



基于TPMS与相变材料协同强化的电池散热系统设计

郑文锋, 鲍荣清, 梁玲敏, 严培培, 梁 艳
(江西科技学院智能工程学院, 江西 南昌 330098)

摘要: 为改善锂离子电池热管理系统中相变材料(PCM)因热导率低而导致的热饱和问题, 创新地设计了一种环绕电池布置的三周期极小曲面(TPMS)骨架与PCM相结合的复合热管理系统。首先, 通过实验测试不同荷电状态下的电池内阻, 验证了电池-PCM耦合传热模型的可靠性。随后, 以电池最高温度($T_{\max}$)和最大温差($\Delta T_{\max}$)为关键评价指标, 系统比较了纯PCM、传统翅片-PCM以及TPMS-PCM三种方案在3C放电倍率下的热管理性能。结果表明, 在相同TPMS体积分数条件下, TPMS-PCM方案对应的电池 $T_{\max}$ 仅为33.81℃, 较纯PCM和翅片-PCM方案分别降低了3.71℃和2.17℃, 展现出显著的散热优势。通过参数化分析发现, 提高TPMS的径向晶格密度与体积分数均有助于改善散热与均温性能, 其中P-30-60构型(体积分数30%, 周向60°分布)的综合表现最优, 其 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 分别为33.74℃和3.02℃。为进一步协同优化散热性能与结构轻量化, 提出了径向变密度TPMS(P-VD)设计: 在靠近电池侧采用较高体积分数以增强吸热, 在远离电池侧布置密集薄壁结构以扩大散热界面。结果显示, 相较于P-30-60结构, 优化后的P-VD结构在使TPMS金属骨架体积减少30.4%的同时, 将电池 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 进一步降低了0.54℃和0.48℃($\Delta T_{\max}$ 从3.02℃降至2.54℃, 降幅达15.4%), 并且吸热与散热面积也分别提升了66.89%和35.78%。本研究提出的环绕式TPMS-PCM架构及其变密度设计, 有效突破了均质结构在材料用量与性能之间的权衡, 为实现电池热管理系统中“高效散热、优异均温、结构轻质”的多目标协同优化, 提供了一种创新且可行的设计思路与技术路径。

关键词: 锂离子电池; 三周期极小曲面; 相变材料; 电池热管理系统

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1132

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2209-15

Design of a battery cooling system enhanced by synergistic combination of TPMS and phase change materials

ZHENG Wenfeng, BAO Rongqing, LIANG Lingmin, YAN Peipei, LIANG Yan

(School of Intelligent Engineering, Jiangxi Institute of Technology, Nanchang 330098, Jiangxi, China)

Abstract: To address the thermal saturation caused by the low thermal conductivity of phase-change materials (PCMs) in lithium-ion-battery thermal-management systems (BTMSs), in this study, we have designed an innovative composite thermal-management system that features a triply periodic minimal surface (TPMS) exoskeleton arranged around the battery and integrated with the PCM. First, we verified the reliability of the coupled heat-transfer model for the battery-PCM through experimental tests of the internal resistance of the battery under different states of charge. Subsequently, using the maximum battery temperature ($T_{\max}$)

收稿日期: 2025-12-09; 修改稿日期: 2026-01-21。

基金项目: 江西省教育厅科技项目(GJJ2402502); 江西科技学院智能工程学院校级一流学科(机械制造及其自动化)。

第一作者: 郑文锋(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电池散热结构设计, E-mail: 151399635@qq.com; 通信作者: 梁玲敏, 工程师, 研究方向为动力电池冷却系统设计, E-mail: 15079036602@163.com。

引用本文: 郑文锋, 鲍荣清, 梁玲敏, 等. 基于TPMS与相变材料协同强化的电池散热系统设计[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2209-2223.

Citation: ZHENG Wenfeng, BAO Rongqing, LIANG Lingmin, et al. Design of a battery cooling system enhanced by synergistic combination of TPMS and phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2209-2223.

and maximum temperature difference ($\Delta T_{\max}$) as key evaluation metrics, we compared the thermal-management performance of a pure PCM, a conventional fin-PCM, and a TPMS-PCM configuration systematically at a 3C discharge rate. The results show that, for the same TPMS volume fraction, the $T_{\max}$ of the battery with the TPMS-PCM configuration is only 33.81°C , which is 3.71°C (2.17°C) lower than that of the pure PCM (fin-PCM) configuration, thus demonstrating its significant cooling advantage. Parametric analysis revealed that increasing the radial lattice density and volume fraction of the TPMS structure can enhance both cooling and temperature uniformity. Among the tested configurations, the P-30-60 structure (30% volume fraction, 60° circumferential distribution) exhibited the best overall performance, with $T_{\max}=33.74^{\circ}\text{C}$ and $\Delta T_{\max}=3.02^{\circ}\text{C}$. To achieve a synergistic balance between thermal performance and structural lightweighting, in this study, we propose a radially graded-density TPMS design (P-VD). This design employs a higher volume fraction near the battery side to enhance heat absorption and a dense thin-walled structure on the outer side to expand the heat-dissipation interface. Compared to the P-30-60 structure, the optimized P-VD structure reduces the volume of the TPMS metal skeleton by 30.4%, while further lowering $T_{\max}$ by 0.54°C and $\Delta T_{\max}$ by 0.48°C , ($\Delta T_{\max}$ decreased from 3.02°C to 2.54°C , a reduction of 15.4%). Additionally, the heat absorption (dissipation) area increased by 66.89% (35.78%). The proposed surrounding TPMS-PCM architecture and its graded-density design effectively overcome the trade-off between material use and performance in homogeneous structures. This provides an innovative and feasible design approach and a technical pathway for achieving the multi-objective collaborative optimization of "efficient heat dissipation, excellent temperature uniformity, and lightweight structure" in BTMSs.

Keywords: lithium-ion battery; triply periodic minimal surface; battery thermal management system; phase change material

近年来,随着电动汽车性能与续航里程的不断提升,动力电池的能量密度与功率需求也相应增长,这对电池热管理系统提出了更为严峻的安全挑战^[1]。锂离子电池作为当前主流储能载体,在成组后形成的高能量密度模组中易出现热量积聚,若无有效的热管理手段,不仅会加速电池性能衰减与寿命缩短^[2],在极端情况下还可能触发热失控,引发安全事故。研究指出,理想的电池热管理系统应将电池最高温度控制在 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$,且模组内部最大温差不超过 5°C ^[3]。因此,开发高效可靠的热管理技术对保障新能源汽车的安全与可持续发展具有重要意义。

目前,电池冷却方式主要包括风冷、液冷、热管冷却以及基于相变材料(PCM)的被动冷却等^[4]。其中,PCM凭借其高储能密度、结构紧凑及在相变过程中维持温度稳定的特性,被广泛认为在电池热管理领域具有重要的应用潜力。然而,

PCM固有的导热性能较差,在实际应用中易发生热饱和现象。为克服这一缺陷,研究人员尝试通过引入高导热强化结构如膨胀石墨、金属泡沫或金属翅片等方式提升其传热性能^[5-6]。例如,Shen等^[7]将PCM与仿生蜂窝翅片结合,使电池温度降低26.52%;Zare等^[8]设计的翅片结构将电池有效工作时间延长了54%~90%;Alghassab^[9]采用铜/铝翅片强化方案,将电池峰值温度成功降低8%。

在各类强化结构中,多孔金属骨架因比表面积大、传热路径连续而更具潜力。随着增材制造技术进步,结构可控的连续多孔骨架(如体心立方、Kelvin与TPMS结构)得以广泛应用。其中,三周期极小曲面(TPMS)是一类基于隐式数学方程生成的、具有零平均曲率、拓扑无限连续且比表面积极高的先进多孔结构^[10]。其在传热领域中的优势在于,能够构建几何高度可控、贯通性优异的流-固耦合界面,从而形成高效且均匀的传热/储热网络。

近年来，TPMS 被广泛用于增强 PCM 传热，例如 Tian 等^[11]发现 P 型 TPMS 骨架具有最快的储热动力学，熔化时间缩短 20%；Qureshi 等^[12]研究表明，孔隙率与梯度设计可显著增强传热并降低熔化时间。本团队^[13]的前期研究也证实，在多种 TPMS 拓扑中，P 型（Primitive）结构在相变材料热管理系统中具备最优的综合传热强化性能。

当前研究主要集中于 TPMS 晶胞类型、体积分数及 PCM 填充量等参数的优化，对 TPMS-PCM 一体化结构的构型创新，以及如何在提升热性能的同时实现系统轻量化的多目标协同优化，仍缺乏系统探索。特别是针对圆柱形电池，如何设计与之匹配的紧凑型、高性能 TPMS-PCM 模块，是具有重要工程意义的课题。

本研究立足于前期对 P 型 TPMS 性能优势的认知^[13]，针对圆柱形锂离子电池，提出一种环绕式 TPMS-PCM 一体化热管理架构。研究系统揭示了 P 型 TPMS 关键结构参数（体积分数、径向晶格分布）对系统散热性能与温度均匀性的影响规律。进一步地，本研究创新性地提出一种径向变密度 TPMS（P-VD）设计方法。该设计通过沿径向梯度调整结构的体积分数与厚度，旨在近电池侧增强吸热能力，在远电池侧扩大散热界面，从而突破均匀结构的性能瓶颈。本研究的核心目的，在于探索一种能够协同优化热管理性能（控制温升与温差）与工程实用性（显著降低金属用量、实现轻量化）的新路径，为下一代高效、紧凑、轻质的电池热管理系统提供设计参考与理论依据。

1 模型开发和方法

1.1 物理模型

本研究模型基于片层型 TPMS 结构进行几何设计。已有研究指出，片层型 TPMS 结构在物理性能

方面优于实体 TPMS 结构^[14]。TPMS 结构可通过隐式数学函数表达，并具备较高的比表面积^[15]。3 种常用 TPMS 类型的隐函数如式(1)所示。其中，Schwarz Primitive（P 型）TPMS 结构因其显著的散热潜力而被广泛研究^[16]，本研究亦主要基于该结构开展设计。

$$\text{Schwarz P } \phi(x,y,z) = \cos(\omega x) + \cos(\omega y) + \cos(\omega z) = c$$

(1)

研究对象为 NCR18650 电池（容量 4.2 Ah，热物性参数见表 1），为便于网格划分，将其简化为圆柱形热源^[20]。图 1(a)展示了 TPMS 结构与相变材料（PCM-A-30）沿电池周向集成的方案。TPMS-PCM 结构参数为内径 18 mm、外径 30 mm、高 40 mm 的空心圆柱体。TPMS 多孔金属骨架与 PCM 均直接接触电池表面，PCM 填充于多孔结构的孔隙中。

以 P 型 TPMS 为例，其晶格沿电池轴向与周向分布。如图 1(b)所示，沿周向布置的晶格数量分别为 2、4 和 6 个，对应环绕角度分别为 180°、90°和 60°；沿轴向的晶格数量固定为 4 个。TPMS 结构材料选用 AlSi₁₀Mg 合金，该材料具备成本低、与增材制造兼容性好、轻质及可重复使用等优势。

1.2 BTMS 的数学计算模型

采用焓-孔隙度法对相变材料的热行为进行数值模拟。为提升计算效率，采用如下简化假设：

- (1) 熔融态 PCM 视为不可压缩层流（牛顿流体）；
- (2) 通过 Boussinesq 近似法考虑密度变化导致的自然对流效应；
- (3) PCM 在固/液两相状态下保持热导率、密度与比热容等热物性参数恒定^[21-22]；
- (4) 忽略相变过程中的体积变化^[23-24]；
- (5) 不考虑电池与 TPMS-PCM 界面间的接触热阻与辐射传热。

基于上述讨论，不同子域的计算模型如下：

表 1 材料属性^[17-19]

Table 1 Properties of materials^[17-19]

材料	AlSi ₁₀ Mg	电池	PCM-A-30
密度/(kg/m ³)	2670	2743.35	液态：770，固态：840
比热/[J/(kg·K)]	900	877.24	1800
热导率/[W/(m·K)]	175	轴向：1.42，径向：32.56	0.21
潜热/(kJ/kg)	—	—	200
熔点/℃	—	—	29~31

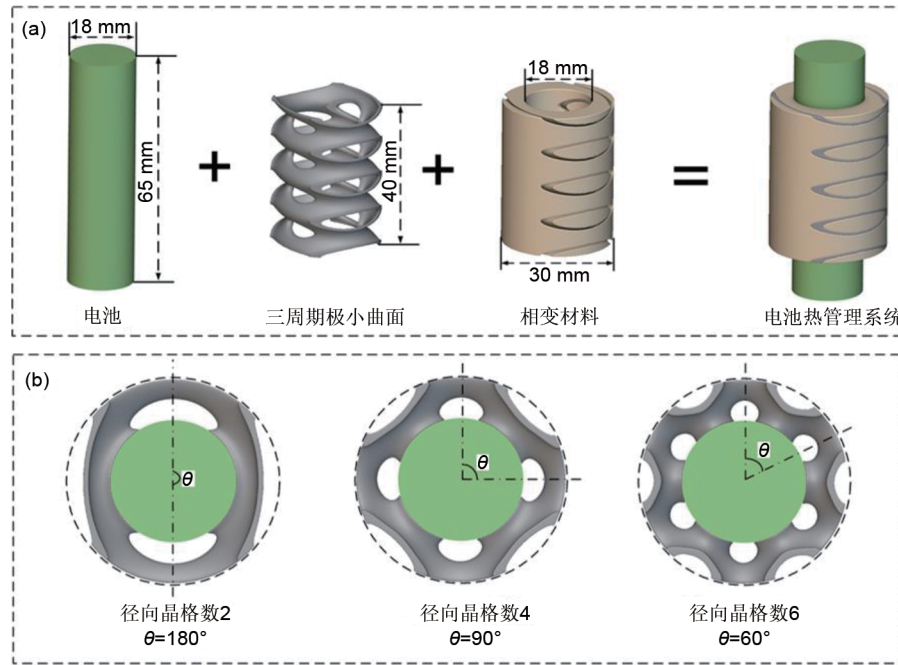


图1 (a) TPMS-PCM-电池周向积分方法; (b) 不同周向填充点阵数目

Fig. 1 (a) Circumferential integration approach for TPMS-PCM-battery; (b) Schematic diagrams of different numbers of circumferentially filled lattices

1.2.1 电池发热计算模型

本研究在构建电池生热模型时，引用了Bernardi等^[25]于1985年提出的电池能量平衡方程。尽管该文献发表时间较早，但其所建立的通用能量平衡框架至今仍在电池热管理领域被视为基础理论模型，并被广泛采用于各类数值与实验研究中。引用该文献，旨在明确本工作所依循的理论基础与建模起点，确保模型在物理机理上的正确性。同时，本研究在模型的具体实现、参数辨识、材料界面处理及结构创新等层面，均严格参考并引用了2019—2025年间的最新研究成果，力求在继承经典理论的基础上，充分融合当前领域的前沿进展。依据Bernardi的热模型^[25]，电池内部的能量守恒方程可表述如下：

$$\rho_b c_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_b \nabla T_b) + Q_{\text{gen}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{gen}} = Q_{\text{re}} + Q_{\text{ir}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{ir}} = I_b (V_{\text{OCV}} - V) = I_b R_b \quad (4)$$

$$Q_{\text{re}} = I_b T_b \frac{dV_{\text{OCV}}}{dT} \quad (5)$$

电池的发热，记为 (Q_{gen}) ，主要由两部分组成。一部分是由欧姆损失和界面电荷转移 (Q_{ir}) 引起的不可逆发热。另一部分是电化学反应引起的熵热 (Q_{re}) 。在上述控制方程 I_b 、 V_{OCV} 、 V 和 T_b 中，分

别表示电流、开路电压、工作电压和电池温度。 R_b 是电池的内阻。 dV_{OCV}/dT 表示电池开路电势随温度的变化率，亦称为熵热系数。在HPPC测试中，荷电状态与内阻通过数学方法建立关联。此外，通过用户自定义函数描述电池放电过程中的瞬态产热功率。所有量化参数与变量均被整合至该定制函数中。

1.2.2 固体区域传热计算模型

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_t c_{p,t} T_t) = \nabla \cdot (\lambda_t \nabla T_t) \quad (6)$$

1.2.3 PCM区域计算模型

采用焓-孔隙度法对PCM的相变过程建模^[26]。液相率表示每个计算单元内熔融态PCM体积占PCM总体积的百分比。参数 γ 由单元内的固相线温度与液相线温度共同决定，具体表达式如下：

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T_{\text{PCM}} < T_S \\ \frac{T_{\text{PCM}} - T_S}{T_L - T_S} & T_S \leq T_{\text{PCM}} \leq T_L \\ 1 & T_{\text{PCM}} > T_L \end{cases} \quad (7)$$

在特定时刻，单位体积相变材料的总焓值 (h) 由温度状态与液相率共同决定，其数值由显焓 (h_s) 与潜热贡献 (h_l) 两部分组成，具体表达式如下所示：

$$h = h_s + h_l \quad (8)$$

其中：

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_{PCM} dT \quad (9)$$

$$h_l = \gamma L \quad (10)$$

式中， c_{PCM} 与 L 分别表示 PCM 的比热容与潜热。

$$\mathbf{S} = -\frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + c} A_{mushy} \mathbf{V} \quad (11)$$

在式(11)中，向 γ^3 项添加小数 c （取值为 0.001）是为了避免出现分母为零的情况。糊状区作为连接固态与液态的界面过渡区域，能够实现速度矢量的跨相渐变。液态 PCM 中速度矢量及其大小的变化由动量方程中的糊状区常数 A_{mushy} 决定。

在 PCM 区域内求解的动量方程、连续性方程与能量控制方程如下所示：

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho_c c_{p,c} \mathbf{V} T_c) = -\nabla \cdot (\lambda_c \nabla T_c) \quad (12)$$

动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla \cdot \mathbf{V} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S} \quad (13)$$

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (14)$$

此处，沿 z 轴负方向垂直向下的重力记为 $\mathbf{g}$ 。

1.3 初始和边界条件

初始条件与边界条件设定如下：

当时间 $t=0$ 时

$$T_{bat} = T_{TPMS} = T_{PCM} = 25^\circ \text{C} \quad (15)$$

固体区域（电池与 TPMS 结构）与 PCM 之间的界面耦合条件如下所示：

$$-\lambda_{bat} \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_{PCM} \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_{TPMS} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (16)$$

式中， $\partial T / \partial n$ 为温度梯度。TPMS 结构通过 nTopology 与 MSlattice 软件建模，数值模拟在 ANSYS Fluent 2020R2 平台中采用有限体积法进行离散求解。设置冷却通道入口为速度入口，出口为压力出口边界条件。压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法，压力项离散使用 PRESTO 格式，动量与能量方程采用二阶迎风格式，时间项采用一阶隐式格式。计算中，连续性方程与动量方程的收敛残差设为 10^{-4} ，能量方程收敛残差设为 10^{-8} 。

考虑到动力电池在车辆储能舱内的工作环境及外界隔离，本研究将电池-PCM 系统视为绝热体系，忽略其与外界环境的热交换。

2 模型验证和实验

2.1 实验设置与测试方法

为获取电池热特性参数并验证仿真模型的可靠性，搭建了专用实验平台，并开展了电池生热测试与相变材料（PCM）冷却实验。

2.1.1 实验平台与材料

实验平台主要包括：CT-4004-30 V30 A-NFA 高性能电池充放电仪（深圳新威尔，电流电压测试精度误差均低于 0.05%）、KCS-8900B 恒温箱（武汉华试，温度范围 $-43 \sim 120^\circ \text{C}$ ，波动 $\pm 0.5^\circ \text{C}$ ）、K 型热电偶（测量误差 $< 0.2^\circ \text{C}$ ）、CA-4008-1U-VT-TX 数据采集器（深圳新威尔，精度 $\pm 0.01^\circ \text{C}$ ）及配套计算机，整体装置如图 2 所示。

2.1.2 实验步骤

PCM 冷却单体电池的实验步骤如下（实验装置及实验步骤如图 2、图 3 所示）：

（1）在电池上、中、下三段表面布置 K 型热电偶，用于监测试验过程中的温度变化。

（2）将布置好传感器的电池置于特制圆柱形容器（内径 28 mm，壁厚 1 mm）中央，使用绝缘胶带包裹电池极耳以防短路。

（3）将固态 PCM-A-30 粉碎后，于 75°C 水浴中熔化，随后灌注至电池与容器之间宽度为 5 mm 的环形空腔中。

（4）填充完成后，将系统静置 3 h 使 PCM 完全凝固，随后移除极耳绝缘层。所有实验在环境温度约 13.5°C 的条件下进行，以利于 PCM 保持稳定。

（5）将封装好的电池-PCM 系统整体置于恒温箱中，在 25°C 下静置 2 h 以确保初始温度均匀，随后进行 3 C 倍率恒流放电实验，并同步记录电压、电流及温度数据。该电池热特性及 PCM 冷却性能的评估方法已在文献[13]中得到验证。

2.1.3 HPPC 测试与内阻模型

为建立精确的电池生热模型，需获取电池内阻随荷电状态（SOC）的变化关系。本研究采用混合脉冲功率特性（HPPC）测试方法：在特定 SOC 下对电池施加短时脉冲电流，通过观测电压的阶跃响应，依据欧姆定律计算该 SOC 点下的直流内阻。

通过上述方法测得不同 SOC 下的电池内阻，并采用高阶多项式拟合，得到内阻随 SOC 变化的数学模型如式(17)所示，拟合精度达 $R^2=0.9914$ 。

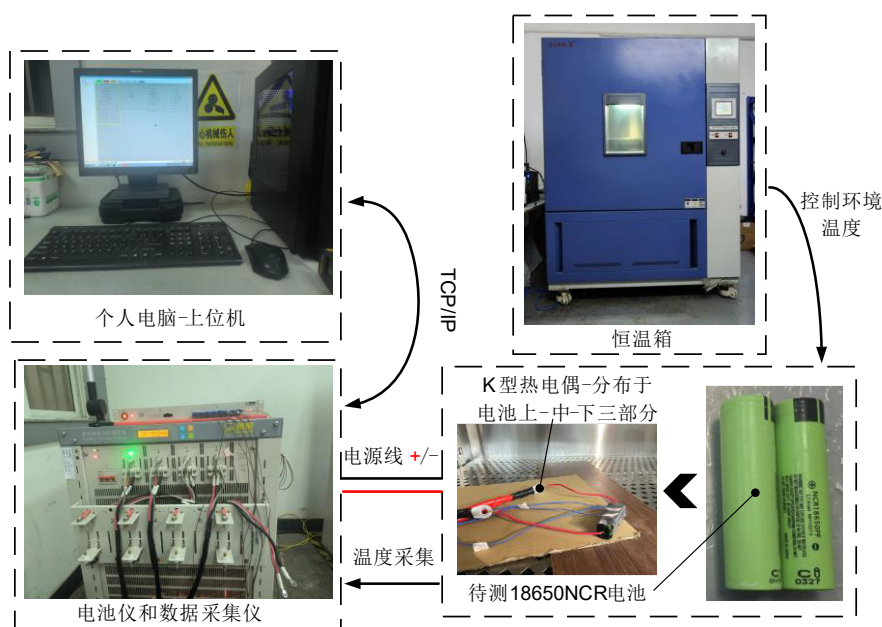


图2 电池热模型HPPC测试

Fig. 2 Experimental platform for testing heat generation characteristics of the battery

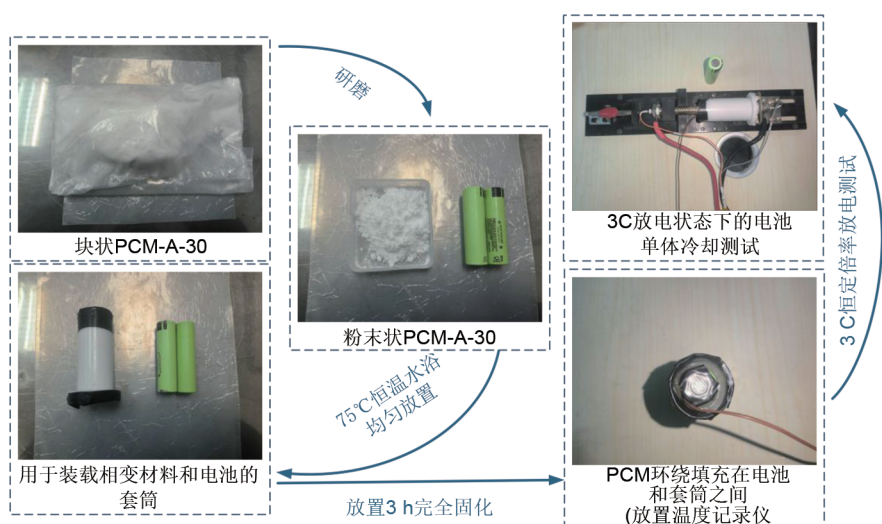


图3 PCM冷却实验方案

Fig. 3 Experimental platform for single-cell testing of PCM cooling experiment

该内阻模型将被集成到后续数值模拟的用户自定义函数(UDF)中,用于描述电池的瞬态产热。该内阻变化趋势与Bao等^[27]报道的结果一致。

$$R_b = 0.05877 - 0.30147 \times \text{SOC} + 1.12759 \times \text{SOC}^2 - 2.2433 \times \text{SOC}^3 + 2.50517 \times \text{SOC}^4 - 1.47486 \times \text{SOC}^5 + 0.35766 \times \text{SOC}^6 \quad (17)$$

2.2 热模型验证

为验证本文第1部分所建立的电池-PCM耦合传热数值模型的准确性,将上述3C放电实验测得的电池表面温度数据与相应条件下的仿真结果进行

对比。

图4(a)展示了基于HPPC测试数据拟合的内阻-SOC曲线。可以看出,在SOC为0.2~0.6的常用区间内,内阻变化较为平缓;当SOC低于0.2或高于0.6时,内阻显著增大。将此外阻模型应用于仿真计算。

图4(b)对比了实验与仿真得到的电池最高温度随时间变化的曲线。结果表明,在整个放电过程中,仿真曲线与实验数据点吻合良好。最大相对误差为3.27%(对应某一时刻的最大绝对温差为

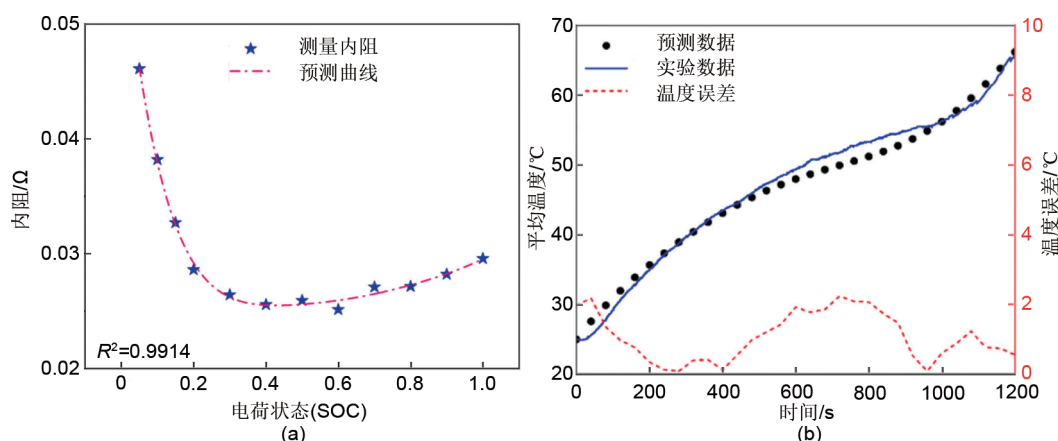


图4 (a) 内阻拟合模型; (b) 实验和模拟计算温度的比较

Fig. 4 (a) Internal resistance calibration model; (b) Experimental and simulated temperature comparison

2.13℃), 所有数据点的误差均控制在5%以内。

该对比验证表明, 本研究建立的、包含精确内阻模型的电池生热模型以及采用焓-孔隙度法的PCM相变传热模型, 能够较为真实地反映电池-PCM系统的热行为, 模型具有较高的可靠性, 可用于后续对集成TPMS结构的复杂电池热管理系统进行数值模拟与性能预测。

2.3 网格独立性验证

为兼顾计算效率与精度, 同时减小网格导致的数值误差, 对计算流体动力学(CFD)模型开展了网格敏感性分析。由于TPMS结构具有高曲率曲面, 需采用高质量网格, 因而网格类型的选择尤为重要。相比非结构化网格(如四面体或六面体-核心网格), 多面体-六面体混合网格在相同计算域中可有效减少单元数量, 在保证精度的前提下提高计算经济性, 并展现出良好的收敛性与计算精度^[28-29]。

因此, 采用多面体-六面体混合网格构建电池热管理系统的CFD模型, 并在流固耦合区域设置三层边界层, 以准确模拟PCM熔融过程中的自然对流(图5)。选取体积分数为20%的TPMS结构(案例P-20-60)进行网格无关性验证。通过比较4种网格密度(7.7×10^5 、 1.5×10^6 、 2.2×10^6 和 3.1×10^6)下电池模组的最高温度与液相分数, 发现当网格数从 7.7×10^5 增至 3.1×10^6 时, 最高温度变化甚微。在网格数为 2.2×10^6 与 3.1×10^6 之间, 最高温度差异仅为0.086%, 对应温度梯度差为0.017℃[图6(a)]。由此可见, 当网格数超过 2.2×10^6 后, 进一步加密网格对模拟结果影响不显著, 满足工程应用要求。因此, 为平衡计算精度与资源消耗, 最

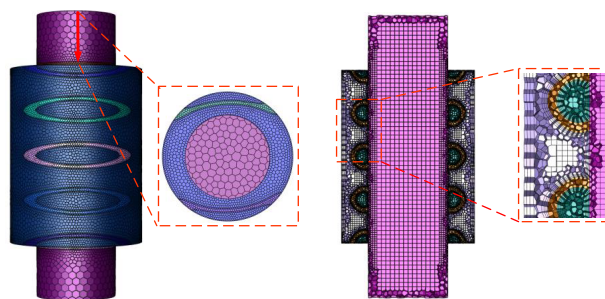


图5 极坐标系三周期极小曲面网格独立性验证
Fig. 5 Mesh independence verification for surrounding-type integrated TPMS-PCM

终选用 2.2×10^6 的网格进行后续数值模拟。

此外, 针对时间步长的测试表明, 0.5 s与2 s时间步长下模拟所得的峰值温度与温度梯度差异分别为0.01℃与0.013℃[图6(b)]。基于此, 为提升计算效率, 确定采用2 s作为CFD模拟的时间步长。

3 结果与讨论

3.1 TPMS结构的散热性能优势分析

本节对比分析了PCM单独冷却、传统翅片强化散热及TPMS结构强化散热3种电池热管理方案, 重点阐明TPMS结构在散热性能上的优势, 并揭示导热结构对PCM熔化过程的影响。为排除PCM用量的干扰, 研究选取体积分数为20%的TPMS构型(P-20-180), 并确保传统翅片结构具有相同体积分数。

图7(a)展示了3种方案下的温度分布云图。在单一PCM方案中, 电池周围出现明显热饱和现象。由于PCM导热性能差, 电池产生的热量难以扩散至整个PCM区域, 主要积聚在电池附近, 导致该

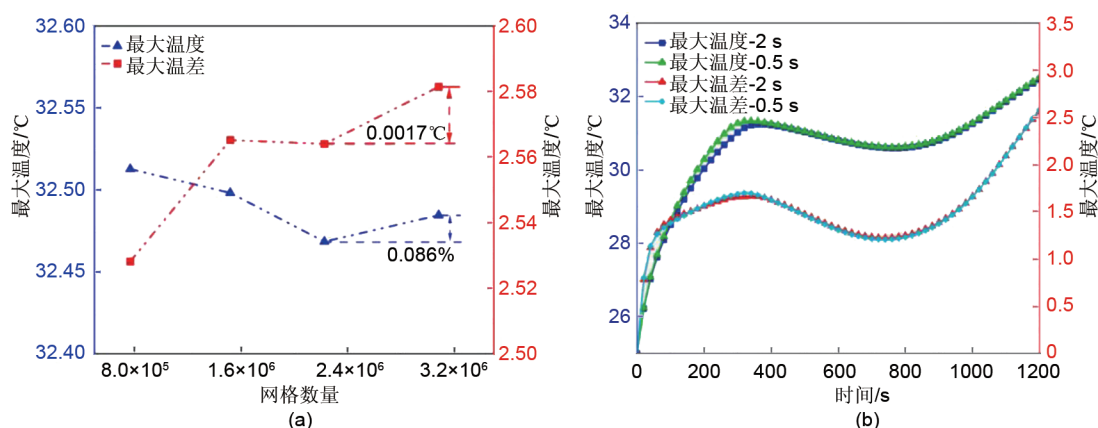


图6 (a) 网格数量; (b) 时间步长独立性

Fig. 6 (a) Grid number and (b) time step independence

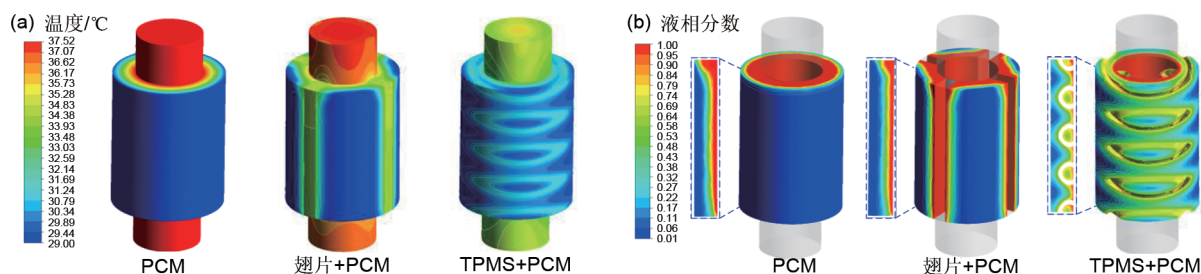


图7 (a) PCM、翅片-PCM与TPMS-PCM三种BTMS方案温度分布云图; (b) 液相分数分布

Fig. 7 (a) Temperature contour plot and (b) liquid phase fraction plot of three BTMS cases of PCM, fins-PCM and TPMS-PCM

区域PCM完全熔化,同时电池内部温度持续上升,最高温度($T_{\max}$)达到37.52°C。

在“翅片-PCM”方案中,翅片通过增大散热面积强化了热扩散,使 $T_{\max}$ 降低1.54°C。而“TPMS-PCM”方案进一步优化了散热性能, $T_{\max}$ 再降低2.17°C,最终控制在33.81°C。翅片结构通过提高与PCM的接触面积和导热效率,有效控制了峰值温度。

图7(b)展示了3种方案中PCM的熔化行为,其相变密度差异诱发了液相自然对流^[30]。在单一PCM和“翅片-PCM”方案中,PCM上部熔化程度均优于下部,与文献[29]报道一致。而在“TPMS-PCM”方案中,TPMS形成的导热网络在散热区域内分布更为均匀,使得所有与之接触的PCM均可同步参与散热,基本避免了热量集中导致的热饱和,确保了热量从电池向整个散热区域高效传递。

图8(a)、(b)进一步呈现了3种方案中电池最高温度和PCM液相分数随时间的变化。“TPMS-PCM”方案在电池温度控制与PCM利用效率方面均表现最佳。尽管“翅片-PCM”方案的PCM液相

分数与“TPMS-PCM”相近,表明两者在潜热利用效率上相当,但后者的电池温度显著更低。结合图7(b)中PCM液相分布可知,“翅片-PCM”配置中远离电池和翅片的PCM区域仍未得到有效利用,而“TPMS-PCM”配置则实现了更均匀的散热效果。

3.2 周向环绕式TPMS结构分析

相较于单一PCM及传统翅片方案,采用周向环绕填充多孔结构的电池热管理系统表现出更优的热管理性能。因此,本研究进一步聚焦于周向环绕式TPMS结构的设计优化。该结构可沿电池曲面周向布置不同数量的TPMS晶格单元,本节重点研究P型TPMS分别以180°、90°和60°三种环绕角度嵌入的冷却构型。

体积分数是影响多孔结构热力学与传质性能的关键参数^[31-32]。在本研究中,体积分数作为控制PCM与多孔结构之间体积配比的核心变量,其变化同时会调节TPMS结构的等效厚度及与电池的接触面积。

3.2.1 TPMS径向晶格数量的影响

本节系统研究环形TPMS结构中径向晶格数量

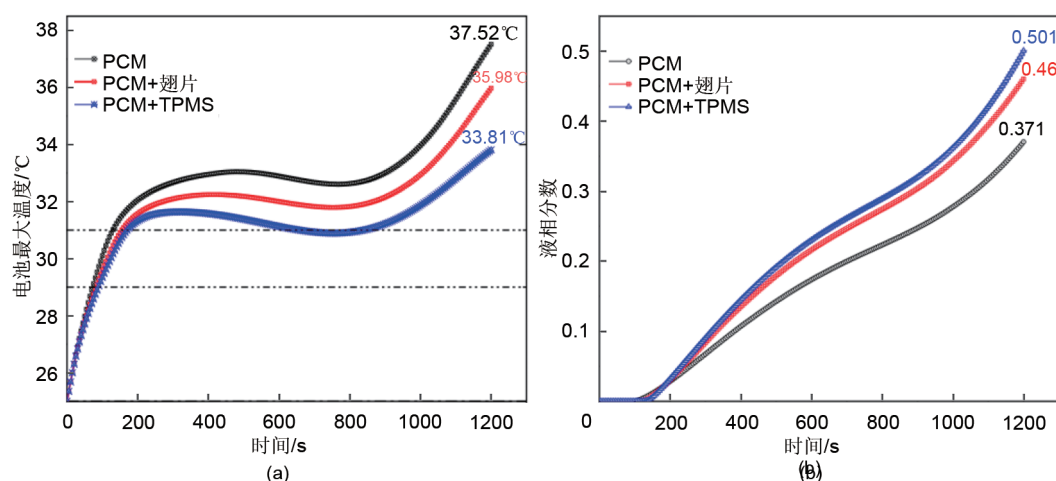


图 8 三种冷却方案的性能对比: (a) 电池最高温度; (b) PCM 液相分数

Fig. 8 Three cooling schemes: (a) evolution of maximum battery temperature over time; (b) evolution of PCM liquid phase fraction over time

与体积分数对系统性能的影响。按照“TPMS 类型-体积分数-径向分布角度”的命名规则（如 P-20-90），在体积分数固定为 10% 的条件下，对比 3 种径向晶格配置的热管理效果。

图 9(a)展示了 3 种径向晶格配置的温度云图。随着径向晶格数量的增加，TPMS-PCM 系统的温

控性能逐步提升，更多晶格构建了更高效的热传导路径。表 2 汇总了不同结构的电池温度数据。在相同体积分数下，随着晶格周期数的增加，多孔结构的比表面积增大，空间分布更均匀，有效降低了电池最高温度与最大温差，其中 P-10-60 构型表现出最优的综合性能。

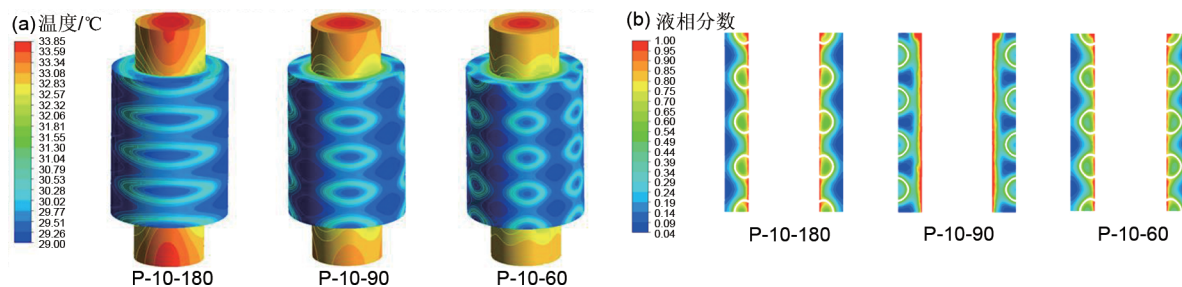


图 9 体积分数 10% 条件下三种径向晶格填充数量的: (a) 温度分布; (b) 液相分数分布

Fig. 9 (a) Temperature results and (b) liquid phase fraction of three numbers of radial lattice fillings with a volume fraction of 10%

表 2 TPMS 多孔结构与电池的温度参数

Table 2 Temperature results of TPMS porous structure and battery

类型/参数	孔隙体积/mm ³	表面孔隙面积/mm ²	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$
P-10-180	1828.8	7163.1	34.18	3.70
P-10-90	1819.2	7573.5	34.02	3.57
P-10-60	1821.4	8162.1	33.91	3.49

图 9(b)展示了 3 种结构的液相分数分布。所有 TPMS 结构均在一定程度上抑制了液相 PCM 的自然对流，熔化现象主要集中在电池、TPMS 骨架与

PCM 的三相接触区。值得注意的是，电池与 PCM 接触区的熔化较为集中，而 TPMS 与 PCM 接触区的熔化分布则相对分散。

图 10(a)、(b)进一步展示了电池径向截面的温度分布曲线与云图。3 种构型的最高温度均集中于电池中心区域，但温度集中形态存在差异。距离多孔结构较远的电池部位易出现热量积聚，而多孔结构的空间分布均匀性直接影响电池温度场的均匀性。具有更均匀多孔结构的散热器可显著降低电池内部温差。图 10(a)中的温度曲线显示，温差主要体现在电池中心

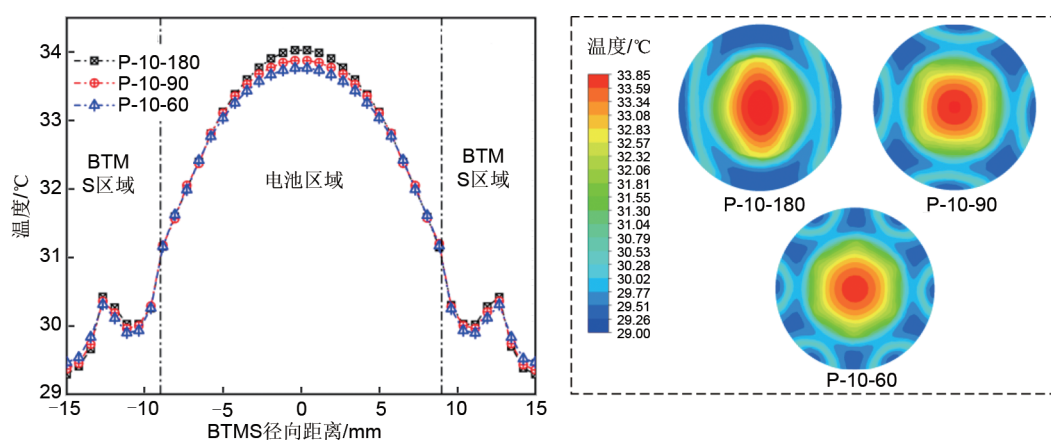


图10 径向截面温度分布与等值线

Fig. 10 Temperature results and contour plot of radial section

高温区，且在距热管理系统区域 12.5 mm 处存在温

3.2.2 TPMS 体积分数的影响

本节重点研究体积分数分别为 10%、20% 与 30% 的 TPMS 结构对系统温控性能的影响。基于前文结论，60° 径向晶格分布结构具有最优散热性能，故以此为基础展开分析。

图 11(a) 展示了 3 种体积分数方案的温度场与液相分数分布。温度云图显示，30% 体积分数案例的最高温度最低，热量积聚现象显著改善。图 11(b) 进一步表明，该方案的 PCM 利用率也明显优于其

度跃变，该现象由 TPMS 结构的高导热特性引起。

他两组。这一现象主要源于两方面：其一，P-30-60 方案中 PCM 填充量较少；其二，高体积分数的 TPMS 结构具有更大厚度及与电池的接触面积，从而强化了整体散热性能。

表 3 列出了 3 种方案的 TPMS 结构参数与温度数据。P-30-60 案例的 TPMS 结构具有最大的体积和表面积，同时实现了最低的最高温度与最大温差。提高 TPMS 体积分数显著改善了电池温度均匀性，这主要得益于结构厚度的增加。

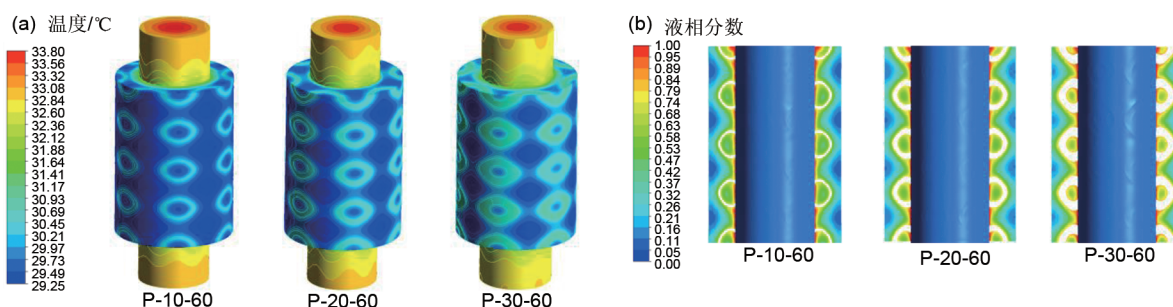


图11 不同体积分数TPMS结构设计的 (a) 温度分布；(b) 液相分数分布

Fig. 11 (a) Temperature results and (b) liquid phase fraction of TPMS designs with different volume fractions

表3 不同体积分数TPMS多孔结构及电池的温度参数结果

Table 3 Temperature results of TPMS porous structures with different volume fractions and battery

种类/参数	多孔结构体积/mm ³	多孔结构表面积/mm ²	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$
P-10-60	1821.4	8162.1	33.91	3.49
P-20-60	3645.2	8625.4	33.80	3.24
P-30-60	5476.4	9034.3	33.74	3.02

需要说明的是，TPMS 表面积可分为与电池接触的吸热区域和与 PCM 接触的散热区域。通过提高体积分数（即增加 TPMS 结构厚度）以增强系统温控性能的机制，主要在于扩展了 TPMS 与电池的接触界面，强化了吸热能力。该机制也导致高体积分数 TPMS 结构自身温度较高：P-10-60 中 TPMS 最高温度为 30.82℃，而 P-30-60 中为 30.58℃。该

温度分布特征表明增强的导热路径有效促进了热量从电池向 PCM 域的传递。

3.3 TPMS 变密度晶格填充设计方案

基于 3.2 节的分析, 已经指出 BTMS 的体积分数和径向晶格分布都会影响 BTMS 的散热性能。图 12 显示了这两个影响因素下的最大温度和温差。其中, 随着径向晶格体积分数的增加, 电池的峰值温度和热梯度都会降低。在所有组合中, P-10-180 的温度和温差最大, 分别为 34.18℃ 和 3.7℃。而 P-30-60 的最高温度和温差最小, 分别为 33.74℃ 和 3.02℃。用 TPMS 设计的 BTMS 散热性能的改善主要取决于 TPMS 的结构参数。所有组合的 TPMS 的结构参数见表 4。

然而, 单一地增大体积分数虽可提升近电池侧的吸热面积, 却会减少 PCM 的有效填充量; 而仅增加径向晶格数量虽能扩大散热面积, 但对近电池高热流区域的吸热强化有限。为协同优化“吸热-导热-散热”全路径性能, 并兼顾系统轻量化需求, 本研究创新性地提出了一种变密度 TPMS 晶格布局 (P-VD)。该设计遵循梯度调控原则: 在靠近电池的高热流区域采用较高的体积分数 (较大结构厚度), 以增强热量捕获能力; 在远离电池的 PCM 主体区域则采用更密集的晶格排布与更薄的结构厚度, 以最大限度地扩展散热界面。具体设计方案与系统集成示意如图 13 所示。

为验证该梯度设计的有效性, 将最优均质结构 P-30-60 作为基准, 与 P-VD 方案进行对比。两种构型的体积分数径向分布与对应的径向温度曲线如图 14 所示。可以看出, P-VD 方案在电池近区的结构厚度 (体积分数) 明显高于 P-30-60, 这使其在电池界面处形成了更强的导热桥接, 从而显著降低

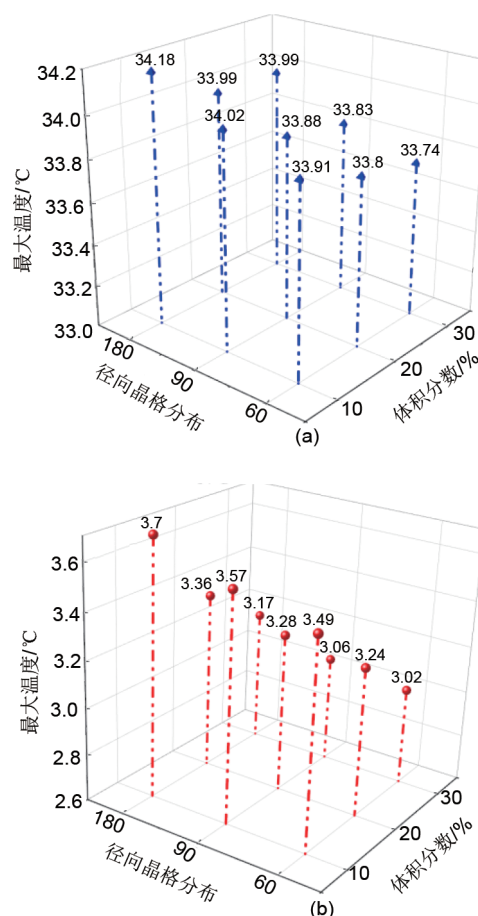


图 12 不同体积分数与径向分布参数的: (a) 最高温度; (b) 温差结果

Fig. 12 (a) Maximum temperature results and (b) temperature difference of different volume fractions and radial distributions

了电池本体的温度。相应地, 该区域 TPMS 骨架自身的温度也略高于 P-30-60 的对应位置, 表明热量被更有效地从电池导出并导入至 TPMS 网络。

图 15 进一步展示了两者的温度场与液相分数

表 4 各 TPMS 构型的体积与表面积几何参数

Table 4 Volume and surface area of all TPMS type designs

种类/参数	多孔结构体积/mm ³	多孔结构表面积/mm ²	吸热面积/mm ²	散热面积/mm ²
P-10-180	1828.8	7163.1	495.3	6667.8
P-10-90	1819.2	7573.5	493.0	7080.5
P-10-60	1821.4	8162.1	491.9	7670.2
P-20-180	3626.4	7639.6	993.9	6645.7
P-20-90	3645.6	8046.6	998.1	7048.5
P-20-60	3645.3	8625.4	997.1	7628.3
P-30-180	5499.4	8088.7	1532.7	6556.1
P-30-90	5490.1	8475.5	1528.7	6946.8
P-30-60	5476.4	9034.3	1516.7	7517.6



图13 变密度TPMS-BTMS结构设计: (a) 结构设计方案; (b) 系统集成方案

Fig. 13 Variable density TPMS-BTMS structural design: (a) Design scheme; (b) BTMS design scheme

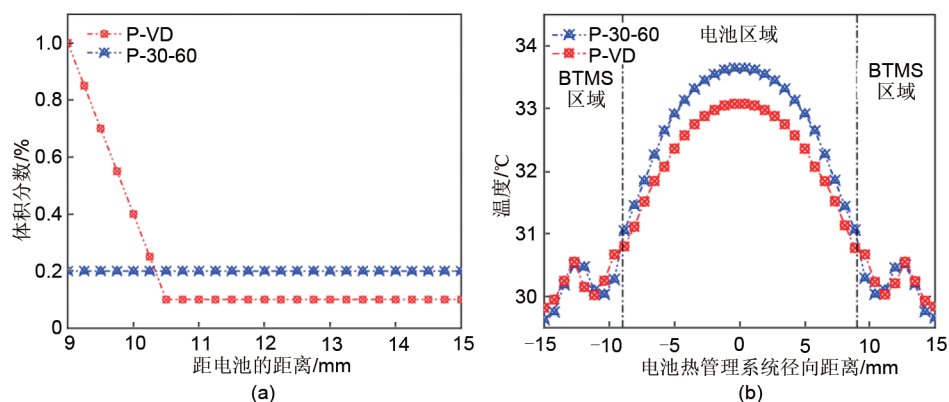


图14 P-30-60与P-VD两种构型对比: (a) 体积分数径向分布; (b) 径向温度分布结果对比

Fig. 14 Two designs of P-30-60 and P-VD: (a) Variation of volume fraction; (b) Radial temperature results

分布。P-VD方案表现出更均匀的温度分布与更高效的PCM熔化过程,热量在PCM域内的扩散更为充分。表5详细对比了两种方案的关键结构参数与热性能数据。数据显示,P-VD方案在将金属骨架体积显著减少约30.4%的同时,实现了吸热

面积与散热面积的大幅提升,增幅分别达66.89%与35.78%。这一结构优化使得电池最高温度($T_{\max}$)与最大温差($\Delta T_{\max}$)进一步降低,较P-30-60分别下降了0.54℃与0.48℃,最大温差降幅超过15%。

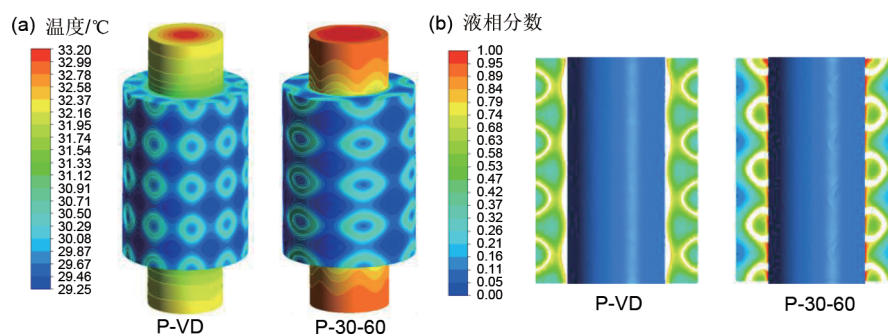


图15 P变密度设计与P-30-60的对比: (a) 温度云图; (b) 液相分数分布

Fig. 15 Comparison between P variable density design and P-30-60: (a) Temperature contour; (b) Liquid phase fraction distribution

表5 P-20-60与P-VD的结构参数及温度结果对比

Table 5 Comparison of structural parameters and temperature results between P-20-60 and P-VD

种类/参数	体积/mm ³	表面积/mm ²	TPMS 吸热面积/mm ²	TPMS 散热面积/mm ²	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$
P-30-60	5476.4	9034.3	1516.7	7517.6	33.74	3.02
P-VD	3813.5	12738.7	2531.2	10207.6	33.20	2.54

值得深入分析的是, 在PCM实际填充量因TPMS骨架体积扩张而相对减少的约束条件下, P-VD方案依然实现了温控性能的提升。这主要归因于其梯度设计本质上优化了热量的空间输运路径: 增大的近电池侧吸热面积确保了热量被快速吸收; 显著扩展的远电池侧散热面积则加速了热量向PCM主体的扩散, 从而避免了热量在局部积聚。这表明, 通过精心设计TPMS结构的空腔构型与密度分布, 可以突破均质结构在材料用量与散热性能之间的权衡, 实现“更强散热、更优均温、更轻量化”的多目标协同。该变密度TPMS设计为发展下一代高效、紧凑、轻质的电池热管理系统提供了新的思路与明确的技术路径。

4 结 论

本研究系统分析了环绕填充的TPMS-PCM复合结构在电池热管理系统中的热行为。模拟在25℃环境温度与3C放电倍率下进行, 以 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 作为关键评价指标, 重点考察了径向晶格数量与体积分数对系统性能的影响, 并据此提出一种性能更优的变密度TPMS填充方案, 其主要结论如下:

(1) 相同体积分数下, TPMS-PCM复合方案将电池最高温度控制在33.81℃, 较单一PCM方案和翅片-PCM方案分别降低3.71℃和2.17℃, 表现出更优的综合散热性能。

(2) 在不同晶格数量与体积分数的组合中, P-30-60方案性能最佳, 其最高温度为33.74℃, 最大温差为3.02℃。

(3) P-30-60方案的优势源于其具备最大的TPMS吸热面积与散热面积。TPMS厚度决定了其与电池的接触面积, 影响吸热能力; 而其表面与PCM的接触状况则直接关系散热效率。TPMS作为电池与PCM之间的导热桥梁, 同步增大其吸热与散热面积可有效提升系统整体热管理性能。

(4) 通过梯度设计实现多目标协同优化, 变密度TPMS填充方案在将金属骨架体积减少约30.4%的同时, 仍使电池最高温度与最大温差较P-30-60分别再降低0.54℃和0.48℃, 吸热与散热面积分别提升66.89%和35.78%, 体现出梯度结构在轻量化与热管理性能协同提升方面的显著潜力。

本研究主要基于经过部分实验验证的数值模型

开展, 未来工作将致力于攻克TPMS-PCM复合样件的增材制造与PCM真空浸渗工艺, 并搭建专门的实验平台, 对优化后的变密度TPMS-PCM结构进行直接的实验测试与验证, 以进一步夯实研究结论的工程可靠性。

参 考 文 献

- [1] 刘彦瑾, 罗玖, 代耀, 等. 基于多尺度模型的锂离子电池电极微结构优化设计[J]. 中国科学(技术科学), 2024, 54(1): 65-77. DOI: 10.1360/SST-2023-0073.
LIU Y J, LUO J, DAI Y, et al. Multi-scale model-based optimal design of electrode microstructures for lithium ion batteries[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2024, 54(1): 65-77. DOI: 10.1360/SST-2023-0073.
- [2] 席鹏飞, 许飞, 杲绍芒, 等. 圆柱形电池热失控防爆技术探索[J]. 电池, 2025, 55(5): 1097-1101. DOI: 10.19535/j.1001-1579.2025.05.033.
XI P F, XU F, GAO S M, et al. Exploration of explosion-proof technology for thermal runaway in cylindrical battery[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(5): 1097-1101. DOI: 10.19535/j.1001-1579.2025.05.033.
- [3] BAO R Q, WANG Z H, GAO Q J, et al. Enhancing the thermal management of 21700 batteries via synergistic porous phase change material and immersion liquid cooling[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 169: 109819. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109819.
- [4] 戴心怡, 孔得朋, 平平. 复合无机相变材料用于锂离子电池热管理性能模拟及优化设计[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(11): 4133-4141.
DAI X Y, KONG D P, PING P. Simulation and optimal design of using composite inorganic phase change materials for lithium-ion batteries thermal management[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(11): 4133-4141.
- [5] NARKHEDE S, SUR A, KOTHARI G, et al. Design and thermal analysis of fin-PCM-integrated thermal management system for lithium-ion cylindrical battery pack[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2025, 239(6): 3269-3278. DOI: 10.1177/09544089231221668.
- [6] KURŞUN B, TOKLU E, POLAT F, et al. The effect of outer container geometry on the thermal management of lithium-ion batteries with a combination of phase change material and metal foam[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 80: 110227. DOI: 10.1016/j.est.2023.110227.
- [7] SHEN X Y, ZHANG X Z, PAN H R, et al. Thermal management of Li-ion battery based on honeycomb-structured fins-modified phase change material[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 232: 125962. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.

- 2024.125962.
- [8] ZARE P, PERERA N, LAHR J, et al. A novel thermal management system for cylindrical lithium-ion batteries using internal-external fin-enhanced phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 121985. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121985.
- [9] ALGHASSAB M A. Investigating the performance improvement of lithium-ion battery cooling process using copper fins and phase change materials (PCMs) [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 59: 104473. DOI: 10.1016/j.csite. 2024. 104473.
- [10] GADO M G, AL-KETAN O, AZIZ M, et al. Triply periodic minimal surface structures: Design, fabrication, 3D printing techniques, state-of-the-art studies, and prospective thermal applications for efficient energy utilization[J]. *Energy Technology*, 2024, 12(5): 2301287. DOI: 10.1002/ente.202301287.
- [11] TIAN Y, LIU X L, LUO Q Y, et al. Sea urchin skeleton-inspired triply periodic foams for fast latent heat storage[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 206: 123944. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123944.
- [12] QURESHI Z A, ADDIN BURHAN AL-OMARI S, ELNAJJAR E, et al. On the effect of porosity and functional grading of 3D printable triply periodic minimal surface (TPMS) based architected lattices embedded with a phase change material[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122111. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122111.
- [13] XIONG S X, WANG Z H, BAO R Q, et al. Performance study and optimization of hybrid battery thermal management system based on triply periodic minimal surface coupled phase change material [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 100: 113529. DOI: 10.1016/j.est.2024.113529.
- [14] QURESHI Z A, AL-OMARI S A B, ELNAJJAR E, et al. Nature-inspired triply periodic minimal surface-based structures in sheet and solid configurations for performance enhancement of a low-thermal-conductivity phase-change material for latent-heat thermal-energy-storage applications[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 173: 107361. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107361.
- [15] GADO M G. Thermal management and heat transfer enhancement of electronic devices using integrative phase change material (PCM) and triply periodic minimal surface (TPMS) heat sinks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124504. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124504.
- [16] FAN Z H, FU Y J, GAO R J, et al. Investigation on heat transfer enhancement of phase change material for battery thermal energy storage system based on composite triply periodic minimal surface[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 57: 106222. DOI: 10.1016/j.est.2022.106222.
- [17] HE R, SONG K W, WU X, et al. Effectiveness analysis of novel battery thermal management systems combining phase change material and air-cooled technologies[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 264: 125499. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2025.125499.
- [18] 钱亨, 刘剑, 霍玉雷. 扰流结构对电池热管理系统的传热特性研究 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(11): 3889-3897. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0581.
- QIAN H, LIU J, HUO Y L. Heat transfer characteristics of lithium-ion battery thermal management system with spoiler structure[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(11): 3889-3897. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0581.
- [19] ZHU W H, LEI F, ZHONG H, et al. Latent heat recovery of composite PCM for hybrid BTMSs based on micro-encapsulated phase change slurry[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108330. DOI: 10.1016/j.est.2023.108330.
- [20] LIU Z W, WANG B Y, TAN Y W, et al. Thermal management of lithium-ion battery pack under demanding conditions and long operating cycles using fin-enhanced PCMs/water hybrid cooling system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121214. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121214.
- [21] WU Z H, SUN X, LUO D, et al. Optimizing the thermal and energy efficiency of a thermoelectric-based battery thermal management system via adaptive control strategies and phase change materials[J]. *Energy*, 2026, 344: 139845. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139845.
- [22] KONG L Y, LI Y H, KONG L L, et al. A novel thermal management system combining phase change material, terminal-cooling with novel arc-fins for a lithium-ion battery pack and the parametric study of the cold plate[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 143: 119685. DOI: 10.1016/j.est.2025.119685.
- [23] 张新宇, 罗声豪, 吴颖欣, 等. 复合相变材料用于锂离子电池热管理和热失控防护研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(3): 1040-1053.
- ZHANG X Y, LUO S H, WU Y X, et al. Research progress of composite phase change materials for thermal management and thermal runaway protection of lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(3): 1040-1053.
- [24] ZHANG F R, LU F, LIANG B B, et al. Thermal performance analysis of a new type of branch-fin enhanced battery thermal management PCM module[J]. *Renewable Energy*, 2023, 206(C): 1049-1063.
- [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. DOI: 10.1149/1.2113792.
- [26] AKULA R, MINNIKANTI A, BALAJI C. Pin fin-PCM composite

- heat sink solution for thermal management of cylindrical Li-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248: 123146. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123146.
- [27] BAO R Q, WANG Z H, GAO Q J, et al. Dynamic-static composite immersion cooling for improving thermal equalization behavior in lithium-ion battery packs[J]. *Energy*, 2025, 330: 136774. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136774.
- [28] ZHANG N, ZHANG Z Y, LI J T, et al. Performance analysis and optimization of a hybrid battery thermal management system integrating PCM with Chinese knot-shaped liquid cooling plate[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 159: 108261. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108261.
- [29] FAN Y W, WANG Z H, XIONG X, et al. Novel concept design of low energy hybrid battery thermal management system using PCM and multistage Tesla valve liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 220: 119680. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119680.
- [30] WU C T, QIU C H, YUAN X L, et al. Numerical study and optimization of battery thermal management systems (BTMS) based on fin-phase change material (PCM) in variable gravity environments[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 244: 122777. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122777.
- [31] CHEN W, TANG X J, CHU X Y, et al. Impact of catalyst carrier with TPMS structures on hydrogen production by methanol reforming[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 58: 1177-1189. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.260.
- [32] SUI L Y, CHEN B M, LIU F, et al. Three-dimensional numerical simulation of solid-liquid phase change in the cavity of composite structures based on TPMS[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 122156. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122156.