

相变材料与风冷耦合的电池热管理优化策略

王恒¹, 曹鹏飞¹, 陈国文², 杨婵¹, 朱俊帆¹, 张亚飞¹, 王瑞鑫¹, 余家豪¹

(1. 长安大学 能源与电气工程学院, 陕西 西安 710016; 2. 徐工新能源动力科技有限公司, 江苏 徐州 221700)

摘要: 针对高放电倍率电流下单一相变材料热管理的电池模组存在热失效和中心温度积累的难题, 在相变材料冷却系统中引入空气耦合, 提出了耦合热管理系统的电池排布结构优化策略。本策略针对复合相变材料(CPCM)耦合空气方式的电池热管理系统, 基于拉丁超立方抽样, 采用 Kriging 近似模型和 MIGA 算法对电池间距进行多目标优化。研究表明, 电池模组采用优化后间距, 相变材料热管理系统最高温度降低 3.64 °C, 最大温差降低 2.75 °C; 相变材料-空气耦合热管理系统电池最高温度进一步下降 0.6 °C。并进一步对比研究了材料密度、进风风速和放电倍率对优化电池模组热管理系统的影响, 结果表明, 高密度的 CPCM 可提升系统的散热能力与均温性; 高风速在增强散热的同时会降低系统均温性。优化后的耦合热管理系统, 在 2C 放电结束时, 最高温度为 42.60 °C, 最大温差低于 1 °C; 在 3C 放电结束时, 最高温度可以控制在 44.9 °C 以下, 最大温差低于 1.5 °C。

关键词: 电池热管理; 多目标优化; 遗传算法; 相变冷却; 风冷

中图分类号: TM912; U469.72

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.03.008

随着电动汽车的快速发展, 锂离子电池作为核心动力源, 其热管理问题日益凸显^[1]。研究表明, 当工作温度超过 45 °C 时, 电池性能将显著衰减, 累积的热量会影响电池的容量、能量输出和循环寿命, 甚至出现电池热失控现象。

目前电池热管理系统可以根据不同的传热介质分为四类: 空气/液体冷却、热管冷却、相变材料(phase change materials, PCM)冷却技术^[2]。相变材料冷却凭借其在电池充放电过程中展现出的紧凑性和均温特性, 逐渐受到研究人员的广泛关注^[3]。Wang 等^[4]基于电池产热原理以及 PCM 热传输理论, 构建了相应的数值模型, 研究发现, PCM 能够有效降低电池在工作过程中的峰值温度, 同时减小放电终止时刻的最大温度偏差。然而, 由于其本身导热系数较低, 在面对快速充放电过程中产生的热冲击时, 难以实现快速有效的热响应^[5]。为解决这一难题, 众多学者致力于探索新的解决方案, 其中将 PCM 与主动冷却方法相结合的耦合冷却系统成为研究热点。

安治国等^[6]针对圆柱形锂离子电池的热管理需求, 设计了一种基于膨胀石墨(expanded graphite, EG)-石蜡(paraffin, PA)的复合相变材料(composite phase change material, CPCM)的风冷式散热结构, 研究了 EG 质量分数对电池模组的散热性能影响。何闯^[7]等深入研究了在风冷热管理系统中, 顺排和插排两种排布方式的性能差异, 发现插排情况下最大温差有所降低。杨涵等^[8]使用非支配遗传排序对电芯间距、冷却液进出口温度、电池模组体积作为优化目标展开优化。本文引入多岛遗传算法(multi-island genetic algorithm, MIGA)算法, 该算法对比非支配排序遗传算法, 可以通过全局搜索有效对复杂多目标寻优求解。

目前, 研究人员主要通过电池布局、电池间距和模块结构来优化电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)的性能。张晓光等^[9]提出电池模组非均匀排布对比均匀排布在实现减少相变材料用量的情况下可以提升热管理系统性能。郭茶秀等^[10]研究了相变电池热管理系统均匀间距下不

收稿日期: 2025-10-22; 修订日期: 2025-11-30

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划(GZC20241442); 陕西省博士后基金(2024BSHSDZZ070); 陕西省大学生创新创业计划(S202410710392X)

通信作者: 王恒(1973—), 男, 山东济南人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事车用清洁能源应用理论与技术的研究, E-mail: wangheng@chd.edu.cn。

同排布方式的电池组温度场的影响。

以往研究都是有序调整电池间距,未提出明确的非均匀排布策略。因此,针对复合相变材料耦合空气的电池热管理系统问题开展优化,采用拉丁超立方抽样(latin hypercube sampling, LHS)、Kriging 近似模型与 MIGA 策略优化电池模组间距。研究表明,优化后电池模组热管理性能显著提升;本文还进一步对比分析了 CPCM 密度、放电倍率、进风风速对其热管理性能的影响。

1 模型描述

1.1 电池仿真模型

本研究采用 21 700 圆柱形锂离子电池,直径 21 mm、高 70 mm,设置构建 4×4 对称式电池模组^[11],电池呈均匀排布,初始间距 5 mm,间隙内填充 CPCM 相变材料,物性参数见表 1^[12]。模组整体尺寸为 109 mm×109 mm×70 mm,置于设有圆形对称进出风口的箱体中。进风口直径 20 mm,轴线与电池阵列中心对齐,初始风速 1 m/s,流道长度 545 mm×169 mm×130 mm,模组置于流道中心位置,流体设置为空气,模型结构如图 2 所示。

表 1 材料物性参数

Table 1 Material properties parameters

| 特性 | 石蜡 | 膨胀石墨 | 复合相变材料 |
|---|-------------------|-------|--|
| 密度/(kg·m ⁻³) | 914 | 2 333 | ρ_{CPCM} |
| 导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 0.3 | 129 | $\frac{k_{\text{EG}}\rho_{\text{CPCM}}\phi_{\text{EG}}}{\rho_{\text{EG}}}$ |
| 比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | — | — | 2.5 |
| 潜热/(kJ·kg ⁻¹) | 186.4 | — | 186.4×(1- ϕ) |
| 相变温度/K | 315.15~ 317.15 | — | 315.15~ 317.15 |

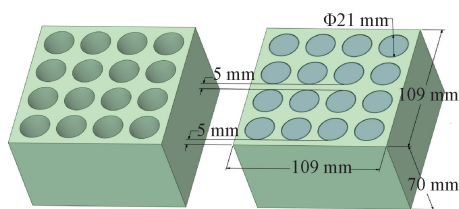


图 1 物理模型图

Figure 1 Physical model diagram

表 2 展示了空气的基本特性和所用电池的物性参数^[13]。在模拟过程中,用于冷却电池的空气通常被视为不可压缩流体,空气的物理参数(密度和比热容)视为与温度无关的固定值。

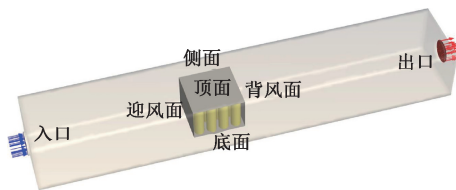


图 2 风冷-相变冷却物理模型

Figure 2 Physical model of phase change-air cooling

表 2 空气和电池的特性

Table 2 Properties of air and batteries

| 特性 | 空气 | 电池 |
|--|----------|--|
| 密度/(kg·m ⁻³) | 1.225 | 2 846 |
| 比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | 1 006.43 | 885 |
| 热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 0.024 2 | 0.9(k_x), 24.2(k_y), 0.9(k_z) |
| 初始温度/K | 298.15 | 298.15 |

1.2 电池产热模型

本研究使用 ANSYS 将三维模型导入 Fluent 中,为了简化电池仿真分析,本文做出以下假设,进气冷却风速保持恒定;电池在 2 C 下放电 1 800 s;所有电池的发热功率相同;所有电池均在绝热环境中工作。基于上述假设,

电池生热速率模型^[14]:

$$q = \frac{I}{V} \left[(E - U) + T \frac{dE}{dT} \right] = \frac{1}{V} \left[I^2 R + IT \frac{dE}{dT} \right]. \quad (1)$$

式中: I 为电池充放电电流, A; V 为电池体积, m³; E 为电池开路电压, V; U 为电池工作电压, V; T 为电池温度, K; $\frac{dE}{dT}$ 为电池熵热系数, V·K⁻¹。

电池热力学模型:

$$C_b \rho_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \left(k_{bx} \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + k_{by} \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} + k_{bz} \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} \right) + q. \quad (2)$$

冷却空气的能量方程式:

$$C_a \rho_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial x} + v \frac{\partial T_a}{\partial y} + w \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = k_a \left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

式中: u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度分量, m·s⁻¹; ρ_a, ρ_b 分别为空气密度、电池密度, kg·m⁻³; C_a, C_b 分别为空气比热容、电池比热容, J·kg⁻¹·K⁻¹; $K_a, K_{bx}, K_{by}, K_{bz}$ 分别为空气导热系数、电池在 x, y, z 方向的导热系数分量, W·m⁻¹·K⁻¹; T_a, T_b 分别为空气温度、电池温度, K。

β 代表液相率,它可以通过温度来进行表示:

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s; \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & T_s < T < T_L; \\ 1, & T > T_L. \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_s 、 T_L 分别为凝固点温度、熔化点温度, K。固-液两相共存区的液相率在 0~1 之间。

1.3 边界条件及参数设定

电池模组仿真在 Fluent 中进行, 本文设定标准工况为: 初始环境温度设置为 25 °C, 放电倍率为 2 C; 仿真时, 本研究基于 Fluent 平台, 采用 Solidification/Melting 模型进行数值模拟。该模型运用“焓-多孔度”理论, 将计算域划分为流体区、固体区和糊状区, 以准确表征相变过程的非稳态传热特性^[15]。参数设置如下: 进风口风速 1 m/s; 出风口为压力出口; 相变材料物性恒定; 电池模组简化为六面体; 流体壁面为绝热边界。

电池模组各表面与空气的换热系数如表 3 所示^[16]。

表 3 电池模组各面换热系数

Table 3 Heat transfer coefficient of each side

| 空气流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 表面换热系数/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) | | | | |
|-------------------------------|--|------|------|------|------|
| | 迎风面 | 背风面 | 顶面 | 底面 | 侧面 |
| 1 | 25.0 | 13.0 | 11.0 | 11.0 | 14.0 |
| 3 | 27.0 | 19.0 | 19.0 | 16.0 | 21.0 |
| 5 | 58.0 | 28.0 | 36.0 | 34.0 | 46.0 |

1.4 独立性验证

(1) 网格独立性验证。为确保数值模拟结果的可靠性, 本研究对电池模组进行网格独立性验证。在标准工况条件下, 计算结果发现: 当网格数量从 1 464 870 逐步增加至 2 458 480 时, 电池最高温度仅降低 0.04 °C, 最终确定采用最大尺寸为 2 mm 的表面网格划分方案。

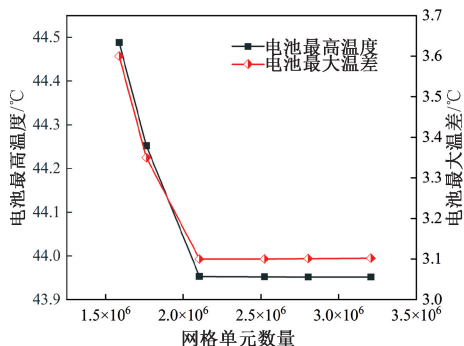


图 3 网格无关性验证

Figure 3 Grid-independent validation

(2) 数值模拟方法验证。从图 4 可以看出, 不同倍率放电时, 根据所示的实验结果和模拟结果对比, 预测的表面平均温度与实验测量值最大误差约为 3% (0.6 °C), 表明数值结果和实验结果之间的误差较小, 构建的电池模组可以用于研究电池的性能。

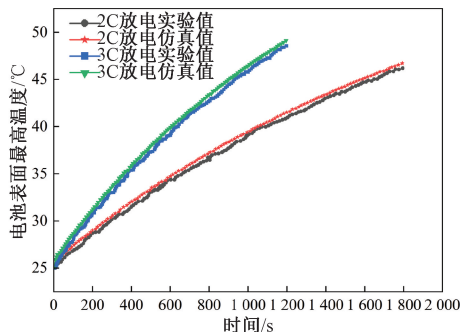


图 4 仿真与实验温升对比

Figure 4 Comparison of simulation and experimental temperature rise

2 电池模组结构优化

2.1 优化流程及实验设计

LHS 是一种通过将设计变量划分为等概率区间, 在保证样本均匀性的同时提高非线性问题的拟合精度的实验设计技术^[17]。本研究采用 LHS 方法生成样本点并完成数值仿真计算; 随后基于仿真结果建立数学模型; 最终通过数值模拟验证算法可靠性并输出优化方案, 整体优化流程如图 5 所示。

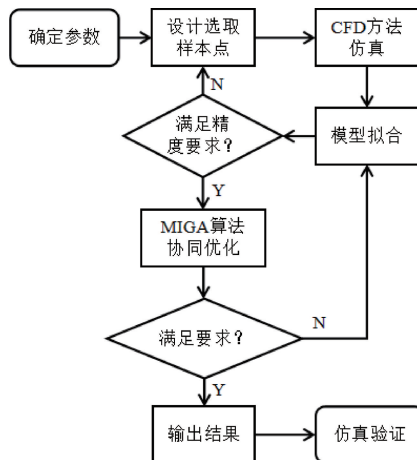


图 5 多目标优化流程

Figure 5 Multi-objective optimization process

本研究采用控制变量法进行结构优化设计, 选取 L_1 、 L_2 和 L_3 作为关键设计变量。电池模组可以被视为由 1、2、5、6 号电池组成的电池组分别旋转 90°、180°、270° 得到整个电池模组, 将 16 个电池单体划分为三个特征组 (如图 6 所示):

- (1) 核心区: 包含 6、7、10、11 号电池, 组内间距为 L_1 ;
- (2) 过渡区: 由 2、3、5、8、9、12、14、15 号电池构成, 与核心区的组间间距为 L_2 ;
- (3) 边缘区: 包括 1、4、13、16 号电池, 与核心区的组间间距为 L_3 。

在保持电池模组总体尺寸 (109 mm × 109 mm ×

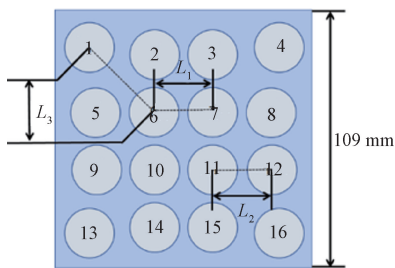


图 6 电池间距参数设计

Figure 6 Design of battery spacing parameters

70 mm) 和相变材料用量恒定的约束条件下,同时保证电池内部设计中电池与电池之间不会出现重合、接触的现象,通过调整电池间距实现热管理性能优化,各设计变量的取值范围见表 4。

表 4 设计变量取值范围

Table 4 Range of values of the design variables

| 变量 | L_1/mm | L_2/mm | L_3/mm |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|
| 下限 | 23 | 23 | 29.55 |
| 上限 | 27 | 27 | 38.18 |

通过对电池间距进行拉丁超立方抽样,得到 13×3 的抽样矩阵,对 13 个抽样点进行建模仿真得到对应电池模组的最高温度、最大温差、液相率,如表 5 所示,数据中电池组最大温差均处于合适范围,选取电池组的最大温度和液相率构建近似模型。

表 5 参数取值样本及仿真结果

Table 5 Parameter value samples and simulation results

| 编号 | L_1/mm | L_2/mm | L_3/mm | 最高温 度/ $^{\circ}\text{C}$ | 最大温 差/ $^{\circ}\text{C}$ | 液相 率 |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|---------|
| 1 | 23.000 | 24.331 | 34.579 | 44.758 | 2.038 | 0.489 |
| 2 | 25.671 | 27.001 | 33.151 | 43.246 | 0.516 | 0.497 |
| 3 | 26.332 | 26.001 | 37.459 | 43.149 | 0.560 | 0.499 |
| 4 | 24.331 | 24.668 | 38.174 | 43.672 | 1.195 | 0.497 |
| 5 | 26.003 | 23.331 | 30.985 | 44.081 | 0.823 | 0.488 |
| 6 | 25.001 | 25.002 | 33.873 | 43.593 | 0.905 | 0.496 |
| 7 | 23.669 | 24.001 | 30.274 | 45.016 | 1.538 | 0.481 |
| 8 | 25.331 | 25.669 | 29.554 | 43.657 | 0.510 | 0.492 |
| 9 | 24.00 | 26.665 | 36.743 | 43.490 | 0.977 | 0.498 |
| 10 | 26.668 | 23.665 | 36.021 | 43.460 | 0.843 | 0.497 |
| 11 | 27.001 | 25.328 | 32.432 | 43.287 | 0.443 | 0.496 |
| 12 | 24.665 | 23.004 | 35.300 | 44.007 | 1.415 | 0.493 |
| 13 | 23.326 | 26.332 | 31.714 | 43.929 | 0.132 | 0.493 |

2.2 基于 Kriging 近似模型的多目标优化

本研究采用基于空间插值的 Kriging 建模方法进行优化分析。该方法通过建立高斯过程回归模型,能够高效处理强非线性工程优化问题,并具备出色的函数拟合性能^[18]。相比常规响应面法,该模型在多维复杂优化问题中具有更高的预测准确性和稳定性。

拟合系数表达式:

$$y(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i y(x_i) \quad (5)$$

式中: $y(x_0)$ 为待测点的估计值; $y(x_i)$ 为各点的响应值; λ_i 代表待定加权系数。

拟合系数表达式:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

y_i 为测试集样本的目标函数值; \hat{y}_i 为测试集样本的函数预测值,

拟合系数越接近于 1,代表代理模型预测精度越高根据设计变量预期响应值的近似函数关系,得到最高温度、液相率的拟合系数分别是 0.969 99、0.954 23,均大于 0.9。这说明该模型的拟合精度达到要求,可进行下一步的多目标优化。

2.3 优化结果

本研究采用 MIGA 算法进行最高温度与液相率的多目标优化,其全局搜索能力和收敛效率优于传统遗传算法。优化结果显示,最高温度在 1 001 次迭代后显著降低,但因目标间相互制约,液相率尚未收敛至最优值。

基于 Pareto^[19] 前沿分析如图 7 所示。由于液相率变化结果不大,采用较低电池最高温度的迭代结果作为优化方案,该解在多目标优化问题中达到了较高性能,此时 $L_1 = 26.432 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 25.7954 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 35.6512 \text{ mm}$,预测最大温度为 $43.197 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、预测液相率为 0.499。

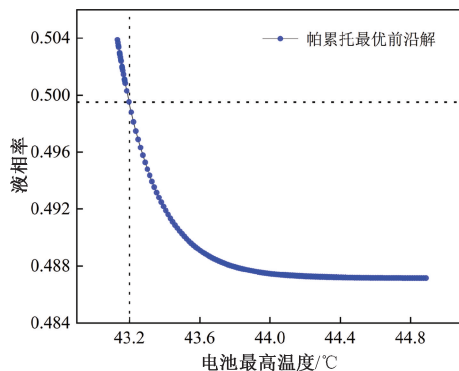


图 7 迭代解及 Pareto 前沿

Figure 7 Iterative solution and Pareto front

2.4 优化结果分析

在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度、 2 C 放电,采用 20% EG 含量的 CPCM 相变材料(密度 700 kg/m^3)的条件下,使用相变材料热管理系统,对比分析了电池模组优化前后的散热性能差异。

如图 9 所示,优化前电池组中心存在明显高温区,优化后温度显著降低且分布更均匀,表明优化后的热管理系统能有效导出热量并发挥相变材料潜热特性。优化后的电池组最高温度从 46.84 °C 降至 43.20 °C,降幅 3.64 °C;同时,电池模组间最大温差由 3.74 °C 大幅降低至 0.99 °C,温差控制效果提升 73.5%,仿真结果和优化策略预测结果接近。

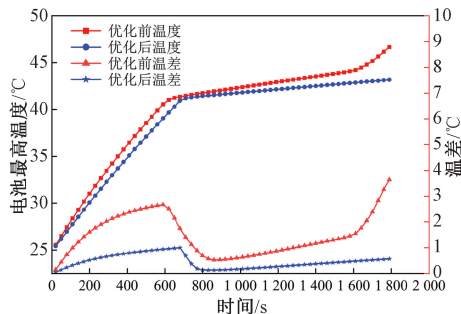


图 8 电池组最高温度和温差对比

Figure 8 Comparison of maximum temperature and temperature difference of battery pack

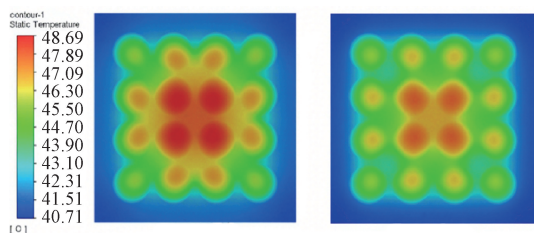


图 9 2 C 放电温度云图对比

Figure 9 Temperature contour map discharge rate at 2 C

3 电池组散热分析

3.1 冷却方式对优化模组的影响

本文对比相变材料-空气耦合热管理系统和单相变材料热管理系统的模组散热效果。相变结构均采用优化电池模组,环境温度为 25 °C,放电倍率为 2 C,送风速度为 1 m/s。

如图 10 所示,相较于单一相变热管理方式,耦合热管理系统使电池组最高温度材料由 43.20 °C 降至 42.60 °C,同时液相率从 0.470 1 降低至 0.433 9。然而,耦合热管理系统的温度均匀性有所下降,最大温差从 0.99 °C 增至 2.33 °C。这种变化源于风冷与相变材料的协同作用机理:强制风冷虽通过增强对流换热抑制局部高温,但由于电池模组各面换热系数不同,其高速气流会干扰相变材料均匀熔化,削弱均温性能,导致出现“散热增强但均温减弱”的特征。

3.2 相变材料密度对优化模组的影响

不同密度的电池模组的最高温度随 EG 质量分

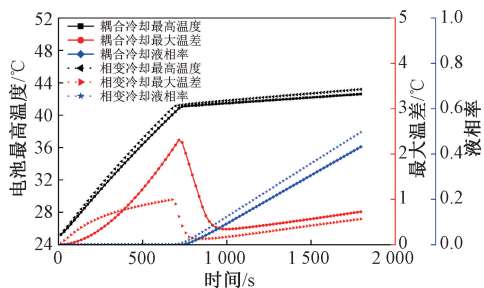


图 10 不同方式冷却的散热效果对比

Figure 10 Heat dissipation effect comparison

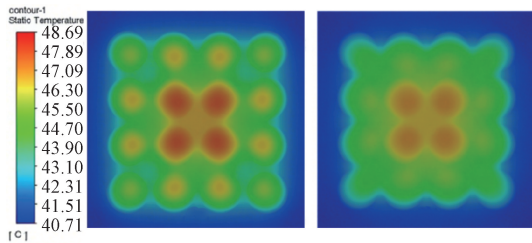


图 11 不同模式温度云图

Figure 11 Temperature contour map of different modes

数变化趋势,如图 12 所示。从图中可知,在 EG 质量分数 0~30% 范围内,低压缩比的高密度相变材料展现出更优异的导热性能。其机理在于:高密度条件下 EG 能形成连续导热网络,且石蜡基体填充更均匀。图 13 的温度云图显示,当材料密度从 600 kg/m³ 提升至 800 kg/m³ 时,电池组温度分布显著改善,高温区域范围缩小,最高温度降低。这说明提高密度可有效增强复合相变材料的散热均温性能。

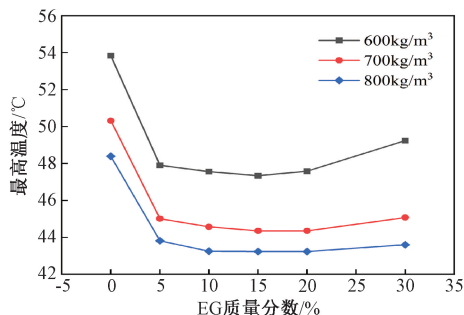


图 12 材料密度对电池组最高温度的影响

Figure 12 Effect of material density on the maximum temperature of battery pack

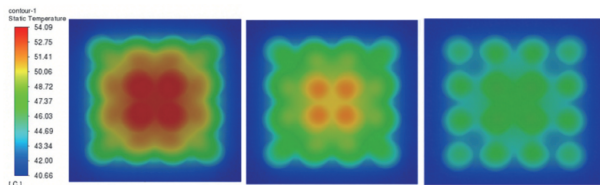


图 13 放电温度云图

Figure 13 Discharge temperature contour map

3.3 高放电倍率对优化模组的影响

由图 14 所示,EG 质量分数对电池热管理性能

的影响呈现显著的倍率依赖性。在 10%~20% 范围内,2C 放电时最高温度随 EG 含量增加而降低,而 3C 放电时则出现反常上升现象。这源于低 EG 含量时高潜热值、低导热率与高 EG 含量时潜热低、导热率高的材料特性。

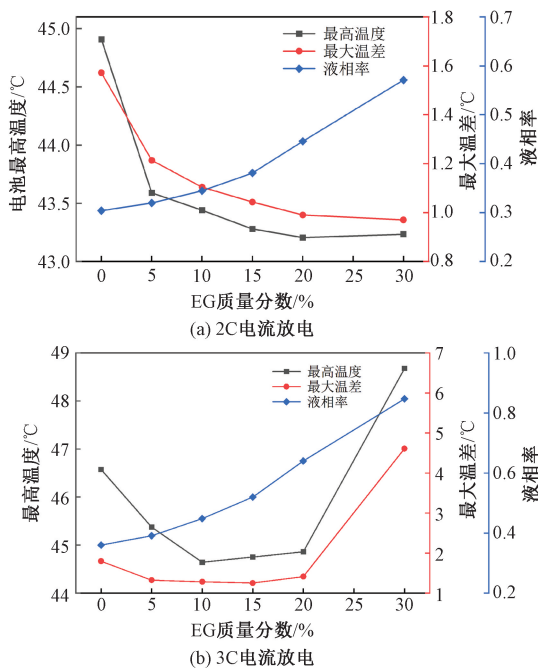


图 14 放电倍率对电池组热管理能力的影响

Figure 14 Effect of discharge rate on the thermal management capability of battery packs

实验数据显示,2 C 工况下最大温差维持在 1.6 °C 以内,验证了材料选型的有效性;而 3 C 工况下,采用 30% EG 质量分数的 CPCM 出现热失控特征(最高温度 49.68 °C,温差 4.61 °C,液相率 0.85)。研究结果表明,虽然提高 EG 含量可改善导热均匀性,但会削弱系统散热能力,因此高倍率应用场景建议采用低 EG 含量 CPCM 以实现导热与蓄热的优化平衡。

3.4 进风风速对优化模组的影响

在标准工况下,设定送风温度为 25 °C、进风口直径为 20 mm,针对 1 m/s、3 m/s 和 5 m/s 三种进风风速开展仿真分析。

从图 15 中可知,进风风速增大导致显著的气流分布不均现象:边缘区域因低阻力形成高速绕流,中心区域因高阻力流速降低;背风面产生低速涡流区。实验数据显示,风速从 1 m/s 增至 3 m/s 时,最高温度降低 0.39 °C,CPCM 液相率下降 17.7%,但加剧了单体间散热差异。值得注意的是,最大温差增速随风速增加而减缓,5 m/s 时稳定在 2.48 °C。当进风口直径增至 40 mm 时,最大温差达 5.97 °C,严重

影响温度均匀性。

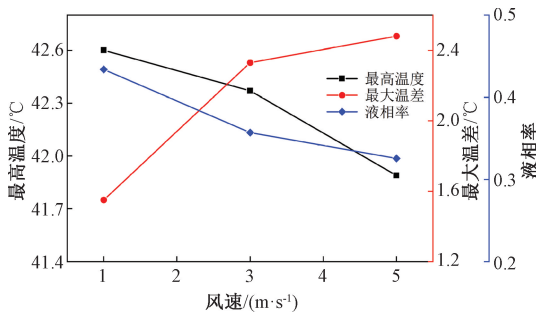


图 15 不同风速的散热效果

Figure 15 Heat dissipation effect at different wind speeds

4 结论

本研究基于 CPCM-空气耦合热管理系统,提出了一种集成多目标优化算法对电池结构进行优化的电池模组优化策略,结论如下:

(1) 基于间距布局的优化策略有效强化了电池模组内部的热扩散能力,使电池组最高温度从 46.84 °C 降至 43.20 °C,大幅改善温度均匀性,模组间最大温差从 3.74 °C 降至 0.99 °C,温差控制效果提升 73.5%。

(2) CPCM 特性研究表明,高密度与 EG 含量的组合有利于提升散热性能。仿真验证表明,在高倍率放电工况下,推荐采用高密度、低 EG 含量的 CPCM,以实现散热需求与材料性能的最佳平衡。

(3) 相较于单一 CPCM 冷却,相变材料-空气耦合热系统展现出协同优势:在 CPCM 液相率降低 12.9% 的情况下,模组最高温度进一步降低 0.6 °C。空气对流换热的引入有效增强了整个热系统的散热能力,缓解了相变散热带来的中心热量累积。

(4) 对耦合热管理系统的深入研究揭示,在封闭空间中提升风速可以缓解相变材料的热负荷压力,但由于绕流效应会导致电池组温度均匀性下降。这些发现为电池热管理系统参数的精细化调控提供了重要依据。

参考文献:

[1] ABDELKAREEM M A, MAGHRABIE H M, ABO-KHALILA G, et al. Thermal management systems based on heat pipes for batteries in EVs/HEVs[J]. Journal of Energy Storage, 2022,51:104384.
 [2] KOORATA P K, CHANDRASEKARAN N. Numerical investigation of cooling performance of a novel air-cooled thermal management system for cylindrical Li-ion battery module [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193:116961.

- [3] WU W X, WANG S F, WU W, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 182: 262-281.
- [4] WANG Y N, WANG Z K, MIN H T, et al. Performance investigation of a passive battery thermal management system applied with phase change material[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 35: 102279.
- [5] NAVID N, HAMID G, MOHAMMADREZA R, et al. The role of phase change materials in lithium-ion batteries: a brief review on current materials, thermal management systems, numerical methods, and experimental models[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 63:107061.
- [6] 安治国, 邓芳, 严冬, 等. 风冷式 CPCM 锂离子电池热管理系统性能分析[J]. *电源技术*, 2021, 45(09): 1125-1128, 1192.
AN Z G, DENG F, YAN D, et al. Performance analysis of air-cooled CPCM lithium ion battery thermal management system [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(9): 1125-1128, 1192.
- [7] 何闯, 赵钦新, 梁志远. 具有扰流结构的风冷型锂电池包热管理系统优化[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2025, 46(1): 90-97.
HE C, ZHAO Q X, LIANG Z Y. Performance optimization of air-cooled lithium battery pack thermal management system with turbulence structure [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2025, 46(1): 90-97.
- [8] 杨涵, 刘宁豪, 高强, 等. 基于 NSGA-II 的双迷宫液道液冷板结构优化设计[J]. *材料导报*, 2025, 39(15): 240-246.
YANG H, LIU N H, GAO Q, et al. Structural optimization design of dual-maze flow channel liquid cooling plates based on NSGA-II [J]. *Journal of Materials Guide*, 2025, 39(15): 240-246.
- [9] 张晓光, 潘晓楠, 李金铭, 等. 电池排布对锂电池组相变热管理性能的影响[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(1): 127-135.
ZHANG X G, PAN X N, LI J M, et al. Effect of battery arrangement on the phase change thermal management performance of lithium-ion battery packs[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(1): 127-135.
- [10] 郭茶秀, 魏金宇. 电池排布方式对 21700 锂电池相变热管理系统的影响[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 91-97.
- GUO C X, WEI J Y. Influence of different arrangement on phase change thermal management system of 21700 lithium battery[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 91-97.
- [11] XU Y F, ZHANG H Y, XU X B, et al. Numerical analysis and surrogate model optimization of air-cooled battery modules using double-layer heat spreading plates[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 176: 121380.
- [12] WU W X, WU W, WANG S F. Thermal optimization of composite PCM based large-format lithium-ion battery modules under extreme operating conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 153: 22-33.
- [13] WU Q C, HUANG R, YU X L. Measurement of thermophysical parameters and thermal modeling of 21, 700 cylindrical battery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 65: 107338.
- [14] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 132(1): 5-12.
- [15] SHI S, XIE Y, LI M, et al. Non-steady experimental investigation on an integrated thermal management system for power battery with phase change materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138: 84-96.
- [16] LING Z Y, WANG F X, FANG X M, et al. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 403-409.
- [17] 张甫仁, 肖康, 鲁福, 等. 基于 NSGA-II 的锂离子电池液冷板的优化设计[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(1): 145-150.
ZHANG F R, XIAO K, LU F, et al. Optimal design of liquid cooling plate for lithium-ion battery based on NSGA-II [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2023, 42(1): 145-150.
- [18] MONIKA K, PUNNOOSE E M, DATTA S P. Multi-objective optimization of cooling plate with hexagonal channel design for thermal management of Li-ion battery module[J]. *Applied Energy*, 2024, 368:123423.
- [19] DONG H, CHEN X, YAN S, et al. Multi-objective optimization of lithium-ion battery pack thermal management systems with novel bionic lotus leaf channels using NSGA-II and RSM[J]. *Energy*, 2025, 314:134226.

Optimization strategy of thermal management of batteries coupled with phase change materials and air cooling

WANG Heng¹, CAO Pengfei¹, CHEN Guowen², YANG Chan¹, ZHU Junfan¹,
ZHANG Yafei¹, WANG Ruixin¹, SHE Jiahao¹

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710016, China; 2. XU GONG New Energy Power Technology Co., Ltd., Xuzhou 221700, China)

Abstract: Under high-discharge-rate currents, battery modules with single-phase change material (PCM) thermal management experience thermal failure and central temperature accumulation. To solve this problem, air cooling is introduced into the PCM cooling system. A battery arrangement optimization strategy for hybrid thermal management is proposed. A composite PCM (CPCM) coupled with forced air convection was developed for the thermal management system. This strategy targets a composite PCM (CPCM) coupled with air cooling. Latin Hypercube Sampling is adopted. Kriging approximation modeling and the MIGA algorithm are applied. Multi-objective optimization of battery spacing is conducted. Results demonstrate that the optimized spacing configuration significantly improves thermal performance. Compared to the initial spacing, the PCM-only system achieves a reduction in maximum temperature of 3.64 °C and a decrease in maximum temperature difference of 2.75 °C. Furthermore, the proposed CPCM-air coupled system provides an additional peak temperature reduction of 0.6 °C. Parametric studies reveal that higher CPCM density enhances both cooling capacity and temperature uniformity. Increasing air velocity improves heat dissipation but reduces temperature homogeneity. Besides, the optimized module with coupled thermal management system maintains temperature below 42.60 °C ($\Delta T < 1$ °C) at 2C discharge and below 44.9 °C ($\Delta T < 1.5$ °C) at 3C discharge.

Keywords: battery thermal management; multi-objective optimization; genetic algorithm; phase change cooling; air coolin