

锂电储能全氟聚醚相变浸没热管理系统研究

李建刚^{1,2}, 饶小宇^{1,2}, 盛世涛^{1,2}, 董缙^{1,2}, 马青山^{1,2}, 曹文灵^{1,2}

(1. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省储能系统与运行控制技术创新中心, 兰州 730070)

摘要: 针对高能量密度锂电储能系统面临的热失控及热均衡问题, 本文提出一种基于相变材料全氟聚醚与浸没式冷却技术结合的复合热管理系统。系统利用浸没冷却与主动循环回路相结合, 构建包含冷凝器、循环泵、电池箱、及传感器网络的实验平台, 分析电池在不同放电工况下的产热行为, 并实时监测温度、产热功率等关键参数。通过实验验证系统在 1C、4C 放电倍率下的散热能力与温度均衡性的控制效果。结果表明, 该复合系统能够将电池模组的最高温度控制在 45℃ 以内, 同时将模组内部温升保持在 7℃ 以内。本研究成果为提升锂电储能系统的热安全性与能量效率提供一种新的热管理方案, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 锂电储能; 相变; 电池热管理; 多工况放电; 浸没冷却

Research on Perfluoropolyether Phase Change Immersion Thermal Management System for Lithium Battery Energy Storage

LI Jiangang^{1,2}, RAO Xiaoyu^{1,2}, SHENG Shitao^{1,2}, DONG Ti^{1,2}, MA Qingshan^{1,2}, CAO Wenjiong^{1,2}

(1. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Province Energy Storage System and Operation Control Technology Innovation Center, Lanzhou 730070, China)

Abstract: As for the issues of thermal runaway and thermal balance in high energydensity lithium battery energy storage systems, in this paper a hybrid thermal management system that combines phase change material perfluoropolyether with immersion cooling technology is proposed. The system integrates immersion cooling with an active circulation loop to establish an experimental platform comprising a condenser, circulation pump, battery pack and sensor network. It analyzes the heat generation behavior of batteries under different discharge conditions and monitors such key parameters as temperature and heat generation power in real time. The control effect of both heat dissipation and temperature uniformity of the system at 1 C and 4 C discharge rates is verified by experiment. The result shows that the hybrid system can maintain the maximum temperature of the battery module within 45℃, while simultaneously limiting the internal temperature rise of the module under 7℃. The research results of this study provide a novel thermal management solution for enhancing the thermal safety and energy efficiency of lithium battery energy storage systems, demonstrating significant engineering application value..

Keywords: lithium energy storage; phase change; battery thermal management; multi-condition discharge; immersion cooling

0 引言

能源体系革新与产业升级具有密切关联性, 我

国近年来在低碳发展与可持续能源领域取得的进展已获得国际社会广泛认可。在“十三五”规划实施期间, 锂离子电池储能领域取得突破性技术进

收稿日期: 2026-01-27; 修回日期: 2026-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52206250)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52206250)。

步,产业链上下游协同创新成效显著,应用场景持续拓展,商业化运营模式逐步成熟,其在现代能源体系重构中的关键作用已通过实践验证^[1-2]。从制造业基础来看,我国已构建全球最完备的工业产业链,特别是在清洁能源领域,不仅占据全球光伏组件和新能源汽车供应主导地位,在氢能开发、风力发电、核能利用等战略性新兴产业亦取得突破性进展^[3-4]。

在储能系统中,热管理系统在其安全性发挥着巨大的作用。依据传热介质的物理状态差异,现行热控策略可分为气体对流散热、液态介质传热及相变储热3大体系^[5-7]。液态传热系统根据工质相态变化特征可细分为单相与两相模式,其中单相系统按接触方式差异又划分为间壁式换热与浸没式直接接触两类;两相系统则包含冷媒直冷、雾化喷淋、热虹吸管及相变浸没等多元技术路径^[8]。

在电池热控领域,气体对流散热作为基础性热传导路径,通过强制气流与电芯表面对流换热实现热量耗散。孔琴^[9]等研究容量32 A·h为方形磷酸铁锂电池,基于锂电池的产热和传热机理,构建了单体锂电池热仿真模型。结果表明,当流道结构为I型,且电池排布间距为9 mm,入口风速为0.5 m/s时,锂离子电池组的风冷效果最佳。优化后单体电池的最高温度降低了1.1℃,电池组整体的平均温差为3.5℃。杜佩袁^[10]等提出一种耦合倾斜U形微热管阵列的风冷式锂电池热管理系统,与未加倾斜U形微热管阵列的模组进行对比,研究其在不同环境温度、不同风量和不同充放电倍率下的散热性能。结果显示,环境温度为25℃、充放电倍率为1 C时,相较于未加倾斜U形微热管阵列的模组,耦合倾斜U形微热管阵列的电池模组最大温升最多降低了33.3%,单体电池和电池模组最大温差最多降低了65.8%和35.8%。即使在2 C充放电倍率条件下,电池模组最高温度也可以控制在40℃左右,并且单体电池和电池模组最大温差分别为1.59℃和2.46℃,单体电池和电池模组均具有良好的均温性。

当空气冷却技术存在局限性时,随之而来的就是液体冷却技术得到了进一步发展。许建民^[11]等提出一种复合仿生流道结构液冷板。结果表明,复合仿生流道不仅弥补了蛛网流道流体与冷板接触面积不足的缺陷,更优化了叶脉流道中流体的分布均匀性,使其温度和压力较初始值都具有明显下降,具有最佳综合性能。Zhen等^[12]研究提出采用一块一侧为凹坑结构、另一侧为肋状结构的液冷板(liquid cooling package, LCP),用于大容量储能电池。实验性调查在两种条件下进行:一是坑侧靠近

炮台(pit-type configuration near battery, PCTB),另一侧侧靠近炮台(rib-type configuration near battery, RCTB)。研究了电池组最大温度($T_{\max}$)、温度标准差(standard deviation, SD)和LCP两表面对流热传递系数(h)的变化。实验表明,随着 qv 增加而锡降低,电池温度下降,但SD增加。同时,PCTB提供了更好的冷却效果和均匀的温度分布,优于RCTB。然而,不管液冷板如何设计,在电池散热时有电池散热不均特点。于是提出浸没式冷却,浸没式冷却是将电池直接浸入在冷却液中,与间接式接触冷却相比,具有热阻小、接触面积大、冷却效率高以及降低电池热失控风险的特点。卢永杰^[13]等通过储能用电池模组为对象,分别建立冷板式冷却和浸没式冷却的数值模型。结果表明在相同放电倍率条件下,采用浸没式冷却的电池模组的最高温度和最大温差优于采用冷板式冷却的电池模组,且最大温差的降低幅度会随着放电倍率的提升而更加明显;浸没式冷却消除了冷板、热管等中间传热结构件的接触热阻,其散热效能显著优于间接液体冷却方案^[14]。在此基础上发展的相变浸没式液冷技术,采用低沸点相变工质作为传热介质,借助液体汽化过程中蕴含的相变潜热实现热量移除,进一步提升了系统散热效率^[15]。然而单相浸没式冷却仅依赖液体的显热变化来吸热,其散热能力受限于液体的比热容、流速和允许的温升。当电池功率密度极高时,需要非常大的流量才能将温升控制在安全范围内。

基于上述问题,本文提出了一种新型全氟聚醚相变浸没式热管理系统,该技术依赖工质的汽化-液化相变换热循环实现高效传热,通过加热片模拟电池不同充放电倍率下的温度变化,观察电池箱内温度变化,以及气泡生成情况,探究浸没式液冷系统对电池散热的影响。但实验过程中,相态转变过程对系统设计提出了特殊要求:一方面,复杂的相变换热机制增加了系统结构设计的难度;另一方面,低沸点工质的高挥发性特征,对冷却系统的气密性提出了严苛标准^[16]。目前,相变浸没式液冷技术主要应用于数据中心高热流密度电子器件的散热场景,通过发挥其高效传热优势解决极端工况下的热管理难题^[17]。

1 实验原理

1.1 相变浸没式热管理系统

实验平台的搭建围绕“相变浸没”核心理念展开,旨在模拟真实储能场景下锂电池的热管理过程,实验平台如图1所示。平台整体采用模块化设

计,由模拟电池箱、真空泵、冷凝器、循环泵、直流电源和加热片、温度传感器等核心组件构成。各部件通过密封管道与智能控制系统联动,形成完整的氟化液循环散热系统(氟化液参数如表 1 所示)。利用加热片模拟电池单体作为热量产生的源头,系统内部被设计为全密封环境,电池模块完全浸没在氟化液中。当加热片模拟电池工作产热时,氟化液吸收热量,当箱体内温度达到相变点时,发生液气相变,气体经过气相管路进入冷凝器。经过冷凝器冷凝后,氟化液液化,液体通过液体回流管道进入电池箱,构成闭环循环。通过过程气化-液化过程,实现热量的高效转移。并且通过真空泵调节系统内部压力,动态控制氟化液的沸点,使散热效率始终与电池产热强度匹配。

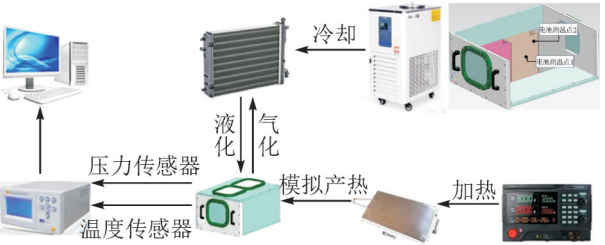


图1 实验平台流程图
Fig. 1 Experimental platform flowchart

表1 氟化液参数
Table 1 Parameters of fluoride solution

参数	数值
组分	全氟聚醚(>99%)
外观	无色、透明
沸点(101 kPa)/℃	49
密度(25℃)/(g/mL)	1.610.03
运动黏度(40℃)/(mm²/s)	0.35
汽化潜热/(J/g)	98
导热系数(40℃)/[W/(m·k)]	0.103 8
比热容(40℃)/(J/gK)	1.308
介电常数(1 kHz, 40℃)/(F/m)	1.848
介电强度(2.5 MM)/kV	12.56
饱和蒸汽压(25℃)/kPa	34.204
倾点/℃	<-118

全氟聚醚作为锂电热管理相变工质的优势在于优越的安全性与稳定性。全氟聚醚有超过 300℃ 的热分解温度,并且没有可燃性,防止电池热失控状态下的燃烧风险;且全氟结构与电池壳体、密封材料及电解液无不良反应,相较于石蜡的易燃性和传统氟化液较差的材料相容性,全氟聚醚更能保障系统长期兼容性;在-70~300℃ 的宽温区内能保持性能永久稳定,几乎无降解或挥发,实现了免

维护的长寿命循环。且全氟聚醚没有任何毒性,在实验过程中对人体没有任何影响。

1.2 锂离子电池产热分析

目前,锂离子动力电池在电动汽车领域已经进入商业化和批量化生产阶段,但从近年来电池的自燃和爆炸事故可以看出,锂离子电池在高负荷高环境温度运行中的可靠性及安全性问题尚未完全解决^[18]。经研究可知,锂离子电池内部热量主要来自电化学反应热、极化热、欧姆热、电解液和 SEI 膜分解热^[19]。

1)电化学反应热指的是在电池充放电过程中,锂离子电池在正负极之间发生脱嵌作用所产生的热量。极化热是由于锂电池在工作时的开路电压和端电压发生电位偏移压降而产生的热量^[20]。欧姆热是由于电池工作时其内部的各种材料具有欧姆内阻所产生的热量,反应热、极化热、欧姆热三者总热量公式为

$$Q=IT\frac{\partial E}{\partial T}+I^2R_p+I^2R_j$$
 (1)

式中: I 表示电流密度, A/cm²; T 表示温度, K; E 表示锂离子电池电动势, V; R_p 表示锂离子电池的极化电阻, Ω; R_j 表示锂离子电池的欧姆内阻, Ω。

2)电解液和 SEI 膜分解热主要发生在电池温度较高时,电解液将与正极材料发生副反应、电解液及 SEI 膜自身发生分解反应所产生的热量^[21]。当锂离子电池处于正常工作温度区间时,电解液分解热和 SEI 膜分解热都很小,在实验过程中可忽略不计。

2 单体电池升温特性实验测试

2.1 电池表面温度测点布置

热电偶测温是测量单体电池表面温度的有效方法,升温特性测试需在电池表面布置热电偶,本测试电池表面热电偶测温点的布置情况如图 2 所示。在电池顶部面布置测温点 202、203、204 3 个测试点,其中 202 靠近电池负极极柱,204 靠近电池正极极柱;在电池正面布置 101 至 109 连续 9 个测试点;在电池左侧布置 205、206、207 3 个测试点;共布置 15 个温度测试点。100 A·h 电池/电池箱规格参数见表 2。

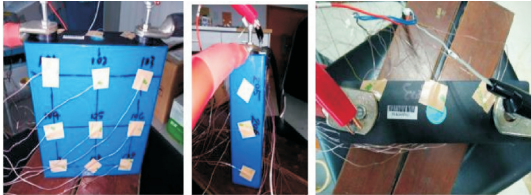


图2 电池表面温度测点布置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of temperature measurement point arrangement on battery surface

表2 100 A·h 电池/电池箱规格参数	
Table 2 Specification for 100 A·h battery/battery pack	
参数	数值
容量/A·h	100
电池尺寸(宽度×高度×厚度, mm)	134×220×27
重量/kg	2.3
工作电压/V	2.0~3.65
最大脉冲放电电流	5 C级
最小允许放电电压/V	1.8

2.2 单体电池 1C 放电时的电压产热特性

本实验记录了电池在 1C 放电倍率下产热功率随电压变化曲线,结果如图 3 所示。图 3 中电压从初始的 3.39 V 下降至 55 min 时的 3.1 V,整个过程缓慢下降,表明电池低倍率下放电平稳;在 55 min 后,有明显跌落,表明放电进入末期。产热功率通过式(1)计算,前期轻微下降,在放电中期保持稳定,说明低倍率放电时电池内阻变化小、发热均匀。在放电末期,产热功率升高,说明在电压突降时,用于对外做功的有效能量比例减少,内阻消耗的能量比例增加,能量转换效率降低,使更多化学能直接转化成了热能。整体实验说明,在 1C 放电过程中,电流较小,电池内部极化效应较弱,锂离子在电极和电解液中的扩散速度能够较好地匹配电子传导,因此电压衰减缓慢,同时欧姆热和反应热较低,使得产热功率变化平缓^[22]。说明电池在低倍率放电下电池工作稳定、可控。

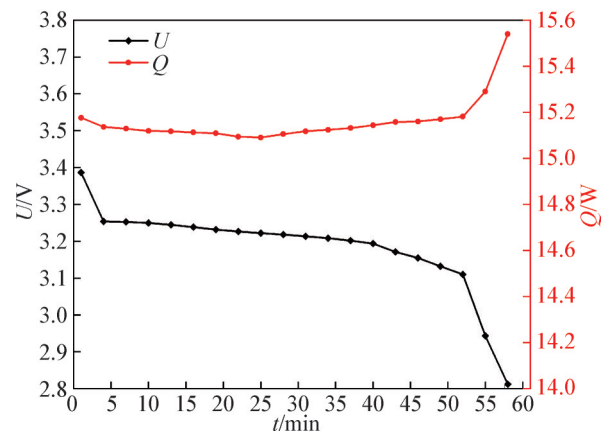


图3 1 C 放电电压产热功率曲线
Fig. 3 1 C discharge voltage and heat generation power curve

2.3 单体电池 4 C 充放电条件下发热量演化实验测试

本实验记录了电池在 4 C 放电倍率下的电压与产热功率的变化,如图 4 所示。在电池放电过程中,电压从初始的 3.4 V 持续下降,在接近 55 min 后出现明显跌落。主要原因是放电中、后期电池活性物质快速消耗,锂离子在电极材料体相及电解液中的扩散速度严重滞后于电子传导速度,导致电极表

面发生严重的浓差极化,同时电荷转移阻抗也显著增大,使得电池端电压快速下降。产热功率在前期保持较高水平,随后逐步下降,是因为前期产热以较大的欧姆热和电化学反应热为主,相对稳定;而进入高压极化阶段后,尽管极化热会增加,但此时电池内阻急剧升高导致实际放电电流可能减小,且可用化学能减少,使得总体产热功率降低^[23-25]。在放电末期,由于电压突降,使更多化学能直接转化成了热能,产热功率升高。相比于 1C 放电,电池在 4C 放电产热功率明显升高,需对电池热管理有较强要求。

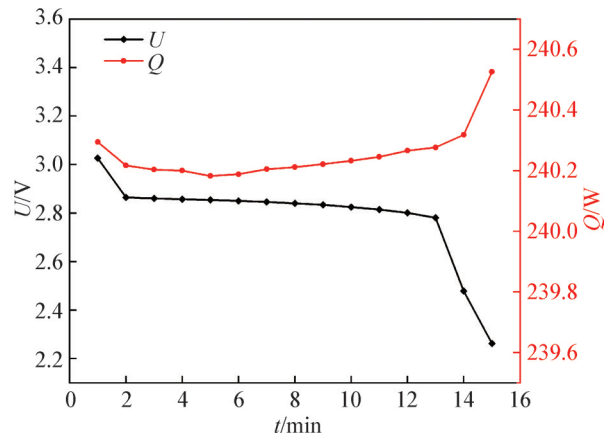


图4 4 C 放电电压产热功率曲线
Fig. 4 4 C discharge voltage and heat generation power curve

3 不同放电倍率下电池温度变化

3.1 1C 放电时温度变化情况

本实验研究电池在 1C 放电工况下温度变化,如图 5 所示。图 5(a)记录了自然冷却下单体电池温度变化,在自然冷却状态下,电池仅依靠空气对流和辐射,换热效率低,导致热量在电池表面快速积累,温升更高^[26-28],最终温升在 8℃ 左右。如图 5(b)记录了浸没式冷却系统中电池温度变化,在电池放电过程中,电池温度持续升高,但其温升在 3.5℃ 左右,显著低于自然冷却下温升情况。其主要原因是氟化液本身的显热冷却能力,大量热量被氟化液吸收,氟化液的导热系数和比热容远高于空气,能够通过强制对流或自然对流更高效地将电池表面热量传递至整个液体容积中,实现快速、均匀的散热;同时,通过红外热成像(如图 6),同样说明电池箱体内部最高温度 27.5℃,主要集中在电池表面。由于电池在放电结束时,电池最高温升在 27.5℃ 左右,未达到氟化液沸点,没有相变情况产生(如图 7)。实验说明即便电池温升未达到相变点,但浸没式系统能够凭借氟化液自身热物理性质,为

电池提供比自然冷却更强的热管理水平。

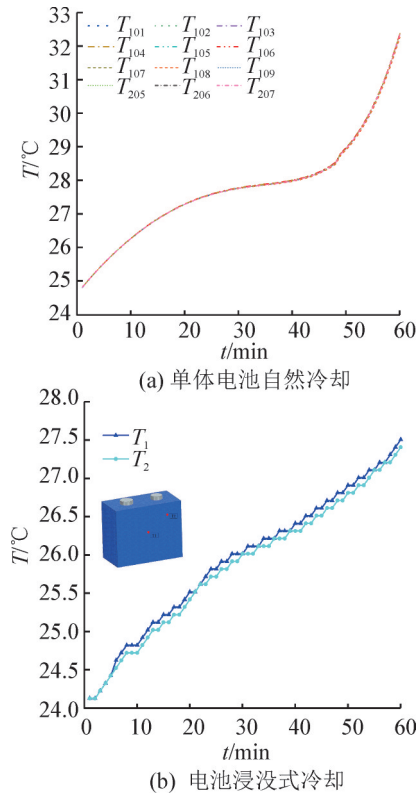


图5 1 C放电工况下电池表面温度变化趋势
Fig. 5 Temperature variation trend of battery surface under 1 C discharge condition

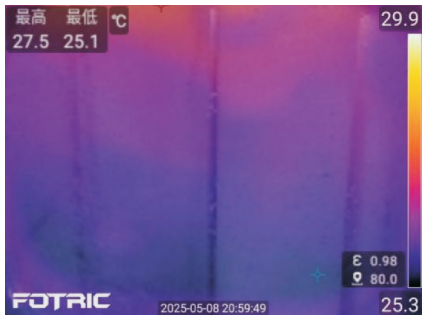


图6 1 C放电工况下电池箱内温度分布
Fig. 6 Temperature distribution inside the battery pack under 1 C discharge condition



图7 1 C放电工况下电池箱氟化液状态
Fig. 7 Status of fluorinated liquid in the battery pack under 1 C discharge condition

3.2 4C放电时温度变化情况

本实验记录了在 4 C 放电过程的温度变化，如图 8 所示。

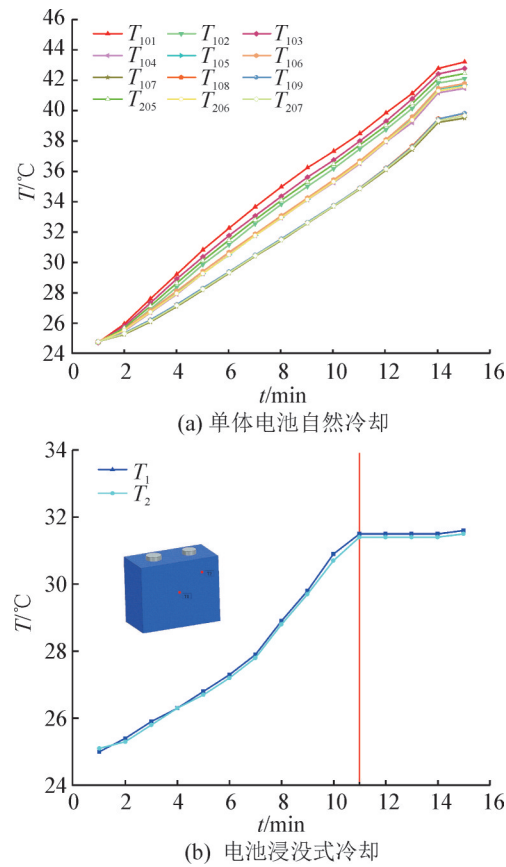


图8 4 C放电工况下电池表面温度变化趋势
Fig. 8 Temperature variation trend of battery surface under 4 C discharge condition

图 8(a)记录了自然冷却下单体电池温度变化，自然冷却因仅依靠低效的空气对流散热，导致热量快速积累，在 4 C 放电结束时，最终温升达 20 °C 左右。图 8(b)记录了在浸没式相变冷却电池温度变化，在电池浸没式冷却时，先利用真空泵降低电池箱内压力，降低氟化液沸点。实验曲线表明，电池在放电过程中，电池温度持续升高，在 11 min 达到氟化液相变点，氟化液剧烈沸腾(如图 9)产生大量气泡，相变潜热带走大量热量^[29]。由于氟化液持续沸腾产生大量气泡，经冷凝器冷凝后回流至电池箱体内，将电池温度维持在 31 °C 左右。同时，通过红外热成像(如图 10)，说明电池箱体内最高温度 31.5 °C，主要集中在电池表面。电池表面最高温升仅 6 °C，相较于自然冷却下电池温度变化，相变浸没冷却系统在 4 C 高倍率放电时，系统能将温度严格控制在低温区，不仅保障了绝对安全，为电池提供了合理的工作温度，有利于电池保持高效率 and 长循

环寿命,保证电池安全运行。



图9 4 C放电工况下氟化液沸腾情况
Fig. 9 Boiling condition of the fluorinated liquid under 4 C discharge condition



图10 4 C放电工况下电池箱内温度分布
Fig. 10 Temperature distribution inside the battery pack under 4 C discharge condition

4 结语

本研究针对锂电储能系统在高倍率放电工况下的热安全性问题,提出了一种基于相变浸没冷却的热管理方案。

研究揭示了相变材料全氟聚醚在液-气相变过程中的协同传热机理,建立了多物理场耦合模型,并通过实验验证了系统在高倍率放电工况下的热均衡能力。实验结果表明,该系统可将电池模组最高温度控制在 32℃ 以内,显著抑制了热失控风险。研究通过对比自然冷却和浸没式冷却,说明自然冷却仅依赖空气自然对流和辐射散热,其换热系数极低。在 4C 高倍率放电产生的大热流密度冲击下,产热速率远超散热速率,导致热量不断积累,电池温度线性攀升。相变冷却中,氟化液全氟聚醚在电池表面受热后发生沸腾(液-气相变),此过程吸收大量潜热,而非仅依靠液体温升(显热)吸收热量,极大降低电池本体的温升。

相较于现阶段研究的单纯相变浸没^[30]和液冷板冷却^[31],本实验主要通过沸腾-冷凝循环,通过电池箱和冷凝器内不同压强,进行气液传输,且因冷凝器持续冷凝,电池箱内散热持续,能够将电池温度控制在工质沸点。能够保证电池在长时间,复杂工况下稳定散热。而单纯相变冷却,因依赖这是相变

潜热,如果相变材料完全相变,储能饱和,电池箱内温度会持续升高,无法应对长时间以及复杂工况下的稳定性运行。且本实验电池箱内温度分布均匀。而传统液冷板在冷却后,冷却板与电池接触位置,电池温度低,在未接触冷却板电池处于高温状态。且电池、导热界面材料、冷板壁面,存在多层热阻,导致冷却效率降低。相较于传统冷却板冷却,本实验更能保证电池在低温状态下运行,保证电池的安全性及长循环性。

尽管本研究在锂电储能的相变浸没热管理领域取得了阶段性成果,但仍存在需进一步探索的问题。未来工作可围绕以下方向展开:1)针对长期循环工况下的氟化液稳定性与材料相容性展开研究,以评估系统在全生命周期内的可靠性;2)结合经济性分析优化冷凝器与循环泵的能耗,提升系统能效比;3)拓展系统在低温环境或极端气候条件下的适应性,开发自适应压力调控策略。此外,如何将相变浸没冷却与智能控制算法结合,实现热管理的动态优化与故障预警,亦是未来研究的重点方向。通过多维度技术迭代,本方案有望为下一代储能系统提供更高效、更安全的温控保障。

参考文献

- [1] 王晓慧,崔世界,杨超,等. 考虑储能电池寿命影响的源网荷储协同调度策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 37-43.
WANG Xiaohui, CUI Shijie, YANG Chao, et al. Coordinated scheduling strategy of source-grid-load-storage considering the impact of energy storage battery life [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 37-43.
- [2] 李佩兹,张丽霞,冯武彤,等. 锂离子电池失效机理综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 153-159.
LI Peixuan, ZHANG Lixia, FENG Wutong, et al. A review of Lithium-ion battery failure mechanisms [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 153-159.
- [3] 葛元江,王磊,吕业. 基于浸没式液冷技术的电池热管理[J]. 质量与认证, 2026(1): 51-53.
GE Yuanjiang, WANG Lei, LYU Ye. Battery thermal management based on immersive liquid cooling technology [J]. Quality and Certification, 2026(1): 51-53.
- [4] 谭婷,马育林. 锂离子电池热失控建模及产气行为[J]. 电池, 2025, 55(6): 1312-1318.
TAN Ting, MA Yulin. Thermal runaway modeling and gas generation behavior of Li-ion battery [J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(6): 1312-1318.
- [5] 刘金平. 电动汽车电源管理系统的设计与应用[J]. 电池,

- 2024, 54(1): 141-142.
- [6] LIU H, ALKHAYYATA, FAYZULLAEV N, et al. Intelligent design of lithium-ion battery thermal management systems for electric vehicles: integration of gene expression programming modeling and multi-objective atomic orbital search optimization[J]. Journal of Power Sources, 2026, 667239257-239257.
- [7] BAO R, WANG Z, XIONG S, et al. Numerical study on battery thermal management system with surrounding-filled triply periodic minimal surface and phase change material[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 289 (P1): 129741-129741.
- [8] 熊杰, 于海波, 李响, 等. 储能锂电池充放电特性和热管理研究[J/OL]. 储能科学与技术, 1-16[2026-01-12].
XIONG Jie, YU Haibo, LI Xiang, et al. Research on the charge-discharge characteristics and thermal management of energy storage Lithium batteries [J/OL]. Energy Storage Science & Technology, 1-16[2026-01-12].
- [9] 孔琴, 赵斌, 周鹏程, 等. 储能锂电池组风冷散热性能仿真优化[J]. 可再生能源, 2025, 43(10): 1312-1320.
KONG Qin, ZHAO Bin, ZHOU Pengcheng, et al. Simulation and optimization of air-cooled thermal performance of energy storage Lithium battery packs [J]. Renewable Energy, 2025, 43(10): 1312-1320.
- [10] 杜佩袁, 刁彦华, 任汝阳, 等. 耦合倾斜U形微热管阵列的风冷锂电池热管理系统性能[J]. 新能源进展, 2025, 13(3): 241-250.
DU Peiyuan, DIAO Yanhua, REN Ruyang, et al. Performance of air-cooled Lithium battery thermal management system coupled with inclined U-shaped micro heat pipe array[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2025, 13(3): 241-250.
- [11] 许建民, 武颂, 杨炜. 基于新型复合仿生流道的锂电池液冷系统散热分析及优化[J/OL]. 材料导报, 1-12[2026-01-12].
XU Jianmin, WU Song, YANG Wei. Heat dissipation analysis and optimization of lithium battery liquid cooling system based on novel composite bionic flow channel [J/OL]. Materials Review, 1-12 [2026-01-12].
- [12] TIAN Z, ZHANG J, CAO Z, et al. Experimental investigation of rib and pit configurations in liquid cooling plates for high-capacity energy storage batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 144: 119711.
- [13] 卢永杰, 杨佳亮, 伍宸亮, 等. 储能应用场景下冷板式和浸没式液体冷却性能对比研究[J]. 制冷与空调, 2025, 25(6): 83-91.
LU Yongjie, YANG Jialiang, WU Chenliang, et al. Comparative study on the cooling performance of cold plate and immersion liquid cooling in energy storage applications [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2025, 25(6): 83-91.
- [14] 曾少鸿, 吴伟雄, 刘吉臻, 等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 2888-2903.
ZENG Shaohong, WU Weixiong, LIU Jizhen, et al. Review of immersion cooling technology for Lithium-ion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(9): 2888-2903.
- [15] 梁高宁. 基于相变材料结合三维肋管换热器的锂离子电池热管理技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [16] 李程. 基于气液相变冷却技术的电化学储能温控系统研究[J]. 中国战略新兴产业, 2024, (2): 78-80.
LI Cheng. Research on electrochemical energy storage temperature control system based on gas-liquid phase change cooling technology [J]. China Strategic Emerging Industries, 2024, (2): 78-80.
- [17] WU Y, LYU L, WU F, et al. Numerical simulation of phase change material-assisted liquid cooling with gear-shaped fins for battery thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 284(1): 128983-128983.
- [18] ZI J, LONG W, LIN T, et al. Optimization and performance analysis of a battery thermal management system combining piped liquid cooling and phase change material[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2026, 220 (PB): 110401-110401.
- [19] 汪张洲, 唐天琪, 夏嘉俊, 等. 基于复合相变材料的电池热管理性能模拟[J]. 化工学报, 2024, 75(S1): 329-338.
WANG Zhangzhou, TANG Tianqi, XIA Jiajun, et al. Simulation of battery thermal management performance based on composite phase change materials [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 75(S1): 329-338.
- [20] 徐宁. 多温位电动汽车直冷热管理系统特性及控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [21] 汤子艺. 基于复合相变材料的电池热管理系统仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [22] 陆威, 仲文, 吴志根, 等. 储能锂电池浸没式液冷的散热特性实验研究[J]. 化学工程, 2024(12): 26-31.
LU Wei, ZHONG Wen, WU Zhigen, et al. Experimental study on the heat dissipation characteristics of immersion liquid cooling for energy storage lithium batteries[J]. Chemical Engineering, 2024(12): 26-31.
- [23] 李奕彤, 许乐俊, 孙均利, 等. 磷酸铁锂锂离子电池热滥用的热失控特性[J]. 电池, 2025, (4): 699-705.
LI Yitong, XU Lejun, SUN Junli, et al. Thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate Li-ion battery by thermal buses [J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, (4): 699-705.
- [24] 陈杰. 锂离子电池浸没式热管理技术应用基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [25] 卢兵荣, 陈莉, 韩丽华, 等. 三电极软包装电池无析锂快充策略[J]. 电池, 2024, 54(3): 344-347.

- LU Bingrong, CHEN Li, HAN Lihua, et al. Non-lithium plating fast charging strategy for three electrode pouch battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(3): 344-347.
- [26] 吴成会. 基于浸没式冷却的电动汽车锂离子电池的传热性能研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- [27] 马文斌, 杨小钰, 谢松. 低温搁置对锂离子电池性能的影响[J]. 电池, 2024, 54(4): 533-536.
- MA Wenbin, YANG Xiaoyu, XIE Song. Effect of low-temperature storing on the performance of Li-ion battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(4): 533-536.
- [28] 杨振印, 康赛赛, 何飞, 等. 隔膜对锂离子电池短路的影响[J]. 电池, 2025, 55(3): 503-507.
- YANG Zhengyin, KANG Saisai, HE Fei, et al. Effect of separator on the short circuit of Li-ion battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(3): 503-507.
- [29] PENG A, PENG F, CHEN Y, et al. Numerical research on baffle-enhanced liquid immersion cooling for thermal regulation in 280 A·h LiFePO₄ batteries[J]. Energy, 2025, 138458.
- [30] 郭鹏宇, 张明杰, 程宜风, 等. 280 A·h 浸没式液冷电池模组流动传热策略研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(12): 4567-4582.
- GUO Pengyu, ZHANG Mingjie, CHENG Yifeng, et al. Study on flow and heat transfer strategies of 280 A·h immersed liquid-cooled battery modules[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(12): 4567-4582.
- [31] 陆张浩. 混合动力汽车动力电池液冷式热管理系统设计与仿真[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(23): 20-24.
- LU Zhanghao. Design and simulation of liquid-cooled thermal management system for hybrid vehicle power batteries[J]. Automotive Practical Technology, 2025, 50(23): 20-24.

作者简介:

李建刚(1998—), 男, 硕士, 研究方向为储能电池浸没式热管理。E-mail: 717416218@qq.com。

饶小宇(2002—), 男, 硕士, 研究方向为电池热管理。E-mail: 874585395@qq.com。

盛世涛(2003—), 男, 本科, 研究方向为新能源技术。E-mail: 2673916018@qq.com。

董缙(1989—), 男, 副教授, 研究方向为能源开发、利用和存储过程中工程热物理、电气工程及化学工程。E-mail: dongti0410@163.com。

马青山(1995—), 男, 博士, 研究方向为地热能开发与利用。E-mail: qsma@lzjtu.edu.cn。

曹文灵(1983—), 男, 副教授, 研究方向为多尺度多场合耦合仿真与数字孪生, 电化学储能技术。E-mail: wenjiong.cao@mail.lzjtu.cn。