



160Ah 聚阴离子型钠离子电池热失控与产气特性研究

储玉喜^{1,2,3}, 马 畅^{1,2,3}, 陈红光^{1,2,3}, 姜 楠^{1,2,3}, 卓 萍^{1,2,3}

(¹应急管理部天津消防研究所, 天津 300381; ²电化学能源消防安全联合创新应急管理部重点实验室, 北京 102000; ³天津市消防安全技术重点实验室, 天津 300381)

摘 要: 当前, 商用大容量钠离子电池的正极材料体系主要分为层状氧化物与聚阴离子型两大类, 其中绝大多数热失控安全研究集中于层状氧化物体系, 对聚阴离子型钠离子电池的热安全特性研究仍较为缺乏。本工作以 160 Ah 大容量聚阴离子型钠离子电池为研究对象, 利用绝热加速量热仪与 320 L 密闭压力容器实验系统, 探究了电池在绝热、外部加热及 0.5 C 过充滥用条件下的热失控与产气特性。研究结果表明: 在绝热条件下, 电池自产热起始温度(T_{onset})、热失控触发温度(T_{tr})及最高温度(T_{max})分别为 100.94℃、180.51℃和 247.02℃, 其热失控最高温度显著低于同类磷酸铁锂电池。外部加热触发热失控后, 释放气体总量为 93.1 L, 主要成分为 CO_2 (37.97%)、 H_2 (31.25%)、 CO (11.41%) 和 C_3H_6 (9.38%), 电池质量损失率为 20.12%。在过充条件下, 电池在过充电量达标称容量 29.94% 时发生热失控, 最高温度达 272.04℃, 产气总量为 107.8 L, 电池质量损失率为 21.19%, 其中 H_2 (43.09%)、 CO_2 (27.68%) 为主要组分。本研究证实, 聚阴离子型钠离子电池具有较低的热失控剧烈程度, 但其产气中可燃组分比例依然较高, 试验结果为大容量钠离子电池的安全设计与应用提供了重要实验依据。

关键词: 聚阴离子型钠离子电池; 热失控; 绝热环境; 电热滥用; 产气特性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0808

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-479-09

Thermal runaway and gas release characteristics of a 160Ah polyanion-type sodium-ion battery

CHU Yuxi^{1,2,3}, MA Chang^{1,2,3}, CHEN Hongguang^{1,2,3}, JIANG Nan^{1,2,3}, ZHUO Ping^{1,2,3}

(¹Tianjin Fire Research Institute of Emergency Management Department, Tianjin 300381, China; ²Key Laboratory of Electrochemical Energy and Fire Safety Joint Innovation, Ministry of Emergency Management, Beijing 102000, China; ³Tianjin Key Laboratory of Fire Safety Technology, Tianjin 300381, China)

Abstract: Currently, cathode material systems for commercial large-capacity sodium-ion batteries (NIBs) are mainly divided into two categories: layered oxides and polyanion-type materials. While most thermal runaway safety studies have focused on layered oxide systems, investigations into the thermal safety characteristics of polyanion-type NIBs remain limited. This study investigates the thermal runaway and gas release characteristics of a 160 Ah large-capacity polyanion-type NIB under adiabatic conditions, external heating, and 0.5 C

收稿日期: 2025-09-09; 修改稿日期: 2025-10-17。

基金项目: 应急管理部重点科技计划 (2024EMST111107), 应急管理部天津消防研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (2024SJ21), 天津市自然科学基金面上项目 (24JCYBJC00070)。

第一作者: 储玉喜 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事锂离子电池安全领域相关研究, E-mail: chuyuxi@tfri.com.cn; 通信作者: 卓萍, 副研究员, 主要从事电池安全及标准化研究, E-mail: zhuoping@tfri.com.cn。

引用本文: 储玉喜, 马畅, 陈红光, 等. 160Ah 聚阴离子型钠离子电池热失控与产气特性研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 479-487.

Citation: CHU Yuxi, MA Chang, CHEN Hongguang, et al. Thermal runaway and gas release characteristics of a 160Ah polyanion-type sodium-ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 479-487.

overcharge abuse conditions, using an adiabatic accelerated calorimeter and a 320 L sealed pressure vessel experimental system. The results indicate that, under adiabatic conditions, the battery self-heating onset temperature (T_{onset}), thermal runaway trigger temperature (T_{tr}), and maximum temperature (T_{max}) are 100.94°C, 180.51°C, and 247.02°C, respectively. The maximum thermal runaway temperature of the polyanion-type NIB is significantly lower than that of comparable lithium iron phosphate batteries. Following thermal runaway triggered by external heating, the total gas release is 93.1 L, primarily composed of CO_2 (37.97%), H_2 (31.25%), CO (11.41%), and C_3H_6 (9.38%), with a battery mass-loss rate of 20.12%. Under overcharge conditions, thermal runaway occurs when the overcharge capacity reaches 29.94% of the nominal capacity, with a T_{max} value of 272.04°C, a total gas production of 107.8 L, and a battery mass-loss rate of 21.19%. The main components of the released gas are H_2 (43.09%) and CO_2 (27.68%). These results confirm that polyanion-type NIBs exhibit a lower thermal runaway intensity compared with lithium iron phosphate batteries; however, the proportion of flammable components in the released gas remains high. The findings provide important data for the safety design and application of large-capacity NIBs.

Keywords: polyanionic sodium-ion battery; thermal runaway; adiabatic environment; electro-thermal abuse; gas-generating properties

全球“双碳”战略背景下,电化学储能技术成为能源转型的核心支撑。然而,锂资源的地理分布不均和价格剧烈波动制约了锂离子电池的可持续发展。钠离子电池凭借储量丰富、充放电速度快、循环寿命长和低温性能优异等优点在低速电动车、规模储能及备用电源等领域形成差异化应用场景^[1-2]。正极材料是钠离子电池性能与成本的核心制约因素^[3]。目前,该领域的研究与产业化应用主要围绕层状氧化物、聚阴离子化合物及普鲁士蓝类化合物三大正极材料体系展开。然而,普鲁士蓝类材料受制于结晶水残留和晶格结构缺陷等关键技术瓶颈,其实际应用仍面临较大挑战^[4]。因此,当前实现大规模量产的大容量钠离子电池正极材料以层状氧化物型和聚阴离子型为主。其中,层状氧化物正极具有较高的能量密度,而聚阴离子型材料则表现出优异的结构稳定性和长循环寿命^[5]。

钠离子电池与锂离子电池类似,在机械滥用、热滥用和电滥用条件下均可能发生热失控,且过程中会释放大量的燃爆和有毒有害气体。然而,不同类型正极材料的钠离子电池在热失控行为方面表现出显著差异。Carter等^[6]比较了容量分别为0.7 Ah(聚阴离子型)、1.5 Ah(层状氧化物型)和4.3 Ah(普鲁士蓝型)的商用小容量钠离子电池的电性能与安全特性,发现其热稳定性存在明显区别。李勇琦等^[7]研

究对比了 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 磷酸盐系聚阴离子钠离子电池和 $\text{NaNi}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 层状氧化物钠离子电池在过热条件下的热失控行为,结果表明 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 电池具有较高的热安全性。储玉喜等^[8]采用绝热加速量热仪(ARC)和密闭压力容器测试装置,对180 Ah层状氧化物钠离子电池与锂离子电池在不同滥用情境下的热失控行为进行了研究。结果表明,钠离子电池的热失控特性与三元锂(NCM)电池更为接近,且在过充条件下其荷电状态(SOC)阈值显著高于锂离子电池。吴静云等^[9]研究了大容量层状氧化物钠离子电池在加热和过充条件下的热失控行为及机理,结果表明,加热与过充条件下热失控的触发机理与演变过程存在显著差异,且过充安全风险更高。研究人员系统研究了不同容量层状氧化物钠离子电池在不同滥用条件下的热失控特性,并对比了锂离子电池在相同滥用条件下的热失控特性,从而对两种电池的危险性进行了评估与比较,热风险分析表明,层状氧化物钠离子电池的安全性水平介于磷酸铁锂(LFP)电池和三元锂(NCM)电池之间^[10-13]。目前,针对大容量钠离子电池的安全研究主要集中于层状氧化物体系,而对大容量聚阴离子型钠离子电池的热失控行为与安全性能研究仍相对缺乏。

本工作以160 Ah、NPFF型聚阴离子钠离子电池为研究对象,采用绝热加速量热仪和密闭压力容

器，研究了电池在绝热、过热和过充条件下的热失控行为，并分析了在不同滥用条件下的热失控产气体积和组分。通过对实验结果的分析得出，电池的绝热热失控最高温度为247.02℃，显著低于同类型磷酸铁锂电池。在加热和过充条件下的热失控产气行为与磷酸铁锂电池更为接近。本研究可为聚阴离子型钠离子电池在实际应用中的热安全设计与消防安全策略制定提供重要实验依据与理论参考。

1 实验设计

1.1 实验样品

本工作以方形铝壳 160 Ah 钠离子电池单体为研究对象，电池能量密度约为 98 Wh/kg，电池的相关参数如表 1 所示，实物如图 1 所示。

表 1 实验用电池基本参数

Table 1 Basic parameters of the experimental battery

参数	数值
正极材料	$\text{Na}_4\text{M}_3(\text{PO}_4)_2\text{P}_2\text{O}_7$ (M 为过渡金属原子，磷酸焦磷酸铁钠)
负极材料	硬碳
尺寸(宽×高×厚)/mm	$(174\pm0.5)\times(207\pm0.5)\times(72\pm0.8)$
标称容量/Ah	160
标称能量/Wh	450
标称电压/V	3.0
充电截止电压/V	3.45
放电截止电压/V	1.5
重量/g	4600 ± 100
荷电状态/%	100



图 1 电池实物图

Fig. 1 Physical image of the battery

1.2 实验装置和测试方案

①绝热加速量热实验

使用绝热加速量热仪研究电池在绝热条件下的“自产热-开阀-热失控”过程。装置设置最高温度 315℃，自产热温升速率检测阈值为 0.02℃/min，

温度步长为 5.0℃。实验前，使用充放电循环仪对样品电池进行充放电，使得样品电池在测试之前处于 100% 荷电状态(state of charge, SOC)。电池表面布置热电偶，用于记录实验过程中电池表面的温度变化，采用金属夹板对电池的两个大面进行固定，如图 2 所示。

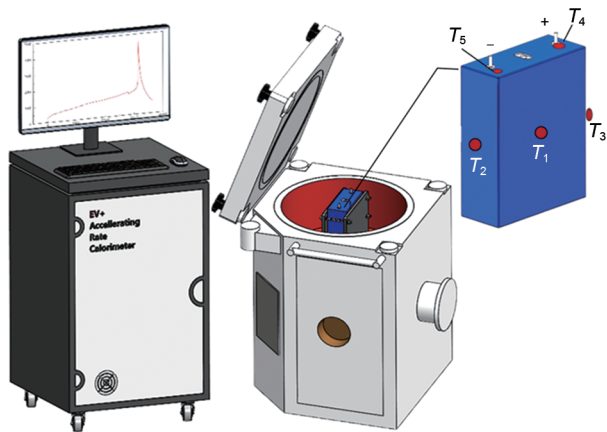


图 2 绝热加速量热仪

Fig. 2 Adiabatic accelerating rate calorimeter

表 2 绝热条件下电池表面温度测点

Table 2 Thermocouples layout of TR experiment for a battery using ARC

序号	位置
T_1	电池大面
T_2	正极侧面
T_3	负极侧面
T_4	正极旁
T_5	负极旁

②单体电池热失控试验

利用密闭压力容器，对电池进行加热和过充触发电池发生热失控，压力容器内部空间为 320 L。容器配套有抽真空系统、充氮系统、加热系统和气体采样系统，同时集成了压力传感器和多路热电偶等数据采集系统，用于测试实验过程中电池表面温度、电压和容器压力。电池采用双面加热的方式，加热板尺寸为 140 mm×180 mm×2 mm，加热板下方布置热电偶，用于反馈加热板的温度，从而控制加热的温升速率。在加热板与电池表面未覆盖的位置中间布置热电偶，用于测量电池两个大面的温度。同时，在电池侧面、负极、安全阀旁布置测温点，对比不同位置处的温度差异。为避免空气组分的干扰，在触发电池热失控前，先对密闭压力容器

进行抽真空，随后充入氮气，在氮气氛围下开展电池的热失控的产气分析。实验装置及电池表面温度测点如图3所示。

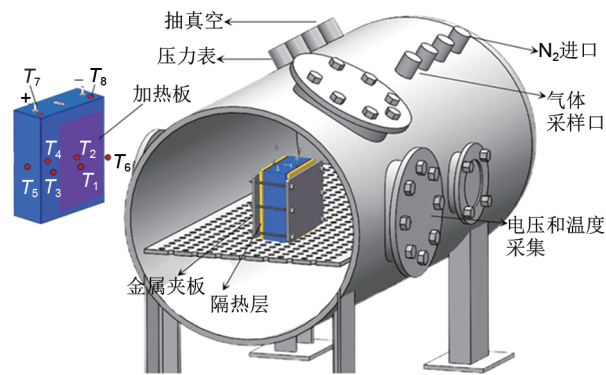


图3 电池热失控试验装置
Fig. 3 Experimental device for thermal runaway

表3 加热条件下电池表面温度测点
Table 3 Thermocouples layout of TR experiment for a battery under overheat

序号	位置
T_1	加热板1下
T_2	加热板2下
T_3	电池大面1
T_4	电池大面2
T_5	正极侧面
T_6	负极侧面
T_7	正极旁
T_8	负极旁

表4 过充条件下电池表面温度测点
Table 4 Thermocouples layout of TR experiment for a battery under overcharge

序号	位置
T_1	电池大面1
T_2	电池大面2
T_3	正极侧面
T_4	负极侧面
T_5	正极旁
T_6	负极旁

2 结果与讨论

2.1 绝热条件下电池热失控特性分析

图4(a)给出了在绝热条件下电池热失控过程中表面温度和温升速率变化情况。该过程可依据三个特征温度点划分为三个阶段，分别为自产热起始温度(T_{onset})、热失控触发温度(T_{tr})和热失控最高温度(T_{max})。当电池表面温升速率达到0.02℃/min时，

视为电池开始自产热，此时对应的表面温度定义为 T_{onset} 。实验结果显示，该电池的 T_{onset} 为100.94℃，此时温升速率达到0.021℃/min。在此温度下，电池电压为3.25 V，相较于初始电压(3.29 V)仅下降0.04 V，表明正极材料结构保持稳定，且尚未发生由隔膜熔化所致的内短路(对于聚烯烃隔膜一般在130℃以上)。该起始温度与文献中报道的硬碳负极表面固态电解质界面(SEI)膜分解的典型温度范围(80~120℃)高度吻合^[14-15]。因此，该初始自产热阶段主要归因于SEI膜的放热分解，该过程暴露了高活性的负极，进而引发其与电解液之间更剧烈的还原反应，推动电池进入持续的自产热阶段。随着温度持续上升，电池内部化学反应产生大量气体，同时电解液蒸发，导致内压迅速升高。至2778.21 min时，电池安全阀在达到承压极限后开启，电池开阀温度(T_{sv})为143.07℃。由于焦耳-汤姆逊效应，排出气体带走部分热量，电池表面温度由143.07℃短暂下降至142.09℃，自产热行为暂时中止，绝热加速量热仪随即切换为加热模式。直至151.62℃时，电池重新进入自产热状态。随后电解液分解及电极反应放出大量热量，温度上升进一步加速反应速率，形成正反馈循环。3165.75 min时，温度上升至约180℃，电压由3.11 V在数十秒内急剧跌落至0.03 V[图4(a)]，同时温升速率骤增至2855.28℃/min[图4(b)]。电压的瞬间下降和温升速率的爆发式增长，是电池内部发生大规模内短路的直接标志。高温导致隔膜发生熔融收缩，失去电子绝缘性，从而诱发正负极直接接触形成内短路。内短路产生的大量焦耳热，与同步加剧的电解液分解及电极反应共同作用，形成正反馈循环，最终触发彻底的热失控。由于样品电池内部有两个卷芯，两个卷芯发生热失控行为具有一定的时间间隔，因此在热失控过程中出现两个温升速率的峰值，分别对应2855.28℃/min和2343.62℃/min。3183.54 min时，热失控达到最高温度 T_{max} ，为247.02℃。通过文献对比，与本工作相同尺寸的280 Ah磷酸铁锂电池绝热条件下的热失控最高温度为340.72℃^[15]，文献[11]中102 Ah磷酸铁锂电池绝热条件下的热失控最高温度超过了400℃。图4(b)进一步展示了热失控过程中电池温升速率随温度的变化情况，最高温升速率为2855.28℃/min，对应表面温度为209.56℃。

图5为电池其他测点处温度变化，正极侧面、

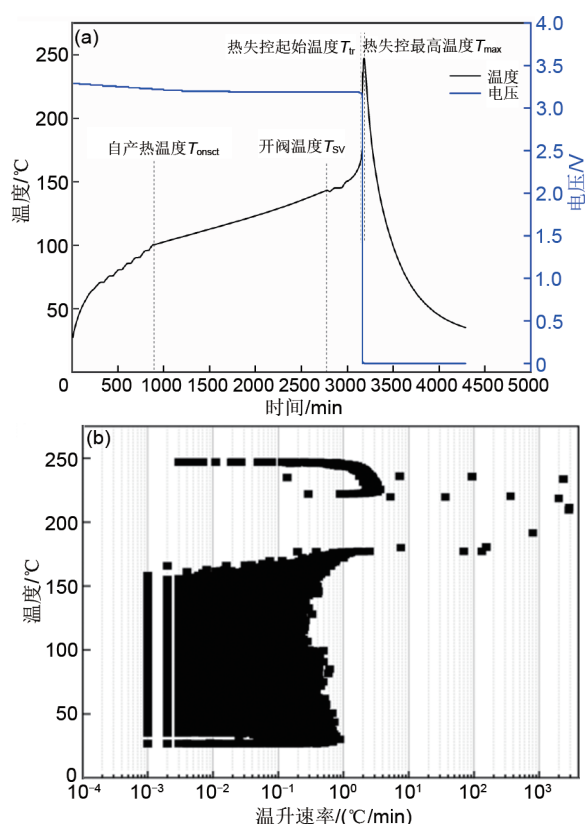


图4 绝热条件下电池表面温度 (a) 和温升速率 (b) 变化情况

Fig. 4 Evolutions in battery surface temperature (a) and temperature rise rate (b) under adiabatic conditions

负极侧面、正极旁和负极旁的最高温度分别为249.0、238.1、246.0和254.0°C。由于钠离子电池的正极与负极集流体均采用铝材,其导热性质相近,因此正极与负极附近测点的温度分布较为一致,差异较小。实验后对电池进行称重,质量损失率为20.01%。

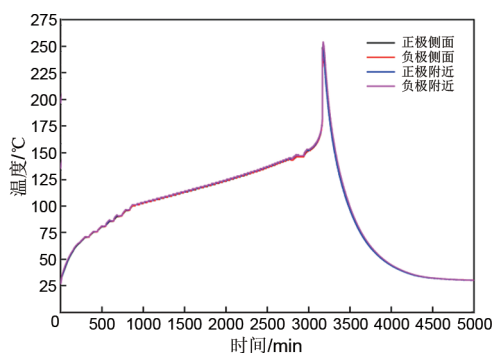


图5 绝热条件下电池其他位置温度变化情况
Fig. 5 Evolutions in battery temperature of other positions and under adiabatic conditions

2.2 加热条件下电池热失控温度与产气特性分析

选择功率为800 W加热板设置在电池两个大面,并在加热板下方布置热电偶,用于加热温升速率控制。在两侧放置云母隔热板以减少散热,将电池、加热板和隔热板用夹具进行固定后放置于压力容器内支架上。参考UL9540A标准中对电芯热失控测试选择的升温速率4~7°C/min,本工作采用程控加热器对电池两面同时加热,温升速率设置为7°C/min。在电池表面布置8个热电偶测温点($T_1 \sim T_8$),位置信息如表3所示。图6为电池在双面加热条件下各测点温度变化。由图可知,试验开始后,加热板表面温度持续升高,电池温度随之升高。加热至1447 s时,容器内压力由102.9 kPa上升至106.2 kPa,电池正极和负极侧面温度分别下降了0.57°C和0.33°C,表明电池安全阀开启,此时电池大面测点 T_1 和 T_2 温度分别为123.23°C和125.86°C。加热至1456 s时,电池表面温度迅速上升,温升速率超过加热速率,电池发生热失控。电池大面测点 T_3 和 T_4 最高温度分别为252.31°C和252.44°C。电池侧面测点 T_5 最高温度为249.95°C,侧面测点 T_6 发生了脱离。正极旁测点 T_7 和负极旁测点安全阀旁测点 T_8 最高温度分别为273.32°C和234.13°C。随后,电池内部反应基本停止,温度逐渐下降。从结果可以看出,各温度测点的最高温度与绝热条件下相似。实验后对电池进行称重,质量损失率为20.12%。

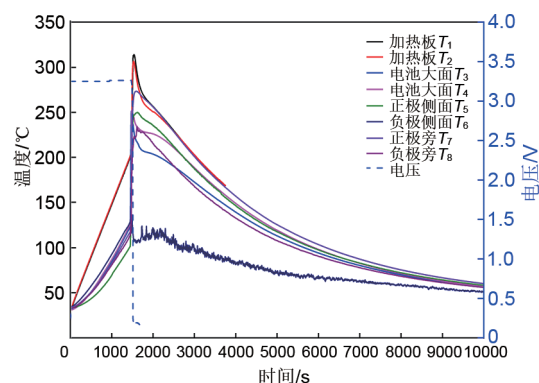


图6 加热条件下电池温度曲线
Fig. 6 Temperature evolutions of the battery under overheating conditions

相对于绝热条件,外部加热条件下的电池热失控最高温度更高,原因在于外部加热条件时持续供给能量,外部热源不仅触发内部放热反应(如SEI膜

分解、隔膜熔化), 还提供额外热量, 导致温度梯度更大和局部热点形成, 使热失控更剧烈, 而绝热条件下电池热失控主要依靠电池自产热, 外部输出能量低于加热条件。

图7(a)为320 L密闭压力容器内压力变化曲线。当电池发生热失控时, 容器内压力迅速上升, 最高达到174.1 kPa, 随后开始下降。当容器内压力稳定时, 测得内部压力为129.7 kPa。采用罐内环境平均温度作为计算参数, 基于理想气体状态方程计算压力容器内的气体量:

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (1)$$

式中, n 为压力容器内混合气体的摩尔数; P 为压力容器内压力, kPa; V 为压力容器容积, L; R 是气体常数[8.3145 L·kPa/(mol·K)]; T 是混合气体温度, K。

根据式(1)计算得到初始条件下($P=101.3$ kPa、 25°C)压力容器内的气体摩尔数为12.9 mol, 热失控后($P=131.6$ kPa、 25°C)压力容器内的气体摩尔数为16.7 mol, 二者间差值即为电池热失控后释放气体的摩尔数, 约3.8 mol, 进一步与 25°C 室温下气体摩尔体积相乘, 便可得到电池单体热失控后释放的混合气体体积为93.1 L, 归一化产气量为0.58 L/Ah, 与280 Ah磷酸铁锂液态电解质电池在外部加热条件下热失控归一化产气量相当^[6]。

利用气相色谱仪对电池热失控产生的混合气体进行成分分析, 所得结果如图7(b)所示。由图可知, 二氧化碳、氢气、一氧化碳和丙烯为混合气体的主要组成部分, 体积占比分别为37.97%、31.25%、11.41%和9.38%, 总占比超过89.99%, 而其他气体体积占比相对较低。该结果与参考文献[7]中聚阴离子钠离子电池在加热条件下热失控产气的结果相符。

图8所示为热失控后电池形貌, 电池安全阀正常开启, 电池壳体完整, 且电池表面蓝膜未发生大面积的溶解, 对比进一步证实了电池热失控温度较低。

2.3 过充条件下电池热失控温度与产气特性分析

图9为电池在0.5 C过充条件下的电池温度和电压曲线, 充电电流80 A。随着过充时间的增加, 电池温度和电压上升, 2007 s时, 电压迅速升高至30.04 V, 此时电池 $T_1 \sim T_6$ 测点对应的温度分别为

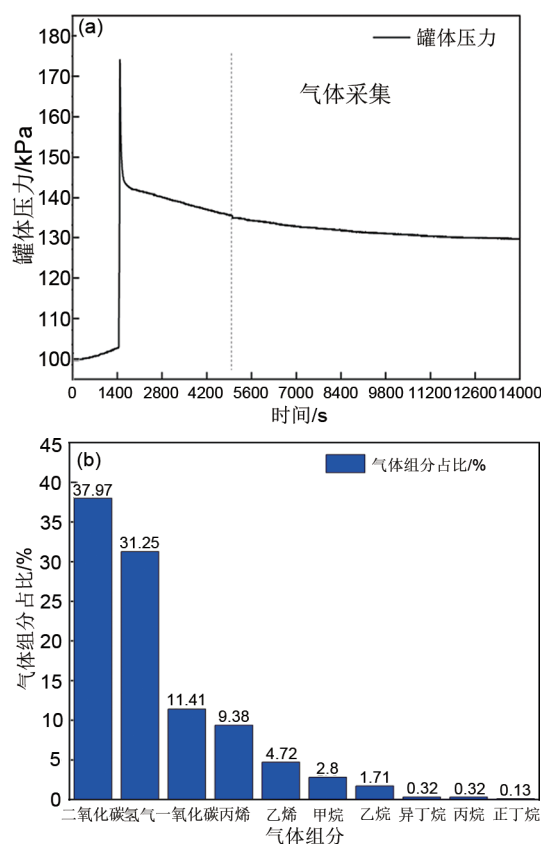


图7 (a) 加热条件下密闭容器内压力变化; (b) 电池热失控释放气体各组分体积比

Fig. 7 (a) Pressure evolutions within the sealed container, (b) volume ratio of gas components released from thermal runaway of the battery under overheating conditions

74.03、75.16、91.84、86.21、91.02、95.41 $^{\circ}\text{C}$ 。2080 s时, 电池各测点温度迅速升高, 电池发生热失控, $T_1 \sim T_6$ 测点对应的最高温度分别为188.57、192.34、272.04、250.12、239.34、267.69 $^{\circ}\text{C}$ 整个过充过程中总计充入电量47.91 Ah, 过充SOC 29.94%。实验后对电池进行称重, 质量损失率为21.19%。

图10(a)为320 L压力容器内的压力变化曲线。当电池发生热失控时, 容器内压力迅速上升, 最高达到181.40 kPa, 随后开始下降。当容器内温度恢复至室温 25°C 且压力稳定时的舱内压力为136.80 kPa。利用理想气体状态方程计算电池热失控产气量为107.8 L。过充条件下的产气量高于外部加热条件, 原因在于过充属于电滥用, 过量的电能会直接引发正极电解液剧烈氧化、负极析钠等高强度产气副反应, 从而生成更多气体, 而加热属于外部热滥用, 主要通过外部热量引发内部材料的热分

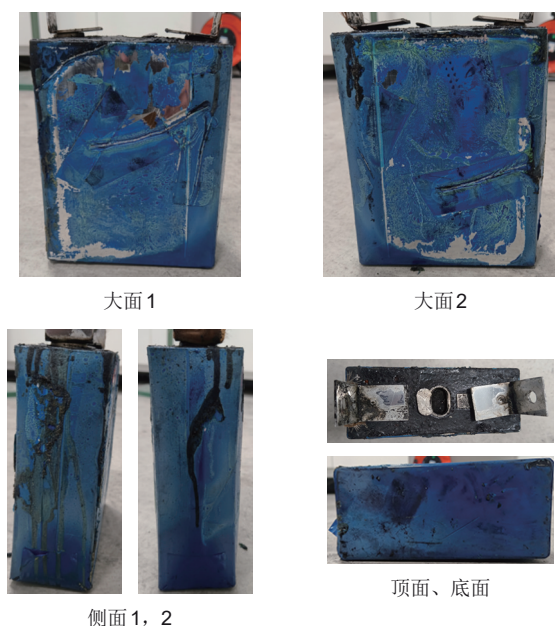


图8 热失控后电池外观形态分析

Fig. 8 Morphological analysis of battery appearance after thermal runaway under overheating conditions

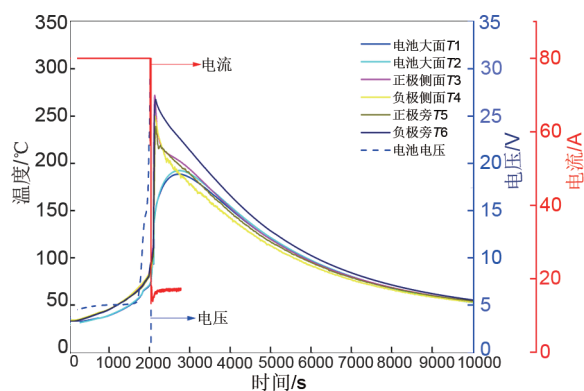


图9 过充条件下电池温度曲线

Fig. 9 Temperature evolutions of the battery under overcharge conditions

解来产气, 其产气效率和总量相对较低。图10(b)为电池热失控产生的混合气体成分, 由图可知, 氢气、二氧化碳、一氧化碳和丙烯为主要组成部分, 体积占比分别为43.09%、27.68%、10.87%和6.55%, 总占比超过88.18%, 而其他气体体积占比相对较低。相对于加热条件下的 CO_2 占比最高, 可能原因在于外部加热条件下, 热失控主要由持续的热滥用驱动, 电池内部温度均匀上升, 优先引发碳酸酯类的电解液溶剂的氧化分解, 以及正极材料的分解反应, 这些氧化分解过程更容易生成大量 CO_2 。在过充条件下, 热失控主要由电化学滥用主导。过量的

钠离子嵌入会导致负极电位急剧升高, 从而引发电解液在负极表面发生剧烈的还原分解, 这些还原过程会大量产生 H_2 。同时, 需要指出的是, 电池的热失控产气行为是一个复杂的“电-热-化学”耦合过程, 具体气体组分与含量同时受电池体系(如正负极材料)和电解液成分等多种因素影响。

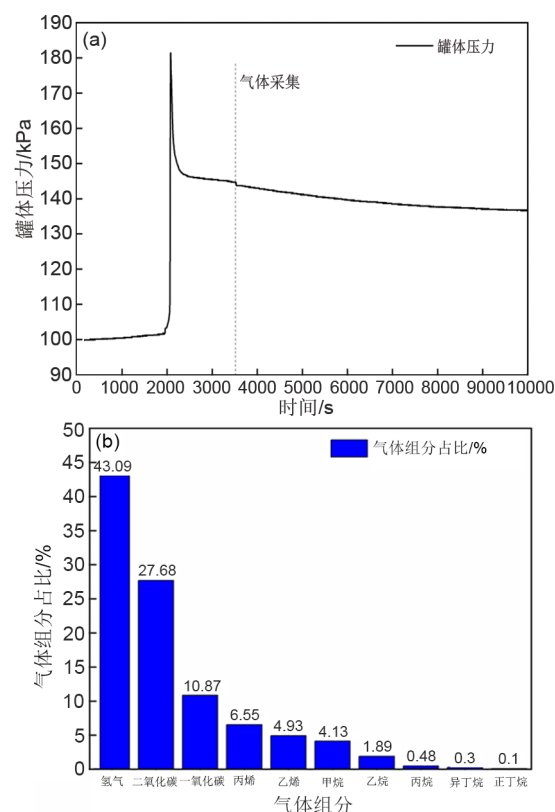


图10 (a) 过充条件下密闭容器内压力变化; (b) 电池热失控释放气体各组分体积比

Fig. 10 (a) Pressure evolutions within the sealed container, (b) volume ratio of gas components released from thermal runaway of the battery under overcharge conditions

2.4 不同正极材料钠离子电池的热失控特性对比

为探究不同正极材料对电池热安全特性的影响, 将本工作研究的160 Ah NPFF型聚阴离子钠离子电池与文献[8]中180 Ah层状氧化物电池的热失控特性数据进行比较, 两者容量接近且尺寸相同。实验结果表明, 两种正极材料体系下的钠离子电池, 其热失控特性表现出显著差异。具体而言, 本研究的聚阴离子电池在绝热条件下的热失控最高温度 $T_{\max}$ 为247.02℃, 显著低于层状氧化物电池的444.82℃。在外部滥用条件下, 该差距同样明显, 聚阴离子电池在加热和过充时的最高温度分别为

273.32℃ 与 272.04℃ 远低于层状氧化物电池 484.51℃ 与 573.60℃。此外,聚阴离子电池的产气总量与质量损失率均处于较低水平,其过充产气量(107.8 L)不及层状氧化物电池(200.26 L)的一半。然而,在过充耐受性方面,层状氧化物电池表现出明显优势,其热失控临界过充电量可达标称容量的 190.84%,远超聚阴离子电池的 29.94%。对比结果如表 5,表 6 和表 7 所示。

表 5 绝热条件下电池热失控对比

Table 5 Comparison of battery thermal uncontrol under isolated conditions

电池种类	自产热温度(T_{onset})/℃	热失控触发温度(T_{tr})/℃	最高温度(T_{max})/℃
160 Ah NPFF 型聚阴离子钠离子电池	100.94	180.51	247.02
180 Ah 层状氧化物钠离子电池 ^[8]	115.92	201.30	444.82

表 6 外部加热条件下电池热失控对比

Table 6 Comparison of battery thermal uncontrol under external heating conditions

电池种类	产气总量/L	热失控最高温度/℃	产气主要组分/%
160 Ah NPFF 型聚阴离子钠离子电池	93.10	273.32	CO ₂ (37.97)、H ₂ (31.25)、CO(11.41)、C ₃ H ₆ (9.38)
180 Ah 层状氧化物钠离子电池 ^[8]	123.25	484.51	H ₂ (35.39)、CO ₂ (30.95)、CO(19.16)、C ₂ H ₄ (4.34)

表 7 0.5 C 过充条件下电池热失控对比

Table 7 Comparison of battery thermal uncontrol under overcharge condition of 0.5 C

电池种类	产气总量/L	热失控最高温度/℃	过充 SOC/%	产气主要组分/%
160 Ah NPFF 型聚阴离子钠离子电池	107.80	272.04	129.94	H ₂ (43.09)、CO ₂ (27.68)、CO(10.87)、C ₃ H ₆ (6.55)
180 Ah 层状氧化物钠离子电池 ^[8]	200.26	573.60	190.84	CO ₂ (29.08)、H ₂ (28.10)、CO(20.79)、C ₂ H ₄ (14.43)

3 结 论

本工作以 160 Ah 聚阴离子型钠离子电池为研究对象,开展了电池在绝热、加热和 0.5 C 过充三种实验条件下的热失控实验,得到了该电池的温度、温升速率、电压和产气变化,同时对实验结果进行了分析,得出主要结论如下。

(1) 在绝热环境下,通过对样品电池表面温度曲线的分析,得到电池在绝热条件下的自产热温度 T_{onset} 、开阀温度 T_{sv} 、热失控触发温度 T_{tr} 和最高温度 T_{max} 分别为 100.94℃、143.07℃、180.51℃ 和 247.02℃。热失控过程中最高温升速率为 2855.28℃/min。

(2) 在外部加热条件下,电池最高温度为 273.32℃,位于电池负极旁测点。热失控后释放混合气体总量为 93.1 L,主要由二氧化碳(37.97%)、氢气(31.25%)、一氧化碳(11.41%)和丙烯(9.38%)等组成,电池质量损失率为 20.12%。在 0.5 C 过充条件下,当过充至 SOC 达到 29.94% 时,充电电流急剧降低,电池发生热失控,热失控最高温度为 272.04℃。热失控后释放混合气体总量为 107.8 L,主要由氢气(43.09%)、二氧化碳(27.68%)、一氧化

碳(10.87%)和丙烯(6.55%)等组成,电池质量损失率为 21.19%。

(3) 通过实验数据的对比分析得出,聚阴离子型钠离子电池凭借其稳固的晶体结构,热失控最高温度显著降低,在本征热稳定性和抑制热失控剧烈程度方面具有优势;而层状氧化物钠离子电池则展现出更高的过充电量耐受上限,但其触发热失控后的反应剧烈程度与火灾风险显著更高。值得注意的是,该电池热失控产气组分中可燃气体比例占比仍然超过了 50%,其在触发热失控后同样会构成显著的燃爆风险。

参 考 文 献

[1] 马琳,刘晨曦,王敏,等. 推动我国钠离子电池产业化路径探析[J]. 信息记录材料, 2022, 23(3): 224-226. DOI: 10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2022.03.007.
MA L, LIU C X, WANG M, et al. An analysis of the industrialization path of sodium-ion batteries in China[J]. Information Recording Materials, 2022, 23(3): 224-226. DOI: 10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2022.03.007.
[2] 徐国平,李海涛,钟良亮,等. 储能用钠离子电池及电池模块的开发应用[J]. 电源技术, 2024, 48(10): 2052-2057. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2024.10.026.
XU G P, LI H T, ZHONG L L, et al. Development and application

- of sodium-ion battery and module for energy storage system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(10): 2052-2057. DOI:10.3969/j.issn.1002-087X.2024.10.026.
- [3] 吴凡, 魏鹏, 吴韶杨, 等. 钠离子电池正极材料技术路线及产业现状[J]. 材料工程, 2025, 53(7): 15-28. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000211.
- WU F, WEI P, WU S Y, et al. Technical route and industrial status of positive electrode materials for sodium-ion batteries[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(7): 15-28. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000211.
- [4] 张李帅, 张艺菲, 马伊扬, 等. 铁基普鲁士蓝类似物钠离子电池正极材料研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(2): 525-543. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0663.
- ZHANG L S, ZHANG Y F, MA Y Y, et al. Research progress on sodium-ion battery cathode materials based on iron-based Prussian blue analogues[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(2): 525-543. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0663.
- [5] ZOU Z Y, MU Y B, HAN M S, et al. Integrated polyanion-layered oxide cathodes enabling 100 000 cycle life for sodium-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(5): 2216-2230.
- [6] CARTER R, WALLER G H, JACOB C, et al. First look at safety and performance evaluation of commercial sodium-ion batteries[J]. Energies, 2025, 18(3): 661. DOI:10.3390/en18030661.
- [7] 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. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.1044.
- 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. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.1044.
- [8] 储玉喜, 马畅, 陈红光, 等. 180 Ah 钠离子电池热失控与产气特性分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3611-3618. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0242.
- CHU Y X, MA C, CHEN H G, et al. Thermal runaway and gas production characteristics of a 180 Ah sodium-ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3611-3618. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0242.
- [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. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0349.
- 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. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0349.
- [10] YUE Y B, JIA Z Z, LI Y Q, et al. Thermal runaway hazards comparison between sodium-ion and lithium-ion batteries using accelerating rate calorimetry[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 189: 61-70. DOI:10.1016/j.psep.2024.06.032.
- [11] MEI W X, CHENG Z X, WANG L B, et al. Thermal hazard comparison and assessment of Li-ion battery and Na-ion battery[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 102: 18-26. DOI:10.1016/j.jechem.2024.10.036.
- [12] LI Z Y, CHENG Z X, YU Y, et al. Thermal runaway comparison and assessment between sodium-ion and lithium-ion batteries[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 193: 842-855. DOI:10.1016/j.psep.2024.11.118.
- [13] YANG J C, PAN T L, LI Y X, et al. Thermal runaway in large-capacity sodium-ion batteries: Safety performance evaluation under thermal, electrical, and mechanical abuse conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 130: 117405. DOI:10.1016/j.est.2025.117405.
- [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] 宋来丰, 梅文听, 贾壮壮, 等. 绝热条件下 280 Ah 大型磷酸铁锂电池热失控特性分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2411-2417. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0349.
- SONG L F, MEI W X, JIA Z Z, et al. Analysis of thermal runaway characteristics of 280 Ah large LiFePO₄ battery under adiabatic conditions[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2411-2417. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0349.
- [16] 陈晔, 李晋, 储玉喜, 等. 半固态与液态电解质大容量电池热失控产热产气特征对比[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3982-3989. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0371.
- CHEN Y, LI J, CHU Y X, et al. Comparative analysis of heat and gas production characteristics during thermal runaway of semisolid and liquid electrolyte lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3982-3989. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0371.