

# 高容量锂离子电池储能模组在浸没状态下的热失控行为实验研究

姚新宇, 张振东, 盛雷, 朱泽华, 付林祥

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 针对高容量锂离子电池储能系统的热安全管控问题, 结合理论分析和实验测试, 采用浸没式液冷方案研究了储能模组在过充情形下的热失控行为特征, 探讨了浸没液种类、电池间距等因素对模组热失控过程中的电压、温度、热蔓延等的影响机制, 并将其与常规非浸没式模组的热失控行为进行了比较。结果表明, 常规非浸没式储能模组发生了严重的热失控蔓延, 而浸没式储能模组无热失控传播, 且热失控电池的最高温度相较于非浸没模组降低了 85%。采用导热系数、比热容较大的浸没液, 可将模组的最高温度控制在 237 °C 以内; 同时, 延长了电池热失控的早期孕育时间, 使热失控触发时间延后 150 s。此外, 过充电电池的升温幅度也较小(约 12.9 °C)。电池间距由 1.5 mm 增至 2.0 mm 时, 储能模组的最高温度降幅达 40.3 °C。浸没式储能模组热失控过程中无起火、爆炸和热失控传播现象。研究结果可为大规模锂电储能的热安全管理系统设计、优化等提供参考。

**关键词:** 磷酸铁锂储能电池; 热失控蔓延; 浸没式液冷; 热安全管理

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

## Experimental study of thermal runaway behavior of high-capacity lithium-ion battery energy storage module in immersion state

YAO Xinyu, ZHANG Zhendong, SHENG Lei, ZHU Zehua, FU Linxiang

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** To address the thermal safety control of high-capacity lithium-ion battery energy storage systems, this study combined theoretical analysis and experimental testing and adopted a immersion liquid cooling scheme to investigate the thermal runaway behavior of energy storage modules under overcharging conditions. It explored the influence of factors such as the type of immersion liquid and

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52472381, 52206267); 中国博士后基金资助项目(2021M702191)

第一作者: 姚新宇(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电池浸没式热安全。E-mail: 3291319194@qq.com

通信作者: 张振东(1968—), 男, 教授。研究方向: 汽车动力与控制工程、新能源汽车热管理技术。E-mail: usstzdz@usst.edu.cn

引文格式: 姚新宇, 张振东, 盛雷, 等. 高容量锂离子电池储能模组在浸没状态下的热失控行为实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(5): 523-532.

Citation: YAO Xinyu, ZHANG Zhendong, SHENG Lei, et al. Experimental study of thermal runaway behavior of high-capacity lithium-ion battery energy storage module in immersion state[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(5): 523-532.

the spacing between batteries on the voltage, temperature, and heat propagation of the module during thermal runaway and compared the results with those of conventional non-immersion modules. The study reveals that severe thermal runaway propagation occurs in conventional non-immersion energy storage modules, whereas no thermal runaway propagation is observed in immersion modules. Additionally, the maximum temperature of the battery undergoing thermal runaway is reduced by 85% compared to that of the non-immersion module. By using a immersion liquid with higher thermal conductivity and specific heat capacity, the maximum temperature of the module can be controlled within 237 °C. Meanwhile, the gestation period before thermal runaway is extended, delaying the thermal runaway onset by 150 s. Besides, the temperature rise of the overcharged battery is also small (approximately 12.9 °C). Increasing the battery spacing from 1.5 mm to 2.0 mm reduces the maximum module temperature by 40.3 °C. No fire, explosion, or thermal runaway propagation is observed during the thermal runaway process of the immersion energy storage module. The findings of this study can provide valuable reference points for the design and optimization of thermal safety management systems in large-scale lithium-ion energy storage.

**Keywords:** *lithium iron phosphate storage battery; thermal runaway spreading; immersion liquid cooling; thermal safety management*

随着全球气候变暖所带来的挑战，发展储能产业已经成为了国家重要能源战略<sup>[1-2]</sup>，目前，锂电池储能是储能产业的核心。锂离子电池具有高功率、高能量密度、长循环寿命、无记忆效应和无污染的技术优势<sup>[3-4]</sup>。截至 2023 年底，中国新增投运新型储能装机规模 21.5 GW/46.6 GWh，功率和能量规模同比增长均超 150%，3 倍于 2022 年新增投运规模水平<sup>[5]</sup>。由电池热失控问题引起的储能电站起火燃烧事故时有发生。因此，对电池组的热扩散行为进行深入研究，找到有效的热扩散防护方法，提升储能电站的安全性，避免人员的伤亡和经济的损失，非常有必要。

国内外研究人员对锂离子电池热失控行为开展了许多研究，如不同的触发方式<sup>[6-7]</sup>、电池热失控产物分析<sup>[8-9]</sup>和电池材料的热稳定性<sup>[10-11]</sup>等。Liu 等<sup>[12]</sup>设计了一种浸没式冷却系统，在过度充电期间，浸没在相变浸没液中的电池的热失控得到了有效的抑制，发生热失控的电池单元仅在 60 °C 以上持续 14 s 左右，且在此期间，相邻的电池单元未观察到热失控。王志等<sup>[13]</sup>利用外部加热和过充对梯次利用锂离子电池模组热失控进行探究，相比外部加热下触发的热失控，过充条件下触发的热失控温度更高，传播时间更短。Zhang 等<sup>[14]</sup>设计了一种利用混合粒径细水雾抑制锂离子电池热失控扩散的系统，结果表明，该系统可以抑制锂离子电池热失控扩散，显著缩短冷却时

间，降低水耗，使电池系统具有良好的温度。朱晓庆等<sup>[15]</sup>对 NCM622 电池进行了不同倍率的充放电实验，发现电池在过充电热失控过程中最高温度和峰值电压都随着充电倍率的增加而升高。

此外，研究者还针对热失控的其他影响因素<sup>[16-17]</sup>进行了研究，但对于浸没式的研究不充分。目前，国内外研究者主要是通过细水雾、相变材料等对锂电池热失控进行抑制。本文采用浸没式热管理方式，采用阻燃绝缘液体浸没方式，有效、快速地对电池所产生的热量进行吸收，并将电池置于隔绝氧气的环境下，因此具有抑制锂电池热失控的良好基础。本文以某品牌 280 Ah 磷酸铁锂硬壳电池为研究对象，采用不同的浸没冷却液和电池间距，以过充方式触发电热失控，通过理论分析和实验测试，研究浸没式热管理系统的热失控特性，旨在为浸没式储能液冷系统的热失控预防和热蔓延抑制提供参考。

1 实验方案

1.1 研究对象

以某品牌生产的 280 Ah 磷酸铁锂硬壳电池为研究对象，其形貌和规格参数如表 1 所示。

1.2 测试系统

图 1 为实验系统示意图，该系统由膨胀水壶、水泵、流量计、浸没箱(内含电池模组)、换

表 1 电池外观和规格参数

Tab.1 Battery appearance and specifications

| 电池外观                                                                              | 参数           | 数值                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------|
|  | 尺寸(长×宽×高)/mm | 173.6 × 71.25 × 199.7 |
|                                                                                   | 额定容量/Ah      | 280                   |
|                                                                                   | 标称电压/V       | 3.2                   |
|                                                                                   | 充放电截止电压/V    | 3.65/2.5              |
|                                                                                   | 标准充放电电流/A    | 140                   |
|                                                                                   | 电池质量/g       | 5393.4                |

热器、恒温水浴、电控箱等部件连接而成，其中，电池模组的电压和温度的变化情况可利用数据采集仪和上位机进行监测。

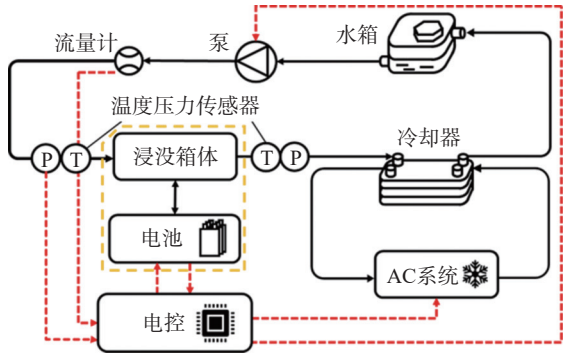


图 1 浸没式液冷系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of immersion liquid cooling system

浸没箱的内部布置如图 2 所示，箱体的整体尺寸为 1340 mm × 540 mm × 343 mm，重量 700 kg。其中，支撑条位于箱体底部，3 块电芯置于支撑条上，电芯左右设有 304 不锈钢挡板便于定位与紧固。箱体防爆阀位于上盖前方，便于释放热失控产生的大量气体。上盖与箱体间夹有密封条，最后通过螺栓连接并加固。走线孔均位于箱体右侧，用于穿引截面积为 50 mm<sup>2</sup> 的充放电线缆，便于对中间电芯进行过充，使其发生热失控，下方的两孔分别走监测电压和温度的线束。浸没液的流动方向如图 3 所示，将进出口布置在同侧，采用下进上出的流动方式。根据浸没液进口流向，电芯依次编号为 B1、B2、B3，电芯之间布置厚度为 1.5 mm 和 2.0 mm 的 MPP 阻燃隔板，浸没液可通过隔条间的间隙向上流动。

开展电池浸没热失控实验时，每块电芯布置 4 个测温点，两侧大面中心有编号为 TC<sub>1</sub> 和 TC<sub>2</sub> 的两根热电偶(耐高温，K 型，精度±0.4%)，一侧侧面中心的热电偶编号为 TC<sub>3</sub>，电池顶部的防爆阀处布置编号为 TC<sub>4</sub> 的热电偶，该电芯的热电偶(感

温线)布置形式如图 4 所示。此外，在浸没箱的进出口处分别布置两根热电偶，用于监测浸没液的进出口温变情况。同时，电压监测线分别连接电池的正负极，便于对电池进行充放电。

实验系统中的设备型号和规格参数见表 2。

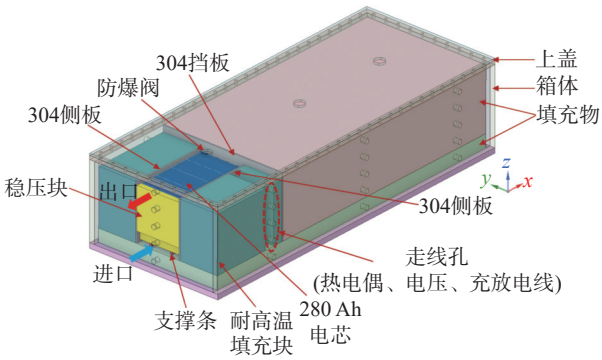


图 2 浸没箱示意图

Fig.2 Schematic diagram of the immersion tank

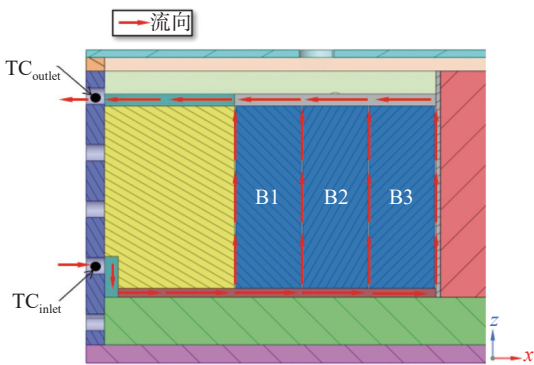


图 3 浸没液流动方式

Fig.3 Flow path of immersion liquid

1.3 测试过程

实验时采用过充的方式来触发锂电池的热失控，浸没箱内冷却液的静态用量为 5 L，循环用量约 10~30 L。浸没液的进口流量为 2.0 L/min，初始温度为 25 ℃，浸没液循环时无额外的冷却回路。

相关的实验步骤：

a. 设定恒温水槽温度为 25 ℃，开启浸没式实

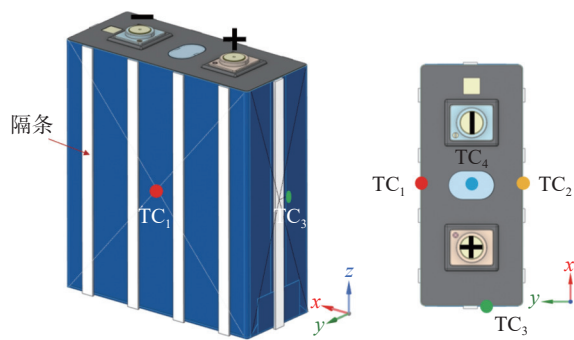


图 4 电芯热电偶的布置形式

Fig.4 Arrangement of battery thermocouples

表 2 浸没式热管理系统中主要部件的规格参数

Tab.2 Specification parameters of the main components in the immersion thermal management system

| 部件    | 型号             | 参数                                            |
|-------|----------------|-----------------------------------------------|
| 电池    | LFP            | 容量: 280 Ah                                    |
| 制冷器   | EATB23-D-24    | 标定压力: 4.5 MPa<br>温度范围: 180~200 ℃              |
| 恒温浴槽  | SC1030         | 温度范围: 10~100 ℃<br>流量范围: 0~13 L/min            |
| 泵     | Gospel PWM/DA  | 流量范围: 0~25 L/min<br>最大抬升高度: 15 m              |
| 流量计   | FHKU-938-6 300 | 测量范围: 3~30 L/min<br>精确度: ±2%<br>压力范围: 0~2 MPa |
| 膨胀水壶  | Cruze 1.8      | 容积: 1.8 L                                     |
| 数据采集仪 | NI USB-6212    | 输入频率: 400 kS/s<br>输出频率: 250 kS/s              |

- 验台架，对浸没槽内的电池进行均温。
- b. 待电池温度平稳后，利用充放电仪对 B2 电芯进行 0.5 C 过充，记录每块电芯的温度和电压数据，并视频拍摄电池失控时的现象。
- c. B2 电池热失控发生时，监控电池热失控现象，并观察模组是否发生热失控传播现象。
- d. 待电芯温度下降至室温，确定无二次热失控风险后，停止实验。
- e. 观察并记录电池模组的热失控蔓延情况后，清理实验设备并妥善处理电池残骸。最后，整理并分析实验数据。

2 对照测试——非浸没储能模组热失控

研究非浸没工况下，电池模组过充热失控实验的热传播行为，监测电池的电压、防爆阀和温

度变化，探讨电池模组的热失控蔓延现象。

根据充放电仪显示，电池 B2 过充容量 58.9 Ah，其电压达到峰值 15.92 V 之后，中间的电池 B2 发生热失控，电压在 60 s 内降低至 0 V，但其余两个电池的电压并未产生明显突变，如图 5(a) 所示。非浸没状态下，图 5(c) 电池 B2 的温变曲线表明，电池在 1 658 s，防爆阀开启，电池泄压，喷出少量白色气体。继续对电池过充电，电池温度急剧上升，在 2 744 s 时达到峰值 362.9 ℃，且电池的最高温度位于 B2 电池的侧面中心点。受 B2 电池热失控的影响，电池 B3 靠近 B2 测温点（即 B3 顶面）的温度率先突变，但 B3 侧面温度在 2 979 s 时可达到最大值 171.6 ℃。之后，电池温度开始下降，在 3 188 s 时，B3 防爆阀开启，温度骤降，电池内部开始发生自产热反应，侧面温度逐渐上升，但顶面温度会持续下降。这是由于防爆阀开启时，电池顶部气凝胶被顶开所致。类似地，电池 B1 靠近 B2 监测点的温度上升，在 3 850 s 时达到峰值 157.5 ℃，之后电池温度逐渐下降。

拆箱后，对 B1 和 B3 电池的形貌和电压进行观察和测试。发现 B3 电池的防爆阀开启，万用表测得电压为 1.221 V；B1 电池的防爆阀未开启，电池鼓包严重，电压为 3.321 V，表明此次实验存在热失控蔓延现象(B2-B3)。

在图 6 电池模组热失控蔓延的实况图中，热失控后，温度传感器依旧牢固地粘贴在电池表面，所监测的温度数据无明显断层，精确可靠。同时，B2 电池外包蓝膜被烧毁，热失控时发生整块电池的剧烈燃烧。

3 浸没状态下电池模组热失控

3.1 浸没液种类

针对 280 Ah 电池模组，设定电池间距 1.5 mm，浸没液入口温度 25 ℃，设定流量 2.0 L/min，研究浸没液 A 和 B(碳氢基合成油)分别对储能模组电热失控传播的影响。浸没液参数见表 3。

3.1.1 电池电压

由图 7 可知，电池过充至 60.7 Ah(浸没液 A)和 67.4 Ah(浸没液 B)，B2 电池电压均达到峰值，分别为 16.39 V(浸没液 A)和 20.22 V(浸没液 B)。之后，中间电池 B2 发生热失控，电压分别在 124 s(浸没液 A)和 100 s(浸没液 B)内骤降为 0 V。其

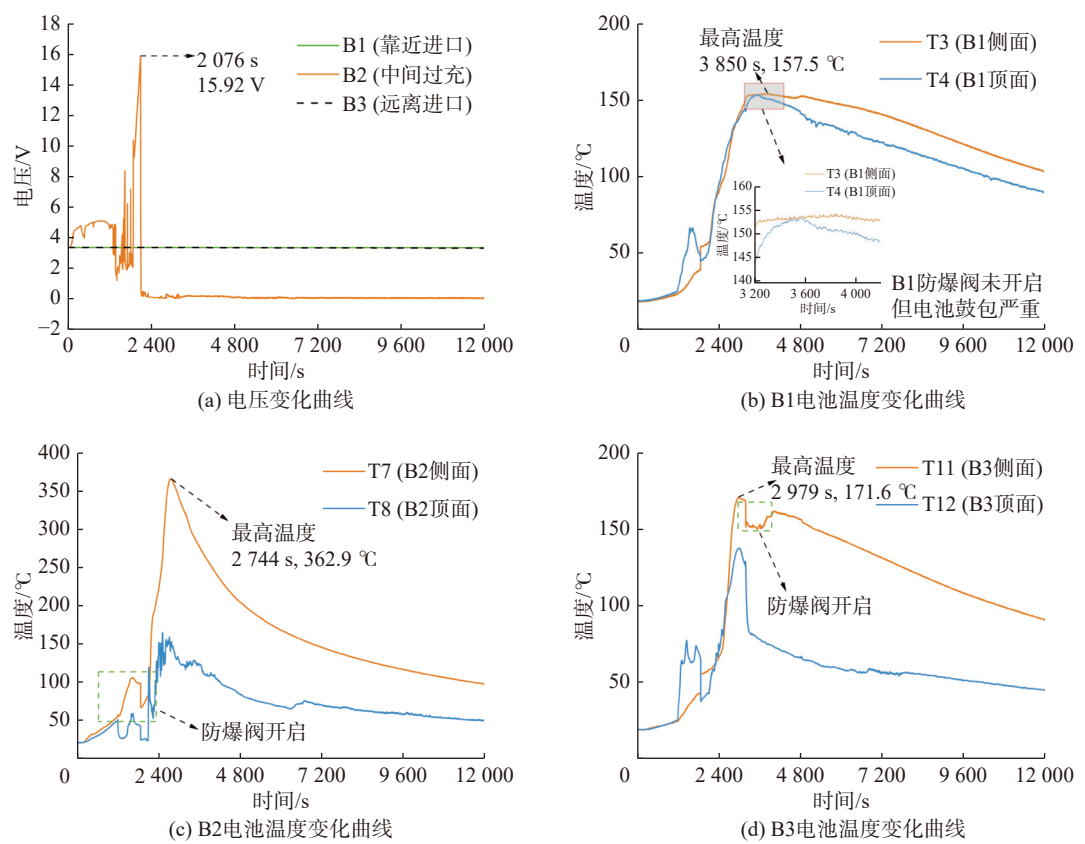


图 5 非浸没工况电池模组热失控电压变化曲线

Fig.5 Change curve of thermal runaway voltage of non-immersion battery module

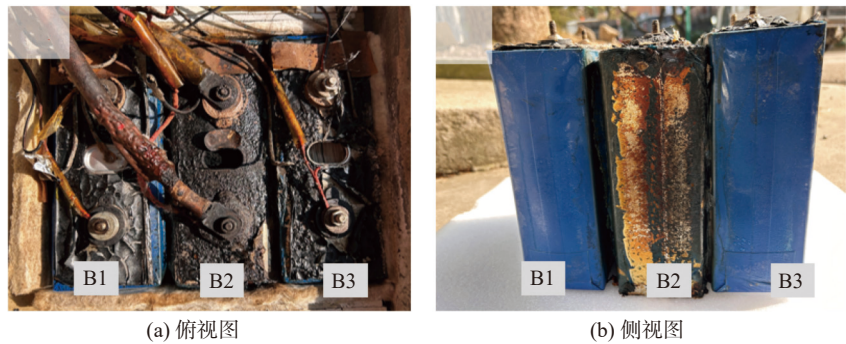


图 6 热失控实验后, 电池 B1、B2、B3 的形貌图

Fig.6 Morphology of batteries B1, B2 and B3 after thermal runaway experiments

表 3 浸没液参数

Tab.3 Physical properties of immersion liquids

| 浸没液种类 | 运动黏度/<br>(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 导热系数/<br>(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) | 闪点/<br>(°C) | 比热容/<br>(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) |
|-------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------|
| A     | 6.05                                         | 0.13                                            | 143         | 1.97                                             |
| B     | 12.38                                        | 0.14                                            | 177         | 2.02                                             |

中, B1 和 B3 电池的电压仍维持在 3.3 V 附近, 未发生热失控蔓延。

3.1.2 电池温度

实验得到储能模组分别在浸没液 A、B 冷却情景下的热失控升温曲线, 如图 8 所示。

结果表明, 选用浸没液 A 时, B2 电池在 927 s 时防爆阀开启, 随后经过 909 s(即 1836 s 时), B2 电池大面中心的温度 T6 达到峰值 249.6 °C。而选用浸没液 B 时, B2 电池防爆阀的开启时间延迟至 1196 s, 且在 1059 s 后(即 2255 s 时), B2 电池大面中心的最高温度 T5 仅为 236.7 °C。对比发现, 浸没液 B 显著延长了电池触发热失控的时间, 并降低了最高温度。这说明浸没液 B 的更高导热系数和比热容在抑制电池内部热量累积、延缓热失控触发方面具有更好的效果。

进一步分析 B2 电池热失控对相邻电池的影

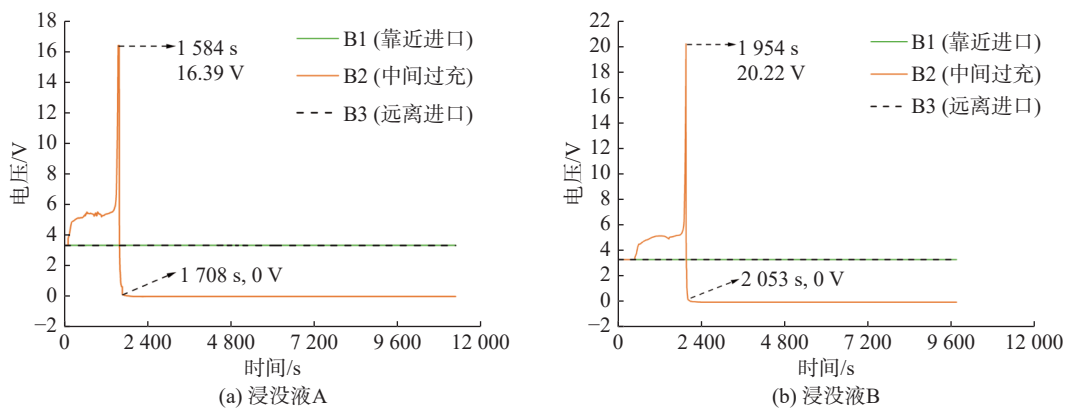


图 7 不同浸没液热失控模组实验时电池电压变化曲线

Fig.7 Battery voltage change curves during thermal runaway module experiments with different immersion liquids

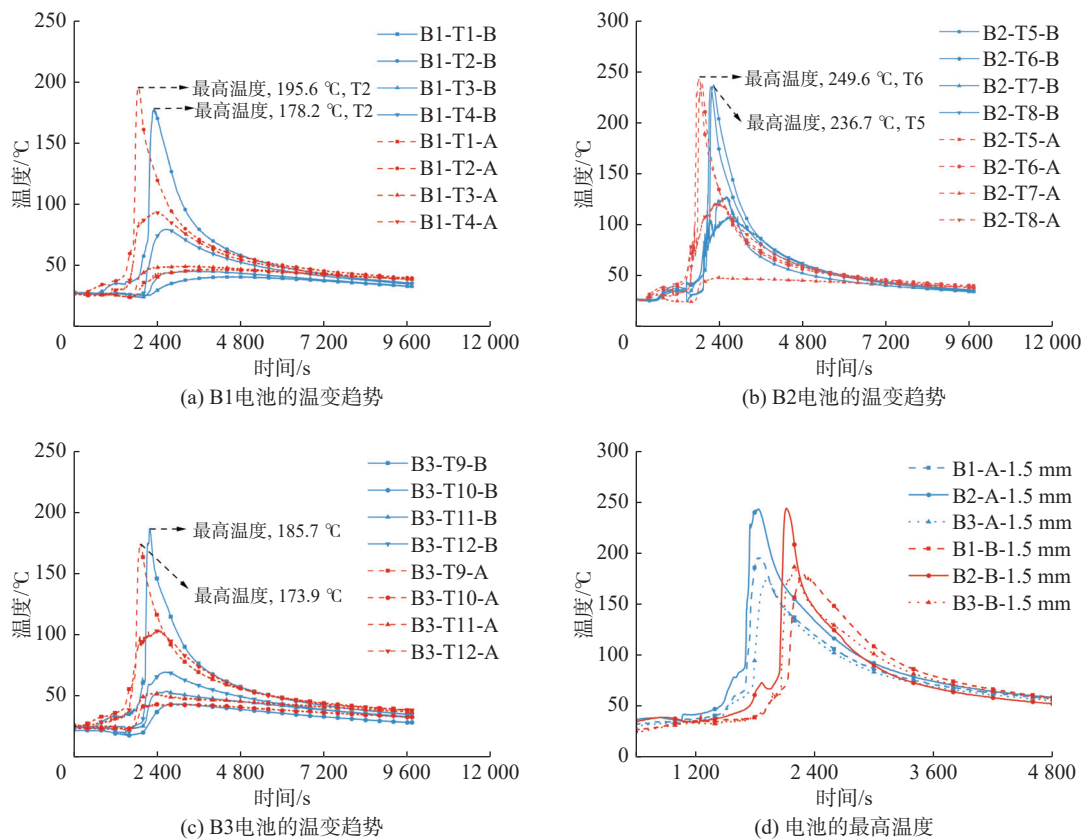


图 8 不同浸没液电池模组热失控温度变化曲线

Fig.8 Thermal runaway temperature change curves of battery modules with different immersion fluids

响。受 B2 电池热失控的影响，B3 电池靠近 B2 一侧的测温点(B3-T9)温度率先突变，在 1925 s(浸没液 A)和 2189 s(浸没液 B)分别达到峰值 173.9 °C 和 185.7 °C，之后温度逐渐下降，如图 8(c) 所示。值得注意的是，尽管 B3 电池温度有所上升，但未触发热失控。相比之下，浸没液 B 使 B3 电池的温度峰值略高，但延迟了峰值时间，表明浸没液 B 在控制热量扩散和抑制热失控传播方面更具缓冲作用。

同样，B1 电池靠近 B2 电池侧的温度监测点(B1-T2)温度也出现突变，并在 1834 s(浸没液 A)和 2300 s(浸没液 B)时分别达到最高温度 195.6 °C 和 178.2 °C，随后温度逐渐下降。B1 电池未触发热失控。分析表明，浸没液 B 在两侧电池间的热量传导中起到了有效的抑制作用，通过更好的热传导性，有效降低了电池间的温差和热失控传播风险。综上所述，实验结果显示，浸没液 B 凭借其优越的热物性参数，不仅延缓了 B2 电池的热失控

触发时间, 且对相邻电池的热扩散影响也较为温和, 从而显著降低了系统整体的热失控风险。3 块电池的关键温度点变化情况见表 4。

3.1.3 热失控现象

电池模组热失控蔓延的实况图如图 9 所示。热失控后, 温度传感器依旧牢固地粘贴在电池表面, 所监测的温度数据无明显断层, 精确可靠。电池外包蓝膜清晰可见, 说明热失控时未发生整块电池的剧烈燃烧。此外, 电池之间的白色隔条没有融化, 表明热失控蔓延得到了有效抑制, 充分验证了浸没式热管理较佳的散热性能。

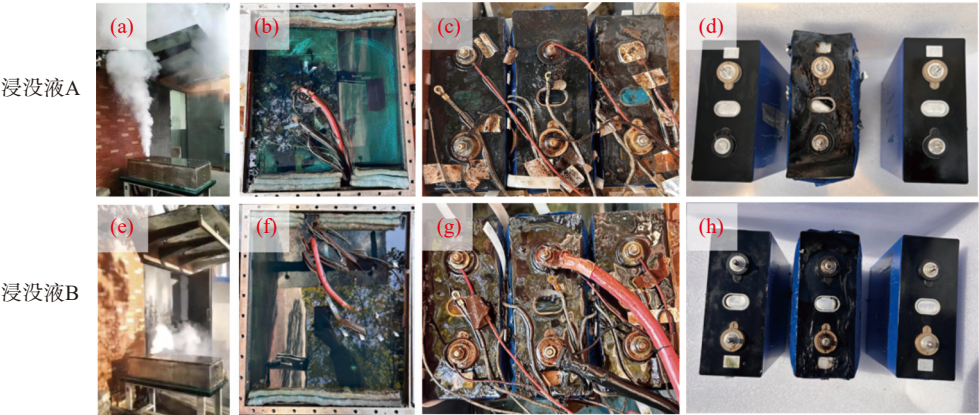


图 9 不同浸没液下 280 Ah 电池模组热失控实况图

Fig.9 Live image of thermal runaway of 280 Ah battery module under different immersion fluids

进一步观察每个电池的残骸发现, B1 和 B3 的防爆阀没有破坏和开启的迹象, 电池结构完整无鼓包, 用万用表测得 B1 和 B3 电池的电压均为 3.3 V 左右, 表明这两块电池未发生热失控, 即浸没液 A 和 B 均对电池模组热失控蔓延进行了有效抑制。

总体来看, 浸没液 B 相对于浸没液 A, 电池 B1、B2、B3 最高温度的最大差值为 17.4 ℃。其中, 失控电池 B2 的最大温度下降了 12.9 ℃。同时, 浸没液 B 在延缓电池热控上也有很好的表现。在电池 B2 防爆阀开启后, 与浸没液 A 相比, 浸没液 B 可延缓电池热失控 150 s, 延长电池失控的孕育阶段 16.5%。这是因为浸没液非流动状态下, 浸没液 B 的比热容和导热系数均大于浸没液 A, 比热容较大的浸没液能够在电池热失控过程中吸收更多的热量, 而温度上升较少, 这在一定程度上可以降低电池周围的温度变化幅度, 选择具有较大比热容的浸没液, 能够有效缓解电池热失控过程中产生的高温累积, 延缓电池温度急剧上升的时间, 抑制热失控触发的时间窗口。同时导热系数越高, 浸没液越能够迅速将电池内部的热

表 4 不同电池关键温度点变化情况  
Tab.4 Variation of critical temperature points of different batteries

| 浸没液种类 | 电池编号 | 热失控 | 最高温度/℃ | 最高温度时间/s | 最高温度位置 |
|-------|------|-----|--------|----------|--------|
| A     | B2   | 触发  | 249.6  | 1836     | B2-T5  |
|       | B3   | —   | 173.9  | 1925     | B3-T9  |
|       | B1   | —   | 195.6  | 1834     | B1-T2  |
| B     | B2   | 触发  | 236.7  | 2255     | B2-T5  |
|       | B3   | —   | 185.7  | 2189     | B3-T9  |
|       | B1   | —   | 178.2  | 2300     | B1-T2  |

量传导至周围环境, 避免热量在电池内部局部累积, 从而降低电池的整体温度, 减缓热失控的扩散速度。在实验中, 浸没液 B 相对于浸没液 A, 在热失控过程中, 能够更高效地传导热量, 避免热量局部集中, 减缓了热失控的传播。

3.2 电池间距

针对 280 Ah 的电池模组, 浸没液 A 的入口温度为 25 ℃, 流量设置为 2.0 L/min。分别研究电池间距为 1.5 mm 和 2.0 mm 时, 电池模组过充电热失控传播的影响。

3.2.1 电池电压

根据充放电仪监测的电压数据, 绘制得到电池电压变化曲线, 如图 10 所示。两组实验过充电 B2 分别在过充 60.7 Ah(1.5 mm 间距)和 74.6 Ah(2 mm 间距)后, B2 电池电压值达到 16.39 V(1.5 mm 间距)和 16.39 V(2 mm 间距)时, 中间电池 B2 发生热失控, 电压均在 125 s 内降低至 0 V, 但 B1 和 B3 电池的电压仍维持在 3.3 V 附近, 未发生热失控蔓延。

3.2.2 电池表面温度

电池模组的温升曲线如图 11 所示, 显示了不

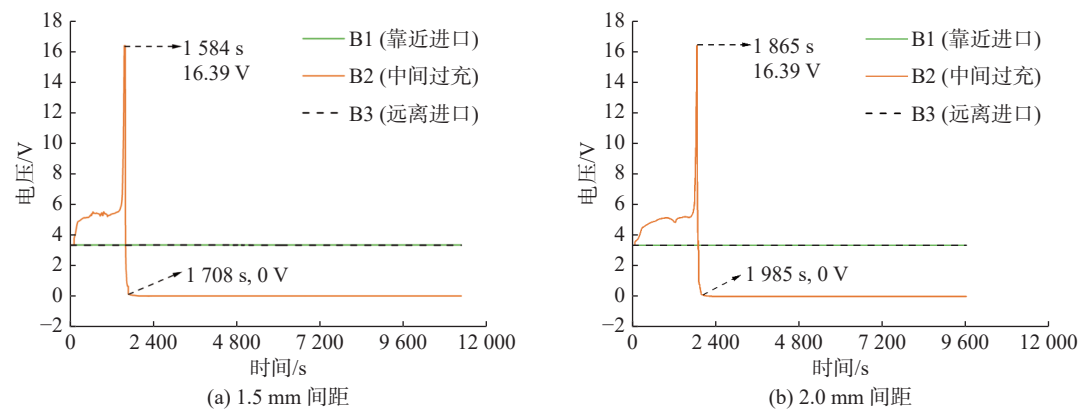


图 10 不同电池间距热失控模组实验时电池电压变化曲线

Fig.10 Battery voltage change curves during thermal runaway module experiments with different cell spacings

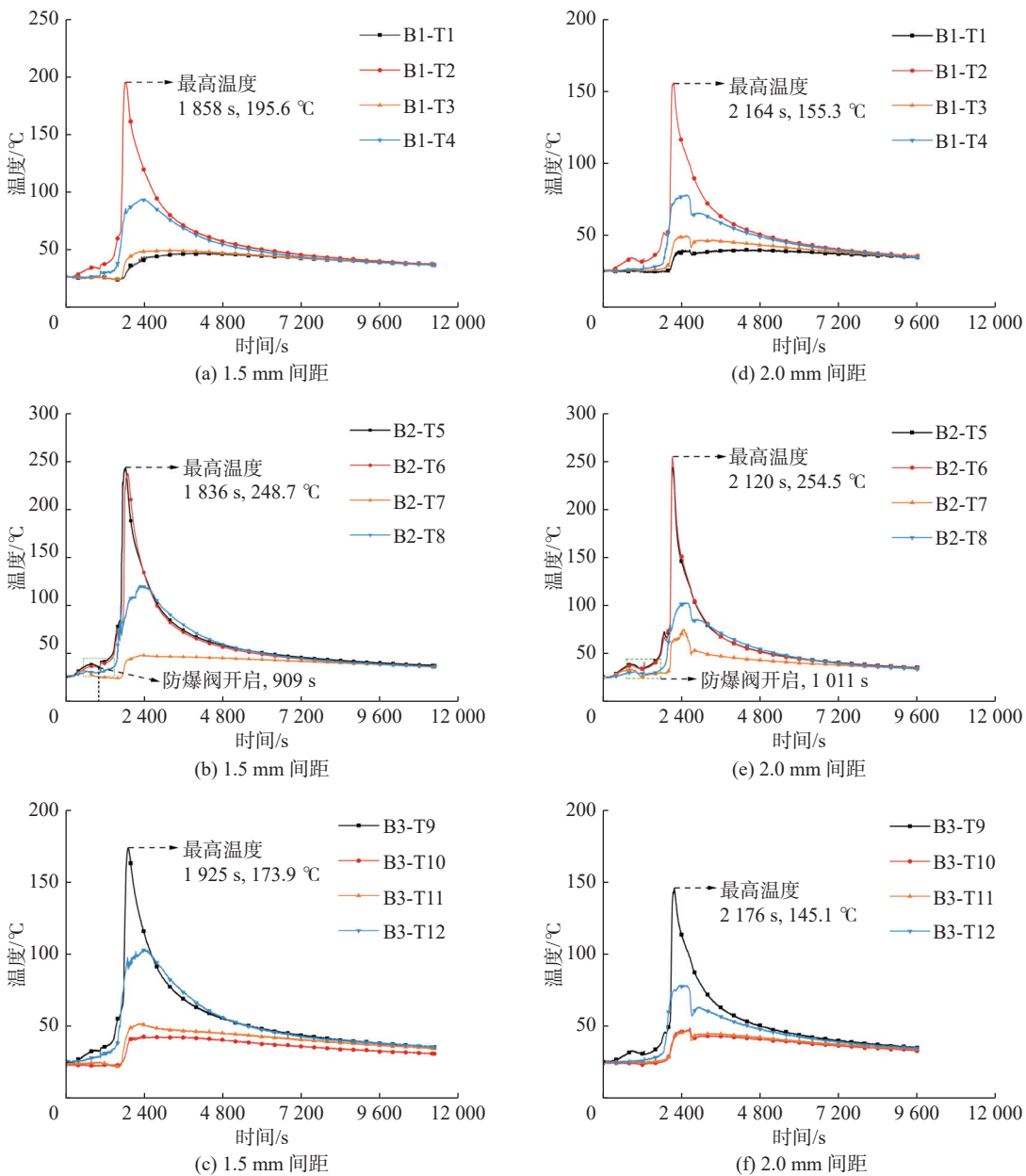


图 11 不同电池间距电池模组热失控温度变化曲线

Fig.11 Thermal runaway temperature variation curves of battery modules with different cell spacing

同电池间距对热传导行为的影响。对于 1.5 mm 间距(图 11(b)), B2 电池的防爆阀在 909 s 时开启, 伴随少量白色气体喷出。继续过充后, B2 电池温度在 1836 s 时达到峰值 248.7 ℃, 最高温度位于大面中心点(B2-T5)。而在 2.0 mm 间距(图 11(e)), 防爆阀开启时间延迟至 1011 s, 最高温度则在 2120 s 时达到 254.5 ℃(B2-T6)。这一现象表明, 增大电池间距可以减缓热量的积累和传递。

B3 电池(靠近 B2 侧, 测温点 B3-T9)的温度在 1925 s(1.5 mm 间距)和 2176 s(2.0 mm 间距)时, 分别达到 173.9 ℃ 和 145.1 ℃(图 11(c)和图 11(f)), 但未触发热失控。这表明, 适当的电池间距有助于延缓热量传播, 降低邻近电池的热失控风险。

同样, B1 电池(监测点 B1-T2)的温度在 1834 s(1.5 mm 间距)和 2164 s(2.0 mm 间距)时, 分别达到 195.6 ℃ 和 155.3 ℃, 显示出其温度变化较 B2 电池低。B1 和 B3 电池的温度均低于 200 ℃(1.5 mm 间距)和 160 ℃(2.0 mm 间距), 证明增大电池间距能有效抑制热失控的蔓延。

总的来看, 电池间距对热传递路径的影响显著, 较大的间距有效减少了电池间的热传递强度, 从而增强了电池模块的安全性。关键温度点的变化详见表 5。

表 5 不同电池关键温度点变化情况

Tab.5 Variation of critical temperature points of different batteries

| 电池间距   | 电池编号 | 热失控 | 最高温度/℃ | 最高温度时间/s | 最高温度位置 |
|--------|------|-----|--------|----------|--------|
| 1.5 mm | B2   | 触发  | 248.7  | 1836     | B2-T5  |
|        | B3   | —   | 173.9  | 1925     | B3-T9  |
|        | B1   | —   | 195.6  | 1834     | B1-T2  |
| 2.0 mm | B2   | 触发  | 254.5  | 2120     | B2-T6  |
|        | B3   | —   | 145.1  | 2176     | B3-T9  |
|        | B1   | —   | 155.3  | 2164     | B1-T2  |

3.2.3 热失控现象

电池热失控后, 对实验箱拆箱可见, 温度传感器和电池外包蓝膜均未发生破损, 依旧牢固地粘贴在电池表面, 说明所测得的温度数据可靠, 热失控时未发生整块电池的剧烈燃烧。同时, 电池之间的白色隔条没有融化, 说明热失控蔓延得到了有效抑制, 这些都体现出浸没式热管理具有较佳的热性能。

为了进一步确定 B1、B3 电池情况, 拆箱后对

其进行观察。其中, B1、B3 的防爆阀没有破裂和开启的迹象, 电池本身完整无鼓包, 说明这两块电池没有发生热失控。总体来看, 电池间距 2.0 mm 相对于 1.5 mm, 电池 B1、B2、B3 最高温度的最大差值为 40.3 ℃。其中, 失控电池 B2 的最大温度提高 5.8 ℃, 电池 B1 的最大温度降低了 40.3 ℃, 电池 B3 的最大温度降低了 28.8 ℃。在电池模组中, 热失控往往伴随着热量的快速传递。电池间距较小时, 热量更容易从一个电池传导到邻近的电池, 增加了热失控传播的风险。在热失控过程中, 电池会经历迅速升温。较小的电池间距会导致相邻电池之间的温度梯度较低, 热量能迅速在多个电池之间传递, 使得多个电池几乎同时受到高温影响。而增大电池间距能够增加电池之间的温度梯度, 减缓高温向其他电池的传递速度。同时电池在热失控过程中会释放大量热量, 而相邻电池之间的热耦合效应会加剧这一现象。电池间距较小时, 热耦合效应明显, 多个电池可能会在短时间内同时进入热失控状态。通过增大电池间距, 可以有效减少这种热耦合效应, 从而控制热失控的传播趋势, 使得相邻电池可以保持相对较低的温度, 防止大范围的热失控传播。这些因素共同作用, 能够显著提高电池模组的热安全性。

4 结 论

本研究以大容量 280 Ah 磷酸铁锂电池储能模组为研究对象, 系统开展了非浸没电池模组和浸没式模组的热失控实验, 对比了不同浸没液种类和电池间距对热失控的影响。研究得出了以下主要结论:

a. 浸没式液冷对热失控的抑制作用显著: 非浸没工况下, 电池模组发生了热失控蔓延, 侧面温度达到较高值。而在浸没工况下, 电池模组未发生热失控蔓延, 且侧面最高温度降低了 85%。实验表明, 浸没式冷却技术能够有效抑制热失控的传播, 同时提高了电池模组的整体完整性。这一结果为电池储能系统的热管理提供了新的解决方案。

b. 不同浸没液对热失控的影响存在差异: 浸没液 B 由于具备较大的比热容和导热系数, 在抑制电池热失控温度上表现出更优的效果, 能够更好地控制电池的最高温度并延缓热失控的触发时间。相比之下, 浸没液 A 的热性能相对较弱, 提

示未来储能系统设计中浸没液选择的优化具有重要意义。

c. 电池间距对热失控传播的影响：不同电池间距下，电池模组的热失控行为有所不同。虽然在B2位置下，1.5 mm和2.0 mm间距的最高温度相差不大（248.7℃与254.5℃），但1.5 mm间距时的B1、B3电池温度明显高于2.0 mm间距，最大温度差达到40.3℃。这表明，电池间距是影响热失控传播的重要因素，应在设计中加以优化，以降低热失控风险。

尽管本研究揭示了浸没液冷却在防止热失控传播方面的潜力，但实验主要集中于较短时间内的热失控过程。后续可以考虑更多实际应用工况，如快速充放电、环境温度波动等对浸没液冷却效果的影响，以验证其在大规模储能系统中的广泛适用性，以及在不同电池间距和浸没液组合的基础上，研究如何进一步优化储能系统的热管理方案，包括浸没液冷却与其他冷却技术的协同应用，以最大限度提升系统的热安全性和可靠性。

参考文献：

[1] WANG Q S, PING P, ZHAO X J, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 210–224.

[2] 缪平, 姚祯, LEMMON J, 等. 电池储能技术研究进展及展望 [J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(3): 670–678.

[3] 李建林, 梁忠豪, 李雅欣, 等. 锂电池储能系统建模发展现状及其数据驱动建模初步探讨 [J]. *油气与新能源*, 2021, 33(4): 75–81.

[4] FENG X N, OUYANG M G, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review[J]. *Energy Storage Materials*, 2018, 10: 246–267.

[5] 中国能源研究会储能专业委员会, 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2024[R]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2024.

[6] 张青松, 刘添添, 白伟. 加热方式对锂离子电池热失控行为影响 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(9): 44–51.

[7] 尤万龙, 梅自强, 丁林祥, 等. 锂离子电池比能量与针刺结果相关性探究 [J]. *电子质量*, 2023, (3): 40–43.

[8] VALENCIA-MOLINA M C, CHALCO VERA J, LOAIZA S, et al. Carbon dioxide and nitrous oxide emissions from a typical sugarcane soil in the Cauca river valley, Colombia[J]. *Sugar Tech*, 2023, 26(1): 171–179.

[9] WRZESINSKI J A, KOLACZKOWSKI A, MACIEJEWSKI P, et al. A study on explosion hazards connected with a spontaneous thermal decomposition of ammonium nitrate(V) emulsions. Part 2. Kinetics of thermal decomposition process, estimating the risk of thermal explosion[J]. *Przemysl Chemiczny*, 2012, 91(2): 173–177.

[10] LI L, JU X Y, ZHOU X D, et al. Experimental study on thermal runaway process of 18650 lithium-ion battery under different discharge currents[J]. *Materials*, 2021, 14(16): 4740.

[11] XIANG H F, WANG H F, CHEN C H, et al. Thermal stability of LiPF<sub>6</sub>-based electrolyte and effect of contact with various delithiated cathodes of Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 191(2): 575–581.

[12] LIU X Y, ZHOU Z F, WU W T, et al. Modelling for the mitigation of lithium ion battery thermal runaway propagation by using phase change material or liquid immersion cooling[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52: 103749.

[13] 王志, 何昌林, 史波波, 等. 外部加热和过充下梯次利用锂离子电池模组热失控传播特性 [J]. *消防科学与技术*, 2023, 42(12): 1625–1629, 1635.

[14] ZHANG Y, PENG W, LIU X Y, et al. Experimental study on suppression of thermal runaway in lithium-ion battery by mixed particle size water mist[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 179: 189–198.

[15] 朱晓庆, 王震坡, 王聪, 等. 三元锂离子动力电池过充行为特性实验研究 [J]. *汽车工程*, 2019, 41(5): 582–589.

[16] JIA Z Z, QIN P, LI Z, et al. Analysis of gas release during the process of thermal runaway of lithium-ion batteries with three different cathode materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104302.

[17] QIN P, SUN J H, WANG Q S. A new method to explore thermal and venting behavior of lithium-ion battery thermal runaway[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 486: 229357.

(编辑：董 伟)