

新能源动力电池系统高效热管理技术研究

贺 伟, 朱龙潜*, 卢瑞辉

广州市香港科大霍英东研究院建筑物能源研究中心, 广东 广州

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年9月2日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

在“双碳”目标的推动下, 新能源汽车产业迅速发展起来, 新能源汽车的核心部件动力电池, 其性能和寿命直接决定整车的发展。锂离子电池对温度非常敏感, 在高倍率充放电工况下很容易产生局部热量积聚, 加速容量衰退甚至引发热失控。本文提出了一种协同热管理架构, 即采用液体冷却系统和柔性复合相变材料相结合的方式, 同时, 验证了一种基于润湿网格设计的新型超薄均热板在模组局部热点散热中的应用潜力。经过实验测试, 5C高倍率放电下, 该协同系统把模组最高温度控制在48.1℃, 比自然冷却模组(72.55℃)和纯相变冷却模组(62.6℃)分别低24.45℃和14.5℃, 模组内部最大温差保持在3℃左右, 满足温差小于5℃的均温要求。另外发现具有65μm润湿网格图案的超薄均热板在61.6%的最佳注液率时扩散热阻降低至0.058℃/W, 可以很好地实现高功率密度电池模组局部热点管理的组件级方案。

关键词

锂离子电池, 热管理, 复合相变材料, 超薄均热板, 高倍率放电

Research on Efficient Thermal Management Technology of New Energy Power Battery System

Wei He, Longqian Zhu*, Ruihui Lu

Building Energy Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou Guangdong

Received: August 3, 2026; accepted: September 2, 2026; published: September 14, 2026

Abstract

Driven by the goal of “double carbon,” the new energy automobile industry has developed rapidly. The performance and life of power battery, the core component of new energy vehicles, directly

*通讯作者。

determine the development of the whole vehicle. Lithium-ion batteries are very sensitive to temperature. Under high-rate charging and discharging conditions, it is easy to produce local heat accumulation, accelerate capacity fading and even cause thermal runaway. In this paper, a collaborative thermal management architecture is proposed, which combines a liquid cooling system and a flexible composite phase change material. At the same time, the application potential of a new ultra-thin soaking plate based on wetting grid design in local hot spot heat dissipation of the module is verified. Through the experimental test, Under 5C high-rate discharge, the system held the maximum module temperature at 48.1°C, 24.45°C and 14.5°C lower than the natural-convection module (72.55°C) and the pure-PCM module (62.6°C) respectively, with the in-module temperature difference kept around 3°C, below the 5°C uniformity target. In addition, it is found that the thermal resistance of the ultra-thin soaking plate with 65 μm wetting grid pattern is reduced to 0.058°C/W at the optimal liquid injection rate of 61.6%, which can well realize the component-level scheme of local hot spot management of high power density battery module.

Keywords

Li-Ion Battery, Thermal Management, Composite Phase Change Material, Vapor Chamber, High Rate Discharge

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“双碳”目标强力推动之下，全球新能源汽车市场出现了爆发式增长。动力电池是新能源汽车的主要动力来源，动力电池的性能和寿命直接影响到整车的续航里程、安全性以及市场接受度。根据新能源汽车产业发展规划(2021~2035 年)，预计到 2025 年，新能源汽车销售量将占汽车销售总量的 20%；到 2035 年，纯电动汽车将成销售主流。公共领域用车全面电动化、高能量密度电池的大规模普及已经成为必然趋势。随着电池能量密度的提高以及应用场合的扩大，由热量造成的整车性能下降和安全隐患越来越明显。

具体而言，引发动力电池热安全问题的原因主要包括：(1) 大倍率或多次充/放电循环过程中，内部电化学反应导致电池温度急剧上升。该过程遵循连锁反应的机制，在此期间，电池组件材料的分解反应会陆续发生，进而发生热失控；(2) 充电速率的提高，局部热流严重，导致单体电池发热不均匀，造成不可逆损伤，电池模组性能的退化，引发安全事故。因此，在动力电池体系未能取得重大突破，本征安全问题不能根本解决时，下一代高能量密度锂离子电池的发展除了改进自身结构稳定性外，发展有效的电池热管理系统，降低局部热流密度过高导致的电池温升，控制并实现电池温度的均匀分布是解决热安全问题的有效途径。

目前，电池热管理方法可以分为四类，即空气冷却、液体冷却、相变冷却和热管冷却。对于空气冷却，国内外学者大多从气流组织的角度出发进行研究，主要研究气流组织的几何形状、进出风口的位置以及电池排布的顺序等。Sun 等[1]用数值模拟得出，用锥形冷却管道可以将电池组温差改善约 70%。Mohammadian 等[2]在风冷模块中加入沿气流方向线性增加高度的铝针翅片，从而提高散热效果。尽管空气冷却结构紧凑、成本低廉，但是由于空气比热容很小，在高倍率充放电工况下很难达到理想的冷却效果。液体冷却由于液体的比热容和导热系数都比空气大得多，所以散热效率远高于空气冷却。Tousi 等[3]设计了基于 AgO 纳米流体的新型液冷系统，有效降低了最高温度和温差。Ding 等[4]和沈华平等[5]分别

对液冷板的通道截面形状、蛇形/并行流道以及入口位置进行了优化,发现流道结构调整可以有效降低系统的不均匀性。但是液冷系统对结构封闭性要求很高,存在漏液短路的风险。针对相变材料(PCM)冷却,国内外学者通过添加导热纳米粒子或者碳质材料来强化传热。Al Hallaj 等[6]最早提出将 PCM 用于电池热管理。为了克服纯有机 PCM 导热差、易泄漏的缺点,学者们常添加碳质材料或者采用多孔介质封装。Liu 等[7]使用膨胀石墨,Parameshwaran 等[8]添加 Ag-TiO₂ 纳米粒子以提升导热。王海涛等[9]利用烯烃嵌段共聚物(OBC)将泄漏率控制在 0.5% 以下。但是大功率下 PCM 很容易发生“热饱和”,导致控温失效。对于热管冷却,国内外学者大多从结构创新、工质改性、冷凝端散热耦合方式优化等角度展开研究,Xie 等[10]用嵌入式热管改善了均温性能;Singh 等[11]、Zhou 等[12]分别验证了环路热管的长距离传输能力以及纳米流体在振荡热管中的强化传热效应。目前所有的散热技术都存在单一的限制,而且多以电池表面温度为热管理控制的目标,存在着散热滞后、内部温升过快等问题。因此本文提出了一种“液冷 + 柔性相变材料”的协同热管理系统架构,以期在抑制整体温升的同时解决相变材料的热饱和问题。另外,针对电池极耳等高热流密度区域的局部热点问题,本文研发了一种基于化学润湿网格蒸发端新型超薄均热板(UTVC),探究了其在组件级热点管理中的应用潜力,为下一代动力电池的高效热管理提供理论与实验支撑。

2. 动力电池发热特性分析

锂离子电池充放电过程中产生的热量主要分为不可逆的焦耳热、极化热和可逆的反应熵变热。为了准确量化电池的产热功率,本文采用热管理领域经典的简化版 Bernardi 生热模型,其总产热功率 Q 的表达式为

$$Q = I^2 R - IT \frac{dE_0}{dT} \quad (1)$$

式中, $I^2 R$ 为电池内阻(含欧姆内阻与极化内阻)引起的不可逆产热; $ITdE_0/dT$ 为由电化学反应熵变引起的可逆产热; I 为充放电电流; R 为等效内阻; T 为电池绝对温度; dE_0/dT 为电池的温度系数。

为了获取上述模型中的未知参数,对电池进行理想绝热环境下的温升测试。在绝热条件下,电池产生的热量完全转化为自身温升,即 $Q = C_p m \frac{dT}{dt}$, 将其与式(1)联立,可将温升速率与放电电流转化为线性关系:

$$\frac{1}{I} \frac{dT}{dt} = \frac{R}{C_p m} I - \frac{T}{C_p m} \frac{dE_0}{dT} \quad (2)$$

式中, C_p 为电池比热容, m 为电池质量。

基于上述线性关系式,通过实验提取电池在不同倍率下的温升速率 dT/dt ,即可通过线性回归反解出未知的热物性参数 C_p 和 TdE_0/dT ,即可获得锂电池在不同充放电倍率下的产热。

为了量化地评价单体电池的发热特性,本文以额定容量为 25 Ah 的商用方形磷酸铁锂电池(实测质量 $m = 0.924$ kg, $R = 2.66$ mΩ)作为测试对象。准绝热测试环境下依次对电芯施加 1C、3C 和 5C 的恒流放电负载。测试过程在自制保温装置内进行。电池用 EPE 珍珠棉包裹后放入保温盒,保温盒置于恒温箱中(控温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$),环境温度保持稳定,漏热对测试影响很小。电池表面布置 5 支 T 型热电偶(Omega 型, TT-T-30-SLE-1M,精度 $\pm 1^\circ\text{C}$),温度由安捷伦数据采集系统记录,充放电由电池测试仪(CE-7002-100V300A)控制。测试程序为:先以 1C 恒流恒压充电至 3.75 V、0.5 A 截止,搁置 30 min 使温度回落并与环境一致,再分别以 1C、3C 和 5C 恒流放电至 2.5 V 截止,结束后搁置降温至室温。对放电段温升-时间曲线线性拟合,得到各倍率温升速率,线性度良好;准绝热近似与集总热容假设成立,按式(2)即可由温升速率反解电池热物性参数。

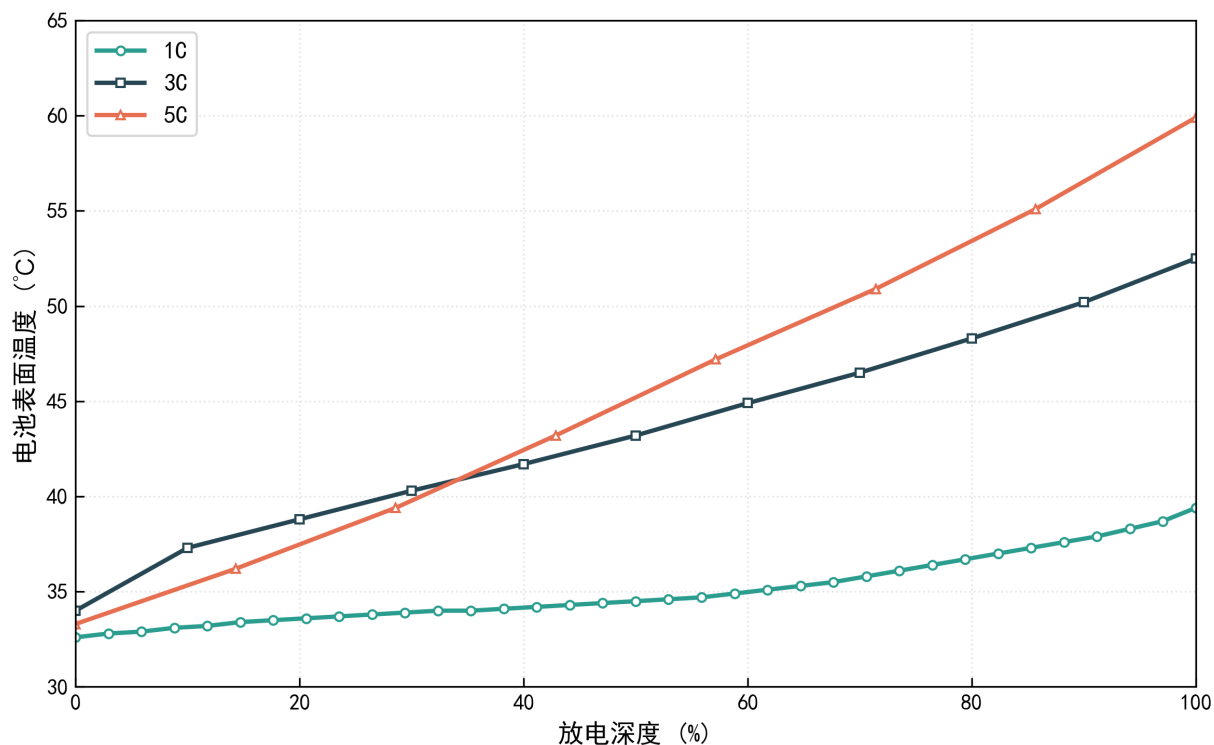


Figure 1. Surface temperature variation curves of the battery under different discharge rates

图 1. 不同倍率下电池表面温度变化曲线

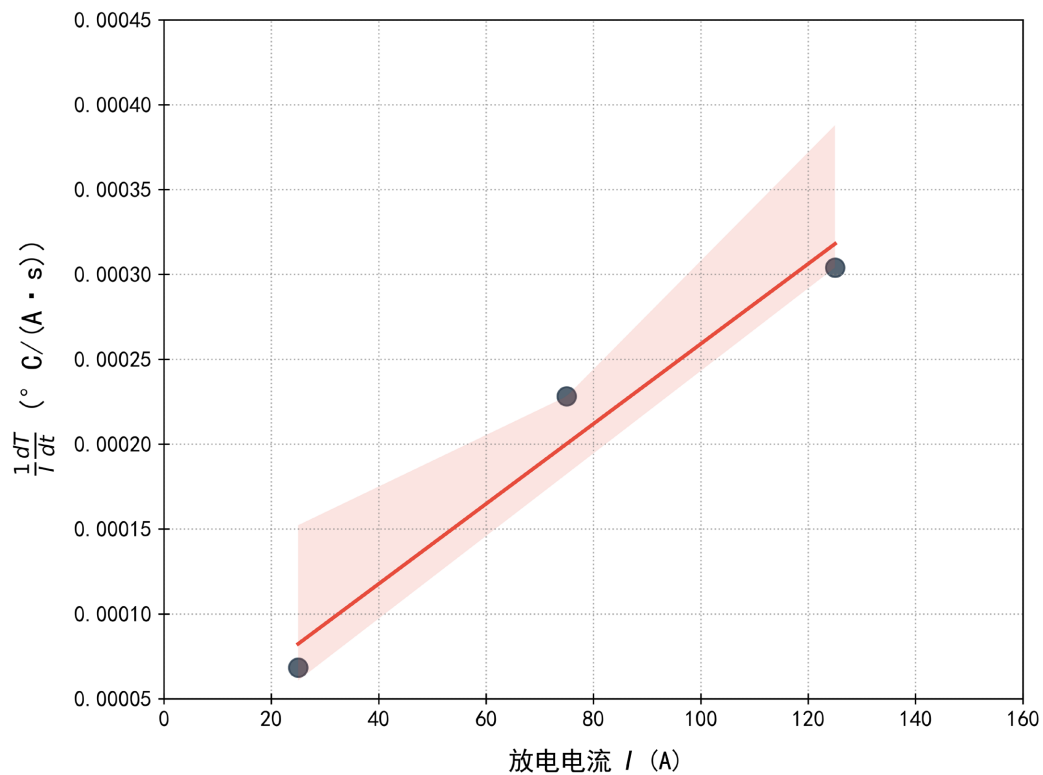


Figure 2. Relationship curves of dT/Idt versus discharge current I

图 2. dT/Idt - I 关系曲线

图 1 给出了不同工况下电芯表面温度随放电深度(DOD)变化的情况。由图 1 可知,随着放电负荷加大,电池表面温升速度呈明显的增大趋势。在 1C 低倍率放电区间内,内源生热较慢,整个过程温度变化平稳,放电末期(100%放电深度)最高温度只有微升到 39.4℃,始终处于锂离子电池的适宜工作温区内;当放电倍率提升到 3C 时,焦耳热和极化热都变得明显起来,放电到 100%深度时的峰值温度可以达到 52.5℃;而在 5C 大倍率的苛刻工况下,内部热量产生严重的累积,放电末期最高温度飙升至 59.9℃。由此可知,高倍率放电很容易造成严重的局部热堆积,需要采用高效的热管理系统来进行干预。

根据图 1 温度响应特性可以得到不同的放电电流对应的温升速率 dT/dt ,为了求取电池的热物性参数,将 dT/dt 和放电电流 I 的关系线性拟合。带 95%置信区间内的散点拟合结果如图 2 所示,可以看出两者有很强的线性正相关特征。

从图 2 的线性拟合结果,可以得到如下关系式:

$$\frac{1}{I} \frac{dT}{dt} = 2.33 \times 10^{-6} \cdot I + 2.88 \times 10^{-5} \quad (3)$$

将上述拟合直线的斜率和截距,代入前面的电池热量平衡方程(式 2)中进行计算,求得该磷酸铁锂电池的平均比热容 C_p 为 1241 J/(kg·K), dE_0/dT 为 0.11 mV/K,结合这些参数,可以得出电池发热功率 Q 与放电电流 I 的计算公式:

$$Q = 2.66 \times 10^{-3} I^2 + 0.033 I \quad (4)$$

根据公式 4 计算不同放电倍率下的产热速率,结果如表 1 所示。

Table 1. Heat generation rates of the battery under different discharge rates

表 1. 不同放电倍率下电池产热速率

	1C	3C	5C
电流(A)	25	75	125
产热速率(W)	2.49	17.44	45.69

从表 1 可知,在 1C 放电倍率下,单体电池的发热量比较小,仅为 2.49 W;但是随着放电倍率的增大,发热速率就会急剧上升,在 5C 倍率的时候就达到了 45.69 W。大电流放电造成的大量热荷如果没有被及时地消耗掉,就会造成模组内部出现严重的热量聚集和局部温度过高。如果电池长期在高温环境下工作,内部材料的微观结构就会受到破坏,从而引起内阻增大,形成“内阻变大-产热增加”的恶性循环,严重的时候还会出现热失控。因此为了保证动力电池系统运行的安全性,本文提出了一种新的散热方式——液冷+复合相变材料的协同散热管理方案,用来实现对整个电池模组的全局温控;同时针对大倍率工况下部分区域容易出现的极端局部热点,提出了引入超薄均热板部件进行靶向散热的思路,为此,本研究试制了相应的超薄均热板组件,对其基础传热性能进行了独立表征与评估,初步论证了其作为局部导热强化单元在未来电池热管理系统中的应用可行性与技术潜力。

3. 协同热管理系统的构建与验证

3.1. 柔性复合相变材料的制备与表征

本研究将苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)(含量 15%)作为支撑材料,膨胀石墨(EG)(含量 5%)为导热强化材料,石蜡(PA)作为相变基底,采用熔融共混法制备柔性复合相变材料。制作流程如图 3 所示。经过瞬态平面热源法测试,复合后导热系数由纯 PA 的 0.512 W/(m·K)提升至 1.324 W/(m·K)。

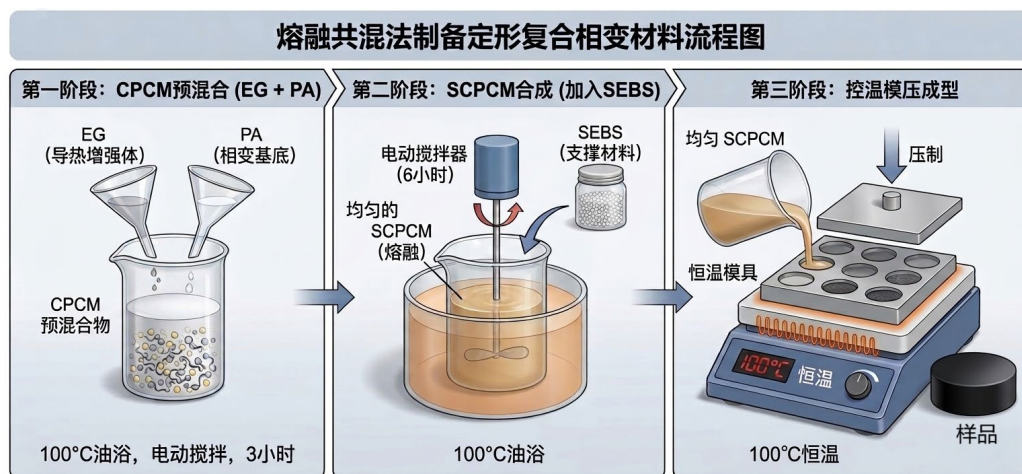


Figure 3. Preparation flowchart of flexible composite phase change material

图 3. 柔性复合相变材料制备流程图

本文用 SEBS 中乙烯-丁烯嵌段和石蜡的相近溶解度参数来达到两者的相容性。SEBS 在材料内部形成一个稳固的物理交联骨架,可以很好地束缚住高温熔融态的石蜡。该复合材料(SCPCM)经过高温相变、吸收大量潜热之后,仍然保持固态基体的形态,没有发生液体泄漏。优异的防漏液特性、柔韧性可以消除材料与电池表面接触时的界面气隙,给后续模组的高效均温控制提供可靠的材料基础。

3.2. 协同系统的均温与控温性能分析

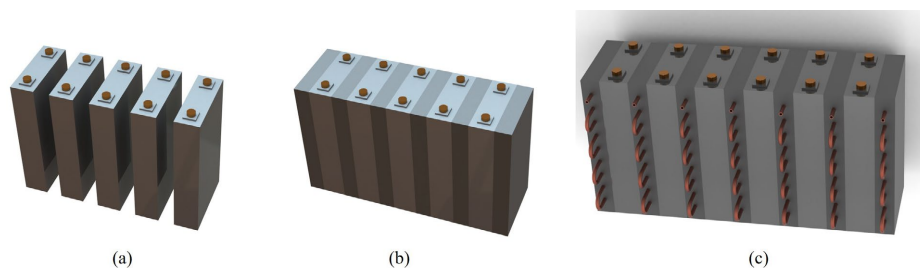


Figure 4. Battery modules: (a) NO-PCM battery module; (b) PCM battery module; (c) W-PCM battery module

图 4. 电池模组, (a) NO-PCM 电池模组; (b) PCM 电池模组; (c) W-PCM 电池模组

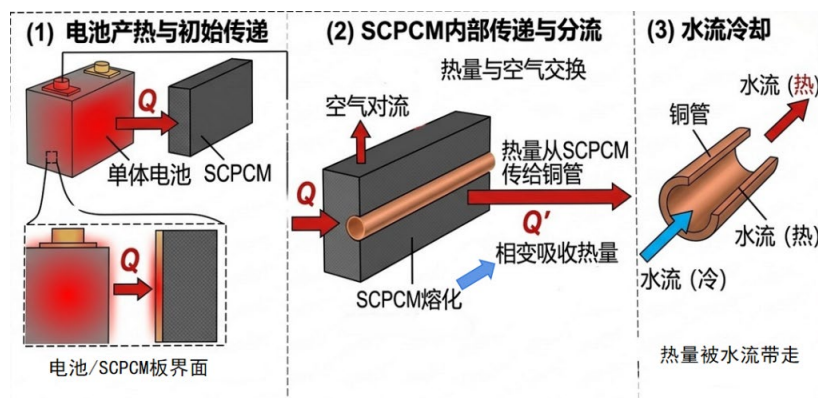


Figure 5. Heat transfer mechanism of W-PCM

图 5. W-PCM 传热原理

为了系统地评价所提出的方案温控增益效果, 本文建立起了三种不同的电池热管理测试模块, 即自然冷却模块(NO-PCM)、纯复合相变冷却模块(PCM)和液冷-相变协同冷却模块(W-PCM), 其拓扑结构如图4所示。PCM和W-PCM架构中的5节单体电芯和6片SCPCM导热板用交替堆叠的方式紧密压合, 以达到最大的接触换热面积。W-PCM协同系统内SCPCM内部嵌有微通道铜管。如图5所示, 该系统内部的热量演化过程可以分为电池产热与初始传递、SCPCM内部传递与分流、水流冷却。

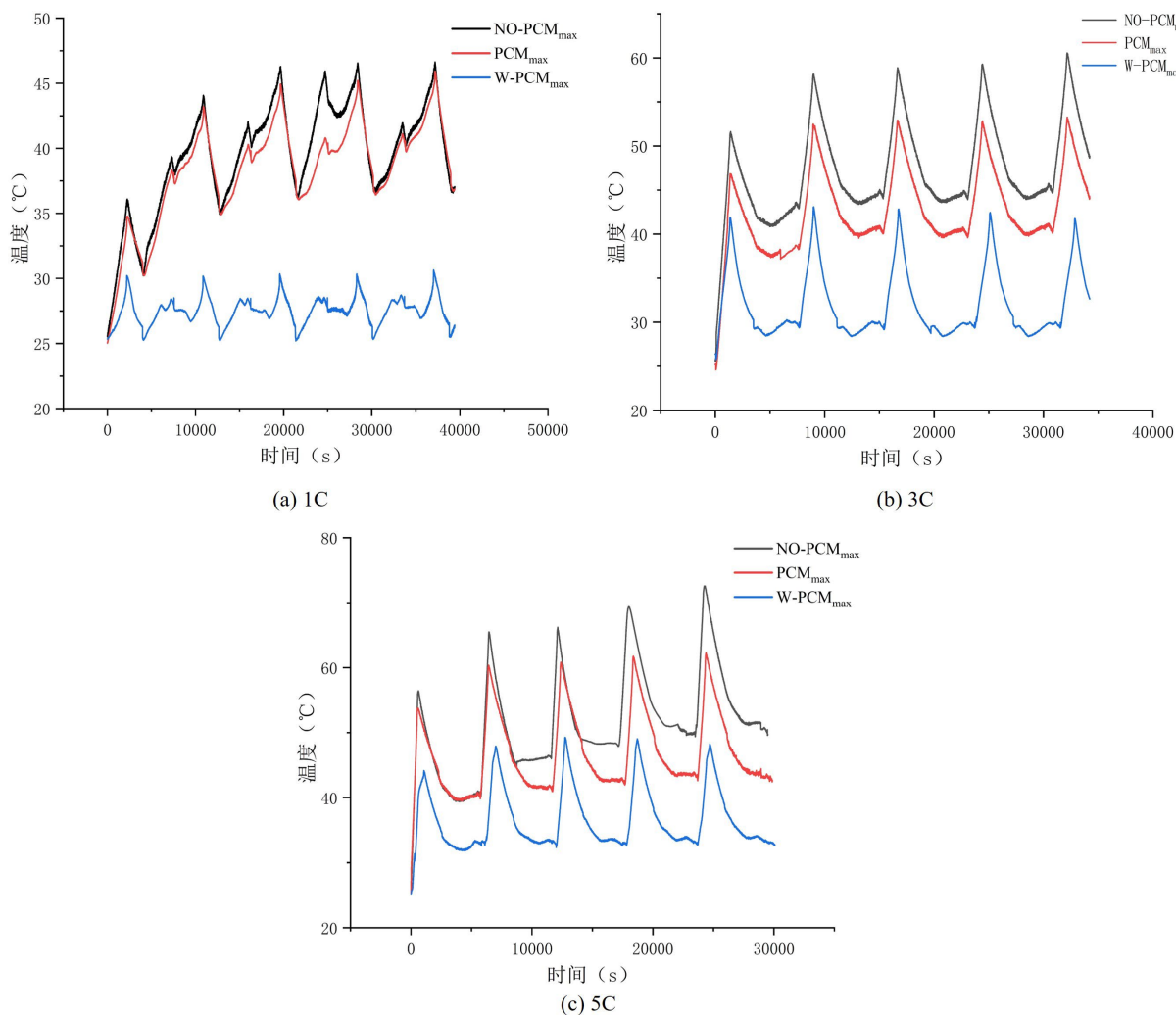


Figure 6. Temperature variation curves of battery modules under different discharge rates
图 6. 不同放电倍率下电池模组温度变化曲线

搭建充放电热循环实验平台, 在环境温度保持在 25°C , 铜管内冷却水流速为 6 mL/s , 对三组模块分别做连续 5 次 1C、3C、5C 倍率恒流放电实验。实验结果如图6所示。低倍率(1C)下, NO-PCM和PCM的最高温度相差只有 0.63°C 。这是由于此时电池产热小, 最高温度还没有达到 SCPCM 的熔化阈值, 材料依靠物理导热性能工作, 没有激发潜热吸收能力; 而 W-PCM 依靠水流的主动带热, 将模组温度稳稳压制在 30°C 左右。中倍率(3C)下, 依靠自然对流的 NO-PCM 模组最高温度已经达到了 57.55°C , 超过了锂离子电池的常规工作上限, 而 PCM 和 W-PCM 都可以把温度控制在安全范围内。高倍率(5C)下, NO-PCM 模组热量严重堆积, 温度飙升至 72.55°C ; 纯 PCM 模组虽然在初期吸收了大量潜热, 但是由于缺少

主动排热路径,材料完全熔化并达到“热饱和”状态,高温下导热能力受限,最终温度仍突破了 62.6°C 。相比而言,W-PCM协同系统依靠流经铜管的冷却水迅速带走相变材料内部的积聚热量,实现了“吸热-相变-排热”的动态平衡,最终将极端工况下的模组最高温度控制在 48.1°C 。

电池模块中电池温度的均匀性差会使得电气不平衡,进而影响到整个性能。锂离子电池模块内最大温差应该小于 5°C 。三种散热策略在连续充放电循环下内部最大温差的变化情况如图7所示,1C和3C放电工况下,循环次数越多,NO-PCM模组中心区域自然对流受限,最大温差逐渐增大到 7.70°C 和 9.42°C 。PCM模组在3C及以下工况下具有较好的均温性(温差 $<5^{\circ}\text{C}$)。但是当放电倍率达到5C的时候,纯PCM模组内部热量不能及时地释放出去,造成边缘和中心单体温差增大到 6.60°C ,产生局部热应力隐患。W-PCM协同热管理结构依靠SCPCM中膨胀石墨(EG)优秀的面内均热性能和内部铜管的主动分流带热,在连续热冲击下,模组内部最大温差始终被严格控制在 3°C 左右,具有极高的全局温度一致性。

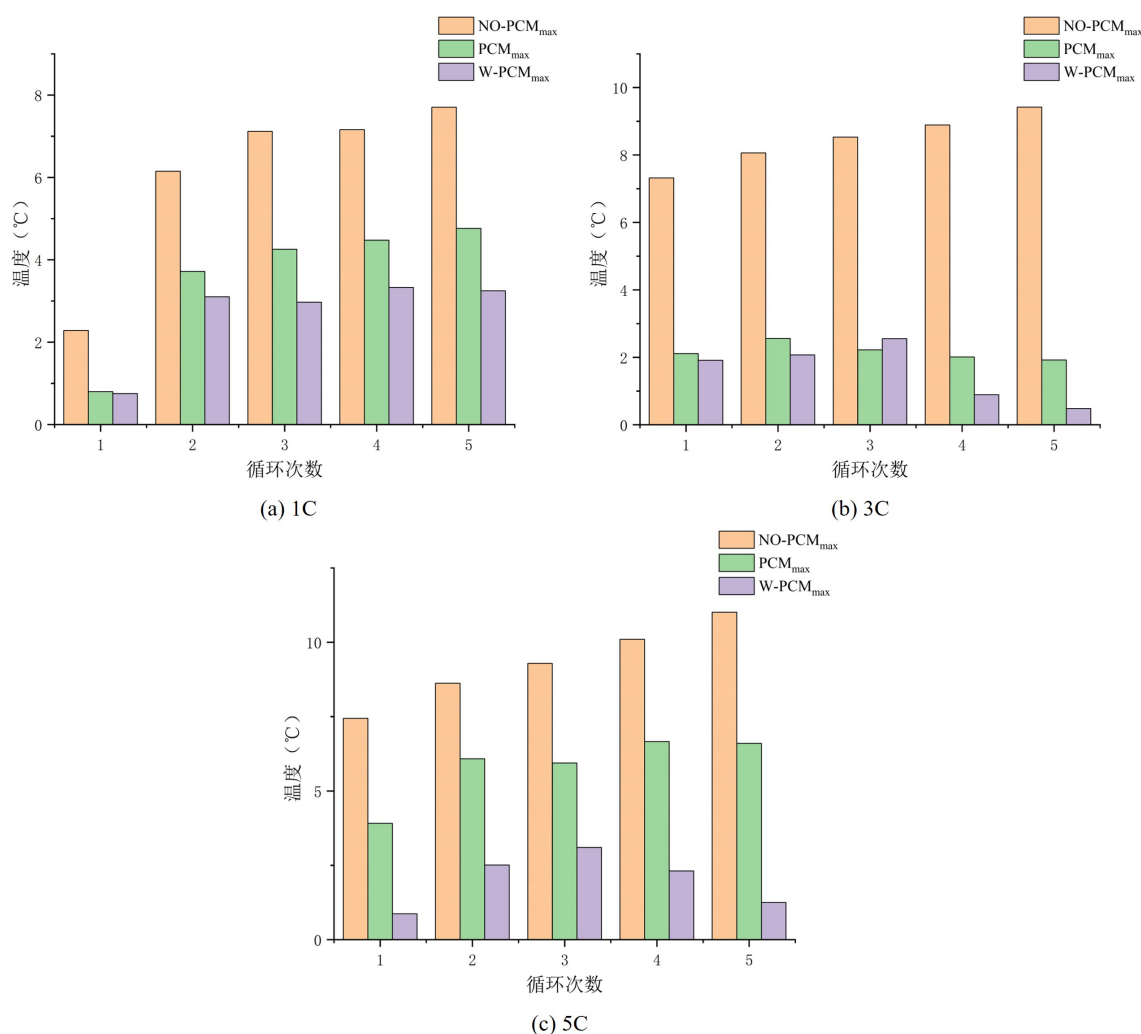


Figure 7. Temperature variation curves of battery modules under different discharge rates

图 7. 最大温差变化曲线

4. 局部热点的超薄均热板潜力探索

在动力电池高倍率快充或长期循环的恶劣工况下,除了模组级别的宏观热积累,电池单体内部或极

耳处极易产生高热流密度的微观局部热点。这些热点是诱发热失控的源头。由于相变材料的导热能力依然有限,面对极高热流密度的瞬间冲击,亟需引入能够实现“极速面内均热”的底层传热组件。基于此,本文进一步探索了引入新型超薄均热板进行局部热点消散的工程潜力。

4.1. 润湿网格蒸发端结构与实验设计

超薄均热板由三个部分组成,如图8所示,分别为具有微型圆柱阵列的冷凝端,多尺度微/纳米结构网状吸液芯和具有化学润湿网格图案的蒸发端。冷凝端和蒸发端基底材料分别为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的 C1100P 铜片。为了研究化学润湿网格图案的设计对超薄均热板性能的影响,设计了不同的化学润湿网格并制造在均热板底部基底材料上。化学润湿网格由亲水区和疏水岛组成。疏水岛大小为 $45\text{ }\mu\text{m} \times 45\text{ }\mu\text{m}$,相邻疏水岛的间距为 $65\text{ }\mu\text{m}$ 或 $90\text{ }\mu\text{m}$,组成了疏水岛阵列,其他部分为亲水区域。微型圆柱阵列的制作方法是光刻技术和电镀技术制作而成,其高度为 $120\text{ }\mu\text{m}$ 。多尺度微纳复合吸液芯是通过将磷青铜铜网进行化学氧化制作而成的。铜网表面形成了一层针状纳米结构,可以提高吸液芯的回流能力并增加蒸发速率,具体制作步骤如下。

化学润湿网格的制备流程为:先将蒸发端铜片依次浸入丙酮和异丙醇中各超声清洗 10 min ,再用去离子水冲洗;随后浸入 20% 稀硫酸溶液去除表面天然氧化层并用去离子水洗净,通过光刻技术在铜片表面形成 HPR506 光刻胶图案,将铜片浸入氟烷基硅烷(FAS)溶液中 1 h (FAS 与正己烷按 1.6% 质量比配制),取出后在 115°C 烘箱中烘烤,未受光刻胶保护的区域即形成疏水岛,最后浸入丙酮去除光刻胶。制得的亲水区与疏水岛水接触角分别为 78° 和 110° 。微型圆柱阵列采用光刻与电镀两步工艺制作,圆柱高度为 $120\text{ }\mu\text{m}$ 。多尺度微纳复合吸液芯以 #450 C5191 磷青铜铜网为基体,经标准清洗后浸入 $0.065\text{ M K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 和 2.5 M KOH 的混合水溶液中处理 30 min ,去离子水冲洗后在 180°C 烘箱中烘烤 2 h ,使铜网表面原位生长针状纳米结构。均热板封装时以 Sn/3Ag/0.5Cu 焊料密封,并封装一根铜管用于抽真空与注液;封装后整体尺寸为 $70 \times 70 \times 0.246\text{ mm}^3$,工作区域 $60 \times 60\text{ mm}^2$,内部抽真空至 1 Pa 后注入去离子水工质,注液后厚度约 0.228 mm 。注液率分别设置为 57.2% 、 61.6% 和 66.0% 。

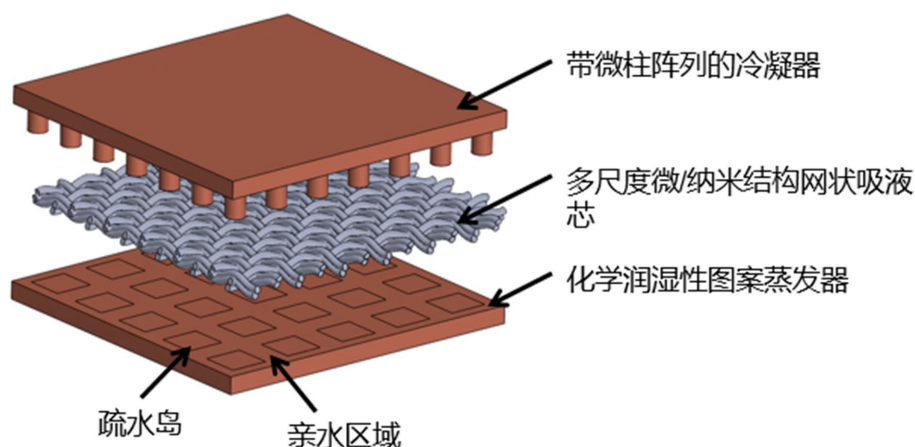


Figure 8. Schematic diagram of vapor chamber structure
图8. 均热板结构示意图

本文设计出一种具有化学润湿网格图案的蒸发端,通过多尺度微纳复合吸液芯的基础上,用光刻法和氟烷基硅烷(FAS)表面修饰技术,形成亲水区和疏水岛交替排列的图案。设计的目的是用疏水岛来降低汽泡形核过热度从而促使汽泡脱离,用亲水区强化的毛细力来引导冷凝液快速回流。

实验制备了不同疏水岛间距(65 μm 和 90 μm , 分别记为 P65 和 P90)的超薄均热板, 封装并抽真空注液后, 其整体尺寸为 $70 \times 70 \times 0.228 \text{ mm}^3$ 。为模拟电池局部热点, 采用 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的加热器作为集中热源, 在不同注液率(57.2%、61.6%、66.0%)和输入热流密度下测试了均热板的扩散热阻、垂直热阻及面内有效导热系数。

4.2. 超薄均热板传热性能分析

如图 9 所示, 搭建了均热板性能测试平台, 热量通过外部电源 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的加热器输入。一个可调节的风扇用于提供强制空气对流来带走均热板冷凝端的热量, 空气流量为 6.875 cfm, 温度为 22°C 。5 个分辨率为 0.1°C 的 T 型热电偶安装在冷凝端的外表面, 并有 1 个置于加热器内部进行温度测量, 位置如图 9(b)和图 9(c)所示。

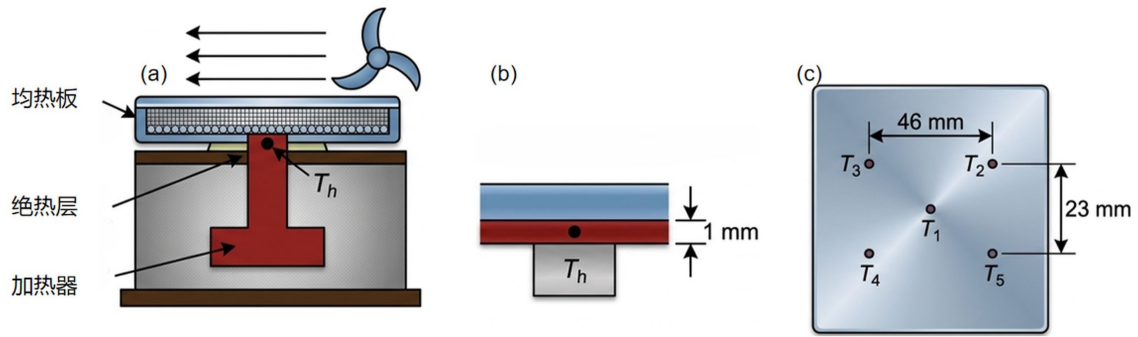


Figure 9. Experimental setup: (a) schematic diagram of test platform; (b) heater temperature measurement; (c) schematic diagram of temperature measurement locations for thermal spreading

图 9. 实验装置, (a) 测试平台示意图; (b) 加热器温度测量; (c) 均热温度测试位置示意图

为了评估超薄均热板的性能, 引入了扩散热阻 R_{spread} 和垂直热阻 R_{vr} 作为评价指标:

$$R_{\text{spread}} = \frac{(T_1 - T_{\text{avg}(2-5)})}{Q} \quad (5)$$

$$R_{\text{vr}} = \frac{(T_b - T_{\text{avg}(1-5)})}{Q} \quad (6)$$

式中, Q 为输入功率, T_1 为冷凝端外表面中心的温度; $T_{\text{avg}(1-5)}$ 和 $T_{\text{avg}(2-5)}$ 分别是冷凝端 5 个和 4 个测温点的平均温度, T_b 是蒸发端外表面中心温度, 可根据傅里叶定律计算:

$$T_b = T_h - \frac{ql}{k_{\text{Cu}}} \quad (7)$$

式中, T_h 是测量的加热器温度; l 是热电偶到加热器外表面的距离; k_{Cu} 是铜的导热系数, q 是输入热流密度。

为了表征均热板的温度均匀性并与铜进行比较, 进一步定义了面内有效导热系数 K_{eff} :

$$K_{\text{eff}} = \frac{k_{\text{Cu}} R_{\text{spread,Cu}}}{R_{\text{spread}}} \quad (8)$$

式中, $R_{\text{spread,Cu}}$ 为测量的铜的扩散热阻。

4.2.1. 注液率对均热板性能的影响

超薄均热板内部的液体工质充注率对其极限传热能力影响极大：过高的注液率会使液体工质占据过多的蒸汽通道，导致蒸汽流动阻力急剧增加，削弱冷凝回流效率；过低则会使蒸发端在较低热流密度下提前发生局部干涸(Dry-out)。为了探究并锁定最优的内部工质体积，本研究对比了 57.2%、61.6%和 66.0% 三种不同注液率下的热阻演变规律。

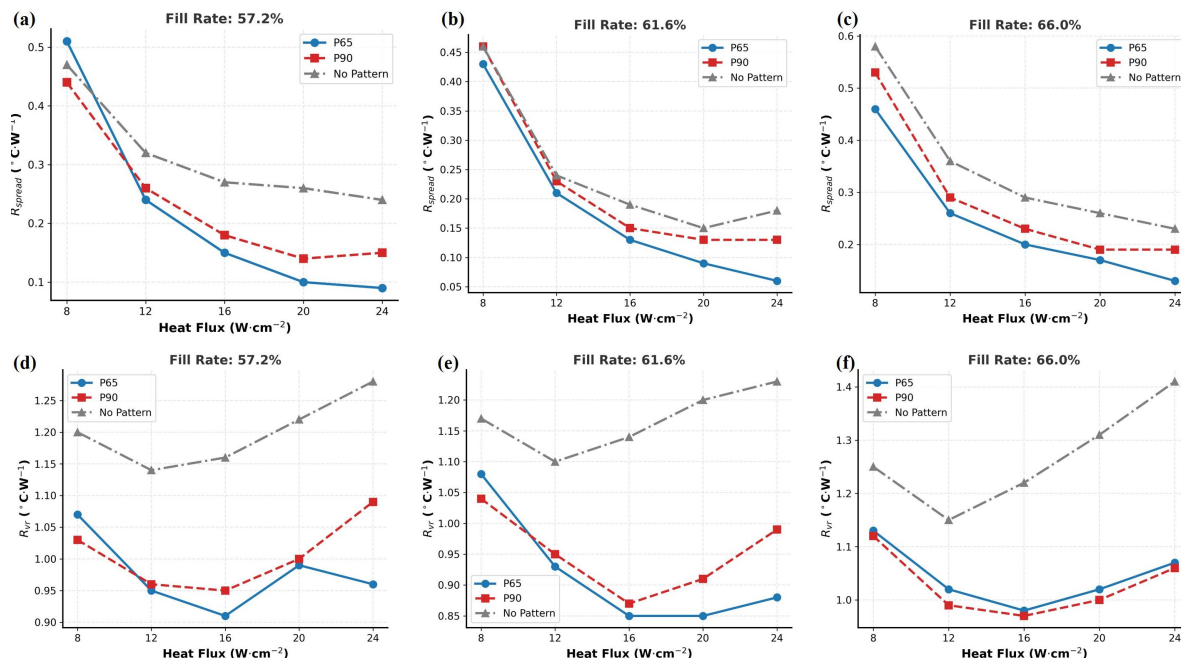


Figure 10. Comparison of spreading thermal resistance and vertical thermal resistance of ultra-thin vapor chambers under different filling ratios and heat fluxes: (a) 57.2% filling ratio: spreading thermal resistance; (b) 61.6% filling ratio: spreading thermal resistance; (c) 66.0% filling ratio: spreading thermal resistance; (d) 57.2% filling ratio: vertical thermal resistance; (e) 61.6% filling ratio: vertical thermal resistance; (f) 66.0% filling ratio: vertical thermal resistance

图 10. 不同注液率及热流密度下超薄均热板的扩散热阻与垂直热阻对比: (a) 57.2%注液率: 扩散热阻; (b) 61.6%注液率: 扩散热阻; (c) 66.0%注液率: 扩散热阻; (d) 57.2%注液率: 垂直热阻; (e) 61.6%注液率: 垂直热阻; (f) 66.0%注液率: 垂直热阻

如图 10 所示，在所有测试注液率下，超薄均热板的扩散热阻均随着热流密度的增加而呈现出单调下降的趋势。横向对比发现，当注液率为 57.2%和 66.0%时，P65 (疏水岛间距在 $6.5\mu\text{m}$) 在 $24\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 高热流密度下的最小扩散热阻分别约为 $0.09\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$ 和 $0.13\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$ ，而当注液率为 61.6%时，P65 展现出了极佳的横向扩热能力，在 $24\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的极端热流密度下，达到了所有测试工况下的全局最小扩散热阻 $0.058\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

另一方面，垂直热阻的测试曲线呈现出先下降后逐渐平缓或反弹的“U”型特征。这种非线性变化归因于沸腾传热机制的转换：随着热流密度增加，蒸发端内部逐渐触发并强化了核沸腾，相变潜热带走大量热量，有效降低了垂直方向的传热热阻；但当热流进一步攀升至极限时，部分区域液体回流速率低于蒸发速率，引发局部瞬态干涸，导致热阻降幅趋缓甚至回升。在 61.6%注液率下，P65 的垂直热阻在热流密度达到 $16\sim 20\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 区间时降至最低平台，约为 $0.85\text{°C}\cdot\text{W}^{-1}$ ，显著优于其他注液率下 P65 的最低垂直热阻极值。

综合扩散热阻的全局最低点与垂直热阻的最低平台表现，61.6%确定为该系列超薄均热板的最优注液

率。后续对表面润湿网格间距极限传热性能的深入对比,均基于此最佳注液率开展,测试结果如图 11 所示。

4.2.2. 润湿网格间距对极限传热性能的强化

在锁定 61.6%为最优注液率后,进一步对比了不同疏水岛间距(P65、P90)与无图案(No Pattern)均热板面内有效导热系数的差异,以揭示化学润湿网格对传热极限的强化作用。

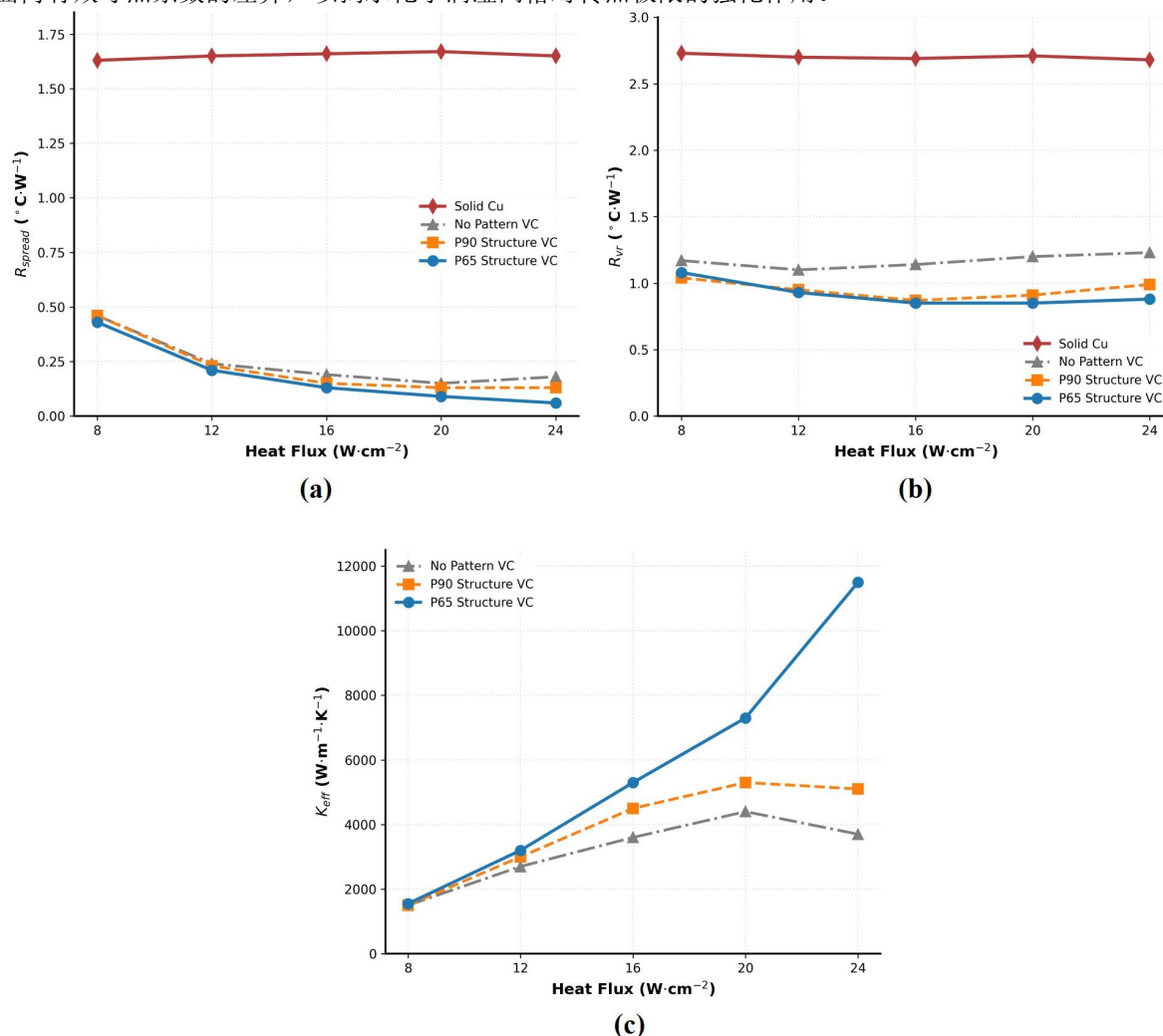


Figure 11. Comparison of in-plane effective thermal conductivity of vapor chambers with different evaporator structures under optimal filling ratio (61.6%): (a) spreading thermal resistance; (b) vertical thermal resistance; (c) effective thermal conductivity

图 11. 最优注液率(61.6%)下不同蒸发端结构的均热板面内有效导热系数对比, (a) 扩散热阻; (b) 垂直热阻; (c) 有效导热系数

在较低的热流密度($8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$)下,三种结构样品的面内有效导热系数差异较小。然而,当输入热流密度攀升至 $16 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,表面润湿网格设计的强化优势被显著放大: P65 和 P90 的面内有效导热系数分别提升至 $5255.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $4487.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 而无图案(No Pattern)样品仅维持在 $3500 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右。

当热流密度达到测试极限时,无图案样品的面内有效导热系数出现明显的下降趋势,表明其内部气液循环受阻,已濒临传热极限(毛细极限或沸腾极限);而 P65 样品的面内有效导热系数则呈现出阶跃式跃升,最高达到 $11499.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

机理分析表明,较小间距的化学润湿网格(P65 型)蒸发端能够提供最大的性能提升。其密集的亲水区与疏水岛交替结构结合表面原位生长的针状纳米结构,一方面为核沸腾提供了更密集、活跃的汽化核心;另一方面极大增强了表面毛细抽吸力,加速了冷凝液体的回流与铺展。

5. 测量不确定度分析

超薄均热板测试平台 LW9510 标称的输入功率、温度、长度测量相对不确定度分别为 $\pm 0.9\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 0.4\%$;加热器四周以绝缘材料隔热,实测热损失约 0.41 W,相对输入功率很小,可忽略。电池热物性测试中,表面温度取 5 支 T 型热电偶(Omega 型, TT-T-30-SLE-1M, 精度 $\pm 1^\circ\text{C}$)的多点平均值,温升速率由线性拟合得到;模组均温性测试采用安捷伦 34972A 数据采集系统配 T 型热电偶,采集分辨率 0.1°C ,仪器标称的 T 型热电偶测量精度为 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 。电压、电流由充放电测试仪 CE-7002-100V300A 记录,精度满足产热功率的计算要求。

上述不确定度对主要结论的影响很小。5C 放电下, W-PCM 模组最高温度(48.1°C)比自然冷却模组(72.55°C)和纯相变冷却模组(62.6°C)低 $14^\circ\text{C}\sim 24^\circ\text{C}$,远大于单点测温精度($\pm 1.0^\circ\text{C}$ 以内);模组内部最大温差 3°C 左右的结论在 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 测温精度下仍可分辨,且多次循环稳定复现。P65 型均热板的面内有效导热系数($11499.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)约为无图案样品的 3.3 倍,同样远大于输入功率与温度测量的合成不确定度,扩散热阻 $0.058^\circ\text{C}/\text{W}$ 的结论不受影响。测量误差不会改变本文的主要结论。

6. 结论

本文针对动力电池在复杂工况与高倍率放电条件下面临的热安全与热管理瓶颈,从电池单体产热机制、宏观系统级协同热管理到微观局部热点均热技术进行了系统性研究,主要得出以下结论:

(1) 电池发热特性与放电倍率呈强非线性正相关。经绝热温升实验验证及简化 Bernardi 热模型计算,动力电池在 5C 极端高倍率放电下产热功率高达 45.69 W,热量积聚极快。常规单一的自然对流或被动风冷已无法满足安全需求,极易跨越安全温度阈值引发热失控,建立高效的主动式及相变协同热管理系统具有工程必然性。

(2) “水冷 + 柔性复合相变(W-PCM)”协同系统的全局温控效果明显。SEBS/EG/PA 柔性复合相变材料导热性和形状稳定性好,与液冷管网耦合后,在 5C 连续循环放电测试中把模组最高温度控制在 48.1°C ,比自然冷却模组(72.55°C)和纯相变冷却模组(62.6°C)分别低 24.45°C 和 14.5°C ,模组内部最大温差保持在 3°C 左右,低于 5°C 的均温要求。

(3) 化学润湿网格超薄均热板明显改善了电池局部高热流密度区域的散热。针对极耳等易出现高热流密度的“热斑”区域,研制了厚度约 0.228 mm 、含多尺度微纳复合吸液芯和化学润湿网格的超薄均热板。在 61.6%最优注液率和 P65 疏水岛间距下,面内有效导热系数达到 $11499.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,约为无图案样品的 3.3 倍,扩散热阻最低 $0.058^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

从实验室走向工程应用,仍需解决若干实际问题。成本上,复合相变材料、微通道铜管以及超薄均热板涉及的光刻、电镀、表面修饰与真空注液等工序,设备和材料投入明显高于传统风冷,现阶段更适合高功率密度、对热管理要求苛刻的应用;随着工艺成熟和产量提升,成本有望逐步回落。制造端的压力主要在超薄均热板,多步微纳加工对精度和一致性要求高,批量良率不好控制;复合相变材料的熔融共混工艺已经比较成熟,连续化生产中的组分均匀性和批次稳定性仍需打磨。长期可靠性需要寿命试验验证,相变材料多次相变循环后的潜热衰减与形状稳定性、液冷管路的长期密封与漏液风险、均热板长期运行中工质迁移导致的局部干涸和性能退化,目前均缺乏完整数据。集成方面, 0.228 mm 厚的超薄均热板对体积几乎没影响,但它与极耳、模组结构如何装配,还得结合具体电池体系做适配研究。后续工

作先解决成本、工艺和可靠性问题，再考虑规模化应用。

基金项目

广州市科技计划项目(2025A03J3484)。

参考文献

- [1] Sun, H., Wang, X., Tossan, B. and Dixon, R. (2012) Three-Dimensional Thermal Modeling of a Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Power Sources*, **206**, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.081>
- [2] Mohammadian, S.K. and Zhang, Y. (2015) Thermal Management Optimization of an Air-Cooled Li-Ion Battery Module Using Pin-Fin Heat Sinks for Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, **273**, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.110>
- [3] Tousi, M., Sarchami, A., Kiani, M., Najafi, M. and Houshfar, E. (2021) Numerical Study of Novel Liquid-Cooled Thermal Management System for Cylindrical Li-Ion Battery Packs under High Discharge Rate Based on Ago Nanofluid and Copper Sheath. *Journal of Energy Storage*, **41**, Article 102910. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102910>
- [4] Ding, Y., Ji, H., Wei, M. and Liu, R. (2022) Effect of Liquid Cooling System Structure on Lithium-Ion Battery Pack Temperature Fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **183**, Article 122178. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122178>
- [5] 沈华平, 竺玉强, 杨梓堃, 等. 锂离子电池模组液冷散热设计[J]. 电源技术, 2022, 46(3): 271-275.
- [6] Hallaj, S.A. and Selman, J.R. (2000) A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material. *Journal of The Electrochemical Society*, **147**, Article 3231. <https://doi.org/10.1149/1.1393888>
- [7] Liu, J., Fan, Y. and Xie, Q. (2022) An Experimental Study on the Thermal Performance of Mixed Phase Change Materials-Based Battery Cooling System. *Journal of Energy Storage*, **46**, Article 103839. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103839>
- [8] Parameshwaran, R., Deepak, K., Saravanan, R. and Kalaiselvam, S. (2014) Preparation, Thermal and Rheological Properties of Hybrid Nanocomposite Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, **115**, 320-330. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.029>
- [9] 王海涛, 李建, 李皖皖. 基于 PA/OBC/EG 复合相变材料的锂离子电池热管理研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(11): 141-146+152.
- [10] Xie, Y., Li, H., Li, W., Zhang, Y., Fowler, M., Tran, M.K., *et al.* (2022) Improving Thermal Performance of Battery at High Current Rate by Using Embedded Heat Pipe System. *Journal of Energy Storage*, **46**, Article 103809. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103809>
- [11] Singh, R. and Nguyen, T. (2021) Loop Heat Pipes for Thermal Management of Electric Vehicles. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, **14**, Article 061010. <https://doi.org/10.1115/1.4052348>
- [12] Zhou, Z., Lv, Y., Qu, J., Sun, Q. and Grachev, D. (2021) Performance Evaluation of Hybrid Oscillating Heat Pipe with Carbon Nanotube Nanofluids for Electric Vehicle Battery Cooling. *Applied Thermal Engineering*, **196**, Article 117300. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117300>