DOI: 10.11858/gywlxb.20240708

挤压/冲击工况下圆柱形锂离子电池失效的影响因素分析

顾丽蓉[1], 王敬德[1,2], 张新春[1], 黄子轩[1], 齐文睿[1], 张英杰[1]

（1. 华北电力大学机械工程系, 河北 保定 071003;
2. 河北电力工程监理有限公司, 河北 石家庄 050081）

摘要: 锂离子电池在受到挤压、冲击载荷时会发生内部短路而引发热失控, 因此, 研究电池失效影响因素对电池结构耐撞性设计具有重要意义。以圆柱形锂离子电池为研究对象, 利用自制的平面压缩和局部压痕实验系统, 研究不同挤压/冲击工况下锂离子电池的力-电-热响应, 并与有限元模拟结果进行对比分析, 结果表明, 实验与有限元模拟结果具有较好的一致性。基于显式非线性有限元方法, 研究了加载速度、压头形状和压头直径对锂离子电池失效行为和力学响应的影响。研究表明: 局部压痕相较于平面压缩更容易导致锂离子电池失效; 随着压头直径的减小, 电池的峰值力显著降低, 失效位移相应减小; 失效位移随着冲击速度的增加而增大, 但当冲击速度超过 15 m/s 时, 失效位移开始减小。研究结果将对锂离子电池的耐撞性多目标优化设计和安全性评估提供一定的指导。

关键词: 锂离子电池; 失效机理; 力学响应; 冲击; 有限元模拟

中图分类号: O347; TM912.9 **文献标志码:** A

随着“双碳”战略的推进, 新能源利用对中国经济的可持续发展至关重要[1]。锂离子电池（lithium-ion battery, LIB）由于具有高能量密度、长寿命和可减少环境污染等优点, 成为新能源结构的重要组成部分[2]。然而, 随着电池能量密度的提高, 安全风险也随之增大。国内外学者对导致电池形变及故障的因素, 如机械滥用、电气滥用和热滥用等[3], 进行了研究, 发现机械滥用是最重要、最直接的诱因[4]。因此, 研究锂离子电池在机械荷载下失效的影响因素对电动汽车组的耐撞性设计具有重要意义。

目前, 已开展了大量机械滥用下锂离子电池的力学行为和失效机理研究。Attara 等[5] 发现将锂离子聚合物电池嵌入多功能复合材料结构可以提高其总体压缩强度和刚度; 董思捷等[6] 通过实验观察和分析锂离子电池在不同挤压载荷下的失效情况, 讨论了失效机理以及挤压载荷对其性能的影响; Greve 等[7] 通过实验和有限元模拟研究了圆柱形锂离子电池在受到外部载荷时发生的塑性变形和断裂, 发现有可能引起短路。受限于实验条件, 大多数学者主要采用有限元模拟方法研究锂离子电池。在力学模拟方面, Jia 等[8] 提出了一种基于代表性体积元素方法的锂离子电池热-电-力学建模框架; Liu 等[9] 研究了 18650 锂离子电池模块在不同堆叠密度和堆叠方式下的机械完整性问题; Beaumont 等[10] 提出了一种锂离子电池薄片的宏观有限元模型开发方法, 用于预测电池在多种机械载荷下的力学响应; 李志杰等[11] 采用精细化模型, 对动力电池包进行了有限元模拟; Wang 等[12] 利用详细的力学模型研究了圆柱形锂离

* **收稿日期:** 2024-01-10; **修回日期:** 2024-01-31

基金项目: 河北省自然科学基金（A2020502005）; 保定市基础研究专项（2372P018）; 河北省电力工程监理有限公司项目（SGTYHT/21-JS-223）

作者简介: 顾丽蓉（2001—）, 女, 硕士研究生, 主要从事锂离子电池的模型预测及失效机理研究. E-mail: gulirongy@163.com

通信作者: 张新春（1980—）, 男, 博士, 副教授, 主要从事冲击动力学和新能源电池研究. E-mail: xczhang@ncepu.edu.cn

子电池在机械载荷下的力学响应和内部短路损伤机制。然而，关于准静态工况下锂离子电池失效的影响因素仍需进一步研究，例如：如何建立锂离子电池的失效模型是锂离子电池失效研究的关键问题之一。

此外，动态冲击工况下锂离子电池的失效行为和机制也引起了国内外学者的广泛关注。在冲击实验方面，Zhou 等[13] 研究了在动态和准静态机械荷载下锂离子电池的力-电-化学耦合失效机制，并进行了安全评估；Hu 等[14] 研究了动态冲击下可充电电池组的失效行为；Jia 等[15] 研究了锂离子电池在动态机械加载下的力-电-化学耦合行为。在有限元模拟方面，冲击工况下锂离子电池的失效研究还较少。Zhang 等[16] 基于应力波理论，通过实验和数值模拟，研究了电池内部的应力波传播机制以及应力波对电池结构和材料的影响；Xing 等[17] 通过实验和数值模拟研究了锂离子电池在不同撞击速度下的动态失效机制。Pan 等[18] 研究了锂离子电池在不同冲击载荷下的响应特征和失效模式。如何对不同冲击工况下锂离子电池失效时的影响因素进行分析，建立各影响因素与锂离子电池动态失效机理之间的关联性，也是电动汽车耐撞性领域亟待解决的关键问题。

本研究将通过实验与有限元模拟相结合的方法研究锂离子电池在挤压/冲击工况下的失效行为，分析在不同工况下锂离子电池失效时的影响因素，给出锂离子电池的力-电-热响应和失效模式，建立不同工况下锂离子电池的失效位移、失效峰值力与各影响因素的关系。

1　方法和模型

1.1　样品、设备和挤压实验方法

选用 NCR18650 圆柱形锂离子电池作为实验研究对象。正极活性物质为镍钴锰酸锂化合物，覆盖在铝箔表面；负极由负极活性材料石墨和集流体铜箔组成；隔膜通常由聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）等材料制成；额定容量为 3 400 mA·h。表 1 为 NCR18650 圆柱形锂离子电池的相关参数。

表 1　NCR18650 圆柱形锂离子电池参数

Table 1　Parameters of the NCR18650 cylindrical lithium-ion battery

Rated capacity/(mA·h)	Diameter/mm	Length/mm	Nominal voltage/V	Charge termination voltage/V	Discharge cut-off voltage/V
3 400	18	65	3.7	4.2	2.75

采用 SANS 微机控制式电子万能试验机加载设备进行位移测量，分辨率为 0.01 mm，量程 100 kN；实验采用加载压板，加载弯曲压头直径 10 mm；温度采集装置为 Ulid UTi85A 红外热成像仪，采集温度的位置为电池侧面的几何中心，经热电偶标定后，发射率设定为 0.95。利用数据采集软件对电压进行采集，电压采集线分别与电池两端正负极相连并绝缘，实验过程如图 1 所示。

为尽可能地降低锂离子电池失效故障造成的热失控风险和因充电不均匀而产生的误差影响，在实验前对电池进行完全放电处理，荷电状态（state-of-charge, SOC）值均为零[6]。为保证实验结果的准确性，每组实验重复 3 次。具体实验步骤如下：

(1) 在加载前，将不同容量的电池样本放置在万能试验机起支撑作用的工作平台中央，缓慢控制压头下降，在即将达到电池上表面位置处停止；

(2) 将电池采集电压用的导线与万用表连接，并对试验机压头与电池的接触位置进行绝缘处理；

(3) 启动红外热成像仪、万用表，并将其与控制电脑连接，打开对应数据的采集软件；

(4) 启动万能试验机，加载速度均为 2 mm/min，局部压痕实验的加载位置位于电池侧面的几何中心线；

(5) 观察实验现象、载荷-位移曲线、电压行为和温度响应，当电池开路电压下降到零时，万能试验机停止加载；

(6) 整理失效的电池样本和实验数据，清理并检查实验系统。

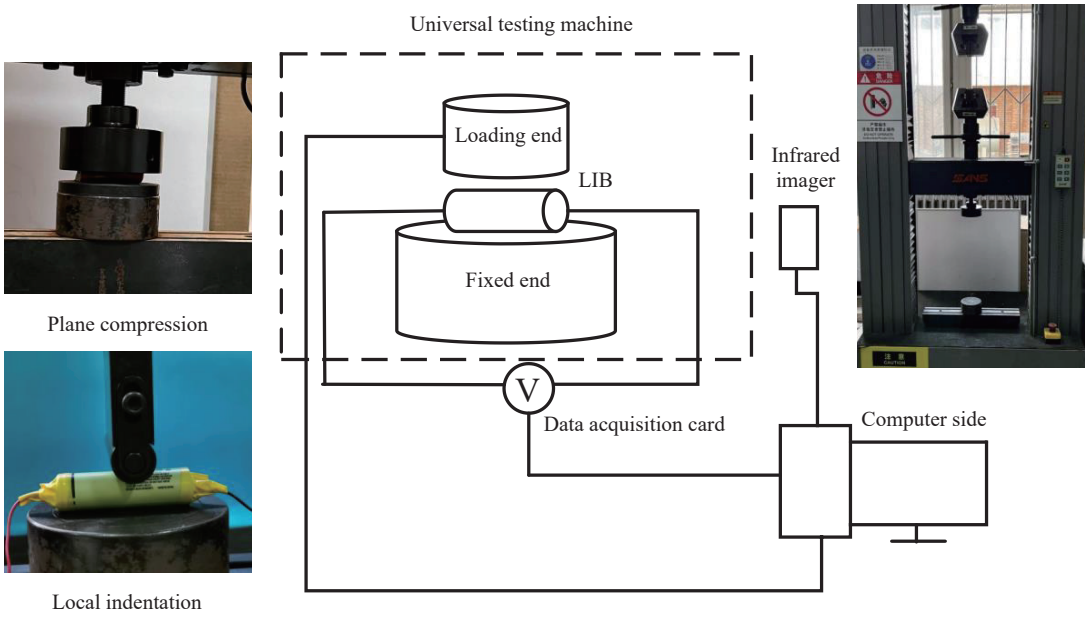


图 1　实验过程示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the experimental process

1.2　有限元模型

基于 NCR18650 圆柱形锂离子电池建立有限元模型。电池内芯由集流体、活性物质和隔膜等组成[2−3]。在建立电池内芯模型时，可以将其看成均质各向同性材料，即采用均质化方法建立电池内芯模型[3]，均质化模型计算简单，能够满足工程需求。

为了建立圆柱形锂离子电池单体模型，需要获得电池内芯的材料力学特性。通过实验测得挤压后的电池内芯载荷-位移曲线，将荷载-位移曲线转换为名义应力-应变关系[19]。电池内芯所受的名义应力

$$\sigma = F/S \tag{1}$$

式中：F 为电池承受的载荷，S 为电池的受力面积。

由于电池为圆柱形电池，受力面积随着压缩过程发生变化，且

$$S = Ld \tag{2}$$

式中：L 为电池内芯的长度，d 为受力面积的宽度。在压缩过程中，受力面积的宽度是不断变化的

$$d = 2r\arccos\left(\frac{r - x/2}{r}\right) \tag{3}$$

式中：r 为电池内芯的半径，x 为万能试验机挤压盘的位移。

根据式 (1)～式 (3)，电池内芯所受的名义应力

$$\sigma = \frac{F}{2Lr\arccos\left(\dfrac{r - x/2}{r}\right)} \tag{4}$$

电池内芯所受的名义应变

$$\varepsilon = x/2r \tag{5}$$

根据单轴压缩测试得到的结果，圆柱形电池内芯的应力-应变曲线如图 2 所示。电池内芯材料与泡沫材料的性质类似，在压缩过程中，逐渐出现了压缩密实阶段。为了建立适用于锂离子电池的本构方程，可以采用参数拟合的方法。根据文献 [20]，采用均质化本构方程描述锂离子电池的力学行为

$$\sigma = A\varepsilon^n \tag{6}$$

式中：A 为材料参数，n 为硬化指数。根据图 2 所示的电池内芯单轴压缩应力-应变数据，通过幂指函数拟合得到圆柱形锂离子电池内芯的 A=276 MPa，n=1.8。最终得到圆柱形锂离子电池的本构方程[20]

$$\sigma = 276\varepsilon^{1.8} \tag{7}$$

利用 ANSYS/LS-DYNA 非线性有限元软件对电池进行准静态挤压模拟，加载速度为 0.1 m/s，该速度可视为准静态加载[21]。电池内芯采用 SOLID164 体单元（8 节点六面体单元）描述，为保证计算精度，单元尺寸设为 1 mm。为提高计算效率，对外壳和压头采用四边形 SHELL163 壳单元（4 节点四边形壳单元）描述，单元尺寸统一设为 2 mm，采用 Belytschko-Wong-Chiang 算法，支撑平台为刚性板。平面压缩实验表明，电池内芯具有低平台应力泡沫材料属性。电池内芯选择 63 号可压缩泡沫材料，外壳采用 24 号弹塑性材料，压头采用 20 号刚性材料，具体参数见表 2。支撑平台底端固定，压头以恒定速度向下运动，限制其他方向位移。接触均选择面-面自动接触算法，摩擦系数为 0.3。

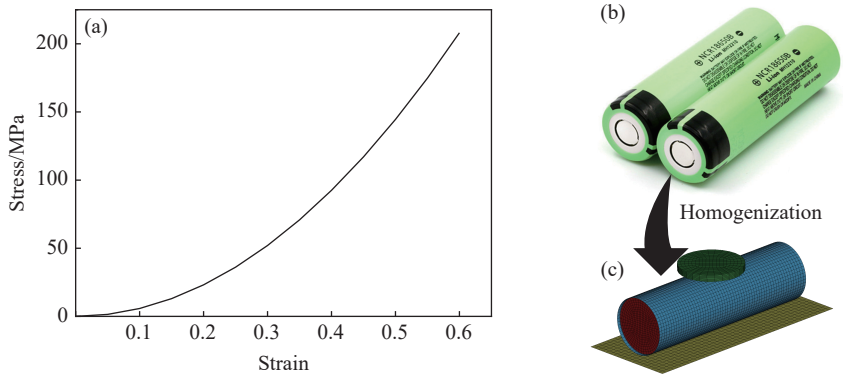


图 2　电池内芯材料的应力-应变曲线 (a)、NCR18650 圆柱形锂离子电池实物 (b) 及有限元模型 (c)

Fig. 2　(a) Stress-strain curves of battery inner core, (b) NCR18650 cylindrical lithium-ion battery and (c) finite element model

表 2　有限元模型材料参数

Table 2　Finite element model material parameters

Component	Material type	Poisson's ratio	Density/(kg·m^{-3})	Elasticity modulus/GPa
Indenter	MAT_20	0.30	7800	210
Shell	MAT_24	0.30	2700	69
Inner core	MAT_63	0.01	2000	0.38

1.3　可靠性验证

图 3 显示了圆柱形锂离子电池准静态加载实验和有限元模拟结果。目前没有统一标准判断锂离子电池失效，Xu 等[22] 用统一强度理论描述圆柱形锂离子电池在压缩过程中的失效。Sahraei 等[23] 采用拉伸截止应力作为锂离子电池短路的标准。局部压痕实验中，常用力-位移曲线的突变点判断电池失效。本研究采用失效参数 T_s（拉伸截止应力）和最大失效主应变 ε_f 判断电池失效，并确定所用锂离子电池的 T_s=26 MPa，ε_f=0.14[23]。当模型尺寸、加载速度和边界条件均相同时，由图 3 可知，局部压痕载荷下有限元模拟与实验结果吻合较好。由于本研究为均匀化模型，而实际上电池内芯为层级结构，计算时难免产生误差，考虑到压缩趋势是一致的，由此证明了内芯材料模型的正确性。

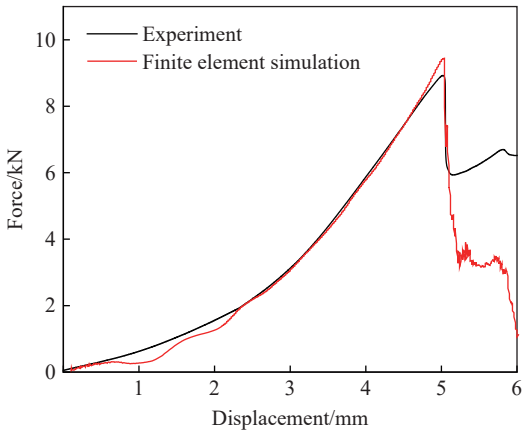


图 3　局部压痕下有限元模拟与实验结果对比

Fig. 3　Comparison of finite element simulation and experimental results under local indentation

2　结果和讨论

2.1　实验数据及分析

设计了平面压缩和局部压痕 2 种加载方案，平面挤压实验主要研究锂离子电池受大面积整体压缩工况，而局部压痕实验具体讨论锂离子电池局部区域受到外物挤压的工况。图 4 分别给出了平面压缩、局部压痕实验中，容量为 3400 mA·h 的锂离子电池的力-电-热曲线。可以看出，在 2 种加载工况下，初始阶段负载均随压缩位移的增大而增加，而温度和电压几乎保持不变。在电池失效前的变形过程中特征点为拐点和峰值力，整个变形过程可分为 3 个阶段：第 1 阶段，电池壳体承受主要负载；第 2 阶段，电池内部的空隙逐渐被压实，刚度随之增大，压缩载荷也逐步增大；第 3 阶段，电池整体受力，内部开始出现损坏并逐渐扩展，累积为整体故障，该阶段也被称为损坏扩展阶段。第 3 阶段以后，电池发生整体故障，压缩力迅速降低。在平面压缩和局部压痕加载形式下，电压下降、温度上升、承载能力减弱以及电解液流出等现象同时出现，进一步证实了电池已发生故障。实验测得的力-位移曲线可以反映电池在压缩过程中的受力情况和变形行为，特别是在第 3 阶段，可以观察到力的突然减小，表明电池内部出现了明显损伤。

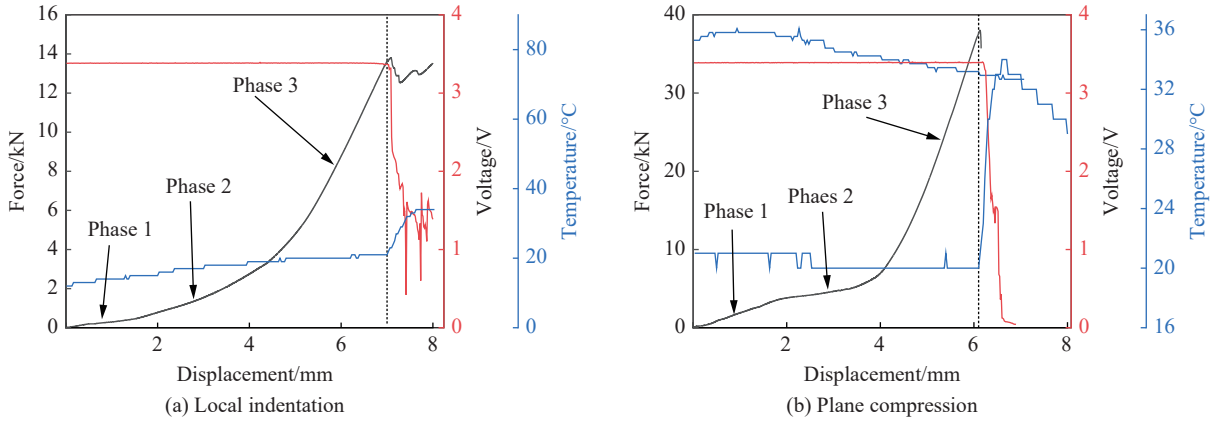


图 4　不同挤压载荷下的力-电压-温度曲线

Fig. 4　Force-voltage-temperature curves under different compression loadings

2.2　准静态挤压工况下的电池失效影响因素分析

2.2.1　压头形状的影响

为了研究压头形状对锂离子电池失效行为的影响，通过改变压头形貌进行整体压缩和局部压痕有限元模拟。在计算过程中，加载速度均设置为 0.1 m/s。图 5 给出了不同压头形状下的力-位移曲线及应力云图。当压头为刚性板时，电池被整体压缩，横截面由圆形变成椭圆形，接触挤压头中间位置的应力最大。在杆棒、球形和圆柱压头挤压下，相当于局部压痕作用，电池中间部分局部变形凹陷，两侧翘起，中间部分变形为挤压头的轮廓。接触挤压头的中心位置应力最大。从图 5 中可以看出，整体压缩比局部压痕作用下电池失效的峰值力更大，失效位移也更大，说明在局部压痕作用下，电池更容易发生破坏、应力集中和失效。

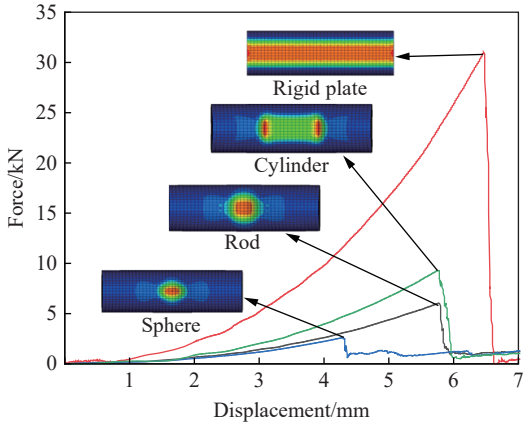


图 5　不同压头形状下锂离子电池的力-位移曲线

Fig. 5　Force-displacement curves of lithium-ion battery under different indenter shapes

2.2.2　压头速度的影响

为了研究压头速度对电池失效的影响，在计算过程中，分别对杆棒压头、刚性板、球形压头、圆柱压头施加不同的速度 v（0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 m/s），观察不同速度下准静态挤压锂离子电池在受到平面压缩和局部压痕时的失效模式。图 6 给出了不同准静态挤压速度下电池的失效位移和失效峰值力关系。失效位移是指电池在受到冲击或挤压过程中发生失效时的位移。失效峰值力是指电池在受到冲击或挤压过程中，达到失效状态时所承受的最大外力。研究结果表明，尽管压头加载速度存在差异，但相同类型压头的失效位移和失效峰值力基本相同。这说明在准静态挤压工况下，挤压速度并不是电池失效的主要影响因素。

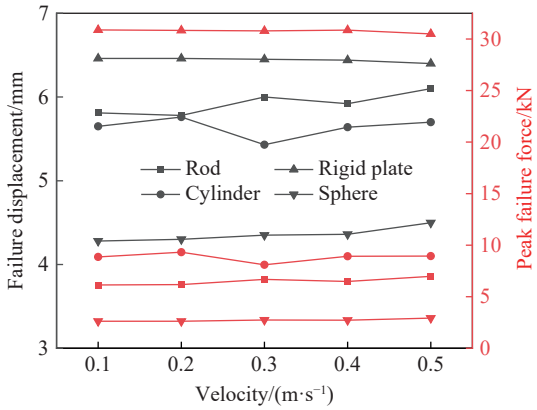
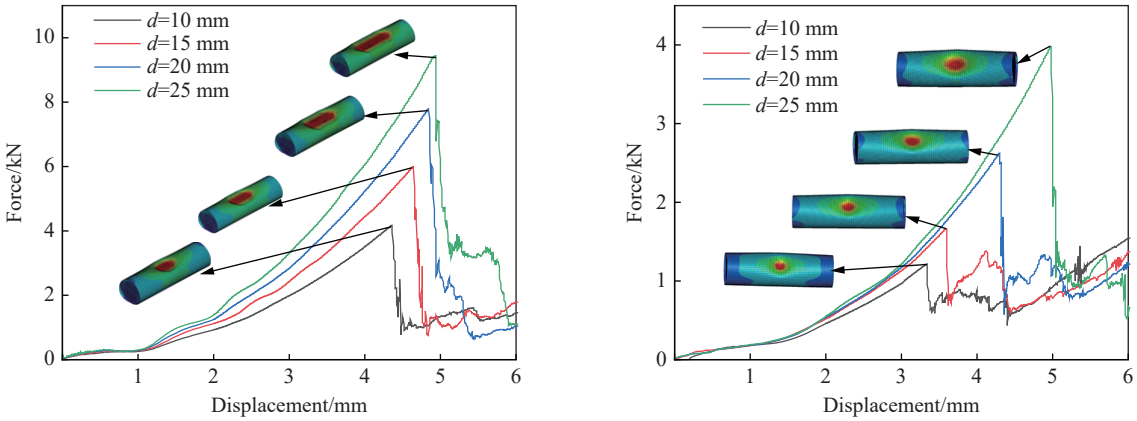


图 6　不同挤压速度下锂离子电池的失效位移和失效峰值力

Fig. 6　Failure displacement and failure peak force of lithium-ion battery under different compression velocities

2.2.3　压头直径的影响

为了研究压头直径对电池失效的影响，对不同直径 d（10、15、20 和 25 mm）的球形和圆柱压头进行数值模拟，加载速度均设置为 0.1 m/s。图 7 分别给出了不同直径的球形和圆柱压头加载下电池的失效力学响应曲线和应力云图。在相同的冲击速度下，随着压头直径的增大，电池发生失效时的位移和峰值力呈增大趋势。究其原因，压头直径越小，电池受力区域越小，更容易诱发电池层间剪切破坏，导致电池局部变形增大，发生破坏所需的最大作用力和最大位移减小。并且，在圆柱和球形压头的压痕中心处，层间剪切破坏现象较为严重。在前一阶段，力-位移曲线呈现上升趋势，说明随着压头的下压，电池所承受的作用力逐渐增大；在后一阶段，曲线出现了明显的峰值后下降趋势，说明电池所承受的作用力达到最大值后开始减小，电池的内部结构已经无法继续承载更多的外部作用力，导致作用力迅速下降，表明电池已经发生失效。



(a) Cylindrical indenter　　(b) Spherical indenter

图 7　不同压头直径下锂离子电池的力-位移曲线

Fig. 7　Force-displacement curves of lithium-ion battery under different indenter diameters

2.3　不同冲击工况下电池失效的影响因素分析

2.3.1　冲击速度的影响

对于球形压头，图 8 给出了不同冲击速度（v）下电池失效的冲击力-位移曲线（d=20 mm）。选择曲线上的不同位移点分析电池的变形情况。通过前述实验可以看出，电池内部在峰值力点处出现小裂纹，将出现这种现象对应的位移点作为判断电池失效的失效点。研究结果表明，低速冲击时的力-位移

曲线具有相似性。在加载过程中，电池受到的冲击力持续增大，短路后迅速减小。图 8 中的峰值力点表示电池在不同速度下的失效点，并给出了此时的失效情况。不同速度下的冲击力-位移曲线存在差异。在动态冲击下，当发生短路时，冲击力不会减小，甚至可能继续增大，这一现象与低速载荷下短路后峰值力的快速下降[3] 不同。当冲击速度提高至 30 m/s 时，冲击力增大，随后迅速下降，并出现一个平台期。在这个过程中，电池将遭受严重损坏。压缩过程结束时，冲击力再次呈现上升趋势，这些现象就是典型的动态损伤。值得注意的是，高速冲击加载下，电池发生短路失效时的峰值力低于低速冲击下电池短路失效的峰值力，这一现象与文献 [3] 相同。

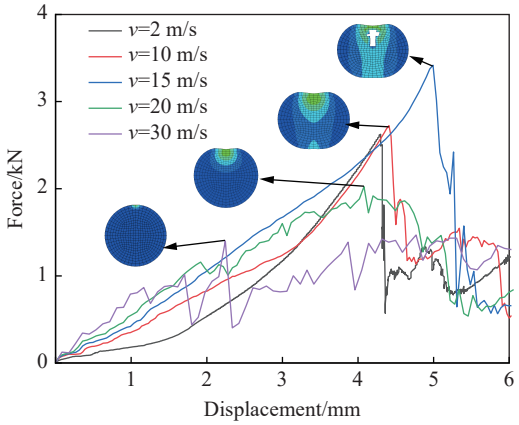


图 8　不同冲击速度下锂离子电池的力-位移曲线及应力云图

Fig. 8　Force-displacement curves and stress contours of lithium-ion battery under different impact velocities

2.3.2　冲头形状的影响

图 9 给出了不同冲头形状下电池的失效位移-失效峰值力曲线和冲头形状。冲击速度相同时，球形冲头冲击电池发生失效时的位移和峰值力最小，杆棒冲头次之，圆柱压头下电池失效位移最大，说明圆柱冲头冲击下的电池最不易发生失效。随着冲击速度的增加，不同冲头下的失效位移基本相同，除圆柱压头外，失效峰值力的差值逐渐减小，说明高速冲击下压头形状不是影响电池失效的主要因素。

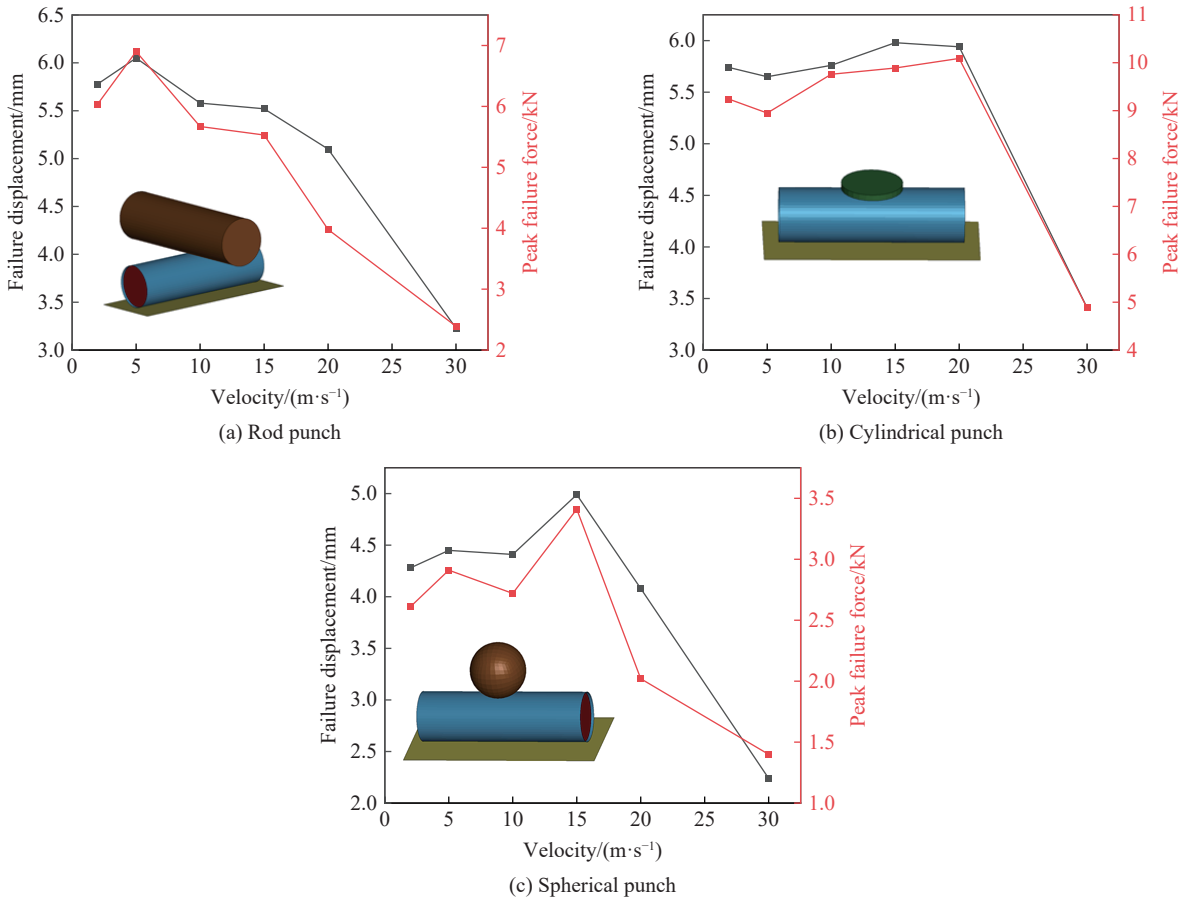
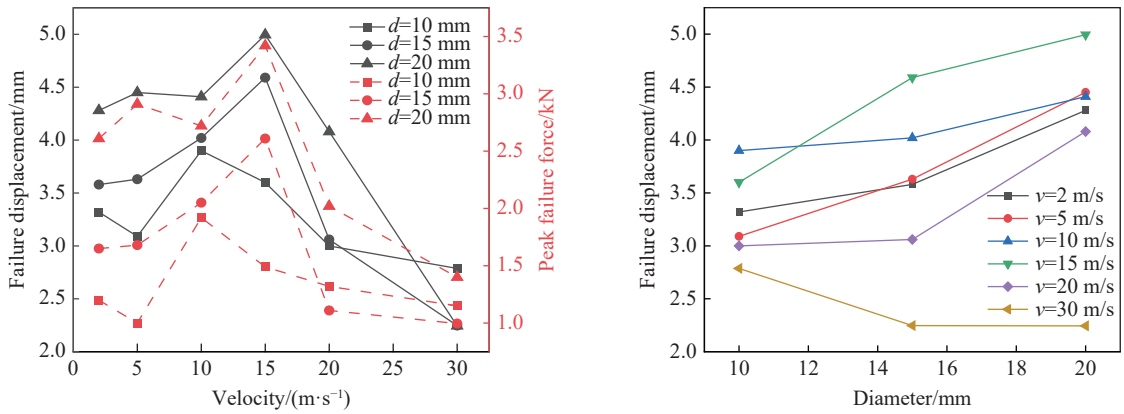


图 9　不同形状冲头下电池的失效位移-失效峰值力曲线

Fig. 9　Failure displacement-failure peak force curves of the batteries under different punch shapes

2.3.3　冲头直径的影响

图 10 给出了不同冲击速度下冲头直径对锂离子电池失效位移和失效峰值力的影响。可以看出，当冲击速度小于 15 m/s 时，随着冲击速度的增加，失效位移和失效峰值力都将增大。对于相同的冲击速度：冲头的直径越大，失效位移和失效峰值力越大；当冲头直径较小时，由于冲击面积较小，承受的冲击力相对集中，导致被冲击物体局部应力过大而发生失效。当冲击速度超过 15 m/s 时，随着冲击速度的增加，相应的失效位移和失效峰值力均减小，而且不同直径冲头下的失效位移点和失效峰值力点接近，冲击力-位移曲线基本重合。尤其当冲击速度为 30 m/s 时，随着冲头直径的增加，失效位移几乎不变，说明在高速冲击下冲头直径将不再是影响电池失效的主要因素。



(a) Failure displacement-force-velocity curves　　(b) Failure displacement-diameter curves

图 10　不同冲击速度下冲头直径对电池失效位移和失效峰值力的影响

Fig. 10　Influence of punch diameter on the battery failure displacement and failure peak force at different impact velocities

3　结　论

利用实验与有限元模拟相结合的方法，对不同挤压/冲击工况下圆柱形锂离子电池失效的影响因素进行了研究，得到如下主要结论。

(1) 在平面压缩和局部压痕准静态实验中，初始阶段负载随着电池位移的增加而增大，而温度和电压几乎保持不变。以拐点和峰值力为特征点描述变形过程，在电池失效前分为 3 个阶段：第 1 阶段电池壳体承受主要负载；第 2 阶段电池内部的空隙逐渐被压实；第 3 阶段电池整体受力，内部开始损坏并逐渐扩展，累积至整体发生故障。

(2) 在准静态挤压工况下，加载速度不变，而改变挤压形式，则局部压痕相较于平面压缩更容易使锂离子电池发生失效。同种压头下，改变加载速度得到的力-位移曲线基本吻合；改变压头直径后，随着压头直径的减小，电池峰值力明显降低，失效位移减小。

(3) 动态冲击工况下，高速冲击过程中电池失效前冲击力会有一个短暂的平台期，发生破坏后冲击力仍然增大。当冲击速度不大于 15 m/s 时，随着冲头直径的增加，失效位移和失效峰值力均会增加，且差值较大；当冲击速度超过 15 m/s 时，不同直径冲头的失效位移和失效峰值力差值均逐渐减小，尤其当冲击速度大于 30 m/s 时，不同直径冲头下的力-位移曲线几乎重合，冲头直径对电池失效的影响较小。

参考文献：

[1] 来鑫, 陈权威, 顾黄辉, 等. 面向“双碳”战略目标的锂离子电池生命周期评价: 框架、方法与进展 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 3–18.
LAI X, CHEN Q W, GU H H, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for carbon-peaking and carbon-neutrality: framework, methods, and progress [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 3–18.

[2] 刘南南, 张新春, 董思捷, 等. 不同挤压载荷下方形锂离子电池的力学响应特性研究 [J/OL]. 应用力学学报, 2024, 1−7. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20221207.1750.012.html.
LIU N N, ZHANG X C, DONG S J, et al. Mechanical response of square lithium-ion battery under different compression loadings [J/OL]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2024, 1−7. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20221207.1750.012.html.

[3] ZHANG X C, ZHANG T, LIU N N, et al. Dynamic crushing behaviors and failure of cylindrical lithium-ion batteries subjected to impact loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107653.

[4] 尹啸笛, 张涛, 张新春, 等. 机械滥用下锂离子电池的力学响应及安全性预测研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38(2): 22070154.
YIN X D, ZHANG T, ZHANG X C, et al. Research progress on mechanical responses and safety prediction of lithium-ion batteries under mechanical abuse [J]. Materials Reports, 2024, 38(2): 22070154.

[5] ATTAR P, GALOS J, BEST A S, et al. Compression properties of multifunctional composite structures with embedded lithium-ion polymer batteries [J]. Composite Structures, 2020, 237: 111937.

[6] 董思捷, 张新春, 汪玉林, 等. 不同挤压载荷下圆柱形锂离子电池的失效机理试验研究 [J]. 中国机械工程, 2022, 33(8): 915–920, 951.
DONG S J, ZHANG X C, WANG Y L, et al. Experimental study of failure mechanism of cylindrical lithium-ion batteries under different compression loadings [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(8): 915–920, 951.

[7] GREVE L, FEHRENBACH C. Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical lithium ion battery cells [J]. Journal of Power Sources, 2012, 214: 377–385.

[8] JIA Y K, GAO X, MOUILLET J B, et al. Effective thermo-electro-mechanical modeling framework of lithium-ion batteries based on a representative volume element approach [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102090.

[9] LIU B H, ZHANG J J, ZHANG C, et al. Mechanical integrity of 18650 lithium-ion battery module: packing density and packing mode [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 91: 315–326.

[10] BEAUMONT R, MASTERS I, DAS A, et al. Methodology for developing a macro finite element model of lithium-ion pouch cells for predicting mechanical behaviour under multiple loading conditions [J]. Energies, 2021, 14(7): 1921.

[11] 李志杰, 陈吉清, 兰凤崇, 等. 机械外力下动力电池包的系统安全性分析与评价 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 137–148.
LI Z J, CHEN J Q, LAN F C, et al. Analysis and evaluation on system safety of power battery pack under mechanical loading [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 137–148.

[12] WANG L B, YIN S, XU J. A detailed computational model for cylindrical lithium-ion batteries under mechanical loading: from cell deformation to short-circuit onset [J]. Journal of Power Sources, 2019, 413: 284–292.

[13] ZHOU M Z, HU L L, CHEN S R, 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.

[14] HU L L, ZHANG Z W, ZHOU M Z, et al. Crushing behaviors and failure of packed batteries [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 143: 103618.

[15] JIA Y K, YIN S, LIU B H, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon dynamic mechanical loading [J]. Energy, 2019, 166: 951–960.

[16] ZHANG H J, ZHOU M Z, HU L L, et al. Mechanism of the dynamic behaviors and failure analysis of lithium-ion batteries under crushing based on stress wave theory [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 108: 104290.

[17] XING B B, XIAO F Y, KOROGI Y, et al. Direction-dependent mechanical-electrical-thermal responses of large-format prismatic Li-ion battery under mechanical abuse [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: 103270.

[18] PAN Z X, LI W, XIA Y. Experiments and 3D detailed modeling for a pouch battery cell under impact loading [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101016.

[19] 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.

[20] WIERZBICKI T, SAHRAEI E. Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical lithium-ion cells [J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 467–476.

[21] 兰凤崇, 郑文杰, 李志杰, 等. 车用动力电池的挤压载荷变形响应及内部短路失效分析 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2018, 46(6): 65–72.
LAN F C, ZHENG W J, LI Z J, et al. Compression load-deformation response and internal short circuit failure analysis of

vehicle powered batteries [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 65–72.

[22] XU J, LIU B H, WANG L B, et al. Dynamic mechanical integrity of cylindrical lithium-ion battery cell upon crushing [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 53: 97–110.

[23] SAHRAEI E, MEIER J, WIERZBICKI T. Characterizing and modeling mechanical properties and onset of short circuit for three types of lithium-ion pouch cells [J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 503–516.

Analysis of Influencing Factors of Failure for Cylindrical Lithium-Ion Batteries under Compression/Impact Conditions

GU Lirong[1], WANG Jingde[1,2], ZHANG Xinchun[1], HUANG Zixuan[1], QI Wenrui[1], ZHANG Yingjie[1]

（1. *Department of Mechanical Engineering*, *North China Electric Power University*, *Baoding* 071003, *Hebei*, *China*;
2. *Hebei Electric Power Engineering Supervision Co.*, *Ltd.*, *Shijiazhuang* 050081, *Hebei*, *China*）

Abstract: Lithium-ion batteries (LIBs) will cause internal short-circuits and even induce thermal runaway when they are subjected to compression and impact loadings. It is of great significance to explore the influencing factors of battery failure under different mechanical abuses for the crashworthiness design of the cells. In this paper, taking cylindrical LIBs as the research object, the force-electrical-thermal responses of the cells under different compression/impact conditions were studied by using a self-made plane compression and local indentation experimental system. The experimental results were compared with the corresponding finite element (FE) ones, and there was in good agreement with each other. Based on the explicit nonlinear FE method, the effects of loading velocity, indenter shape, and indenter diameter on the failure behaviors and mechanical responses of LIBs were also discussed. It is shown that localized indentation is more likely to induce the failure of the cells compared with plane compression. The peak force significantly decreases with the decrease of the indenter diameter, and the failure displacement also decreases correspondingly. It is noted that the failure displacement increases with the increase of the impact velocity, however, the failure displacement will decrease gradually when the impact velocity is more than 15 m/s. These results will provide some guidance for the multi-objective optimal design and safety assessment of LIBs.

Keywords: lithium-ion battery; failure mechanism; mechanical responses; impact; finite element simulation