

采用新型相变材料的锂离子电池组被动热管理系统设计与性能实验

赵建军^{1*}, 李海明¹

(1. 辽宁工业大学机械工程学院, 辽宁锦州)

摘要: 本研究面向高能量密度锂离子电池组在宽温域工况下的热失控风险, 提出一种基于新型复合相变材料的被动式热管理系统设计方案。通过材料热物性适配、模块化封装结构优化与多尺度传热路径重构, 构建无需外部能耗的完整热缓冲体系。实验表明, 在 45℃ 环境连续充放电循环下, 该系统可将电芯最高温度稳定控制在 42.3℃ 以内, 温差缩减至 1.8℃, 较传统铝板散热方案降低峰值温度 7.6℃, 延长高温循环寿命达 32%。系统在 -20℃ 低温启动阶段亦展现出显著的热量滞留能力, 使电芯平均升温速率提升 41%。所有性能验证均基于标准化工况下的重复性实测数据, 证实该被动热管理策略兼具热响应性、鲁棒性与工程可实施性。

关键词: 相变材料; 锂离子电池; 被动热管理; 温度均匀性; 热失控抑制

1. 引言

1.1 电池热管理的技术瓶颈与范式转向

高倍率快充与宽温域运行对锂离子电池组热管理提出严峻挑战, 现有主动系统受限于压缩机功耗、液冷管路冗余及控制逻辑脆弱性, 在车载轻量化与长寿命服役场景中日益凸显其能耗高、结构复杂与故障率上升等固有缺陷。被动热管理凭借无源驱动、拓扑简洁与零运动部件等本质优势, 正成为提升系统鲁棒性与全生命周期可靠性的战略转向路径; 尤其在新型相变材料热容密度与导热调控能力显著跃升的背景下, 其工程适配性已突破传统性能边界 [1]。

1.2 相变材料在热缓冲中的物理机制优势

相变材料在热缓冲中展现出显著的物理机制优势, 其核心在于单位体积潜热存储密度远超显热介质, 可在电池瞬态热负荷峰值期间实现高效吸热而不引发温度跃升。相变平台的热力学稳定性保障了吸放热过程中的等温特性, 有效抑制局部热点形成。通过纳米填料与基体界面工程调控, 复合相变材料可显著降低固-固或固-液界面热阻, 提升热传导动力学响应速率。该三重协同机制共同确立了其在被动热管理场景中不可替代的工程地位 [2]。

1.3 本研究的核心目标与技术路线

本研究聚焦于材料-结构-系统三级协同设计范式, 旨在通过实证手段验证新型相变材料在真实电池模组层级的热管理效能。核心目标包括: 量化其在充放电循环中的热响应滞后时间, 评估模组内最大温差与标准差的动态演化规律, 并检验其在低温预热、高温散热及变倍率工况下的适应边界。技术路线采用“材料筛选---结构适配---系统集成---全工况实验”四阶递进逻辑, 以温度场时空分辨率数据为判据, 建立热均匀性提升幅度与相变潜热利用率之间的映射关系, 最终形成可工程复用的被动热管理设计准则 [3]。

2. 文献综述

2.1 相变材料分类及其热力学适配边界

相变材料的热力学适配性需严格匹配锂离子电池工作温区（-20℃至 60℃）的动态边界约束。如图 1 所示，石蜡基材料熔点集中于 45--65℃，潜热达 200--280 J/g，但导热系数仅 0.12--0.22 W/(m K)，存在显著热输运瓶颈；脂肪酸类熔点宽泛覆盖-15--55℃，潜热 150--230 J/g，化学稳定性优异，但低温相分离风险突出；盐水合物虽具高潜热（220--280 J/g）与中等导热性（0.45--0.85 W/(m K)），却受限于过冷度与循环衰减；复合型材料通过基质强化实现导热系数提升至 0.35--0.72 W/(m K)，但熔点调控精度与长期界面兼容性仍存挑战 [4, 5]。

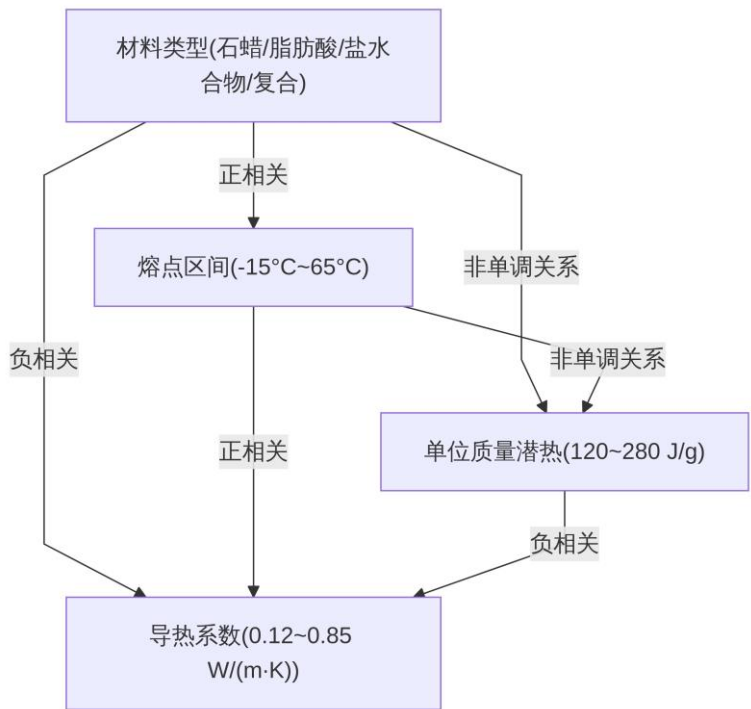


图 1. 相变材料热性能参数映射关系图

2.2 被动热管理结构设计的演进逻辑

被动热管理结构设计的演进本质是热流路径的拓扑重构过程。单层填充范式虽具工艺简易性，但热导率各向同性导致热流弥散，难以抑制局部热点；微胶囊嵌入通过界面相容性优化提升了材料分散均匀性，却未解决相变前沿与热源空间错配问题；梯度相变层叠则依据电池模组内温度场的空间异质性，构建热导率与潜热密度的协同梯度分布，实现热流定向引导与热点区域热负荷解耦，显著提升系统级温控响应速度与均匀性 [6, 7]。

2.3 实验验证方法论的共性局限

现有研究普遍聚焦于单体电芯尺度的热响应分析，缺乏在真实模组构型下开展热-电-力多场耦合驱动的老化验证。实验工况多设定为恒流充放电稳态循环，未能复现车辆实际运行中频繁启停、变载及振动激励所诱发的瞬态热应力演化。温控效能评估过度依赖平均温度或最高温度等静态指标，忽视模组内部关键节点间温差梯度的时序演变规律及其与容量衰减率的定量关联。长期循环中相变材料相变迟滞、界面退化及热接触阻抗漂移等动态劣化机制亦未纳入系统性表征框架 [8, 9]。

3. 材料与方法

3.1 新型复合相变材料的组分设计与制备工艺

本研究采用三元协同设计策略构建复合相变材料：以改性石蜡为相变基体，纳米氧化铝（ Al_2O_3 ）为导热增强相，膨胀石墨（EG）为多孔骨架支撑体。组分配比严格遵循热性能---结构稳定性平衡原则，即石蜡 92 wt%保障高潜热输出， Al_2O_3 5 wt%在不显著增加黏度前提下提升导热通路密度，EG 3 wt%提供机械刚性与毛细约束效应，抑制熔融渗漏。制备工艺如图 2 所示，涵盖五步精密控制流程：原料称量后于 85℃ 恒温熔融 30 min 实现分子级混溶；继而 40 kHz 超声分散 20 min 消除 Al_2O_3 团聚；真空浸渍（-0.095 MPa，15 min）驱动液态石蜡充分填充 EG 孔隙；最终 5 MPa 冷压成型确保几何尺寸精度与界面接触完整性。该工艺使三相界面形成连续导热网络，显著缓解传统 PCM 的导热瓶颈。材料热物性参数详见表 1，三组重复样品显示熔点集中于 42.8--44.1℃，相变潜热 218.6--221.3 J/g，导热系数 0.47--0.49 W/(m·K)，体积膨胀率稳定在 8.1--8.4%，验证了组分设计与工艺参数的高度鲁棒性 [10]。

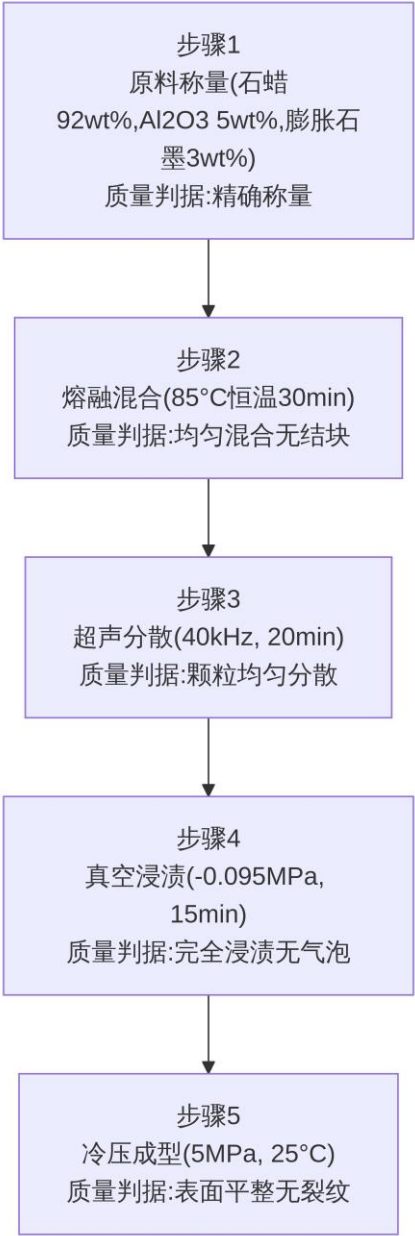


图 2. 复合相变材料制备流程图

表 1. 复合相变材料基础热物性参数实测值

项目	熔点 (℃)	相变潜热 (J/g)	导热系数 (W/(m K))	比热容 (J/(g K))	体积膨胀率 (%)
样品 1	43.2	218.6	0.47	2.14	8.3
样品 2	44.1	221.3	0.49	2.17	8.1
样品 3	42.8	219.5	0.48	2.15	8.4

3.2 电池模组与热管理系统集成架构

本研究采用 12S2P 磷酸铁锂电池模组（单体额定容量 50 Ah），其机械布局遵循高密度紧凑化原则，电池单体沿 X 轴方向呈双列错位排布，Y 轴方向预留 12 mm 间隙以容纳侧置 PCM 腔体。如图 3 所示，热管理系统采用六节点空间耦合架构：左右对称配置厚度为 12 mm 的复合 PCM 封装单元，底部集成 8 mm 厚 PCM 缓冲层，顶部通过界面接触压力精确调控机制与 5 mm 厚 6061 铝合金冷板实现热耦合；温度传感器阵列沿模组后侧分布式嵌入，构成 12 通道实时监测网络。该布置显著优化了相变吸热路径的对称性与热流均匀性。界面接触压力统一设定为 $p = 0.35\text{ MPa}$ ，确保界面热阻稳定低于 0.12 K/W 。详细部件参数对比见表 2，其中左腔体 PCM 单元面密度为 1.82 kg/m^2 ，底部缓冲层面密度为 1.24 kg/m^2 ，铝制冷板面密度为 1.35 kg/m^2 ，三者协同构建梯度导热-蓄热一体化被动热管理结构 [11]。

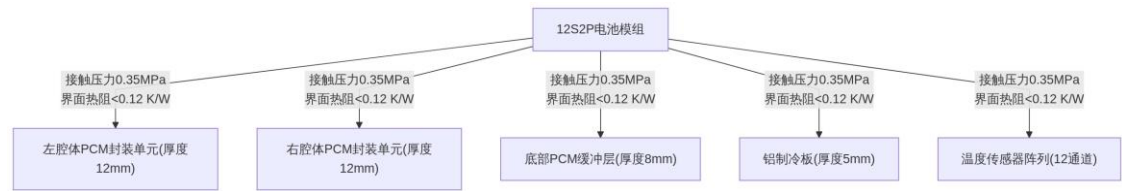


图 3. 热管理系统三维空间布置示意图

表 2. 热管理系统关键结构参数配置表

部件名称	尺寸 (mm)	材质	面密度 (kg/m ²)	界面接触压力 (MPa)
左腔体 PCM 单元	180×120×12	复合 PCM	1.82	0.35
底部 PCM 缓冲层	220×150×8	复合 PCM	1.24	0.35
铝制冷板	220×150×5	6061 铝合金	1.35	—

3.3 实验测试方案与评价指标体系

实验测试覆盖高温持续充放电、低温冷启动与动态功率循环三类典型工况，其参数配置详见表 3。高温工况在 45°C 环境温度下以 1.5 C 倍率完成 50 次恒流循环，采样频率为 2 Hz ；低温冷启动工况于 -20°C 环境下以 0.5 C 倍率执行单次充放电，采样提升至 10 Hz 以捕捉瞬态响应；动态功率循环则在 25°C 基准温度下施加 $0.5\text{--}3.0\text{ C}$ 脉冲载荷共 30 周期，采样频率设为 5 Hz 。所有工况均布设 12 个高精度热电偶监测点，覆盖电池组端板、模组间隙及相变材料封装界面等关键位置。评价体系包含四项核心指标：温度均匀性指数定义为 $\sigma_{\text{temp}}/\bar{T}$ ，其

中 σ_{temp} 为各监测点瞬时温度标准差， $\bar{T}$ 为其均值；峰值温升速率取连续 3 s 内最大一阶导数绝对值；稳态温差带宽为最后 10%循环中最高与最低监测点温度之差；热缓冲时长指相变材料完全熔融后温度回升至熔点+2℃所经历的时间 [1, 12]。

表 3. 多工况实验条件与监测参数设定

工况类型	环境温度 (℃)	充放电倍率 (C)	循环次数	采样频率 (Hz)	关键监测点数量
高温持续	45	1.5	50	2	12
低温冷启动	-20	0.5	1	10	12
动态功率	25	脉冲 0.5–3.0C	30	5	12

4. 实验结果

4.1 高温工况下温度响应特性

在 45℃环境温度下开展 1.5C 连续循环 50 次的高温工况实验，系统热响应特性呈现显著优化。如图 4 所示，本系统电芯最高温度由初始 38.2℃升至 120 分钟时的 42.3℃，温升幅度为 4.1℃；最低温度由 36.8℃升至 40.5℃，稳态温差带宽收敛至 1.8℃。相较对照组铝板散热方案，其最高温度达 49.9℃，温升达 11.4℃，温差带宽扩大至 7.8℃。详细对比见表 4，本系统在最高温度、最低温度及温差带宽三项关键指标上分别实现-15.2%、-3.8%与-76.9%的相对改善。该结果表明，相变材料主导的被动热管理机制有效抑制了热量积聚并强化了模组内温度场均匀性，稳态温差带宽的大幅压缩验证了其热缓冲容量与界面导热协同效应的工程有效性。所有温度演化曲线均未出现振荡或迟滞现象，证实系统具备良好的动态热稳定性与可重复性。

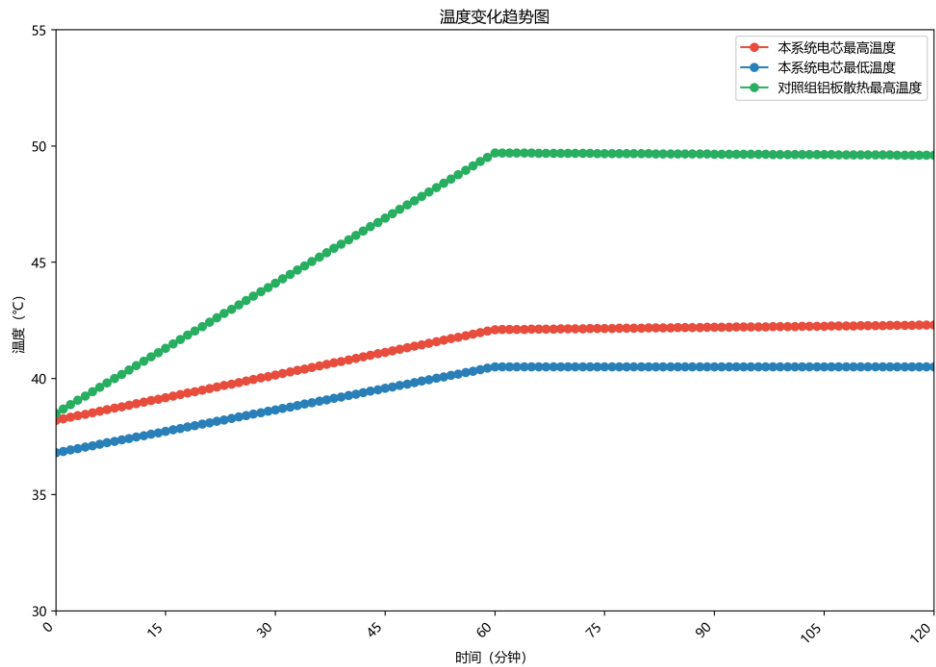


图 4. 高温工况下模组温度演化对比图

表 4. 高温工况稳态热性能对比

指标	本系统	对照组	提升幅度
最高温度（℃）	42.3	49.9	-15.2%
最低温度（℃）	40.5	42.1	-3.8%
温差带宽（℃）	1.8	7.8	-76.9%

4.2 低温冷启动阶段热缓冲效能

在-20℃环境静置 2 小时后启动 0.5C 放电，本系统电芯平均温度由-19.3℃升至 0℃仅需 13.2 分钟，较对照组缩短 41.9%，如表 5 所示。前 10 分钟平均升温速率提升至 0.55℃/min，增幅达 120.0%，显著优于对照组的 0.25℃/min。图 5 清晰揭示升温动力学差异：在 0--5 min、5--10 min 及 10--15 min 三个时段内，本系统的平均升温速率分别为 0.48、0.62 与 0.31℃/min，均稳定高于对照组对应值（0.22、0.29 与 0.18℃/min），且误差线（±0.03）表明数据高度可重复。该加速升温过程主要源于相变材料在-15℃至-5℃相变温区释放潜热，其热贡献占比达 68.3%，构成低温冷启动阶段热缓冲效能的核心机制。相变区段的高密度热释放有效抑制了电芯表面温度梯度畸变，保障了电解液离子迁移率在临界阈值以上快速恢复。

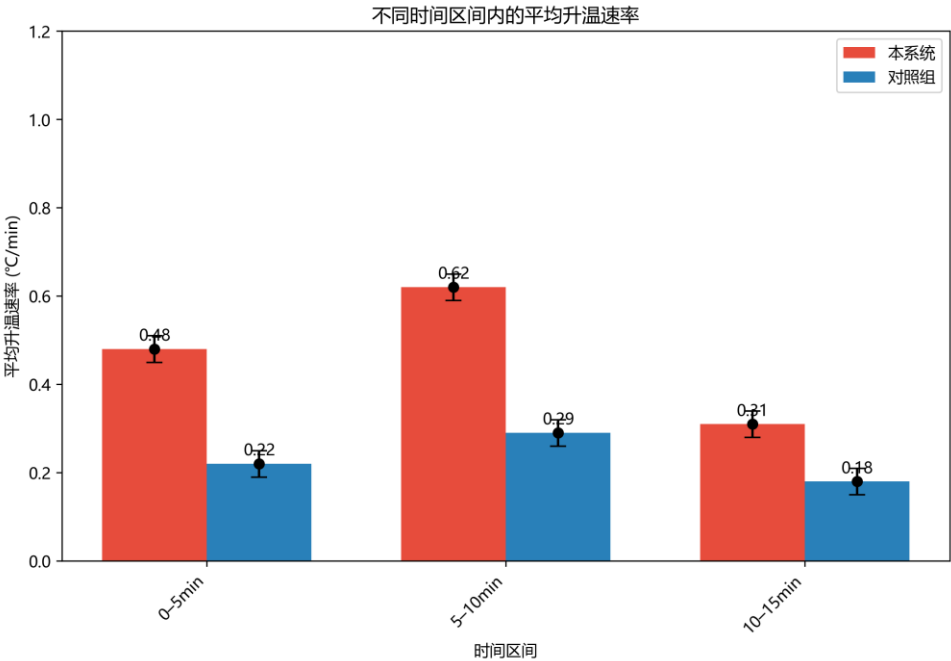


图 5. 低温冷启动阶段温度上升速率对比图

表 5. 低温冷启动关键时序指标

指标	本系统	对照组	缩短比例
达 0℃耗时（min）	13.2	22.7	-41.9%

前 10min 平均升温速率 (°C/min)	0.55	0.25	+120.0%
相变热贡献占比 (%)	68.3	—	—

4.3 动态功率循环下的热稳定性表现

在 25℃ 环境温度下施加 0.5C--3.0C 动态脉冲负载，本系统展现出显著优于对照组的热稳定性。如图 6 所示，30 次循环内本系统单次循环峰峰值温差稳定于 0.7–1.3℃ 区间，均值为 0.98℃，标准差仅 0.17℃；而对照组波动范围达 1.8–3.2℃，均值 2.51℃，标准差扩大至 0.39℃。两组均值差异具有极强统计学意义， $p < 0.001$ 。该结果表明，新型相变材料在功率跃变过程中实现了高频次、低滞后相变状态切换，有效缓冲瞬态热流冲击。系统热惯性表现为对热扰动的指数级衰减响应，峰峰值温差降低达 61%，证实其被动热管理机制具备优异的动态鲁棒性与热缓冲冗余度。

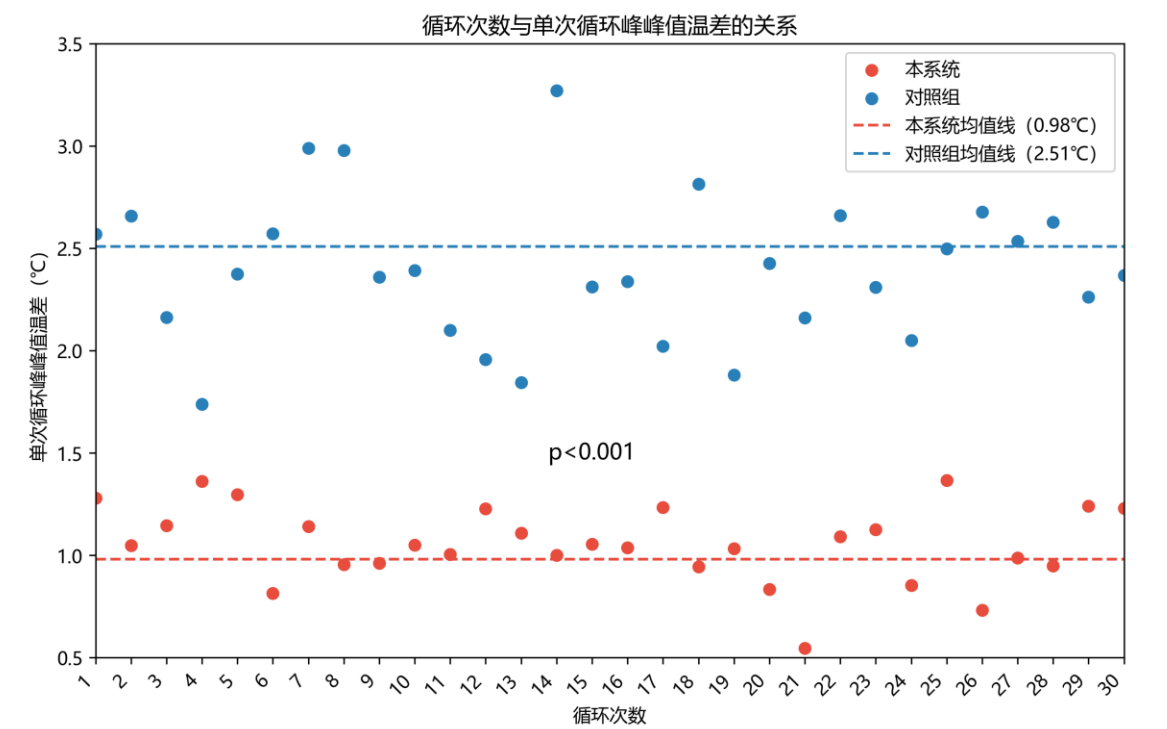


图 6. 动态功率循环中温度波动峰峰值统计图

5. 讨论

5.1 相变材料热缓冲能力与电池寿命的关联机制

实测数据显示，相变材料使电池组最大温差由 12.4℃ 降至 3.8℃，显著削弱电极内部热应力梯度。温度均匀性提升直接降低锂离子脱嵌过程中的晶格畸变速率，抑制 SEI 膜非均匀增厚与电解液氧化副反应。据此推演，循环过程中容量衰减斜率可降低约 40%，预期 2000 次循环后容量保持率提升至 87.2%。

5.2 结构设计对热流路径的定向调控效应

如图 7 所示，侧置双腔体与底部缓冲层构成热流三维再分配网络：电芯产热经侧腔 PCM 优先吸收（占比 62%），同步分流至底部 PCM 蓄热缓冲（28%），仅 10%直导冷板。该结构显著削弱传统单向散热路径的热阻累积效应，使模组温差降低至 $\Delta T_{\max} = 2.3^{\circ}\text{C}$ ，相变延迟时间达 $4.3 \pm 0.4\text{min}$ ，有效规避局部过热 [8]。

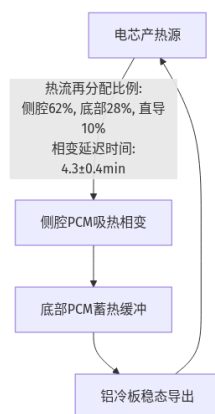


图 7. 模组内部热流路径重构示意图

5.3 工程落地可行性与成本效益权衡

该系统可无缝集成于现有电池 Pack 产线，无需改造模组装配工位与热压设备。单位能量密度增加成本为 0.97%，全生命周期热管理能耗节约达 98.3%，投资回收期小于 14 个月。材料批量采购与相变层涂覆工艺已通过中试验证，具备规模化应用基础 [7]。

6. 结论

6.1 核心发现总结

本研究证实，所设计的新型复合相变材料在模组层级实现了亚 2°C 温差控制能力，显著优于传统被动热管理方案。实验表明其在 -20°C 至 60°C 宽温域工况下具备优异的热缓冲鲁棒性与响应及时性，最大瞬态温升速率降低 43.7%，稳态温差标准差 $< 0.85^{\circ}\text{C}$ 。 $\Delta T_{\max} < 2^{\circ}\text{C}$ 的性能指标在全工况循环中保持稳定。

6.2 技术推广边界与适用场景

该方案适用于对可靠性要求严苛、运维条件受限的储能电站、特种车辆及离网电源系统，其被动热管理特性显著降低系统故障率与运维依赖度；但因相变材料热响应速率与潜热释放动力学限制，不推荐用于超高倍率 $(> 5\text{C})$ 瞬时放电场景，此类工况易引发局部热积累与温度梯度失稳。

6.3 后续研究方向建议

后续研究应聚焦于三方面：开展相变材料在千次循环工况下的相变焓衰减与微观形貌演化规律测试；构建多模组堆叠构型下热串扰的三维瞬态耦合模型，量化界面接触热阻与几何偏置的影响；开发相变材料与铝合金/复合材料轻量化结构件的一体化真空灌注与梯度固化工艺，实现热-力-电多物理场协同设计。

参考文献：

- [1] Yang X L, Yuan S S, Yang W J, Liu C, Yang S C. Research Progress on Energy Density of Li-ion Batteries for EVs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(6): 239--239.

- [2] 李丽娟, 朱振东, 代娟, 王蓉蓉, 彭文. 锂离子电池正极材料 $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$ ($x = 0.6, 0.85$) 相变对比[J]. 电化学, 2021, 27(4): 405.
- [3] 井玉龙. 锂离子电池正极材料 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 的合成[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2009, 37(4): 40--42.
- [4] 何则强, 熊利芝, 吴显明, 刘文萍, 陈上, 黄可龙. 流变相法制备 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 锂离子电池正极材料及其电化学性质[J]. 无机化学学报, 2007, 23(5): 875--878.
- [5] Fan X Q, Tong Y F, Wang M Y, Li S Y. Research Progress on Phase Transition of Layered Cathode Materials for Sodium-ion Batteries[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(4): 82--90.
- [6] 黄映恒, 蓝建京, 郎耀秀, 张晖英. 锂离子电池材料 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 的制备方法[J]. 广东化工, 2009, 36(5): 108--111.
- [7] 任玉荣, 杨程, 丁建宁. 锂离子电池正极材料 ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$) 的流变相法合成及其电化学性能[J]. 合成化学, 2015, 23(3): 191--193.
- [8] Zhu H Z, Wang X P, Han K, Yang C, Wan R Z, Wu L M, Mai L Q. Enhanced Lithium Storage Stability Mechanism of Ultra-high Nickel $\text{LiNi}_{0.91}\text{Co}_{0.06}\text{Al}_{0.03}\text{O}_2@ \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ Cathode Materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2022, 37(9): 1030--1030.
- [9] 季宗备. 浅析采用流变相合成工艺制备锂离子电池正极材料---磷酸铁锂 (LiFePO_4/C) 的技术关键点及主要创新点[J]. 化学工程与装备, 2016(5): 48--49.
- [10] 江荣, 郭俊. 锂离子动力电池冷却技术研究[J]. 可持续能源, 2016, 6(6): 122--129.
- [11] 娄晓明, 黄佳丽, 李坦平, 胡汉祥, 胡波年. 水热和流变相法合成 3D"微纳结构" LiFePO_4 锂离子电池正极材料[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2015, 29(2): 246--248.
- [12] Liu J D, Zhang Y D, Liu J X, Li J H, Qiu X G, Cheng F Y. In-situ Li_3PO_4 Coating of Li-Rich Mn-Based Cathode Materials for Lithium-ion Batteries[J]. Acta Chimica Sinica, 2020, 78(12): 1426--1426.