DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.274 **中图分类号**：U469.72 **文献标志码**：A

基于翅片强化传热 PCM 锂电池热管理研究

路 玲，汪缤缤，胡 健，秦 鹏
(巢湖学院机械工程学院，合肥 238000)

摘要：为弥补相变材料 PCM(phase change materials)低导热系数的不足，设计新型轴向延伸式波纹形翅片以提高锂电池散热性能，运用 CFD 仿真研究翅片类型、对流换热系数、翅片数量、翅片延伸长度以及环境温度对电池散热性能的影响。研究表明，添加翅片可提高锂电池散热性能。相比传统梯形翅片，波纹形翅片将电池最高温度进一步降低 1.7 ℃；电池散热性能随换热系数、翅片数量以及翅片延伸长度的增加而增强，权衡散热模型冷却性能和重量，三参数的最佳取值分别为 35 W/(m^2·K)、8 和 15 mm，此工况下锂电池最高温度和温差分别为 39.9 ℃和 4.0 ℃。此外，当环境温度从 25 ℃提高至 30 ℃时，电池最高温度为 46.0 ℃，仍保持在安全范围内，热管理系统展现良好的热稳定性。

关键词：锂电池；波纹形翅片；相变材料；热管理

Study on Thermal Management of Lithium-ion Battery Based on PCM-fin Reinforced Heat Transfer Structure

LU Ling, WANG Binbin, HU Jian, QIN Peng
(School of Mechanical Engineering, Chaohu University, Hefei 238000, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of phase change materials (PCM) such as a low coefficient of heat conductivity, a novel axial extended corrugated fin is designed to improve the heat dissipation performance of lithium-ion batteries. Subsequently, the effects of the types of fins, convective heat transfer coefficient, number of fins, extended fin length and ambient temperature on the heat dissipation performance of batteries are studied by simulations using computational fluid dynamics (CFD). Results demonstrate that the introduction of corrugated fins can improve the heat dissipation performance of lithium-ion batteries. Compared with the traditional trapezoidal fins, the corrugated fins can further reduce the maximum temperature of batteries by 1.7 ° C. In addition, the heat dissipation performance of batteries is improved by increasing the heat transfer coefficient, as well as the number and extended length of fins. With a trade-off between the cooling performance of the heat dissipation model and its weight, the maximum temperature and temperature difference of the lithium-ion battery are 39.9 ° C and 4 ° C respectively when the convective heat transfer coefficient, the number of fins and fin length separately take their optimal values of 35 W/m^{2}K, 8 and 15 mm. Moreover, when the ambient temperature rises from 25 ° C to 30 ° C, the maximum temperature of the battery is 46 ° C, which still remains within a safe range, indicating that the thermal management system presents good thermal stability.

Keywords: Lithium-ion battery; corrugated fin; phase change material (PCM); thermal management

零排放的新能源电动汽车在实现“双碳”目标中发挥了关键作用，锂离子电池因高能量密度、高比功率、循环寿命长等优点成为电动汽车供能核心部件[1]。但锂电池运行时会产生大量热量导致自身温度升高，这将引起电池性能和寿命严重衰减，甚至引发热失控等安全问题[2]。为保证锂电池安全高效运行，其工作温度应控制在 20~50 ℃且电池

收稿日期：2022-09-18；**修回日期**：2022-12-07，2022-12-20，2023-01-06；**录用日期**：2023-02-09；**网络首发日期**：2023-04-03
基金项目：巢湖学院校级科研资助项目(XLY-202003，XLY-202004，XLY-202005)
This work is supported by Chaohu University under the grants XLY-202003, XLY-202004 and XLY-202005

组温差小于 5 ℃[3]，故建立高效的锂电池热管理系统十分必要。

锂电池散热方式有风冷[4-6]、液冷[7-10]、相变材料 PCM(phase change materials)冷却[11-12]和热管冷却[13]。风冷结构简单紧凑，但冷却效率低；液冷散热效能高，但均温性差且冷却液有泄漏风险；热管冷却成本高。相较而言，PCM 冷却因零能耗、结构适应性强、均温性好等优势，备受当前研究者青睐。为弥补 PCM 低导系数的缺点，学者们将 PCM 与高导热材料如膨胀石墨[14]、石墨烯[15]、泡沫金属[16]等结合，或添加导热翅片[17-21]，但复合 PCM 在循环运用后添加剂易发生沉积且稳定性会衰退，而添加导热翅片更可靠和稳定。

针对圆柱电池散热的研究，文献[17]设计了离散形翅片以提升 PCM 冷却时效，运用体积比例为 4%离散型翅片可将 PCM 的熔化时长延长 54%；文献[18]将翅片添加至 PCM/液冷电池模组后，电池组最高温度和温差分别降至 49 ℃和 1.7 ℃；文献[19]研究了矩形翅片厚度、数量及间距对 PCM 储/散热性能的影响，结果表明增加翅片数量可显著延长 PCM 熔化时长；文献[20]将 V、X、Y 这 3 种形状翅片添加至 PCM 散热模型中，当环境温度为 40 ℃时电池温升仅为 7 ℃，但 PCM 厚度高达 8 mm；文献[21]比对了矩形、三角形、梯形、I 形、T 形这 5 种翅片的散热性能，结果表明 2C、3C 放电倍率下，添加翅片后电池最高温度分别降低 2.38%和 9.28%。基于上述研究可知，添加翅片扩展了 PCM 传热路径从而增强散热性能，但所设计翅片长度均与圆柱电池等高，未考虑翅片沿轴向延展对散热性能的影响。

故本文设计 1 种新型波纹形翅片，并将其沿轴向延展，在 2C 充电、4C 放电的循环工况下，研究翅片类型、对流换热系数、翅片数量、翅片延伸长度及环境温度对电池散热性能的影响。

1　散热模型与方法

1.1　散热模型的建立

本文所设计锂电池散热模型如图 1 所示。图 1(a)为纯 PCM 散热模型；图 1(b)为传统梯形翅片散热模型；图 1(c)为新型波纹形翅片散热模型。

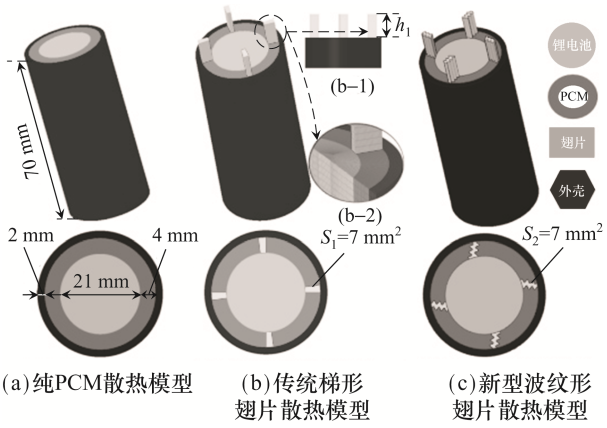


图 1　锂电池热管理模型

Fig. 1 Thermal management model for lithium-ion batteries

散热模型由圆柱形锂离子电池、PCM、翅片及外壳组成，本文三元锂动力电池由天津力神股份有限公司提供，其规格为 21700(即电池直径为 21 mm，高度为 70 mm)，正极材料为 $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$，负极材料为石墨，标称容量为 3.0 A·h，充、放电截止电压分别为 4.2、2.7 V； PCM 采用 RT35HC 石蜡，它具有潜热高、相变温度适宜的特点，材料厚度为4 mm；翅片材质为铝合金，具有导热系数高、重量轻的特点；梯形翅片与波纹形翅片截面积相等，均为 7 mm^2；外壳材质采用低密度的亚克力板，厚度为 2 mm。上述材料的物性参数见表 1。

表 1　不同材料的物性参数

Tab. 1 Physical parameters of different materials

模型材料	导热系数/[W/(m·K)]	密度/(kg/m^3)	比热容/[J/(kg·K)]	潜热/(kJ/kg)	相变温度/℃	标称容量/(A·h)
21700 锂电池	λ_r=1.5；λ_z=20	2 765	1 028	—	—	3
PCM(RT35HC 石蜡)	0.2	880	2 000	240.4	34~36	—
翅片(铝合金)	202.4	2 719	871	—	—	—
外壳(亚克力板)	0.003	1 050	1 470	—	—	—

为增强散热效能，将散热翅片的长度延伸 h_1，即在 70 mm 长度基础上增加 h_1，h_1 可取 5、10、15、20 mm，如图 1(b-1)所示；运用 HyperMesh 软件并采用六面体非结构网格形式对三维模型进行网格划分，得到的网格模型如图 1(b-2)所示。

1.2 电池发热模型

在充放电过程中，锂电池内部会发生电化学反应，从而产生大量热量，该反应过程极为复杂，为简化模型，本文对锂电池做如下合理假设：①锂电池内部发热恒定且均匀；②锂电池各种材料介质均匀，放电时电池内部各处电流密度均匀；③忽略热辐射。从而可得电池内部能量守恒公式[6,11]为

$$\rho_{\mathrm{b}} C_{p\mathrm{b}} \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \tag{1}$$

式中：ρ_{b} 和 $C_{p\mathrm{b}}$ 分别为电池密度和定压比热容，二者的物性参数见表 1；T 为电池局部温度；t 为时间；k_x、k_y、k_z 分别为 x、y、z 坐标轴 3 个方向上的导热系数；$\dot{q}$ 为不可逆反应焦耳热和可逆反应熵热之和，表示单位体积电池生热速率，即

$$\dot{q} = \frac{1}{V}\left[I(U_{\mathrm{OCV}} - U) + IT\frac{\partial U_{\mathrm{OCV}}}{\partial T} \right] = \frac{1}{V}\left[I^2 R_{\mathrm{j}} + IT\frac{\partial U_{\mathrm{OCV}}}{\partial T} \right] \tag{2}$$

式中：I 为充/放电电流，放电时取正，充电时取负；U_{OCV} 和 U 分别为开路电压和负载电压；V 为单体电池体积；T 为开氏温度；R_{j} 为电池焦耳内阻；$\partial U_{\mathrm{OCV}} / \partial T$ 为锂电池熵热系数，本文取 0.4 mV/K，由此得到 2C 充电、4C 放电倍率时，$\dot{q}$ 分别为 40 286 W/m^3 和 128 714 W/m^3。在环境温度 25 ℃下，采用 HPPC (hybrid pulse power characterization)工况测试不同荷电状态 SOC(state of charge)下的锂电池内阻，为简化计算，其均值取为电池焦耳内阻，测试过程示意如图 2 所示。

1.3 PCM 模型

采用石蜡 RT35HC 作为相变材料，运用焓变法仿真 PCM 的热传递[3]，能量公式为

$$\rho_{\mathrm{PCM}} \frac{\partial H}{\partial t} = k_{\mathrm{PCM}} \nabla^2 T \tag{3}$$

$$H = \beta L + \int_{T_{\mathrm{i}}}^{T} C_{p,\mathrm{PCM}} \mathrm{d}T \tag{4}$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T \leqslant T_{\mathrm{m}} \\ \dfrac{T - T_{\mathrm{m}}}{T_{\mathrm{m}} - T_{\mathrm{l}}} & T_{\mathrm{m}} < T < T_{\mathrm{l}} \\ 1 & T \geqslant T_{\mathrm{l}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：ρ_{PCM} 和 k_{PCM} 分别为 PCM 的密度和导热系数；β 为液相体积分数；L 为相变潜热；βL 为熔化 PCM 的焓热值；$\int_{T_{\mathrm{i}}}^{T} C_{p,\mathrm{PCM}} \mathrm{d}T$ 为显热焓值，其中 T_{i} 为初始时刻温度，$C_{p,\mathrm{PCM}}$ 为 PCM 定压比热容；T_{m} 为 PCM 融点温度；T_{l} 为 PCM 完全熔化时的温度。

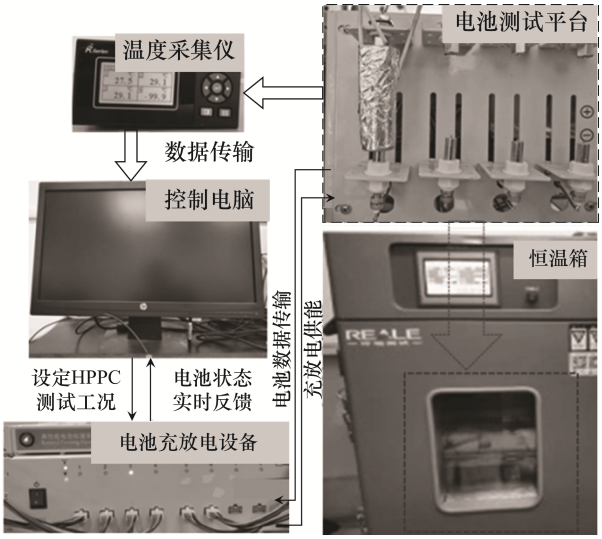


图 2 锂电池内阻及温升测定示意

Fig. 2 Sketch map for measuring internal resistance and temperature rise of lithium-ion batteries

1.4 初始和边界条件

初始条件为：t=0，$T(x, y, z)$=T_0。

基于能量守恒定理可知，锂电池与 PCM 交界面的边界条件为

$$-k_{\mathrm{b}} \frac{\partial T}{\partial n} = -k_{\mathrm{PCM}} \frac{\partial T}{\partial n} \tag{6}$$

式中，k_{b} 和 $\partial T / \partial n$ 分别为锂电池导热系数和温度梯度。

同理可得，PCM 与外壳交界面间的换热边界条件为

$$-k_{\mathrm{PCM}} \frac{\partial T}{\partial n} = -k_{\mathrm{ABS}} \frac{\partial T}{\partial n} \tag{7}$$

式中，k_{ABS} 为亚克力板的导热系数。

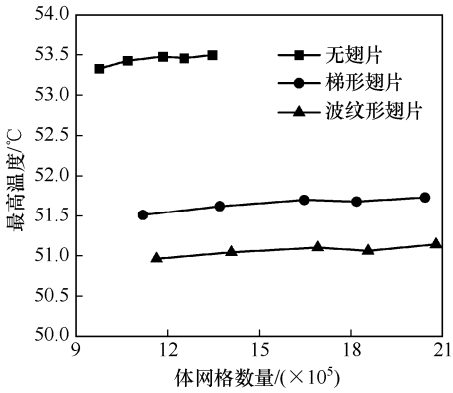
由牛顿冷却定律可知，电池表面与周围环境间的边界条件为

$$Q_C = k_{ABS}\frac{\partial T}{\partial n} = h(T_S - T_O) \tag{8}$$

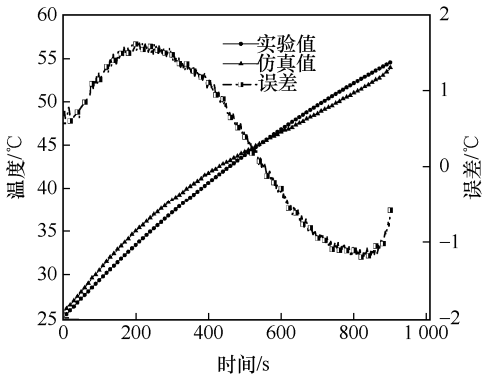
式中：Q_C 为单位面积的对流换热量；h 为对流换热系数，取对流换热系数为 5 W/(m^2·K)[2]；T_S 为电池表面温度；T_O 为环境温度。以上边界条件均可在 ANSYS FLUENT 软件中进行设定。

1.5 模型仿真可靠性验证

为保证仿真模拟的可靠性，对散热模型进行网格独立性验证。锂电池在不同体网格数量下的最高温度以及 4 C 放电下的温度变化如图 3 所示。在 2C 充电 4C 放电、自然对流换热下，不同散热模型最高温度随体网格数量变化如图 3(a)所示。从图 3(a)中可见，当无翅片、梯形翅片以及波纹形翅片散热模型的体网格数量分别增至 12×10^5、16×10^5 和 16×10^5 后，锂电池的最高温度基本保持恒定，最大波动仅为 0.1 ℃，可认为电池组模型网格数量的改变对仿真结果无影响，故该仿真模型可靠。为缩短运算时长，在保证仿真精度的前提下，本文仿真对无翅片、梯形翅片以及波纹形翅片散热模型的网格数量分别选择为 1 183 600、1 648 704 和 1 692 820。此外，为保证仿真精确性，本文还考虑了计算步长和迭代步数对仿真结果的影响，锂电池充放电运行工况下时间步长设置为 2 s 与 4 s 时，散热模型的最高温度误差仅为 0.1 ℃。因此，计算步长对仿真结果没有明显影响，为缩短仿真时间将计算步长和迭代步数分别设定为 4 s 和 20 步。



(a)不同体网格数量下锂电池最高温度变化



(b)4C放电下锂电池温度变化

图 3　不同体网格数量下以及 4C 放电下锂电池的温度变化

Fig. 3 Temperature variations of lithium-ion batteries under different grid numbers and 4C discharge

为验证电池产热模型可靠性，本文比对了单体电池 4C 放电倍率下电池温升的实验值和仿真值，所搭建实验平台如图 2 所示。实验设备包括充放电仪器(NEWARE、BTS4000、5V20A)、恒温箱(REALE、RTP225、温度偏差为±2 ℃)、温度采集仪(MIK-R200D)以及 T 型热电偶(WZP-Pt 100，精度为±0.1 ℃)。图 2 中，将 3 个呈 120° 分布的 T 型热电偶分别贴在电池正极、中间和负极位置，取三者平均值表征电池温升；电池在恒温箱中静置 40 min 以保证其温度稳定在预设温度 25 ℃左右，随后进行放电实验。图 3(b)展示 4C 高倍率放电下锂电池温升随时间的变化曲线，仿真值与实验值的温升曲线具有良好的一致性，最大误差仅为 1.5 ℃，故电池产热模型可靠。

2　结果与讨论

2.1 不同类型翅片下锂电池散热性能分析

为模拟锂电池在高倍率充放电循环工况的散热性能，锂电池运行工况为：先 2C 充电 1 610 s，随后静置 10 min(600 s)，最后 4C 放电 900 s，进行 2 次充放电循环。在环境温度为 25 ℃，自然对流换热，h_1 取 10 mm(后续研究中若未特别说明，则默认 h_1 均取为 10 mm)时，不同类型翅片散热性能如图 4 所示。

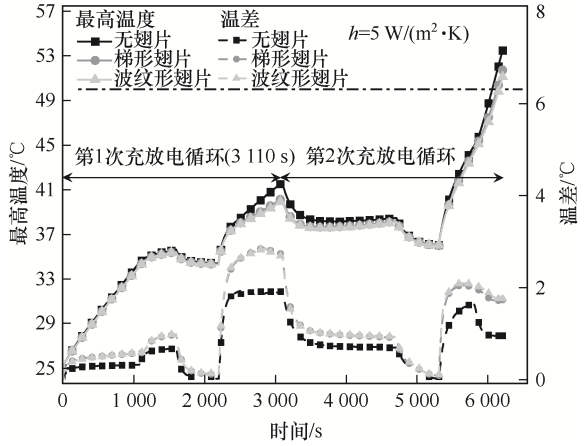


图 4 自然对流下不同类型翅片的电池温度随时间的变化

Fig. 4 Variations of battery temperature with time for different types of fins under natural convection

放电结束时未添加翅片、采用梯形翅片以及波纹形翅片散热时电池的最高温度分别为 53.5、51.7、51.1 ℃，散热模型的温差分别为 1.0、1.7、1.7 ℃。结果表明，添加翅片有效提高了 PCM 散热性能，相比无翅片，梯形翅片和波纹形翅片将电池最高温度分别降低了 1.8、2.4 ℃；同时电池的温差均小于 2.0 ℃，保持了良好的均温性能。此外，波纹形翅片比梯形翅片展现了更优的散热性能，将电池最高温度进一步降低 0.6 ℃；这是因为与传统梯形翅片相比，新型波纹形翅片具有更大表面积，这增加了与周围空气换热效能，更高效地将电池和 PCM 热量散至空气域，从而提高了散热性能。

不同类型翅片散热下电池温度云图如图 5 所示，对于未添加翅片的 PCM 散热模型，锂电池温度呈中间高四周低的分布，温差仅为 1.0 ℃；添加翅片的 PCM 散热模型，锂电池最高温度仍分布在电池中心位置，而最低温度出现在锂电池顶部与翅片接触位置，因翅片导热性能良好，该位置可与周围空气域进行有效的换热使其温度更低，故出现了电池最低温度。

由上述分析可知，添加翅片可有效增强 PCM 冷却效能，但若仅依靠自然对流，换热在 2 次充放电结束后电池最高温度超过 50 ℃，不满足散热要求，故需对翅片延伸部分辅以强制对流换热，以提升锂电池散热性能。

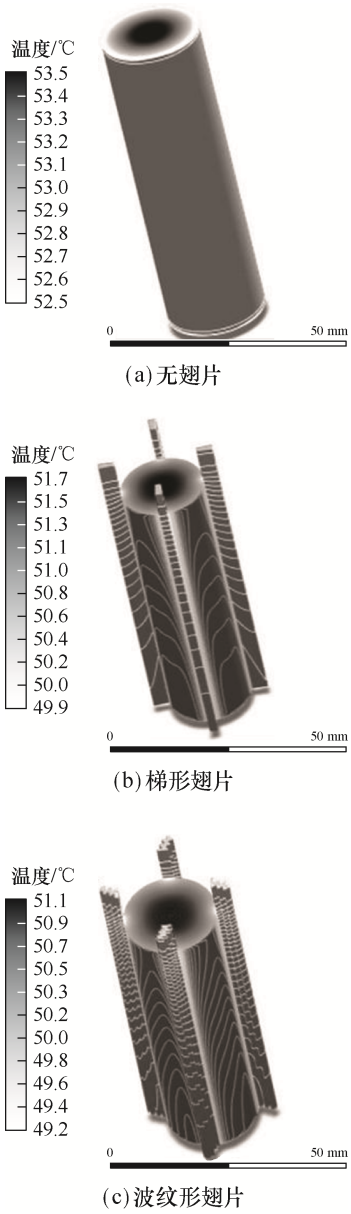


图 5 不同类型翅片散热下电池温度云图

Fig. 5 Temperature contours of batteries under heat dissipation with different types of fins

2.2 不同对流换热系数下锂电池散热性能分析

为进一步提高 PCM 冷却性能，增大翅片延伸区域的对流换热系数，而其他区域仍为自然对流换热。为模拟强制风冷换热，将对流换热系数从 15 W/(m^2·K)逐步增加至 45 W/(m^2·K)，每间隔按 10 W/(m^2·K)取值。不同对流换热系数、不同翅片类型下锂电池温度变化曲线如图 6 所示。

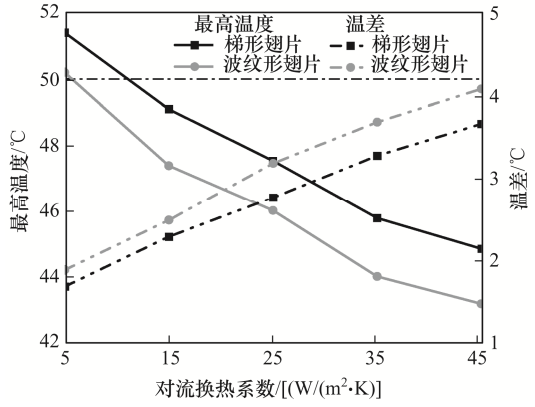


图 6　不同对流换热系数、不同翅片类型下锂电池温度变化

Fig. 6 Variations of lithium-ion battery temperature under different convective heat transfer coefficients and different types of fins

由图 6 可见，随着对流换热系数的增加，锂电池最高温度持续降低，但温差逐渐上升；不同对流换热系数下，新型波纹形翅片散热性能均优于传统梯形翅片，均将锂电池最高温度降低 1.7 ℃左右，且锂电池最高温度和温差均分别控制在 50 ℃和 5 ℃内，满足温控要求；对于波纹形散热翅片，当对流换热系数从 25 W/(m^2·K)增至 35 W/(m^2·K)再增至 45 W/(m^2·K)过程中，锂电池最高温度从 46.0 ℃降至 44.1 ℃(降低了 1.9 ℃)，再从 44.1 ℃降至 43.2 ℃(仅降低了 0.9 ℃)。研究表明，当对流换热系数大于 35 W/(m^2·K)后，继续增大对流换热系数，锂电池散热性能的优化程度有限，但主动冷却功耗将大幅度增大。故对流换热系数取 35 W/(m^2·K)进行后续研究，并通过改变波纹形翅片数量及翅片延伸长度以期进一步提高锂电池散热性能。

2.3 不同翅片数量下锂电池散热性能分析

为进一步优化锂电池散热性能，研究不同波纹形翅片数量对锂电池散热性能的影响，翅片数量从 4 逐步增至 10，间隔数量为 2。不同翅片数量下锂电池温度变化如图 7 所示。

由图 7 可见，增加翅片数量可有效降低锂电池最高温度，且锂电池温差基本保持不变，这是因为增加翅片数量可有效扩展 PCM 导热路径，增强传热效能，同时增加翅片与空气域的接触面积，将电池热量更高效地散至空气域。当翅片数量从 4 增至

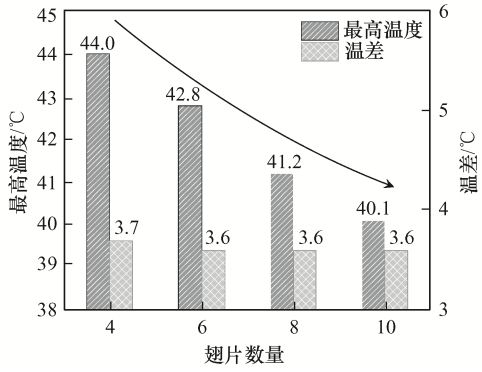


图 7　不同翅片数量下锂电池温度变化

Fig. 7 Variations of lithium-ion battery temperature under different numbers of fins

10 时，电池最高温度从 44.0 ℃降至 40.1 ℃，降低了 3.9 ℃，其中当翅片数量从 6 增至 8 时，电池最高温度降低了 1.6 ℃;进一步增加翅片数量至 10，电池最高温度仅降低 1.1 ℃，最高温度优化性能有所降低。图 8 展示了不同翅片数量下锂电池温度云图，电池温度呈中间高、四周低分布，最低温度出现在翅片与电池底部周向接触位置。增加翅片

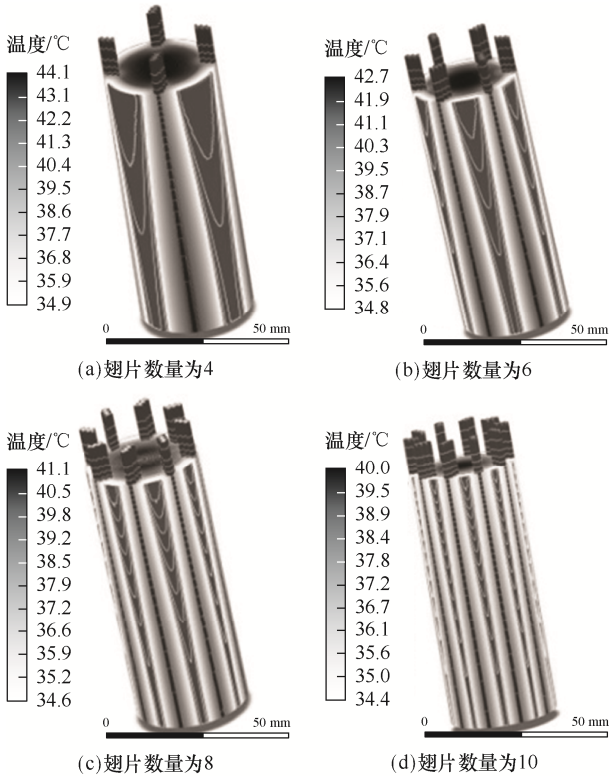


图 8　不同翅片数量下锂电池温度云图

Fig. 8 Temperature contours of lithium-ion batteries under different numbers of fins

数量可提高锂电池散热性能，但同时也增加了热管理系统重量，因此基于锂电池散热系统性能和重量的权衡，波纹形翅片数量取为 8 进行后续研究。

2.4 不同翅片延伸长度下锂电池散热性能分析

为进一步优化锂电池散热性能，研究波纹形翅片不同延伸长度对锂电池散热性能的影响，翅片延伸长度 h_1 从 5 mm 逐步增加至 20 mm，每间隔 5 mm 进行取值。不同翅片延伸长度下锂电池温度变化如图 9 所示。

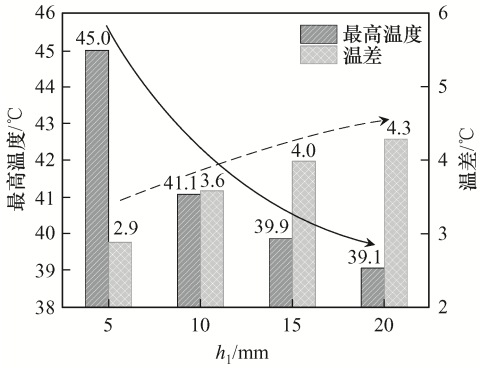


图 9 不同翅片延伸长度下锂电池温度变化

Fig. 9 Variations of lithium-ion battery temperature under different extended lengths of fins

由图 9 可知，随着翅片延伸长度的增加电池的最高温度不断减小，而温差不断增大，这是因为增加翅片长度可扩大翅片与空气域的换热面积，更多的电池热量被散出，同时翅片顶部温度更低导致与电池接触部分的温度降低，电池温差增大。当 h_1 从 5 mm 增加至 10 mm 时，电池最高温度从 45.0 ℃降至 41.1 ℃，降低了 3.9 ℃，散热性能得到明显提升，且温差低于 4 ℃；随着 h_1 不断增加锂电池最高温度的优化不断缩小，当 h_1 从 15 mm 增加至 20 mm 时电池最高温度分别为 39.9、39.1 ℃，最高温度仅降低了 0.8 ℃，且温差已超过 4 ℃。

翅片不同延伸长度下 PCM 液相率随时间变化曲线如图 10 所示。可见，随着 h_1 的增加 PCM 液相率不断减小，当 h_1 从 5 mm 增加至 20 mm 时，PCM 液相率从 1.0 降至 0.6，有效避免因 PCM 完全熔化而发生的泄漏，表明翅片长度的延伸有效提高了锂电池散热效能。

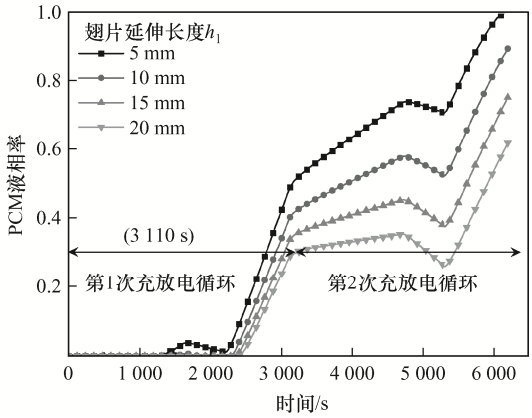


图 10 不同翅片延伸长度下 PCM 液相率随时间的变化

Fig. 10 Variations of PCM liquid-phase fraction with time under different extended lengths of fins

图 11 为翅片不同延伸长度下锂电池温度云图。随着翅片延伸长度的增加，锂电池最高温度的范围逐渐缩小，电池周向低温区域不断增加，故降低锂电池最高温度的同时温差有所上升。翅片长度的增加也将增加散热模型体积，翅片每延长 5 mm，其体积将增大 7.1%。为权衡锂电池散热性能和散

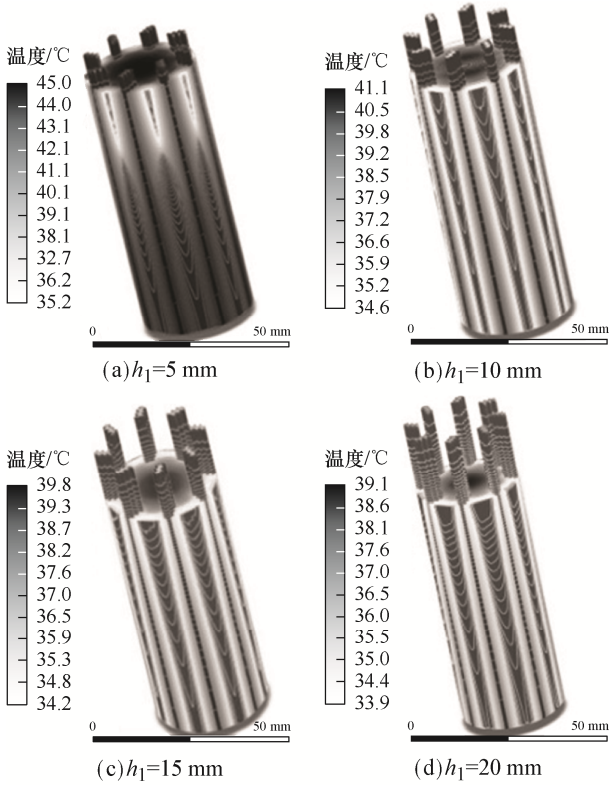


图 11 不同翅片延伸长度下锂电池温度云图

Fig. 11 Temperature contours of lithium-ion batteries under different extended lengths of fins

热模型体积能量密度，h_1最佳取值为 15 mm，故后续研究在该取值上进行。

2.5 不同环境温度下锂电池散热性能分析

为保证锂电池在高温度环境下仍能安全高效地运行，探究不同环境温度下添加翅片后 PCM 的散热性能，环境温度为 25、30、35 ℃时锂电池温度随时间变化曲线如图 12 所示。从图 12 中可见，当环境温度从 25 ℃升至 30 ℃时，前 5 300 s 内锂电池最高温度均保持在 40 ℃以下，第 2 次放电结束时锂电池最高温度升至 46 ℃，仍保持在安全温度(50 ℃)内，表明所设计翅片强化传热 PCM 散热方案展现了良好热稳定性。当环境温度增至 35 ℃时，在第 1 次放电过程中锂电池最高温度接近温控临界值 50 ℃，第 2 次充电过程中锂电池温度保持稳定，随后在静置状态下电池温度降至 45 ℃，第 2 次 4C 放电过程中锂电池温度剧增，放电结束时电池最高温度达到 60 ℃，不满足温控要求。

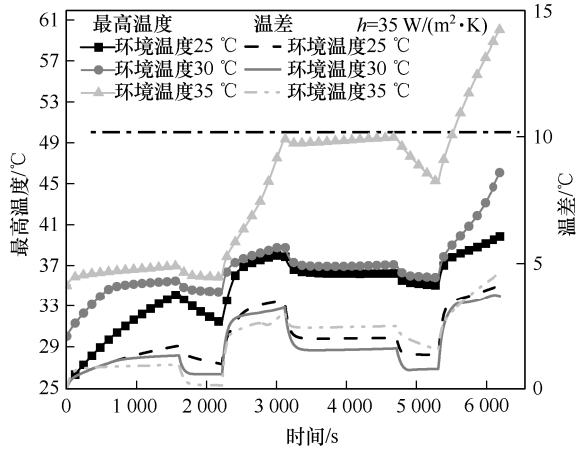


图 12　不同环境温度下锂电池温度随时间的变化

Fig. 12 Variations of lithium-ion battery temperature with time at different ambient temperatures

3　结论

本文研究了高倍率充放电(2C 充电，4C 放电)循环工况下翅片/PCM 散热模型冷却性能，对比了类型翅片、对流换热系数、翅片数量、翅片延伸长度以及环境温度对锂电池散热性能的影响，得到如下结论：

(1)添加翅片的 PCM 散热模型可将锂电池最高温度进一步降低 2.4 ℃，新型波纹形翅片比传统梯形翅片有更优散热性能。

(2)增加对流换热系数可有效提高锂电池散热性能，当换热系数从 5 W/(m^2·K)增至 35 W/(m^2·K)时，锂电池最高温度从 51.1 ℃降至 44.1 ℃，温差为 3.7 ℃，进一步增大换热系数电池散热性能优化不明显。

(3)增加翅片数量和延伸翅片长度均可提升锂电池散热性能，权衡热管理模型的散热性能和重量，翅片数量和延伸翅片长度最佳取值分别为 8 mm 和 15 mm，该散热模型下锂电池最高温度和温差分别为 39.9 ℃和 4 ℃。

(4)当环境温度从 25 ℃增加至 30 ℃，添加翅片的 PCM 散热模型展现了良好的控温稳定性，放电末期锂电池的最高温度为 46 ℃，保持在安全范围内。

参考文献：

[1] Zhang Xinghui, Li Zhao, Luo Lingai, et al. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles [J]. Energy, 2022, 238: 121652.

[2] 杨梦洁, 杨爱军, 叶奕君, 等. 基于气体分析的锂离子电池热失控早期预警研究进展[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4507-4538.
Yang Mengjie, Yang Aijun, Ye Yijun, et al. Research progress on early warning of thermal runaway of Li-ion batteries based on gas analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4507-4538. (in Chinese)

[3] Cao Jiahao, Feng Jinxin, Fang Xiaoming, et al. A delayed cooling system coupling composite phase change material and nano phase change material emulsion [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 191: 116888.

[4] Chen Kai, Wu Weixiong, Yuan Fang, et al. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern [J]. Energy, 2019, 167: 781-790.

[5] 韩静, 吴晓刚, 孙金磊. 电动汽车动力电池箱冷却影响

因素分析[J]. 电源学报, 2019, 17(1): 120-127, 144.
Han Jing, Wu Xiaogang, Sun Jinlei. Analysis of cooling influence factors for power battery box of electric vehicle [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(1): 120-127, 144. (in Chinese)

[6] Zhang Furen, Lin Aizhen, Wang Pengwei, et al. Optimization design of a parallel air-cooled battery thermal management system with spoilers [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116062.

[7] Xu Jing, Chen Zhaoliang, Qin Jiang, et al. A lightweight and low-cost liquid-cooled thermal management solution for high energy density prismatic lithium-ion battery packs [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117871.

[8] 张蕾, 杨洋, 马菁, 等. 液冷动力电池系统热管理控制策略优化探究[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 127-133.
Zhang Lei, Yang Yang, Ma Jing, et al. Optimization of thermal management control strategy for liquid-cooled power battery system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 127-133. (in Chinese)

[9] 安治国, 赵琳, 陈星, 等. 流道布置对方形锂电池组温度场的影响[J]. 电源学报, 2021, 19(5): 178-184.
An Zhiguo, Zhao Lin, Chen Xing, et al. Influences of flow channel arrangement on temperature field of square lithium battery pack [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(5): 178-184. (in Chinese)

[10] Wu Shangquan, Lao Li, Wu Lin, et al. Effect analysis on integration efficiency and safety performance of a battery thermal management system based on direct contact liquid cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117788.

[11] Zhou Zhizuan, Wang Dong, Peng Yang, et al. Experimental study on the thermal management performance of phase change material module for the large format prismatic lithium-ion battery [J]. Energy, 2022, 238: 122081.

[12] Ling Ziye, Li Suimin, Cai Chuyue, et al. Battery thermal management based on multiscale encapsulated inorganic phase change material of high stability [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193: 117002.

[13] Bernagozzi M, Georgoulas A, Miché N, et al. Novel battery thermal management system for electric vehicles with a loop heat pipe and graphite sheet inserts [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 194: 117061.

[14] Lin Xiangwei, Zhang Xuelai, Ji Jun, et al. Experimental investigation of form-stable phase change material with enhanced thermal conductivity and thermal-induced flexibility for thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117762.

[15] Hussain A, Abidi I H, Tso C Y, et al. Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 124: 23-35.

[16] Wang Zichen, Zhang Zhuqian, Jia Li, et al. Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 428-436.

[17] Sarani I, Payan S, Payan A, et al. Enhancement of energy storage capability in RT82 phase change material using strips fins and metal-oxide based nanoparticles [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 102009.

[18] Zhang Furen, Zhai Lei, Zhang Lin, et al. A novel hybrid battery thermal management system with fins added on and between liquid cooling channels in composite phase change materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 207: 118198.

[19] Yang Xiaohu, Wang Xinyi, Liu Zhan, et al. Effect of fin number on the melting phase change in a horizontal finned shell-and-tube thermal energy storage unit [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 236: 111527.

[20] Weng Jingwen, He Yaping, Ouyang Dongxu, et al. Thermal performance of PCM and branch-structured fins for cylindrical power battery in a high-temperature environment [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 200: 112106.

[21] Choudhari V G, Dhoble A S, Panchal S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 163: 120434.

(下转第 293 页)

chemical Society, 2019, 166(14): A3079-A3097.

[23] Smekens J, Paulsen J, Yang W, et al. A modified multiphysics model for lithium-ion batteries with a $Li_xNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ electrode [J]. Electrochimica Acta, 2015, 174: 615-624.

[24] Rheinfeld A, Sturm J, Noel A, et al. Quasi-isothermal external short circuit tests applied to lithium-ion cells: part II. modeling and simulation [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(2): A151-A177.

[25] Nileshwar P R, McGordon A, Ashwin T R, et al. Parametric optimization study of a lithium-ion cell [J]. Energy Procedia, 2017, 138: 829-834.

[26] Geifes F, Bolsinger C, Mielcarek P, et al. Determination of the entropicheat coefficient in a simple electro-thermal lithium-ion cell model with pulse relaxation measurements and least squares algorithm [J]. Journal of Power Sources, 2019, 419: 148-154.



赵家城

作者简介：

赵家城(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：锂电池智能充电管理。E-mail：zhaojiacheng1@outlook.com。

孙坚(1964—)，男，通信作者，硕士，教授。研究方向：新能源计量和智能管理。E-mail：1955692303@qq.com。

徐红伟(1972—)，男，博士，副教授。研究方向：锂电池智能管理和自动化装置。E-mail：xhw@cjlu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)

(上接第 282 页)



路玲

作者简介：

路玲(1993—)，女，通信作者，硕士，讲师。研究方向：新能源汽车电驱动系统热设计。E-mail：849402646@qq.com。

汪缤缤(1991—)，女，硕士，讲师。研究方向：材料组织性能及流体动力学研究。E-mail：1151105263@qq.com。

胡健(1985—)，男，硕士，副教授。研究方向：机械传动与 NVH 及机电产品再资源化技术与方法。E-mail：253984415@qq.com。

秦鹏(1991—)，男，硕士，讲师。研究方向：先进制造技术。E-mail：925709170@qq.com。

(责任编辑：陈国珍)