

动静态荷载下软包电池失效及性能劣化机制*

陈云¹, 富明慧¹, 周名哲¹, 林扬杰¹, 郭万荣¹, 胡玲玲¹

(1. 中山大学·深圳 航空航天学院, 广东 深圳 518107)

摘要: 本文以商用软包锂离子电池为研究对象, 旨在揭示不同机械滥用工况下电池的失效特征与性能劣化规律。通过开展准静态平面压缩、动态平板冲击与动态球头冲击的对比实验, 结合瞬态电压响应监测、冲击后电压跟踪、电化学性能测试及拆解分析, 系统探究了加载方式对电池失效阈值、电性能劣化行为及内部损伤机制的影响。实验结果表明: 加载方式显著影响电池的安全边界与失效模式, 准静态压缩下电池在变形能约 115 J 后开始出现失效, 而平板冲击和球头冲击分别在输入能量约 50 J 和 10 J 后出现失效, 表明动态冲击尤其是局部球头冲击会显著压缩电池安全边界。相同载荷水平下, 准静态压缩主要引起内阻上升, 而平板冲击则导致更明显的容量衰减。临界失效工况下, 平板冲击仅引起轻微容量衰减与内阻变化, 而球头冲击使未失效电池容量损失达 17.4%、内阻最高增至新电池的 3 倍, 表明瞬时电压扰动与实际性能劣化程度并不完全对应。研究进一步揭示, 动态冲击下电池失效存在球头冲击诱发隔膜局部撕裂导致内短路, 以及平板冲击引起铝塑膜破裂与电解液流失两种不同机制。本研究为复杂碰撞场景下的电池安全风险评估提供了实验依据。

关键词: 锂离子电池; 动态冲击; 失效机制; 电性能劣化; 新能源安全

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130.3530

文献标识码: A

Failure and performance degradation mechanisms of pouch batteries under dynamic and quasi-static loading

CHEN Yun¹, FU Minghui¹, ZHOU Mingzhe¹, LIN Yangjie¹, GUO Wanrong¹, HU Lingling¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, Guangdong, China)

Abstract: To reveal the failure characteristics and performance degradation mechanisms of lithium-ion batteries under different mechanical abuse conditions, comparative tests of quasi-static planar compression, dynamic plate impact, and dynamic hemispherical impact were conducted on commercial pouch lithium-ion batteries. The batteries were adjusted to the same state of charge before mechanical loading. During loading, the mechanical response and transient voltage variation were recorded synchronously, and the post-impact open-circuit voltage was tracked for several days to determine the safety state of the batteries. For the batteries that did not fail immediately, capacity tests, direct current resistance measurements, electrochemical impedance spectroscopy, and post-test disassembly were further performed. The effects of loading mode on failure threshold, electrical degradation, and internal damage morphology were analyzed by comparing input energy, peak load, voltage drop, capacity loss, resistance variation, and separator or casing damage. The results show that the loading mode significantly affects the safety

*收稿日期: 2026-02-12; 修回日期: 2026-05-31;

基金项目: 深圳市科技计划项目 (JCYJ20241202130001002); 国家自然科学基金 (12472400, 12202511)

第一作者: 陈云 (2000-), 男, 硕士研究生. E-mail: chenyt2397@mail2.sysu.edu.cn;

通信作者: 周名哲 (1994-), 男, 博士, 特聘副研究员. E-mail: zhoumzh9@mail.sysu.edu.cn;

胡玲玲 (1980-), 女, 博士, 教授. E-mail: hulingl@mail.sysu.edu.cn.

boundary and failure mode of the battery. Failure occurs after a deformation energy of approximately 115 J under quasi-static compression, whereas plate impact and hemispherical impact induce failure at input energies of approximately 50 J and 10 J, respectively, indicating that dynamic impact, especially localized hemispherical impact, markedly narrows the safety boundary of the battery. At the same load level, quasi-static compression mainly causes an increase in internal resistance, while plate impact leads to more pronounced capacity loss. Under critical failure conditions, plate impact causes only slight capacity loss and internal resistance variation, whereas hemispherical impact results in a capacity loss of 17.4% and an internal resistance up to three times that of the fresh battery. This indicates that the transient voltage disturbance does not necessarily correspond to the actual degradation degree. Disassembly analysis further reveals two distinct failure mechanisms under dynamic impact: localized separator tearing and internal short circuit induced by hemispherical impact, and aluminum-plastic film rupture with electrolyte leakage induced by plate impact. These findings provide experimental evidence for battery safety risk assessment under complex collision scenarios.

Keywords: Lithium-ion battery; dynamic impact; failure mechanism; electrical performance deterioration; new energy safety

随着全球能源转型的加速推进,以电动汽车为代表的新能源产业呈现出爆发式增长态势,这直接带动了高能量密度锂离子电池装机量的持续攀升^[1,2]。然而,伴随产业规模的极速扩张,锂离子电池的安全风险也日益凸显,各类电池安全事故随之频发^[3]。电池安全问题已成为制约新能源汽车领域进一步发展的关键瓶颈。

统计数据与研究表明,机械滥用是诱发电池内部短路、起火甚至爆炸的主要诱因之一^[4-6]。在复杂的实际工况下,电池往往面临着从准静态挤压到高速动态冲击等多种形式的力学挑战,其内部损伤与劣化直接决定了系统的安全性。因此,深入探究锂离子电池在极端机械载荷下的失效特征与性能劣化规律,是解决当前安全问题的迫切需求。

为探究不同机械滥用工况下锂离子电池的失效模式,研究者们开展了大量实验。在准静态载荷方面,Sahraei等^[7]通过实验明确了电池硬短路和软短路两种失效模式。Xu等^[8]揭示了荷电状态(SOC)对失效阈值的负面影响。Luo等^[9]通过压痕测试,将全局力与位移曲线之间的拐点与石墨涂层和隔膜陶瓷涂层之间附着力相关联。此外,压头几何形状的影响也受到关注,Zhu等^[10]发现压头半径通过改变剪切分量影响隔膜失效行为。Liu等^[11]研究了局部机械加载诱发内短路下软包电池的安全行为,指出环境温度和SOC会显著影响电池的载荷响应、电压下降和温升过程。进一步地,机械损伤后的电性能退化规律逐渐成为研究重点,例如Zhu等^[12]对机械压痕后电池的电化学性能演变进行了研究,发现压痕后电池容量损失和内阻增加。Wang等^[13]研究了电池在面外压缩下的渐进退化行为和机制,并分析了不同SOC和加载速度对电池退化的影响。

在更贴近实际碰撞场景的动态冲击研究中,学者们对失效机理进行了细致探索。Liu等^[14]针对动态加载下的电池失效模式进行了细致分类,深化了对冲击机理的理论认知。Chen等^[15]进行了一系列高速冲击测试,使用不同形状的冲击头以200至1000米/秒的速度施加动态载荷于软包电池。Hu等^[16]进行了低速冲击试验,以模拟电动汽车运行中遇到的实际情况下的冲击条件,记录了结构化锂离子电池的机械响应、变形模式和失效行为。Xi等^[17]重点探讨了冲击速度对失效机制的影响,揭示了高速冲击下电池的应力波传播规律及显著的动力硬化现象。Deng等^[18]研究了动态冲击下锂离子电池的实时损伤评估,发现声发射特征可反映不同冲击损伤等级,并与冲击后容量衰减和内阻变化相对应。Zhou等^[19]解耦了冲击能量与速度的影响,揭示了冲击能量是导致锂离子电池失效的主导因素,并发现电池在相同冲击能量下随速度升高呈现出非单调失效趋势。高游等^[20]研究了含碰撞缺陷锂离子电池的后续安全性,发现碰撞缺陷会降低电池的短路位移、短路载荷和吸能能力,并加剧容量衰退。

尽管现有研究已对准静态与动态冲击下的锂离子电池失效模式进行了广泛探索,但对不同动力学(动/静态)及不同应力分布形式(均布/局部加载)的耦合影响缺乏系统对比。同时,在这些荷载条件作用下,对临近失效阈值时电池性能劣化模式的差异性及其内在机理认识不足。为此,本文以商用

软包锂离子电池为对象，同步开展准静态平面压缩、动态平板冲击与动态球头冲击的对比实验研究。通过综合瞬态电压响应、冲击后电压跟踪监测、电性能测试及拆解分析，系统揭示加载方式对电池失效阈值、性能劣化规律及内在损伤机制的影响，旨在为复杂碰撞场景下的电池安全风险评估提供更精准的实验依据与理论支撑。

1 实验

1.1 电池试样

实验选用商用堆叠式软包锂离子电池作为研究对象（结构见图1），电池体系为钴酸锂/石墨体系。该电池采用典型的“Z”字型隔膜折叠工艺，将正、负极片交替叠放而成。正极片活性物质为钴酸锂，涂覆于铝箔集流体；负极片为石墨，涂覆于铜箔集流体。电池标称容量为850 mAh，充放电电压区间设定为3.0 V~4.2 V，电池尺寸为57 mm × 26 mm × 6.4 mm，内部正、负极片各包含20层。试验前，所有电池均经标准充放电流程调整至0% SOC，并静置24 h后开展力学加载实验。此外，实验过程中未观察到起火、爆炸等热失控事件，因此本文主要关注机械加载下的力-电响应与冲击后电性能劣化，未同步开展温度测试。

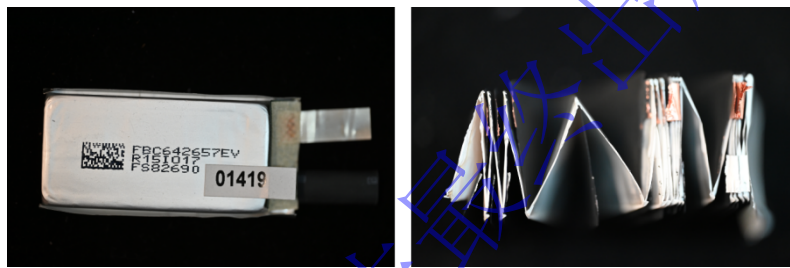


图1 软包电池结构示意图

Fig.1 Pouch battery structure illustration

需要说明的是，本文选用的小容量钴酸锂/石墨软包电池与当前车用大容量三元或磷酸铁锂动力电池在容量、尺寸和材料体系上存在差异，具体失效能量、载荷和位移阈值不宜直接外推。本文关注的是不同加载方式下力-电响应、损伤模式和性能劣化路径的相对差异。由于软包电池在机械滥用下均涉及应力集中、隔膜破坏、封装破裂、电解液流失及受损后电性能劣化等共性问题，本文结果仍可为大容量动力电池碰撞防护设计、局部冲击风险识别和机械滥用后安全筛查提供参考。不同体系和尺寸电池的定量安全边界仍需结合具体结构和工况进一步测试确定。

1.2 动静态力学实验方案

1.2.1 准静态压缩实验

电池准静态压缩实验如图2所示，采用MTS-E45电子万能试验机进行，试验机配备有300 kN力传感器，加载头为圆形平板，面积可以覆盖整个电池，加载速度设置为2 mm/min，加载头位移也由试验机内置传感器得到。电池实验时，底部用钢块垫高防止短路和压坏引线夹。加载过程的开路电压由HIOKI-MR6000数据采集仪实时监测。对电池进行了连续加载和不同终止载荷下的中断加载实验。其中，30、50和90 kN中断加载用于分析未失效电池的电性能劣化；约110 kN中断加载用于确定准静态压缩下延迟失效边界。每组实验至少重复三次。

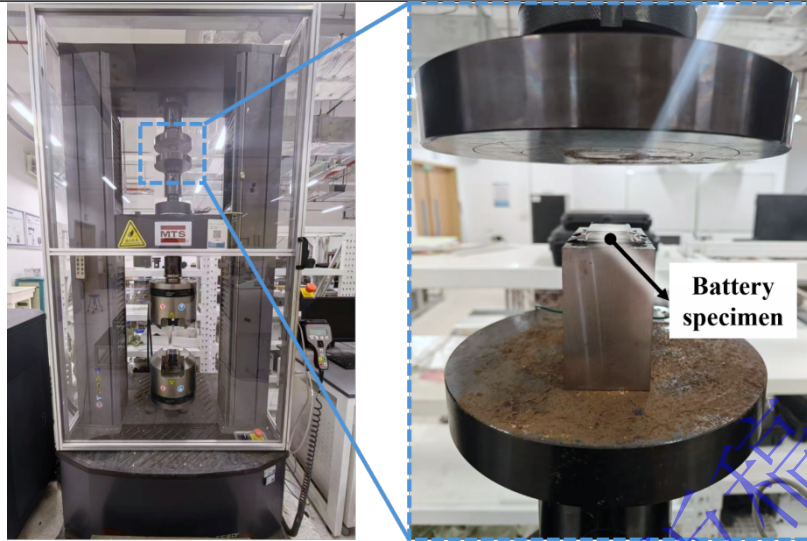


图2 准静态压缩实验装置

Fig.2 Quasi-static compression experimental setup

1.2.2 平板冲击实验

电池平板动态冲击实验如图3所示，采用德国 Coesfeld Magnus2000 仪器化落锤冲击试验机完成，落锤主体由框架和定制冲击头组成，质量为 7.4 kg。冲击头也为圆形平板，能覆盖整个电池，实验过程中的开路电压也由上述的数据采集仪记录，并通过与落锤试验机连接以实现冲击过程的力电数据同步。冲击过程使用高速摄像机拍摄，以确保电池和冲击头是平面接触。为了完整覆盖电池失效和性能劣化的冲击能量范围，对电池进行了速度为 1.6、1.9、2.3、2.8、3.2、3.7、4.4 和 5 m/s 的冲击实验，同样每个工况至少进行三次重复实验。平板冲击速度通过调整落锤释放高度进行控制，并由落锤试验机测速系统记录实际冲击速度。速度工况的选取旨在覆盖平板冲击下电池由安全状态至失效状态的动态响应范围。

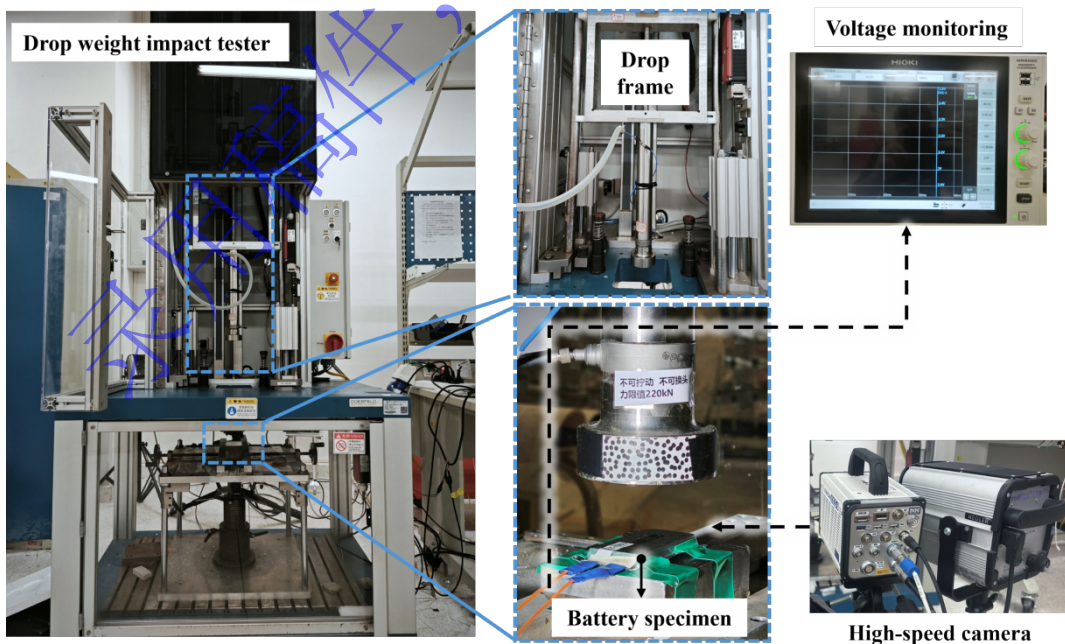


图3 平板冲击实验装置

Fig.3 Plate impact experimental setup

1.2.3 球头冲击实验

电池的球头冲击实验在上述平板冲击实验的基础上,采用改良后的落锤冲击实验机进行,如图4所示。冲击头为半径10 mm的半球形压头,材质为7075铝合金,质量为0.84 kg;上方可组装不同数量的质量块以调整冲击质量,本文固定冲击头总质量为2.413 kg。冲击过程中使用NAC ACS-3高速摄像机记录冲头运动,并采用数字图像相关法(digital image correlation, DIC)获得冲头位移历程,由此计算冲击速度和加速度,再根据牛顿运动定律可得到冲头与电池在碰撞过程中的冲击力^[19]。同样,实验过程中的开路电压由上文的数据采集仪监测。为覆盖局部球头冲击下电池由安全状态、延迟失效至直接失效的响应范围,对电池进行速度为1.3、2.0、2.58、2.75、2.88、3.13和3.42 m/s的冲击实验,每组实验重复三次。需要说明的是,球头冲击与平板冲击的冲击头质量、接触面积及应力分布均不同,二者不存在简单的速度等量换算关系。本文采用输入动能作为冲击强度的宏观表征,并结合峰值力、电压响应及拆解形貌分析不同冲击形式下的失效差异。

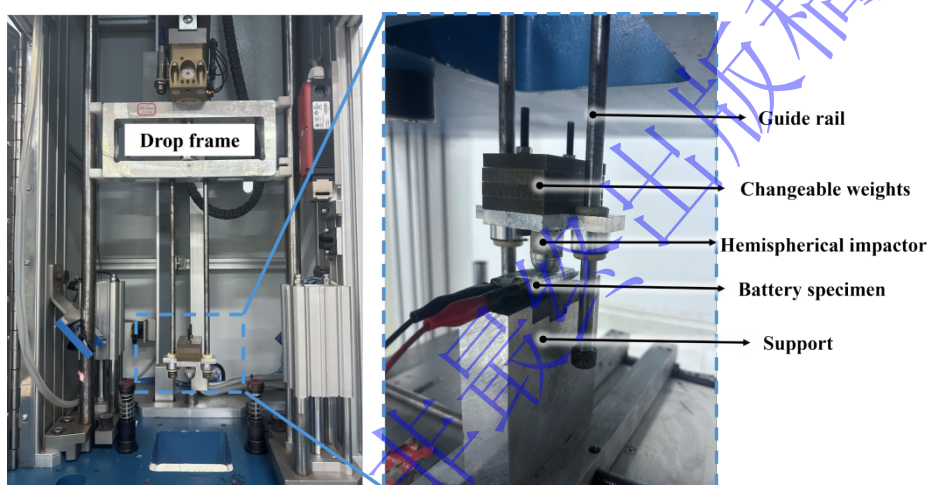


图4 球头冲击实验装置

Fig.4 Hemispherical impact experimental setup

为判定加载后电池的失效状态,实验前后均记录电池开路电压,并在加载后24 h再次测量;随后至少连续监测3 d。若监测期间电压出现持续下降,则继续延长监测时间,直至电压趋于0 V。本文将加载后电压能够恢复并在监测窗口内保持稳定、无持续自放电现象的样品定义为未失效电池;将加载后未立即失效但在静置监测过程中出现持续自放电并最终失效的样品定义为延迟失效电池;将加载过程中电压快速跌落至0 V的样品定义为直接失效电池。

1.3 电性能表征

对于电池冲击后的电性能变化,实验前后电池都进行混合脉冲功率特性测试(hybrid pulse power characteristics test, HPPC)和电化学阻抗测试(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)。上述测试用于分析电池容量,直流内阻和交流阻抗。HPPC测试使用Neware CT4008电池循环仪进行,测试流程及不同放电深度下的直流内阻的计算方式同作者前期文章^[21]。EIS测试采用东华DH7007交流阻抗测试仪,通过电池对不同频段交流激励的响应,测量交流电势和电流信号的比值,辅助表征电池内部性能的变化。测试中设置的扫描频率范围为0.1 Hz~10 kHz,激励电流60 mA。

2 实验结果与分析

2.1 准静态平面压缩下电池的力-电行为与性能劣化

2.1.1 连续加载下的失效特征

准静态平面压缩下, 电池试样典型的力-电响应重复性实验结果如图 5 所示(图中仅展示载荷进入稳定阶段后的刚度数据)。依据电压与外载荷的变化特征, 可将电芯在连续压缩下的变形损伤过程划分为四个阶段: 阶段 I 主要对应初始接触与结构调整过程。由于软包电池为柔性封装, 且内部为多层电极/隔膜堆叠结构, 加载初期接触状态尚未完全稳定, 内部叠层也处于逐步压实和调整过程中, 因此载荷维持在较低水平, 并可能出现小幅波动或下降; 此时电压保持稳定, 说明尚未发生明显内部短路或电化学反应。阶段 II 中, 随着内部叠层进一步压实, 有效承载结构逐渐形成, 荷载持续上升, 电池整体刚度逐渐增大, 而电压仍保持稳定。阶段 III 中, 持续压缩导致内部结构损伤逐渐累积, 刚度开始下降, 电压曲线同步出现拐点并缓慢下降, 表明电池内部力-电耦合损伤已经开始影响电响应。阶段 IV 中, 内部隔膜局部破坏使正负极形成短路通道, 电压瞬间跌落至 0 V, 同时结构承载能力显著下降, 表现为刚度急剧降低。类似的力-电响应阶段特征在前期关于准静态压缩下电池力学行为的研究中亦有报道^[22,23]。

2.1.2 中断加载下的电性能劣化

在连续加载试验中, 电池在最终突然失效前, 其开路电压已出现细微变化, 表明内部可能已发生微观损伤。尽管此时电池未因内部短路而导致电气失效, 但其电化学性能或已受到影响。与连续加载工况相似, 在 30 kN 和 50 kN 的中断实验中, 电池电压均保持稳定; 仅在 90 kN 的中断实验中观察到电压略微下降。进一步的静置监测结果表明, 各组电池的开路电压均未出现明显衰减, 即未发生因自放电引起的延迟失效行为。

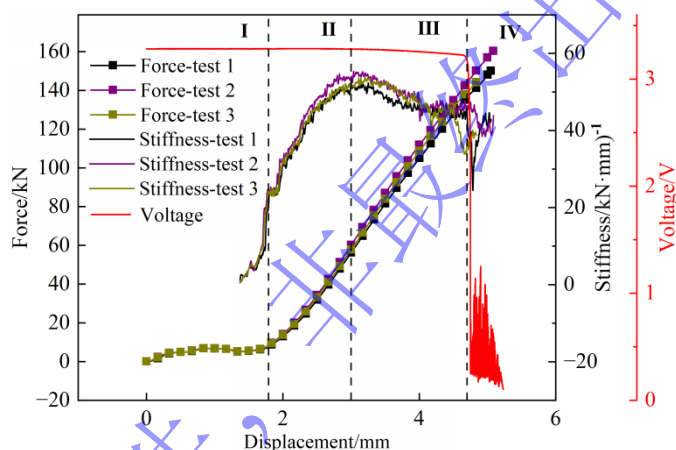


图 5 准静态平面压缩下电池的典型力-电响应

Fig.5 Typical mechanical-electrical responses of pouch battery under quasi-static planar compression

尽管中断加载实验中所有电池均未发生完全失效, 但其电化学性能已出现可观的劣化。图 6(a)展示了中断加载后电池的容量损失情况。在终止载荷为 30 kN 和 50 kN 的工况下, 对应的压缩位移分别为 2.4 mm 与 2.8 mm, 电池容量几乎未发生衰减。然而, 当终止载荷增至 90 kN (压缩位移约 3.6 mm) 时, 电池容量损失达 40 mAh。这表明随着静态压缩载荷的增大, 电池内部电极及隔膜微观结构可能发生不可逆损伤, 导致部分活性锂无法参与正常的嵌脱反应, 从而引起显著的容量衰减^[13,24]。

上述电性能劣化同样体现在电池的阻抗特性上。图 6(b)展示了不同放电深度 (depth of discharge, DOD) 下电池的直流内阻变化。经历 30 kN 和 50 kN 中断加载的电池, 其直流内阻在各 DOD 下仅较新电池轻微上升; 而在 90 kN 中断加载后, 电池内阻显著增大, 均值由新电池的 22.96 mΩ 升高至 32.24 mΩ, 增加约 9.28 mΩ。对电化学阻抗谱 (EIS) Nyquist 曲线定性分析进一步印证了这一趋势 (图 6(c))。在高频区与实轴 (Z_{re}) 的截距对应欧姆阻抗。30 kN 与 50 kN 工况的曲线起点与新电池基本一致, 而 90 kN 工况的曲线则明显右移, 表明较大的静压载荷导致电池欧姆内阻显著上升。与新电池相比, 经历 30 kN、50 kN 与 90 kN 中断加载后, 电池中频区容抗弧整体更为展开, 提示电极/电解液界面的电荷转移过程受到影响。低频区曲线斜率代表锂离子扩散阻抗, 各工况曲线斜率与新电池基本一致, 表明扩散过程未发生明显变化。

上述劣化行为与准静态平面压缩下电池内部多层电极/隔膜结构压实导致的孔隙率变化等有关。较低终止载荷下，该压实过程尚未造成明显不可逆损伤，因此容量和直流内阻变化较小；当终止载荷增至 90 kN 时，持续压缩使隔膜及多孔电极结构发生更明显的压实和局部结构变化，可能导致孔隙连通性降低、离子传输路径受限以及电极/电解液界面状态改变^[25]，使得界面电化学过程受到影响，并使部分活性材料难以充分参与脱嵌锂反应，最终表现为容量衰减及阻抗变化。

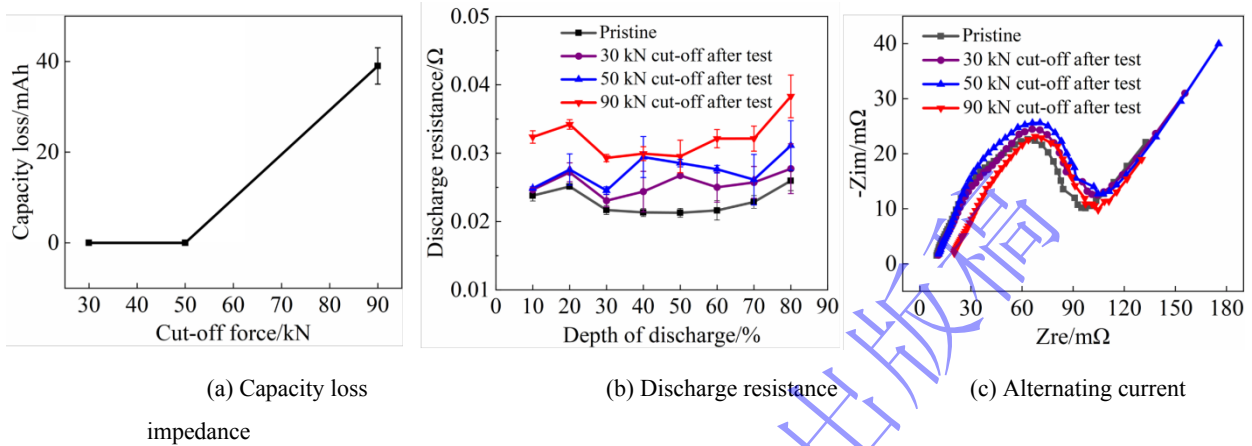


图 6 中断加载后电池电性能变化

Fig.6 Electrical performance variation of batteries after interrupted load

2.2 平板冲击下电池的力-电行为与性能劣化

2.2.1 不同冲击速度下的电池失效特征

图 7 展示了电池在平板冲击载荷下的典型力-电耦合响应。可以看出，冲击过程中力响应与电压响应变化同步：冲击载荷开始上升时，电压随即发生下降。在实验工况内，受冲击电池的电压均呈现“快速下降-缓慢回升”的变化规律。随着冲击速度从 2.8 m/s 提高至 5 m/s，对应的峰值载荷由 32 kN 增大至 60 kN，冲击过程电压下降幅度也从 190 mV 增加至 360 mV，且电压恢复至稳定的时间亦相应延长。

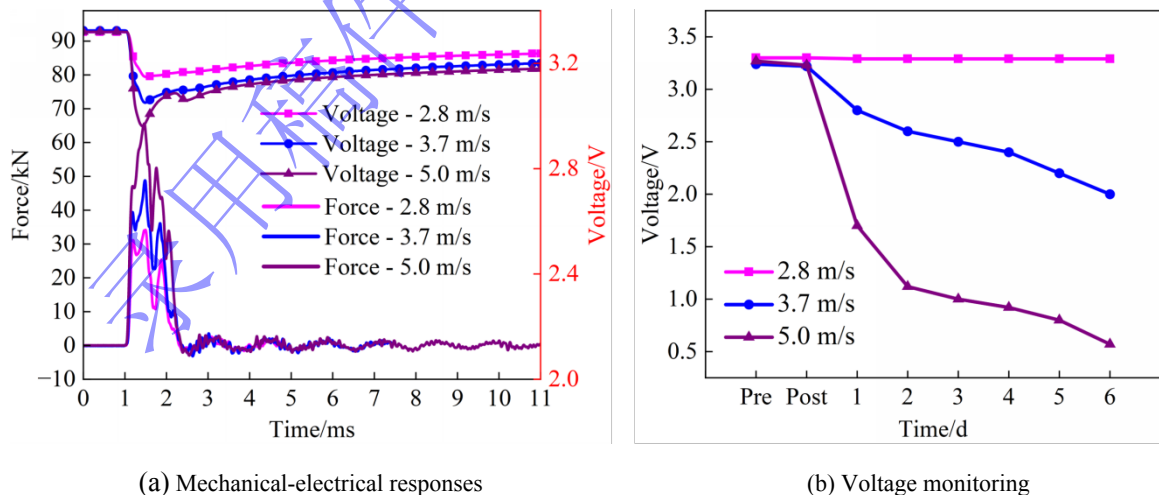


图 7 平板冲击下电池的典型力-电响应与实验后电压监测

Fig.7 Typical mechanical-electrical responses and voltage monitoring of pouch battery under plate impact

结合实验后电压监测结果（图 7(b)）可以看出，在 2.8 m/s 冲击工况下，受损电池电压回升后可保持长期稳定；而在 3.7 m/s 和 5 m/s 工况下，电池则出现不可逆的开路电压下降，降幅分别为 20 mV 和 40 mV。随后的静置监测进一步显示，5 m/s 冲击后的电池持续自放电，首日电压即跌落至约

1.7 V，并持续衰减至 0.5 V；3.7 m/s 冲击后的电池电压衰减较缓，但最终也降至 2.0 V 左右，两者均已严重偏离正常电池自放电速率。

上述结果表明，与准静态压缩中电压骤降至零的特征不同，平板冲击下无论电池最终是否失效，其受冲击瞬间的电压曲线波动特征均呈现高度一致性。失效电池碰撞前后的微小电压差，可能是延迟失效的前兆。在毫秒级时间尺度内实现多电芯电压实时监测存在工程难度，对碰撞后电池的安全预警不仅需要考虑瞬时的力-电响应特征，也须结合冲击后电压的短期波动与长期演化趋势进行系统评估。

2.2.2 冲击后未失效电池的性能劣化

对于未失效电池，图 8 进一步评估了典型冲击速度下其电性能的劣化情况。需要说明的是，3.7 m/s 是本实验中平板冲击的临界失效速度，由于该速度下电池失效具有随机性，本文仅针对该工况下未进入延迟失效模式（即冲击后电压保持长期稳定）的试样进行电性能分析。如图 8(a)所示，随着冲击速度从 2.8 m/s 提高至 3.7 m/s，电池容量损失率由 0.8% 增加至 3%。在阻抗方面，与准静态压缩下高载荷导致内阻显著上升不同，平板冲击后的电池直流内阻变化较小，如图 8(b)所示，各放电深度下的内阻曲线与新电池基本重合。EIS 测试结果（图 8(c)）进一步显示，在 2.8 m/s 与 3.2 m/s 冲击后，Nyquist 曲线特征与新电池几乎一致；而当冲击速度达到临界值 3.7 m/s 时，中频区容抗弧明显扩大，表明电荷转移阻抗显著增大。

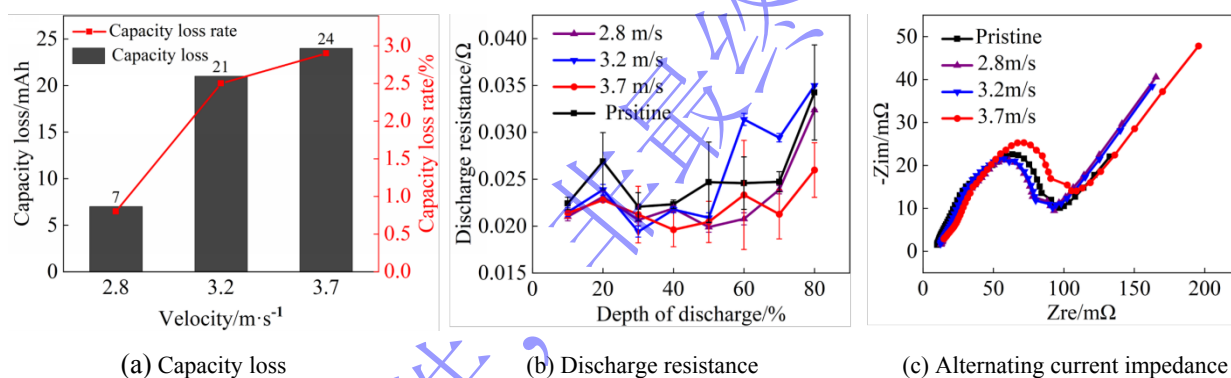


图 8 平板冲击后未失效电池的电性能劣化
Fig. 8 Electrical performance degradation of non-failed batteries after plate impact

2.3 平板冲击和准静态平面压缩下电池的不同响应特征

2.3.1 宏观力-电响应区别

图 9 展示了平板冲击与准静态压缩实验中，电池力学响应及电压降随输入能量变化的关系。对于平板冲击实验（图 9(a)），能量取不同工况下的落锤冲击动能，力值取冲击峰值力，电压降为冲击过程中电压的瞬时下降最大值。对于准静态压缩实验（图 9(b)），能量定义为电池的变形能（通过对力-位移曲线积分获得），力值为压缩过程中对应变形下的荷载，电压降取该荷载时的电压下降值。需要说明的是，准静态压缩中连续加载与中断加载在加载阶段的力-电响应具有较好一致性，因此图 9(b)中不同终止载荷对应的变形能、载荷和电压降由连续加载曲线提取。图中不同颜色区域根据加载过程及加载后电压监测结果划分，而非依据固定电压降阈值或单独依据力学曲线拐点确定。具体而言，加载后电压能够恢复并保持稳定的工况定义为安全区域；加载后电压持续自放电并最终失效的工况定义为延迟失效区域；加载过程中电压快速跌落至 0 V 的工况定义为直接失效区域。

由图 9(a)可见，在平板冲击工况下，随着冲击能量从 9.5 J 增至 92.5 J，峰值力与电压瞬时压降均呈单调上升趋势。结合实验后的电压监测结果，可以将约 50 J 为临界能量值，将电池的安全状态划分为两个区域。在未失效区域（绿色区，对应冲击速度 ≤ 3.7 m/s），尽管峰值力从 20 kN 升至 48

kN, 瞬时压降达 300 mV, 但电池在实验后能够恢复至初始电压并保持稳定, 未发生失效; 当能量超过 50 J 后, 电池进入延迟失效区域 (黄色区), 此时峰值力进一步增大, 压降超过 300 mV。

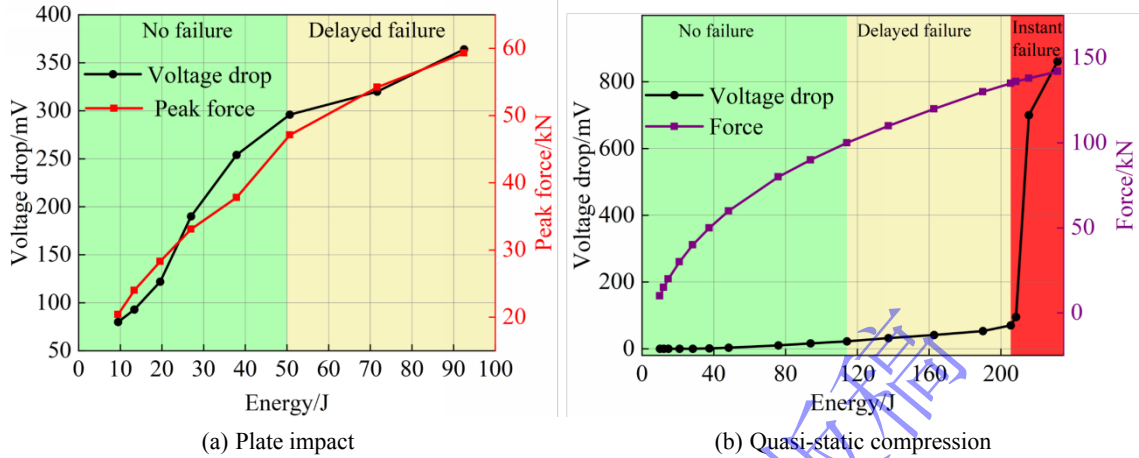


图 9 平板冲击与准静态压缩下力-电响应随能量的变化关系

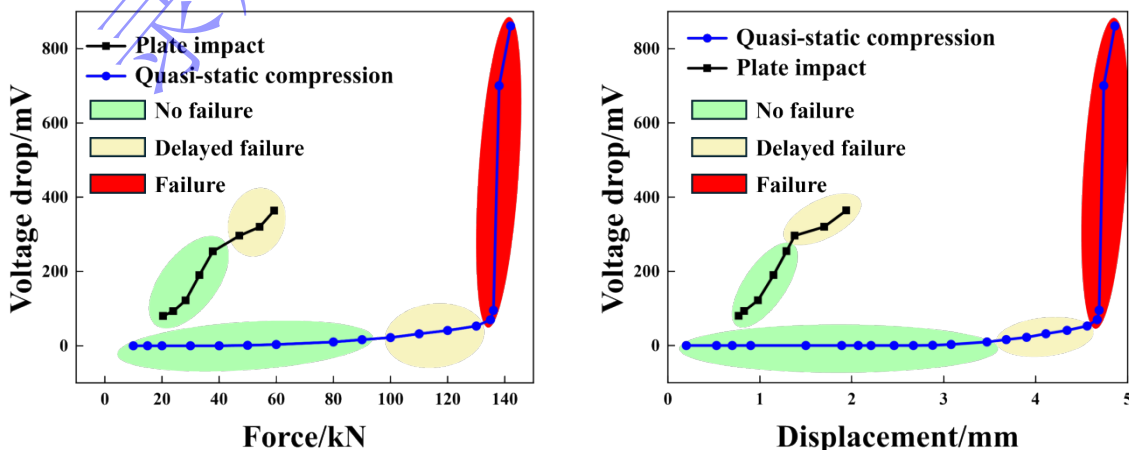
Fig. 9 Relationships between mechanical-electrical response and energy under plate impact and quasi-static compression

图 9(b)展示了准静态压缩工况下电池响应特征。结合实验后电压监测结果, 可将电池安全状态划分为三个区域: 当能量低于 115 J 时 (绿色区), 电池在实验后电压可恢复至初始水平并保持稳定; 在此区间内, 尽管压缩载荷从 10 kN 显著增大至 100 kN, 电压下降幅度始终维持在极低水平。当能量介于 115 J 至 210 J 之间时, 电池进入延迟失效区域 (黄色区), 此时载荷继续增大, 电压降有所增大但仍低于 100 mV。一旦能量超过 210 J, 电池即进入直接失效区域 (红色区), 此时载荷仅从 136 kN 小幅增加至 138 kN, 电压下降却从约 100 mV 急剧升至 700 mV。

图 10 进一步对比了准静态压缩与平板冲击两种加载工况下, 电池的电压降同载荷与压缩位移的关系。其中, 准静态压缩的位移直接由力-位移曲线获得; 而在平板冲击试验中, 则通过力-时间曲线计算加速度, 并二次积分得到落锤位移历程, 进而确定冲击过程中的最大压缩位移。

从力学响应来看, 图 10(a)显示平板冲击下电池进入延迟失效区域的临界载荷仅为 47 kN。相比之下, 准静态压缩在同等载荷下电池表现出更高的结构稳定性, 在载荷达到 100 kN 前始终处于安全区域。在电压响应方面, 准静态压缩直至直接失效的临界载荷 (约 130 kN) 前, 电压下降幅度始终保持在 100 mV 以下的较低水平; 而平板冲击则在远小于该值的载荷下即已出现更显著的电压波动。这说明动态冲击诱发电池内部损伤的临界载荷远低于准静态压缩。

从压缩位移的角度分析, 图 10(b)表明, 在准静态压缩中, 由于载荷在电池内部分布均匀, 电池在压缩位移约 3.5 mm 时才开始导致明显的电压下降, 并在位移约 4.7 mm 处出现电压骤降; 而在平板冲击工况下, 引发延迟失效的变形仅为 1.38 mm 左右。



(a) Voltage drop vs. force (b) Voltage drop vs. displacement
图 10 动态与准静态工况电压降随载荷及位移的变化规律对比

Fig. 10 Comparison of voltage drop evolution with force and displacement under dynamic and quasi-static conditions

上述结果表明，动态平板冲击比准静态压缩更容易引发电池失效。在输入能量、载荷及压缩位移均远低于准静态压缩实验的条件下，受冲击电池已呈现更显著的电压波动，并更早进入延迟失效状态。相比之下，准静态压缩下的电压响应相对平缓，直至达到直接失效的临界条件时，电压才会出现急剧下降。

2.3.2 同载荷水平的不同电性能劣化行为

为进一步分析动、静态加载对未失效电池电化学性能劣化影响的差异，本文选取 30 kN 与 50 kN 两个典型载荷水平进行对比。平板冲击对应的速度分别为 2.8 m/s 和 3.7 m/s（其中 3.7 m/s 为临界失效速度，仅选取未失效试样进行分析）；准静态压缩实验则选用相同终止载荷下的中断加载实验。图 11(a)展示了两类工况下的容量衰减对比。结果显示，在相同载荷下，平板冲击引起的容量损失显著大于准静态压缩。30 kN 时，冲击导致的容量损失为 7 mAh，而准静态压缩几乎无损失；载荷增至 50 kN 时，冲击下的容量损失达 24 mAh，远高于准静态压缩的 2 mAh。

然而在阻抗特性方面，损伤规律出现变化。如图 11(b)所示，相同载荷下，准静态压缩导致的直流内阻增幅更大：无论是 30 kN 还是 50 kN，其全放电深度范围内的内阻曲线均显著高于新电池均值；而平板冲击后的电池即使峰值力达到 50 kN，其内阻曲线仍与新电池高度吻合，未见明显上升。EIS 结果（图 11(c)）进一步显示，两类工况的高频区截距（欧姆阻抗）均与新电池基本一致；但在中频区，30 kN 时准静态压缩电池的容抗弧更为展开，而平板冲击变化不明显。载荷升至 50 kN 时，两种加载方式下 Nyquist 曲线中频区容抗弧均出现扩大趋势，但准静态压缩对应的中频区变化更明显，说明其引起的整体结构压实对界面电化学过程的影响更强。

上述对比结果表明，在 30 kN 与 50 kN 相同载荷水平下，尽管电池均未发生宏观失效，但动、静态加载诱发的性能劣化模式存在显著差异：平板冲击主要导致更严重的容量衰减，而准静态压缩则引起更突出的内阻上升。

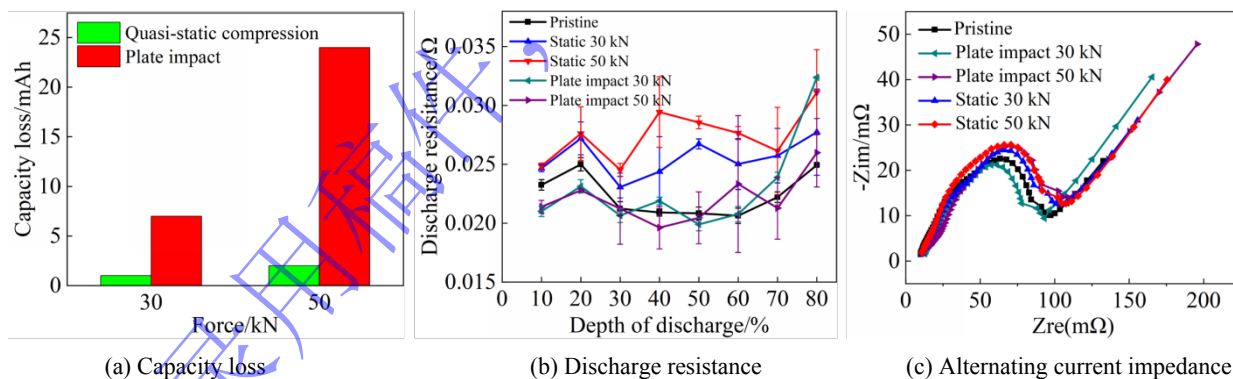


图 11 同载荷水平下准静态压缩与平板冲击电池的电性能劣化对比

Fig. 11 Comparison of electrical performance degradation for batteries under quasi-static compression and plate impact at equivalent load levels

2.3.3 动静态平面荷载下的不同行为机制

为进一步探究动、静态加载下电池性能劣化的内在机理，我们对 50 kN 载荷下未失效的电池进行了拆解分析。拆解结果如图 12 所示。从整体外观（图 12(a)）可以清晰观察到，准静态加载后的电池截面中电极层间结合紧密，未出现明显分层；而平板冲击后的电池则发生了严重的电极分层，且靠近加载面处的分层现象较支撑面侧更为显著。图 12(b)进一步对比了平板冲击电池中靠近加载面与支撑面的首层电极损伤形貌。加载面侧的电极损伤严重，出现明显的涂层脱落与褶皱；在高倍放大下可见

褶皱处存在微裂纹及涂层损伤。与之对比，图 12(c)显示准静态压缩后的电池，无论是加载面还是支撑面侧，电极涂层结构均保持相对完整，未观察到明显的褶皱或微裂纹。

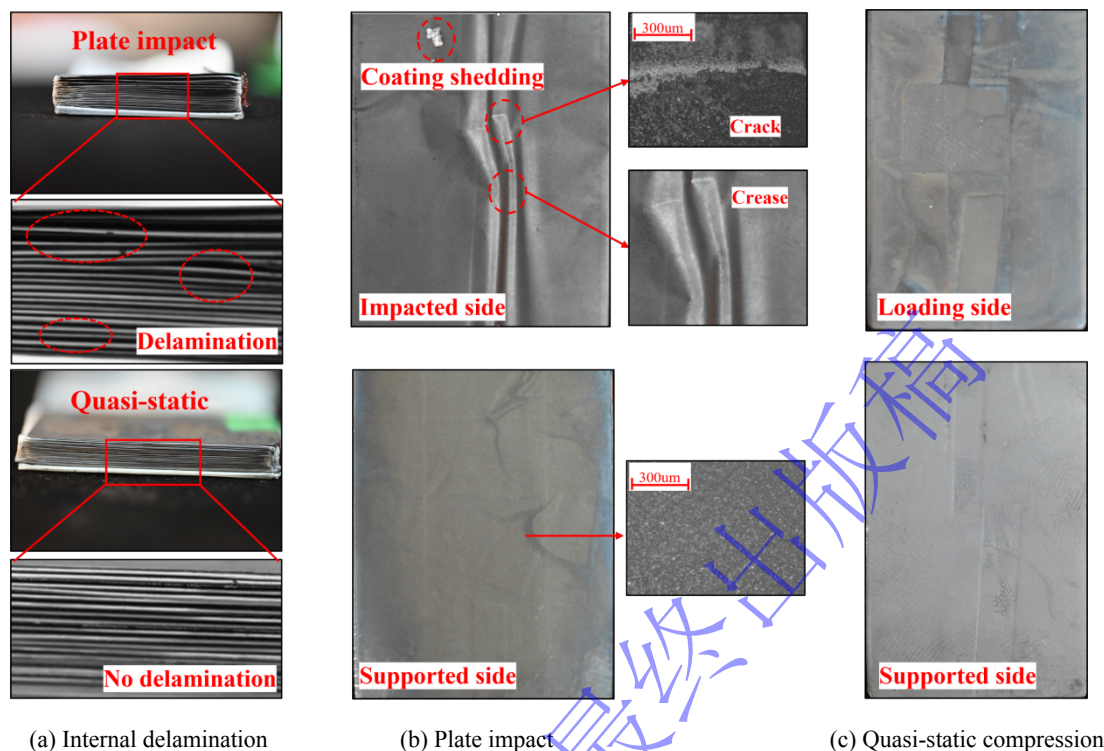


图 12 50 kN 荷载水平下准静态压缩与平板冲击未失效电池的拆解

Fig. 12 Disassembly of batteries without electrical failure under quasi-static compression and plate impact at 50 kN

上述对比分析和拆解结果表明，两种加载模式对电池内部结构损伤形式的影响存在明显差异。准静态压缩主要表现为全局性结构压实。由于加载速率低、持续时间长，外荷载能够被各电极层与隔膜相对均匀地分担，因此在达到失效阈值前，电极涂层未观察到明显脱落或破碎，故容量衰减较轻微。同时，已有研究表明^[25]，机械压力会使电极/隔膜多孔结构发生压实，限制锂离子传输。因此，本文中准静态压缩下电池整体压实可能是导致直流内阻和电荷转移阻抗升高的原因。

相比之下，平板冲击则呈现局部性结构损伤。冲击能量主要由靠近撞击面的局部区域吸收，致使加载面附近出现显著的分层现象，且受冲击端涂层发生褶皱与微裂纹。这会导致参与电极反应的活性物质损失^[26]，从而引起比准静态压缩更明显的容量损失。但由于冲击作用时间极短，电池内部未发生如准静态压缩般的整体压实，对大部分隔膜的孔隙率的影响较小，因此对直流内阻与电荷转移阻抗的负面影响也相对较弱。这一结论与文献^[27]的研究相一致，即动态冲击下，电池的容量损失更为显著，且内阻变化与容量衰减之间并无必然的耦合关系。

2.4 局部球头冲击与平板冲击下电池的不同损伤模式与性能劣化

2.4.1 宏观力-电响应

图 13 展示了球头冲击下电池在典型冲击速度下的瞬时力 - 电响应及冲击后电压监测结果。与平板冲击下受损电池响应相似的情形不同，球头冲击电池的电响应随冲击速度增加呈现显著差异。在 2.75 m/s (能量约 9.1 J) 的冲击下，力与电压响应同步变化：受冲击后电压瞬时下降约 100 mV，随后迅速恢复至初始水平。冲击后电压监测 (图 13(d)) 表明，电池电压持续稳定，未出现自放电现象。当速度提升至 3.13 m/s (约 11.8 J) 时，受冲击电池电压从 3.23 V 骤降至 2.75 V，且载荷卸载后电压无法恢复。静置 24 h 内电压持续跌落至 0 V，说明内部已出现微短路损伤，电池进入延迟失效状态。值得注意的是，电压的显著跌落发生在力曲线的载荷下降阶段，表现出电压响应滞后于冲击过程的特征。

速度进一步增至 3.42 m/s (约 14 J) 时, 电池在受撞击瞬间电压即跌落至 0 V, 发生直接失效, 且电压归零的时刻同样滞后于峰值力的出现时刻。

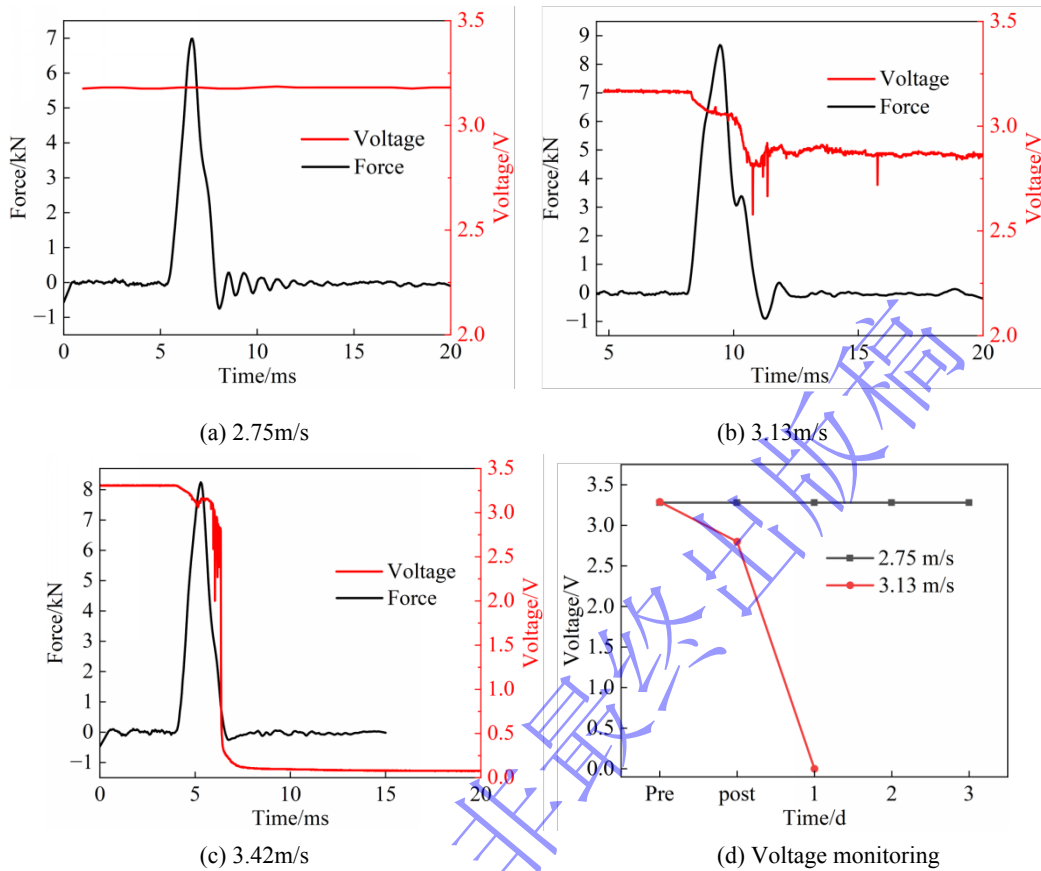


图 13 球头冲击下电池的典型力-电响应与实验后电压监测

Fig. 13 Typical mechanical-electrical response and post-impact voltage monitoring under hemispherical impact

图 14 综合呈现了球头冲击下峰值力与瞬时电压下降幅度随冲击能量的变化关系。与平板冲击类似, 二者均随冲击能量增加呈单调上升趋势。根据冲击后电压监测结果, 可将电池安全状态以约 10 J 为界划分为两个区域: 当能量介于 2 J 至 9.1 J 时, 电压下降幅度维持在 50 mV~110 mV 的较低水平, 处于安全区域, 电池未失效; 一旦冲击能量超过 10 J, 电压下降幅度骤增至约 350 mV, 电池即刻进入延迟失效区域。

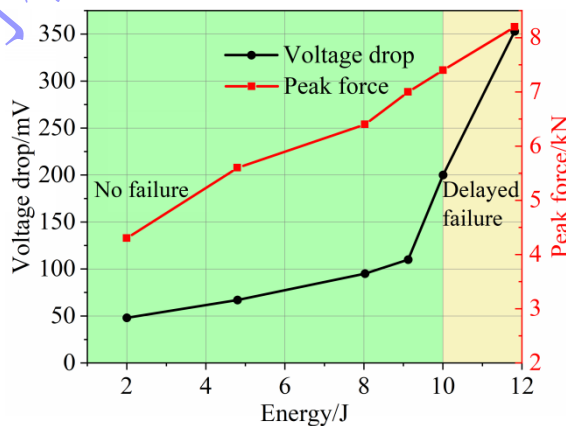


图 14 球头冲击下电池力-电响应随能量的变化关系

Fig. 14 Correlation between mechanical-electrical response and energy under hemispherical impact

冲击工况下的临界载荷是指电池由安全状态转入延迟失效状态时对应的峰值载荷。由于平板冲击与球头冲击的接触面积和应力分布差异显著，临界载荷主要用于描述各自加载形式下的宏观响应阈值，不作为两种冲击工况荷载强度的直接比较依据。因此，本节主要从输入能量范围和失效模式演化对两类冲击的安全边界进行比较。平板冲击在约 50 J 后进入延迟失效状态，并在高达 100 J 的能量范围内主要呈现安全与延迟失效两种模式；而球头冲击在约 10 J 后即进入延迟失效状态，并在约 15 J 以内相继出现安全、延迟失效与直接失效三种模式。该结果表明，局部球头冲击由于接触面积小、变形集中程度高，会更显著地压缩电池安全边界。

2.4.2 局部与均布荷载下临界失效电池性能劣化对比

为对比平板与球头冲击下电池在临近失效状态时的电性能劣化的差异，本节选取平板冲击（3.7 m/s）与球头冲击（2.88 m/s）的临界未失效工况进行分析。由于两类冲击的加载头形状、冲击质量及接触面积不同。本节比较并非等速度、等载荷或等能量条件下的直接对比，而是基于两种加载形式各自临界失效边缘状态的对比。旨在揭示不同接触形式下“临界未失效”电池性能劣化程度的差异。

图 15(a)对比了两种冲击在临界速度下的瞬时压降：平板冲击引起的压降（约 300 mV）显著高于球头冲击（约 200 mV）。未失效电池加载过程中的电压下降可能源于电解液和电极多孔涂层被挤压导致的化学势变化，平板冲击由于加载面积大，导致更大范围内的电解液发生迁移，因而产生了更剧烈的瞬时电压扰动。然而，更大幅值的瞬时压降并不意味着更严重的性能劣化。如图 15(b)所示，处于失效边缘的平板冲击电池，其容量损失率仅为 2.9%；相比之下，临界速度下的球头冲击电池出现了严重的性能衰减，容量损失率高达 17.4%。这一差异在直流内阻变化上得到进一步印证（图 15(c)）：平板冲击后电池在全放电深度下的内阻曲线与新电池几乎完全重合，而球头冲击电池的内阻则在全放电深度范围内显著升高，在 80% 放电深度时，其内阻甚至达到新电池的三倍。

上述结果表明，在球头冲击中，电池在临近延迟失效前已表现出显著的性能衰退；相比之下，平板冲击即使在临界失效条件附近，其性能劣化程度也相对有限。本文将这种瞬态电压响应与后续性能劣化程度不一致的现象称为“反转”效应，即瞬时电压扰动较大的平板冲击并未导致更严重的后续性能劣化，而瞬时电压扰动较小的球头冲击反而造成更显著的容量损失和内阻升高。

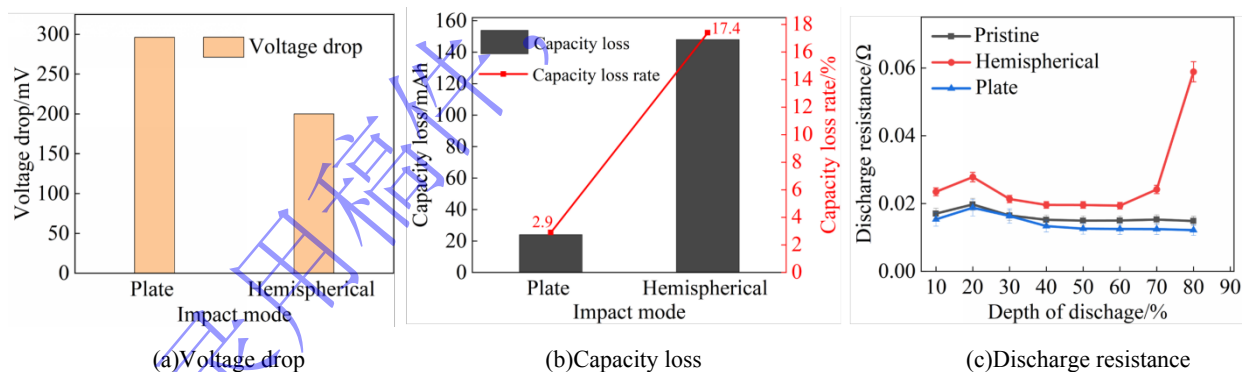


图 15 平板冲击与球头冲击下临界未失效电池的电性能劣化对比

Fig. 15 Comparison of electrical performance degradation for critical non-failed batteries under plate and hemispherical impact

2.4.3 局部球头冲击与平板冲击下的不同的损伤模式

为进一步阐明平板与球头冲击的失效机理差异，对两种冲击在临界速度下发生延迟失效的电池进行了拆解分析，结果如图 16 所示。如图 16(a)所示，球头冲击样品在撞击点形成明显的半球状凹坑，但壳体整体保持完整；而平板冲击样品则在电池尾部边缘区域出现了铝塑膜破裂。图 16(a)同时展示了两种冲击下首层隔膜的损伤情况。球头冲击区域的隔膜受损严重，可见明显撕裂；而平板冲击后的首层隔膜表面光滑，显微观察未见明显损伤。

对于电极损伤情况，图 16(b)显示，球头冲击下电池在靠近加载面的首层电极在凹坑区域内出现集流体破裂，凹坑四周伴随微裂纹；支撑面附近电极虽可见凹坑，但深度较浅、表面光滑，显微观察未发现明显损伤。对于平板冲击，图 16(c)表明，加载面附近电极损伤严重，出现严重的涂层脱落、微裂纹及明显褶皱；支撑面附近电极也有轻微褶皱，显微观察可见因褶皱挤压产生的细微裂纹。

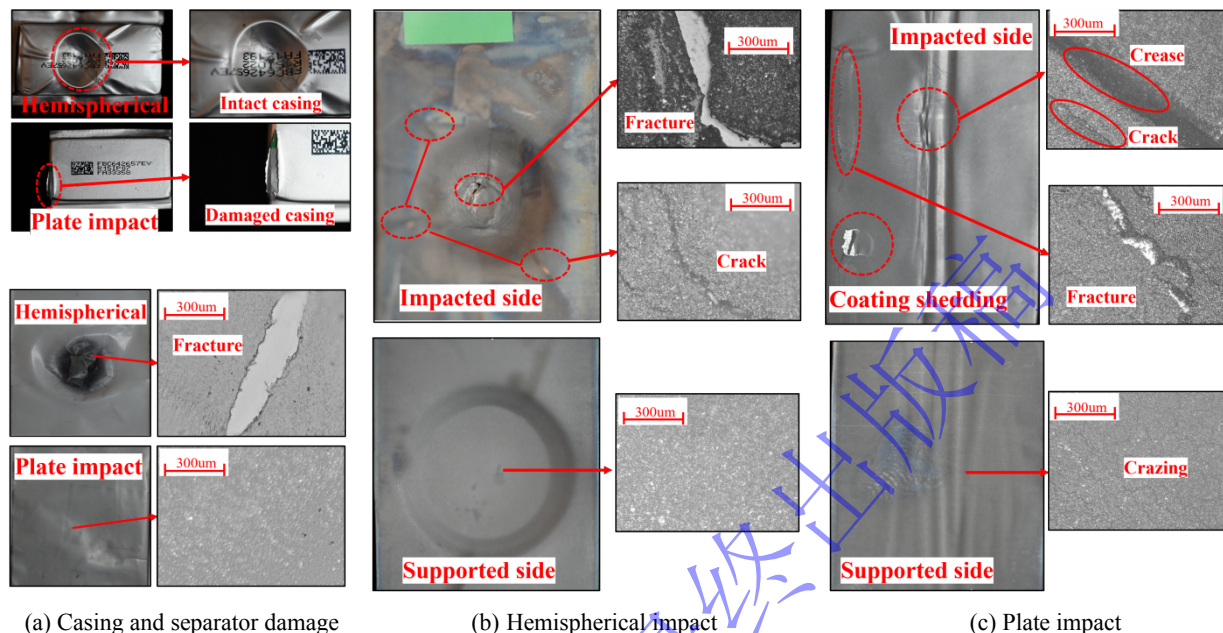


图 16 球头冲击与平板冲击工况临界速度时的延迟失效电池拆解

Fig. 16 Disassembly of delayed failure batteries at critical velocities under hemispherical impact and plate impact

上述拆解结果从结构层面解释了两类冲击样品的失效机制差异。对于球头冲击，其小接触面积使载荷和变形集中于冲击区域，导致局部应力集中，并可能伴随较高的局部应变率，从而更易诱发隔膜撕裂，形成局部内短路路径，进而引发持续自放电并最终表现为延迟失效。而对于平板冲击，尽管加载面首层隔膜结构完整，但电池尾部铝塑膜却发生破裂。这可能是由于大面积动态冲击下，电池在厚度方向受压而产生的横向泊松效应较为显著，导致铝塑膜先于内部隔膜发生破坏，造成电解液泄漏与挥发，继而引发自放电并走向延迟失效。

上述两类不同的失效机制也对应了两者不同的力电响应特征。对于平板冲击，失效主要由壳体破坏及电解液流失引起，内部隔膜保持完整，未形成局部短路。因此，无论是未失效还是延迟失效的电池，其电压均呈现“快速下降-缓慢回升”的相似变化模式，且实验前后短期内电压仅出现轻微衰减。而对于球头冲击，未失效电池因隔膜完好，其电压响应与平板冲击相似；但对于延迟失效电池，拆解证实隔膜已发生撕裂并引发局部短路，对应在电信号上则表现为电压剧烈下降，且实验前后电压衰减显著。

两类失效机制的差异，同样解释了二者在临界失效状态下电性能劣化程度的不同。球头冲击下，由于荷载作用面积小，电池各层变形程度较大，电池在隔膜断裂前多层电极涂层就出现了较大裂痕，导致电性能明显衰减。而平板冲击的失效主要由电解液流失引发，在临界失效前电池主体结构仍相对完整。且由于惯性效应导致的变形局部化，电极涂层的损伤受限于受冲击端（图 12(b)及图 16(c)），对电池整体性能的影响相对有限，因此其电性能相比局部荷载劣化程度更轻。

3 结论

本文基于对比软包电池在准静态平面压缩、平板冲击以及球头冲击等典型的机械滥用工况下的不同的力电响应和电性能劣化表现，结合电池内部的损伤分析，得到的主要结论如下：

(1) 加载方式极大影响了电池的力-电行为与失效安全边界。准静态压缩在极高载荷（变形能约 210 J，荷载水平约 136 kN）下方发生直接失效，而在 115 J~210 J（100 kN~136 kN）范围内出现延迟失效；与之相比，平板冲击在 50 J~100 J 能量范围（峰值载荷 48 kN~60 kN）主要表现为延迟失效。而球头冲击因接触面积小、应力集中，在极窄能量窗口（约 10 J~15 J）内即经历延迟失效与直接失效两种状态，安全边界被显著压缩。

(2) 动静态加载对未失效电池的电性能劣化行为存在显著影响。相同荷载水平下，准静态压缩由于全局结构压实、隔膜孔隙率降低导致的离子传输阻力增加，电池性能劣化表现为直流内阻和电荷转移阻抗增加；而平板冲击下，变形局部化导致的受冲击端涂层褶皱与电极分层，造成参与电极反应的活性物质损失，使得性能劣化主要表现为容量衰减。

(3) 局部与均布动态荷载对电池瞬态电压响应与性能劣化的“反转”影响。在临界失效工况下，冲击过程瞬时电压扰动更剧烈的平板冲击仅引起轻微容量衰减与内阻变化；而瞬时电压扰动较小的球头冲击却导致严重的性能劣化（容量损失达 17.4%，内阻最高增至 3 倍）。这说明瞬时电压信号对判断机械滥用后未失效电池劣化程度的局限性，需结合冲击头形状及事后电化学测试进行综合判断。

(4) 揭示了动态冲击下结构损伤与电解液流失两种失效机制。研究发现，球头冲击下电池失效由应力集中引起的隔膜局部撕裂（结构损伤）主导，即内短路；平板冲击下电池的失效则主要由于均布荷载下的泊松效应，电池内部组分材料横向膨胀引发铝塑膜先于隔膜破裂（电解液流失）主导。这为工程中的电池碰撞防护设计提供了新思考方向。

参考文献

- [1] 王震坡, 黎小慧, 孙逢春. 产业融合背景下的新能源汽车技术发展趋势[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 1-10. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.309. WANG Z P, LI X H, SUN F C. Development trends of new energy vehicle technology under industrial integration[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(1): 1-10. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.309.
- [2] JIA Z, JIN K, MEI W, et al. Advances and perspectives in fire safety of lithium-ion battery energy storage systems[J]. eTransportation, 2025, 24: 100390. DOI: 10.1016/j.etrans.2024.100390.
- [3] 陈泽宇, 熊瑞, 孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 93-104, 116. DOI: 10.3901/JME.2019.24.093. CHEN Z Y, XIONG R, SUN F C. Research status and analysis for battery safety accidents in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 93-104, 116. DOI: 10.3901/JME.2019.24.093.
- [4] BAI J, WANG Z, WERAGODA D M, et al. Thermal runaway of Li-ion batteries caused by hemispherical indentation under different temperatures: Battery deformation and fracture[J]. Journal of Power Sources, 2024, 621: 235293. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.235293.
- [5] 王涛, 孟康培, 刘跃专, 等. 冲击质量对方形锂离子电池在冲击载荷下动态力学响应和失效模式的影响[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(2): 021423. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0316. WANG T, MENG K P, LIU Y Z, et al. Effects of impact mass on dynamic mechanical responses and failure modes of square lithium-ion batteries under impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(2): 021423. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0316.
- [6] 郭亚周, 刘小川, 白春玉, 等. 轻型消费级无人机软包锂离子电池在机械强冲击载荷下的力学响应特性[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(2): 021424. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0320. GUO Y Z, LIU X C, BAI C Y, et al. Dynamic response

- characteristics of soft-pack lithium batteries for light-weight consumer drones under mechanical strong impact loads[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(2): 021424. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0320.
- [7] SAHRAEI E, CAMPBELL J, WIERZBICKI T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 220: 360-372. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.07.057.
- [8] XU J, LIU B, HU D. State of charge dependent mechanical integrity behavior of 18650 lithium-ion batteries[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 21829. DOI: 10.1038/srep21829.
- [9] LUO H, XIA Y, ZHOU Q. Mechanical damage in a lithium-ion pouch cell under indentation loads[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 357: 61-70. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.04.101.
- [10] ZHU X, WANG H, WANG X, et al. Internal short circuit and failure mechanisms of lithium-ion pouch cells under mechanical indentation abuse conditions: an experimental study[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 455: 227939. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227939.
- [11] LIU Z, WANG X, WANG L, et al. Temperature-dependent safety behavior of LiFePO₄ pouch cells under mechanically induced localized short circuits[J]. *Energy*, 2026, 342: 139494. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139494.
- [12] ZHU X, 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. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228314.
- [13] WANG C, WANG R, LIU G, et al. Progressive degradation behavior and mechanism of lithium-ion batteries subjected to minor deformation damage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 101: 113992. DOI: 10.1016/j.est.2024.113992.
- [14] LIU B, JIA Y, YUAN C, et al. Safety issues and mechanisms of lithium-ion battery cell upon mechanical abusive loading: a review[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 24: 85-112. DOI: 10.1016/j.ensm.2019.06.036.
- [15] CHEN Y, SANTHANAGOPALAN S, BABU V, et al. Dynamic mechanical behavior of lithium-ion pouch cells subjected to high-velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2019, 218: 50-59. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.03.046.
- [16] HU R, ZHOU D, JIA Y, et al. Dynamic mechanical behaviors of load-bearing battery structure upon low-velocity impact loading in electric vehicles[J]. *eTransportation*, 2024, 21: 100334. DOI: 10.1016/j.etrans.2024.100334.
- [17] XI S, ZHAO Q, CHANG L, et al. The dynamic failure mechanism of a lithium-ion battery at different impact velocity[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104747. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104747.
- [18] DENG Y, LI J, HUANG X. Deep-learning-based real-time damage assessment of lithium-ion batteries under dynamic impact[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 662: 238737. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.238737.
- [19] ZHOU M, HU L, ZHAO X, et al. Decoupling the influence of impact energy and velocity on dynamic failure of cylindrical lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 624: 235612. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.235612.
- [20] 高游, 郑若昕, 姜宇新, 等. 含碰撞缺陷的锂离子电池的电化学性能衰退及安全性[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(2): 021422. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0368. GAO Y, ZHENG R X, JIANG Y X, et al. Electrochemical performance degradation and safety of lithium-ion batteries containing defects induced by collision[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(2): 021422. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0368.
- [21] 魏和光, 周名哲, 朱瑞卿, 等. 受冲击荷载后未失效电池力学性能和电性能的劣化[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(2): 021421. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0312. WEI H G, ZHOU M Z, ZHU R Q, et al. Mechanical and electrical degradation of impaired batteries after impact loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(2): 021421. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0312.
- [22] ZHOU M, HU L, CHEN S, et al. Different mechanical-electrochemical coupled failure mechanism and safety evaluation of lithium-ion pouch cells under dynamic and quasi-static mechanical abuse[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 497: 229897. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229897.
- [23] FASCHING M, GROLLITSCH S, HOSCHELE P, et al. Investigating the mechanical in-plane characteristics of lithium-ion pouch cells under crush loads[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 89: 111581. DOI: 10.1016/j.est.2024.111581.
- [24] LIU B, WU C, LIU Y, et al. Electrochemical-mechanical understanding of the accelerated degradation of lithium-ion

- batteries caused by mechanical stress[J]. Energy, 2025, 333: 137420. DOI: 10.1016/j.energy.2025.137420.
- [25] MÜLLER V, SCURTU R G, MEMM M, et al. Study of the influence of mechanical pressure on the performance and aging of lithium-ion battery cells[J]. Journal of Power Sources, 2019, 440: 227148. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227148.
- [26] BIRKL C R, ROBERTS M R, MCTURK E, et al. Degradation diagnostics for lithium ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2017, 341: 373-386. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [27] ZHOU D, LI H, LI Z, et al. Toward the performance evolution of lithium-ion battery upon impact loading[J]. Electrochimica Acta, 2022, 432: 141192. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.141192.

录用稿件，
非最终出版稿