

相变材料和液冷结合的锂离子电池热管理性能优化

姜鑫鑫, 李凌

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 相变材料因其良好的控温能力在电池热管理中得到了广泛的研究,但在高温环境和高放电倍率下,单纯依靠相变材料很难满足热管理的要求。设计了相变材料和冷却板混合的电池热管理方式并对其进行数值模拟,与采用纯相变冷却进行了对比。分析了电池间距、冷却液入口速度对电池最高温度以及相变材料液化率的影响,并对充放电循环过程进行了探究。结果表明,在高温和高放电工况下,液冷的引入解决了因相变材料完全液化导致的电池温度恶化和中间电池热量累积的问题。相比于纯相变冷却,当冷却液速度为 0.5 m/s 时,混合冷却可将电池的间距减小至 3 mm,继续增大冷却液的速度对热管理性能提升较小。同时,液冷板的加入可以减少首次充放电循环对后续循环过程的影响,增加电池的使用寿命。

关键词: 电池热管理; 数值模拟; 相变材料; 液冷

中图分类号: TK 121

文献标志码: A

Thermal management performance optimization of lithium-ion batteries combined with phase change materials and liquid cooling

JIANG Xinxin, LI Ling

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Phase change materials have been widely studied in battery thermal management due to their good temperature control capabilities, but in high temperature environments and high discharge rates, it is difficult to rely solely on phase change materials to meet the requirements of thermal management. Therefore, a battery thermal management method with a mixture of phase change materials and cooling plates was designed and numerically simulated and compared with pure phase change cooling. The effects of distance and coolant inlet velocity on the maximum temperature of the battery and liquid fraction of phase change materials were investigated, and the charge-discharge cycle process was also investigated. The results show that the addition of liquid cooling solves the problems of battery temperature deterioration and intermediate battery heat accumulation caused by complete liquefaction of phase change materials under high temperature and high discharge conditions. Compared with pure phase-change cooling, the hybrid cooling can reduce the cell spacing to 3 mm when the coolant velocity

收稿日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476102)

第一作者: 姜鑫鑫(1997-),男,硕士研究生。研究方向: 电池热管理。E-mail: jxx051316@163.com

通信作者: 李凌(1976-),女,教授。研究方向: 相变传热、能源有效利用等。E-mail: lil@usst.edu.cn

is 0.5 m/s and the thermal management performance can be improved less by continuing to increase the cooling liquid velocity. At the same time, the addition of the liquid cooling plate can reduce the influence of the first charge-discharge cycle on the subsequent cycle process and increase the lifetime of the batteries.

Keywords: battery thermal management; numerical simulation; phase change materials; liquid cooling

为了应对环境危机, 减少二氧化碳的排放, 清洁无污染的新能源汽车引起了人们越来越多的关注^[1-2]。作为储/供能装置, 电池性能的好坏直接决定了汽车的产品质量^[3]。其中, 锂离子电池因为无记忆性、能量密度高、循环寿命长等优点, 在储能和新能源汽车领域得到了广泛的应用^[4]。但锂离子电池的性能受温度的影响很大, 电池的最佳工作温度范围需要控制在 20 ~ 45 °C 之间^[5]。在实际的高温环境和快速放电应用下, 电池的产热量迅速增加。若热量得不到耗散, 会发生不可逆的热失控甚至爆炸^[6-7]。另一方面, 电池间的最大温差应小于 5 °C^[8-10], 过大的温差会导致电池内的不平衡放电, 加快老化速率, 影响电池的寿命。为了提高电池的性能, 高效的电池热管理技术显得尤为重要。

根据工作介质的不同, 目前电池热管理方式可以分为空气冷却^[11]、液体冷却^[12]、相变材料(phase change material, PCM)冷却^[13]、热管冷却等^[14]。其中相变冷却比空冷冷却能力强, 比液冷、热管冷却结构简单, 并且在相变过程中可以吸收大量的热, 使电池的温度维持在相变温度附近^[15], 因此得到了广泛的研究。Javani^[16]研究了单体电池在放电过程中, 不同厚度的 PCM 对电池温度的影响, 结果表明, 相比空气自然冷却, PCM 的加入使电池的温度下降了 3 K 左右, 电池温度变得更加均匀。然而, 相变材料存在导热率低和自身散热差两个主要问题^[17]。虽然通过加入例如膨胀石墨(EG)、金属泡沫、碳纳米管等高导热率材料可以增加相变材料的导热系数^[18-21], 但是, 相变材料自身的散热仍是大问题。在高温和快速放电工况下, 若仅通过与环境的自然对流散热, 相变材料会完全液化, 电池的热量无法高效耗散, 导致电池局部温度过高。为了解决这个问题, 结合了相变冷却和其他冷却(如空冷、液冷、热管冷却)的混合冷却方式得到了广泛的研究。例如, Safdari

等^[22]数值研究了 PCM 和强制空气冷却的混合冷却效率。通过改变入口空气的流速, 与自然对流相比, 在流速为 0.2 m/s 的情况下, 强制空冷的冷却能力提高了 6 倍以上。但是, 当电池在较大电流工况时, 该冷却方式将很难满足热管理的要求。相比于空气, 液体更适合电池在大电流工况时的冷却。Zhang 等^[23]实验表明, 在高放电倍率时, 结合相变材料和底部液体冷却可以将电池的最高温度控制在 50 °C 以下, 并且电池的温度呈现出良好的均匀性。为了增加冷却液的换热面积, Zhuang 等^[24]设计了包含冷却孔的冷却板, 将电池和相变材料包覆其中, 在高放电过程中防止了电池热量的累积, 有效地降低了电池的温度, 但是过多的冷却孔会增加系统的复杂度。目前, 对于相变材料和液冷混合系统的研究, 主要针对电池的放电过程, 却对使用更多的充放电循环过程探究较少。另外, 冷却能力的提升往往伴随着系统体积的增加, 所以在结构设计时, 减小系统的复杂性和体积也至关重要。

本文设计了一种相变材料和液冷板复合的冷却结构, 降低了系统的复杂程度。在此基础上, 讨论了电池的间距、冷却液的速度对电池热性能的影响。在考虑放电的同时, 也对充放电循环过程中电池的温度以及相变材料的液化情况进行了探究, 并和无液冷板的相变模组进行对比分析。通过对混合模组的优化设计, 减小了模组的体积和输入功。

1 研究方法

1.1 物理模型

本文研究的物理模型如图 1 所示, 该模组由 24 个圆柱形锂离子电池构成, 直径 $D=26$ mm, 高度 $H=65$ mm, 电池的具体参数如表 1 所示。电池模组周围穿插了中空铝制冷却板, 冷却介质从中

间流过。冷却板的壁厚为 0.5 mm，冷却液通道横截面的尺寸为 1 mm×64 mm，冷却介质为水，具体物性参数如表 2 所示。电池和液冷板的间隙处填充了由石蜡、脂质和膨胀石墨(EG)复合的相变材料，用来吸收电池充放电过程中产生的热量，这部分热量将由导热性能较好的铝金属板传递给冷却水耗散掉，相变材料的具体参数如表 3 所示。为了确保安全，整个电池组用绝缘材料包装起来。初始电池之间的间距 $d=6$ mm。

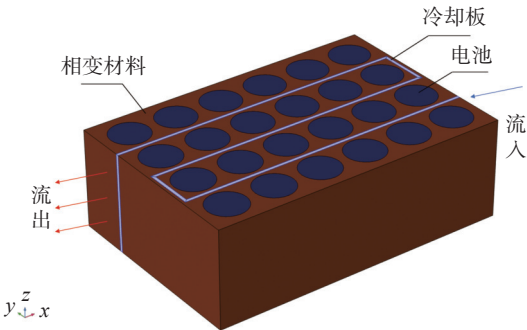


图 1 电池混合冷却模组结构图

Fig.1 Structure diagram of battery hybrid cooling module

表 1 电池的性能参数

Tab.1 Battery performance parameters

参数	数值
容量/(A·h)	3
标称电压/V	3.2
放电截止电压/V	2.5
电池直径/mm	65
内阻/mΩ	28
径向导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.98
轴向系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	26.96
密度/(kg·m ⁻³)	2059
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1375

表 2 金属板和冷却水的物性参数

Tab.2 Physical parameters of metal plate and cooling water

材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	运动黏度×10 ⁶ / (m ² ·s ⁻¹)
铝板	238	2700	900	—
水(303.15 K)	0.618	995.7	4.174	0.805

表 3 相变材料的物性参数

Tab.3 Physical parameters of phase change materials

导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	相变温度/℃	相变潜热/ (kJ·kg)
5.023	870	2412	31~36	119.24

1.2 数学模型

为方便计算，作出如下假设：a. 冷却液为不可压缩的牛顿流体；b. 各材料之间的接触热阻忽略不计，材料的物性为定值；c. 电池与相变材料之间只通过导热进行热量传递，忽略辐射的影响；d. 忽略相变材料在相变后的体积与压力的变化。

电池的导热方程为

$$\begin{aligned} p_b C_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{\text{gen}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中： p_b 、 C_b 和 T 分别表示电池的密度、比热容和温度； K_x 、 K_y 、 K_z 表示电池沿着 3 个坐标轴方向的导热系数；源项 $\dot{Q}_{\text{gen}}$ 表示电池的产热量，根据产生原理，又可分为由于熵变产生的可逆热和由于电池内阻产生的不可逆热两部分。

目前常用的电池发热量的计算公式是从 Bernardi 等^[25]提出的公式中简化而来的，即

$$\dot{Q}_{\text{gen}} = I(U - V) - IT \frac{dU}{dT} \quad (2)$$

式中： I 为电池的工作电流； U 和 V 表示电池的开路电压和工作电压。式(2)右侧第一项表示不可逆热，右侧第二项表示可逆反应热。

电池和相变材料以及相变材料和外界环境在界面之间处于热平衡，遵循以下的公式：

$$-\lambda_b \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_{\text{PCM}} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

$$-\lambda_{\text{PCM}} \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{\text{PCM}} - T_a) \quad (4)$$

式中： h 、 T_{PCM} 和 T_a 分别表示表面传热系数、相变材料的温度和环境的温度； λ_b 和 λ_{PCM} 分别为电池和复合相变材料的导热系数； $\frac{\partial T}{\partial n}$ 表示温度的梯度。

相变材料的热量传递方程可以表示为

$$\rho_{\text{PCM}} \frac{\partial H_{\text{PCM}}}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{\text{PCM}} \nabla T_{\text{PCM}}) \quad (5)$$

$$H_{\text{PCM}} = \int_{T_a}^{T_{\text{PCM}}} C_{\text{PCM}} dT + \beta L \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_S \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S}, & T_S \leq T \leq T_L \\ 1, & T > T_L \end{cases} \quad (7)$$

式中： ρ_{PCM} 表示相变材料的密度； H_{PCM} 表示相变材料的焓； C_{PCM} 、 L 和 β 分别为相变材料的比热

容、潜热和液化率; T_S 表示固相温度; T_L 表示液相温度。

流体的连续性方程、动量方程、能量方程分别表示为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\mathbf{v}) = 0 \\ \frac{\partial (\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}\mathbf{v}) = \nabla \cdot (\mu_c \nabla \mathbf{v}) - \frac{1}{\rho_c} \nabla P \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_c C_{p,c} T_c) + \nabla \cdot (\rho_c C_{p,c} \mathbf{v} T_c) = \nabla \cdot (\lambda_c \nabla T_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ_c , $C_{p,c}$ 和 λ_c 分别表示冷却液的密度、比热容和导热系数; T_c 表示冷却液的温度; $\mathbf{v}$ 表示冷却液的速度矢量; μ_c 表示流体的运动黏度。

冷却液的雷诺数为

$$Re = \frac{v_c l}{\mu_c} \quad (9)$$

式中: v_c 为流体的速度; l 为矩形板的当量直径。

为了对电池温度的空间分布进行解析, 定义了电池最高温度和最低温度之差为电池的温差 ΔT , 即

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (10)$$

式中, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别表示电池的最高温度和最低温度。

整个系统的初始温度为 303.15 K, 冷却液的入口为速度进口, 温度为 303.15 K。出口边界为压力出口。除此之外, 整个系统与外界环境之间的换热系数恒定为 5, 换热系数恒定为 5 W/(m²·K)。入口的速度范围在 0~1 m/s 之间, 经过计算, 雷诺数 $Re < 2300$, 按层流计算, 并且壁面无滑移。

2 结果与讨论

2.1 网格无关性和模型验证

在电池间距 6 mm, 入口速度 0.5 m/s 的情况下, 绘制了 5 套网格。计算了 5 C 放电倍率(表示 0.2 h 将电池容量放完, 放电电流为 15 A)结束时电池的最高温度, 如图 2 所示。5 套网格的数量分别为 481173, 932399, 1278268, 1735924 和 2134791。由图 2 可以发现, 当网格数达到 1278268 时, 随着网格数的增加, 电池的最高温度基本不变, 误差在 ± 0.1 K 以内。所以, 在满足计算精度的条件下, 选取 1278268 的网格数量来进行仿真模拟。

为了对模型进行验证, 对基于复合相变材料的电池在不同放电倍率下的最高温度进行了模拟, 并与黄菊花等^[26]的结果进行了对比。在 1,

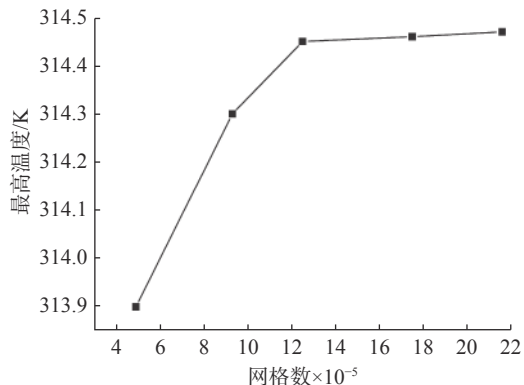


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

3, 5 C 放电倍率下电池的最高温度随时间的变化如图 3 所示。从图 3 可以发现, 模拟的结果与文献结果吻合度很好, 最大的相对误差为 1.2%, 证实了模型的准确性。

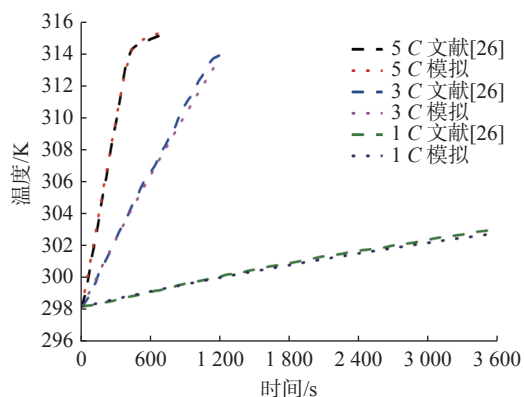


图 3 不同放电倍率下电池最高温度随时间变化的对比验证

Fig.3 Comparison and validation of the maximum temperature of the battery with time under different discharge rates

2.2 不同冷却方式下的电池热性能分析与优化

不同的冷却方式会影响电池的温度变化, 本文首先模拟了 5 C 放电倍率时在自然冷却、相变冷却以及混合冷却模式下, 电池的最高温度随时间的变化, 结果如图 4 所示。从图 4 可以发现, 自然冷却模组电池的温度最高, 混合冷却模组电池的温度最低。在自然对流冷却方式下, 电池温度直线上升, 在放电结束时的温度达到了 346.27 K, 远远超过电池的最佳工作温度。加入相变材料后, 电池的最高温度明显下降, 并维持在相变温度附近, 曲线的斜率先减小后趋于不变。在放电结束时, 电池的最高温度为 316.27 K。引入液冷板后电池的最高温度进一步降低, 在放电结束时, 电池的最高温度为 313.92 K, 比相变冷却降低了 2.35 K。此外, 电池的最高温度所在位置也不相

同，图 5 为放电结束时模组高度方向上中间截面的温度云图。从图 5 可以发现，在相变模组下，电池的最高温度出现在模组的中间位置。这是因为中间相变材料的散热能力相较于模组两边较差，模组中间相变材料完全液化，进而发生热量的累积，此时电池模组的最大温差为 3.9 K。在液冷板加入后，由于对流换热的影响，增强了模组相变材料的换热能力，降低了相变材料的温度，进而增强了电池和相变材料之间的导热，降低了混合冷却模组中间电池的最高温度，此时电池的最高温度出现在与液冷板传热面积较小的模组两边。但是相较于纯相变模组，混合冷却模组的最大温差为 4.76 K，增加了 0.8 K 左右。这是因为液冷板的加入和相变材料的减少，导致模组中间电池温度下降的幅度大于两边的电池。

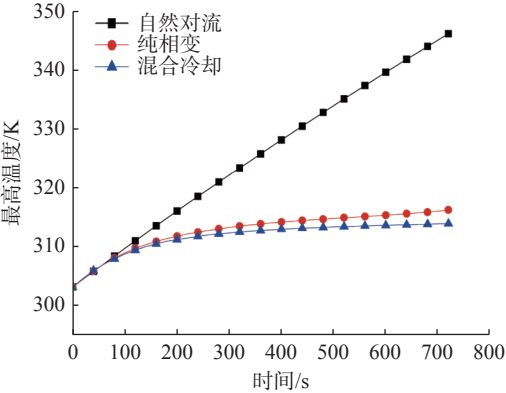


图 4 电池的最高温度随时间的变化

Fig.4 The maximum temperature of the battery changes with time

在混合冷却的基础上，进一步探究了冷却液速度对放电过程中电池温度、最大温差以及冷却液压降的影响，结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 可以发现，随着速度的增加，相变材料和液冷板之间的散热增强，电池的温度逐渐降低，电池温升曲线的斜率慢慢减小并趋于不变。当速度大于 0.5 m/s 时，电池温升曲线在整个放电时间内基本重合，放电结束时最高温度维持在 313.9 K 左右，说明再增加冷却液速度对改善电池温度的作用已经可以忽略。从图 7 可以发现，随着速度的增加，电池之间的温差趋于不变，但压降急剧增长，所以，过大的速度会增加系统的输入功，但对电池温度的影响很小。因此，后续混合冷却模组的冷却液速度定为 0.5 m/s。

为了优化电池模组的体积，研究了不同电池间距下的散热特性。图 8 为不同间距下电池最高

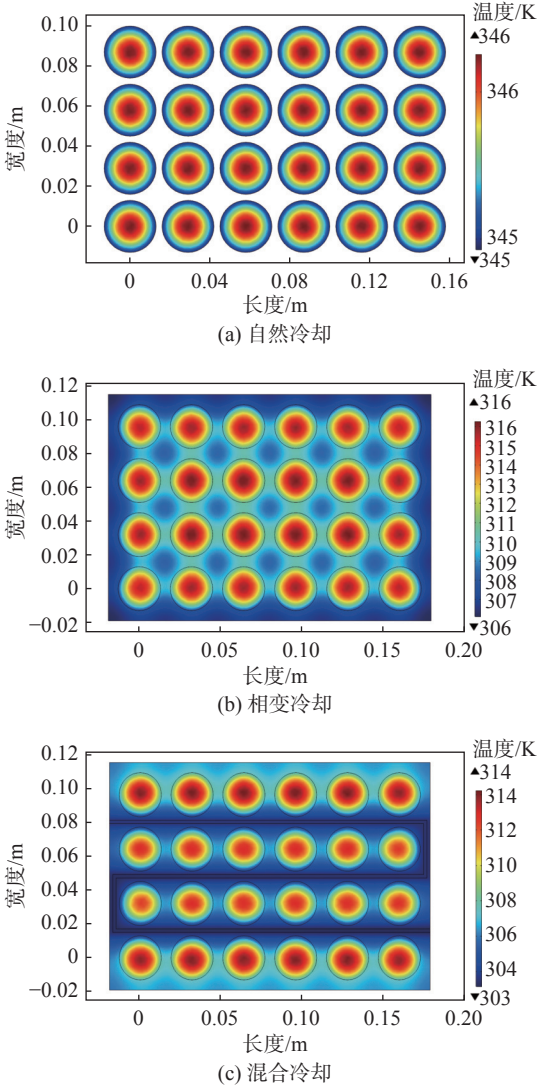


图 5 放电截止时截面的温度云图

Fig.5 Temperature cloud diagram of the cross-section at the ending of discharge

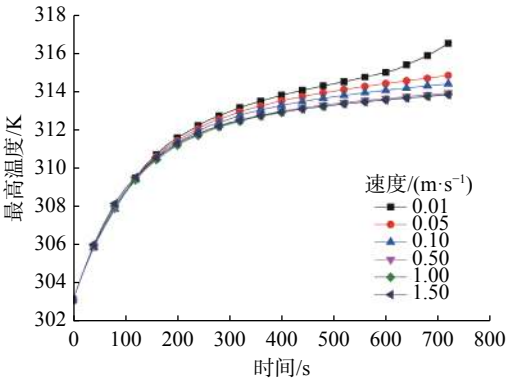


图 6 冷却液速度对电池温度的影响

Fig.6 Effect of the coolant speed on the battery temperature

温度随时间的变化情况。从图中可以发现，放电初期电池间距对于温度的变化影响不大。随着电池的持续放电，到了放电后期，随着间距的减

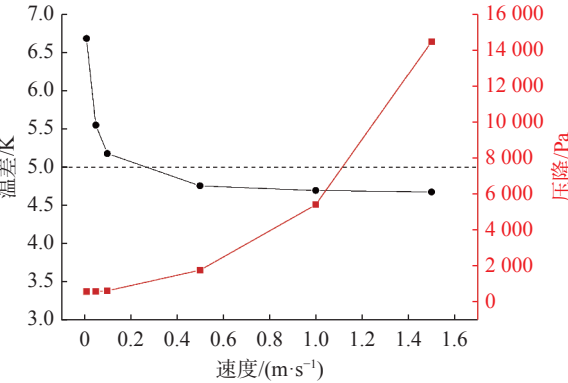


图 7 温差和压降随速度的变化

Fig. 7 Variation of temperature difference and the pressure drop under different flow velocities

小, 温度逐渐升高。这是因为当电池间距减小时, 相变材料的质量也减小, 导致相变材料吸收的热量减少, 电池的最高温度增加。这种趋势在纯相变模组下愈发明显。从图 8(b)中可以发现, 相较于相变模组, 由于液冷的引入, 增强了模组的换热能力。即使在 3 mm 间距时, 混合模组仍然具有良好的控温效果, 电池的最高温度为 315.73 K, 并且相变材料通过潜热吸热的时间明显增加, 所以放电末期的温升变得相对平缓。在 3 mm 间距下, 由于相变材料质量减小, 模组两边的电池与液冷板接触的面积相对较小, 出现了相变材料的局部完全液化问题, 导致电池的最高温升速率变大, 在减小模组体积的要求下, 此时电池的最高温度依然满足要求。图 9 表示了相变材料的液化率随电池间距的变化。如图 9 所示, 液冷板的加入改善了小间距时相变材料完全液化的现象, 所以降低了电池的温度。综上所述, 在冷却效果提升的同时, 混合冷却可以减小电池模组的体积。后续电池的间距恒定为 3 mm。

2.3 充放电循环下电池温度的探究

为了进一步探究电池在使用更为普遍的充放电循环过程中的温度变化, 对混合冷却模组进行了 2 次充放电循环的模拟研究, 并和无液冷板的相变模组进行了对比, 结果如图 10 和图 11 所示。电池的放电倍率为 5 C(720 s), 充电倍率为 0.5 C(7200 s), 无静置时间。由于充电倍率较小, 电池的最高温度在充电过程中会有所下降。从图 10 和 11 中可以发现, 在纯相变模组下, 首次充放电循环对后续的循环过程影响很大。在第一次循环结束时, 电池的最高温度在 310 K 附近, 相变材料基本处于完全液化的状态。导致了

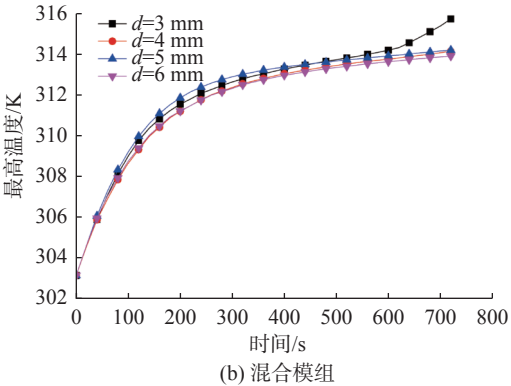
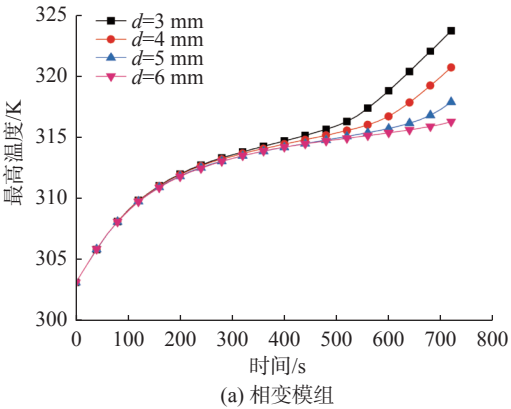


图 8 电池的最高温度随电池间距的变化

Fig. 8 Evolution of the maximum temperature of battery under the different cell-to-cell spacing

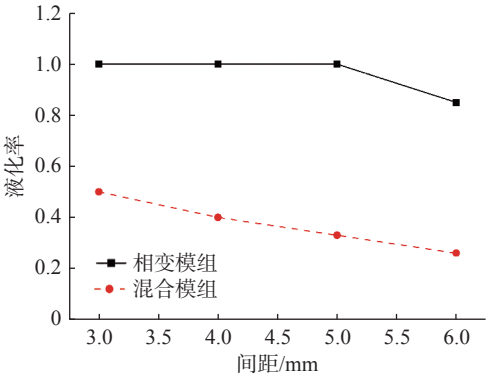


图 9 相变材料的液化率随电池间距的变化

Fig. 9 Evolution of the liquid fraction of the PCM under the different cell-to-cell spacing

在第二次放电过程中, 电池的最高温度急剧增加接近 340 K, 相变材料完全处于液化状态。其中, 电池的温差为同一时刻模组中电池的最高温度和最低温度之差。从图 10(b)中可以发现, 第一次循环过程中, 相变材料的凝固导致电池温差发生短暂的上升, 然而在第二次循环过程中, 由于相变材料的完全液化, 这种现象消失。液冷板加入后, 首次充放电循环对后续的循环过程基本没有

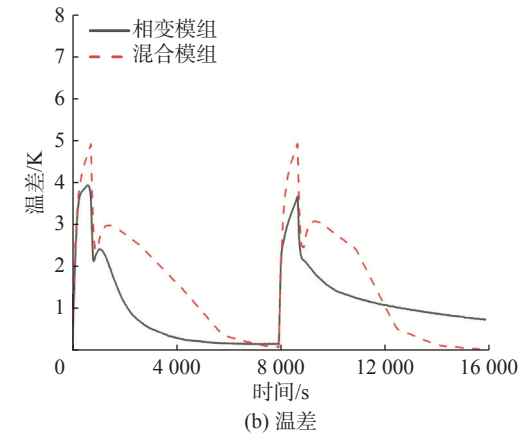
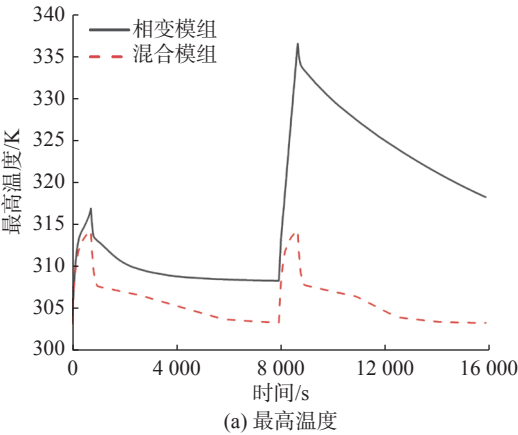


图 10 充放电循环时电池的最高温度和温差随时间的变化
Fig. 10 Changes in the maximum temperature and temperature difference of the battery with time during charge-discharge cycles

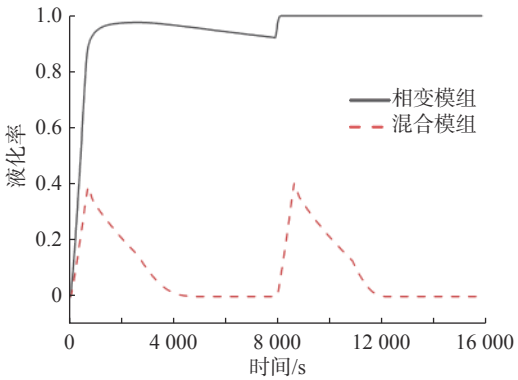


图 11 充放电循环时相变材料液化率随时间的变化
Fig. 11 Liquid fraction of PCM with time during charge-discharge cycles

影响。在第一次循环结束时，电池的温度趋于环境温度，此时相变材料的液化率为 0。在第二次充放电循环中，相较于相变模组，液冷板的加入强化了电池和相变材料的散热，明显降低了电池的最高温度。并且，在两次充电过程中都可以发现相变材料凝固放热导致温差短暂上升的现象。所

以在充放电循环过程中，液冷板的加入可以减少首次充放电循环对后续循环过程的影响，降低电池在循环过程中的温度，增加电池的循环寿命。

液冷的引入可以有效降低电池的温度，改善电池的性能，但同时也会消耗一定的输入功。为了减小模组的输入功，在电池的最高温度($T_{\max}$)降低到相变材料的初始熔点以下时，可以适当减小冷却液的入口速度(v_c)。如图 12 所示，当 $T_{\max}$ 小于相变材料的液化温度时， v_c 减小为 0.1 m/s，此时电池模組的温度性能仍保持在适当范围内。

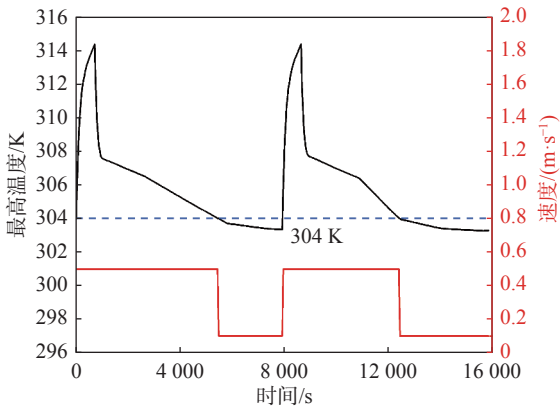


图 12 速度的动态变化对电池温度的影响
Fig. 12 Effect of dynamic changes in speed on the battery temperature

3 结 论

设计了相变材料和液冷板复合的电池热管理方式，在高放电倍率和高温环境下，模拟了放电和充放电循环过程中电池热性能和相变材料液化的变化情况。优化了电池间距、冷却液流动速度对电池模组冷却的影响。主要结论如下：

- 高放电倍率和高温环境下，相比于自然冷却和相变冷却，混合冷却表现出了更好的冷却效果。当冷却液速度超过一定值时，继续增大冷却液的流动速度，对电池热管理性能的提升影响较小。
- 混合冷却可以减小本电池模组的体积，在小间距和高放电倍率时，依然能将电池的温度控制在合理范围内，并且相变材料不会出现完全液化的现象。
- 液冷的引入在降低电池温度的同时也降低了首次充放电循环对后续循环过程中电池温度的影响，并且相变材料的潜热可以在充电过程中恢复，增加了电池的循环寿命。动态调整冷却液的流动速度，在控温的同时减少了输入功。

参考文献:

- [1] LI L, DABABNEH F, ZHAO J. Cost-effective supply chain for electric vehicle battery remanufacturing[J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 277–286.
- [2] 王鸣, 张振东. 电动汽车充电网关控制器开发 [J]. *能源研究与信息*, 2018, 34(3): 159–163.
- [3] DUAN X, NATERER G F. Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(23/24): 5176–5182.
- [4] WEN J P, ZHAO D, ZHANG C W. An overview of electricity powered vehicles: lithium-ion battery energy storage density and energy conversion efficiency[J]. *Renewable Energy*, 2020, 162: 1629–1648.
- [5] WEINERT J X, BURKE A F, WEI X Z. Lead-acid and lithium-ion batteries for the Chinese electric bike market and implications on future technology advancement[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 172(2): 938–945.
- [6] PUTRA N, ARIANTARA B, PAMUNGKAS R A. Experimental investigation on performance of lithium-ion battery thermal management system using flat plate loop heat pipe for electric vehicle application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 784–789.
- [7] 唐致远, 管道安, 张娜, 等. 锂离子电池的安全性研究进展 [J]. *化工进展*, 2005, 24(10): 1098–1102.
- [8] 施尚, 余建祖, 陈梦东, 等. 基于泡沫铜/石蜡的锂电池热管理系统性能 [J]. *化工学报*, 2017, 68(7): 2678–2683.
- [9] LV Y F, YANG X Q, LI X X, et al. Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 376–382.
- [10] JIANG G W, HUANG J H, LIU M C, et al. Experiment and simulation of thermal management for a tube-shell Li-ion battery pack with composite phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 120: 1–9.
- [11] 宋俊杰, 王义春, 王腾. 动力电池组分层风冷式热管理系统仿真 [J]. *化工进展*, 2017, 36(S1): 187–194.
- [12] PATIL M S, SEO J H, PANCHAL S, et al. Numerical study on sensitivity analysis of factors influencing liquid cooling with double cold-plate for lithium-ion pouch cell[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(2): 2533–2559.
- [13] 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.
- [14] RAO Z H, WANG S F, WU M C, et al. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 65: 92–97.
- [15] 崔梦冬, 刘道平, 杨亮, 等. 二元有机复合相变材料相变过程热特性实验研究 [J]. *能源研究与信息*, 2022, 38(1): 53–60.
- [16] JAVANI N, DINCER I, NATERER G F, et al. Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72: 690–703.
- [17] FARID M M, KHUDHAIR A M, RAZACK S A K, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(9/10): 1597–1615.
- [18] HUSSAIN A, TSO C Y, CHAO C Y H. Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite[J]. *Energy*, 2016, 115: 209–218.
- [19] SITU W F, ZHANG G Q, LI X X, et al. A thermal management system for rectangular LiFePO₄ battery module using novel double copper mesh-enhanced phase change material plates[J]. *Energy*, 2017, 141: 613–623.
- [20] MEHRABI-KERMANI M, HOUSHFAR E, ASHJAEI M. A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 141: 47–61.
- [21] HUANG Q Q, LI X X, ZHANG G Q, et al. Thermal management of lithium-ion battery pack through the application of flexible form-stable composite phase change materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 183: 116151.
- [22] SAFDARI M, AHMADI R, SADEGHZADEH S. Numerical investigation on PCM encapsulation shape used in the passive-active battery thermal management[J]. *Energy*, 2020, 193: 116840.
- [23] ZHANG H Y, WU X Y, WU Q Y, et al. Experimental investigation of thermal performance of large-sized battery module using hybrid PCM and bottom liquid cooling configuration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113968.
- [24] ZHUANG Y J, CHEN T H, CHEN J T, et al. Thermal uniformity performance of a hybrid battery thermal management system using phase change material and cooling plates arrayed in the manner of honeycomb[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, 26: 101094.
- [25] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5–12.
- [26] 黄菊花, 陈强, 曹铭, 等. 相变材料与水套式液冷结构耦合的圆柱型锂离子电池组热管理仿真分析 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(4): 1423–1431.

(编辑: 丁红艺)