



容量与并联组合方式对层状氧化物钠离子电池过热热失控特性影响研究

陈霖宇^{1,2}, 李娜¹, 周屈兰¹, 吴晨阳¹, 和越洋^{1,2}, 刘亚男², 张士前²

(¹西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; ²中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122)

摘要: 钠离子电池因其成本和资源优势, 被视为储能场景的理想技术, 但热失控风险仍是其应用的核心瓶颈之一。本研究选取 75 Ah、210 Ah 方形铝壳层状氧化物钠离子单体电池及 3 块 75 Ah 并联的等效容量电池为研究对象, 系统探究了容量与并联组合方式对电池过热热失控特性的影响。结果表明, 210 Ah 单体电池的热失控起始温度为 276.0℃, 相较于 75 Ah 的 266.5℃ 有提升, 大容量单体电池呈现更强的热耐受性。其最高温度由 75 Ah 的 609.3℃ 升至 946.3℃, 内蔓延速率由 1.365 mm/s 增至 1.553 mm/s, 表观产气量增至 75 Ah 的 4.3 倍, 而最大温升速率则由 75 Ah 的 2349℃/min 降至 1386℃/min。两种容量单体电池的产气均呈现出显著可燃性, 但均未发生喷气燃烧。并联等效容量电池则表现为逐级触发且末端恶化的热失控特征, 前段电池热失控可持续加热后段电池, 并由前段电池的顶盖材料燃烧火焰点燃末端电池喷气, 形成强射流燃烧, 最大放热速率达 77.754 kW; 其产气规模与 210 Ah 单体电池接近, 但组分特征由单体电池产气的富氢转向富二氧化碳。综合危害评估结果显示, 并联等效容量电池危害最高, 其次为 210 Ah 单体电池, 75 Ah 单体电池最低。研究结果表明, 容量主要影响单体电池热失控的触发门槛与危害强度, 而并联组合方式则显著改变热失控演化路径并放大燃烧危害。研究结果可为钠离子电池储能系统的安全设计与应用提供数据支撑。

关键词: 钠离子电池; 热失控传播; 产气特性; 热释放特性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0092

中图分类号: TQ 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 07-2734-16

Effects of capacity and parallel configuration on overheating-induced thermal runaway characteristics of layered oxide sodium-ion batteries

CHEN Linyu^{1,2}, LI Na¹, ZHOU Qulan¹, WU Chenyang¹, HE Yueyang^{1,2}, LIU Yanan²,
ZHANG Shiqian²

(¹School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; ²China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: Sodium-ion batteries are regarded as an ideal technology for energy-storage applications because of their cost and resource advantages. However, the risk of thermal runaway remains a major bottleneck to their deployment. This study investigates 75 Ah and

收稿日期: 2026-01-28; 修改稿日期: 2026-04-22。

基金项目: 中建股份科技研发课题 (CSCEC-2023-Z-2)。

第一作者: 陈霖宇 (2001—), 男, 博士研究生, 研究方向为电池储能安全, E-mail: chenlinyu@stu.xjtu.edu.cn; 通信作者: 张士前, 高级工程师, 研究方向为建筑储能及建筑工业化, E-mail: zhangshiqian@cscec.com。

引用本文: 陈霖宇, 李娜, 周屈兰, 等. 容量与并联组合方式对层状氧化物钠离子电池过热热失控特性影响研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(7): 2734-2749.

Citation: CHEN Linyu, LI Na, ZHOU Qulan, et al. Effects of capacity and parallel configuration on overheating-induced thermal runaway characteristics of layered oxide sodium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(7): 2734-2749.

210 Ah prismatic aluminum-cased, layered-oxide, sodium-ion single cells, along with an equivalent-capacity pack formed by connecting three 75 Ah cells in parallel, aiming to clarify the effects of the cell capacity and parallel configuration on overheating-induced thermal runaway under external one-sided heating. The onset temperature for thermal runaway increases from 266.5°C for the 75 Ah cell to 276.0°C for the 210 Ah cell, indicating that the larger-capacity cell exhibits greater tolerance to external heating. The maximum temperature increases from 609.3 to 946.3°C, the internal propagation rate increases from 1.365 to 1.553 mm/s, and the apparent gas yield is 4.3 times higher than that of the 75 Ah cell, whereas the maximum rate of temperature-rise decreases from 2349°C/min for the 75 Ah cell to 1386°C/min for the 210 Ah cell. The gases released from both single cells are highly flammable, but no jet-fire combustion occurs. In contrast, the equivalent-capacity parallel pack exhibits stepwise triggering and progressively more severe thermal runaway. Thermal runaway of the preceding cells continuously heats the subsequent cells, and the vent jet of the last cell is ignited by flames from the cover materials of the preceding cells, resulting in intense jet combustion, with a peak heat-release rate of 77.754 kW. The gas-generation scale is close to that of the 210 Ah single cell, whereas the gas composition shifts from hydrogen-rich to carbon-dioxide-rich. Comprehensive hazard assessment further shows that the equivalent-capacity parallel pack presents the highest hazard, followed sequentially by the 210 Ah and 75 Ah cells. These results indicate that the cell capacity is the main factor triggering the threshold and hazard intensity of thermal runaway in single cells, while the parallel configuration significantly alters the pathway for the evolution of thermal runaway and amplifies the combustion hazard. This study provides useful data for designing and implementing safe energy-storage systems employing sodium-ion batteries.

Keywords: sodium-ion battery; thermal runaway propagation; gas generation characteristics; thermal release characteristics

“双碳”目标背景下, 储能技术作为支撑新能源稳定应用的关键环节, 其重要性日益凸显^[1]。钠离子电池因其资源丰富、成本低廉、低温性能优异等独特优势, 被认为是锂离子电池在储能场景、低速电动车等领域有力的替代技术^[2-3]。

随着钠离子电池单体容量的增大和模组集成规模的扩展, 其安全性问题, 特别是由极端滥用触发的热失控 (thermal runaway, TR), 已成为制约其大规模应用的核心瓶颈之一^[4-5]。同时, 钠离子电池不同正极体系的热失控行为差异显著。聚阴离子体系依托更稳固的多阴离子骨架, 一般表现出高于层状氧化物 (以下简称为“层氧”) 体系的热稳定性。层氧体系虽具有较高的能量密度, 但往往伴随着更弱的正极热稳定性, 其热安全问题更值得重点关注。一些研究者对层氧钠离子电池的热失控特性进行了探索。Li 等^[6]发现 185 Ah 层氧钠离子电池发

生热失控时, 产气中的 H_2 占比随荷电状态 (state of charge, SOC) 升高而显著上升, 燃烧爆炸风险同步提高; 但剧烈产气可有效耗散电池热量, 且将可燃气体与火花和 O_2 隔离, 引发喷气火焰的自熄灭。马畅等^[7]对比分析了 180 Ah 钠离子电池与磷酸铁锂 (LFP) 和三元锂 (NCM) 电池的热失控燃烧差异, 发现钠电的燃烧危害介于 NCM 和 LFP 之间, NCM 的热释放速率和产烟速率最大, 而 LFP 的热释放总量最多。Yu 等^[8]系统考察了过充程度对层氧钠离子电池热失控特性的影响, 结果表明, 随着 SOC 升高, 热失控的触发温度降低、持续时间缩短, 且火焰温度与热释放量显著增加, 150% SOC 具有最高热失控风险, 110% SOC 产生最强火焰危害。吴静云等^[9]研究发现不同滥用条件下层氧钠离子电池热失控的触发机理与演变过程存在本质差异。这些工作为理解层状氧化物钠离子电池的

热危险性提供了宝贵的数据，但同材料体系的大、小容量单体电池的热失控关键特征参数存在差异，即对“容量效应”尚缺乏系统性地对比研究。同时，对单个大容量单体电池与其近似容量的并联等效电池组在热失控触发与蔓延特性上的差异，也缺乏系统性地对比研究。

本研究选取 75 Ah、210 Ah 两种容量的层状氧化物钠离子电池以及由 3 块 75 Ah 单体电池并联构成的等效容量电池（225 Ah）为研究对象，采用外部加热触发热失控，分析不同条件下的热失控行为，揭示容量对热失控特征温度、产气特性等关键参数的影响，阐明等效容量下并联组合方式对热蔓延路径和整体危害的影响，为钠离子电池储能系统的安全设计、热管理策略优化及风险评估提供关键的实验数据与参考。

1 实验设计

1.1 实验样品

本工作选取了两种容量（210 Ah、75 Ah）的商用钠离子电池，详细参数见表 1。两款电池均为“Z”字形叠片工艺，正、负极片沿着大表面垂直方向（横向）多层交叉堆叠，电池侧面与底面仅是隔膜包络极片边缘的累计组成面，因此将横向作为热失控特征方向，前后大表面为热失控特征面，如图 1 所示。实验前需进行预处理，所有样品均在经历 3 次完整充放电循环后，再充电至 100% SOC。

1.2 实验装置与测试方案

等效容量电池焊接并联 3 块 75 Ah 单体电池（225 Ah），与 210 Ah 单体电池形成近似容量。通过钢制夹具对单体电池和电池组进行额定预紧力固

表 1 75 Ah 和 210 Ah 的钠离子电池规格参数

Table 1 Parameters for 75 Ah and 210 Ah cells

规格参数	75 Ah 单体电池	210 Ah 单体电池
正极材料	层状氧化物	层状氧化物
负极材料	硬碳	硬碳
标称电压/V	3.0	3.0
工作电压/V	1.5~3.9	1.5~3.9
电池尺寸/(mm×mm×mm)	160.3×115.5×50.5	173.7×204.6×73
重量/g	1750	4700



图 1 电池内部叠芯示意图

Fig. 1 Schematic of stacked electrode assembly inside cell

定，云母加热板对前表面进行单面加热，如图 2 所示。并联电池组的受加热电池命名为#1，往后依次为#2、#3。本研究采用外部加热触发热失控，整体实验系统如图 3 所示。实验在防爆室中进行，以保障人员安全。电池电压、表面温度和喷气温度由 PC 数采系统在线记录，热失控行为图像由摄影机和红外成像仪进行采集。热失控气体分析系统负责热失控产气的捕集分析，其包含气体采样管与气体分析仪。实验以 5℃/min 进行恒速率加热，当受热表面温升速率超过 60℃/min 并持续 10 s 时，判定热失控发生，结束加热。

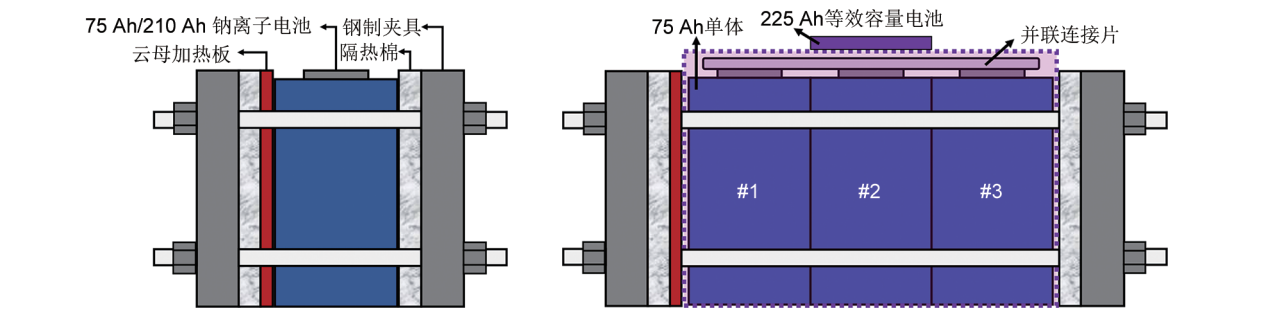


图 2 单体电池与等效容量电池布置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup for single-cell and equivalent-capacity pack

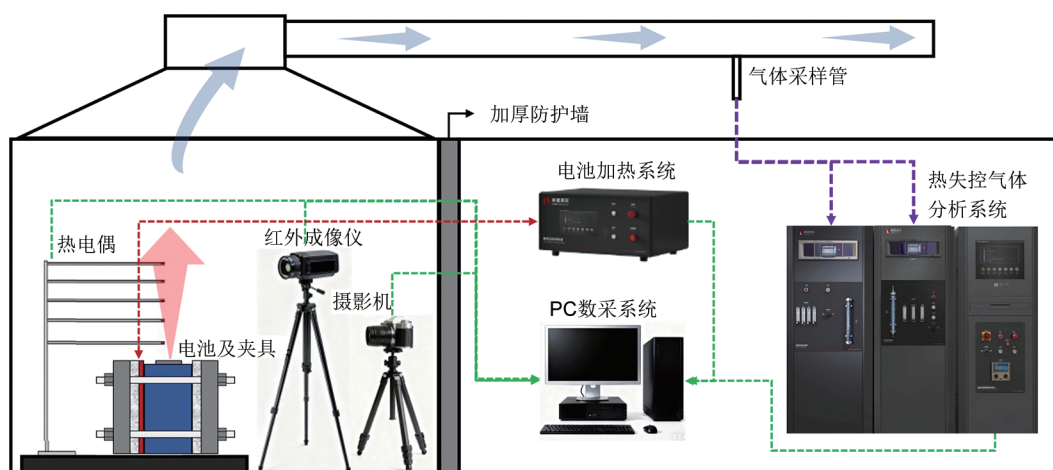


图3 热失控实验室示意图

Fig. 3 Schematic of facility for thermal runaway test

2 结果与讨论

2.1 容量效应下的单体电池热失控特性分析

2.1.1 过热热失控行为

图4为两种容量电池在100% SOC下的热失控关键行为时序图。结合热电参数和行为特征，热失控可划分为4个阶段^[10]：恒速加热阶段、开阀泄压阶段、热失控阶段与冷却阶段。

开始阶段，电池被加热系统加热，以恒定速率逐步升温。固体电解质界面（solid electrolyte interface, SEI）首先发生分解，造成一系列链式反应^[11-12]。活性电极、隔膜、电解液、嵌入钠之间

大量反应产气，导致电池内部压力逐步升高。当压力达到安全阀阈值时，电池开阀泄压，并有部分尚未蒸发或反应的液态电解液伴随排气喷出而溅射。该阶段往往持续时间较短，数秒后即进入热失控阶段。热失控期间，两款单体电池均出现剧烈喷气和巨大噪声，但并未发生射流燃烧。随着内部材料消耗，电池产气衰减，表面温度逐渐升至最大值，热失控阶段结束，进入冷却阶段。热失控后的电池形貌如图5所示，由于剧烈产气、产热，表面包覆的绝缘膜均已熔化，铝壳出现鼓包和不同程度的破损。210 Ah电池更高的表面温度导致其受热前表面出现大规模的铝壳熔化，裸露出其内部的失效叠芯。

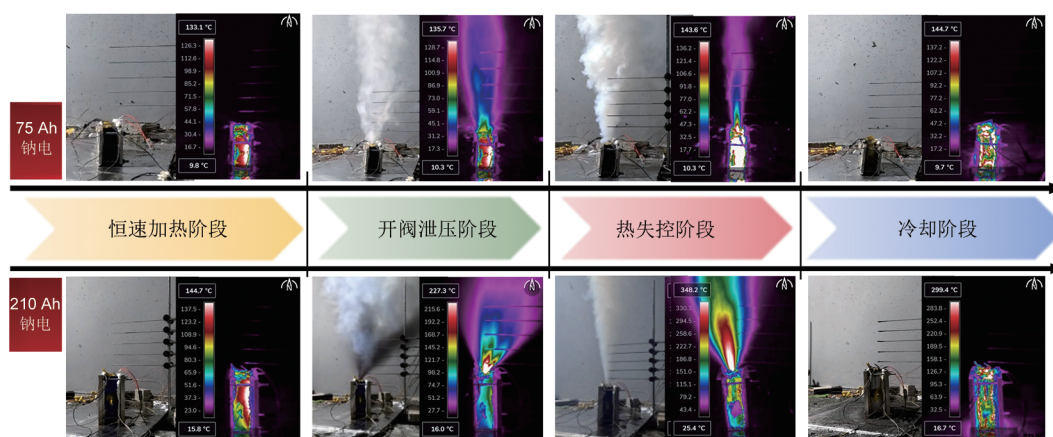


图4 75 Ah与210 Ah的热失控时序轴图

Fig. 4 Thermal runaway timeline for 75 Ah and 210 Ah cells

需要注意的是，在产气行为消失后的升温过程中，210 Ah电池的顶盖在表面高温下出现了持续47 s的火焰（图6），顶盖材料在燃烧中消耗殆尽，

露出下层的变形铝壳。由于小容量单体电池的表面温度更低且热失控高温持续时间更短，这种现象在75 Ah电池中并未发生，其顶盖材料呈熔化状黏附

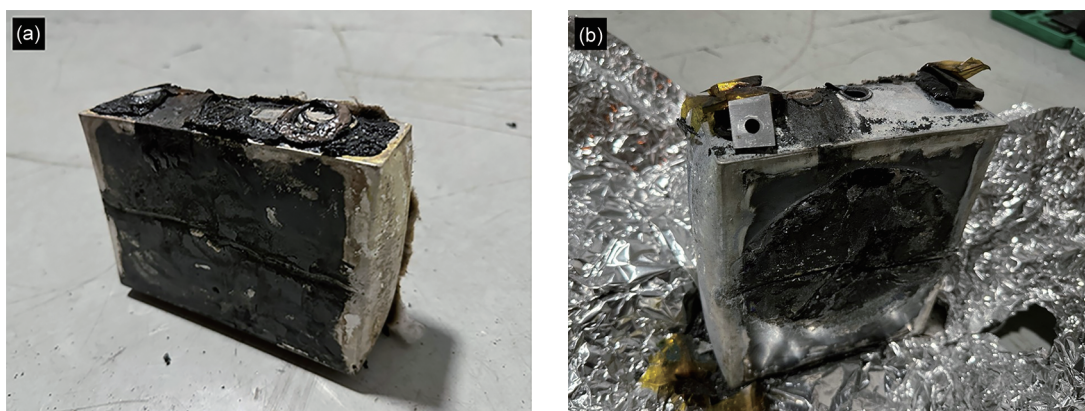


图5 热失控后的电池形貌: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah
Fig. 5 Post-test appearance of cell: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

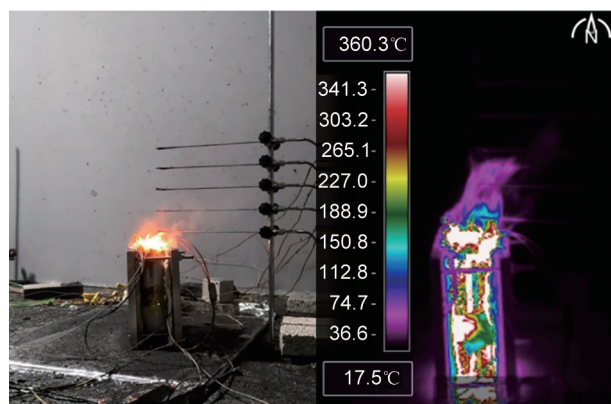


图6 210 Ah顶盖燃烧的红外图像
Fig. 6 Infrared images of cover-plate burning in 210 Ah cell

于顶端铝壳。

2.1.2 热失控热电特性

热失控开始温度 T_{TR} 和开始时刻 t_{TR} 是表征电池对外界输入热量耐受程度的重要指标, 更高的 T_{TR} 和更晚的 t_{TR} 代表电池更强的外加热耐受性^[13]。图7呈现了75 Ah和210 Ah电池的热失控热电响应曲线, 其热失控相关特征参数如表2所示。在相同加热条件下, 210 Ah电池受热表面的 t_{TR} 比75 Ah电池延迟175 s, T_{TR} 比75 Ah电池高9.5°C, 其需要吸收更多的热量才会达到热失控, 这表明大容量单体电池对外部热量的耐受性优于小容量单体电池。

由于热失控触发方式为单面加热, 且受内部双层叠芯结构影响, 两款电池均存在热失控内蔓延过程, 热失控从受热面内层的极片叠层逐步向后表面传播, 因此前、后表面的热失控起始时刻存在较大时差。为量化内蔓延特性^[14-15], 定义热失控内蔓延速率 (U_{TRP} , mm/s) 为

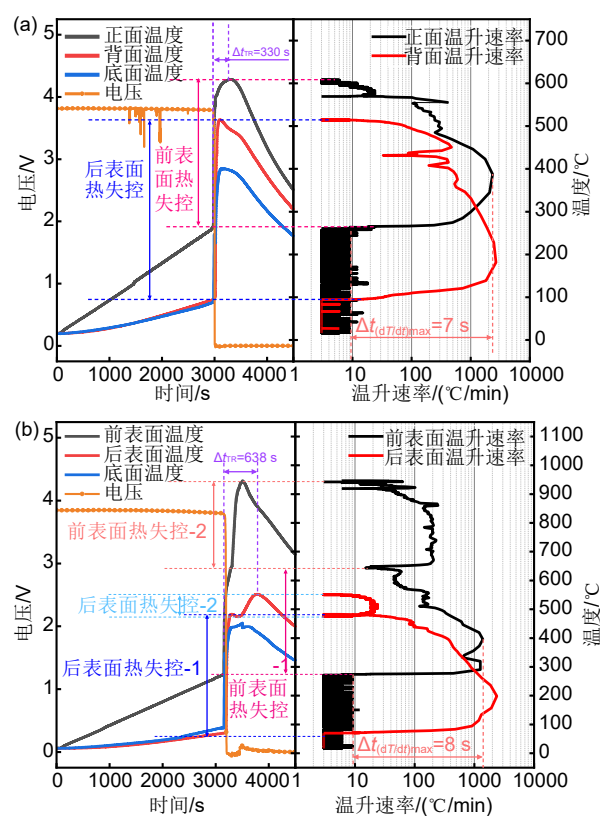


图7 热失控热电变化与温升速率曲线: (a) 75 Ah;
(b) 210 Ah
Fig. 7 Thermal-electrical response and temperature-rise-rate curves during thermal runaway: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

$$U_{TRP} = \frac{x}{\Delta t_{TRP}} \quad (1)$$

式中, x 为电池厚度, mm; Δt_{TRP} 为前、后表面热失控起始时差, s。

如图8所示, 75 Ah和210 Ah电池的 Δt_{TRP} 分别为37 s和47 s, 对应的 U_{TRP} 分别为1.365 mm/s、

表 2 两款单体电池的前表面热失控特征参数
Table 2 Characteristic front-surface thermal runaway parameters of the two cells

特征参数	75 Ah 单体电池	210 Ah 单体电池
热失控开始温度 $T_{TR}/^{\circ}\text{C}$	266.5	276.0
热失控开始时刻 t_{TR}/s	2974	3149
电压跳水温度 $T_{drop}/^{\circ}\text{C}$	541.2	580.8
电压跳水时刻 t_{drop}/s	3002	3206
最高温度 $T_{max}/^{\circ}\text{C}$	609.3	946.3
最大温升速率 $(dT/dt)_{max}/(^{\circ}\text{C}/\text{min})$	2349	1386
热失控持续时间 $\Delta t_{TR}/\text{s}$	330	638
热失控内蔓延时间 $\Delta t_{TRP}/\text{s}$	37	47
内蔓延速率 $U_{TRP}/(\text{mm}/\text{s})$	1.365	1.553

1.553 mm/s。210 Ah 电池的内蔓延速率比 75 Ah 高出 13.8%，这是由于大容量单体电池的表面积/容量比更小（210 Ah 电池为 $5.81 \text{ cm}^2/\text{Ah}$ ，75 Ah 电池为 $8.58 \text{ cm}^2/\text{Ah}$ ），散热困难导致内部热量积累更显著，形成更大的内部温度梯度，且局部高温也加速了热失控反应链的传播。同时，更高的 T_{TR} 反映了其内部触发需要更多的能量，触发后的累积能量会以更集中的形式释放，推动热失控更快地蔓延。这种容量和厚度造成的热失控内蔓延与传播速率差异，即速率与厚度成正比，在模组层级也同时存在^[16]。

虽然 210 Ah 电池 U_{TRP} 更高，但更大的厚度（比 75 Ah 电池厚 44.6%）使其表现出更加持久的热失控过程。210 Ah 电池的电压从正常值下降到最低点的持续时间 Δt_{drop} 为 34 s，比 75 Ah 电池（28 s）高出 21.4%。这是由于 210 Ah 电池的内蔓延距离更长，未发生热失控的后部叠芯仍可提供电压。210 Ah 电池的前、后表面更加明显的“双峰状”温度和温升速率响应也代表了更加显著的内蔓延过程。

电池热失控的剧烈程度通常用受加热表面最高温度 T_{max} 和最大温升速率 $(dT/dt)_{max}$ 来描述，分别表征总放热量和最高瞬态放热功率。75 Ah 和 210 Ah 电池前表面热失控最高温度 T_{max} 分别为 609.3°C 和 946.3°C ，而后表面分别为 515.0°C 和 552.0°C 。75 Ah 电池的热失控持续时长 Δt_{TR} （330 s）也仅为 210 Ah 电池（638 s）的 51.7%。这是由于大容量电池有着更多的含能材料，反应可释放热量更大，从而在更长时间尺度上达到更高的峰温。

但从最高瞬态放热功率来看，210 Ah 电池却展现出相对较低的热失控剧烈程度。75 Ah 电池前

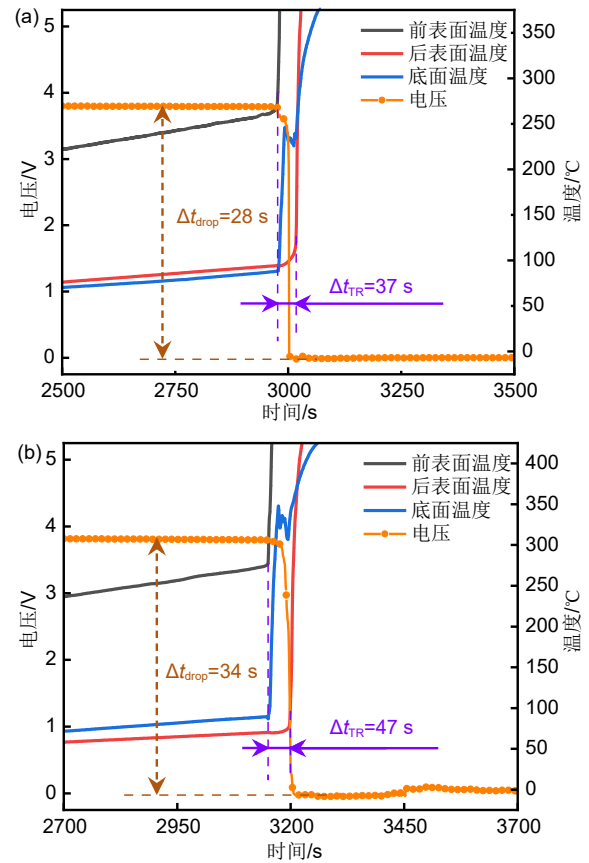


图 8 内蔓延温度特性图：(a) 75 Ah；(b) 210 Ah
Fig. 8 Temperature characteristics of internal propagation: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

表面 $(dT/dt)_{max}$ 为 $2349^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，相比 210 Ah（ $1386^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）高出 69.5%。210 Ah 和 75 Ah 电池自热失控开始至最高瞬态放热的发展时长 $\Delta t_{(dT/dt)_{max}}$ 分别为 8 s 和 7 s，远小于各自的内蔓延时长 Δt_{TRP} ，即峰值温升出现时电池除前表面区域外的部分并未进入热失控，故而可认为前表面峰值温升仅由前表面横向极小厚度内区域发生的反应造成。同时，由于电池被隔热棉夹紧，前表面区域的对流散热项在短时尺度上可近似忽略，因此前表面温升可以视作由前表面局部区域与其后方电池内部之间的能量交换所主导^[17]。以 75 Ah 和 210 Ah 电池靠近加热板的前表面薄层（厚度为 δ ，mm）作为控制体，短时内其瞬时温度变化满足局部能量守恒关系^[18]，如式(2)。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{\text{gen, front}}(T, t) - Q_{\text{internal}}(T, t)}{m_{\text{front}} c_p} \quad (2)$$

式中， $Q_{\text{gen, front}}$ 为前表面薄层的放热速率，J/s； Q_{internal} 为该薄层向后的内部传热速率，J/s； m_{front} 为

该局部控制体的质量，kg； c_p 为平均比热容，J/(kg·K)； $m_{\text{front}}c_p$ 为前表面区域的热惯性，J/K。由于210 Ah电池内部体积较大且可作为“热汇”的材料更多，前表面与内部之间形成的温度梯度更大，从而沿厚度方向的导热通量 Q_{internal} 较75 Ah电池更大^[19-20]。局部能量平衡公式中，这相当于前表面薄层产生的部分热量被迅速传入较冷的内部区域，前表面控制体的净热积累（ $Q_{\text{gen, front}}-Q_{\text{internal}}$ ）被削弱。同时，大容量电池前表面薄层的本身质量更大，热惯性更强，在同样的净热流输入下难以在短时间内产生同等幅度的温升^[21]。在以上因素共同作用下，尽管210 Ah电池的局部放热过程同样剧烈，甚至总放热量更高，但其热失控初始阶段的前表面 $(dT/dt)_{\text{max}}$ 明显低于75 Ah电池。

为理解层氧钠电的危险性定位，表3罗列了文献报道的锂离子电池热失控关键参数^[26-29]。在近似的外部加热条件下，层氧钠电的热失控危险性总体上高于LFP，但低于NCM。由于磷酸盐骨架具有更强的热稳定性，层氧钠电热失控的剧烈程度通常比LFP更高。但与同为层状氧化物正极的NCM相比，其整体危险性却更低，这可归因于 Na^+ 在负极及电极耦合反应上的不同。层氧钠电一般由硬碳负极界面分解诱发早期热积累，后期高温阶段由正极提供中等强度放热^[22]。而NCM由于层状正极高温结构的失稳释氧以及材料间的强耦合热反应，热失控后更易转入高强度自催化放热阶段，表现出更高的热失控整体剧烈程度^[23]。

表3 过热热失控下典型锂离子电池的受热面特征参数（外部单面加热）

Table 3 Characteristic front-surface thermal runaway parameters of typical lithium-ion batteries (external single-side heating)				
特征参数	LFP ^[24]	LFP ^[25]	NCM ^[26]	NCM ^[27]
容量/Ah	86	50	50	117
加热功率/W	500	500	1000	600
$T_{\text{TR}}/^\circ\text{C}$	—	236	115.2	251
$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	373.1	359.1	941	644
$(dT/dt)_{\text{max}}/(^\circ\text{C}/\text{min})$	396	222	—	3774

2.1.3 热失控产气特性

图9展示了电池上方的喷气温度分布，两种容量电池的热失控射流沿高度方向均呈现“近场高温、远场衰减”的规律，但幅值差异显著。210 Ah

电池在距安全阀5 cm处的峰值温度高达275.5℃，25 cm处峰值温度也达141.1℃，表明高温射流在25 cm高度范围内仍具有较强的热冲击能力。75 Ah电池在5 cm处的峰值温度仅为126.0℃，且随高度增加的温度衰减更为明显，说明其产气射流的初始热能与动能均显著低于210 Ah电池，对上方空间的热影响范围较为有限。此外，210 Ah电池在热失控后期于5 cm与10 cm处还出现了约153.6℃和74.2℃的第二温度峰，这归因于热失控后期出现的顶盖材料燃烧。

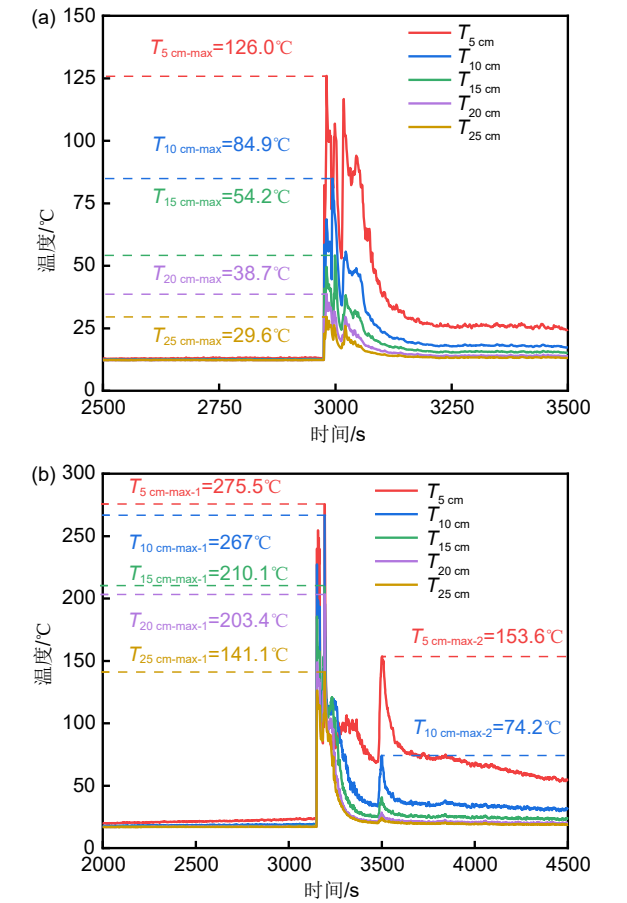


图9 产气射流温度分布：(a) 75 Ah；(b) 210 Ah
Fig. 9 Temperature distribution of vent-jet plume: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

图10给出了产气组分及总体积分数。两种容量电池的主产气均为 H_2 和 CO_2 ，其中 H_2 占比超过50%且在210 Ah中进一步升高，CO与总碳氢化合物（total hydrocarbons, THC）处于5%~8%的次要水平。从反应机理上看， H_2 主要来自电解液和SEI的裂解及极片与电解液/隔膜的还原反应， CO_2 和

CO 则与有机碳酸酯、电极黏结剂和隔膜的热分解有关, THC 反映了未完全裂解的电解液有机蒸气。因此, 210 Ah 电池中更大的 H_2 生成量和生成比, 表明了其热失控过程中更为显著的还原反应和可燃性气体放气过程。基于排气管道积分结果, 75 Ah 电池的总产气量为 173.19 L, 而 210 Ah 电池总产气量达到 749.76 L, 约为前者的 4.3 倍, 显著高于两者容量比 (2.8)。具体到各组分, 210 Ah 电池产生的 H_2 体积为 474.37 L, 约为 75 Ah 电池的 4.8 倍; CO_2 约为其 3.5 倍; CO 和 THC 分别约为其 5.5 倍和 3.0 倍。这表明大容量电池在热失控时不仅总能量更高, 且单位容量的材料分解反应程度更深或参与反应的材料比例更大, 导致产气量呈现“超线性”放大。

较高的可燃组分 (H_2 、CO、THC) 占比使得 75 Ah 和 210 Ah 电池的混合产气均呈现可燃性。考虑到 THC 为相对次要组成, 采用保守假设将 THC 视为电池产气的典型烃类 (乙烯 C_2H_4), 利用经验公式 Le Chatelier 定律可计算热失控混合气的爆炸下限 LEL_{mix} , 如式(3)^[28]。

$$LEL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{LEL_i}} \quad (3)$$

式中, x_i 为混合气中可燃组分 i 的体积分数; LEL_i 为可燃组分 i 的爆炸下限。75 Ah 和 210 Ah 电池的热失控混合气 LEL_{mix} 分别为 5.728% 和 5.478%, 表明 210 Ah 电池的产气有着更强的燃爆风险。

图 11 给出了热失控过程的可燃气体浓度变化。75 Ah 电池热失控的总可燃气体体积分数约为 0.16%, 210 Ah 电池则约为 0.58%, 均远低于各自混合气的爆炸下限。因此, 本研究实验条件下, 两

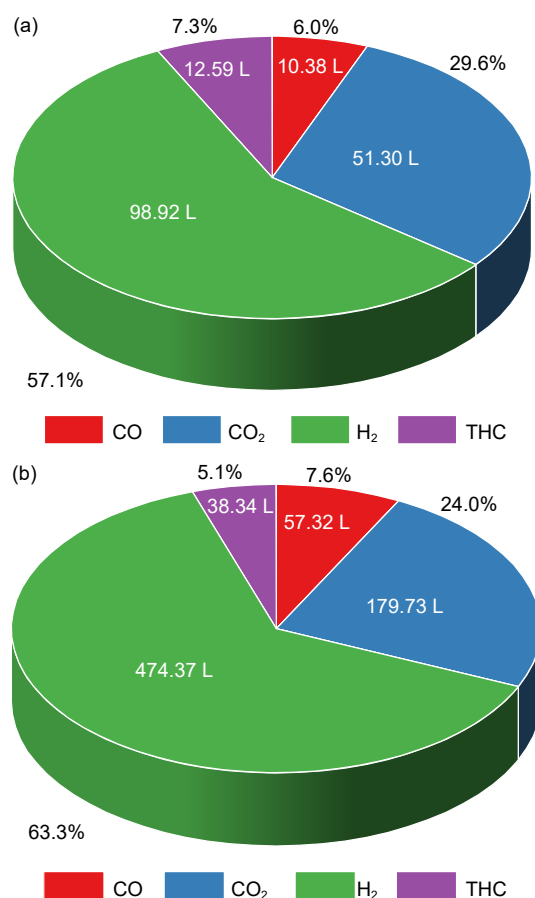


图 10 气体组分饼状图: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah
Fig. 10 Pie charts of gas composition: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

种电池热失控所产生的平均可燃气体浓度尚不足以在实验室空间内形成整体爆炸性气氛, 但 210 Ah 电池在“接近 LEL_{mix} ”程度上明显高于 75 Ah 电池, 燃爆裕度更小。需要强调的是, 上述气体数据为产

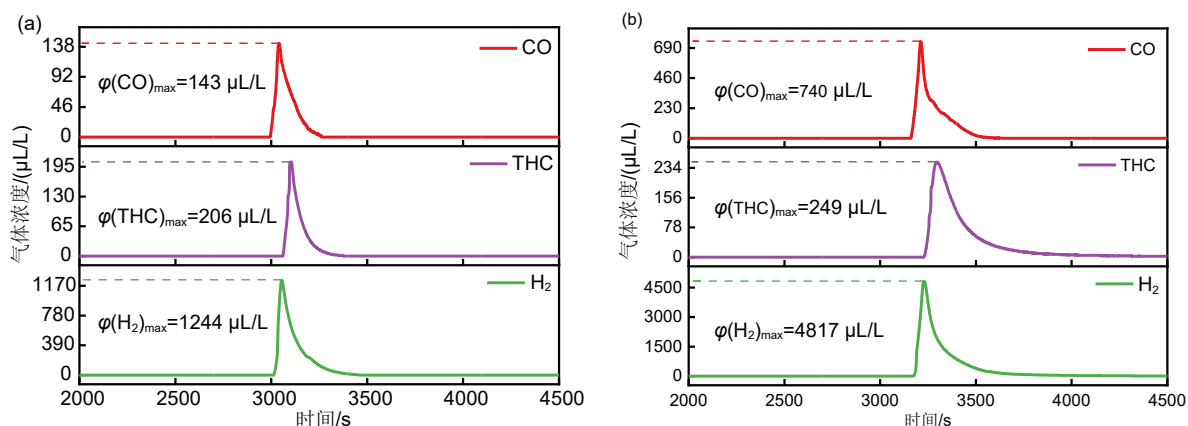


图 11 可燃气体浓度变化: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah
Fig. 11 Volume fraction of flammable gases over time: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

气在实验室空间内混合后由排气管道采集后测量所得,未考虑安全阀近场的高浓度射流区。由于210 Ah电池的可燃气体体积和射流动量显著更大,其在阀口附近形成局部富燃云团、在存在点火源时诱发爆燃的风险明显高于75 Ah电池。

气体组分的浓度变化直接关系到人员呼吸健康。国标规定,工作场所中CO的8 h时间加权容许浓度PC-TWA为16 $\mu\text{L/L}$,短时间接触容许浓度PC-STEL为24 $\mu\text{L/L}$,最高不得超过88 $\mu\text{L/L}$ 。因此即使是75 Ah电池,CO峰值已远超长期暴露限值,而210 Ah工况则接近急性中毒水平。图12表明,CO₂峰值浓度(75 Ah: 0.141%; 210 Ah: 0.357%)虽未达到传统窒息阈值(5%),但其与O₂消耗叠加将加剧空间内的呼吸负担。O₂最低浓度虽然仍高于19.5%的缺氧报警阈值,但已体现出大容量电池热失控具有更强的“O₂消耗+惰性气体累积”趋势,体现出更强的窒息危害可能。

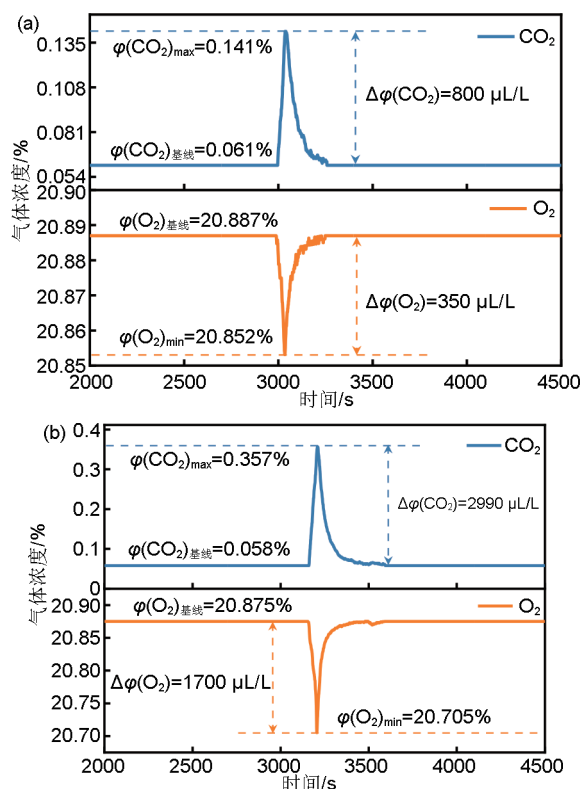


图12 O₂和CO₂浓度变化: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah
Fig. 12 Volume fraction of oxygen and carbon dioxide over time: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

本研究使用烟气生成速率(smoke production rate, SPR)、烟气总量(total smoke production,

TSP)和透光率来描述烟雾危害。SPR越高,即烟气密度越大,视觉遮蔽越严重,人员疏散难度越高。图13表明210 Ah电池的烟气生成速率、生成总量和光学遮蔽程度均远高于75 Ah电池,大容量电池产气有着更为显著的烟雾危害。两款电池热失控之后,防爆间在短时间内就被高浓度烟雾充满,透光率在数秒内即降低至低点,环境彻底丧失可视性。

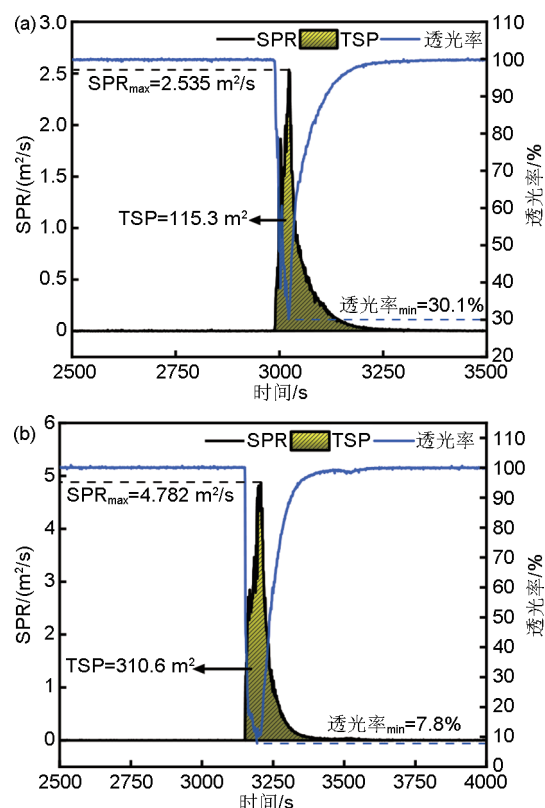


图13 烟雾生成变化: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah
Fig. 13 Smoke generation characteristics: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

由于本研究实验条件下通风良好、空间充足,气体和颗粒浓度随时间衰减较快,毒害效应主要表现为短时间内高浓度暴露。在实际储能站等通风不良或局部积聚空间内,热失控产气CO、CO₂、THC和烟雾造成的急性中毒、窒息及视距丧失风险将被显著放大,对人员暴露风险和疏散时间控制提出更高要求。

2.2 并联组合方式下的等效容量电池热失控特性分析

2.2.1 过热热失控行为

图14给出了等效容量并联电池组(3×75 Ah)的热失控行为时序图。与单体电池类似,其热失控过程可划分为:首个电芯受热阶段、逐级触发阶

段、喷气点燃阶段和冷却阶段。实验开始时, #1 前表面以恒速升温, #2、#3 基本保持环境温度。#1 随后发展至开阀泄压阶段并快速进入热失控, 出现剧烈的喷气射流。#1 强射流消退后, 其内部仍在进行的放热反应向 #2 持续传热, 使得 #2 前表面温度快速上升并随后发生安全阀破开, 形成第二次喷气射流, 此时 #3 进入预热状态。随着 #2 热失控的持续放热, #3 表面温度逐步逼近阈值, 最终同样发生开阀和热失控。与 #1、#2 不同, #3 热失

控中后期可见强烈的射流火焰, 燃烧总体持续 3 min。这是由于在并联电池的共同加热和保温下, #1、#2 比单体电池表现出更高的表面温度, 因此在 75 Ah 单体热失控中未发生燃烧的顶盖材料在电池组工况中被点燃, 继而点燃 #3 喷气。其射流燃烧持续 2 min, 并由于 #3 顶盖材料也发生燃烧, 燃烧末期出现持续数分钟的短小火焰。冷却阶段内, 外壳缓慢降温, 红外图像中显示仅剩壳体余温。图 15 给出了电池组热失控后形貌。



图 14 等效容量电池组的热失控时序轴图

Fig. 14 Thermal runaway timeline for equivalent-capacity pack



图 15 电池组热失控后形貌

Fig. 15 Post-test appearance of pack after thermal runaway

2.2.2 热失控热电特性

图 16 呈现了等效容量电池的热失控热电响应曲线, 其热失控相关特征参数如表 4 所示。需要说明的是, 并联单体在夹具内受压紧贴, 故而认为接

触面的温度差可忽略。将并联电池组视作大单体, 其热失控持续时长达 856 s, 前、后表面 (即 #1 前表面和 #3 后表面) 的 T_{TR} 分别为 263.3℃、103.8℃, T_{max} 分别为 696.1℃、437℃, #1 温度参数与 75 Ah 单体保持近似水平。

由于并联属性, 电池间接触面展现出不同的热失控特性。#1 与 #2 间温度 $T_{\#1-\#2}$ 的热失控触发点为 98.7℃, 但峰值温度 T_{max} 却高达 1127℃, 这是由于 $T_{\#1-\#2}$ 测量值为 #1 后表面和 #2 前表面的共同温度。 $T_{\#1-\#2}$ 触发点反映的是 #1 后表面触发温度, 在其持续升温过程中 #2 也进入热失控, 最终在 #1 后表面和 #2 前表面耦合的升温、保温作用下达达到 1127℃ 的高点, 数值略高于 210 Ah 单体的 T_{max} 。同样地, #2 与 #3 间温度 $T_{\#2-\#3}$ 呈现一致特性, 其 T_{TR} 为 90.2℃, T_{max} 高达 1152.3℃。将等效容量电池中的单体电芯类比于单体中的叠芯, 接触面温度则类似于单体的叠芯内部温度, 同样的双面耦合作用下,

叠芯内部温度也应远高于其对应的单体前、后表面温度,这与已有报道一致^[29]。

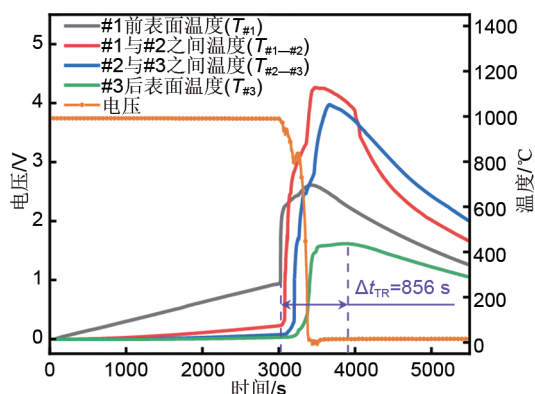


图 16 等效容量电池的热电响应曲线

Fig. 16 Thermal-electrical response curve of equivalent-capacity pack

表 4 等效容量电池的温度参数

Table 4 Characteristic temperature parameters of equivalent-capacity pack

温度参数	#1 前表面	#1 与#2 间表面	#2 与#3 间表面	#3 后表面
$T_{TR}/^{\circ}\text{C}$	263.3	98.7	90.2	103.8
t_{TR}/s	3019	3073	3197	3352
$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	696.1	1127	1152.3	437

图 17 呈现了等效容量电池的传播温度特性,并联后的等效容量电池呈现比“单体电池双叠芯内蔓延”更加明显的传播特性。当 $T_{\#1}$ 达到热失控触发点后的 54 s 时, $T_{\#1-\#2}$ 达到热失控触发点, #1 至 #2 的传播速率 U_{TRP-1} 为 0.935 mm/s。由于 $T_{\#1-\#2}$ 触发点反映的是 #1 后表面进入热失控, 故而 U_{TRP-1} 与单 75 Ah 电池的内蔓延速率 U_{TRP} 数值近似。 $T_{\#1-\#2}$ 与 $T_{\#2-\#3}$ 间的热失控传播时长 Δt_{TRP-2} 为 124 s, 这对应 #1 与 #2 后表面热失控触发的时间差, 传播速率 U_{TRP-2} 为 0.407 mm/s。与之类似, $T_{\#2-\#3}$ 与 $T_{\#3}$ 间的 Δt_{TRP-3} (155 s) 反映了 #2 与 #3 后表面的热失控触发时差, 其 U_{TRP-3} 为 0.326 mm/s。而 U_{TRP-2} 与 U_{TRP-3} 间的数值差异主要归因于 #1 为受热电池, 热失控触发时的整体综合温度显著高于 #2 和 #3, 造成 U_{TRP-2} 略高。等效容量电池整体的内蔓延时长 Δt_{TRP} 达 333 s, 内蔓延速率 U_{TRP} 为 0.455 mm/s, 显著慢于 75 Ah 和 210 Ah 单体。与之相符, 电压呈现 373 s 内跳水降低的蔓延趋势, 电压在 #1 触发热失控时即出现下降, 直至 #3 完全热失控才降至 0 V。

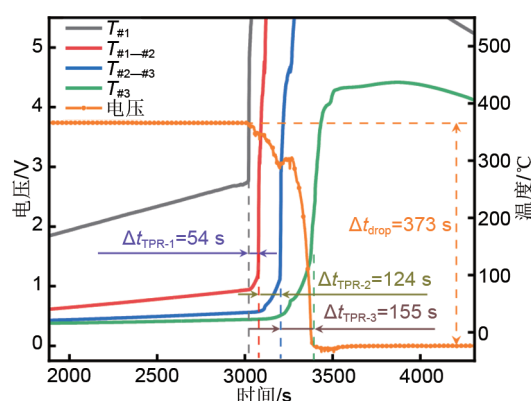


图 17 等效容量电池的传播温度特性

Fig. 17 Temperature characteristics of propagation in equivalent-capacity pack

2.2.3 热失控产气特性

等效容量电池热失控过程的产气如图 18 所示。基于排气管道积分结果, CO_2 为占比 57.8% 的主要组分, 其次为 34.9% 的 H_2 , CO 和 THC 仍为小占比次要组分, 总产气量为 758.4 L。与 75 Ah 单体 (173.19 L) 相比, 等效容量电池总产气量提高约 4.4 倍, 与 210 Ah 单体产气量 (749.76 L) 相当, 热失控呈现由由单点触发演变为逐级传播过程, 反应物总量显著增加, 等效容量在总产气规模上呈现可比性。与单体的富氢特征不同, 等效容量电池产气特征为富二氧化碳, 这是由于 #3 的可燃组分被顶盖点燃, 产生大量的氧化产物 CO_2 。但 #1 和 #2 并未发生射流燃烧, 其原始产气仍被采样捕获, 导致 H_2 保持 34.9% 的较大占比, THC 和 CO 维持次要水平。

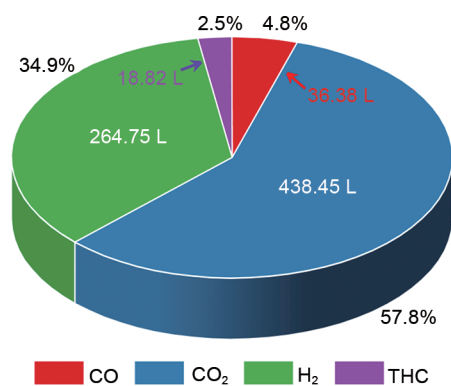


图 18 等效容量电池的气体组分饼状图

Fig. 18 Pie chart of gas composition for equivalent-capacity pack

图 19 和图 20 显示, 等效容量电池的气体浓度变化呈现显著的多峰特征。 CO 、 THC 与 H_2 出现 3

个依次衰减的峰值, CO_2 和 O_2 亦出现3个峰值, 以第三峰为最大波动。第一、二峰对应先后#1、#2的喷气, 组分以 H_2 和 CO_2 为主, 这与75 Ah单体产气分布一致。相比于第一峰, 5种组分在第二峰的波动较小, 这归因于#2电池未直接受热, 而#1在加热阶段经历了更加彻底的内部材料还原、裂解反应, 形成更加充分的副反应产气累积。#3喷气的射流燃烧导致可燃气体被剧烈消耗, 对应 CO 、 THC 、 H_2 衰减至最小峰值, 同时 O_2 快速降至最小含氧量(20.495%)、 CO_2 出现最大第三峰(0.433%)。产气组分最高峰与75 Ah单体基本持平, 等效容量电池的最大毒害作用也保持相近水平, 但因其更为持续的热失控和传播过程, 气氛整体呈现一般剧烈、长期作用的持续毒害。

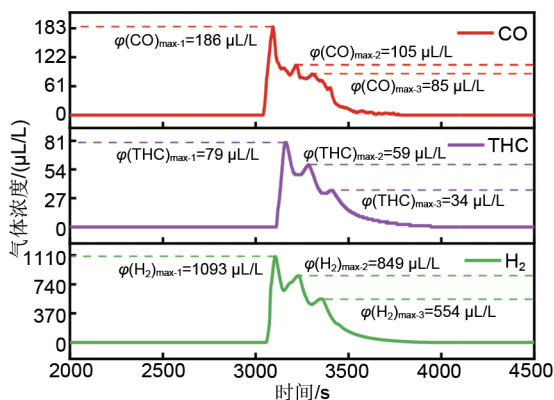


图 19 等效容量电池的可燃气体浓度变化
Fig. 19 Volume fraction of flammable gases over time for equivalent-capacity pack

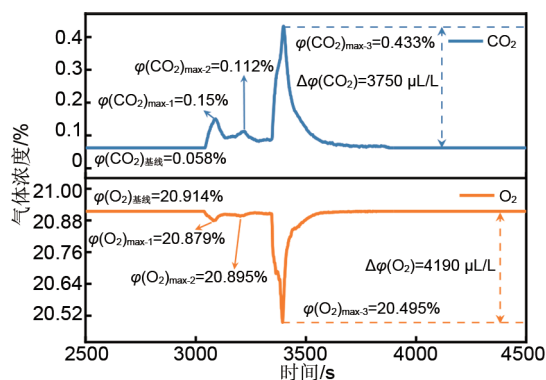


图 20 等效容量电池的 O_2 和 CO_2 浓度变化
Fig. 20 Volume fraction of oxygen and carbon dioxide over time for equivalent-capacity pack

等效容量电池的烟雾生成变化同样呈现明显的多峰脉冲特征。图21中SPR存在3个峰值, 累积TSP达 358.0 m^2 。透光率曲线进一步反映了可视性

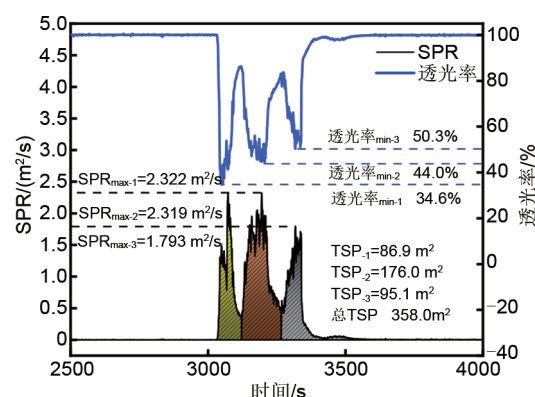


图 21 等效容量电池的烟气生成变化
Fig. 21 Smoke generation characteristics of equivalent-capacity pack

衰减的时间演化, 三峰的最小透光率分别为34.6%、44.0%和50.3%, 说明受热充分的#1造成的光学遮蔽作用最为显著, 随后两峰的遮蔽程度减弱。因未被直接加热, #2的SPR和透光率峰高虽小于#1, 但其低温度梯度造成了更持续的热失控产气, 故而#2峰明显宽于#1峰, 使得总产烟量显著增加, TSP_2 占总烟气量的49.2%。由于#3发生射流燃烧, 可燃气体的大量消耗使得其烟雾危害降低, 光学遮蔽时长同样缩短。等效容量电池表现出与75 Ah单体电池类似水平的 SPR_{max} 和光学遮蔽, TSP较210 Ah单体电池略大15%, 综合烟气危害水平与210 Ah单体电池近似。

2.3 热失控热释放动力学

为评估3种工况下的热释放特性, 本研究基于耗氧量计算热失控的热释放速率HRR。图22、图23为耗氧量法计算的热释放速率与总放热量。75 Ah与210 Ah单体电池热失控均未出现射流燃烧, 曲线反映的是热失控产气和化学反应造成的表观含氧量降低, 分别记为 $\text{HRR}_{\text{max-气}}$ 、 $\text{THR}_{\text{max-气}}$ 。75 Ah单体的 $\text{HRR}_{\text{max-气}}$ 和 $\text{THR}_{\text{max-气}}$ 分别为2.516 kW、63.9 kJ, 210 Ah单体对应升至14.636 kW、336.6 kJ, 整体热释放提高5倍以上, 这说明大容量电芯在热失控内产气更剧烈并伴随更强的耗氧反应, 热释放更为集中。210 Ah单体电池在产气结束后出现顶盖材料局部燃烧, 对应 $\text{HRR}_{\text{max-火}}$ 为0.648 kW、 $\text{THR}_{\text{max-火}}$ 为17.2 kJ, 显著低于其 $\text{THR}_{\text{max-气}}$, 属于附加结构件着火而非内部二次反应。

等效容量电池呈现“气-气-火”三峰的热释放特性。#1与#2无射流火焰, 对应着 $\text{HRR}_{\text{max-气-1}}$ 为

3.249 kW、THR-气-1为88.7 kJ, HRR_{max} -气-2为1.299 kW、THR-气-2为62.7 kJ, 释热量级与75 Ah单体电池相当。但是#3喷气被点燃形成真实射流燃烧, HRR_{max} -火跃升至77.754 kW、THR-火达到3743.2 kJ, 这表明在逐级传播和气体累积条件下, 燃烧放热将主导并显著放大热释放, 等效容量电池表现出比等容量大单体电池更为严重的放热危害。

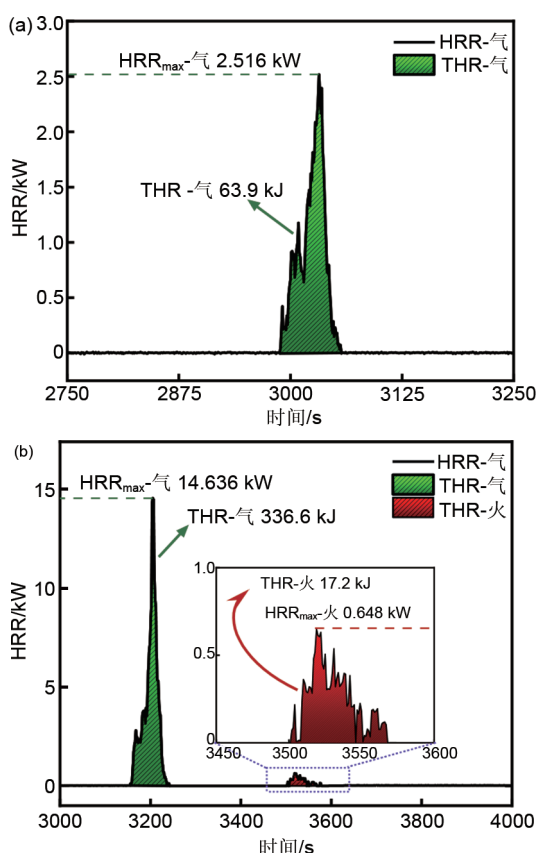


图 22 热释放速率曲线: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah
Fig. 22 Heat-release-rate curves: (a) 75 Ah; (b) 210 Ah

值得指出的是, 并联等效容量电池的危险性高于近似容量大单体电池的根本原因, 并不在于其单个电芯的热失控源项强度更高, 而是并联组合方式改变了热失控的系统级演化路径。210 Ah单体电池的热失控虽具有更高峰值温度和更大的单体源项, 但其失效过程主要局限于单电芯内部, 热量释放与产气过程在时间上相对集中, 且未形成持续外部点火条件, 仅出现高温导致的顶盖材料燃烧。相比之下, 3×75 Ah并联电池中, #1热失控后并未终止事件, 而是继续向相邻电池传热, 使#2、#3依

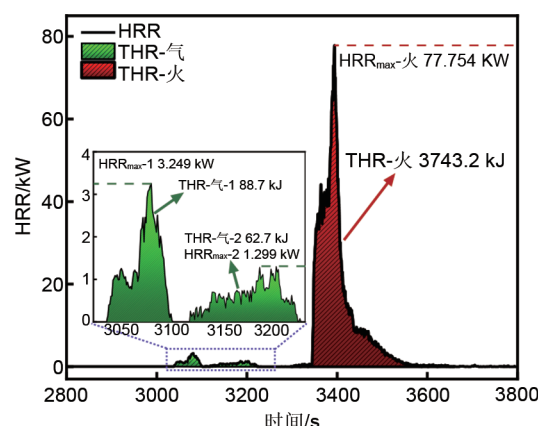


图 23 等效容量电池的热释放速率曲线
Fig. 23 Heat-release-rate curve of equivalent-capacity pack

次进入预热和触发状态, 形成明显的逐级传播过程。这一传播过程一方面延长了可燃气体释放窗口, 另一方面使前段电池持续高温壳体导致的顶盖材料燃烧与后段电池喷气在时间和空间上发生耦合。由此, 并联组合方式建立了“传播—汇聚—点燃”的危险链条。前段电池提供持续热反馈与外部点火源, 后段电池提供新的可燃喷气, 最终#3喷气被点燃并形成强射流燃烧, 导致热释放由产气主导转变为燃烧主导, 放热危害出现显著跃迁。因此, 并联等效容量电池较近似容量大单体电池表现出更高的系统级热危险性, 本质上是多电芯时序失效与相互耦合作用放大的结果, 而非简单的容量等效替代。

2.4 热失控综合危害评估分析

为综合评估容量与并联组合方式对热失控的影响, 本研究选取覆盖特征温度、气体参数、热释放危害等方面的14个典型指标进行分析。首先进行评估方向一致化, T_{TR} 为反向指标(越低越危险), 其余为正向指标(越高越危险)。随后采用极值归一化将各指标映射至无量纲区间, 热危害归一化后的热图如图24所示。本研究定义一个综合危害指数 C , 根据各指标离散度客观赋值权重, 使用熵权法的计算公式如式(4)^[30-31]。

$$C = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (4)$$

式中, i 为指标 i 参数; n 为指标总数; w_i 为指标 i 的权重; x_i 为指标 i 的归一化数值。

计算结果显示, 等效容量电池的 C 最高(0.630), 210 Ah单体电池次之(0.568), 75 Ah

单体电池最低 (0.114)。等效容量并联系统的综合危害主要由显著的热释放贡献驱动, 同时高强度和长时间的 O_2 、 CO_2 波动和烟雾生成, 表明其更易形成持续的缺氧和烟雾遮蔽环境。210 Ah 单体电池表现为“难触发, 高温, 多产气”的热失控特性, 其有着最高的表面温度、最多的可燃气生成量和较高的烟雾危害, 但实际释热较弱, 综合风险低于发生射流燃烧的等效容量电池。75 Ah 单体电池在多数指标上处于低位, 表现为相对较低的综合危害水平。

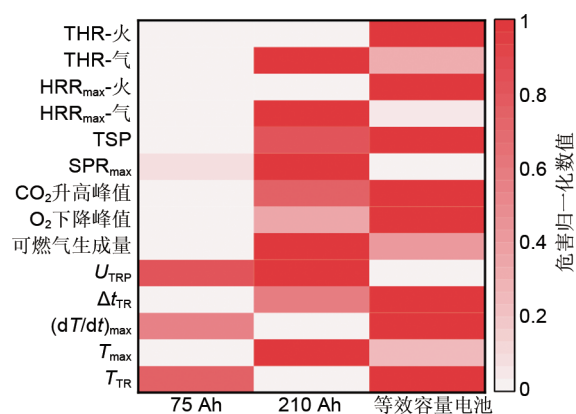


图 24 热危害归一化评估热图

Fig. 24 Heat-hazard assessment heatmap based on normalized indicators

综合实验与多指标评估, 大容量单体电池在热滥用早期体现为更强的热耐受性, 但热失控的整体危害更为剧烈。相较于小容量单体电池, 容量增大显著抬升了单体热失控的源项强度, 表现为更高的温度水平、更大的可燃气释放潜力和更强的单体燃爆与毒害风险。而当电池由单一大容量单体转为 3×75 Ah 的并联组合方式后, 危险性的放大机制不再主要体现在单点源项增强, 而在于多电芯逐级触发所形成的系统级耦合效应。前段电池持续放热并为后段电池提供预热条件, 时序错开的连续释气延长了可燃气体存在窗口, 而前段电池的顶盖材料燃烧又为后续喷气提供了外部点火源, 最终建立“传播—汇聚—点燃”链条并诱发射流燃烧, 使其热释放危害显著高于近似大容量单体电池。因此, 以层状氧化物钠离子电池为例, 储能模组选型应避免使用少量大容量单体电池而堆高单点源项, 同时也不能仅以小容量替代而忽略逐级传播与射流燃烧, 应以严苛的热管理设计与完善的热失控消防方案为前

提, 选择符合物理尺寸限制和电化学性能需求的合理容量与组合方式。

3 结 论

本工作系统研究了容量与并联组合方式对层状氧化物钠离子电池过热热失控特性的影响, 并从温度响应、产气特征与热释放参数出发, 构建了综合危害评估框架。研究结果为钠离子电池的储能安全应用提供基础数据和参考, 主要结论如下。

(1) 210 Ah 层状氧化物钠离子单体电池表现出比 75 Ah 单体电池更高的热失控触发门槛, 但热失控后的热影响更强。210 Ah 单体电池的产气有着更强的可燃性, 伴随更明显的烟雾毒害作用, 且顶盖材料的燃烧进一步增加了火灾风险的不确定性。

(2) 并联等效容量电池的触发条件与其构成单体接近, 但温度、电压和气体响应更具阶段性特征。并联组合方式使多电芯失效在时间和空间上发生耦合, 前段电池持续放热促使后段电池逐级触发, 连续释气延长了可燃气体和毒害气体存在窗口, 而前段电池的顶盖材料燃烧又为后续喷气提供了外部点火源, 最终诱发严重射流燃烧并放大系统级危害。

(3) 两种单体电池和并联等效容量电池中的 #1、#2 的热释放主要对应非燃烧氧消耗, 而并联等效容量电池中 #3 电池的射流燃烧形成 77.754 kW 的高强度放热, 并联组合方式可使热失控危害由产气主导向燃烧主导跃迁, 危害等级被显著抬升。

(4) 综合危害评估结果显示, 并联等效容量电池危害程度最高, 210 Ah 单体电池次之, 75 Ah 单体电池最低。对层状氧化物钠离子电池而言, 电池容量增大主要提升单体电池热失控的触发耐受性, 但抬升后续源项强度, 而并联组合方式则更易建立传播和点燃链条, 从而放大系统级热释放与燃烧风险。实际应用中, 大容量单体电池需配套更严苛的热管理与产物处置措施, 而并联小容量单体电池组合则应优先抑制热传播和点火源形成, 以避免风险在系统层级被进一步放大。

参 考 文 献

- [1] 胡传芳, 张忠山, 陈敏. 电化学储能技术在电力系统中的应用现状[J]. 电池, 2025, 55(2): 382-388. DOI:10.19535/j.1001-1579.2025.

- 02.030.
HU C F, ZHANG Z S, CHEN M. Application status of electrochemical energy storage in new power system[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(2): 382-388. DOI: 10.19535/j.1001-1579.2025.02.030.
- [2] 曹文栋, 周丹. 钠离子电池层状氧化物正极材料的掺杂改性策略研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(12): 3798-3832. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20250079.
CAO W D, ZHOU D. Research progress on doping modification strategy of layered oxide cathode materials for sodium-ion batteries[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(12): 3798-3832. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20250079.
- [3] 潘文涛, 余新玲, 杨续来, 等. 钠离子电池的机遇与挑战[J]. 材料工程, 2025, 53(7): 1-14.
PAN W T, YU X L, YANG X L, et al. Opportunities and challenges of sodium-ion battery[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(7): 1-14.
- [4] 彭宇翔, 高立克, 李勇琦, 等. 钠离子电池储能系统产热特性与热管理策略优化[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3764-3773.
PENG Y X, GAO L K, LI Y Q, et al. Heat-generation characteristics and thermal-management optimization of sodium-ion-battery energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3764-3773.
- [5] 张明杰, 杨凯, 刘振, 等. 钠离子电池热安全性研究进展[J]. 电池, 2025, 55(2): 368-375.
ZHANG M J, YANG K, LIU Z, et al. Research progress in thermal safety for sodium-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(2): 368-375.
- [6] LI Z Y, YU Y, WANG J J, et al. Thermal runaway and gas venting behaviors of large-format prismatic sodium-ion battery[J]. Energy Storage Materials, 2025, 77: 104197. DOI:10.1016/j.ensm.2025.104197.
- [7] 马畅, 储玉喜, 陈红光, 等. 钠离子电池热失控行为与燃烧特性研究[J]. 消防科学与技术, 2025, 44(9): 1226-1232. DOI: 10.20168/j.1009-0029.2025.09.1226.07.
MA C, CHU Y X, CHEN H G, et al. Study on thermal runaway behavior and combustion characteristics of sodium-ion battery[J]. Fire Science and Technology, 2025, 44(9): 1226-1232. DOI: 10.20168/j.1009-0029.2025.09.1226.07.
- [8] YU X Y, WANG Z, JIA D Y, et al. Thermal runaway and fire behaviors of sodium-ion batteries with different overcharge levels induced by heat abuse[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 134: 118248. DOI:10.1016/j.est.2025.118248.
- [9] 吴静云, 郭鹏宇, 黄铮. 不同滥用条件下钠离子电池热失控特性试验研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3942-3954.
WU J Y, GUO P Y, HUANG Z. Experimental study on the thermal-runaway characteristics of sodium-ion batteries under different abuse conditions[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3942-3954.
- [10] HUANG X, JING H L, YANG M, et al. Comparative study on thermal and gas characteristics of 26700 sodium-ion and lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2025, 631: 236270. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.236270.
- [11] JIA Z Z, LI H, WANG Q S. Experimental study on heat and gas generation characteristics of commercial sodium-ion batteries during thermal runaway[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 109: 357-367. DOI:10.1016/j.jechem.2025.05.049.
- [12] TENG A Q, ZHANG Y, JIANG L H, et al. Revealing the thermal stability of sodium-ion battery from material to cell level using combined thermal-gas analysis[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 103: 838-849. DOI:10.1016/j.jechem.2024.11.059.
- [13] 李勇琦, 李志远, 闻有为, 等. 大容量钠离子电池热失控特性实验研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1657-1667.
LI Y Q, LI Z Y, WEN Y W, et al. Experimental study of thermal runaway characteristics of large-capacity sodium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1657-1667.
- [14] HUANG Z H, LI X, WANG Q S, et al. Experimental investigation on thermal runaway propagation of large format lithium ion battery modules with two cathodes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 172: 121077. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121077.
- [15] HUANG Z H, YU Y, DUAN Q L, et al. Heating position effect on internal thermal runaway propagation in large-format lithium iron phosphate battery[J]. Applied Energy, 2022, 325: 119778. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119778.
- [16] HONG Y, WONG S K, JIN C Y, et al. Thickness-dependent of thermal runaway propagation velocity in lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 127734. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127734.
- [17] ZHENG S Q, WANG L, FENG X N, et al. Probing the heat sources during thermal runaway process by thermal analysis of different battery chemistries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 527-536. DOI:10.1016/j.jpowsour.2017.12.050.
- [18] FENG X N, HE X M, OUYANG M, et al. A coupled electrochemical-thermal failure model for predicting the thermal runaway behavior of lithium-ion batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(16): A3748-A3765. DOI: 10.1149/2.0311816jes.
- [19] HE X Z, ZHAO C P, HU Z W, et al. Heat transfer effects on accelerating rate calorimetry of the thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 162: 684-693. DOI:10.1016/j.psep.2022.04.028.
- [20] FENG X N, FANG M, HE X M, et al. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry[J]. Journal of Power Sources, 2014, 255: 294-301. DOI:10.1016/j.jpowsour.2014.01.005.
- [21] XU X M, LI R Z, ZHAO L, et al. Probing the thermal runaway triggering process within a lithium-ion battery cell with local heating[J]. AIP Advances, 2018, 8(10): 105323. DOI: 10.1063/1.5039841.
- [22] LIN S N, LI W, QIN Y, et al. Deciphering thermal failure mechanism of sodium-ion battery with O_3 phase layered cathode[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 506: 160202. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160202.

- [23] AMANO K O A, GIMADIEVA E, KRAUSE U. Comparing the thermal runaway characteristics in sodium-ion batteries and Li-ion batteries with layered oxide cathode materials: Influence of state of charge level[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 648: 237414. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.237414.
- [24] JIA Z Z, WANG S P, QIN P, et al. Comparative investigation of the thermal runaway and gas venting behaviors of large-format LiFePO_4 batteries caused by overcharging and overheating[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 61: 106791. DOI: 10.1016/j.est.2023.106791.
- [25] ZHOU Z Z, LI M Y, ZHOU X D, et al. Investigating thermal runaway triggering mechanism of the prismatic lithium iron phosphate battery under thermal abuse[J]. *Renewable Energy*, 2024, 220: 119674. DOI:10.1016/j.renene.2023.119674.
- [26] WANG H B, DU Z M, RUI X Y, et al. A comparative analysis on thermal runaway behavior of $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ battery with different nickel contents at cell and module level[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122361. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.122361.
- [27] LIU P J, SUN H L, QIAO Y T, et al. Experimental study on the thermal runaway and fire behavior of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ battery in open and confined spaces[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 158: 711-726. DOI:10.1016/j.psep.2021.12.056.
- [28] WEI G, HUANG R J, ZHANG G X, et al. A comprehensive insight into the thermal runaway issues in the view of lithium-ion battery intrinsic safety performance and venting gas explosion hazards [J]. *Applied Energy*, 2023, 349: 121651. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121651.
- [29] WANG H B, XU H, ZHAO Z Y, et al. An experimental analysis on thermal runaway and its propagation in Cell-to-Pack lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118418. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.118418.
- [30] LI W F, PENG J J, GAO Z H, et al. Phase-resolved evaluation of thermal runaway in lithium-ion batteries *via* an entropy-weighted multi-criteria framework[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 141: 119292. DOI:10.1016/j.est.2025.119292.
- [31] GUO J P, HUANG Q, CHEN Q P, et al. Thermal runaway hazard assessment of sodium-ion and lithium-ion batteries under different state-of-charge conditions[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 138: 118783. DOI:10.1016/j.est.2025.118783.