

相变材料耦合冷板电池热管理系统的优化设计

黄 钦, 余凌峰, 陈 凯

Design of the Battery Thermal Management System With Phase Change Material Coupled Cold Plates

HUANG Qin, YU Lingfeng, and CHEN Kai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.430278>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机场新增卫星厅对登机口影响的评估方法

An Evaluation Method for Impacts of a New Satellite Hall on Boarding Gates

应用数学和力学. 2020, 41(4): 448–457 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400189>

基于特征正交分解的材料微结构参数化表征模型及等效性能优化设计

A POD-Based Parameterization Model for Material Microstructure Representation and Its Application to Optimal Design of Material Effective Mechanical Properties

应用数学和力学. 2017, 38(7): 727–742 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.370279>

基于参数化水平集法的材料非线性子结构拓扑优化

Topology Optimization of Nonlinear Material Structures Based on Parameterized Level Set and Substructure Methods

应用数学和力学. 2021, 42(11): 1150–1160 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420090>

基于特征值分析的多尺度结构优化设计方法

Multi-Scale Structure Optimization Design Based on Eigenvalue Analysis

应用数学和力学. 2019, 40(6): 630–640 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.390207>

充液弹性毛细管低温相变的力学分析

Mechanics of Low-Temperature Phase Transition in Liquid-Filled Elastic Capillary Tube

应用数学和力学. 2021, 42(10): 1045–1061 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420301>

碳纤维汽车底盘后纵臂CAE设计的优化算法

An Optimization Algorithm for CAE Design of Carbon Fiber Reinforced Composite Chassis Longitudinal Arms

应用数学和力学. 2018, 39(8): 925–934 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.390001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

相变材料耦合冷板电池热管理系统的优化设计*

黄 钦, 余凌峰, 陈 凯

(华南理工大学 化学与化工学院 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 广州 510640)

摘要: 以相变材料耦合冷板电池热管理系统为研究对象, 采用数值方法研究了系统的冷却性能. 结果表明, 通过增加耦合系统的冷却水流量可以降低电池组温度和温差, 但是显著增加了冷板功耗, 系统能效较低. 为了提高耦合热管理系统的冷却效率, 在固定系统体积的情况下, 采用优化策略对系统中相变材料的厚度分布进行调整. 典型算例结果表明, 优化策略仅需 5 步调整就能得到最佳相变材料厚度分布. 相比于优化前系统, 优化后的系统使电池组最高温度降低了 1.1 K, 温差减小了 29%. 在同等电池组温差下, 优化系统的功耗相比优化前系统下降了 64%.

关键词: 相变材料; 冷板; 电池热管理; 优化策略

中图分类号: TB34; O242.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.430278

Design of the Battery Thermal Management System With Phase Change Material Coupled Cold Plates

HUANG Qin, YU Lingfeng, CHEN Kai

(Key Laboratory of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation of Education Ministry, School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P.R.China)

Abstract: The battery thermal management system with phase change material coupled cold plates was investigated with the numerical simulation method. The results show that, the temperature and temperature difference of the battery pack decreases with the increase of the flow rates of the cold plate in the system, while the power consumption of the cold plate significantly increases, which leads to poor efficiency of the system. To improve the efficiency of the coupled thermal management system, an adjusting strategy was introduced to optimize the thickness distribution of phase change materials with the system volume fixed. The optimized results of typical cases show that, the optimal phase change material thickness distribution can be obtained by only 5 adjusting steps. Compared with the original system, the maximum temperature of the battery pack drops by 1.1 K and the temperature difference narrows down by 29% after the optimization. To achieve the same temperature difference in the battery pack, the power consumption of the optimized system lowers down by 64% compared with that of the original system.

Key words: phase change material; cold plate; battery thermal management; optimization strategy

引 言

随着全球经济高速发展, 能源危机和环境污染问题日益突出, 各国都在倡导绿色环保的低碳交通方式, 电

* 收稿日期: 2022-09-05; 修订日期: 2022-11-11

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515010637); 广州市科技计划(202102020563)

作者简介: 黄钦(2001—), 男, 硕士生 (E-mail: 321055625@qq.com);

陈凯(1986—), 男, 副研究员, 博士, 博士生导师 (通讯作者. E-mail: chenkaih09@126.com).

引用格式: 黄钦, 余凌峰, 陈凯. 相变材料耦合冷板电池热管理系统的优化设计[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(11): 1195-1202.

电动汽车得以蓬勃发展,动力电池作为电动汽车三大组件之一,是电动汽车的驱动核心,电动汽车动力性能和续航里程的提升,对电池比容量、高倍率充放电提出了更高的要求,电池充放电过程是一个产热过程,若产生的热量无法及时散出,将引起电池温度上升,导致热失控^[1].因此需要对动力电池进行热管理,保证其在合适的温度范围内工作,以维持电动汽车安全稳定运行.

目前,电池热管理技术有空气冷却^[2]、液体冷却^[3]、相变材料(PCM)冷却^[4]、热管冷却^[5]以及不同方式的耦合冷却^[6-8].其中,基于相变材料和冷板的耦合冷却方式,可以综合液冷换热系数高与相变材料均温性好的优点,实现电池组最高温度的降低和温差的减小,是一种非常有应用前景的复合热管理方式.学者们对相变材料耦合冷板(PCM-LC)热管理系统的性能开展了大量研究.喻寰^[9]研究了系统的运行参数及复合相变材料成分分配对系统冷却性能的影响,结果表明冷却液入口流速为 0.15 m/s,膨胀石墨质量分数为 20% 复合相变材料组成的系统能够达到较好的热管理效果;Cao 等^[10]通过实验发现液冷进水温度接近环境温度可以获得较优的热管理性能,在相变材料总质量不变的情况下,相变材料潜热值比导热系数的影响更大;Liu 等^[11]通过调节运行参数对电池组冷却模块进行控温,结果表明当电池组的冷却要求不高时,改变进水流量比改变进水温度更节能;Bai 等^[12]研究发现液冷板越靠近电极区域,对电池降温效果越显著,而相邻电池间距增加可以提高系统温度的均匀性,但对电池最高温度影响不大;Zhu 等^[13]通过对系统运行参数和结构参数进行单因素分析,发现结构参数是影响系统性能的关键参数.

为了进一步提高系统性能,学者们对耦合热管理系统的结构进行优化设计.Li 等^[14]研究了系统单侧液冷板与双侧液冷板的冷却性能,结果表明双侧液冷板可显著降低电池组温差,并使电池在 4 C 高倍率放电结束后最高温度低于 50 °C. Wang 等^[15]也比较了单侧与双侧液冷板情况下的系统性能,发现双侧液冷板使 5 C 倍率放电结束后的电池组最高温度从 64 °C 降低到 46.3 °C. Molaeimanesh 等^[16]在保证系统体积不变的情况下,改变相变材料与多个液冷板的布局方式对电池模块进行冷却,降低了电池组的最高温度并改善了其温度均匀性;Cao 等^[17]优化了相变材料耦合液冷系统中冷板的内流道布置,结果表明增大流道间距并将相邻流道内的液体反向流动可以有效减少电池组的径向温差.

现有研究表明,相变材料耦合冷板系统的结构显著影响系统的冷却性能.而对于耦合系统结构的优化方法,主要通过枚举设计不同系统结构进行模拟实验,分析各自的温度特性从而局部寻优,带入的经验性阻碍了系统性能的进一步提高.针对上述问题,本文以相变材料耦合冷板系统为研究对象,采用数值方法研究进口工质流量对系统冷却性能的影响规律.随后,采用优化策略对耦合系统中相变材料的厚度分布进行优化设计,在保证系统体积不变的情况下,降低电池组最高温度并改善其温度均匀性.

1 数值模型

1.1 物理模型

图 1 为本文研究的相变材料耦合冷板电池热管理系统.其中,系统中的电池组包含 8×2 个方形电池,液冷板分别与电池两个侧面紧密贴合,沿着液冷板内并行流道方向上,相邻电池之间填充相变材料.其中相邻电池的相变材料厚度为 4 mm,冷板进口和出口附近相变材料厚度为 2 mm.引入文献 [18-19] 中的电池和石蜡/EG 复合相变材料,其中电池尺寸为 18 mm \times 65 mm \times 90 mm.采用文献 [20] 中的微通道冷板,其尺寸为 176 mm \times 130 mm \times 2 mm,进、出口长度为 65 mm,冷板内流道的厚度为 0.6 mm,内部包含五条并行流道,流道宽度为 12 mm.冷板的材质为铝,冷却工质为水,铝、水、相变材料和电池的物性参数如表 1 所示.

表 1 系统中各种材料物性参数

Table 1 Physical property parameters of various materials in the system

property	Al	water	PCM ^[19]	battery ^[18-19]
density ρ /(kg/m ³)	2702	997.56	950	2335
specific heat c_p /(J/(kg·K))	903	4181.72	3000	950
dynamic viscosity η /(kg/(m·s))	—	8.89×10^{-4}	—	—
melting temperature T /K	—	—	315.15 ~ 317.15	—
latent heat H_p /(kJ/kg)	—	—	141.7	—
thermal conductivity λ /(W/(m·K))	237	0.62	7.654	1.05, 21.1, 21.1 (k_x, k_y, k_z)

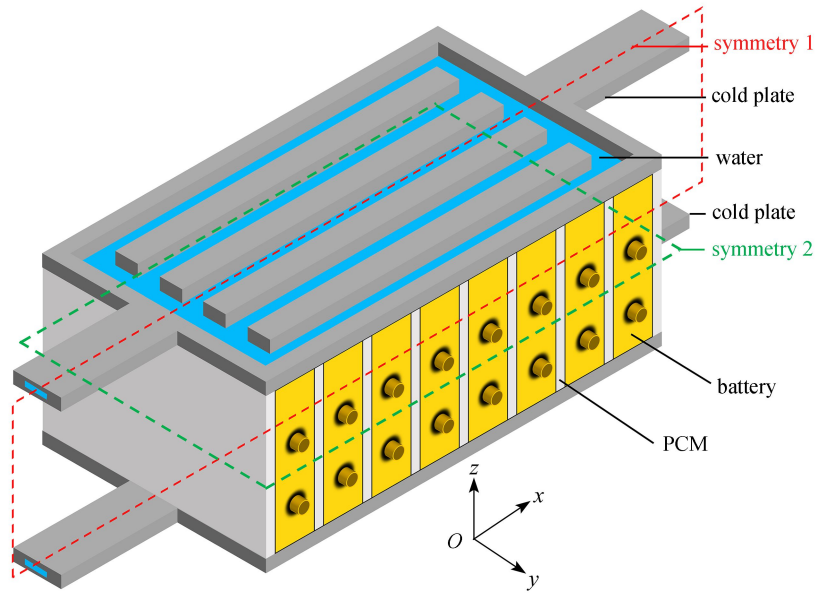


图 1 相变材料耦合冷板系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the PCM coupled cold plate system

1.2 控制方程

本文建立了耦合电池热管理系统的三维数值模型, 采用数值方法计算系统的速度场和温度场, 计算过程中假设相变材料不受重力作用, 在熔化过程只有热传导, 无自然流动; 忽略各材料之间的接触热阻; 系统中各物性参数视为常数, 速度场和温度场计算可以解耦. 电池组在放电过程为非稳态产热过程, 采用瞬态能量方程进行模拟; 相变材料经历融化凝固过程, 使用焓法进行模拟; 冷板中工质采用计算流体力学方法^[21]进行模拟. 因此, 系统各部分的控制方程如下:

电池

$$\rho_b c_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x_j} \right) + \phi_b, \quad (1)$$

其中, T_b 是电池温度, λ_b 是电池热导率, $c_{p,b}$ 是电池比热容, ϕ_b 是电池发热率. 本文考虑电池的 5 倍恒定倍率 (5 C) 放电过程, 采用文献 [22] 中通过实验测定的 12AhLiFePO₄ 电池产热率模型计算电池发热率, 模型如下:

$$\phi_b = \left(I^2 R_b - I T_b \frac{du}{dT} \right) / V_b, \quad (2)$$

$$R_b = 0.007\ 05 - 0.018\ 53 \times Q_{SOC} + 0.058\ 94 \times Q_{SOC}^2 - 0.091\ 51 \times Q_{SOC}^3 + 0.065\ 79 \times Q_{SOC}^4 - 0.017\ 07 \times Q_{SOC}^5, \quad (3)$$

其中, I 为电池放电电流, R_b 为 5 C 放电倍率过程中电池单体的等效电阻, V_b 是电池体积, du/dT 是电化学量热法得到电压温度系数, 值为 $-0.22\ \text{mV/K}$ ^[22].

相变材料

$$\frac{\partial(\rho_p H_p)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x_j} \right), \quad (4)$$

其中, T_p 是相变材料的温度, λ_p 是相变材料的热导率, H_p 是相变材料的焓, 可由下式得到:

$$H_p = h_p + \Delta H_p, \quad (5)$$

$$h_p = \int_{T_0}^{T_p} c_{p,p} dT, \quad (6)$$

$$\Delta H_p = \beta \gamma, \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & T_p < T_s, \\ \frac{T_p - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s < T_p < T_1, \\ 1, & T_p > T_1, \end{cases} \quad (8)$$

其中, $c_{p,p}$ 是相变材料的比热容, β 表示相变材料的液相率, γ 为相变材料的相变焓, T_0 表示初始温度, T_s 为固相点温度, T_1 为液相点温度.

水

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho_w u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta_w \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i}, \quad (10)$$

$$\rho_w c_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} + \rho_w c_{p,w} \frac{\partial(u_j T_w)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x_j} \right), \quad (11)$$

其中, ρ_w 为水的密度, u_i 和 u_j 为 Reynolds 平均速度分量, P 是 Reynolds 平均压力, η_w 为水的动力黏度, $c_{p,w}$ 为水的比热容, λ_w 为水的热导率, T_w 为水的温度.

冷板

$$\rho_c c_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x_j} \right), \quad (12)$$

其中, ρ_c 为冷板的密度, $c_{p,c}$ 为冷板的比热容, λ_c 为冷板的热导率, T_c 为冷板的温度.

1.3 边界条件及网格无关性验证

为了求解控制方程, 采用以下边界条件: 冷却水进口边界设置为质量流量进口, 进口温度和环境温度为恒定温度, 出口设置为压力出口; 由于忽略了各材料之间的接触热阻, 不同材料接触界面设置为温度连续的无滑移边界; 系统为对称结构, 因此取系统四分之一区域作为计算域, 对称面 1 和对称面 2 (图 1 所示) 均设置为对称边界, 其余表面均设置为无滑移绝热边界. 控制方程和边界条件通过有限体积法离散化^[23], 方程中的扩散项由中心差分法离散化.

系统采用结构化网格进行离散, 在流固接触壁面上加密网格保证流动边界层的计算精度. 为了确定合适的网格数, 进行了网格无关性验证. 结果表明, 当网格数量大于 1.5×10^6 时, 电池组最高温度和温差的变化幅度均小于 0.1 K. 因此, 下面将采用类似的网格尺寸对系统进行离散.

2 耦合系统热管理性能

采用第 1 节的数值方法计算相变材料耦合液冷板系统的速度场和温度场. 进口冷却水流量设置为 5 g/s, 进口温度和环境温度设置为 303.15 K. 图 2(a) 给出了放电结束后系统对称面 1 的温度云图. 可以看到, 电池产生的热量一部分被周围的相变材料吸收, 一部分被冷板中的冷却水带走. 冷板中冷却水在往下游流动过程中不断吸收电池产热, 温度逐渐升高. 上游冷却水温度较低, 附近电池产热更多通过冷却水带走; 下游冷却水温度较高, 下游电池更多热量通过相变材料吸收. 图 2(b) 给出了放电结束后系统对称面 1 的液相分数(相变率)云图; 可以看到, 沿冷却水流动方向, 相变材料的熔化率逐渐升高, 下游靠近电池中部附近的相变材料基本熔化, 最终导致下游电池温度较高. 因此, 沿冷却水流动方向电池的平均温度呈现上升趋势. 放电结束后, 电池最高温度 T_{\max} 为 322.5 K, 电池组间温差 ΔT 为 4.9 K. 进一步, 考虑不同的进口冷却水流量 m_0 (5 g/s, 6 g/s, 7 g/s, 8 g/s), 计算结果如图 3 所示. 可以看到, 随着冷却水流量增加, 电池组 T_{\max} 和 ΔT 均减小, 但是液冷板系统功耗 W_p 显著增加. 因此, 通过增加冷板进口流量难以有效地提高相变材料耦合冷板系统的冷却性能.

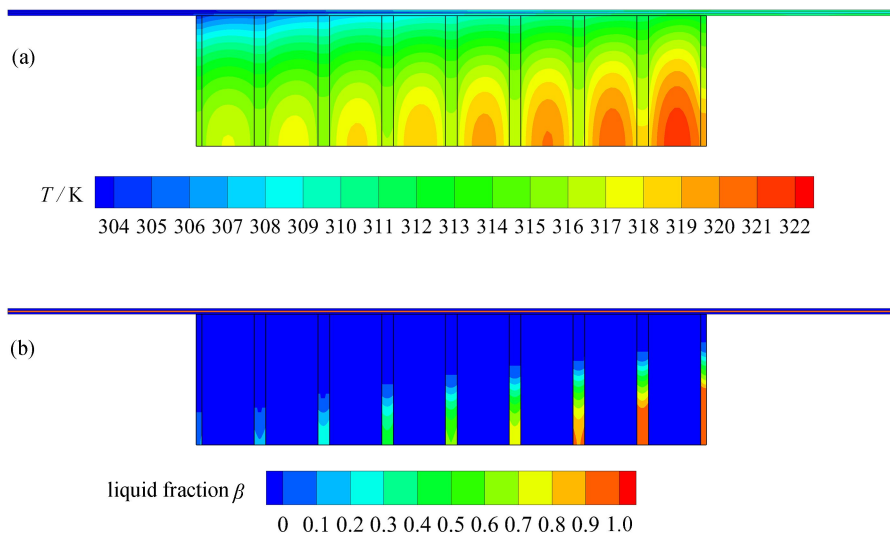


图 2 放电结束时对称面 1 的计算结果: (a) 温度云图; (b) 相变率云图

Fig. 2 Numerical results of symmetry 1 when the discharge process is finished: (a) the temperature nephogram; (b) the liquid fraction nephogram

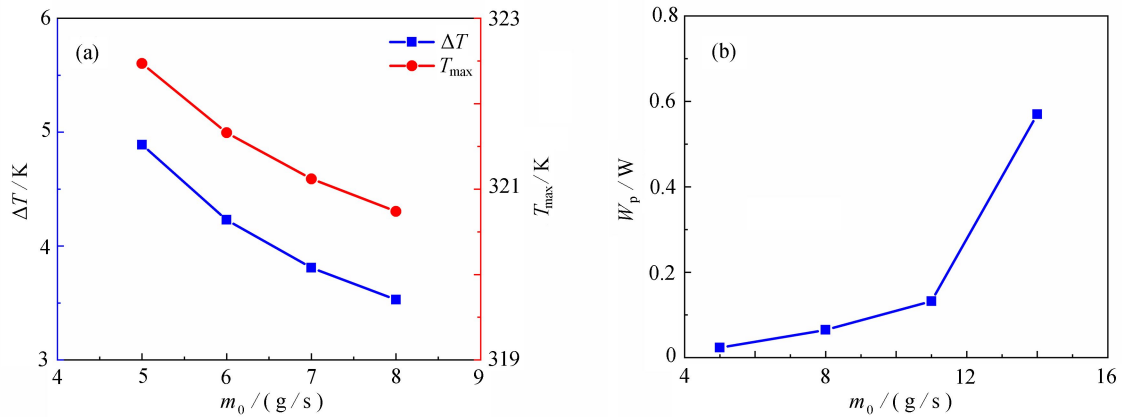


图 3 系统性能指标随冷却水流量的变化关系: (a) 电池组 T_{max} 和 ΔT ; (b) 系统功耗

Fig. 3 System performance with the flow rate of cooling water: (a) T_{max} and ΔT of the battery pack; (b) power consumption of the system
注 为了解释图中的颜色, 读者可以参考本文的电子网页版本, 后同.

3 耦合系统优化设计

在耦合系统中, 冷却液流经并行流道带走电池产生的热量, 其温度沿流向逐渐升高, 从而造成上下游电池的温度差异, 最终导致靠近冷板进口的上游相变材料熔化速率较慢, 利用率较低; 靠近冷板出口的下游相变材料熔化速率快, 利用率较高. 长时间放电后, 因相变材料相变率差异而导致电池组出现较大温差. 在已有研究中, Chen 等^[19] 针对相变材料耦合热管冷却系统, 采用调整策略改变相变材料的厚度分布, 从而调控不同位置相变材料的熔化速率, 达到了改善热管理系统冷却性能的目标. 本文采用类似的思想, 引入文献中的优化策略调整系统中相变材料的厚度分布, 调控不同位置相变材料的利用效率, 从而降低电池组温差. 图 4 给出了耦合系统的主视图. 为了方便识别调整区域位置, 将相变材料的厚度分布记为 $\mathbf{L}=[L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_N, L_{N+1}]$, 其中, N 为电池个数, L_i 为第 i 个相变材料的厚度. 采用以下优化策略对 \mathbf{L} 进行优化:

1) 设置相变材料厚度调整步长为 ΔL , 最小值为 L_{min} , 相变率阈值为 φ_{lim} , 假设初始时刻电池之间的相变材料厚度相同.

2) 计算耦合系统的温度场, 得到每个电池的平均温度 T_k 和电池组温差 ΔT , 记录此时电池间隙分布为最佳分布 \mathbf{L}_{opt} , 对应的电池组温差为最佳温差 ΔT_{opt} .

3) 寻找平均温度最高的电池, 标记为 i , 若 $i=N$, 将 L_{N+1} 增加 ΔL ; 若 $i \neq N$, 比较第 $i-1$ 个电池与第 $i+1$ 个电池的平均温度 T_{i-1} 和 T_{i+1} , 若 $T_{i-1} \geq T_{i+1}$, 将 L_i 增加 ΔL , 若 $T_{i-1} < T_{i+1}$, 将 L_{i+1} 增加 ΔL ; 若所选相变材料调整区域的相变率低于 φ_{lim} , 则该区域不作为调整区域, 此时寻找平均温度次高的电池作为参考依据, 将其标记为 i , 按照调整方法继续调整.

4) 寻找平均温度最低的电池, 标记为 j , 若 $j=1$, 将 L_1 减少 ΔL ; 若 $j \neq 1$, 比较第 $j-1$ 个电池与第 $j+1$ 个电池的平均温度 T_{j-1} 和 T_{j+1} , 若 $T_{j-1} \leq T_{j+1}$, 将 L_j 减少 ΔL , 若 $T_{j-1} > T_{j+1}$, 将 L_{j+1} 减少 ΔL ; 若所选相变材料调整区域达到厚度最小值 L_{min} , 则该区域不作为调整区域, 此时寻找平均温度次低的电池作为参考依据, 将其标记为 j , 按照调整方法继续调整.

5) 再次计算当前系统中每个电池的平均温度及电池组温差 ΔT , 若 $\Delta T < \Delta T_{opt}$, 则将当前相变材料分布记为最佳分布 L_{opt} , 将当前温差记为最佳温差 ΔT_{opt} ; 回到步骤 3), 重复上述过程, 直到 ΔT 不随调整步数增加而减小. 此时优化过程结束, 当前相变材料分布为优化结果.

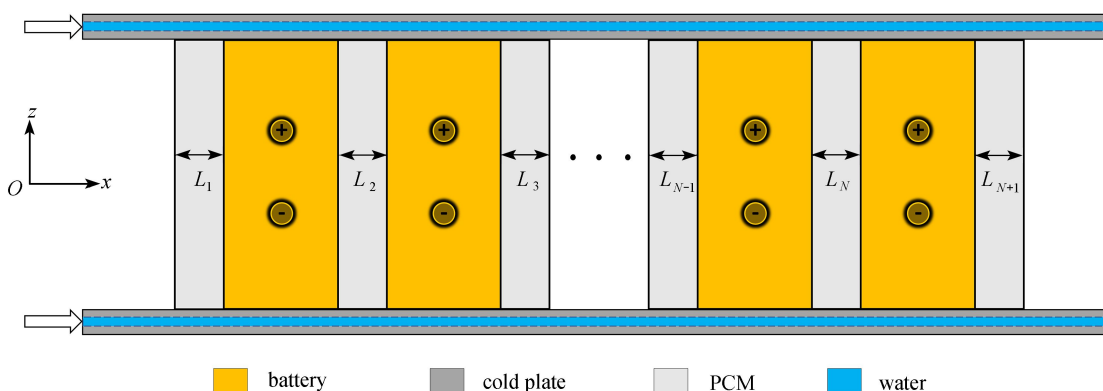


图4 相变材料耦合冷板系统的主视图
Fig. 4 The main view of the PCM coupled cold plate system

4 优化结果分析

采用上述优化策略对第2节的耦合系统进行厚度分布调整. 其中, 相变材料的初始分布为 $L=[2, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 2]$ mm, ΔL , L_{min} 和 φ_{lim} 分别设为 2 mm, 2 mm 和 20%. 图5给出了优化系统温度特性. 电池组 T_{max} 和 ΔT 随相变材料厚度调整次数的变化规律如图5(a)所示. 可以看到, 随着调整次数的增加, 电池组 T_{max} 和 ΔT 先逐渐减小, 到达最小值后逐渐增加; 当调整次数为5次时, ΔT 达到最小值, 此时对应的相变材料厚度优化分布为 $L_{opt}=[2, 2, 2, 2, 2, 2, 4, 10, 6]$ mm.

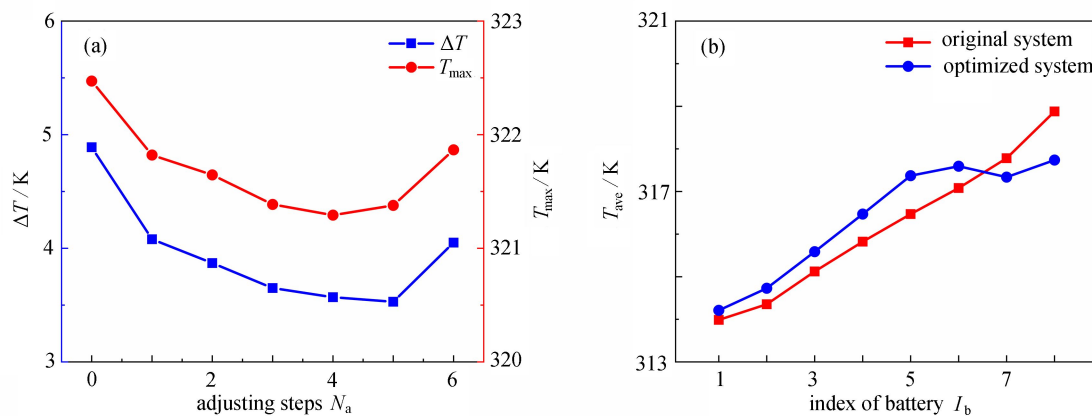


图5 优化系统温度特性: (a) 电池组 T_{max} 和 ΔT 随调整次数的变化; (b) 优化前后电池温度的比较
Fig. 5 Temperature characteristics of the optimized system: (a) changes of T_{max} and ΔT of the battery pack with adjustment steps; (b) battery temperatures before and after optimization

采用数值方法评估优化后系统的性能, 得到放电结束后优化系统的对称面计算域温度云图, 如图 6(a) 所示. 可以看出, 与优化前系统相比, 优化后下游的相变材料厚度增大, 弥补了因下游冷却水温度升高造成的冷却能力下降的问题, 因此下游高温区域有所减少, 电池组温度分布更加均匀(图 5(b)). 图 6(b) 显示了放电结束后优化系统对称面 1 的相变材料液相分数(相变率)云图. 可以看出, 相比于优化前系统(图 2(b)), 优化后上游的相变材料熔化率上升, 下游的相变材料熔化率下降, 沿冷却水流动方向各相变材料熔化比例更加接近, 使相变材料的潜热得到更充分的利用, 而上下游相变材料熔化率差异的减小有利于提升系统的温控性能. 放电结束时, 优化系统中电池组 T_{\max} 和 ΔT 分别为 321.4 K 和 3.5 K, 相比优化前系统分别减小了 1.1 K 和 29%. 由图 3(a) 可知, 优化前系统要保证放电结束时电池组 ΔT 为 3.5 K, 冷却水流量需要由 5 g/s 增大到 8 g/s, 此时冷板功耗由 0.0234 W 增加到 0.0650 W. 因此, 采用优化策略对相变材料厚度分布进行优化后, 在同等冷却性能下, 优化系统的功耗可以降低 64%.

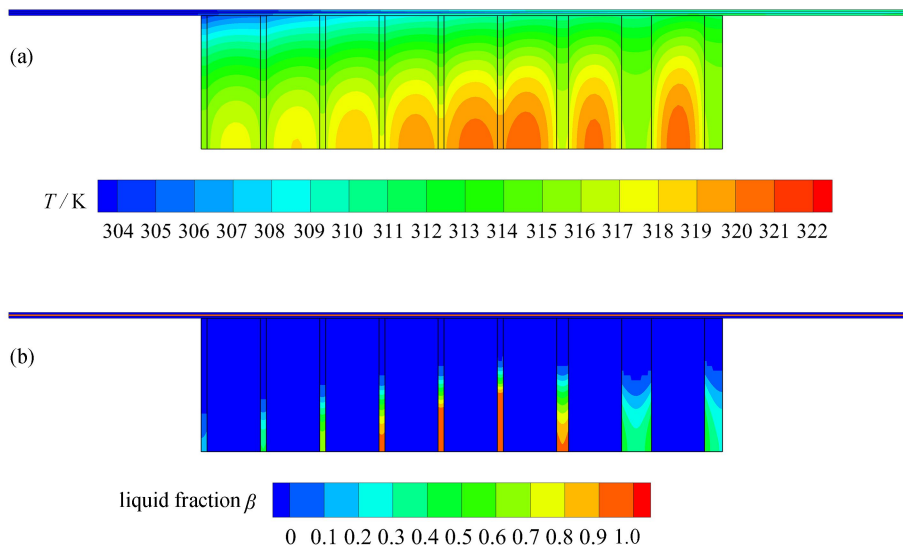


图 6 优化系统对称面 1 的计算结果: (a) 温度云图; (b) 相变率云图

Fig. 6 Numerical results of symmetry 1 in the optimized system: (a) the temperature nephogram; (b) the liquid fraction nephogram

5 结 论

本文针对相变材料耦合冷板热电池管理系统, 采用数值方法研究了系统的冷却性能以及进口流量的影响规律; 进一步采用一种优化策略对系统中相变材料的厚度分布进行了调整. 通过研究, 主要得到了以下结论: 优化策略可在较少调整步数情况下得到优化的相变材料厚度分布; 典型算例结果表明, 相比于优化前耦合系统, 优化后电池组 T_{\max} 减小了 1.1 K, ΔT 减小了 29%; 在同等冷却能力情况下, 优化后系统所需的功耗减小了 64%. 采用的厚度优化策略为相变材料耦合冷板电池热管理系统的设计提供了有效指导.

参考文献(References):

- [1] LU L, HAN X, LI J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, **226**: 272-288.
- [2] SAECHAN P, DHUCHAKALLAYA I. Numerical investigation of air cooling system for a densely packed battery to enhance the cooling performance through cell arrangement strategy[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, **49**(14): 20670-20684.
- [3] DING Y, WEI M, LIU R. Channel parameters for the temperature distribution of a battery thermal management system with liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **186**: 116494.
- [4] HUANG Y H, CHENG W L, ZHAO R. Thermal management of Li-ion battery pack with the application of flexible form-stable composite phase change materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, **182**: 9-20.
- [5] VUDATA S P, BHATTACHARYYA D. Thermal management of a high temperature sodium sulphur battery

- stack[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, **181**: 122025.
- [6] JIANG Z Y, QU Z G. Lithium-ion battery thermal management using heat pipe and phase change material during discharge-charge cycle: a comprehensive numerical study[J]. *Applied Energy*, 2019, **242**: 378-392.
- [7] 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.
- [8] SONG L, ZHANG H, YANG C. Thermal analysis of conjugated cooling configurations using phase change material and liquid cooling techniques for a battery module[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **133**: 827-841.
- [9] 喻寰. 相变材料与液冷耦合的锂电池热管理系统研究[D]. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2019. (YU Huan. Study on lithium battery thermal management system based on coupling of phase change materials and liquid cooling[D]. Master Thesis. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese))
- [10] CAO J, LUO M, FANG X, et al. Liquid cooling with phase change materials for cylindrical Li-ion batteries: an experimental and numerical study[J]. *Energy*, 2020, **191**: 116565.
- [11] LIU Z, HUANG J, CAO M, et al. Experimental study on the thermal management of batteries based on the coupling of composite phase change materials and liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **185**: 116415.
- [12] BAI F, CHEN M, SONG W, et al. Thermal management performances of PCM/water cooling-plate using for lithium-ion battery module based on non-uniform internal heat source[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **126**: 17-27.
- [13] ZHU Z, WU X, ZHANG H, et al. Multi-objective optimization of a liquid cooled battery module with collaborative heat dissipation in both axial and radial directions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **155**: 119701.
- [14] LI J W, ZHANG H Y. 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.
- [15] WANG R, LIANG Z, SOURI M, et al. Numerical analysis of lithium-ion battery thermal management system using phase change material assisted by liquid cooling method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, **183**: 122095.
- [16] MOLAEIMANESH G R, MIRFALLAH N S M, DAHMARDEH M. Impact of configuration on the performance of a hybrid thermal management system including phase change material and water-cooling channels for Li-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, **181**: 116028.
- [17] CAO J, LING Z, FANG X, et al. Delayed liquid cooling strategy with phase change material to achieve high temperature uniformity of Li-ion battery under high-rate discharge[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, **450**: 227673.
- [18] CHEN Y, CHEN K, DONG Y, et al. Bidirectional symmetrical parallel mini-channel cold plate for energy efficient cooling of large battery packs[J]. *Energy*, 2022, **242**: 122553.
- [19] CHEN K, HOU J, SONG M, et al. Design of battery thermal management system based on phase change material and heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **188**: 116665.
- [20] CHEN K, CHEN Y, SONG M, et al. Multi-parameter structure design of parallel mini-channel cold plate for battery thermal management[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, **44**(6): 4321-4334.
- [21] 白羽, 方慧灵, 张艳. Oldroyd-B流体绕拉伸楔形体的非稳态滑移流动与传热分析[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(3): 272-280. (BAI Yu, FANG Huiling, ZHANG Yan. Unsteady slip flow and heat transfer analysis of Oldroyd-B fluid over the stretching wedge[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(3): 272-280.(in Chinese))
- [22] WU W, WU W, WANG S. Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized phase change material[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **121**: 967-977.
- [23] 彭世彬, 郭瑞, 冯上升, 等. 主动冷却点阵夹层隔热结构温度响应计算模型[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(5): 477-489. (PENG Shibin, GUO Rui, FENG Shangsheng, et al. A calculation model for temperature responses of active cooling lattice sandwich structures for thermal protection[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(5): 477-489.(in Chinese))