



钠离子电池内短路模型构建与安全性能提升

聂 阳¹, 何 伟², 徐雄文¹, 涂 健¹, 周碧香¹, 谢 健³

(¹湖南立方新能源科技有限责任公司, 湖南 株洲 412000; ²中国船级社武汉分社, 湖北 武汉 430000; ³浙江大学材料科学与工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 锂离子电池内短路(ISC)机制已被广泛研究, 鉴于钠离子电池与锂离子电池结构较为类似, 其内短路机制可以参考锂离子电池的研究成果。但是, 考虑到两者使用的主材和辅材存在差异, 其短路机制的差异仍需要进一步模拟验证。本工作采用 1 Ah 级的软包钠离子电池, 通过缺孔挤压的试验方案, 对钠离子电池中 4 种类型的内短路模型进行模拟, 并且比较了磷酸铁锂(LFP)和三元(NCM)体系的锂离子电池和钠离子电池在最严苛短路方式下发热情况。发现钠离子电池在 4 种内短路模型中, 负极材料与正极集流体(Al-An)短路过程发热最为严重。而与锂离子电池相比, 相同的内短路模型下钠离子电池温升更高。由于钠电负极集流体铝箔和锂电负极集流体铜箔的电导率、导热性和化学稳定性存在差异, 通过单因子试验, 发现将钠电负极集流体改为铜箔, 能显著降低钠离子电池内短路的局部温升。进一步实验采用型号为 32700 的商业圆柱钠离子电池, 验证了负极使用铜集流体能够显著提高针刺通过率, 为钠离子电池的安全性能提升和商业化提供解决思路。

关键词: 钠离子电池; 内短路方式; 电池安全性能; 短路模拟

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1028

中图分类号: TM 912.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-628-09

Internal short-circuit modeling and safety performance improvement in sodium-ion batteries

NIE Yang¹, HE Wei², XU Xiongwen¹, TU Jian¹, ZHOU Bixiang¹, XIE Jian³

(¹LI-FUN Technology Corporation Limited, Zhuzhou 412000, Hunan, China; ²China Classification Society Wuhan Branch, Wuhan 430000, Hubei, China; ³School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: The internal short-circuit (ISC) mechanisms of lithium-ion batteries (LIBs) have been extensively studied. Given the structural similarities between sodium-ion batteries (SIBs) and LIBs, research on SIB ISC mechanisms can draw from LIB studies. However, simulation validation for SIBs remains essential due to differences in key and auxiliary materials. In this study, 1 Ah pouch SIBs were used to simulate four ISC models and to compare the thermal behavior of SIBs and LIBs (e.g., lithium iron phosphate and nickel cobalt manganese) under the most severe short-circuit conditions. The results show that SIBs exhibit the highest heat generation in the Al-anode ISC mode, with significantly higher temperature rises than LIBs under identical conditions. Differences in electrical conductivity, thermal conductivity, and

收稿日期: 2025-11-13; 修改稿日期: 2025-12-10。

基金项目: 湖南省储能型锂/钠离子电池工程技术研究中心 (2019TP2045), 2025 年度株洲市“小荷”行动专项。

第一作者: 聂阳 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电化学工程, E-mail: nieyangdf18@163.com; 通信作者: 谢健, 副教授, 研究方向为新能源材料与器件, E-mail: xiejian1977@zju.edu.cn。

引用本文: 聂阳, 何伟, 徐雄文, 等. 钠离子电池内短路模型构建与安全性能提升[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 628-636.

Citation: NIE Yang, HE Wei, XU Xiongwen, et al. Internal short-circuit modeling and safety performance improvement in sodium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 628-636.

chemical stability between aluminum foil (used in SIB anodes) and copper foil (used in LIB anodes) prompted a single-factor experiment in which the SIB anode current collector was replaced with copper foil. This modification significantly reduced localized temperature rise during the ISC process in SIBs. Further experiments using commercial 32700 SIBs confirmed that using a copper foil current collector significantly improves the nail-penetration pass rate, offering a viable strategy to enhance safety performance of SIBs for commercialization.

Keywords: sodium-ion battery; internal short-circuit modes; safety performance; short circuit simulation

随着全球能源结构转型加速和“双碳”目标的推进,动力电池技术成为新能源产业的核心竞争领域。然而,锂离子电池面临锂资源短缺、成本高以及低温性能不足等瓶颈问题。尤其在北方低温环境(-20°C 以下),锂电容量可衰减超40%,使其在低速电动车、二轮车等场景的应用受限^[1]。钠离子电池凭借钠资源丰富(地壳丰度是锂的1000倍以上)、低温性能优异(-20°C 容量保持率 $>90\%$)^[2]和成本优势(理论成本较锂电低30%)^[3],成为锂电的重要补充方案。

虽然钠离子电池具备上述优势,但是钠离子电池在安全性能方面未能得到充分的验证。一方面钠离子电池的安全性能仍存在争议,Niu等^[4]提出钠离子电池硬碳负极中以准金属态钠簇存在,使得钠电比锂电更容易触发热失控。另一方面,在电动自行车、电动汽车、储能电站等多起锂电引发的燃烧事件后,社会对锂/钠离子电池安全性能表现出更多的关注及担忧。国家出台了电动自行车、电动汽车、储能电池安全相关强制性国家标准,如:《电动自行车用锂离子蓄电池安全技术规范》(GB 43854—2024)、《电动汽车用动力蓄电池安全要求》(GB 38031—2020)、《电力储能用锂离子电池》(GB/T 36276—2023),严格规范了电池的安全性能。这些国标均对挤压、针刺、加速度冲击等机械滥用测试进行严格要求。而这类机械滥用条件下,引发的电池内短路,则是导致热失控的根本原因^[5-6]。

锂离子电池的内短路行为已被广泛研究,存在以下4种内短路方式:①正负极集流体短路;②负极材料和正极集流体短路;③负极集流体和正极材料短路;④正极材料和负极材料短路^[7]。实验结果显示,负极材料与正极集流体接触是最危险的情况,能够轻易使电池发生热失控^[8-10]。主要原因是负极铜箔与负极材料均具有良好的导电性,当热失

控发生时产生较大的电流和焦耳热。而负极材料的散热能力有限,且热失控初始温度低,使得产生局部热积累,最终引发热失控。对于电池内短路的模拟或仿真手段多样,通过设计内短路的替代实验,如:杂质颗粒挤压^[9]、缺孔挤压^[11-12]、相变材料内短路替代^[13-14]、低熔点合金内短路替代等,更能反馈实际电芯在不同类型内短路情况下真实放热和热扩散过程。Ramadass等^[11-12]设计缺孔挤压试验方案,对锂电不同充电状态(SOC)下内短路与针刺发热情况进行观察,发现电芯SOC越高,产热量越高。而钠离子电池与锂离子电池结构类似,同样存在以上4种内短路方式,但由于主材、辅材不同,在内短路的表现上与锂离子电池存在差异。

本工作采用1 Ah商业钠离子电池,通过缺孔挤压的试验方案,模拟钠离子电池内短路的4种方式。试验发现,钠离子电池内短路方式中最危险的内短路方式为负极硬碳与正极铝箔接触发生的短路。进一步验证了锂离子电池中三元体系、磷酸铁锂体系与钠离子电池中层状氧化物体系在负极材料与正极集流体短路模型下的最高温度对比。结果表明,钠离子电池在极端内短路情况下比锂离子电池温升更加显著。改进实验表明,当钠离子电池负极集流体采用铜箔时,能够显著改善短路温升,并且使得商业化的钠电100%通过针刺测试。以上研究结果从内短路温升的角度提出了对钠离子电池安全性的担忧,同时也为提高钠离子电池的安全性能和钠离子电池商业化提供解决思路。

1 实 验

1.1 原材料

钠离子电池正极材料为镍铁锰基层状氧化物,负极材料为硬碳。磷酸铁锂电池和三元电池正极分别为磷酸铁锂正极材料(LFP)和镍钴锰基三元正极

材料(NCM), 负极均为人造石墨。正极浆料制备的辅材有 *N*-甲基吡咯烷酮(NMP)、聚偏氟乙烯(PVDF)、碳纳米管(CNT)和导电炭黑 Super-P 等, 负极浆料制备的辅材有去离子水、羧甲基纤维素钠(CMC)、聚丙烯酸(PAA)、丁苯橡胶(SBR)、导电炭黑 Super-P 等。隔膜均使用 15 μm 陶瓷涂覆隔膜

(PE 基)。钠离子电池、磷酸铁锂电池和三元电池正极集流体分别使用 12 μm 铝箔、15 μm 涂炭铝箔、12 μm 铝箔, 负极集流体分别使用 12 μm 铝箔/8 μm 铜箔、8 μm 铜箔、8 μm 铜箔。

软包电池与 32700 圆柱钠离子电池均为湖南立方生产, 具体电芯规格如表 1。

表 1 试验电芯规格
Table 1 Experimental cell specifications

参数	软包钠电	软包磷酸铁锂电池	软包三元电池	32700 圆柱钠电
容量/Ah	1.0	1.0	1.0	4.7 Ah
电压区间/V	1.5~3.9	2.5~3.65	3.0~4.25	1.5~3.9
电芯尺寸/mm	5.0×51×66(厚度×宽度×长度)	4.5×51×66(厚度×宽度×长度)	3.0×51×66(厚度×宽度×长度)	32×70(直径×高度)

1.2 缺孔挤压实验方案

本工作通过在隔膜处设置缺孔, 通过外部压力使得电芯内部发生短路, 示意图如图 1(a), 为验证测试准确性, 每个组别设置 2 个测试电芯进行重复测试, 电芯 SOC 调至 100%, 测试环境均在室温条件。具体缺孔挤压电芯测试前处理步骤如图 1(c)所示:

(1) 在具有氩气环境的手套箱内拆解电芯, 将电芯(正极、隔膜和负极)展开, 在隔膜中间打一个直径为 22 mm 的孔, 作为形成内短路的位置。不同试验电芯内短路位置设置在离电芯表面第二层。

(2) 对于负极材料与正极集流体短路(Al-An), 将面向隔膜孔的正极材料轻轻刮掉以露出铝箔。在负极片和隔膜之间插入一片隔离膜覆盖隔膜上的孔, 以避免在重新组装过程中短路, 隔离膜长度需大于电芯主体 1~3 cm, 便于后续抽离, 实现内短路, 如图 1(c)所示。

其他 3 种短路模型: 正负极集流体短路(Al-Al)则需要将正负极对应位置活性材料全部刮掉; 正极材料和负极集流体短路(Ca-Al)则需要将负极活性材料刮掉; 正极材料和负极材料短路(Ca-An)则不需要处理正负极片。

不同短路方式设计的电芯短路点电子照片, 如图 1(b)所示:

(3) 重新组装电芯, 在封装前需要补充适量电解液。在完全密封后, 将电池从手套箱中取出并小心地放置在滥用测试室内。

(4) 连接好感温线和电压监控线。将电芯底端铝塑膜袋剪开, 沿电芯底端迅速抽离预埋的隔离膜, 并马上使用直径 12 mm 的压块对短路区域进

行加压, 产生内短路, 并保持压力 15 min。

1.3 针刺测试

先将电芯充满, 用直径为 $\Phi 5$ mm 的耐高温钢针(针尖的圆锥角为 45°), 以 (80 ± 5) mm/s 的速度, 从垂直于电池极片的方向贯穿电池的几何中心, 并使钢针停留在电池中, 观察 1 h。

2 结果与讨论

2.1 钠离子电池不同内短路方式测试

采用 1 Ah 钠离子软包电池, 通过缺孔挤压方式模拟 4 种不同内短路情形, 过程的电压和温度监控如图 2 所示, 测试前后电压、温度、实验现象及隔膜状态如表 2 所示。图 2(a)为钠离子电池在内短路过程中的电压变化曲线, 在内短路的瞬间电池受极化影响出现电压降, 内短路处内阻越小, 瞬间电流越大则电压降越大。其中, 短路瞬间电压降 $\text{Al-Al} > \text{Al-An} > \text{Ca-An} > \text{Ca-Al}$, 表明短路位置的内阻 $\text{Al-Al} < \text{Al-An} < \text{Ca-An} < \text{Ca-Al}$, 该现象与锂离子电池内短路特征一致^[15-16]。监控不同内短路方式的电芯在短路 900 s 前后的电压, 电芯的电压降幅分别为 $\Delta V(\text{Ca-An}) = 0.424$ V, $\Delta V(\text{Al-An}) = 2.425$ V, $\Delta V(\text{Ca-Al}) = 0.014$ V, $\Delta V(\text{Al-Al}) = 3.853$ V。可见在相同时间内, 不同内短路方式放出的电量存在差异, 由多到少依次是 $\text{Al-Al} > \text{Al-An} \gg \text{Ca-An} > \text{Ca-Al}$, Al-An 和 Al-Al 短路模式下电流远大于 Ca-Al 和 Ca-An。

图 2(b)、(c)分别为不同内短路方式的电芯主体温升情况和电芯顶部温升情况, 分别反映内短路点的温度和热传导的温度。不同内短路方式的瞬时温升存在明显区别, 由高到低依次为 $\text{Al-An} > \text{Al-Al} \gg \text{Ca-An} > \text{Ca-Al}$, 在 4 种内短路模型下, 负极材料与

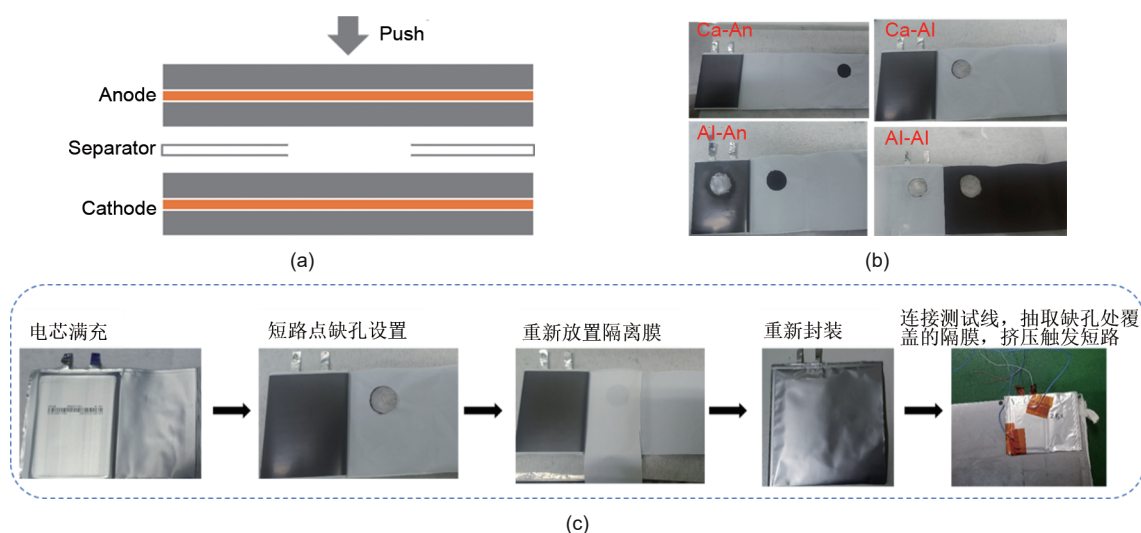


图1 (a) 缺孔挤压触发短路示意图; (b) 不同内短路方式的电芯短路点数码照片; (c) 缺孔挤压法电芯测试前处理方法
Fig. 1 (a) Schematic illustration of ISC test; (b) digital photos of different ISC cell models; (c) cell pre-treatment method before ISC test

正极集流体铝箔接触虽然短路电流不是最高,但是电芯温升最高,短路过程观察到,在Al-An模型下会发生轻微冒烟现象。Al-An模型在短路后50 s内,电芯温度由19.1℃最高达到94.6℃,主体温升75.5℃,电芯顶部温度最高达到66.4℃。其次则为负极集流体铝箔与正极集流体铝箔接触,电芯相比Al-An模式,电芯主体温升40℃,电芯主体最高温度55.3℃,电芯顶部最高温度45.5℃。导致Al-An类型短路相比Al-AI类型放电量更低但是产热更多的主要原因为:①硬碳负极阻抗小,短路电流几乎与Al-AI接近;②负极热失控触发温度低;③硬碳负极热扩散性能不如Al箔,导致负极热量积累,引发负极热失控行为。锂离子电池同样存在Al-An类型短路比Al-Cu类型短路内阻大,但放热量更多的情况^[15]。

Al-An和Al-AI短路模式下放热量远大于Ca-AI和Ca-An,试验电芯以Ca-An或Ca-AI模式短路后,电芯主体温升分别为13.1和2.3℃。主要原因是正极集流体与负极材料或者负极集流体接触时,铝集流体和负极材料都具有良好的导电性,导致短路内阻非常小,从而产生较大的短路电流,大电流瞬间产生大量的焦耳热。而正极材料与负极材料或者负极集流体发生短路,由于正极材料的导电性差,短路内阻大,电压下降缓慢,不易形成大的短路电流和快速温升,难以触发热失控。

为分析电池经过不同内短路方式后的内部结构

变化,电芯经过内短路后,在露点为-30℃的环境中进行拆解,拆解后正负极片和隔膜如图3所示,极片和隔膜摆放顺序由上至下依次为正极、负极、隔膜。

如图3(a)、(b)所示,在Ca-An和Ca-AI短路模型下,极片和隔膜完整,尤其是Ca-AI短路模型下,当负极极片暴露在外界环境后仍具有化学活性,与空气中水反应后颜色发白。相反,将以Al-An与Al-AI方式短路后的电芯拆解后,发现隔膜受内短路产生的高温影响被烧穿,Al-An被烧穿9层,Al-AI有一层隔膜产生熔融现象,如图3(c)、(d)所示。隔膜失效会进一步引发其他类型或更大面积的内短路行为。其中,最为危险的为Al-An类型短路,从拆解放大照片图3(e)可看出,因内短路引发的高温不仅导致隔膜被烧穿,短路点的正负极铝层也被烧穿,表明Al-An类型内短路可诱发Al的腐蚀,可能导致进一步的放热反应。

2.2 锂离子电池与钠离子电池Al-An内短路模拟

为进一步研究钠离子电池的安全性能,将同样卷绕型号的1 Ah三元体系锂离子电池和1 Ah磷酸铁锂电池采用Al-An的内短路模型进行对比实验。为了避免不同体系电芯层数不同的影响温度监控准确性,内短路点均设置在距电芯表面的第二层位置。不同体系内短路外部电压和温度监控曲线如图4(a)、(b)所示。锂离子电池体系正极采用磷酸铁锂或三元正极,在Al-An短路模式下,外电压均迅

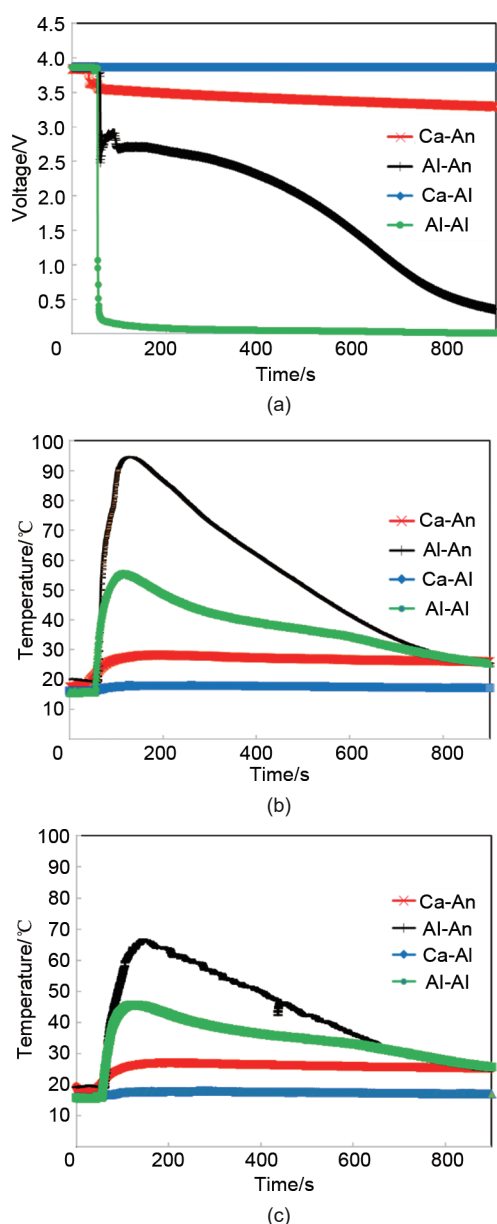


图2 不同内短路方式电芯 (a) 外部电压、(b) 电芯主体温度、(c) 电芯顶部温度变化曲线

Fig. 2 (a) External voltage, (b) cell body temperature, and (c) cell top temperature curves of cells under different ISC tests

表2 钠离子电池四种内短路模型测试关键参数

Table 2 Key parameters of 4 ISC tests of SIBs

短路模型	电压降幅 (ΔV)/V	主体温升 (ΔT)/°C	顶侧温升 (ΔT)/°C	隔膜状态	实验现象
Ca-An	0.424	13.1	9.9	完整	无
Al-An	2.425	75.5	47.7	烧穿9层	冒烟
Ca-Al	0.014	2.3	2.3	完整	无
Al-Al	3.853	40.0	30.2	熔融1层	无

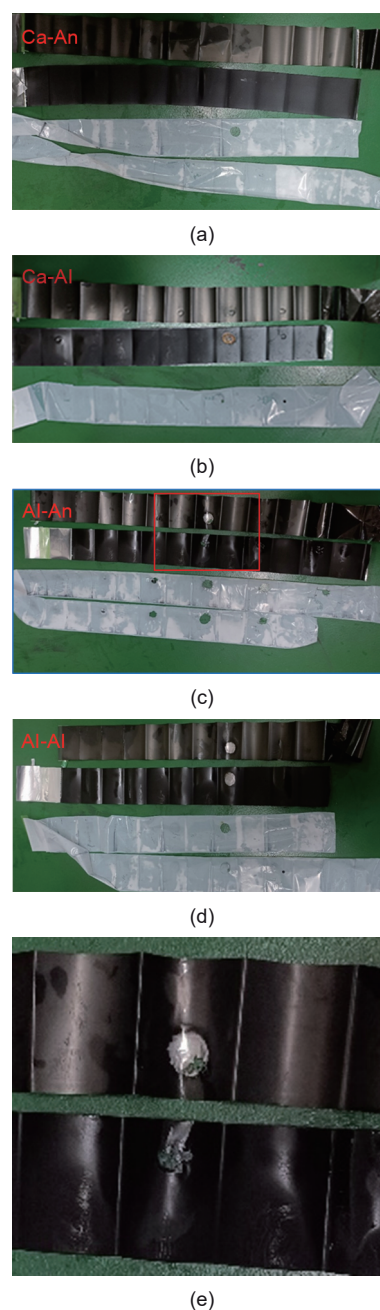


图3 (a)~(d) 不同短路方式试验后电芯拆解照片; (e) Al-An内短路点放大照片。极片和隔离膜摆放顺序由上至下为正极、负极、隔离膜

Fig. 3 (a)~(d) Photos of disassembled cells after different ISC tests; (e) enlarged photo of the ISC site.

The placement sequence from top to bottom is: positive electrode, negative electrode, and separator

速下降至 1 V 以下, 电芯主体温度分别从常温迅速升至 71.4 和 76.3°C, 温升分别为 $\Delta T_{\text{LFP}}=50^\circ\text{C}$ 和 $\Delta T_{\text{NCM}}=55^\circ\text{C}$ 。两者的温升较为接近, 可见锂离子电池 Al-An 内短路模式下放热量与正极无关, 与理想

的Al-An短路模式相符。而钠离子电池在同样的Al-An的内短路模型下, 外电路电压未直接降至0 V, 且最高温度达到93.6℃, 温升 $\Delta T_{\text{SIB}}=75.5^\circ\text{C}$ 。Al-An内短路情况下, 电芯温升顺序为 $\Delta T_{\text{SIB}} > \Delta T_{\text{NCM}} \approx \Delta T_{\text{LFP}}$, 可见钠离子电池在极端的Al-An内短路情况下, 放热量大于锂离子电池体系, 热失控的风险更大。

对内短路后的电芯进行拆解, 由图4(c)、(d)所示。可见锂离子电池在Al-An短路情况下: ①LFP和NCM拆解外观接近, 表面内短路后电芯的破坏程度相近; ②相比钠离子电池, 虽然温升相对较

低, 短路点仍然会造成隔膜烧穿的现象, 且同样影响到多层隔膜, 并且正极铝箔同样发生腐蚀; ③负极的破坏程度低于钠离子电池, 石墨极片较为完整, 而钠电硬碳极片被烧穿。可见, 在内短路情形下, 钠离子电池的安全性能比锂离子更低, 主要的原因包括: ①钠离子电池负极使用铝箔, 在短路或热失控情形下发生腐蚀, 导致钠离子电池短路温升更高; ②一般认为硬碳的晶格无序态导致其导热系数低于石墨^[17-18], 并且铝的导热系数 $[200\sim 237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 低于铜的导热系数 $[380\sim 400 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$, 导致硬碳负极的散热性能较差, 更容易在局部区域产生热量累积。

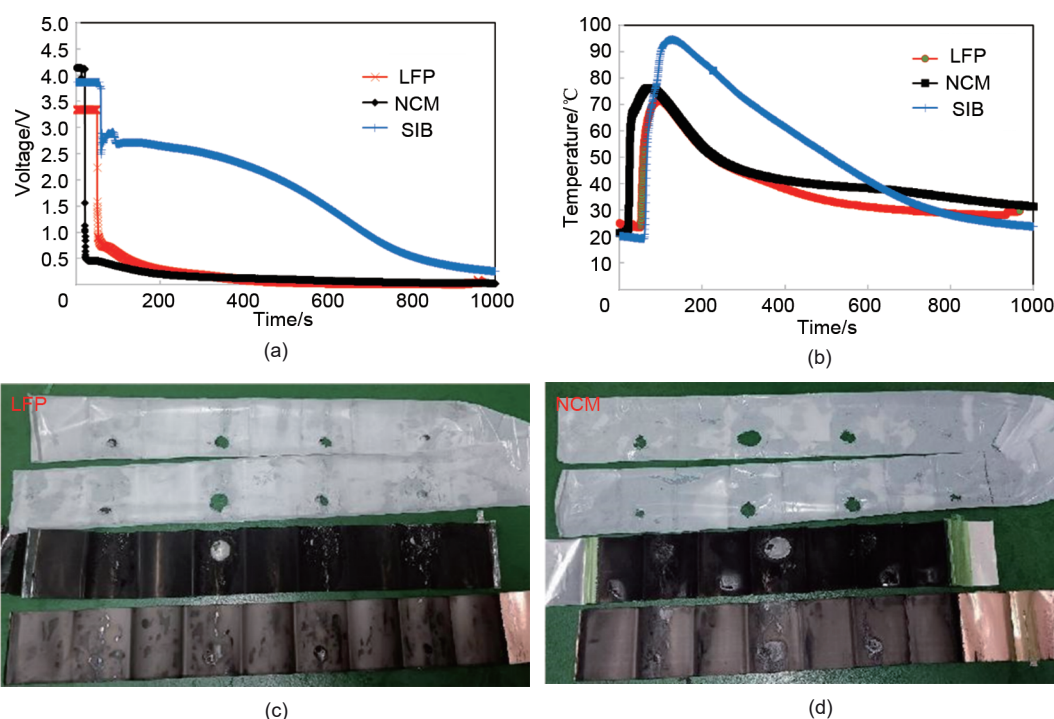


图4 磷酸铁锂(LFP)、三元(NCM)、钠电(SIB)的1 Ah电芯Al-An短路模型下电压(a)和电芯主体温度(b)曲线; (c)(d) LFP和NCM锂离子电池Al-An内短路试验后电芯拆解照片, 极片和隔膜摆放顺序由上至下依次为隔膜、正极、负极

Fig. 4 Voltage (a) and cell body temperature (b) curves of 1 Ah LFP, NCM, and SIB under the Al-An short-circuit model; photos of (c) LFP and (d) NCM cells disassembled after Al-An internal short-circuit tests. The placement sequence from top to bottom is: separator, cathode, and anode

2.3 负极集流体材质对钠离子电池安全性能影响

由于钠离子电池在Al-An的短路模式下温升最为明显, 而且相比相同电量下的锂离子电池, 钠电热失控风险更高。从电池设计入手, 常规的改善手段有: ①通过保护正极集流体, 提高Al-An内短路过程的内阻, 降低电流, 从而降低焦耳热; ②热管理设计, 采用导热率更高的材料, 增强电池的散热性能; ③提高隔膜的熔点和收缩温度, 防止内短路

面积扩大。而钠离子电池负极集流体可采用铜箔, 一方面提高电芯的散热能力, 另一方面减少Al氧化反应的产热量。本工作采用相同的电芯设计, 简单将钠离子电池负极集流体, 由12 mm铝箔替换为8 mm铜箔, 制备电芯。

具体的内短路测试结果如图5所示。Al-An内短路瞬间, Cu集流体组电芯电压降大于Al集流体组, 表明Cu集流体组的短路内阻比Al集流体组更

小,导致Cu集流体组在内短路过程中的瞬时电流更大,极化电位更大,电压下降迅速,如图5(a)所示。电芯主体和电芯顶部的温度变化如图5(b)、(c)所示,虽然负极集流体厚度由12 mm降低至8 mm,但集流体材质的变化使得电芯在Al-An内短路过程中产热明显降低。电芯主体的温升 ΔT 由75.5℃降低至63.2℃,电芯顶部的温升 ΔT 由47℃降低至32℃。同样,对Cu集流体组的钠离子电池短路后进行电芯拆解,如图5(d)所示,发现负极侧有明显烧灼点,但铜箔完好,表明将Al材质替换为Cu,化学稳定性显著提高,可防止负极集流体腐蚀导致的放热,能够显著减少短路情况下放热量,电芯产热减小散热性能提高,从而提高电芯在短路情况下的热稳定性。

为进一步研究负极箔材对钠离子电池内短路安全性能影响,采用32700-4.7Ah圆柱钠离子电池进行单因子验证,实验组使用铜箔集流体,对照组采用铝箔集流体。电芯采用《电动自行车用锂离子蓄电池安全技术规范》(GB 43854—2024)标准测试方法进行电池针刺实验。按型式试验要求最低测试2个电芯,对照组2个电芯全部发生爆炸,测试前后电芯外观如图6(a)所示,电芯在针刺后瞬间发生爆炸,测试防爆阀及后底盖冲开,内含物被喷射出,可见明显火焰。试验组采用铜箔作为集流体,测试前后电芯外观如图6(b)所示,为验证实验的一致性,平行测试3个电芯,针刺测试全部通过,钢针在电芯内部保持1 h无起火无爆炸,正极侧防爆阀泄压正常,外部感温线及包装膜保持良好。

具体的针刺测试温升曲线如图7(a)、(b)所示,感温线紧贴在电芯正极侧、电芯主体和电芯负极侧。铝箔组在钢针扎入瞬间,电芯发生短路,外电压瞬间降至0 V,同时温度瞬间上升,由于外壳的包装膜和感温线崩开,导致温度无法继续监控。由于圆柱电芯正极侧防爆阀优先冲破泄压,导致正极侧最高温度达到460℃以上。而铜箔组在针刺发生过程中,电芯发生短路,外电压瞬间达到0 V,电芯温度逐步上升,监控电芯正极侧在100 s左右达到最高温度100℃,负极侧93℃,电芯主体温度80℃。随着针刺持续进行,电芯外侧温度持续下降。

3 结 论

本研究通过缺孔挤压法系统模拟了钠离子电池

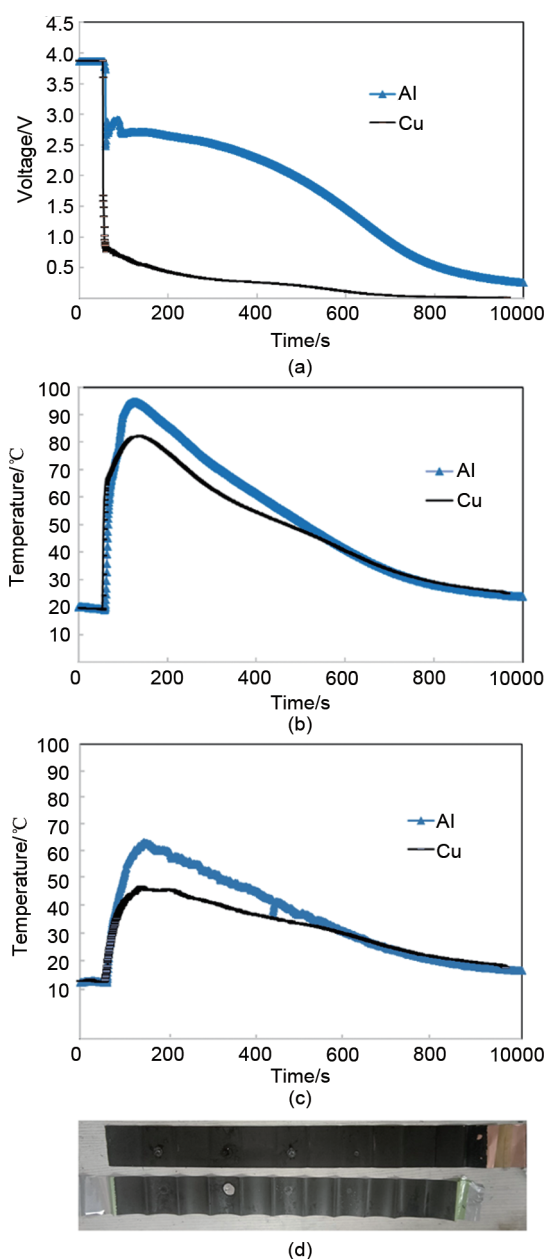


图5 不同负极集流体采用Al-An内短路方式, (a) 电芯外部电压、(b) 电芯主体温度、(c) 电芯顶部温度变化; (d) Cu集流体组钠离子电池内短路后拆解照片

Fig. 5 (a) External voltage, (b) cell body temperature, and (c) cell top temperature curves of SIB with different anode current collectors under Al-An short-circuit model. (d) Photo of the disassembled SIB with Cu current collector after Al-An internal short-circuit tests

四种内短路类型的电压及温度变化(Al-Al、Al-An、Ca-Al、Ca-An),发现Al-An(负极材料与正极集流体接触)短路模式温升最显著(ΔT 达75.5℃),该结果与锂离子电池内短路模型类似。而在Al-An短路情况下,钠离子电池温升高于同容量锂离子电池

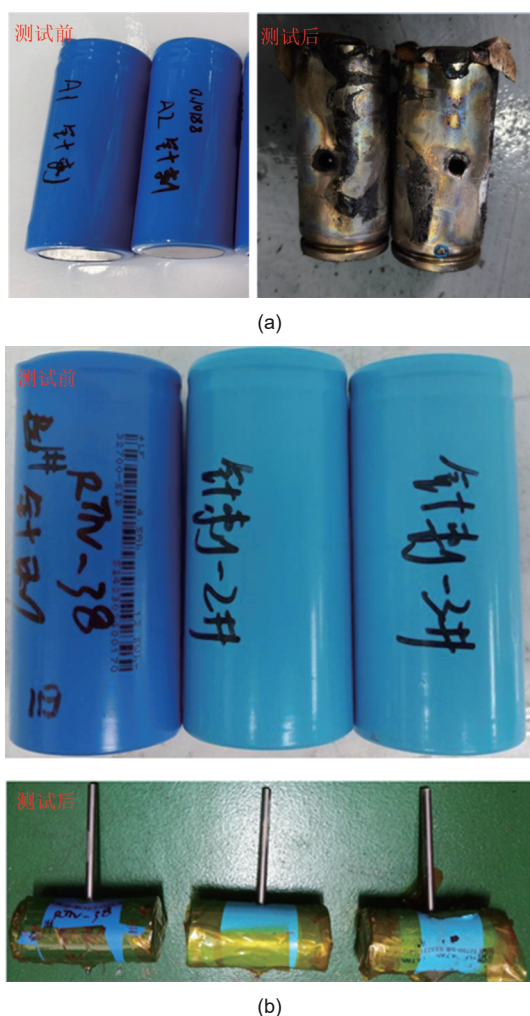


图6 (a) 对照组-负极铝集流体和 (b) 实验组-负极铜集流体的 32700 钠离子电池在针刺测试前后外观照片
Fig. 6 Photos of 32700-SIB before and after nail penetration tests: (a) Al anode current collector, (b) Cu anode current collector

($\Delta T_{LFP}=50^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_{NCM}=55^{\circ}\text{C}$)。其主要原因在于铝箔集流体的高内阻、低导热性及低化学稳定性。通过负极铜箔替代铝箔,在 1 Ah 的钠离子电池上,可降低 Al-An 短路情况下的温升。由此可见,常规以铝箔作为负极集流体的钠离子电池,内短路过程的安全性能劣于锂离子电池。

对商业化的 32700 型号圆柱钠离子电池进行针刺实验,进一步验证集流体对于钠离子电池安全性能的影响,发现铜箔组能通过 GB 43854—2024 安全标准,铝箔组则全部爆炸。为钠电安全性能提升提供了实验依据与改进方向。

未来对钠离子电池内短路安全性能研究可从 3 方面展开:①材料优化:开发高导热负极集流体复

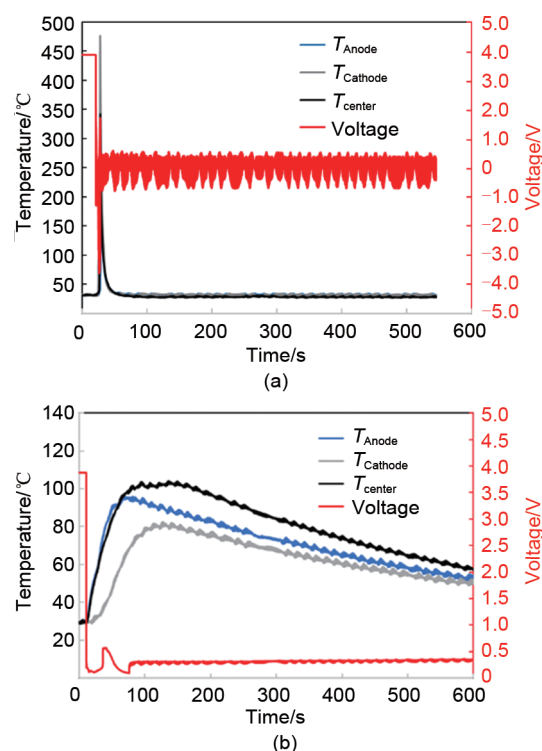


图7 (a) 铝箔组和 (b) 铜箔组针刺过程电压和温度变化
Fig. 7 Voltage and temperature changes during nail penetration tests: (a) Al anode current collector, (b) Cu anode current collector

合材料,平衡成本与安全性;②隔膜改进:提升耐高温与自修复性能,抑制短路扩散;③系统设计:结合热管理算法实现内短路早期预警;④结构设计:降低由机械滥用或电滥用过程 Al-An 类型短路的概率。

参考文献

- [1] 冯祥明,张晶晶,李荣富,等. LiFePO_4 锂离子电池的低温性能[J]. 电池, 2009, 39(1): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1579.2009.01.013. FENG X M, ZHANG J J, LI R F, et al. Low temperature performance of LiFePO_4 Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2009, 39(1): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1579.2009.01.013.
- [2] CHE C, WU F, LI Y, et al. Challenges and breakthroughs in enhancing temperature tolerance of sodium-ion batteries[J]. Advanced Materials, 2024, 36(28): e2402291. DOI: 10.1002/adma.202402291.
- [3] VAALMA C, BUCHHOLZ D, WEIL M, et al. A cost and resource analysis of sodium-ion batteries[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3: 18013. DOI: 10.1038/natrevmats.2018.13.
- [4] NIU J P, DONG J Y, ZHANG X H, et al. Sodium cluster-driven safety concerns of sodium-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(5): 2474-2484.
- [5] 崔志仙. 锂离子电池内短路诱发热失控机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.

- CUI Z X. Study on thermal runaway mechanism of lithium ion battery induced by internal short circuit[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [6] 刘力硕, 张明轩, 卢兰光, 等. 锂离子电池内短路机理与检测研究进展[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1003-1015. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0163.
- LIU L S, ZHANG M X, LU L G, et al. Recent progress on mechanism and detection of internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1003-1015. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0163.
- [7] SANTHANAGOPALAN S, RAMADASS P, ZHANG J. Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 550-557. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.05.002.
- [8] LIU L S, FENG X N, ZHANG M X, et al. Comparative study on substitute triggering approaches for internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114143. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114143.
- [9] GANDOMAN F H, JAGUEMONT J, GOUTAM S, et al. Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: Basics, progress, and challenges[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113343. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113343.
- [10] WANG M, NOELLE D J, SHI Y, et al. Effect of Notch depth of modified current collector on internal-short-circuit mitigation for lithium-ion battery[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(1): 015502. DOI: 10.1088/1361-6463/aa9a74.
- [11] RAMADASS P, FANG W F, ZHANG Z M. Study of internal short in a Li-ion cell I. Test method development using infra-red imaging technique[J]. Journal of Power Sources, 2014, 248: 769-776. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.145.
- [12] FANG W F, RAMADASS P, ZHANG Z M. Study of internal short in a Li-ion cell-II. Numerical investigation using a 3D electrochemical-thermal model[J]. Journal of Power Sources, 2014, 248: 1090-1098. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.10.004.
- [13] ORENDORFF C J, ROTH E P, NAGASUBRAMANIAN G. Experimental triggers for internal short circuits in lithium-ion cells [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(15): 6554-6558. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.035.
- [14] FINEGAN D P, DARCY E, KEYSER M, et al. Characterising thermal runaway within lithium-ion cells by inducing and monitoring internal short circuits[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(6): 1377-1388.
- [15] LAI X, JIN C Y, YI W, et al. Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives[J]. Energy Storage Materials, 2021, 35: 470-499. DOI: 10.1016/j.ensm.2020.11.026.
- [16] 高兴奇. 锂离子电池内短路特性及其检测方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- GAO X Q. Research on the characteristics and detection methods of internal short circuit of lithium ion battery[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [17] PIERSON H O. Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: Processing, properties and applications[M]. Norwich: William Andrew, 2012.
- [18] BALANDIN A A. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials[J]. Nature Materials, 2011, 10(8): 569-581. DOI: 10.1038/nmat3064.