

储热储冷多场景应用专刊



基于高浓度相变微胶囊悬浮液的全气候电池热管理实验研究

文 健, 夏志豪, 安英贤, 温 涵, 柯枋泷, 胡章茂, 王 唯, 吕又付
(长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为确保电动汽车锂电池在 $-30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 的宽温域安全稳定运行, 需依赖高效的热管理系统进行精准温控, 以应对低温导致的容量衰减与高温引发的热失控风险。相变微胶囊悬浮液(MPCMS)是一种新兴的电池热管理工质, 近年来的研究主要集中在其低浓度范围。本研究提出了一种基于高质量浓度(5%~30%)MPCMS的全气候电池热管理系统, 并通过电加热棒模拟电池热负荷, 系统研究了其在低温储热保温、常温储冷吸热及高温散热冷却三种典型工况下的热管理性能。研究表明, 在 -30°C 低温条件下, 与无MPCMS的热管理情况下, 质量分数为5%、15%和30% MPCMS与保温层协同可使保温时间分别延长12.4%、24.9%和34.1%; 当环境温度处于常温(低于微胶囊相变点, 23°C)时, MPCMS可以有效地吸收电池放电产生的热量, 在1 C、2 C和3 C放电发热工况下较无MPCMS系统最大降温达 2.6°C 、 4.7°C 和 5.2°C , 同时质量分数为15% MPCMS在潜热吸收与对流换热能力中取得了最优平衡; 在 40°C 的高温环境中, 即使加热棒在质量分数为30% MPCMS中模拟3 C放电热负荷工况下, 通过控制冷却水入口温度与环境温度的温差为 10°C , 也可将系统温度稳定在 40°C 以下。

关键词: 电池热管理; 全气候温度; 相变微胶囊悬浮液; 保温; 传热

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1000

中图分类号: TB 61

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-828-10

Experimental study on thermal management of all-weather batteries based on high-concentration phase change microcapsule suspension

WEN Jian, XIA Zhihao, AN Yingxian, WEN Han, KE Fanglong, HU Zhangmao, WANG Wei,
LYU Youfu

(College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha
410000, Hunan, China)

Abstract: Ensuring the safe and stable operation of lithium-ion batteries in electric vehicles across a wide temperature range of -30°C to 40°C requires highly efficient battery thermal management systems (BTMS) capable of precise temperature regulation. Such systems mitigate capacity degradation at low temperatures and reduce the risk of thermal runaway at high temperatures. Microencapsulated phase change material slurry (MPCMS) has emerged as a promising working fluid for BTMS applications. While prior studies have primarily focused on low-concentration MPCMS, this study investigates a comprehensive all-climate BTMS

收稿日期: 2025-11-04; 修改稿日期: 2025-12-02。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52306069), 湖南省教育厅科学研究项目重点项目 (23A0263)。

第一作者: 文健 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电池热管理, E-mail: wenjian_0427@163.com; 通信作者: 胡章茂, 副教授, 研究方向为相变储能技术与电池热管理, E-mail: huzhangmao@163.com。

引用本文: 文健, 夏志豪, 安英贤, 等. 基于高浓度相变微胶囊悬浮液的全气候电池热管理实验研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 828-837.

Citation: WEN Jian, XIA Zhihao, AN Yingxian, et al. Experimental study on thermal management of all-weather batteries based on high-concentration phase change microcapsule suspension[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 828-837.

employing MPCMS at high mass fractions (5%—30%). The thermal management performance of the system was systematically evaluated under three representative operating scenarios: thermal insulation and storage at low temperatures, cold storage and heat absorption at moderate temperatures, and heat dissipation and cooling at high temperatures. Electrically heated rods were used to simulate battery thermal loads. Experimental results indicate that, under low-temperature conditions (-30°C), the inclusion of 5%, 15%, and 30% MPCMS, in synergy with an insulation layer, extended thermal preservation time by 12.4%, 24.9%, and 34.1%, respectively, compared to a system without MPCMS. At moderate ambient temperature (23°C , below the phase-change point of the microcapsules), MPCMS effectively absorbs heat generated during battery discharge. Under 1 C, 2 C, and 3 C discharge rates, the maximum temperature reductions achieved were 2.6°C , 4.7°C , and 5.2°C , respectively, relative to the system without MPCMS. Notably, the 15% MPCMS formulation exhibited an optimal balance between latent heat absorption capacity and convective heat transfer performance. Under high-temperature conditions (40°C), even when the heating rod simulated a 3 C discharge thermal load, the system with 30% MPCMS maintained the battery temperature below 40°C by sustaining a 10°C temperature difference between the cooling water inlet and the ambient environment. These findings highlight the significant potential of high-concentration MPCMS as an effective thermal management medium for lithium-ion batteries, enabling reliable thermal regulation across diverse and challenging climatic conditions.

Keywords: battery thermal management; all-weather temperature; phase-change microcapsule suspension; heat preservation; heat transfer

近年来, 锂离子电池(LIBs), 凭借其循环寿命长、能量密度高、无记忆效应和成本相对较低等优势, 已成为纯电动汽车(EVs)和混合动力汽车(HEVs)的主要动力来源^[1-2]。然而, 其广泛应用受到严苛温度要求的限制, 如低温环境会严重损害锂电池性能, 表现为容量衰减、内阻增大和循环寿命缩短, 极端情况下甚至导致车辆无法正常启动, 高温环境下会因为充放电过程中的热量积累导致热失控、性能衰退, 甚至引发安全隐患^[3-6]。因此, 动力电池必须配备电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS), 使其能有效地应对低温环境和高温环境^[7-9]。

目前电池热管理技术的研究一般针对电池高温散热、低温预热保温等单项技术需求而开展。如高温散热方面 Zhang 等^[10]通过对双曲石墨烯相变复合材料(PGC)在 12.5% 填料负载下实现 $30.75\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 高导热率和 90% 潜热保留, 显著提升电池热管理效能, 使 3.75 C 倍率下电池组温度稳定低于 60°C 。Nazar 等^[11]证明使用相变材料被动冷却是提高电池组寿命

和安全性的有效方法, 其能将电池与环境的温差显著降低至约 3.5°C , 效果优于主动风冷的 6°C 温差和无热管理的 10°C 温差。对于预热保温方面, Qin 等^[12]提出了一种将脉冲加热与外部液体循环相结合的新型联合加热方法, 能够在 300 s 内将锂离子电池模块从 -20°C 加热至 6°C , 并将模块内部温差控制在 1°C 以内, 其温度一致性比单纯使用脉冲加热提升了 11 倍。Xu 等^[13]通过借助相变材料与气凝胶的复合结构来减少低温环境下的热量并保持工作温度, 结果表明在系统运行期间电池温度可维持在 $20\sim 28^{\circ}\text{C}$, 同时最大温差小于 2.6°C 。

近年来, 研究者们发现微胶囊相变悬浮液(microencapsulated phase change material suspension, MPCMS)具有很强的载热能力, 是一种非常具有潜力的电池热管理工质^[14-16]。John 等^[17]测试了石蜡芯材微胶囊与乙醇溶液制备的相变微胶囊悬浮液热力学性能, 实验表明质量浓度为 1% 时其热性能优于所有的去离子水对照组, 同时 2% 浓度的悬浮液能改善不同结构微通道中的传热特性, 直线

形、波浪形和锯齿形微通道壁面温度因停留时间短而提高了2.8%~12%。董彬等^[18]的研究表明,质量分数为10%的MPCMS比纯水作为实验介质时,不同工况下MPCMS比相同温度下的纯水更能促进换热,同时相变微胶囊存在的过冷特性对潜热释放具有很大的影响,因此需要为其提供适当的工作温度区间。Zhang等^[19]通过实验发现质量分数为5%的MPCMS在喷雾冷却中相比纯水可实现高达33.9%的传热提升,其性能受浓度、喷雾高度和流态显著影响,存在悬浮液浓度最优工况,超过该浓度后其黏度增大反而可能引起传热性能劣化。Yao等^[20]对比不同分散剂对悬浮液稳定性的影响,证明十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和聚乙烯醇(PVA)的联合使用能显著提升悬浮稳定性,同时质量分数为3%的MPCMS在硅晶圆切割实验中展现出最佳的温度梯度控制能力。综合来看,相变微胶囊悬浮液具有储冷、储热能力,但是关于相变微胶囊悬浮液电池热管理系统的研究主要集中在低浓度体系(0.1%~5%),其储热储冷能力较弱,对高浓度体系的研究较少。

总的来说,目前电池热管理研究多聚焦于单一功能,如高温散热或低温预热,缺乏对“低温储热保温-常温被动冷却-高温主动散热”一体化全气候策略的系统研究。本研究系统提出了一种基于高质量浓度MPCMS(5%~30%)的全气候电池热管理系统,以解决电动汽车锂电池在-30~40℃宽温域下安全稳定运行的热管理难题。

1 材料与方 法

1.1 材料

本研究所用相变微胶囊(MPCM)由石蜡芯材(熔点23℃)与密胺树脂壁材构成,粒径5~20 μm,购自上海昕亚新材料科技有限公司,实测相变潜热为104.9 J/g,经50次循环后储热衰减率低于7%;分散剂为十二烷基硫酸钠(SDS),购自上海阿拉丁生化科技有限公司。基液为自制的去离子水。

1.2 MPCMS制备

MPCMS的制备过程如图1所示:将定量MPCM与SDS加入去离子水中,磁力搅拌30 min后,超声震荡60 min,即得均匀分散的MPCMS悬浮液。

1.3 MPCMS表征与性能测试

采用导热系数测试仪(西安夏溪电子,TC3000)和黏度计(力辰科技,LC-NDJ-1T)测定MPCM和不同质量浓度MPCMS(5%~30%)在15℃、23℃和

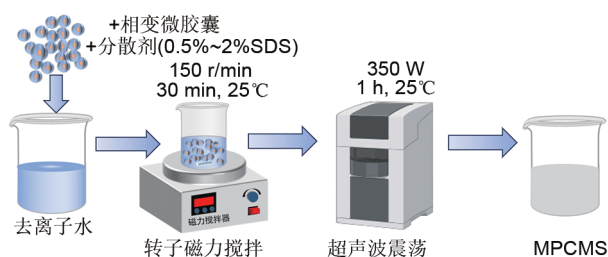


图1 相变微胶囊悬浮液制备流程

Fig. 1 Preparation process of microencapsulated phase change material suspension

30℃的导热系数与黏度。采用pH计(力辰科技,PH-100A)测量了30℃时MPCMS的pH值。测量结果如图2所示,导热系数随质量浓度增加而降低,

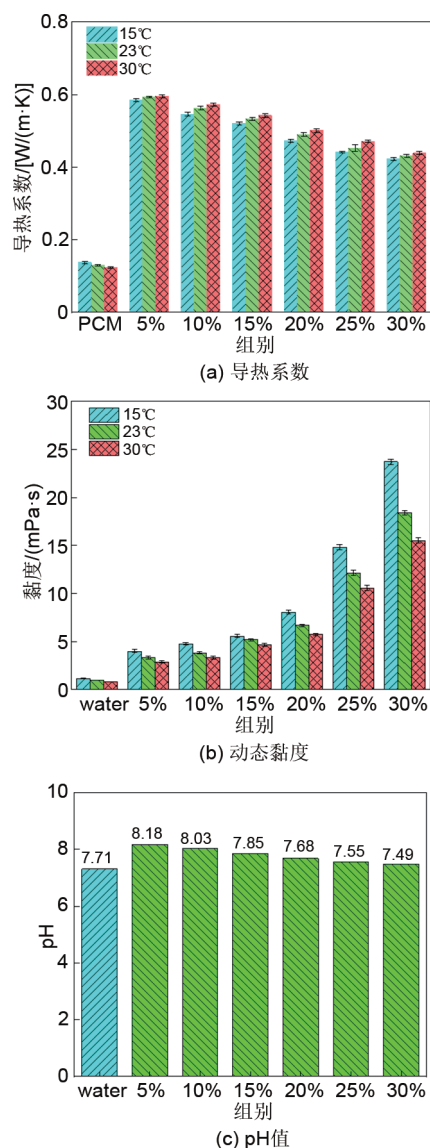


图2 不同质量浓度的MPCMS物性

Fig. 2 Diagram of thermal conductivity and dynamic viscosity for different materials

当微胶囊浓度从5%增至30%时, 15℃下导热系数由0.584 W/(m·K)降至0.422 W/(m·K), 降幅达27.0%; 温度升高会增加其导热系数, 但影响幅度远低于浓度变化。当MPCMS浓度从5%增至20%时, 其最大黏度均小于10 mPa·s, 但质量浓度超过20%时, 黏度会急剧增大。相关研究表明^[21], 当MPCMS质量分数超过20%或超过一定的剪切速率时, 应将此浓度的悬浮液视作为牛顿流体, 测量结果也证实了这一观点。MPCMS的pH值处于7.49~8.32, 为中性微碱性流体, 具备良好的系统兼容性。

采用观测法测试了制备的MPCMS悬浮稳定性。将不同质量浓度的悬浮液在室温下静置8 h, 然后对比不同时间段状态, 结果如图3所示, 所有样品在静置8 h后无明显分层或沉淀, 具备良好的分散稳定性。

2 实验系统与方法

2.1 实验系统与装置

实验系统如图4所示, 主要由热负荷模拟模块、温控模块及数据采集模块构成。实验模组整体放置于恒温箱(东莞瑞凯, R-TH-100LKF)内, 以确保环境温度的一致性与可控性。每次实验前, 模组均在恒温箱内静置30 min, 确保系统达到热力学平衡状态。采用四根18650规格定制加热棒(一言电热, 24 V, 20 W)作为热负荷源, 通过可编程直流电源(东莞鼎策, MP3030D)精确调控输入电压, 模拟锂电池1~3 C放电倍率下的产热行为。恒温循环水箱(北京长流, HX-105)提供稳定的冷却水入口温度, 冷却水通过模组内部冷却盘管实现主动散热。

图4右部展示了实验模型结构图及内部测温点

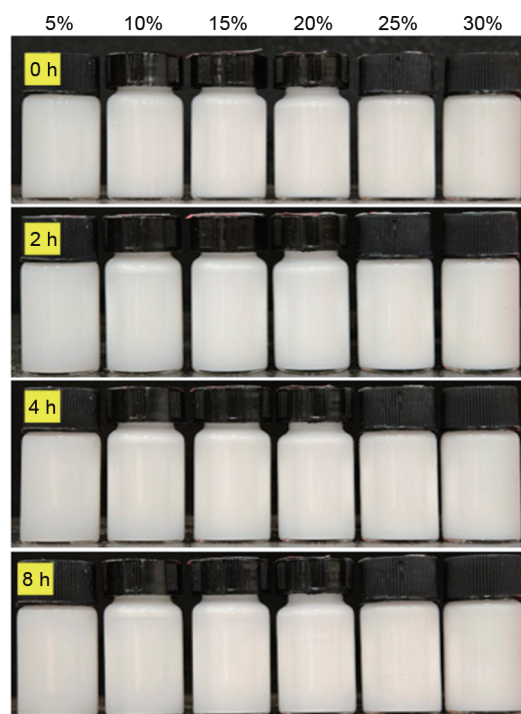


图3 MPCMS悬浮稳定性情况

Fig. 3 The suspension stability of MPCMS

$T_1 \sim T_4$ 的具体位置, 温度监测系统采用数据记录仪(TASi TA612C)实时采集布置于容器内部与加热棒内部的K型铠装热电偶数据。MPCMS浸没全部加热棒及冷却盘管一半高度, 结合恒温箱与冷却盘管, 实现低温蓄热保温(0℃、-15℃与-30℃)、常温被动散热(15℃)以及高温主动散热冷却(40℃)三种功能模式。参照文献[22]与实验工况, 纳米气凝胶隔热层厚度统一设置为10 mm, 兼顾隔热性能与空间占用率。

2.2 加热棒功率控制

为确保实验安全性及经济性, 本研究采用定制加热棒模拟18650锂电池的产热行为。定制加热棒

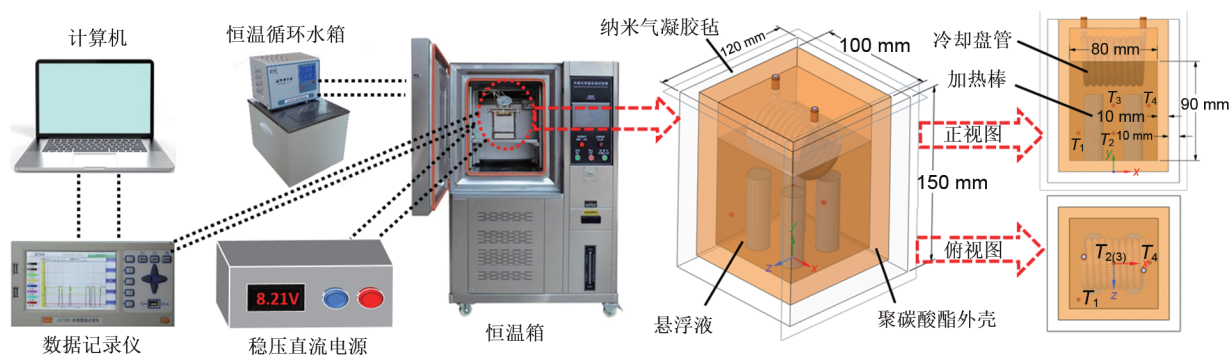


图4 实验系统布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental system layout

几何尺寸与真实电池保持一致,但其内阻为 $28.8\ \Omega$,而常规18650锂电池内阻约为 $0.03\ \Omega$,本研究通过精确控制加热棒的加载电压与加热时间来模拟电池在不同放电倍率下的热负荷。锂电池发热机制复杂,涉及欧姆热、极化热与化学反应热等多种因素。参考Bernardi等^[23]提出的经典锂电池生热模型,本研究进行简化处理,主要考虑欧姆热与极化热两类主要热源,确保实验的可控性与可重复性。

锂电池生热速率模型,如式(1)所示。

$$q = \frac{1}{v_b} \left[i_b^2 r_j + i_b T \frac{\partial U}{\partial T} \right] \quad (1)$$

式中, v_b 、 i_b 、 r_j 、 T 和 $\frac{\partial U}{\partial T}$ 分别是锂电池体积(m^3)、放电电流(A)、电池内阻(Ω)、电池温度(K)和开路电压温度系数,其中开路电压温度系数 $\frac{\partial U}{\partial T}$ 取值 $0.000507^{[24]}$ 。

加热棒和电池功率相等,则:

$$P = i_b^2 r_j + i_b T \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{U_t^2}{R_t} \quad (2)$$

式中, U_t 和 R_t 分别是加热棒电压(V)和加热棒阻值(Ω),将式(1)代入式(2)可得出加热棒的加载电压:

$$U_t = \sqrt{R_t \left(i_b^2 r_j + i_b T \frac{\partial U}{\partial T} \right)} \quad (3)$$

基于上述公式,通过调节直流电源输出电压,即可模拟不同放电倍率下的热负荷。

2.3 实验方法

研究表明,锂电池的最佳工作温度应维持在 $15\sim 40^\circ\text{C}$,且电池组内部温差需控制在 5°C 以下^[25]。为全面评估高质量浓度MPCMS在不同气候条件下的热管理性能,本工作从以下三类典型工况开展实验研究。

(1) 低温条件下的保温性能实验:首先,将实验装置置于 40°C 的恒温恒湿箱中30 min,使整个系统的初始温度为 40°C ;然后将其置于低温恒温恒湿箱中(0°C 、 -15°C 和 -30°C 三种低温环境^[26]),不开启加热电源,任其自然冷却,数据记录仪记录其自然冷却至 15°C 所需时间,并与纯水系统进行对比,评估MPCMS的蓄热保温能力。

(2) 常温下的被动温度控制实验:首先用恒温箱维持 15°C (略低于微胶囊相变点)的环境温度,将实验模组容器置于其中30 min使MPCMS和加热棒都处于 15°C ;然后通过调节直流电源输出电压,

分别模拟1 C、2 C与3 C放电倍率下的热负荷,记录加热棒温度从 15°C 升至 40°C 的变化过程,并与纯水系统对比,评估MPCMS的被动吸热与温控性能。

(3) 高温下的主动散热实验:首先,将实验装置置于 40°C 的恒温恒湿箱中30 min,使整个系统的初始温度为 40°C ;然后通过直流电源使加热棒以3 C放电倍率持续发热,同时,利用恒温水箱向系统内的冷却盘管通入不同温度($25\sim 35^\circ\text{C}$)的冷却水以实现主动散热,数据记录仪监测温度变化,评估MPCMS在高温环境下的散热能力与温度均匀性。

3 实验结果与分析

3.1 低温环境系统的预热保温

为系统评估MPCMS在低温环境下的储热性能,本研究分别在初始温度 $T_0=0^\circ\text{C}$ 、 -15°C 、 -30°C 三种环境温度下,对比了质量浓度为15%的MPCMS与纯水在自然散热条件下的冷却过程。实验设定加热棒与悬浮液初始温度为 40°C ,记录其冷却至 15°C 所需时间,结果如图5所示。实验结果表明,MPCMS在所有测试环境温度下均展现出显著的蓄热保温优势。当环境温度为 0°C 时,MPCMS体系温度从 40°C 降至 15°C 耗时17730 s,较纯水体系的16500 s延长6.9%;在更低的 -15°C 和 -30°C 环境中,保温时间分别延长2280 s和2460 s,提升幅度分别达18.2%和24.9%。环境温度越低,保温时长的提升幅度越大。该现象主要归因于两方面机制:一方面,当悬浮液温度降至芯材冷凝相变区间时(约 23°C),微胶囊发生液-固相变同时释放大量潜热,有效补偿系统向环境的热损失;另一方面,MPCMS较高的黏度与较低的导热系数协同抑制了流体内部的对流与导热换热,进一步延缓了系统降温速率。

图6展示了 -15°C 环境下质量分数15% MPCMS系统内部相邻测温点的温差变化。从图中可以看到在 $22\sim 23^\circ\text{C}$ 温度区间内,水平与竖直方向温差急剧减小,这表明相变过程不仅提升了热稳定性,还显著改善了系统内部温度均匀性。另外,从图中还可以看到,系统上部水平温差(T_4-T_3)远小于系统底部温差(T_2-T_1)和垂直温差(T_3-T_2),这表明MPCMS在系统顶部的水平流动要比底部和垂直流

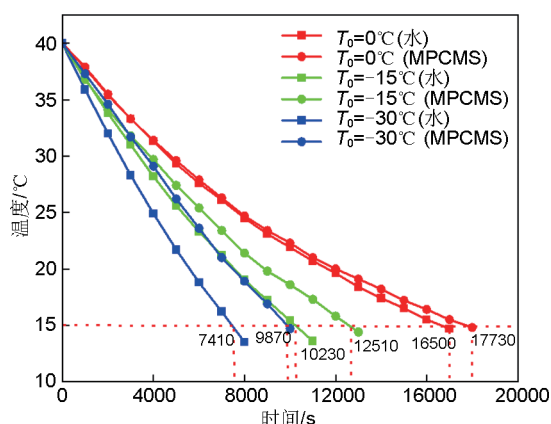


图5 不同环境温度下加热棒温度随时间变化曲线

Fig. 5 The temperature variation curve of the heating rod under different base liquids over time

动更强烈。

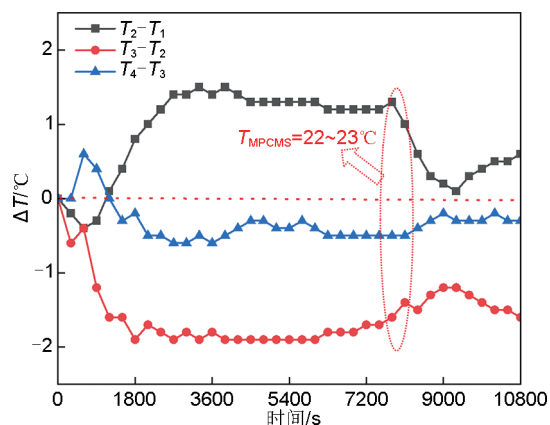


图6 -15℃环境温度下质量分数15%悬浮液相邻测温点温差

Fig. 6 Temperature difference between adjacent measurement points of the 15% mass fraction suspension at an environmental temperature of -15℃

图7显示了在-30℃的环境温度下,加热棒发热功率为0且基液初始温度为40℃,加热棒在不同质量浓度的MPCMS与纯水在自然散热的温度变化曲线。从图中可以看出,不同质量浓度的MPCMS均展现出优于纯水的保温性能。随着MPCMS质量浓度从5%增至30%,其蓄热保温时长较纯水系统分别延长了1050 s、2460 s和3840 s,提升幅度分别为12.4%、24.9%和34.1%。然而,从15%到30%浓度,保温性能并未线性增强,结合前文黏度测试结果可知,当浓度超过20%时,悬浮液趋于牛顿流体行为,黏度急剧上升,导热性能下降,导致蓄热性能提升趋缓。因此,在实际应用中,需综

合考虑浓度、黏度与导热性能之间的耦合关系,优选15% MPCMS作为性能与稳定性之间的平衡点。

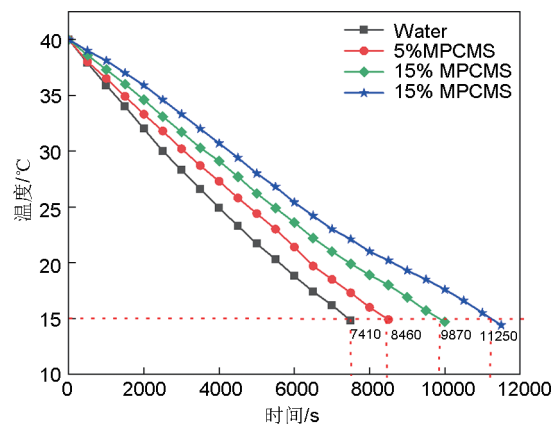


图7 -30℃环境不同质量浓度悬浮液下加热棒温度随时间变化曲线

Fig. 7 The temperature variation curve of the heating rod over time under different mass concentrations of the suspension at -30℃

3.2 常温环境下系统的被动控温

为评估MPCMS在常温条件下的被动热管理能力,本研究在15℃环境下(略低于相变温度),分别模拟1 C、2 C与3 C放电热负荷,记录加热棒温度从15℃升至40℃的变化过程,并与纯水系统对比。图8给出了15% MPCMS的实验结果,可以看到在1 C低负荷下,MPCMS因未达相变温度且导热系数较低,其温升反而略高于纯水系统;而在2 C与3 C条件下,MPCMS在相变温区出现明显平台期,最高温度分别较纯水降低1.9℃与4.7℃,表现出良好的被动吸热能力,而且热负荷越大,被动吸热效果越好。这种现象可能是因为MPCMS黏度较高、导热系数较低,当热负荷较小时,系统内的温差较小,难以驱动MPCMS出现较强的自然对流,使得热量较难在系统内传递。

在高热负荷情况下,MPCMS表现出了良好的被动吸热能力。图9给出了不同质量浓度MPCMS在3 C放电热负荷下的加热棒温度变化曲线。如图9所示,在3 C高负荷发热条件下,所有浓度MPCMS均显著延缓了加热棒温升,并在22~23℃附近出现明显温度平台,表明微胶囊发生固-液相变,吸收大量潜热。随着MPCMS浓度从5%提升至30%,同一时间下最大温降分别达到2.6℃、

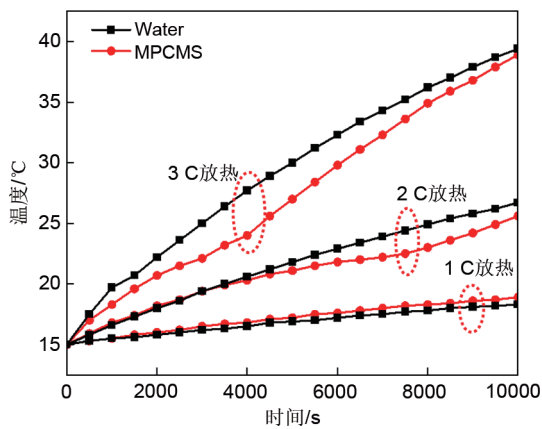


图8 不同等效放电倍率热负荷下加热棒温度随时间变化
Fig. 8 Temperature changes of the heating rod over time under different equivalent discharge rates of heat generation

4.7℃与5.2℃。然而,在加热后期,30% MPCMS 出现温升加速现象,甚至在6000 s与9000 s时温度先后超过15%与5%系统,原因在于高浓度体系黏度激增,抑制了对流换热,同时导热系数下降导致热量积聚于加热棒表面,形成局部热阻。综合来看,质量分数15% MPCMS表现出了最好的综合性能。图10展示了15% MPCMS系统在3 C条件下的内部温差变化。如图10所示,整个温差的变化以MPCMS的相变温度分为两个阶段,当温度低于MPCMS的相变温度时,系统内的温度非常均匀,温差<0.4℃;当温度升至相变温度之上后,温差迅速增大,特别是底部水平温差(T_2-T_1)最大达到了2.8℃。这是因为当相变胶囊的相变潜热耗尽,MPCMS不仅起不到吸收热量控制温度的作用,还因其高黏度、低导热系数阻碍热量的扩散。

3.3 高温下系统的主动散热

在高温环境以及高放电倍率热负荷工况下,单一依赖MPCMS的被动散热已无法满足温控需求,系统温度最终将突破40℃的适宜工作温度上限,此时需要主动冷却系统来将热量带出系统,实现温度控制。

图11展示了在初始温度均为40℃、加热棒以3 C等效功率持续发热的条件下,不同浓度MPCMS在不同冷却水入口温度(T_w)下的散热效果。实验结果表明,MPCMS浓度越高,同等冷却水入口温度下的冷却效能越差。具体而言,30%与15%体系需将冷却水温度降至30℃方可将加热棒温度控制在40℃以下,而5%体系在35℃冷却水条

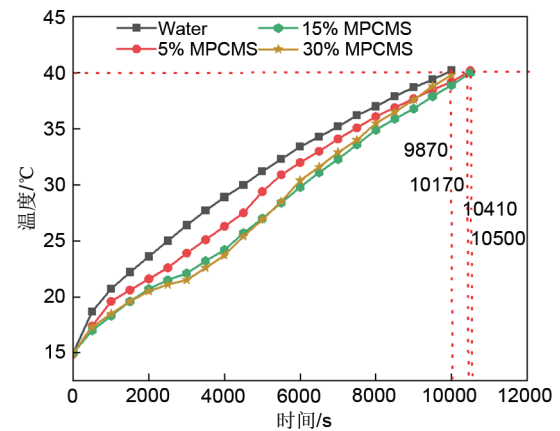


图9 不同质量浓度MPCMS下3 C等效发热加热棒温度随时间变化曲线

Fig. 9 The temperature variation curves of 3 C equivalent heating rods under different MPCMS quality concentrations over time

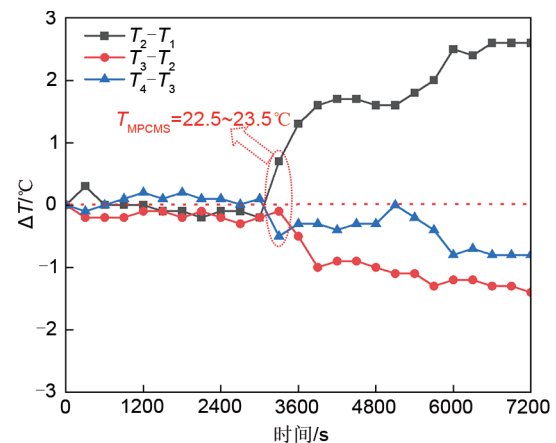


图10 15%质量分数下MPCMS流体内部温差
Fig. 10 The internal temperature difference of the MPCMS fluid at a 15% mass fraction

件下即可满足温控要求,显示出更优的散热适应性。

图12展示了不同浓度MPCMS系统在不同冷却水入口温度下加热棒间的最大温差变化。由图可见,当冷却水入口温度 T_w 为25℃、30℃、35℃时,30% MPCMS系统的最大温差分别为1.8℃、1℃和0.7℃,而5% MPCMS系统的最大温差仅为0.7℃、0.6℃和0.4℃。这表明,在主动冷却模式下,加热棒之间的温差与冷却水温度和MPCMS的浓度都有关:冷却水入口温度越低和MPCMS浓度越高,加热棒之间的温差越大。为深入分析该现象,图13给出了40℃环境温度下、冷却水温度为30℃时,30% MPCMS系统内部的温度分布特征。与图10(常温被动散热)、图6(低温保温)相比,主

动冷却模式下 MPCMS 的温度分布呈现出显著不同的流动结构: ① $T_3 > T_2$, 这说明系统中心位置出现了明显的上升流, 热量在中心聚集; ② $T_4 < T_3$, 这说明上部的流体从中心流向四周, 并在冷却盘管作用下被有效冷却; ③ $T_2 < T_1$, 这表明下部存在大量低温流体向中心区域流动, 形成自然对流循环。综上所述, 在主动冷却模式下, 系统内部形成了“上冷下热”的温度梯度, 驱动自然对流增强; 冷却水温度越低, 对流强度越大, 导致多股低温 MPCMS 对个别加热棒产生局部过冷现象, 从而增大了加热棒之间的温差。因此, 在保证散热效率的同时, 需兼顾系统温度一致性与能耗控制。综合考虑储热能力、散热能力、系统功耗与温度均匀性, 建议将冷却水与环境温差控制在 10°C 左右, 以实现散热效率与温度一致性的最佳平衡。

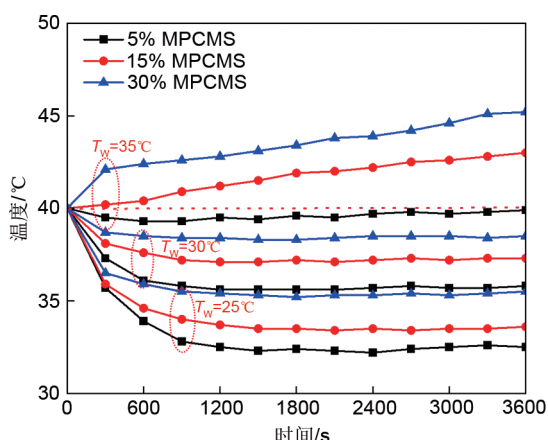


图 11 40°C 环境温度不同质量浓度 MPCMS 的冷却水温度影响

Fig. 11 Effect of cooling water temperature on MPCMS with different mass concentration at 40°C

4 结论

本研究围绕高质量浓度相变微胶囊悬浮液 (MPCMS) 在全气候电池热管理中的应用展开, 系统构建了兼顾低温蓄热保温、常温被动控温与高温主动散热的一体化电池热管理方案。通过实验手段揭示了浓度-热物性-热性能之间的耦合机制, 主要结论如下。

(1) 高浓度 MPCMS 热物性呈现非线性耦合变化, 随着质量浓度由 5% 提升至 30%, 导热系数下降 27.0%, 黏度在质量浓度超过 20% 后急剧上升, 导致传热性能显著劣化。该“热阻-流动”双重抑

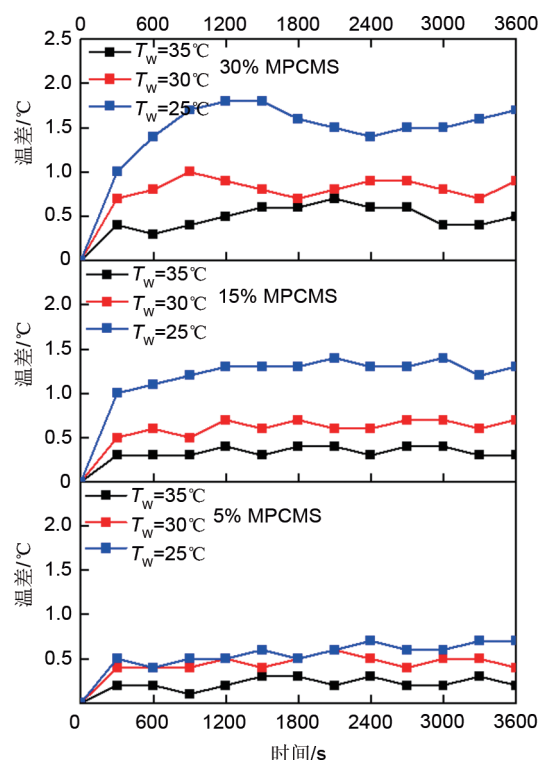


图 12 不同质量分数 MPCMS 在主动散热过程中加热棒的温差变化

Fig. 12 The temperature difference changes of the internal heating rod during active heat dissipation with different quality fractions of MPCMS

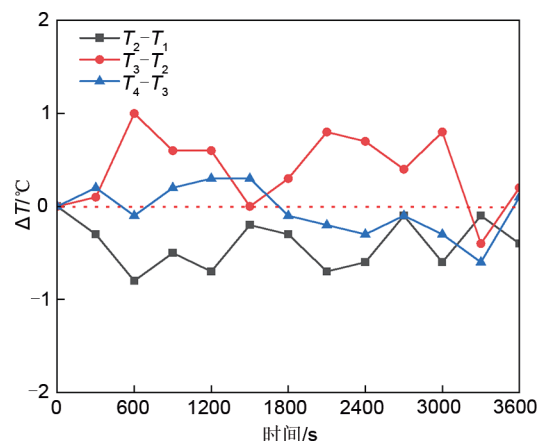


图 13 40°C 环境温度和 30°C 冷却水温度下 30% 质量分数 MPCMS 温度差异

Fig. 13 Temperature difference of 30% mass fraction MPCMS under 40°C ambient temperature and 30°C cooling water temperature

制效应是限制高浓度体系散热能力的关键机制。

(2) 高浓度 MPCMS 体系表现出了良好的低温保温性能。在极端低温环境下, 通过保温层与 MPCMS 的协同作用, 可显著提升实验模组的热稳

定性。如在 -30°C 环境温度下5%、15%和30%浓度的MPCMS系统相较纯水分别可延长12.4%、24.9%、34.1%的蓄热保温时间,使加热棒温度更持久地维持在最佳工作温度区间。

(3)在常温条件下,利用高浓度MPCMS的储冷能力可以实现被动冷却。在 3°C 高负荷放电条件下,15% MPCMS相较纯水系统最大温降达 4.7°C ,且温差控制在 2.8°C 以内;而30%质量浓度体系因黏度激增导致热量积聚,后期温升反超低浓度系统。结果表明,15%为综合性能最优浓度,兼顾潜热吸收与对流换热能力。

(4)在 40°C 的高温条件下,15%与30%质量浓度体系需将冷却水温度降至 30°C (与环境温差为 10°C)方可实现温控目标;而5%浓度体系在 35°C 冷却水条件下即可满足要求。冷却水温度越低,自然对流越强,加热棒间温差越大。综合考虑储热能力、散热效率、系统功耗与温度一致性,建议冷却水与环境温差控制在 10°C 左右。

参考文献

- [1] GHAREHGHANI A, RABIEI M, MEHRANFAR S, et al. Progress in battery thermal management systems technologies for electric vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 202: 114654. DOI:10.1016/j.rser.2024.114654.
- [2] LI H, XIAO X Y, WANG Y N, et al. Performance investigation of a battery thermal management system with microencapsulated phase change material suspension[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 180: 115795. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.115795.
- [3] MA J, SUN Y F, ZHANG S A. Experimental investigation on energy consumption of power battery integrated thermal management system[J]. *Energy*, 2023, 270: 126860. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126860.
- [4] LI Z C, ZHANG Y A, MENG F T, et al. Flexible phase change materials for low temperature thermal management in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 74: 109413. DOI: 10.1016/j.est.2023.109413.
- [5] ZHOU X, M ABED A, CHATURVEDI R, et al. A novel thermal management system for a cylindrical battery based on tubular thermoelectric generator[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 59: 104585. DOI:10.1016/j.csite.2024.104585.
- [6] LI R, GAN Y H, LIANG J L, et al. Experimental study on the thermal management performance of battery with ultra-thin vapor chamber under liquid cooling condition[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 240: 126660. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126660.
- [7] WU H F, ZHANG X J, WANG C, et al. Experimental study on aerogel passive thermal control method for cylindrical lithium-ion batteries at low temperature[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 169: 114946. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.114946.
- [8] 刘松燕, 王卫良, 彭世亮, 等. 兼顾高/低温环境性能的动力电池热管理系统设计[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(7): 2181-2191. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0369.
- LIU S Y, WANG W L, PENG S L, et al. Thermal management system for power battery in high/low-temperature environments [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(7): 2181-2191. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0369.
- [9] LUO M Y, LIN X M, LING Z Y, et al. An electric conductive wide-temperature flexible phase change material for all-climate battery thermal management[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 256: 124051. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.124051.
- [10] ZHANG C Q, MAO Y, LI K W, et al. High power and energy density graphene phase change composite materials for efficient thermal management of Li-ion batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2025, 75: 104003. DOI:10.1016/j.ensm.2025.104003.
- [11] NAZAR M W, IQBAL N, ALI M, et al. Thermal management of Li-ion battery by using active and passive cooling method[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 61: 106800. DOI:10.1016/j.est.2023.106800.
- [12] QIN Y D, XU Z C, XIAO S R, et al. Temperature consistency-oriented rapid heating strategy combining pulsed operation and external thermal management for lithium-ion batteries[J]. *Applied Energy*, 2023, 335: 120659. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.120659.
- [13] XU B, XIA F, WANG Y L, et al. A battery thermal management scheme suited for cold regions based on PCM and aerogel: Demonstration of performance and availability[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 227: 120378. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120378.
- [14] LI M H, YI H, JIA F F, et al. Paraffin@Hectorite/water phase change fluid with sustainable suspension stability and efficient heat dissipation[J]. *Applied Clay Science*, 2024, 250: 107278. DOI:10.1016/j.clay.2024.107278.
- [15] 卜令帅, 屈治国, 徐洪涛, 等. 相变微胶囊悬浮液储能系统放冷特性实验研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(8): 4064-4072. DOI:10.11949/0438-1157.20201693.
- BU L S, QU Z G, XU H T, et al. Experimental study of cooling discharging characteristics of the energy storage system filled with MPCM slurry[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(8): 4064-4072. DOI:10.11949/0438-1157.20201693.
- [16] CHEN R, GE X, ZHONG Y, et al. Experimental study of phase change microcapsule-based liquid cooling for battery thermal management[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 146: 106912. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106912.
- [17] JOHN PETER R, BALASUBRAMANIAN K R, RAVI KUMAR K. Comparative study on the thermal performance of microencapsulated phase change material slurry in tortuous geometry microchannel heat sink[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119328. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.119328.

- [18] 董彬, 薛永浩, 梁坤峰, 等. 相变微胶囊悬浮液喷淋换热特性实验研究[J]. 化工学报, 2022, 73(7): 2971-2981. DOI: 10.11949/0438-1157.20220192.
- DONG B, XUE Y H, LIANG K F, et al. Experimental study on spray heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material suspension[J]. CIESC Journal, 2022, 73(7): 2971-2981. DOI:10.11949/0438-1157.20220192.
- [19] ZHANG J J, ZHU D L, LIU Y, et al. Experimental investigation of spray cooling heat transfer with microcapsule phase change suspension[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 229: 125720. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125720.
- [20] YAO C Y, YU X, FENG L, et al. Development of microencapsulated phase change material slurry for diamond wire sawing silicon wafer and its effect on cutting quality[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 127: 421-432. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.07.132.
- [21] DUTKOWSKI K, FIUK J J. Experimental research of viscosity of microencapsulated PCM slurry at the phase change temperature [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 1209-1217. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.036.
- [22] HU Z M, PENG Y Z, LV Y F, et al. Battery thermal management under all-climate conditions based on phase change materials and heat pipes: A numerical simulation study[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 268: 125913. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125913.
- [23] 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.
- [24] 薛超坦. 基于液冷的纯电动汽车锂电池热管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- XUE C T. Research on lithium-ion battery thermal management for electric vehicles based on liquid cooling[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [25] JIANG Y, LIN X W, XIAO C F, et al. Advanced battery thermal management: Synergistic integration of heat pipes and two-phase immersion cooling for lithium-ion batteries[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 252: 127479. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127479.
- [26] LIN W, ZHU M Y, FAN Y, et al. Low temperature lithium-ion batteries electrolytes: Rational design, advancements, and future perspectives[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 905: 164163. DOI:10.1016/j.jallcom.2022.164163.