

DOI: 10.11858/gywllxb.20261077

# 冲击载荷下锂离子电池性能衰退与失效特性

周雪会<sup>1</sup>, 黄子轩<sup>2</sup>, 张新春<sup>2\*</sup>, 饶理想<sup>2</sup>, 杨帅<sup>3</sup>

(1. 广西工业职业技术学院装备智造学院, 广西 南宁 530001;

2. 华北电力大学机械工程系, 河北 保定 071003;

3. 河北亚大汽车塑料制品有限公司, 河北 保定 072750)

**摘要:** 针对冲击工况下锂离子电池的性能衰退和安全性挑战, 开展了不同碰撞类型下电池损伤与失效特性研究。采用 NCR18650BD 圆柱形锂离子电池, 基于电化学阻抗谱 (EIS)、循环伏安 (CV) 方法和多物理场原位监测平台, 分析球形、柱形和平面冲头下电池的容量衰减、循环老化和阻抗劣化规律, 并揭示碰撞类型对电池失效和热行为的影响机制。结果表明: 当冲击能量为 5 J 时, C/20 倍率下仅有平面冲头下电池发生锂库存损失导致的容量衰退, 而 3C 倍率下, 冲头尺寸越小, 循环老化越快; 冲头尺寸越大, 电池的电化学阻抗越大; 当冲击能量为 20 J 时, 冲头尺寸越小, 力的峰值越小, 电池失效程度越严重, 热失控概率越大; 随着冲击速度增大, 电池整体刚度增加, 力-电失效加剧。研究结果为锂离子电池的优化设计和安全性评估提供了理论基础和技术支持。

**关键词:** 锂离子电池; 碰撞类型; 电化学损伤; 力-电失效

中图分类号: TM 912.9; O521.9 文献标志码: A

近年来, 传统能源短缺和环境污染等问题日益严峻, 锂离子电池由于具有高能量密度、高循环次数、低成本等优势, 已经成为电动汽车、无人机、电动船舶等动力机械储能元件的首选<sup>[1]</sup>。然而, 机械服役过程中碰撞频发, 电池遭受冲击载荷会导致结构变形甚至断裂, 进一步引发其电化学性能损伤及内部短路<sup>[2]</sup>, 因此, 碰撞引发的安全问题亟需深入研究。

电池的容量衰减和阻抗劣化显著影响锂离子电池的服役性能<sup>[3]</sup>, 因此, 力学破坏对电池电化学性能影响的相关研究已经逐步展开。Zhu 等<sup>[4]</sup>探究了机械载荷对电池不可逆容量损失的作用, 并定性分析了不同组件对容量损失的贡献。Shi 等<sup>[5]</sup>根据轻微力学损伤下电池的容量和阻抗变化结合电子显微镜 (SEM), 阐明了电化学性能衰退的机理。Wang 等<sup>[6]</sup>进一步分析了轻微损伤电池的循环性能劣化。Ahmed 等<sup>[7]</sup>将相关研究方法引入固态电池, 从界面接触力的角度明晰了电池的性能衰退特性。然而, 现有机械载荷下电化学性能衰退研

收稿日期: 2026-04-08; 修回日期: 2026-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (12304116); 广西科技计划项目重点研发计划 (AB25069352); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2025KY1553); 河北省博士创新项目 (CXZZBS2026163)

作者简介: 周雪会 (1981-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事锂电池安全研究。

E-mail:

2005020358@gxgy.edu.cn

通讯作者: 张新春 (1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事锂电池耐撞性设计研究。

E-mail:

xczhang@ncepu.edu.cn

究仅针对准静态工况，实际应用中电池多遭受冲击载荷作用。最近，Deng 等<sup>[8]</sup>探究了不同加载速度下圆柱形锂离子电池的循环容量损伤。但冲击载荷下电池电化学阻抗劣化研究仍然空白，且未有考虑碰撞类型影响的相关工作。

大能量冲击载荷下，内短路被触发，电池安全性遭受严重挑战。由于电池内部封闭的复杂材料、结构及动态响应的多物理场特性<sup>[9]</sup>，力学破坏驱动的电池失效也是锂离子电池工程应用中的重大难题。考虑碰撞工况下的动态效应，Xu 等<sup>[10]</sup>开发了均质化的有限元模型，进一步分析了荷电状态（SOC）和应变率对电池力学性能的影响。基于电池在冲击载荷下力-电-热行为间的耦合关系，Wang 等<sup>[11]</sup>搭建了多场耦合的有限元模型框架，并与实验结果取得了较高一致性。Huang 等<sup>[12]</sup>主要基于球形冲头冲击试验，利用惯性效应解释了电池力失效和电失效间的关系，结合 SEM 技术，解释了电池的动态失效机理。Xia 等<sup>[13,14]</sup>探究了单一球形冲头下动态加载速率与低温老化对软包电池安全性能的共同影响，为实际服役状态电池失效预防提供了技术支撑。然而，聚焦多种碰撞类型对电池失效行为特性影响的相关研究仍然短缺。

本文基于上述问题，以圆柱形锂离子电池为研究对象，开展球形、柱形和平面冲头下电池的碰撞试验。针对低能量冲击下未失效电池，采用循环伏安（CV）方法、电化学阻抗谱（EIS），评估全新电池和力学损伤电池的容量、循环性能和交流阻抗；针对高能量冲击下失效电池，采用自行搭建的多物理场动态原位监测平台，阐明力-电-热耦合的失效机制，分析不同冲头下电池力-电失效和热蔓延特性，揭示冲击速度对电池失效的影响。

## 1 实验

### 1.1 试件制备

本研究采用广泛商业化的 NCR18650BD 圆柱形锂离子电池，典型容量 3.18 Ah，电池规格如表 1 所示。电池外壳材料为冷轧钢，承担力学防护功能，内部结构由阴极、阳极和隔膜交替缠绕而成，此外，还包括钢芯，端盖和安全装。将全新电池以 C/20 倍率恒流放电至截止电压 2.5 V，为确保试验安全，试验中所有电池均为 0 SOC。之后，分别在电池的负极和正极焊接导线以监测电压，粘贴绝缘胶带以保证电压采集的稳定性。

表 1 NCR18650BD 锂离子电池试件规格

Table 1 Specifications of NCR18650BD lithium-ion battery test samples

Electrical parameters	Values
Rated capacity/mAh	2980
Minimum capacity/mAh	3350
Typical capacity/mAh	3180
Discharge cut-off voltage/V	2.5
Rated voltage/V	3.6
Charge cut-off voltage/V	4.2
Energy density/(Wh·kg <sup>-1</sup> )	217

### 1.2 碰撞试验

采用配备了防二次冲击装置的落锤冲击试验机（万测，广东产）提供碰撞载荷，同时配备 25 kN 量程的力传感器和 82 mm 量程的激光位移传感器。选用 10 mm 直径球形冲头、10 mm 直径柱形冲头（轴向长度 80 mm），和 80 mm 直径平面冲头，沿径向对电池对心冲击，下部以刚性板支撑，如图 1 所示。锤体总质量控制为 10 kg，通过试验机控制系统设定初始速度。5 J 能量冲击下选取冲击速度  $v=1$  m/s，用以分析力学损伤对电池电化学性能衰退的影响，20 J 能量冲击下选用  $v=2$  m/s，用以分析电池力-电失效机制。

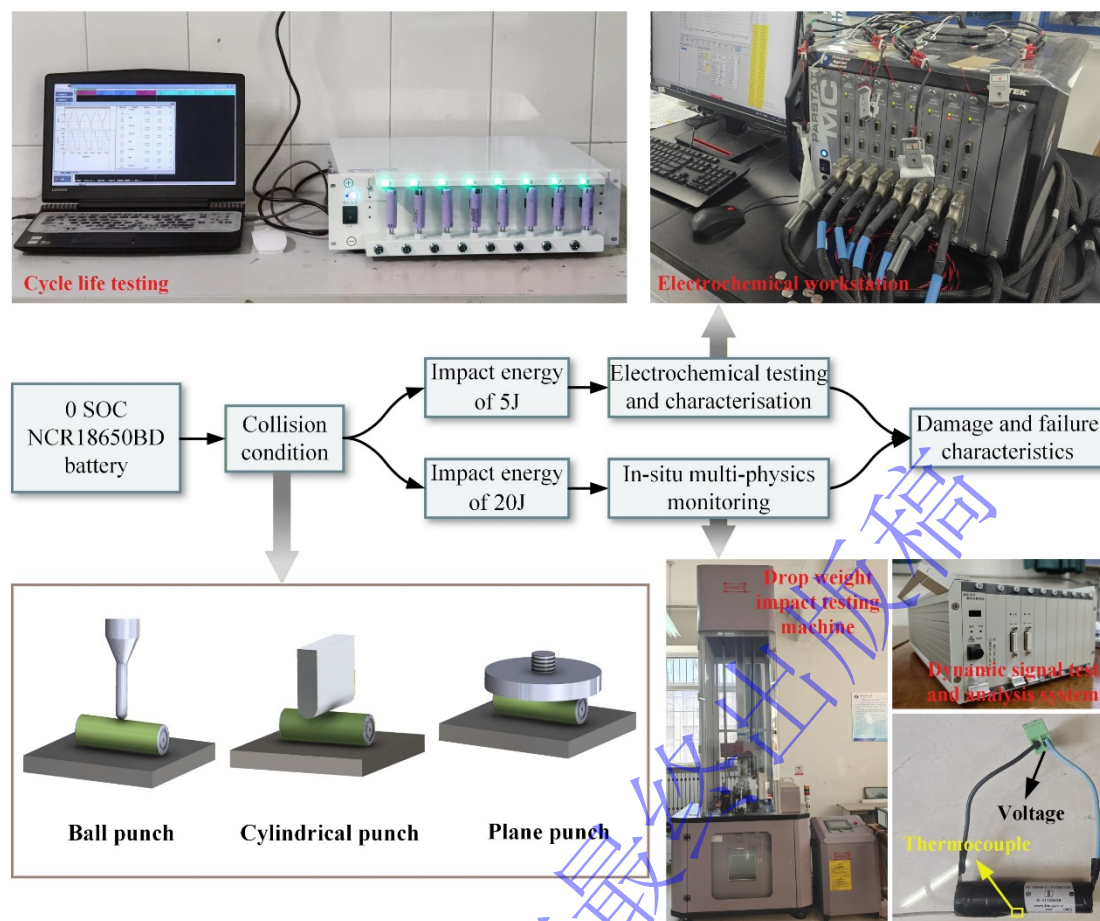


图 1 整体试验流程图

Fig. 1 Overall experimental workflow diagram

### 1.3 电化学测试与表征

针对全新电池和球形、柱形、平面冲头下 5 J 能量冲击受损电池，首先采用电化学工作站（PARSTAT，美国产）进行 EIS 测试，采用恒电位模式，扫描频率范围为 100 kHz-5 mHz，幅值为 10 mV。使用 ZViewer 软件将等效电路参数拟合到交流阻抗谱，电池的交流阻抗主要包括欧姆电阻（ $R_{ohm}$ ）、电荷转移电阻（ $R_{ct}$ ）和扩散电阻（ $R_w$ ），其中  $R_w$  可以通过 Warburg 阻抗进行计算：

$$Z_w = R_w \cdot \frac{\tanh\left(\left(I \frac{l^2}{D} \omega\right)^n\right)}{I \frac{l^2}{D} \omega} \quad (1)$$

式(1)中， $I$ 为电流， $l$ 为扩散距离， $D$ 为有效扩散系数， $\omega$ 为频率。随后，采用循环寿命测试设备（超今达，广东产）对 4 种电池进行 CV 测试以探究容量特性，工步设置为：以 C/20 倍率恒流充电至 4.2 V，静置 10 min，在 4.2 V 电位下恒压充电，直至电流降至 100 mA，静置 10 min，以 C/20 倍率恒流放电至 2.5 V。在对数据的容量增量（IC）分析中，IC 可由式(2)计算：

$$IC = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \quad (2)$$

式(2)中， $Q$ 为电池放电容量， $U$ 为电池电压。最后，以 3C 的充放电倍率测试电池的循环老化性能，其中，恒压充电阶段的截止电流为 200 mA，每种电池均循环充放电 40 次。

## 1.4 多物理场原位监测

针对球形、柱形、平面冲头以 20 J 能量冲击下的电池，基于自行搭建的动态原位监测平台，对加载过程中力、位移、电池电压和表面温度以 100 kHz 频率进行监测。其中，温度监测采用粘贴在电池表面的 K 型热电偶（东华，江苏产）实现，电压监测通过焊接导线接入动态信号测试分析系统（东华，江苏产）实现，力和位移数据由落锤试验机提供，并接入测试分析系统以实现同步采集。碰撞试验结束后，将电池沿中心横截面切开，打磨后置于光学示廓仪下观测内部力学破坏形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电化学性能衰退

#### 2.1.1 容量特性

全新电池和球形、柱形、平面冲头以 5 J 能量冲击下电池经 CV 测试后的放电容量  $Q$  如图 2 所示，可以发现，4 块电池放电起始时刻的开路电压基本一致。球头和柱头冲击几乎不会造成电池容量的衰减，其微小差异是由电池制造产生的。而在平面冲头下，电池放电容量明显由全新电池的 3.14 Ah 下降至 3.07 Ah，容量衰减率为 2.23%。容量衰减可能是由于力学损伤导致多孔结构被堵塞，小部分活性锂被锁定在活性材料中，也就是说，参与可逆反应的锂离子数量减少，这对应了锂库存损失（LLI）的容量衰减模式<sup>[15]</sup>。显然，平面冲头下电池整体发生变形，而非局部，相比球形和柱形冲头，容量衰减最严重。

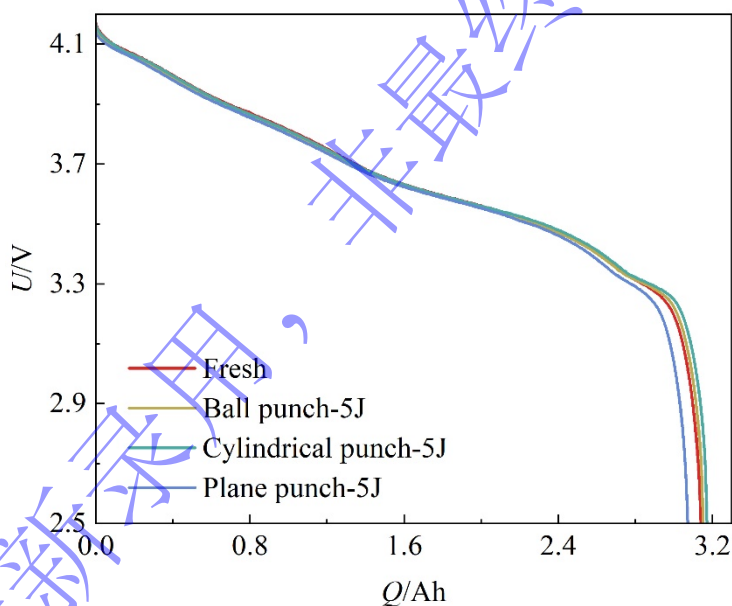
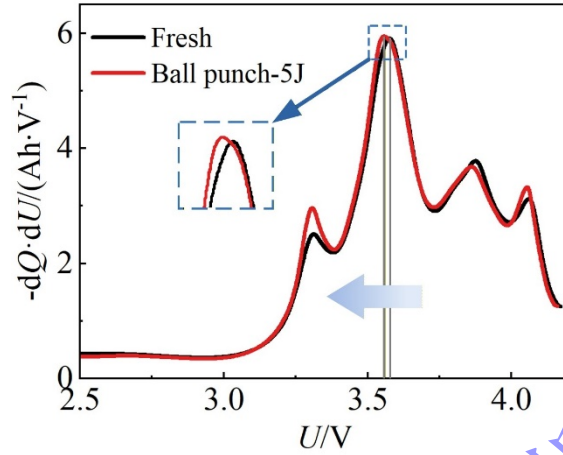


图 2 全新电池和损伤电池的放电容量

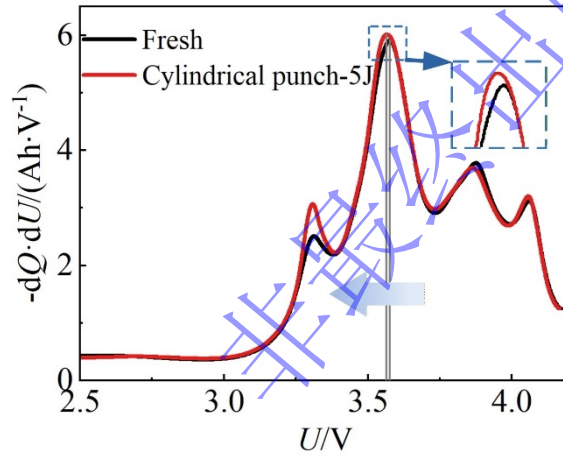
Fig. 2 Discharge capacity of new and damaged batteries

利用 CV 测试数据，展开电池放电过程的 IC 分析，如图 3 所示。IC 曲线中，低电压区域峰值通常与阳极石墨分级转变及其与阴极脱锂嵌锂过程的耦合行为有关，主峰一般对应最主要的可逆脱锂嵌锂反应，高电压区域峰值则多与阴极材料在高 SOC 范围的相变及界面极化行为有关。碰撞损伤的电池与全新电池相比几乎没有曲线峰值大小的变化，从而能够排除活性材料损失（LAM）这一容量衰减模式。球形和柱形冲头下曲线峰值相比全新电池甚至略微增高，对应了放电容量的略微增大，这和电池单体的制造差异有关。LAM 没有出现是由于即使冲击作用下电极颗粒与集流体发生脱黏，但在外壳的机械约束下，电池整体处于被挤压状态，颗粒不会剥落。因此，造成平面冲头下电池容量损失的原因仅为 LLI。而当将电池内部缠绕结构剥开展平后可以明显发现，碰撞损伤电池的颗粒涂层与集

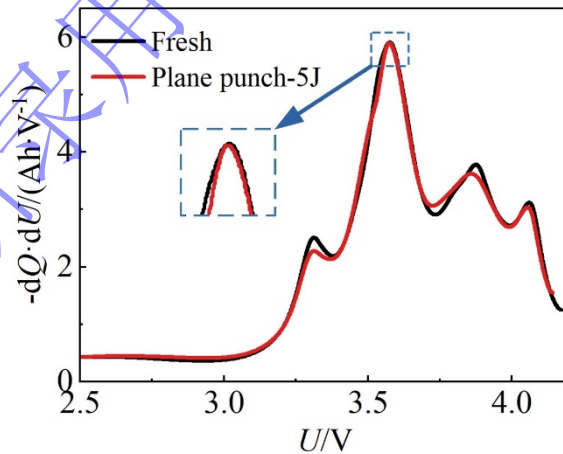
流体已经发生脱粘,如图4所示。此外,球形和柱形冲头下电池IC曲线的峰值相比全新电池左移,峰位偏移代表该电化学反应不再以原有平衡电位完成,这可能和电化学阻抗的改变有关<sup>[4]</sup>,电池具体阻抗的变化仍需借助EIS测试展开。



(a) Fresh-ball punch impacted batteries



(b) Fresh-cylindrical punch impacted batteries



(c) Fresh-plane punch impacted batteries

图3 不同碰撞类型下电池的IC分析曲线

Fig. 3 IC analysis curves for batteries under different collision forms

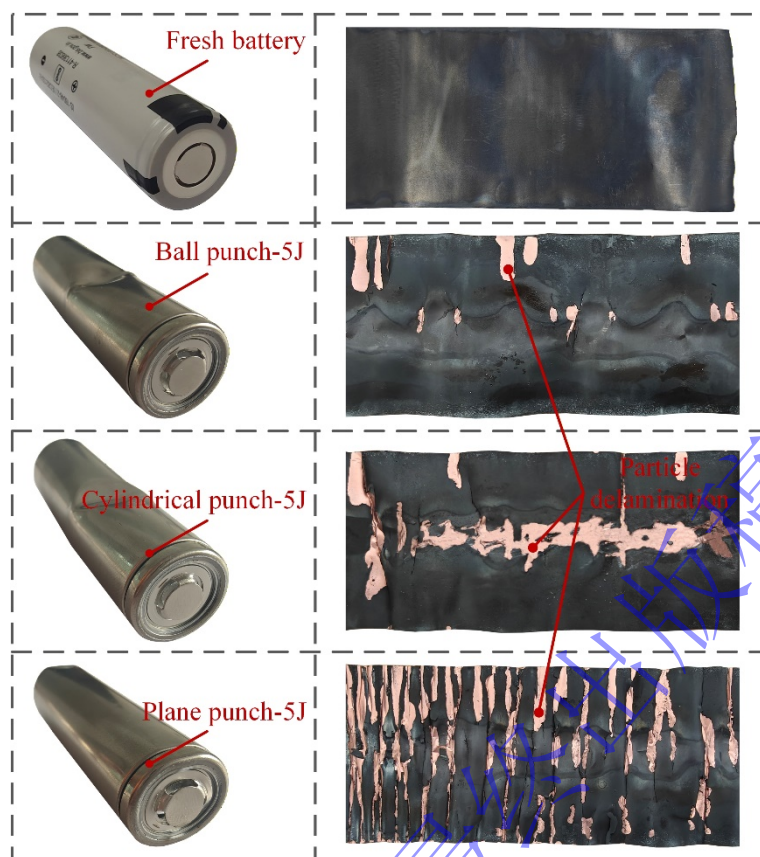


图4 全新电池和损伤电池电极形貌

Fig. 4 Morphology of electrodes from new and damaged batteries

### 2.1.2 高倍率循环老化特性

3C 倍率循环下电池的放电容量见图 5，共计充放电循环 40 次。相比 C/20 低倍率循环，高倍率下碰撞损伤电池的容量大幅下降，球形冲头下电池容量下降最多，其次是柱形冲头和平面冲头，说明冲头尺寸越小，电池高倍率循环性能越差。随着循环次数的增加，所有电池放电容量均有所衰退，采用线性拟合方法，全新电池及平面、柱形、球形冲头下电池的容量衰减趋势可以拟合为：

$$Q = -0.00153 \cdot n + 2.96471 \quad (3)$$

$$Q = -0.0038 \cdot n + 2.91641 \quad (4)$$

$$Q = -0.00549 \cdot n + 2.8373 \quad (5)$$

$$Q = -0.00523 \cdot n + 2.61911 \quad (6)$$

式(3)-(6)中， $Q$  为放电容量， $n$  为循环次数。 $R^2$  计算结果见图 5，拟合效果良好。明显发现，碰撞损伤电池的容量衰退更快，且球形和柱形冲头下，电池循环老化速度相较平面冲头下电池更快。如图 4 所示，球形和柱形冲头在电极表面形成的压痕更深，这意味着更严重的局部损伤，因此推测，高倍率循环下电池容量衰减可能对局部损伤的严重程度敏感，而非损伤面积。

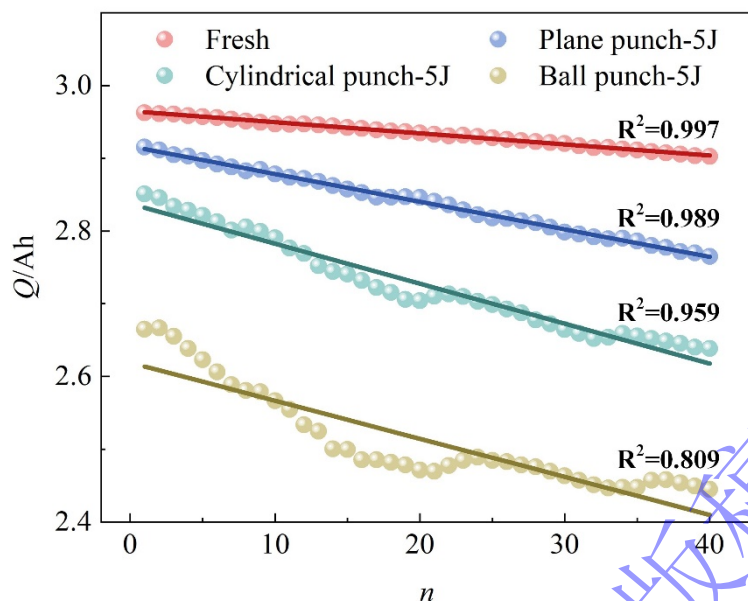


图 5 高倍率下电池的循环老化性能

Fig. 5 Cycle aging performance of batteries at a high rate

### 2.1.3 阻抗特性

全新电池和球形、柱形、平面冲头以 5 J 能量冲击下电池经 EIS 测试后的奈奎斯特图见图 6，碰撞损伤电池的实部和虚部阻抗相比全新电池更大。经图 6 中等效电路拟合，进一步计算电池的  $R_{ohm}$ 、 $R_{ct}$  和  $R_w$ 。

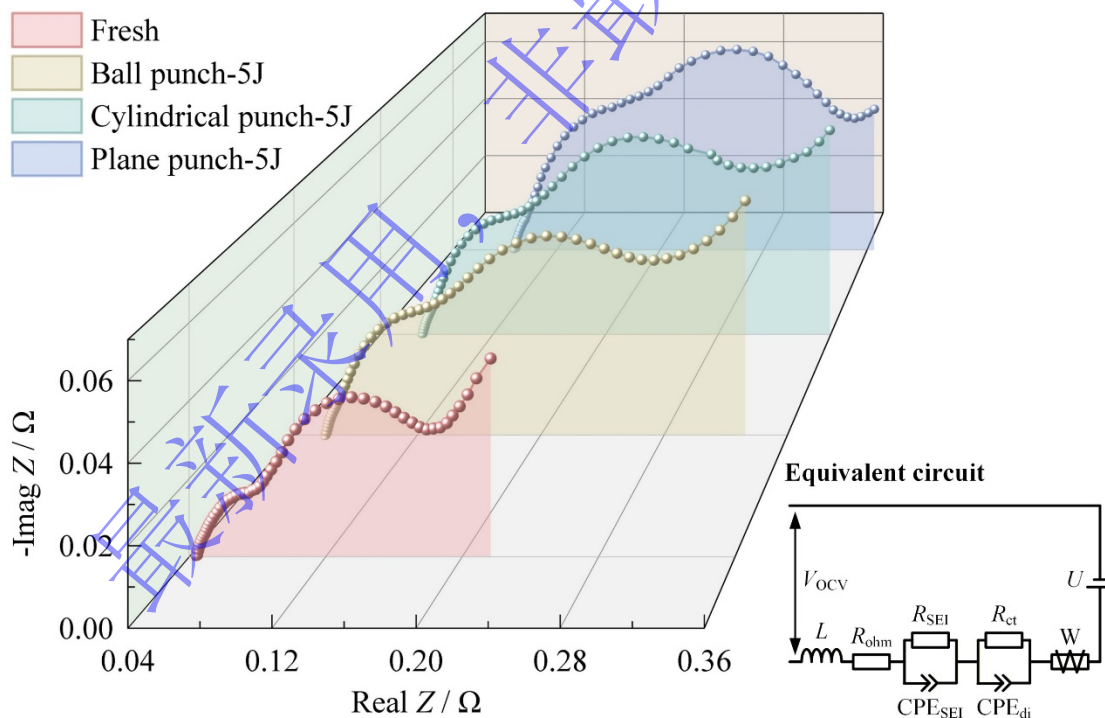


图 6 奈奎斯特图及等效电路图

Fig. 6 Nyquist plots and equivalent circuit diagrams

经计算，电阻值如图 7 所示，全新电池和球形、柱形和平面冲头冲击电池的  $R_{ohm}$  分别为 0.04314  $\Omega$ 、0.0602  $\Omega$ 、0.06986  $\Omega$  和 0.08692  $\Omega$ ，说明随着冲头尺寸的增大， $R_{ohm}$  增大。究其原因，一方面，碰撞造成的电池力学损伤会使隔膜受挤压，从而降低隔膜孔隙率；另

一方面,冲击载荷会导致电极涂层在微观上出现开裂<sup>[6]</sup>,电极与集流体的接触劣化。平面冲头下,孔隙率降低和涂层开裂的范围最大,因此,  $R_{ohm}$  增长最多。全新电池和球形、柱形和平面冲头冲击电池的  $R_{SEI}$  分别为 0.11296  $\Omega$ 、0.13748  $\Omega$ 、0.1389  $\Omega$  和 0.18943  $\Omega$ ,碰撞损伤电池相比全新电池  $R_{SEI}$  更大,这是因为冲击载荷会导致阳极表面的颗粒涂层开裂,进而使原始 SEI 膜被破坏,新的阳极表面暴露并与电解液之间发生副反应,导致新的 SEI 界面生成,这会使 SEI 膜整体变厚且厚度不均匀,从而增加锂离子穿透 SEI 膜的阻抗。平面冲头冲击下破坏范围最大,因此,SEI 膜破裂、重生带来的影响最大,  $R_{SEI}$  最高。

全新电池和球形、柱形和平面冲头冲击电池的  $R_{ct}$  分别为 0.0646  $\Omega$ 、0.24952  $\Omega$ 、0.25376  $\Omega$  和 0.27045  $\Omega$ ,说明碰撞损伤电池相比全新电池  $R_{ct}$  大幅度提高。这是由于损伤电池内部不可避免会发生局部屈曲,部分区域组件间不再紧密贴合<sup>[9]</sup>,这导致锂离子嵌入和脱出的有效面积减小、效率降低,从而  $R_{ct}$  增大。全新电池和球形、柱形和平面冲头冲击电池的  $R_w$  分别为 0.1668  $\Omega$ 、0.17808  $\Omega$ 、0.21789  $\Omega$  和 0.80346  $\Omega$ ,损伤电池  $R_w$  相比全新电池更大,且平面冲头下电池表现出远高于全新电池的  $R_w$ 。总的来说,碰撞损伤会使电池的  $R_{ohm}$ 、 $R_{SEI}$ 、 $R_{ct}$  和  $R_w$  均增大,且冲头尺寸越大,电阻值越大。

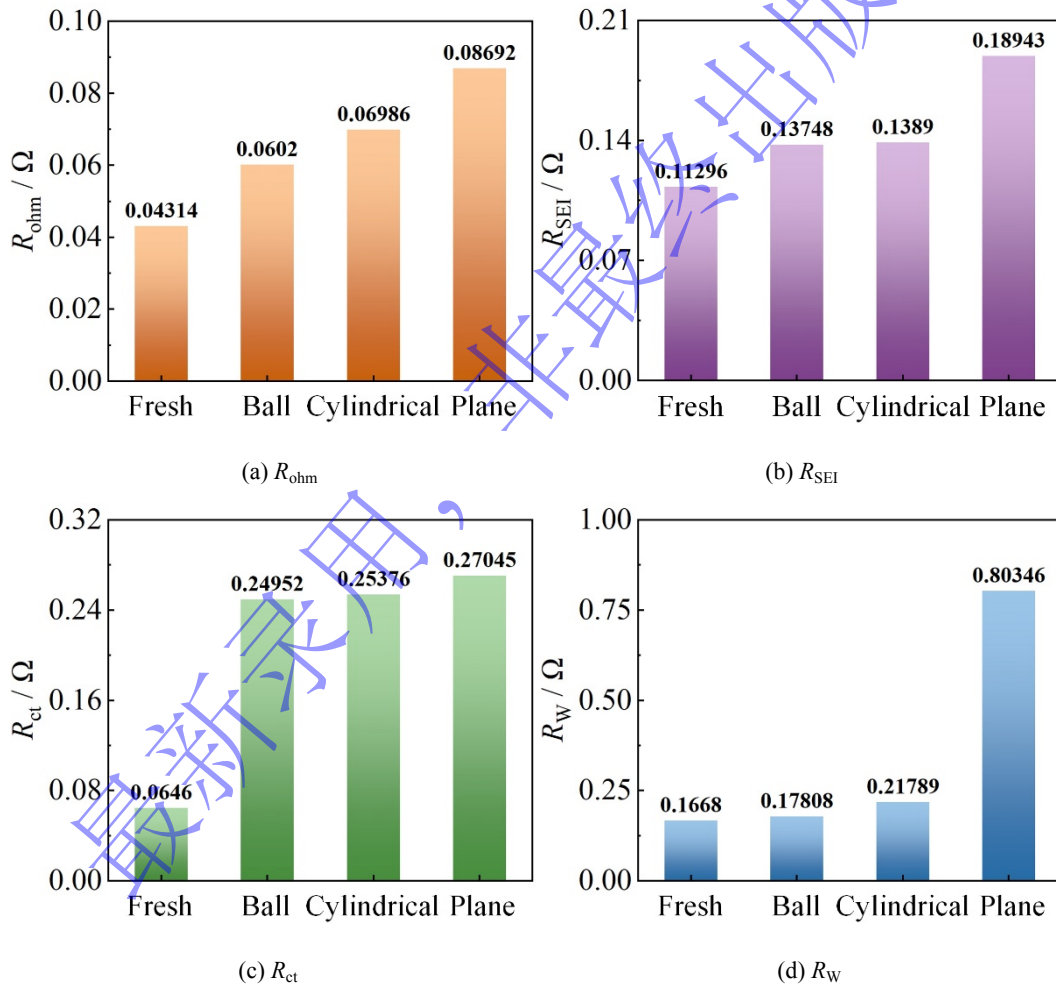


图7 全新电池和损伤电池的电阻值对比

Fig. 7 Comparison of resistance values between new and damaged batteries

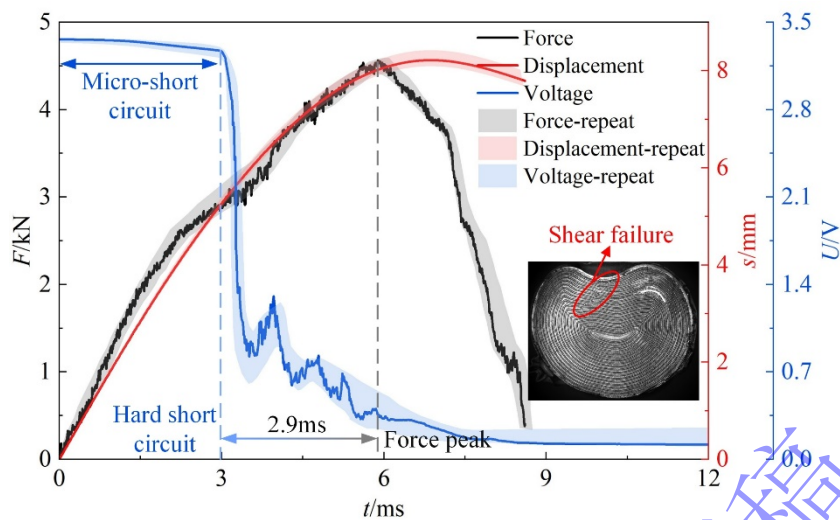
## 2.2 失效特性

### 2.2.1 力-电失效

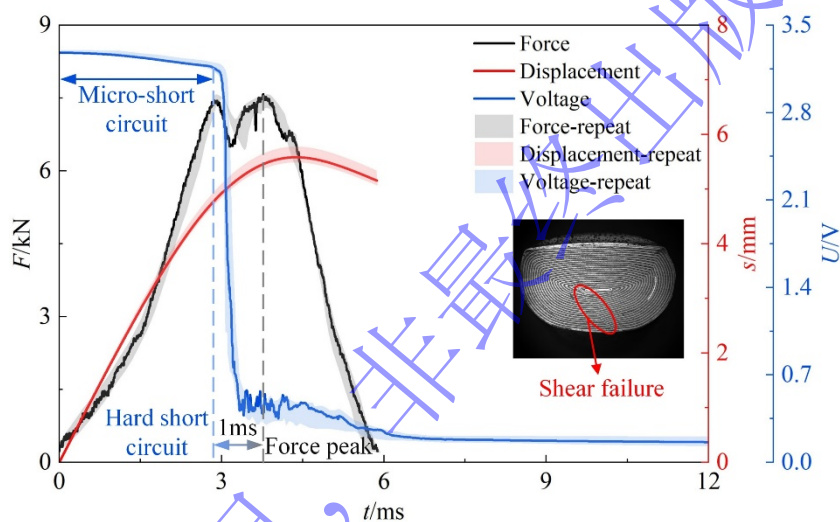
球形冲头以 20 J 能量冲击下,电池的力-电响应如图 8(a)所示。三次独立重复试验的力、位移和电压响应均方差分别为 0.057、0.011 和 0.061。电池在 5.9 ms 达到载荷峰值,由于

峰值过后冲头位移仍然增长, 可以判断, 载荷峰值处电池发生整体力学失效。由电池中心横截面形貌图可以看出, 力学失效形式为内部多层结构的剪切断裂。通常组件发生剪切断裂会触发电池短路<sup>[7]</sup>, 然而, 实际上电池在 3 ms 时刻发生电压快速跌落, 典型的硬短路已经出现, 这是因为冲击载荷作用下需考虑结构的惯性效应。具体来说, 在冲击过程中, 冲头附近区域的电池组件受惯性效应影响先于整体发生变形和力学破坏, 从而导致局部能量耗散集中, 因此, 在电池整体力学失效前, 已经出现组件的局部断裂, 其中, 隔膜的破裂会导致阴极和阳极直接接触<sup>[18]</sup>, 这是触发硬短路的根本原因。这一惯性效应主导的行为在力-电压曲线上表现为硬短路先于载荷峰值 2.9 ms 出现。此外, 在硬短路触发前, 电池电压呈现极缓慢下降, 这属于典型的微短路现象。由于放电速率慢, 推测这是由于冲击载荷作用下冲头附近阴极的活性颗粒嵌入隔膜孔隙内并与阳极颗粒接触, 从而触发电阻最大的阴极颗粒-阳极颗粒短路模式<sup>[11]</sup>。这一过程同样受惯性效应主导, 属于碰撞工况下特有的短路形式。冲击结束后, 惯性效应消失, 材料变形回弹导致颗粒间不再接触, 微短路停止。

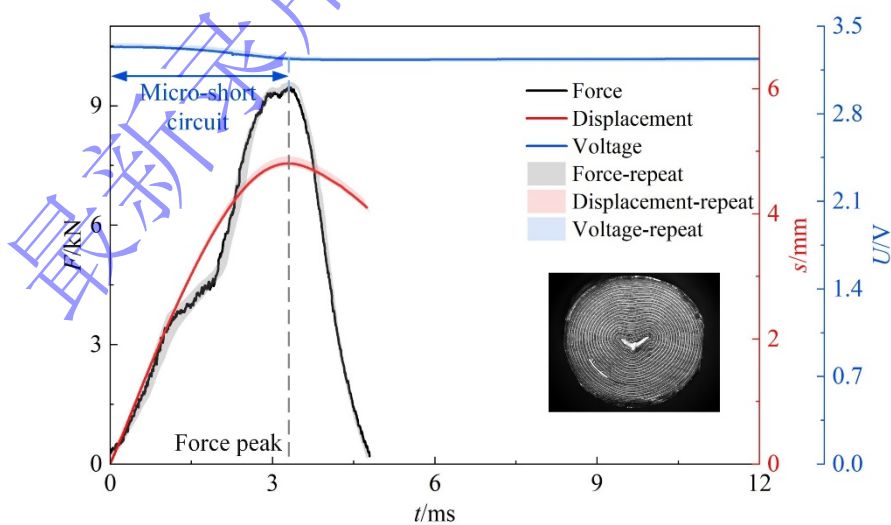
最新录用, 非最终出版稿



(a) Ball punch



(b) Cylindrical punch



(c) Plane punch

图 8 不同形状冲头下电池的力-电响应

Fig. 8 Force-voltage response of the batteries under different punches

柱形冲头以 20 J 能量冲击下, 电池的力-电响应如图 8(b)所示。独立重复试验的力、位移和电压响应均方差分别为 0.052、0.009 和 0.045。3.8 ms 时刻载荷达到峰值, 从电池中心横截面的组件形貌来看, 整体力学失效形式仍然为剪切断裂。2.8 ms 时刻硬短路被触发, 硬短路先于载荷峰值 1 ms 出现的原因和球形冲头下电池失效相同。此外, 柱形冲头下电池依然发生微短路。

平面冲头以 20 J 能量冲击下, 电池的力-电响应如图 8(c)所示。独立重复试验的力、位移和电压响应均方差分别为 0.038、0.007 和 0.013。力和位移曲线在同一时刻达到峰值, 说明电池并未发生整体力学失效, 而是仅被压扁, 这和中心横截面形貌是一致的, 因此, 冲击过程中电压并未发生显著下降。0-3.3 ms 内电池电压极缓慢下降, 微短路被触发, 失效机理和球形、柱形冲头下相同。表 2 总结了三种碰撞类型下电池的失效特性, 冲头尺寸越大, 由于冲头和电池的接触面积更大, 力的峰值越大, 对应的冲头最大位移越小, 由于总冲击动能保持不变; 力失效和电失效特征相同, 冲头尺寸越大, 失效程度越轻微。

表 2 不同碰撞类型下电池失效特性汇总  
Table 2 Summary of battery failure characteristics under different collision dimensions

Collision dimension	Force peak/kN	Displacement peak/mm	Mechanical failure	Electrical failure
Ball punch	4.56	8.21	Shear failure	Micro-short circuit Hard short circuit
Cylindrical punch	7.58	5.58	Shear failure	Micro-short circuit Hard short circuit
Plane punch	9.49	4.81	None	Micro-short circuit

### 2.2.2 冲击速度影响

进一步探究了球形冲头下冲击速度对锂离子电池力-电耦合失效的影响, 锤体质量控制为 10 kg,  $v$  分别为 1 m/s, 2 m/s 和 3 m/s, 对应冲击能量分别为 5 J, 20 J, 45 J。如图 9(a)所示, 在达到载荷峰值前, 冲击速度越高, 电池整体的刚度越大, 这是由电池材料和结构的应变率敏感性导致的<sup>[12]</sup>。具体来说, 电池组件材料在变形过程中会表现出应变硬化现象, 电解液的存在, 进一步加剧了这种硬化效应。当  $v=1$  m/s 时, 载荷达到峰值后冲头位移回弹, 说明电池并未发生力学失效, 这对应了图 9(b)中  $v=1$  m/s 下电池没有发生明显短路。 $v=2$  m/s 和  $v=3$  m/s 时, 电池达到力学失效时刻对应的冲头位移几乎一致, 这对应了图 9(b)中电池硬短路在力学失效时刻被直接触发, 极短时间内电池完全失效。

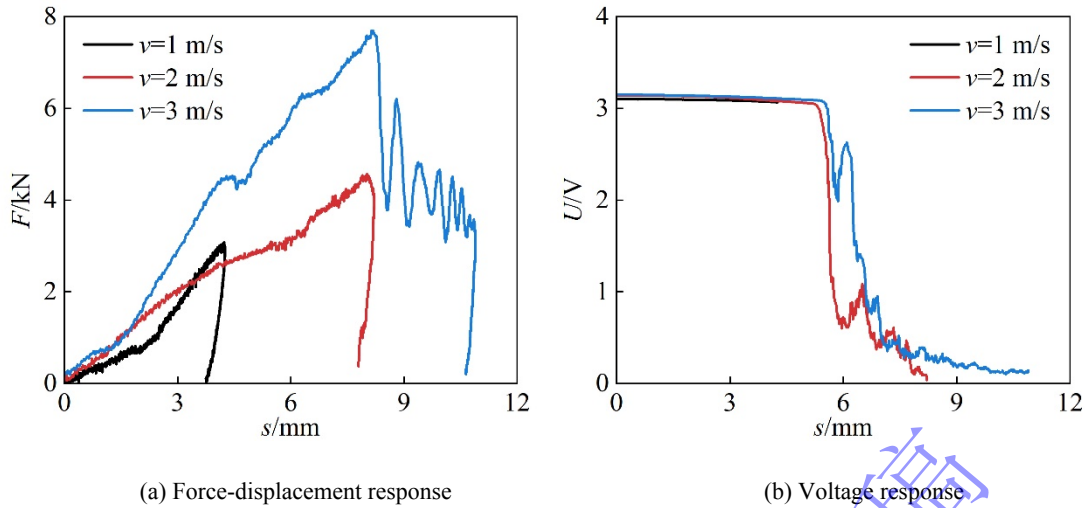


图9 球形冲头下冲击速度对锂离子电池失效的影响

Fig. 9 Effect of impact velocity on lithium-ion battery failure under the ball punch

### 2.2.3 热行为

球形、柱形和平面冲头冲击下, 电池在碰撞后 600 s 内热电偶测温点处的温度演化如图 10 所示, 最大温升分别为 53.8 °C、19.3 °C、0 °C。由于球形冲头下电池内短路最剧烈, 其温度峰值最高, 且温升速率最快; 而平面冲头下, 由于仅有微短路被触发, 电池表面温升不明显。需要说明, 由于内短路产热在传导过程中存在滞后与耗散, 电池表面热电偶测得的温度小于内部的最高温度。总的来说, 20 J 冲击能量下, 冲头尺寸越小, 电池的应力越集中, 失效程度越严重, 热失控的概率越大。

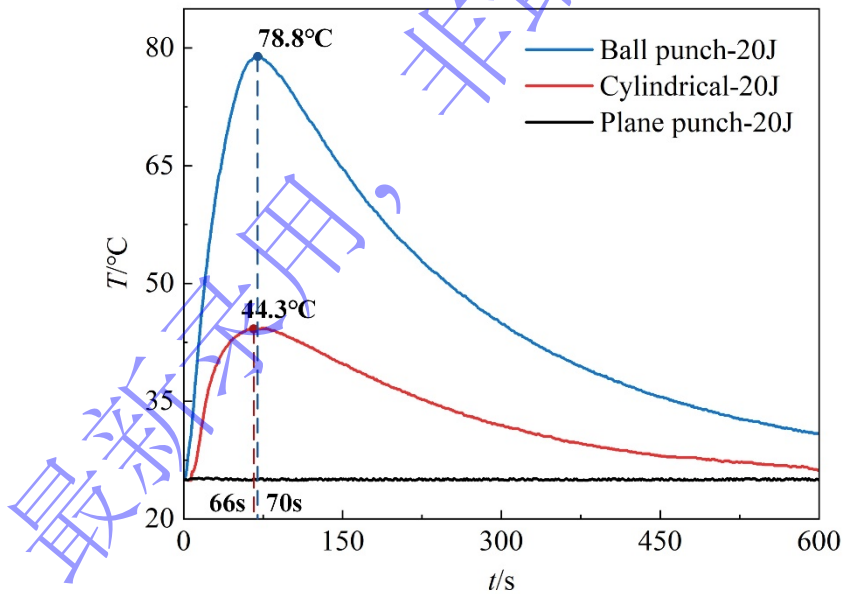


图 10 碰撞下电池的温度演化

Fig. 10 Temperature evolution of batteries under collision

## 3 结 论

本文以 NCR18650BD 圆柱形锂电池为研究对象, 基于不同碰撞类型下的冲击试验、电化学测试与表征和多物理场原位监测, 开展了 5 J 能量冲击下的电化学性能损伤和 20 J 能量冲击下的力-电失效特性研究。主要结论如下:

(1) CV 测试结果表明, C/20 倍率下, 平面冲头下电池容量相比全新电池衰减 2.23%, 容量衰减模式为 LLI, 球形和柱形冲头下电池容量未衰减。3C 倍率快速充放电下, 容量衰减规律完全相反, 球形冲头下电池放电容量相比全新电池衰减最多, 随着循环次数增加, 其老化最快, 而平面冲头下电池衰减最少, 老化最慢。EIS 测试和计算结果表明, 碰撞损伤电池相比全新电池,  $R_{ohm}$ 、 $R_{SEI}$ 、 $R_{ct}$  和  $R_w$  均增大, 且冲头尺寸越大, 电化学阻抗劣化越严重。

(2) 碰撞工况下锂离子电池表现出短路失效早于载荷峰值发生, 这是由结构的惯性效应所导致。20 J 能量球形冲头冲击下, 力的峰值大小为 4.56 kN, 电池整体发生剪切断裂, 电失效形式为微短路和硬短路; 柱形冲头下, 力的峰值大小为 7.58 kN, 力失效和电失效形式和球形冲头冲击下的电池相同; 平面冲头下, 力的峰值大小为 9.49 kN, 无力失效发生, 电池仅发生由阴极和阳极颗粒接触导致的微短路。球形冲头冲击下, 电池表面的温度演化相比柱形冲头和平面冲头峰值更高, 且温升速度更快。电池刚度随着冲击速度增加而增大。

## 参考文献

- [1] 邱宇超, 陈佰爽, 陈诚, 等. 锂离子电池材料准静态压缩本构模型 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3518-3522.  
QIU Y C, CHEN B S, CHEN C, et al. Quasi-static constitutive modeling of lithium-ion battery materials under compression [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3518-3522.
- [2] WANG R J, LIU G F, WANG C, et al. A comparative study on mechanical-electrical-thermal characteristics and failure mechanism of LFP/NMC/LTO batteries under mechanical abuse [J]. eTransportation, 2024, 22: 100359.
- [3] 顾丽蓉, 王敬德, 张新春, 等. 挤压/冲击工况下圆柱形锂离子电池失效的影响因素分析 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(04): 156-165.  
GU L R, WANG J D, ZHANG X C, et al. Analysis of factors influencing the failure of cylindrical lithium-ion batteries under compression and impact conditions [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(04): 156-165.
- [4] ZHU X Q, WANG H, ALLU S, et al. Investigation on capacity loss mechanisms of lithium-ion pouch cells under mechanical indentation conditions [J]. Journal of Power Sources, 2020, 465: 228314.
- [5] SHI T L, AN Z J, DU X Z, et al. Experimental study on the degradation characteristics and mechanism of lithium-ion batteries under mild mechanical deformation [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 108: 115097.
- [6] WANG C, WANG R J, LIU G F, et al. Progressive degradation behavior and mechanism of lithium-ion batteries subjected to minor deformation damage [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 101: 13992.
- [7] AHMED R A, EBECHIDI, N, REISYA I, et al. Pressure-induced interfacial contacts and the deformation in all solid-state Li-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2022, 521: 230939.
- [8] DENG Y F, ZHENG H, HUANG X L. Failure modes and failure energy threshold of lithium-ion batteries under extreme impact [J]. Journal of Energy Storage, 2026, 150: 120037.
- [9] HAO W F, YUAN Z R, XU Y Z, et al. Damage analysis of cylindrical lithium-ion cells under three-points bending using acoustic emission [J]. Journal of Power Sources, 2019, 444: 227323.

- [10] XU J, LIU B H, WANG X Y, et al. Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies [J]. *Applied Energy* 2016, 172: 180-189.
- [11] WANG L B, LI J P, CHEN J Y, et al. Revealing the internal short circuit mechanisms in lithium-ion batteries upon dynamic loading based on multiphysics simulation [J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121790.
- [12] HUANG Z X, ZHANG X C, GU L R, et al. Dynamic failure mechanisms of cylindrical lithium-ion batteries under impact loadings [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 299: 110392.
- [13] LIU Y J, XIA Y, XING B B, et al. Mechanical-electrical-thermal responses of lithium-ion pouch cells under dynamic loading: A comparative study between fresh cells and aged ones [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 166: 104237.
- [14] LIU Y J, XIA Y, ZHOU Q. Effect of low-temperature aging on the safety performance of lithium-ion pouch cells under mechanical abuse condition: A comprehensive experimental investigation [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 40: 268-281.
- [15] WANG Z, SONG Y C, ZHAO Q J, et al. Unveiling the electrochemical degradation behavior of 18650 lithium-ion batteries involved different humidity conditions [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 630: 236185.
- [16] LI H G, GU J H, ZHOU D, et al. Rate-dependent damage and failure behavior of lithium-ion battery electrodes [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 303: 110143.
- [17] ZHAO T Q, ZHANG S, TEUWSEN J, et al. Influence of component properties on the mechanical response of lithium-ion battery jellyrolls subjected to indentation: Quick prediction and parametric study [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 122: 116612.
- [18] 黄子轩, 张新春, 顾丽蓉, 等. 冲击载荷下圆柱形锂离子电池的动态响应预测 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(02): 161-172.  
HUANG Z X, ZHANG X C, GU L R, et al. Dynamic response prediction of cylindrical lithium-ion batteries under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(02): 161-172.

# Performance Degradation and Failure Characteristics of Lithium-Ion Batteries under Impact Loading

ZHOU Xuehui<sup>1</sup>, HUANG Zixuan<sup>2</sup>, ZHANG Xinchun<sup>2\*</sup>, RAO Lixiang<sup>2</sup>,

YANG Shuai<sup>3</sup>

(1. College of Intelligent Equipment Manufacturing, Guangxi Vocational & Technical Institute of Industry, Nanning 530001, Guangxi, China;

2. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

3. Hebei Chinaust Automotive Plastics Corp., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

**Abstract:** To address performance degradation and safety challenges in lithium-ion batteries under impact, this study investigated the damage and failure characteristics of batteries under various collision forms. For NCR18650BD cylindrical lithium-ion batteries, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), cyclic voltammetry (CV) methods, and the multi-physics *in-situ* monitoring platform were employed to analyze the capacity decay, cycling aging, and impedance degradation patterns of batteries under ball, cylindrical, and plane punch. The influence of collision form on failure and thermal behavior was revealed. Results show that at the impact energy of 5 J, only the plane punch causes capacity degradation due to lithium inventory loss in the battery at C/20 rate. At 3C rate, smaller punch means the faster cycle aging. Furthermore, the larger the punch size, the more increased electrochemical impedance of the battery. At an impact energy of 20 J, smaller punch the lower force peak, and subsequently results in the more severe battery failure and the higher probability of thermal runaway. As the impact velocity increases, the overall stiffness of the battery increases, leading to a worsening of force-electric failure. This research provides theoretical foundation and technical support for the optimized design and safety assessment of lithium-ion batteries.

**Key words:** lithium-ion battery; collision form; electrochemical damage; force-electric failure