

中文引用格式:马迷娜,张宸宇,张艳辉,等.三元锂离子电池过放电循环后性能及热稳定性试验[J].中国安全科学学报,2026,36(4):160-167.

英文引用格式:Ma Mina, Zhang Chenyu, Zhang Yanhui, et al. Experiment on performance and thermal stability of ternary lithium-ion batteries after over-discharge cycles[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 160-167.

三元锂离子电池过放电循环后性能 及热稳定性试验*

马迷娜¹讲师,张宸宇¹,张艳辉¹副教授,陈明明¹,
刘梦饶¹,王青松^{**2}研究员

(1 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院,河北 石家庄 050043;

2 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室,安徽 合肥 230026)

中图分类号:X946

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.1484

基金项目:国家自然科学基金资助(52404231);河北省高等学校科学技术研究项目青年拔尖人才项目(BJK2024037);河北省自然科学基金青年科学基金资助(E2022210060)。

【摘要】 为提升锂离子电池长期使用的稳定性和安全性,开展过放电导致的潜在安全隐患研究。针对锂离子电池在新能源电动汽车、电化学储能等实际应用中可能面临的过放电-再次充电现象,以三元锂离子电池为对象,通过循环及混合功率脉冲特性测试(HPPC),利用绝热加速量热仪测试电池热失控,分析过放电-再次充电循环对电池放电容量(DC)、直流内阻、容量增量等电特性参数,以及对绝热条件下热失控特征参数的影响。结果表明:过放电循环会加速电池容量衰减和内阻增加,低荷电状态区域的放电直流内阻增加尤为显著,但在短期循环内长时间搁置电池,电池容量具有一定的恢复能力;过放电循环电池的热稳定性降低,自产热温度降低,热失控时间相较于新鲜电池和正常循环电池提前,但热失控最大温度相对较低。

【关键词】 锂离子电池; 过放电循环; 热稳定性; 放电容量(DC); 热失控

Experiment on performance and thermal stability of ternary lithium-ion batteries after over-discharge cycles

Ma Mi'na¹, Zhang Chenyu¹, Zhang Yanhui¹, Chen Mingming¹,
Liu Mengrao¹, Wang Qingsong²

(1 School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University,
Shijiazhuang Hebei 050043, China; 2 State Key Laboratory of Fire Science, University of
Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China)

Abstract: To enhance the long-term stability and safety of lithium-ion batteries, a study on potential safety hazards caused by over-discharge was conducted. Aiming at the over-discharge/recharge

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0160-08; 收稿日期:2025-10-15; 修稿日期:2026-01-04

** 通信作者:王青松(1977—),男,河南商丘人,博士,研究员,主要从事锂离子电池安全性方面的研究。E-mail: pinew@ustc.edu.cn。

phenomenon that the lithium-ion batteries may encounter in practical applications such as new energy electric vehicles and electrochemical energy storage, ternary lithium-ion batteries were examined. Through cycle tests and Hybrid Pulse Power Characteristic (HPPC) tests, adiabatic accelerating rate calorimetry was employed to investigate thermal runaway. The effects of over-discharge/recharge cycles on electrical characteristics—such as discharge capacity, DC internal resistance, and incremental capacity—as well as on the thermal runaway characteristic parameters under adiabatic conditions, were analyzed. The results show that over-discharge cycling accelerates battery capacity decay and increases internal resistance, with a particularly notable rise in DC internal resistance in the low state-of-charge region. However, after short-term cycling, prolonged resting allows partial capacity recovery. Over-discharge cycles also reduce the thermal stability of batteries, lower the self-heating onset temperature, and shorten the thermal runaway time compared to fresh batteries and normally cycled batteries, although the maximum thermal runaway temperature is relatively lower.

Keywords: lithium-ion batteries; over-discharge cycles; thermal stability; discharge capacity (DC); thermal runaway

0 引言

锂离子电池凭借高比能量与优异的循环寿命,在电动汽车和储能系统等领域得到广泛应用^[1]。然而,锂离子电池因其本身的物理化学性质,存在许多安全隐患^[2]。频繁发生的锂离子电池火灾和爆炸事件,引起了全球的广泛关注与重视^[3]。锂离子电池安全性受到多种因素的影响,其中,包括电池老化与滥用行为引起的性能和安全性降低^[4]。锂离子电池滥用行为可分为机械滥用、电滥用和热滥用^[5],其中,过放电滥用是一种潜在的安全隐患,主要表现为电池差异性导致个别单体出现反复过放电^[6]。虽然电池单体在出厂时能保持较高的一致性,但是随着电池的循环使用,其单体间的差异性逐渐增加^[7]。在电池组瞬时大功率输出或发生深度放电时,个别单体可能会出现过放电^[8]。而且随着电池单体差异性的加剧,这种情况会频繁出现,并且存在累积效应^[9]。研究表明:过放电可在没有任何机械作用和外来物质破坏的情况下加速电池老化,同时,过放电在与连续充电交替进行时会使电池故障恶化,有引发热失控、火灾等安全风险^[10-11]。

目前针对锂离子电池过放电滥用的研究,多集中在对电池进行一次深度过放电并经过长期搁置后再正常循环的性能和安全性分析,以及对电池解剖利用扫描电子显微镜等手段研究电池的失效机制^[12]。GUO Rui 等^[13]使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和X射线衍射技术研究了三元锂离子电池过放电过程及其诱导内

短路的机制。根据电池荷电状态(State of Charge, SOC)将过放电分为3个阶段($-11\% < \text{SOC} \leq 0\%$ 、 $-20\% < \text{SOC} \leq -11\%$ 、 $-100\% < \text{SOC} \leq -20\%$),发现Cu在 -12% SOC时被氧化为 Cu^{2+} 。KOSILOV 等^[14]对 $\text{Li}_{2-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ 电池在推荐和降低的电位范围内进行240次循环的充放电测试,研究过放电对电池电化学性能的影响,发现涉及低电位区域的重复循环会恶化电化学参数:电阻增加,比容量减小。FEAR 等^[15]研究了低于0V极端过放电条件下锂离子电池热、电化学响应特性。研究表明:在阴极、阳极和隔膜表面都观察到了Cu沉积,并通过EDS/SEM验证了结果,进一步表明内短路的形成。HENDRICKS 等^[16]通过X射线光电子能谱和X射线吸收精细结构光谱表征过放电锂离子电池中铜溶解的性质,包括过放电电池中铜的相对浓度和化学状态,发现电池单次深度过放电之后再行正常循环,电池容量加速衰减。ZHOU Hanwei 等^[17]通过配置参考电极分析极端过放电条件下电池的电极状态,揭示了充放电速率对显性阳极和隐形阴极中心退化的双重影响机制。目前锂离子电池过放电研究,仍然存在一些关键问题,如过放电后的电池是否能够继续使用,如何评估和测试过放电-充电循环对电池性能的影响以及由此产生的潜在安全隐患,这些问题目前仍缺乏明确的研究结论。

鉴于此,笔者拟选取一款商用软布袋状三元锂离子电池,通过循环测试、混合功率脉冲特性测试(Hybrid Pulse Power Characteristic, HPPC),以及绝热条件下热失控测试,探究过放电循环对电池容量、直流内阻、容量增量等电化学性能参数的影响,并分

析其热稳定性的变化, 以为电池安全使用提供指导。

1 过放电循环与热稳定性试验

1.1 试验电池与平台

试验使用的是额定容量为 25 Ah 的商用软包装袋状电池, 电池具体参数见表 1。

表 1 电池具体参数

Table 1 Battery specifications

参数	数值或特性
化学体系	LiNi _{0.5} Co _{0.2} Mn _{0.3} O ₂ 正极, 石墨负极, 陶瓷隔膜
额定容量/Ah	25
标称电压/V	3.6
充电截止电压/V	4.2
放电截止电压/V	2.75
最大充电电流/C	1
最大放电电流/C	3
工作环境	充电: 0~ +45 ℃, 湿度≤85% 放电: -20 ~ +60 ℃, 湿度≤85%
电池尺寸/ (mm×mm×mm)	长×宽×高: 134×9.2×201

试验平台如图 1 所示, 测试电池被放置在高低温防爆箱中, 并通过导线连接至充放电循环测试仪。上位机系统与高低温防爆箱及充放电循环测试仪实现联动控制, 可实时采集电池在不同测试阶段的电压、电流、容量等参数。

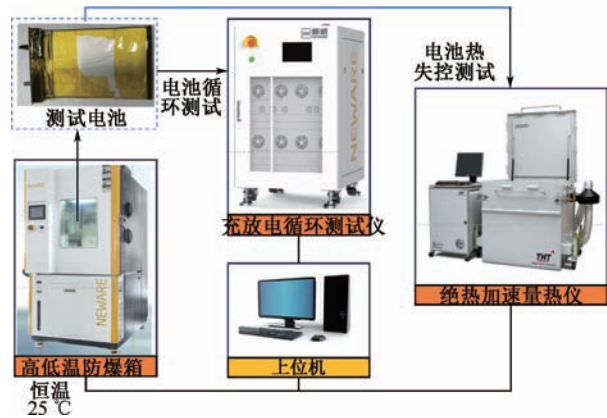


图 1 试验平台

Fig. 1 Experimental platform

整个试验包括标准容量测试、HPPC 测试, 以及过放电循环测试。在完成过放电工况的循环后, 测试电池将转入绝热加速量热仪中开展热失控测试, 记录热失控初始温度、峰值温度、温升速率等特征参数, 分析其热安全性。

1.2 试验方案与过程

试验流程如图 2 所示, 具体内容包括:

1) 选择软包三元锂离子电池单体, 对其执行容量测试和 HPPC 测试, 确定电池的初始状态。

2) 将电池编号, 1 号、2 号、3 号电池分别以 1C 恒流恒压充电至满电, 1C 恒流放电至 2.75、2.15、2.3 V, 以此循环, 每循环 20 圈再执行一次 HPPC 测试, 即完成一个阶段的循环测试, 再循环 6 次, 共计 120 圈。

3) 将循环后的电池和新鲜电池以 50%SOC 分别进行绝热加速量热 (Extended Volume Accelerating Rate Calorimetry, EV-ARC) 加热测试。运行“加热-等待-搜寻 (Heat-Wait-Search, H-W-S) 模式”, 设置温升灵敏度为 0.02 ℃/min, 温升台阶为 5 ℃, 仪器先将样品电池从室温加热到初始温度 60 ℃, 随后系统进入等待模式, 使样品与量热腔达到热平衡。等待阶段结束后, 系统切换到搜寻模式, 系统将实时监测样品电池的温升速率, 以判断其是否超过预设的温升灵敏度。随后, 系统会采用温升阶梯的方式继续加热, 并不断重复这一过程。当监测到样品电池的温升速率超出设定的灵敏度时, 系统将立即停止加热。

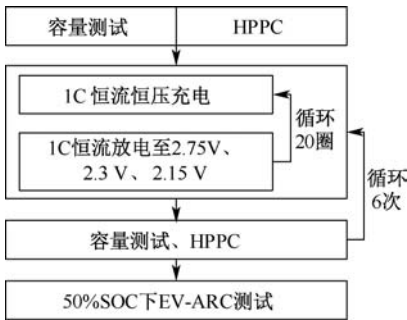


图 2 试验流程

Fig. 2 Experimental flowchart

2 过放电循环与热稳定性试验结果

2.1 电池容量变化

基于原始放电容量 (Discharge Capacity, DC) 数据, 计算各电池 DC 与其初始 DC 的比值, 得到各电池 DC 保持率随循环次数的变化曲线, 如图 3 所示, 在标准充放电截止电压下进行循环的 1 号电池, 其 DC 在前 20 圈表现出上升趋势, 20~80 圈基本保持稳定, 80 圈后呈现衰减趋势。在 40 圈时的容量保持率为 102.93%, 120 圈时容量保持率下降为 101.13%。原因是由于电极材料在初始充放电过程中发生化学反应使锂离子更加有效的嵌入和脱嵌,

从而提高了初期 DC。以过放电循环的 2 号电池为例,在前 10 圈循环中容量有上升趋势,而后逐渐衰减,在完成一个阶段测试(20 圈循环)进入下一阶段循环时,初始容量有显著的回升台阶。分析过放电循环前期引起的可逆极化过程发现,在 HPPC 测试阶段,电池进行了较长时间的搁置,使得容量回升,过放电持续循环又引起容量衰减。2 号电池的容量保持率由 40 圈时的 100.45% 下降到 120 圈时的 99.17%。随着电池循环次数的积累,过放电对电池性能造成的长期不可逆损害逐渐变得明显。3 号电池容量变化趋势与 2 号电池特征相似,

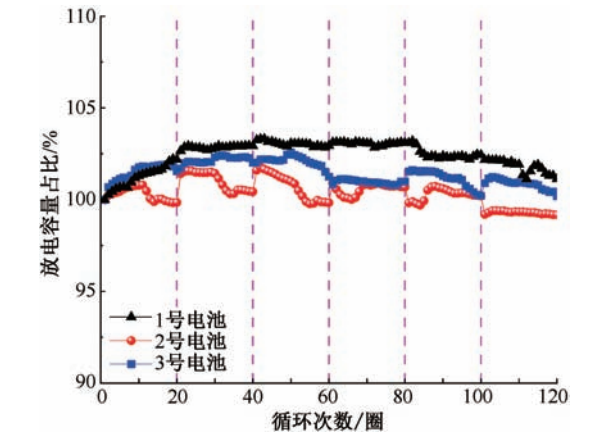


图 3 各电池 DC 保持率随循环次数的变化曲线
Fig. 3 Variation of DC retention of each battery with number of cycles

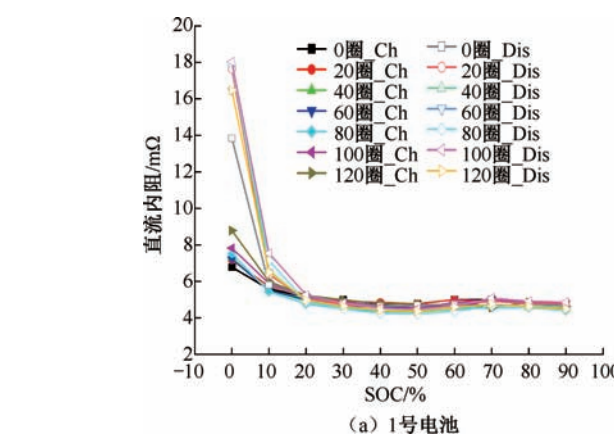


图 4 不同循环次数下充、放电直流内阻随 SOC 的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of charge and discharge DC internal resistance with SOC at different cycle numbers

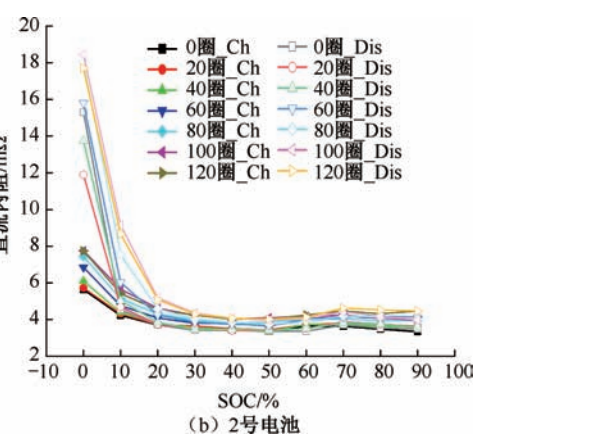
2.3 容量增量分析

通过处理原始的恒流充电和恒流放电的容量-电压数据,计算出 dQ/dV ,即容量对电池端电压的导数,进而得到 dQ/dV -电压曲线,也就是容量增量 (Incremental Capacity, IC) 曲线^[18]。这种方法能够

但程度较 2 号电池弱,因为 3 号电池的过放电程度较轻,引起的极化也较小。3 号电池的容量保持率由 40 圈时的 102.01% 下降到 120 圈时的 100.19%。可以看出,随循环进行,电池容量保持率为 1 号>3 号>2 号,随着放电深度增加,容量保持率下降越快。放电深度是影响电池容量衰退的关键因素。

2.2 直流内阻

每 20 圈循环对电池执行一次 HPPC 测试,分别计算充电阶段 (标注为_Ch) 和放电阶段 (标注为_Dis) 的直流内阻,结果如图 4 所示。结果显示,电池在低于 30% SOC 阶段的直流内阻相较于较高 SOC 阶段有增大的趋势,且放电直流内阻增加显著,约为较高 SOC 的 3~4 倍。以标准充放电截止电压循环的 1 号电池为例,直流内阻随循环次数的增加而增加。经过 120 圈循环,1 号电池的充电直流内阻比循环前平均增加 0.17 mΩ,放电直流内阻平均增加 0.19 mΩ。进行过放电循环的 2 号电池 120 圈之后比循环前充电直流内阻平均增加 0.94 mΩ,放电直流内阻平均增加 1.38 mΩ。内阻增加最为显著的阶段是 20%SOC、10%SOC 和 0%SOC 的放电直流内阻,正常循环的 1 号电池最大增加 2.63 mΩ,过放电循环的 2 号电池最大增加 4.12 mΩ。循环累积对开路电压的影响不显著,同样是在低 SOC 阶段,经过放电循环的电池 0%SOC 开路电压随循环次数增加略有上升。



将电压曲线中的电压平台对应的电池内部反应转化为 IC 曲线上的峰值,使得在电压曲线上难以察觉的微小变化在 IC 曲线上体现。在充电阶段,IC 为正值,而在放电阶段 IC 为负值,图 5 为正常循环 1 号电池和过放电循环 2 号电池的 IC 曲线。从图 5

可以看出,充电过程中,随循环次数增加,主峰 II 峰的高度减小,表明了锂离子的损失^[19];放电过程中,随循环次数增加,III 峰的高度减小,曲线向左偏移,分别表明了锂离子的损失和电池阻抗的增加。

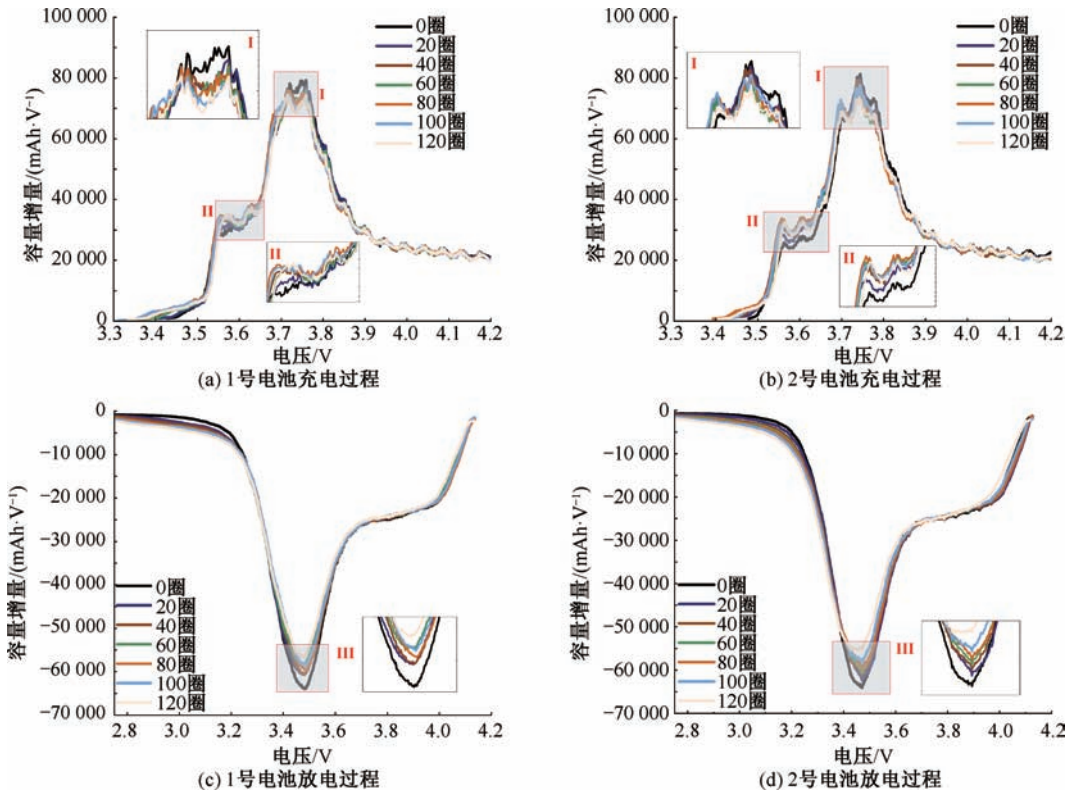


图5 容量增量随循环次数的变化情况

Fig. 5 Variation of capacity increment with cycles

2.4 热稳定性分析

在 50%SOC 条件下,2 号电池进行绝热测试,电池端电压、表面温度随时间的变化以及温升速率随温度的变化如图 6 所示。

根据自产热起始温度 θ_{ER} 、热失控初始温度 θ_{TR} 和热失控峰值温度 θ_{max} 这 3 个特征量,电池热失控

过程一般被分为 3 个阶段,文中未考虑电池表面温度达到峰值后的降温阶段。

1) 阶段 I :系统“H-W-S”阶段。使用绝热量热仪以 5℃ 的温度梯度加热处理电池。当温度上升速率超出 0.02℃/min 时,停止加热。在这一阶段,电池的起始温度 θ_{ER} 记录为 154.92℃。

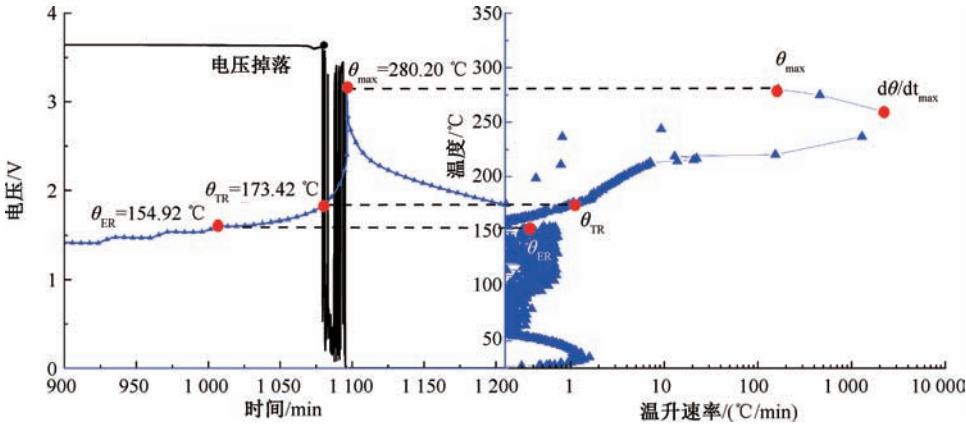


图6 绝热条件下2号电池端电压、表面温度随时间的变化和温度与温升速率的关系

Fig. 6 Variations of terminal voltage and surface temperature with time and relationship between temperature and temperature rise rate of cell 2 under adiabatic conditions

2) 阶段 II: 电池的自放热阶段。系统会确保量热腔内壁与电池表面温度基本一致, 提供一个准绝热环境, 当电池表面的温度上升速率超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, 认为电池进入了热失控状态^[20], 此时往往伴随着电压的显著掉落。软布袋状电池由于没有安全阀, 电压掉落与热失控几乎同时发生。 θ_{TR} 即为这一阶段的起始温度, 为 $173.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 阶段 III: 电池热失控阶段。电池表面温度呈指数升高, 温升速率明显增加, 热失控最高温度 θ_{max} 为 $280.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。观察热失控之后电池的外观发现, 电池发生严重的鼓胀, 电池的层叠结构已从侧面完全暴露, 电池表面有明显的从极耳流出电解液的痕迹。

绝热加热测试条件下, 新鲜电池、正常循环电池和过放电循环电池表面温度随时间的变化曲线如图 7 所示, 正常循环电池的 θ_{max} 最大, 新鲜电池达到自产热起始时间、热失控时间以及最大热失控温度的时间最慢, 过放电循环 2 号电池达到最大热失控温度的时间与 1 号电池基本相同, 3 号电池达到最大

热失控温度的时间最短, 均早于新鲜电池、正常循环电池。图 8 为各电池温升速率随温度的变化, 可以看出, 新鲜电池和正常循环电池的自产热起始温度相近, 约为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均高于过放电循环电池的自产热起始温度约为 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$, 过放电循环电池的 θ_{ER} 降低。

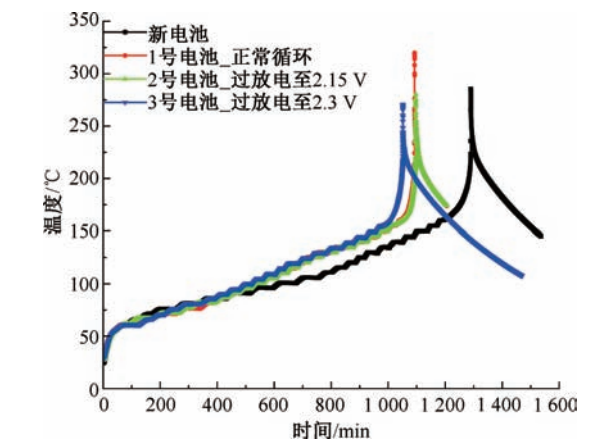


图 7 各电池表面温度与时间关系曲线
Fig. 7 Curves of surface temperature variation of each battery over time

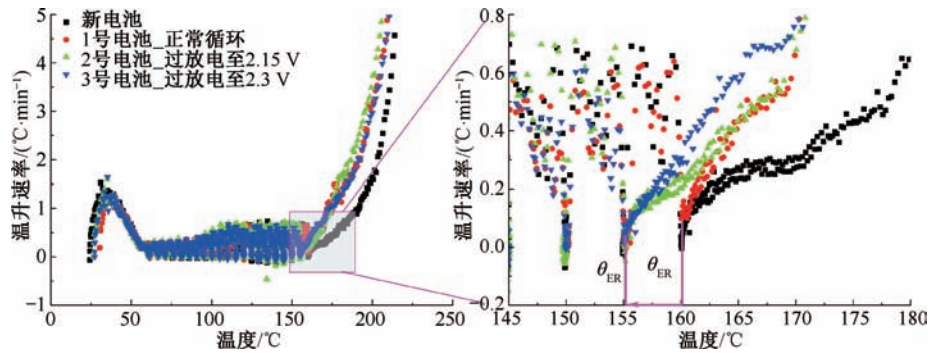


图 8 绝热条件下温升速率与温度的关系曲线
Fig. 8 Curves of temperature rise rate versus temperature under adiabatic conditions

2.5 热失控后电池外观

将失控后的电池从 EV-ARC 量热腔中取出, 观

察其外观, 如图 9a 所示, 电池正面有明显的从极耳流出电解液的痕迹, 电池发生严重的鼓胀; 如图 9b

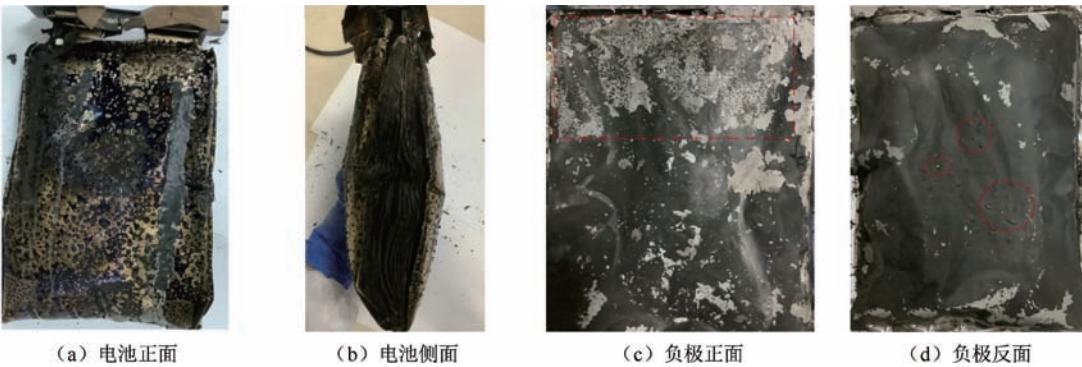


图 9 过放电循环电池热失控后的外观
Fig. 9 Appearance of over-discharged cycled batteries after thermal runaway

所示,电池的层叠结构已从侧面完全暴露。从图 9c 可以看出,在靠近极耳处,有明显的白色斑点;从图 9d 可以看出,白色颗粒点有刺穿隔膜的趋势,分析得出,在循环过程中,有锂沉积,且逐渐发展成锂枝晶,有刺穿隔膜的风险。

3 结 论

- 1) 过放电循环会加速电池容量衰减,但在短期循环内长时间搁置电池,电池容量具有一定恢复能力。
- 2) 过放电循环引起电池直流内阻增加,在低 SOC 阶段的放电直流内阻增加尤为显著,同时也会引起锂离子的损失。

- 3) 过放电循环电池相较于新鲜电池、正常循环电池的热失控时间提前,但热失控最大温度低于新鲜电池和正常循环电池;过放电循环电池的 θ_{ER} 降低,低于正常循环电池和新鲜电池。
- 4) 电池经历过放电-再次充电循环过程后,出现锂沉积,形成锂枝晶。锂枝晶逐渐生长,有穿透隔膜进而引发电池内短路的风险。
- 5) 结果表明:即使是轻度过放电,如果不能及时发现,在多次积累的情况下也会对电池带来性能影响和安全隐患。未来研究可结合无损检测技术进一步探索过放电循环对电池安全性能多尺度影响机制,开发早期诊断方法,进一步提升电池使用安全性。

参 考 文 献

[1] 马静,江依义,沈旻,等. 锂离子电池储能产业发展现状与对策建议[J]. 浙江化工, 2022, 53(12): 17-23.
MA Jing, JIANG Yiyi, SHEN Min, et al. Development status and countermeasures of lithium-ion battery energy storage industry[J]. Zhejiang Chemical Engineering, 2022, 53(12): 17-23.

[2] 李晋,王青松,孔得朋,等. 锂离子电池储能安全评价研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2 282-2 301.
LI Jin, WANG Qingsong, KONG Depeng, et al. Research progress on safety evaluation of lithium-ion battery energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2 282-2 301.

[3] 李凌坤,陈焕军,刘辉,等. 磷酸铁锂电池储能系统典型消防案例[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增 2): 111-117.
LI Lingkun, CHEN Huanjun, LIU Hui, et al. Typical fire protection case of lithium iron phosphate battery energy storage system[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S2): 111-117.

[4] FENG Xuning, OUYANG Minggao, LIU Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: a review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.

[5] 刘丹,王瑞虎,吕伟,等. 基于 IPSO-LSTM 的新能源汽车锂电池健康状态监测[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(9): 94-102.
LI Dan, WANG Ruihu, LYU Wei, et al. SOH monitoring of new energy vehicle lithium batteries based on IPSO-LSTM[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(9): 94-102.

[6] RUIZ V, PFRANG A, KRISTON A, et al. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1 427-1 452.

[7] 曹凤金,郭焱,亢荣,等. 电动牵引车辆锂离子动力电源安全性能研究[J]. 电器工业, 2022 (6): 72-75.
CAO Fengjin, GUO Miao, KANG Rong, et al. Research on the safety performance of lithium-ion power sources for electric traction vehicles[J]. Electrical Appliance Industry, 2022(6): 72-75.

[8] 倪涛来,宫璐,向兴江,等. 锂离子电池一致性问题研究[J]. 电池工业, 2017, 21(5): 37-40.
NI Taolai, GONG Lu, XIANG Xingjiang, et al. Research on the consistency issue of lithium-ion batteries[J]. Battery Industry, 2017, 21(5): 37-40.

[9] 赵翔,周逸玲. 动力电池技术与安全性分析[J]. 华东科技, 2023 (5): 110-112.
ZHAO Xiang, ZHOU Yiling. Analysis of the development and safety of power battery technology[J]. East China Science and Technology, 2023 (5): 110-112.

[10] 马天翼,王芳,徐大鹏,等. 动力电池轻度电滥用积累造成的性能和安全性劣化研究[J]. 储能科学与技术,

2020, 9(2): 400–408.

MA Tianyi, WANG Fang, XU Dapeng, et al. Investigation of the performance and safety degradation caused by slight accumulation of electricity in traction batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(2): 400–408.

- [11] 叶佳娜. 锂离子电池过充电和过放电条件下热失控(失效)特性及机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.

YE Jiana. Thermal runaway and failure mechanism of lithium-ion batteries during overcharge and over-discharge[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

- [12] JUAREZ-ROBLES D, VYAS A A, FEAR C, et al. Over-discharge and aging analytics of Li-ion cells[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, 167(9): DOI:10.1149/1945-7111/aba00a.

- [13] GUO Rui, LU Languang, OUYANG Minggao, et al. Mechanism of the entire over-discharge process and over discharge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: DOI: 10.1038/srep30248.

- [14] KOSILOV V V, POTAPENKO A V, KIRILLOV S A. Effect of over-discharge (over lithiation) on electrochemical properties of LiMn_2O_4 samples of different origin [J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2017, 21(11): 3 269–3 279.

- [15] FEAR C, JUAREZ-ROBLES D, JEEVARAJAN J A, et al. Elucidating copper dissolution phenomenon in Li-ion cells under over-discharge extremes[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, 165(9): 1 639–1 647.

- [16] HENDRICKS C E, MANSOUR A N, FUENTEVILLA D A, et al. Copper dissolution in over discharged lithium-ion cells: X-ray photoelectron spectroscopy and X-ray absorption fine structure analysis[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, 167(9): DOI: 10.1149/1945-7111/ab697a.

- [17] ZHOU Hanwei, CONNER F, JUDITH A, et al. State-of-electrode (SOE) analytics of lithium-ion cells under over discharge extremes[J]. *Energy Storage Materials*, 2023, 54: 60–74.

- [18] 陈峥, 李磊磊, 舒星, 等. 基于改进容量增量分析法的锂电池可用容量估计 [J]. *中国公路学报*, 2022, 35(8): 20–30.

CHEN Zheng, LI Leilei, SHU Xing, et al. Estimation of available capacity for lithium-ion battery based on improved increment capacity analysis[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(8): 20–30.

- [19] 郭琦沛, 张彩萍, 高洋, 等. 基于容量增量曲线的三元锂离子电池健康状态估计方法[J]. *全球能源互联网*, 2018, 1(2): 180–187.

GUO Qipei, ZHANG Caiping, GAO Yang, et al. Incremental capacity curve based state of health estimation for LNMCO lithium-ion batteries[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2018, 1(2): 180–187.

- [20] 赵春朋. 镍钴锰酸锂电池热失控及燃爆危险性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.

ZHAO Chunpeng. Research on thermal runaway and combustion explosion hazards of lithium nickel cobalt manganese oxide batteries[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.



作者简介: 马迷娜 (1992—), 女, 河北邢台人, 博士, 讲师, 主要从事锂离子电池安全性等方面的研究。E-mail: mma@stdu.edu.cn。