

# 基于“口琴板”强化 280 Ah 储能电池组热管理的实验研究

康芳明<sup>1</sup>, 苏庆宗<sup>2</sup>, 马庆<sup>2,3</sup>, 王亚雄<sup>1,3\*</sup>

(1. 内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古包头 014010;

2. 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古包头 014010;

3. 内蒙古自治区煤化工与煤炭综合利用重点实验室, 内蒙古包头 014010)

**摘要:**基于对风冷电池组热管理的研究,开发了一种新型“口琴板”风冷式储能电池组热管理系统。研究了不同放电倍率下,自然对流、入口风速、环境温度对热管理系统温度场和流场分布的影响。结果表明,在1.5 C放电倍率下,入口风速为10 m/s、环境温度为25℃时,储能电池组的最高温度为42.26℃、最大温差为3.2℃。此外,“口琴板”可有效提升储能电池组内部温度分布的均匀性,显著降低电池组的最高温度,为大容量方形储能电池风冷热管理组件的开发优化提供了一定的基础理论和实验数据支撑。

**关键词:**风冷;口琴板;储能电池组;对流换热;热管理

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S1-0179-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.033

## Experimental research on strengthening thermal management of 280 Ah energy storage battery pack based on “harmonica plate”

KANG Fang-ming<sup>1</sup>, SU Qing-zong<sup>2</sup>, MA Qing<sup>2,3</sup>, WANG Ya-xiong<sup>1,3\*</sup>

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2.School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 3.Coal Chemical and Coal Comprehensive Utilization Key Laboratory of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China)

**Abstract:**Based on the research for thermal management of air-cooled energy storage battery pack, a novel “harmonica plate” thermal management system is developed for air-cooled energy storage battery pack. The influences of natural convection, inlet air speed and ambient temperature on temperature contour and flow field distribution of thermal management system are studied under different discharge rates. Study results show that the maximum temperature of the battery pack is 42.26℃ and the maximum temperature difference is 3.2℃ when the discharge rate is 1.5 C, the inlet air speed is 10 m·s<sup>-1</sup> and the ambient temperature is 25℃. In addition, the “harmonica plate” can effectively improve the uniformity of internal temperature distribution of energy storage battery pack, significantly reduce the maximum temperature of the battery pack. This study can provide relevant basic theoretical and experimental data support for the development and optimization of air-cooled thermal management system for large-capacity square energy storage battery packs.

**Key words:** air cooled; harmonica plate; energy storage battery pack; convective heat transfer; thermal management

能源是支撑国家高速发展的命脉,新一轮能源革命必将有效解决当前环境污染以及资源短缺问题。绿色可持续能源(太阳能、风能、地热能等)大规模推广符合当今国家“双碳”政策,可有效为传统化石能源减负,优化现有能源结构,促进经济高速稳定发展<sup>[1]</sup>。目前,可再生能源在转化利用过程中仍存在单位面积能量密度低、波动性和间歇性的问题<sup>[2]</sup>。近年来,储能技术的大力发展应用可有效解

决其间歇性、不稳定性问题,是现有能源结构绿色转型的关键技术<sup>[3]</sup>。

电化学储能因其具有能量密度高、响应速率快、能量和功率配置灵活以及不易受环境影响等优势,容易实现大规模的示范推广应用<sup>[4-5]</sup>。锂离子电池能量密度大、循环特性好、无记忆效应、制造工艺成熟等,被广泛应用于电动汽车、新能源、电网调峰等领域。综合考虑性价比、安全性、使用寿命和产业成

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-06-26

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2023SKYPT0017);内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2023JBGS0012)

作者简介:康芳明(1995-),女,硕士生,研究方向为热管理技术,1431330248@qq.com;王亚雄(1964-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为相变传热及高效节能技术,通讯联系人,yaxiongw@hotmail.com。

熟度等因素,磷酸铁锂电池是现阶段最适合推广应用的电储能介质。

由于锂离子电池具有较高的温度灵敏性和相对较窄的适宜工作温度范围(电池温度保持在 25~45℃;电池组整体温差 $\leq 5^\circ\text{C}$ ),而温度变化,包括不同季节环境温度变化以及其自产热引起局部温升等,都会诱发副反应,导致热失控<sup>[6-8]</sup>。因此,设计开发新型高效热管理系统,有效保证电池稳定高效工作,解决和控制储能电池的热安全问题是决定储能系统推广应用和普及的技术关键<sup>[9]</sup>。

目前储能电池组热管理方式主要有液冷和风冷。其中,液冷系统具有较高的比热容,冷却效果良好,但结构设计复杂,成本高,安全性差,存在易泄露的危险<sup>[10]</sup>。而风冷系统结构设计相对简单,经济性好,便于维护修理,可靠性高,相对安全,更适用于储能电池组(放电倍率一般为 1 C)的热管理研究。Liu 等<sup>[11-12]</sup>将传统“U”型和“Z”型风道结构相结合,提出了新型“J”型风冷电池热管理系统;建立锂离子电池的产热模型,并在此基础上对风道结构变量参数和被控变量进行了探究。张新强<sup>[13]</sup>采用数值模拟进行仿真研究发现,当进出风口面积相等时电池组冷却效果最佳,而继续增大进风口面积,并不能明显提高电池组的冷却效果,反而会增加整体功耗。Niculita<sup>[14]</sup>运用 Fluent 对电池组风冷系统中风扇不同安装位置进行仿真分析,结果表明,风扇安装在风冷系统上方具有更好的冷却效果。Wang 等<sup>[15]</sup>探究了在典型“Z”型风冷电池热管理系统中添加平行板的方法以改善电池组的气流分布,结果表明,优化后的电池组最高温度和最大温差分别降低了 3.42℃ (6.26%)和 6.4℃ (90.78%)。Luo 等<sup>[16]</sup>在以往风冷 BTMS 流道的基础上,开发了一种“X”型双进口、双出口结构的对称风冷电池热管理系统,克服了电池温度高、温差大、耗散功率大的问题;与以往的风冷流道相比,该系统提高了电池的热性能,最高温度降低了 4.33℃,最大温差和最大功耗分别降低了 74.0%和 62.9%。Qin 等<sup>[17]</sup>提出了一种将空气强制对流与相变材料相结合的新型混合电池热管理系统,并用实验验证了其有效性,即使充放电倍率为 4 C 时,该热管理系统的最大温差和最高温度也控制在最佳工作温度范围内。

综上所述,目前的研究主要是针对容量较小的电池通过分析内部流道、进出口结构、冷却空气流体参数等因素对储能电池组最高温度及温度均匀性的影响规律,采用优化策略对风冷散热系统参数进行

优化设计,以期改善储能电池组温度场分布,对于大容量储能电池的研究较少。本文针对大容量 280 Ah 储能电池组提出一种新型耦合“口琴板”的风冷热管理系统。基于“口琴板”的多孔结构,有效增加换热面积和均匀流量分布来强化流道间对流换热,以增强储能电池组整体温度的均一性。通过实验探究自然对流和强制风冷工况下对电池组最大温度及温差分布的影响。本研究为大容量方形储能电池组风冷热管理系统的开发优化提供了一定基础理论和实验数据支撑。

## 1 热管理系统实验测试

### 1.1 实验测试平台搭建

本文搭建了“U”型并行流道风冷储能电池组热管理单元实验测试系统,测试记录不同运行工况下电池组的温度场及速度场的变化。热管理系统实验测试平台主要包括直流电源、储能电池组、HF-200 风机、风速仪、Agilent 数据采集仪、计算机等。相关测试设备参数如表 1 所示。

表 1 相关测试设备参数

仪器/设备	型号	精确度	使用范围
数据采集仪	Agilent 34972A	—	—
T 型热电偶	HT-sensor TT-T-30	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	-40~260℃
风速测量仪	KANOMAX	$\pm(0.3\%+0.1)$	0.1~20.0 m/s
	Model 6113	—	0~220 V
风机	HF-200	—	0.1~10 A
直流电源	XX-1-200V10A	—	2.0~200 V
红外相机	T620, FLIR Corporation, US	$\pm 2\%$	-40~650℃

采用与 280 Ah 储能电池尺寸(72 mm×174 mm×207 mm)一致的内嵌“W”型加热棒方形铝块来模拟储能电池实际产热状况,其加热功率范围为 50~500 W。储能电池热管理系统(Energy storage battery thermal management system, ESBTMS)由 4 块 280 Ah 储能电池、口琴板、高导热柔性硅胶垫组成,导热硅胶垫(0.5 mm)填充于“口琴板”与储能电池间减少接触热阻,4 块储能电池由不锈钢捆扎带固定在一起。测试系统外壳由亚克力板[导热系数 0.19 W/(m·K)]拼接而成,连接处用专用胶水粘接密封。此外,测试系统外壳上下表面包覆保温棉以减少热损失。

当系统工作时,冷空气经过风机吹入进口导流板,再分配到口琴板各个冷却流道中,将储能电池工作过程产生的热量经热传导至口琴板,再经由冷空

气与口琴板的对流换热带走,随后热空气在出口导流板汇合,经过“U”型风道出口排出至环境中。本实验中采用尺寸为8 mm×174 mm×200 mm的口琴板。

为了更好地监测280 Ah 储能电池组整体的温度分布情况,共设置45个温度监测点监测热管理系统整体温度变化。其中,在每个储能电池与高导热硅胶垫相接触的两个表面各布置5个监测点( $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ )以观察储能电池表面的温度均匀性(如图1所示);在风道进出口各设置2个监测点来观察进出口处空气的温度变化;1个监测点被用来监测环境温度的变化。

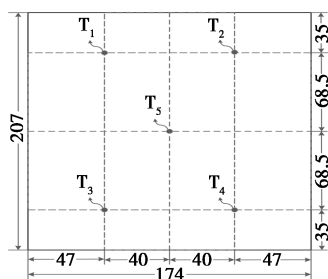


图1 储能电池表面测温点分布示意图

## 1.2 电池产热计算

研究发现,电池工作过程中的热量主要来源于电化学反应的反应热以及内阻产生的欧姆热<sup>[18]</sup>。本研究基于电池恒定放电倍率下的产热模型,产热计算如下<sup>[19]</sup>:

$$q_v = [I^2 R - IT_{\text{cell}}(du/dT)]/V_{\text{cell}} \quad (1)$$

其中, $I$ 和 $R$ 分别为放电过程的放电电流和等效电阻; $V_{\text{cell}}$ 和 $T_{\text{cell}}$ 为电池体积和温度; $I^2 R$ 为电池充放电时的焦耳热; $IT_{\text{cell}}(du/dT)$ 为电池的可逆热,此处忽略电池极化热、副反应热以及热辐射。储能电池单体的产热情况见表2。

表2 280 Ah 储能电池单体产热计算

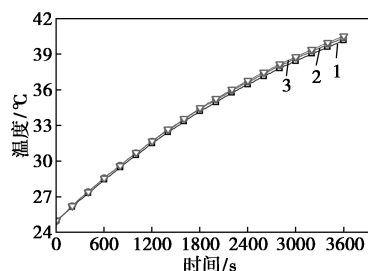
放电倍率/ C	产热速率/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ )	放电倍率/ C	产热速率/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ )
0.3	15038	1.5	84615
0.5	25576	2.0	118461
1.0	53846		

## 1.3 实验误差分析

为了保证实验数据准确性,在实验开始之前,对每个储能电池进行均温性测试。在放电倍率为1 C时对每个储能电池单独加热,根据内部加热棒布置方式,在储能电池外表面上设置了5个温度监测点,

加热时间为1 200 s。采用红外热成像摄像机(T620, Flir Corporation, US)来捕捉电池表面温度分布。热成像摄像机捕捉的电池表面温度表明,储能电池表面最大温差为0.6℃,表面温度均匀性良好。

为保证实验结果的可靠性和重复性,在放电倍率为1 C、进口风量为5 m/s、环境温度为25℃时,取电池表面中心点 $T_5$ 为测试点进行了3次重复性试验,结果如图2所示。测试结果表明,3次重复试验具有很高的一致性,在 $T_5$ 测试点重复实验结果的最大误差为2.3%。



1—第1次测试;2—第2次测试;3—第3次测试

图2 重复性测试 $T_5$ 监测点处温度

## 1.4 风冷储能电池组热管理系统的评价指标

评价BTMS热性能的主要指标为:储能电池组的最高温度、整体温度均匀性。在以往的研究中,在电池组内每个单体电池表面不同位置上的温度监测点来评估。

### (1) 最高温度 $T_{\text{max}}$

是指整个电池组内的所有测温点的最高温度。通过电池组最高温度说明不同充放电倍率下电池组的温度是否超出电池正常的工作温度范围要求。

### (2) 最大温差 $\Delta T_{\text{max}}$

指电池组内最高温度与最低温度之间的差值。通过 $\Delta T_{\text{max}}$ 可以判断电池整体的温度均匀性,防止因某个电池发生热失控而引起周围电池的温度过高。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 自然对流对储能电池组的热性能影响

在自然对流情况下,环境温度为25℃时,不同放电倍率(0.3~2 C)对电池组最高温度和最大温差的变化如图3所示。

如图3(a)所示,自然对流冷却时,随着电池组放电倍率的增加,电池组温升显著增加。在放电倍率0.5 C时,需要2 510 s(约42 min)电池组的最高温度会超出适宜工作温度范围( $>45^\circ\text{C}$ );在放电倍率为1 C时,需要1 880 s(约31 min);而在放电倍

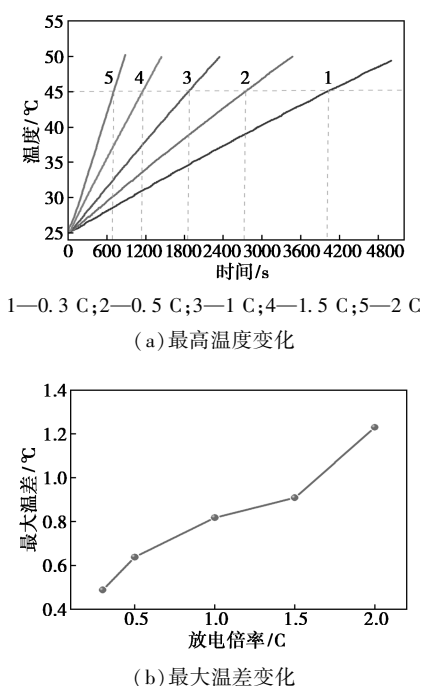


图 3 不同放电倍率下储能电池系统在自然对流时的温度变化

率为 2 C 时,仅需要 624 s (约 10 min) 电池组最高温度就会超出适宜工作温度范围。相同的自然对流冷却情况下,电池组最高温度与放电倍率的增加呈现正相关。对于 280 Ah 储能电池实际运行过程而言,放电时间可能会更短,主要原因是当储能电池温度过高时,负载将可能提前停止工作,电池放电结束时间随放电倍率的增加而明显缩短,并非成倍数关系。

图 3(b) 表明,在自然对流冷却时,即使储能电池在 2 C 的极限放电情况时,电池组最大温差仅为 1.28 °C,表明电池组整体的温度均匀性良好。综上所述,对于 280 Ah 大容量的储能电池而言,在自然对流条件下,仅适合储能电池以较低的放电倍率工作(0.1 C),口琴板能完全满足电池组的散热需求。

## 2.2 强制对流对储能电池组的热性能影响

### 2.2.1 不同进口风速对储能电池热性能的影响

进口空气流速的增加可以显著提高“口琴板”流道内冷空气的对流换热系数,以强化其散热性能,但空气流速过高时又会增加能量的消耗。因此,选择一个最佳的空气进口流量,不仅可以有效提高口琴板的散热性能,还能平衡能量的消耗。当环境温度为 25 °C 时,不同放电倍率下的储能电池组在空气入口流速 1~10 m/s 之间的温度分布情况如图 4(a)~图 4(d) 所示。

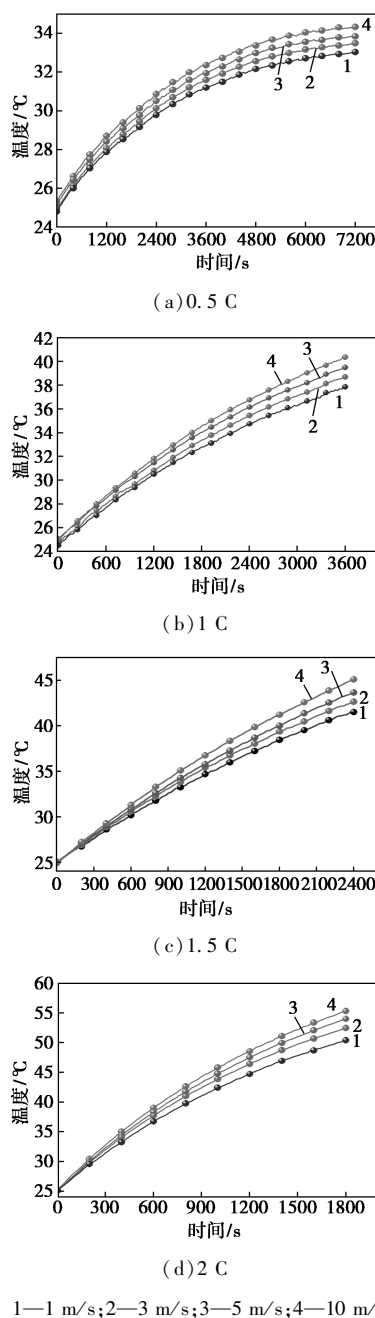


图 4 不同放电倍率下储能电池组最高温度随入口风速的变化

图 4(a)~图 4(d) 结果表明,随着入口风速的增大,电池组最高温度显著降低。放电倍率为 1.5 C 以内时,电池组升温曲线变化相对较慢,且放电结束时,入口风速为 1 m/s 时电池组的最高温度能够被保持在适宜工作温度范围内。但当放电倍率为 2 C 时,在进口风量为 10 m/s 时,放电 1 230 s (约 20 min) 时最高温度就会超过 45 °C,不利于储能电池的正常工作。因此,从提高冷却效率和降低能耗的角度考虑,最终选择空气入口流速为 5 m/s 为最佳的流速值,可有效解决储能电池组在正常工作时

(0.5~1.5 C)最高温度和最大温差控制在适宜温度范围内。

图5为入口风速为10 m/s、环境温度为25℃时,储能电池组在不同放电倍率下的最大温差变化。在放电倍率为0.5~2 C时,电池系统的最大温差均可有效控制在5℃以内,可保证储能电池组的安全高效工作。

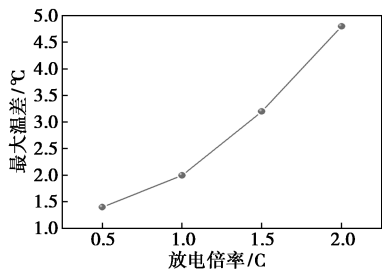
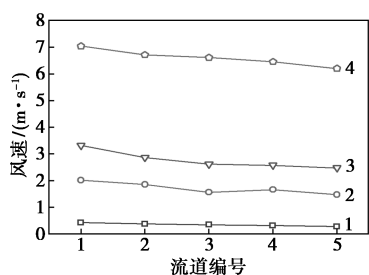


图5 入口风速为10 m/s时储能电池组在不同放电倍率下的最大温差

图6为不同入口风速下,各“口琴板”流道的平均风速的变化。对各“口琴板”流道依次编号1~5(顺着冷空气方向依次增大),环境温度为25℃、放电倍率为1 C。从图6中可以看出,在入口风速一定时,各流道内平均流速变化趋势较为平缓,说明各流道内的流量分布比较均匀,可显著增加储能电池组整体温度均匀性。并且当入口风速越小时,各口琴板冷却通道内的平均风速分布越均匀,更有助于对储能电池组整体温度均匀性的控制,减少电池组内各单体电池间的温差。



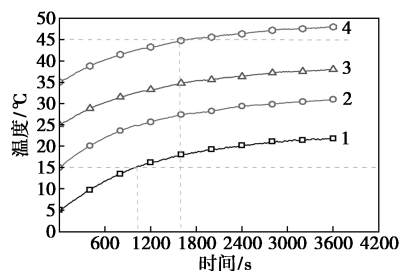
1—1 m/s;2—3 m/s;3—5 m/s;4—10 m/s

图6 不同入口风速下各“口琴板”流道的平均风速

### 2.2.2 不同环境温度对储能电池热性能的影响

图7为入口空气流速为10 m/s、放电倍率为1 C时,不同环境温度下的储能电池组热管理系统的温度分布情况。为了保证实验结果的可靠性,在测试低于环境温度(25℃左右)的工况时,选择在环境温度较低的时间进行实验(时间2024年1月15日,地点为内蒙古自治区包头市)。测试高于环境

温度的工况时,采用辅助加热设备以保证实验环境温度处于35℃。测试结果表明,在环境温度为35℃时,电池组的温升为12.89℃,而环境温度为5℃时温升达到了16.84℃。相同的放电倍率下,电池组的温升随环境温度的升高而降低;环境温度的升高有助于平衡电池组内的温差,但电池组的最高温度也会显著增加。



1—5℃;2—15℃;3—25℃;4—35℃

图7 不同环境温度下储能电池组最高温度的变化

当环境温度为15~25℃范围内时,电池在整个放电过程中,电池组的最高温度均能有效控制在适宜温度范围内(25~45℃)。而在环境温度为35℃时,在放电时间1600 s时,电池组最高温度将超出电池的适宜工作温度范围,恶化电池组性能,可能会产生热失控。综上,在280 Ah大容量储能电池组工作过程中,最好保证储能柜内的温度保持在15~25℃左右,以便保证电池安全高效的工作。

## 3 结论

设计加工制备了一种新型“口琴板”风冷式储能电池组热管理系统,并实验测试了不同放电倍率下,自然对流、入口风速、环境温度对热管理单元温度场和流场分布的影响,为大容量方形储能电池风冷热管理组件的开发优化提供了一定基础理论和实验数据支撑。

(1)自然对流时,所开发的热管理系统能满足对储能电池在较低放电倍率下对温度控制的要求。

(2)入口风速为10 m/s、环境温度为25℃时,电池组在0.5~1.5 C时的最高温度与最大温差可有效控制在45℃和5℃以内;并且1.5 C放电倍率时,最高温度为42.26℃,最大温差为3.2℃。

(3)环境温度对储能电池组的热性能会产生显著影响,所开发风冷式口琴板储能电池热管理系统在5~25℃环境温度范围内,可保证储能电池组安全稳定运行。

## 参考文献

- [1] 郑欢. 中国煤炭产量峰值与煤炭资源可持续利用问题研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2014.
- [2] Teleke S, Baran E M, Bhattacharya S, *et al.* Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1(3): 117-124.
- [3] 李沛, 陈晖, 邓良辰, 等. 储能技术发展战略性问题与政策研究 [J]. *中国能源*, 2020, 42(8): 27-31, 26.
- [4] 刘英军, 刘亚奇, 张华良, 等. 我国储能政策分析与建议 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(4): 1463-1473.
- [5] Scrosati B, Garche J. Lithium batteries: Status, prospects and future [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 195(9): 2419-2430.
- [6] Wang H, Tao T, Xu J, *et al.* Thermal performance of a liquid-immersed battery thermal management system for lithium-ion pouch batteries [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46: 103835.
- [7] Wang C, Xi H, Wang M, Investigation on forced air-cooling strategy of battery thermal management system considering the inconsistency of battery cells [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 214: 118841.
- [8] Zhao D, Lei Z, An C. Research on battery thermal management system based on liquid cooling plate with honeycomb-like flow channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119324.
- [9] Kitoh K, Nemoto H. 100 Wh Large size Li-ion batteries and safety tests [J]. *Journal of Power Sources*, 1999, 81: 887-890.
- [10] Giuliano M R, Prasad A K, Advani S G. Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium-titanate batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 216: 345-352.
- [11] Liu Y, Zhang J. Design a J-type air-based battery thermal management system through surrogate-based optimization [J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113426.
- [12] Liu Y, Zhang J. Self-adapting J-type air-based battery thermal management system via model predictive control [J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114640.
- [13] 张新强. 风冷式动力电池热管理系统技术数值研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [14] Niculuță M C, Veje C. Analysis of the thermal behavior of a LiFePO<sub>4</sub> battery cell [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 395: 012013.
- [15] Wang M, Teng S, Xi H, *et al.* Cooling performance optimization of air-cooled battery thermal management system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117242.
- [16] Luo L, Liu Y, Liao Z, *et al.* Optimal structure design and heat transfer characteristic analysis of X-type air-cooled battery thermal management system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 67: 107681.
- [17] Qin P, Liao M, Zhang D, *et al.* Experimental and numerical study on a novel hybrid battery thermal management system integrated forced-air convection and phase change material [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 195: 1371-1381.
- [18] Pals C R, Newman J. Thermal modeling of the lithium/polymer battery: II. Temperature profiles in a cell stack [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1995, 142(10): 3282-3288.
- [19] Chen K, Chen Y, Li Z, *et al.* Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 393-401. ■
- [20] 李俊, 曹文平, 陈国浩, 等. 响应曲面法优化生物炭去除水中氨氮性能及机理研究 [J]. *环境科技*, 2022, 35(3): 7-12.
- [21] 杨天舒. 植物生物质热解炭孔隙结构表征研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [22] 赵建兵, 朱俊波, 庄长福, 等. 玉米秸秆生物炭对水中铅、镉的去除性能及作用机理研究 [J]. *生物质化学工程*, 2022, 56(4): 15-24.
- [23] 王文思. 改性污泥基生物炭对水溶液中铅的吸附特性研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [24] Gong Y, Ni Z, Xiong Z, *et al.* Phosphate and ammonium adsorption of the modified biochar based on *Phragmites australis* after phytoremediation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(9): 8326-8335.
- [25] Runjuan Z, Ming Z, Ji L, *et al.* Optimization of preparation conditions for biochar derived from water hyacinth by using response surface methodology (RSM) and its application in Pb<sup>2+</sup> removal [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5): 104198.
- [26] Shi W, Fu Y, Jiang W, *et al.* Enhanced phosphate removal by zeolite loaded with Mg-Al-La ternary (hydr) oxides from aqueous solutions: Performance and mechanism [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 357: 33-44.
- [27] Luo W, Qian L, Liu W, *et al.* A potential Mg-enriched biochar fertilizer: Excellent slow-release performance and release mechanism of nutrients [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144454.
- [28] Li R, Wang J J, Zhang Z, *et al.* Recovery of phosphate and dissolved organic matter from aqueous solution using a novel CaO-MgO hybrid carbon composite and its feasibility in phosphorus recycling [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 526-536.
- [29] 闫兵刚, 胡家玮, 姜晓谦, 等. 载镁生物炭对水体中磷酸盐和植酸的吸附性能及机理分析 [J]. *环境工程*, 2020, 38(6): 94-101. ■

(上接第 178 页)