方向为锂电池热管理;  
\*通讯作者: 朱承志 (1993-) 男, 博士, 讲师, 重庆沙坪坝, 研究方向为微尺度散热传热。

针对上述问题, 本研究构建了多物理场耦合的数值模拟模型, 系统分析连续充放电循环下不同横向布置尺度对 PCM 电池组热响应及液相演化的影响。模型引入电池动态放电和真实 CC-CV 充电曲线<sup>[10]</sup>, 更准确反映电池内部热源的时间演变。基于

温度场与相变过程协同分析, 揭示结构参数对热管理性能的作用机制, 为轻量化、高效且可持续的被动 BTMS 设计提供理论支持和工程指导。

## 1 数学物理模型

### 1.1 物理模型和数学方法

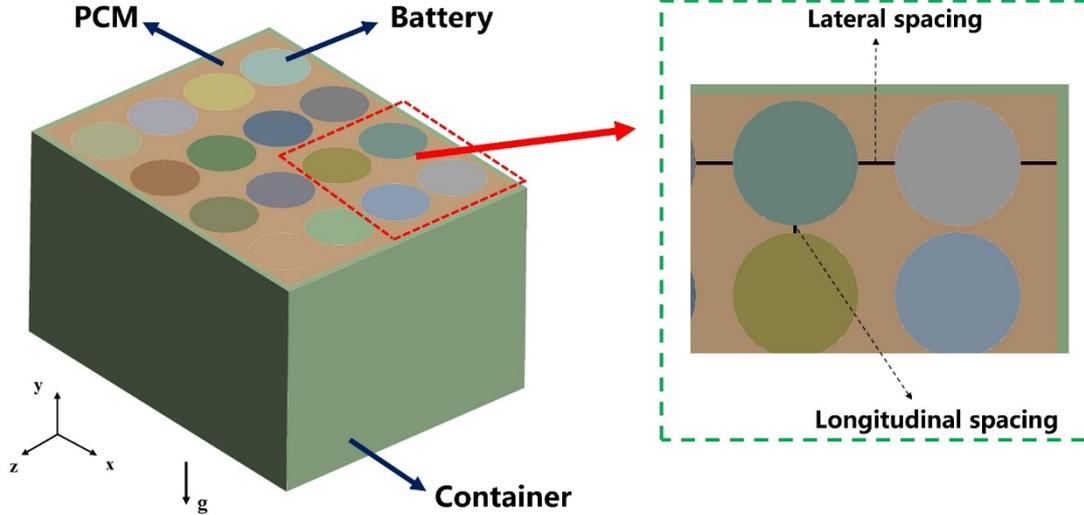


图 1 填充 PCM 的锂离子电池模块三维模型

图 1 展示了本研究所采用的电池模块几何模型。该模块由 16 颗 21700 型锂离子电池 (4.9 Ah, 标称电压 3.6 V, 内阻约 15 mΩ) 组成, 采用四串四并 (4S4P) 方式构成 14.4 V、19.6 Ah 的电池组。所有电池封装于尼龙容器内, 电池与容器之间均匀填充石蜡基 PCM (OP44E), 以提升热管理性能。

本研究中, 几何模型采用参数化设计, 重点考察电池横向间距对相变热管理效果的影响。横向间距范围设为 1–8 mm, 涵盖电池间距及与容器壁之间的距离, 具体如图 1 局部放大图所示; 纵向间距则固定为 1 mm, 以模拟实际紧凑型电池模块的布置特征。

本研究利用 ANSYS Fluent 内置的凝固-熔化模型, 模拟固液相变的热传导, 初始温度设为 298.15 K, 重力加速度沿 Y 轴为 -9.81 m/s<sup>2</sup>。考虑电池组非绝热, 采用 5 W/(m<sup>2</sup>·K) 的自然对流换热系数模拟电池外表面与空气的热交换。通过用户自定义函数 (UDF), 将各电池单元设为独立热源, 实现放电及快充过程的动态热源耦合模拟。

#### 1.2 控制方程

焓-多孔介质模型被用于模拟 PCM 中相界面的演化过程。该方法对解决电池热管理系统 (BTMS) 中的三维瞬态传热问题至关重要。为降低计算复杂度, 需建立以下假设:

- (1) Boussinesq 近似法来考虑 PCM 液相中的自然对流效应。
- (2) 假设液态 PCM 的流动为层流、不可压缩且符合牛顿流体特性。
- (3) 认为 PCM 的热物性参数具有均匀性和各向同性。
- (4) 本研究未考虑辐射传热。

PCM 模型的控制方程如下:

连续性方程:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\rho \vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

$\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) 是液态石蜡的密度,  $v$  ( $\text{m/s}$ ) 为速度矢量,  $\mu$  为动力黏度,  $H$  为相变焓,  $k$  是热导率,  $S = \frac{\rho}{c_{pp}} \frac{\partial H}{\partial t}$  是能量源项,  $\vec{g}$  ( $\text{m/s}^2$ ) 为重力加速度。

$\vec{F}$  (N) 为动量源项,

$$\vec{F} = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + 0.001} A_{mush} \vec{g} \quad (4)$$

$\beta$  表示液相体积分数,  $A_{mush}$  为糊状区参数, 通常取值在  $10^5$  至  $10^7$ [11]。在本研究中, 糊状区常数取  $10^5$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单次放电后的热性能分析

本节首先研究了在第一次放电时, 不同的电池横向间距对仅使用单一进行热管理的电池模块的影响。

在本节研究中, 共设置了 8 组不同的电池横向间距, 从 1 mm 至 8 mm。

随着横向间距的增大, 电池模块总体积随之增加, PCM 的体积分数也呈上升趋势。本节数值模拟设定环境温度为 298.15 K (25 °C), 放电倍率为 2 C, 对应放电时间为 1800 s。

图 2(a) 显示电池间距增大使系统最高温下降、最低温稳定, 间距主要影响最高温; 图 2 (b) 表明液相率与间距负相关, 间距大则液化延迟; 图 3 显示间距大时 PCM 完全液化区减小、液化不均; 图 4 显示温差曲线先升后降再迅速增大, 拐点随间距增大延后, 与液化起始时间一致, 进一步验证了 PCM 在缓解热集中、优化热传导及提升温控性能方面的显著作用与可靠性。

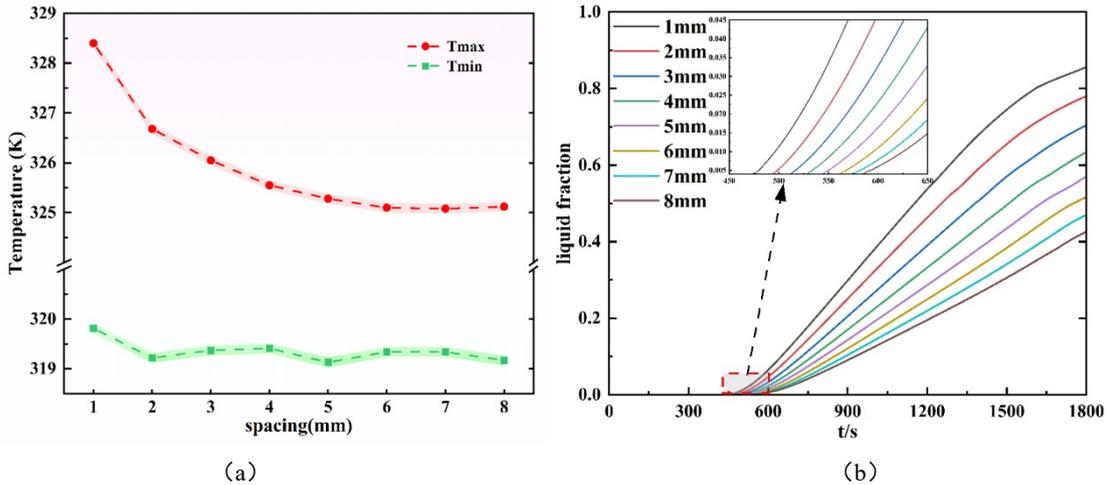


图 2 不同间距下的最大与最小温度 (a) 以及液相分数变化曲线 (b)

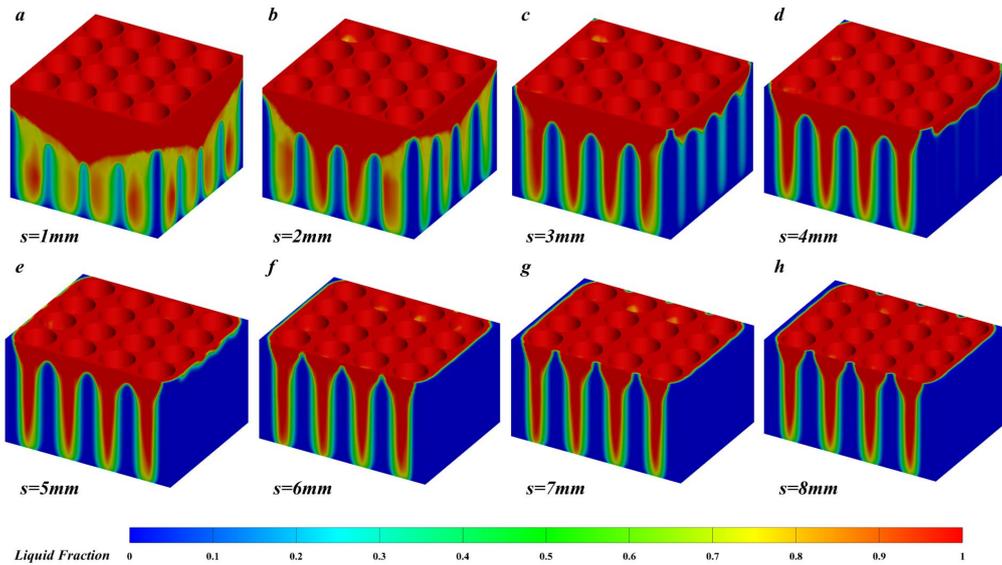


图 3 在 1 - 8 mm 间距条件下 PCM 在 1800 s 时刻的液相分布云图

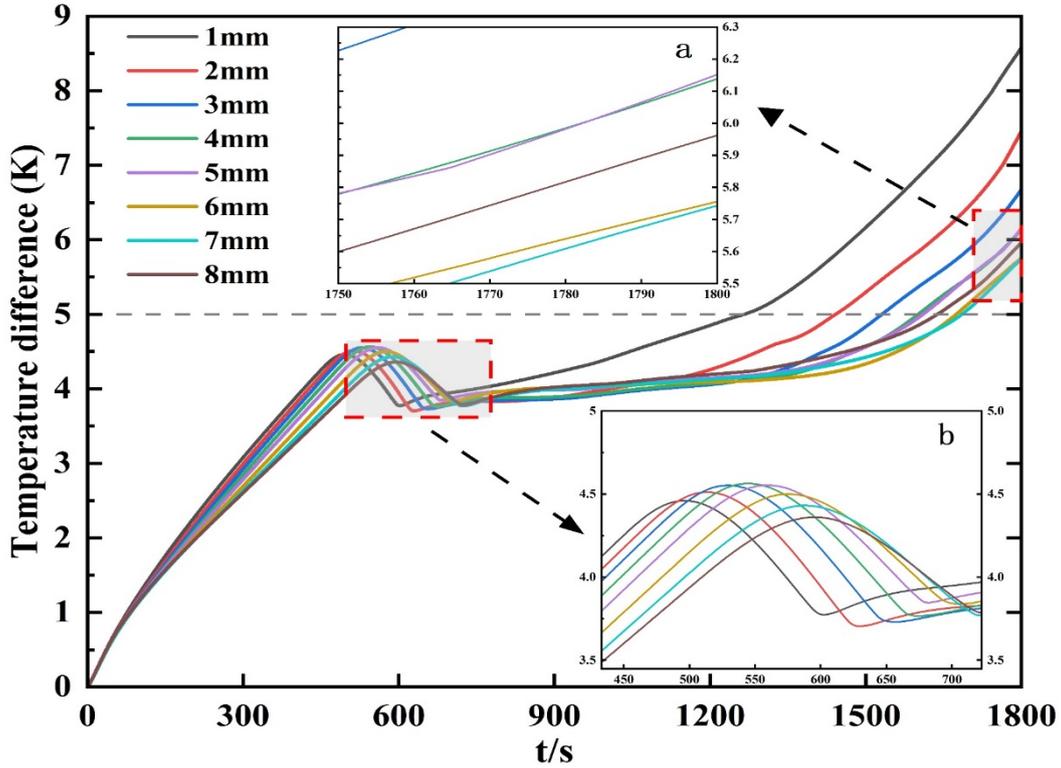


图 4 不同间距条件下电池模块的温差变化曲线

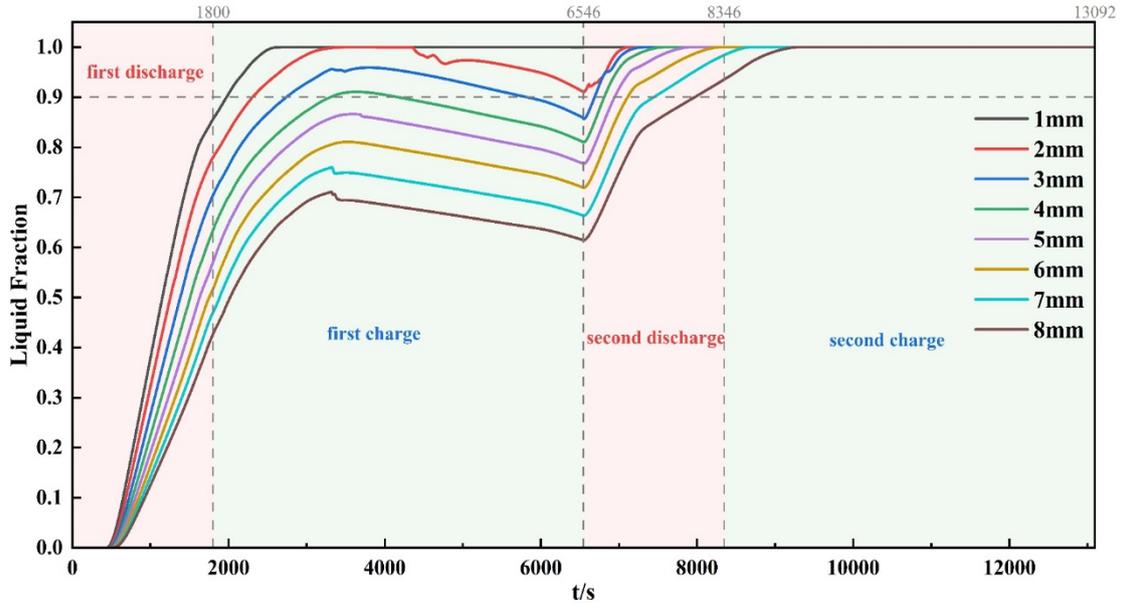


图 5 循环充放电过程中液相分数的变化曲线

### 2.2 循环充放电过程中的热性能分析

在前一节主要分析了电池首次放电过程中的热物理参数变化基础上, 本节结合前文构建的适用于电池快速充电的用户自定义函数 (UDF), 对重复充放电循环进行了数值模拟。充电时长设为 4746 s, 使得一次完整充放电循环时间为 6546 s, 模拟两次

循环总时长 13092 s。环境温度及其他边界条件保持不变, 仅替换了发热热源的 UDF。该模拟旨在深入探讨电池组及 PCM 在多次循环后的温度分布、相态演变及热响应特性。

如图 5 所示表明了 PCM 在快充后期逐步释放热量并发生固化过程。

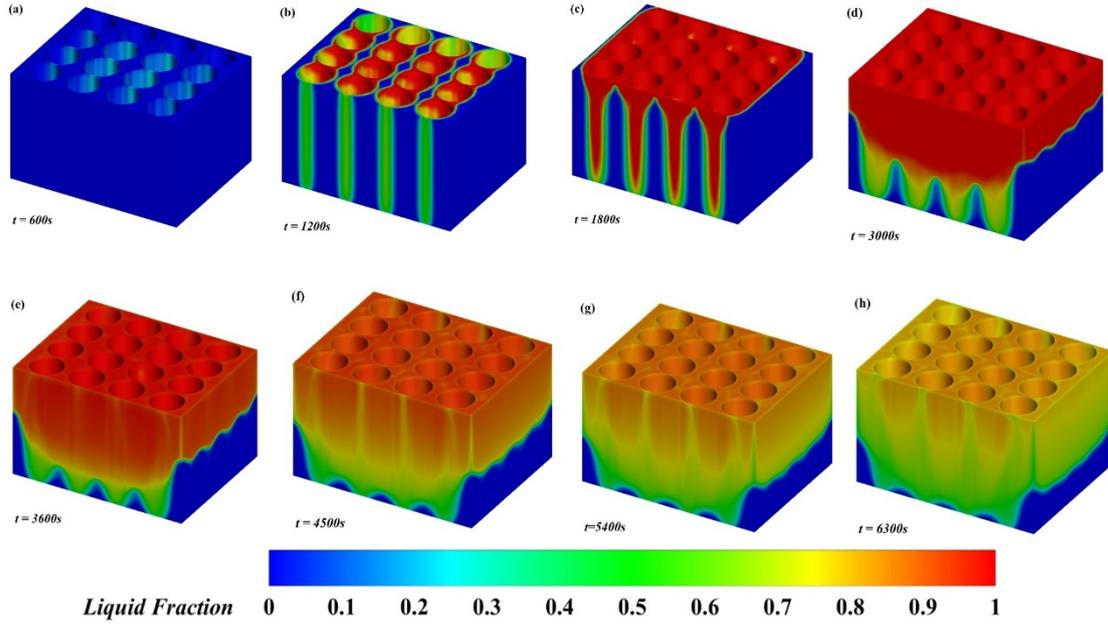


图 6 在 6 mm 间距条件下不同时刻 PCM 的液相分布云图

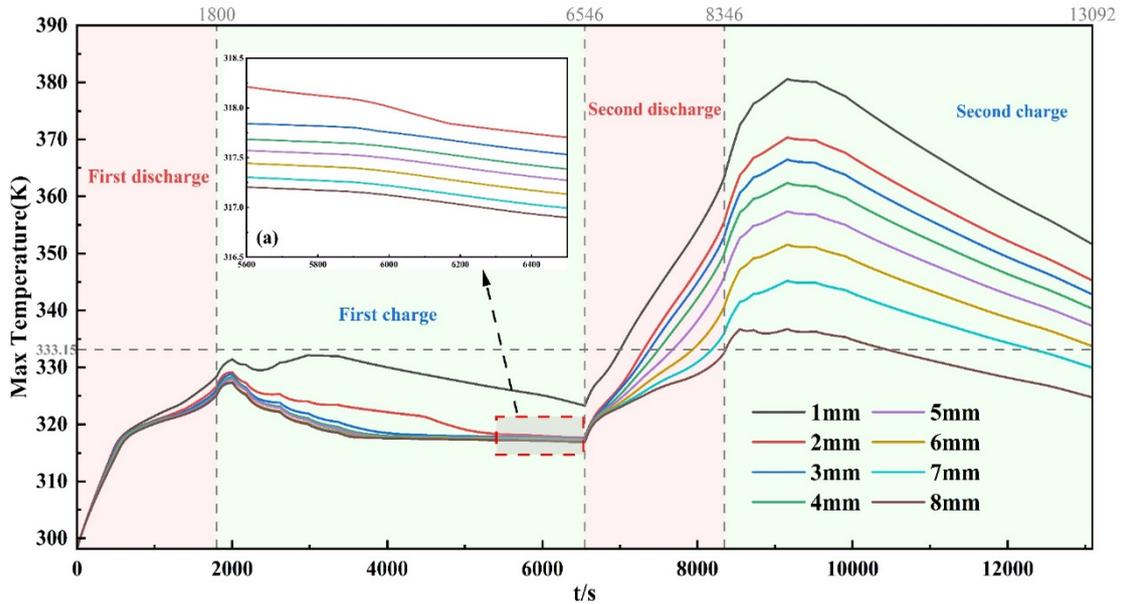


图 7 循环充放电过程中最高温度的变化规律

在第二轮放充电循环中,各间距下的 PCM 液相率都攀升至 1,因此为更好研究 PCM 液相分布的情况和变化过程,本文展示了图 6 中 Case 6 在第一轮循环下的各时间点的液相分布云图。

如图 6 所示部分区域开始由完全液化转向部分固化。至充电结束时,PCM 核心液相率回落至约 0.75,进入能量释放和逆向相变调节阶段。

值得注意的是,Case 1 中,PCM 在首次充电时就全程保持完全液化状态。这主要归因于间距过小

导致热量难以扩散,使 PCM 长时间处于过热液态。Case 2 的液相率虽略低于 Case 1,但仍保持在 0.9 以上,基本失去对后续放电热量的调节与缓冲能力。因此,后续研究中不再对 Case 1 与 Case 2 进行深入讨论和分析。

图 7 展示了重复放充电全周期 (0 s - 13092 s) 内电池最高温度的变化。在第一次快充阶段,充电电流逐渐衰减且 PCM 持续吸热,使各组电池最高温度呈阶梯式下降,体现出良好的热缓冲性能。所有间距

条件下电池充电结束时最高温度稳定在 317 - 318 K 区间, 与 PCM 的相变温度范围 (313.75 - 317.85 K) 高度吻合, 随着电流强度逐渐减小, 温度呈回落趋势。

图 8 展示了 Case 1 至 Case 8 在两次完整放 - 充

电循环中的温差变化曲线。整体上, 各工况温差走势较为一致, 但峰值时刻及充电后期表现出明显的间距依赖性, 电池模组的热均匀性与结构参数呈显著相关性。

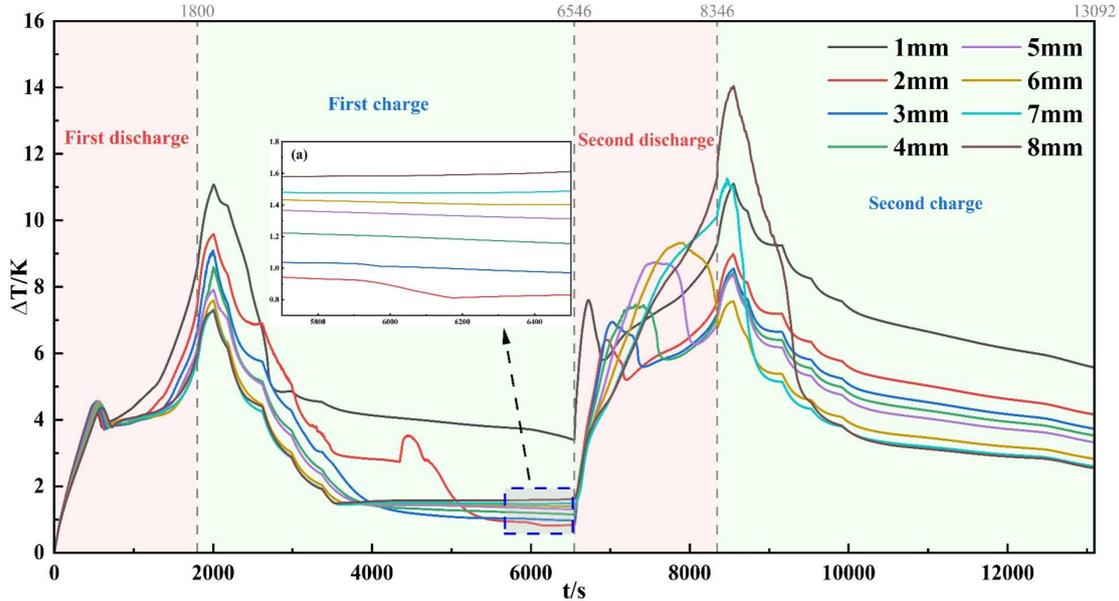


图 8 循环充放电过程中温差的变化曲线

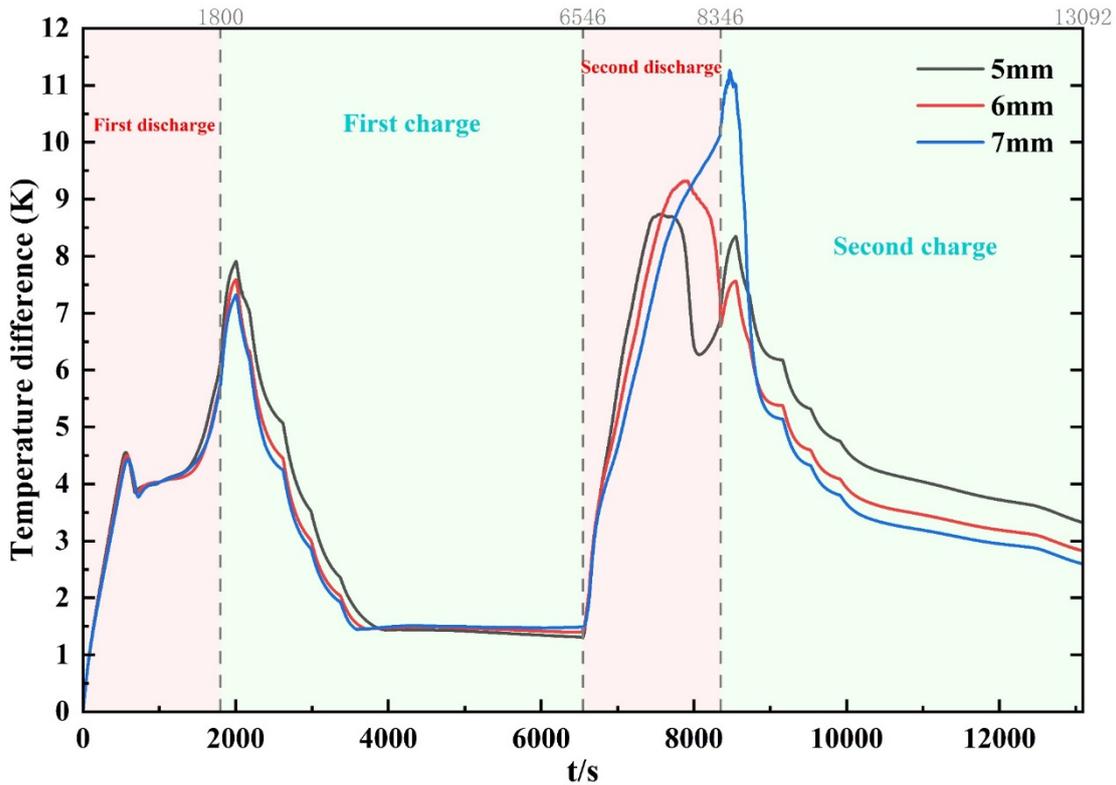


图 9 在 5 - 7 mm 间距条件下电池组的温差分布曲线

然而, 温差的下降并不代表热管理性能的提升。此阶段 PCM 已完全液化, 失去调温能力, 温差缩小

实则源于热扩散主导下系统趋于热均衡的表象, 反映出热缓冲能力的丧失, 反而隐藏着热失控风险。

相比之下, Case 7 在相同阶段温差持续上升, 最终达 11.25 K, 并非热控性能更差, 而是由于横向结构尺寸较大, 传热路径更长, 导致散热边界附近热量释放快、远离边界区域热量滞留, 形成局部温场非均匀性, 造成温差扩大。尽管温差较大, 但其最高温度始终低于 Case 5 与 Case 6, 最大降低达 12.18 K, 显示出其在高热负荷下更强的稳态控温能力。

综上, 结合图 5、图 7 和图 8 的液相率、最高温度与温差分析可见, 若仅以温差控制在 5 K 以内作为衡量电池热管理系统性能的标准过于片面。在 PCM 完全熔化、失去调温功能的情况下, 温差下降并不代表热风险降低, 反而可能掩盖热失控的隐患。长时间超温不仅削弱热管理系统的稳定性, 也显著提高热失控风险, 特别是在高负载充放电条件下更易诱发热失稳。因此, 评估基于 PCM 的 BTMS 性能需综合考虑液相率演化、温差变化与峰值温度等关键热参数, 建立更全面的热风险评价体系, 避免因依赖单一指标而导致设计误判和安全问题。

### 3 结论

本研究为 4S4P 锂离子电池模块 (14.4V, 19.6Ah) 集成 PCM 确定最优横向电芯间距, 构建参数化数值模型并耦合动态热源模拟, 分析 1-8mm 间距热行为。结果如下: 第一次放电阶段, 间距 1-8mm, 最高温随间距增下降 (1-5mm 最显著), 最低温稳定 (319.1-319.8K), 起始液相点随间距增后移, 间距增 1mm, 起始液化时间延迟 1.9%, 与温差变化曲线时间协同。连续两轮放充电循环, 第一轮结束, Case3-Case8 最高温度约 317K, 因 PCM 控温保温能力; 第二轮循环, PCM 液化程度高, 热调节能力衰减, 第二次放电温升速率随间距减显著上升, 最大增 34%, 致 Case5、Case7 最高温度差扩至 12.18K, 运行超安全温度上限时间差 1272s, 热失控风险加剧。空间受限场景, 5mm 间距可实现单次放充电热管理; 电池热安全优先, 7mm 间距较 5mm 可缩短多轮循环超温时间, 但电池模块体积增 18.7%。

### 参考文献

- [1] Patel J R, Rathod M K. Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries [J]. Journal of power sources, 2020, 480: 228820.
- [2] Wang Q, Jiang B, Li B, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries

for the development of pure electric vehicles [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 64: 106-128.

- [3] Chen K, Wu W, Yuan F, et al. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern [J]. Energy, 2019, 167: 781-790.
- [4] Kumar S D, Aneesh P. A review on air cooled and air centric hybrid thermal management techniques for Li-ion battery packs in electric vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41.
- [5] Yize Z, Xuelai Z, Bo Y, et al. A review of battery thermal management systems using liquid cooling and PCM [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 76.
- [6] Wang Y, Wang Y, He T, et al. A numerical study on a hybrid battery thermal management system based on PCM and wavy microchannel liquid cooling [J]. Renewable Energy, 2024, 235: 121273-121273.
- [7] Mengliang Y, Yunhua G, Jialin L, et al. Performance simulation of a heat pipe and refrigerant-based lithium-ion battery thermal management system coupled with electric vehicle air-conditioning [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 191.
- [8] Peng P, Yiwei W, Fangming J. Numerical study of PCM thermal behavior of a novel PCM-heat pipe combined system for Li-ion battery thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209.
- [9] Yang C, Xu X R, Bake M, et al. Numerical investigation and optimization of the melting performance of latent heat thermal energy storage unit strengthened by graded metal foam and mechanical rotation [J]. Renewable Energy, 2024, 227: 120537-.
- [10] 陈国文. 基于相变冷却的锂离子电池充放电热管理研究[D]. 长安大学, 2024.
- [11] Hosseini M J, Ranjbar A A, Sedighi K, et al. A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(9): 1416-1424.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS