DOI: 10.11858/gywlxb.20230754

圆柱形锂电池在局部压痕下的安全性实验研究

李 杰[1], 张云龙[2], 袁博兴[2], 汤元会[3], 何永全[3]

(1. 长安大学能源与电气工程学院, 陕西 西安 710064;
2. 长安大学电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064;
3. 陕西省计量科学研究院, 陕西 西安 710199)

摘要: 锂电池局部挤压是汽车碰撞引发的主要损伤形式。为了明确锂电池在受到局部挤压时的安全性能, 利用自研的机械滥用实验平台, 对 18650 锂电池进行局部压痕实验, 以渐进压缩的方式分析其失效过程, 得到了失效过程及温度演变规律, 讨论了电池荷电状态、加载速度、压痕位置和压头尺寸对电池安全的影响。结果表明: 锂电池受局部挤压后有明显的热失控规律, 失效后不会立即发生热失控, 存在一定的反应时间; 电池荷电状态与热失控剧烈程度成正相关, 加载速度决定了电池的失效时间; 靠近电池负极一端受到损伤时更易引发热失控现象, 且受损面积较大时温度更高。实验结果可为锂电池包的安全性设计提供有益的建议。

关键词: 锂电池; 局部压痕; 失效机制; 热失控; 安全性能

中图分类号: O348.3; TM912.9 **文献标志码:** A

锂电池具有能量密度比高、输出功率高、循环使用寿命长和无污染等优点, 被广泛应用于电子设备和新能源汽车等[1−3]。然而, 锂电池具有高能量密度的电极材料, 容易发生安全问题[4]。近年来, 国内外报道了多起新能源汽车起火/爆炸等严重的热失控事件, 电池安全性已经成为制约新能源汽车发展的一个重要因素[5]。据统计, 碰撞是导致新能源汽车发生热失控的主要原因[6]。新能源汽车发生碰撞时, 电池单体之间、电池与电池箱框架之间会发生冲击[7−8], 导致电池受到结构损伤发生内短路, 从而引发热失控等严重的安全事故[9]。锂电池受到局部挤压是汽车碰撞引发的主要损伤形式, 也是造成电池失效而发生热失控的原因。局部压痕实验可以用于研究电池侧面的局部损伤规律[10], 以明确锂电池在受到局部机械损伤时的安全性能与失效机理。

目前, 国内外对圆柱形锂离子电池在局部压痕下的安全性研究已取得了一些重要成果。Liu 等[11]结合实验与仿真方法研究了圆柱形锂电池在径向局部压痕下的热失控规律, 开发了电池高保真的力-电-热耦合模型, 并建立了典型的内短路标准。Yuan 等[12] 利用仿真模型研究了圆柱形电池在径向局部压痕下的失效机理, 并分析了压头尺寸和压痕位置对电池安全性能的影响。Zhu 等[13] 利用 X 射线计算机断层扫描技术(XCT), 采用渐进侵入方式对锂电池进行局部压痕实验, 从微观和宏观尺度上对锂离子电池单元中的内部短路进行了研究。董思捷等[14] 选用 3 种不同容量的 18650 锂电池, 分别在径向挤压和局部压痕工况下进行实验, 分析了加载形式和不同容量对电池失效过程的影响。Voyiadjis 等[15] 研究了锂电池在局部压痕下的失效特征, 提出了一种新的现象学分析模型以获得压头与电池的接触面积, 并利用有限元模型进行了验证。Li 等[16−17] 通过实验和仿真研究了锂电池在压痕下的热失控行为, 揭示了热失控触发机制, 解释了电池内部短路引起的电化学行为。上述研究在锂电池局部压痕的安全性方面做出了较好的探索, 相关研究尚需进一步深入完善, 尤其是锂电池局部压痕下相关控制参数(如

* **收稿日期:** 2023-10-11; **修回日期:** 2023-11-03
基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2021MK104); 陕西省重点研发计划项目(2022GY-178)
通信作者: 李 杰(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事新能源与交通融合、人工智能应用研究.
E-mail: jli@chd.edu.cn

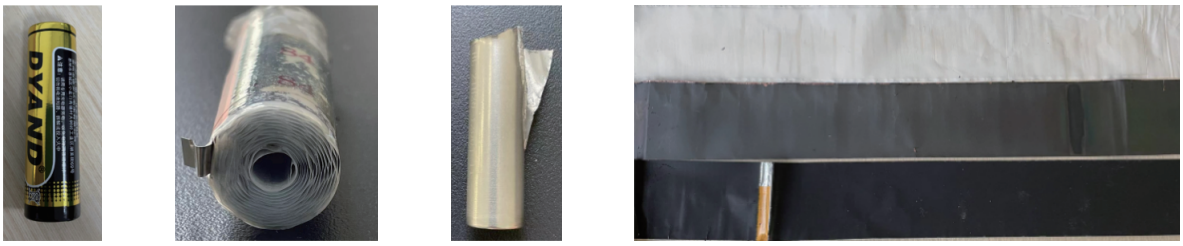
荷电状态(state of charge, SOC)、加载速度、压痕位置和压头尺寸)对其安全性能的影响规律。

针对上述问题，本工作以国产商用 18650 锂电池为研究对象，通过自研的机械滥用实验平台，分析锂电池在径向局部压痕下的力-电-热参数变化，以渐进压缩的方式分析其失效过程，设计实验详细探讨电池在不同加载工况下的安全性能，建立电池 SOC、压头速度、压痕位置、压头尺寸与电池安全性能的关系，并根据实验结果提出锂电池安全性设计的具体建议。

1　实验方法

1.1　实验对象

选用某国产商用 18650 锂电池作为研究样本(图 1(a))。该电池主要由内芯(图 1(b))和钢外壳(图 1(c))组成。内芯由正极、负极和隔膜多层卷绕而成，其中：正极由活性材料钴酸锂和集流体铝箔组成，负极由石墨涂层和集流体铜箔组成，隔膜为聚乙烯材料。图 1(d) 显示了内芯拆解后的正极、负极和隔膜组件。电池样本参数如表 1 所示。



(a) Cylinder cell　(b) Jelly roll　(c) Outer skin　(d) Component

图 1　电池样本

Fig. 1　Battery specimens

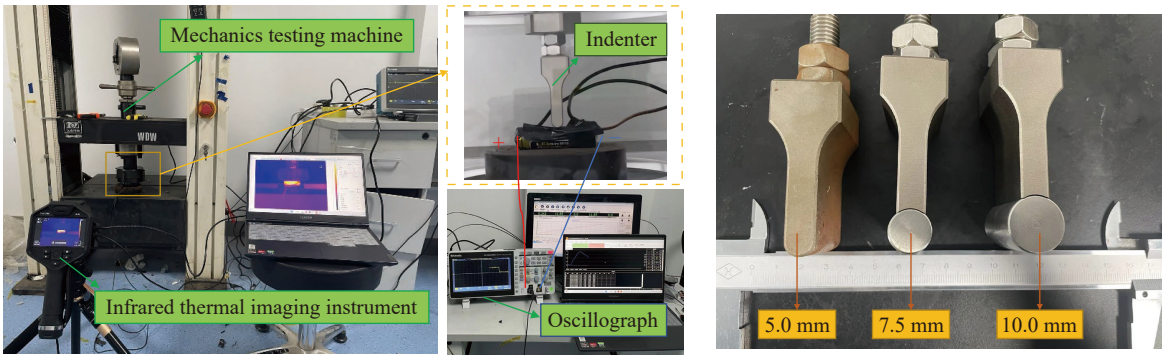
表 1　电池单体参数

Table 1　Battery parameters

Height/ mm	Diameter/ mm	Nominal capacity/ (W·h)	Nominal voltage/V	End-of-charge voltage/V	End-of-discharge voltage/V
65	18	4.6	3.7	4.2	2.75

1.2　压痕测试实验平台

压痕测试实验平台如图 2(a) 所示。利用万能拉伸试验机(量程为 100 kN)对电池施加载荷，记录时间-位移-力数据；用导线连接电池正负极，通过 TBS2204B 示波器记录电池的电压；采用 FOTRIC 红外热



(a) Experimental platform of mechanical abuse　(b) Different sizes of indenters

图 2　实验平台

Fig. 2　Experimental platform

成像仪测量电池表面温度分布和最高温度变化，热成像仪距电池 1 m，采样时间设置为 1 s；将热电偶置于电池侧面的几何中心以校验发射率，经校验，发射率设定为 95%；设置 300 mm×250 mm×150 mm 的透明保护壳，以容纳电池爆炸碎片和烟雾，确保实验安全。

1.3　实验步骤

针对径向局部压痕的特点，设计了 5 组实验，其参数列于表 2。首先，设置第 1 组实验，在 SOC 为 100% 的情况下做压痕滥用实验，分析电池的失效过程和温度演变规律。然后，设置第 2 组和第 3 组实验，分别测量不同 SOC 和不同压头加载速度下电池的力-电-热响应，作为本实验的基准数据。接着，设置第 4 组实验，测量不同压痕位置时电池的力-电-热响应，参考文献 [12] 中的仿真模型参数，并结合本研究中电池尺寸特点，将压痕分别设在距负极 10、20、30、45 和 55 mm 处。最后，设置第 5 组实验，测量不同压头尺寸下电池的力-电-热响应，压头半径分别为 5.0、7.5 和 10.0 mm，如图 2(b) 所示。当压头达到加载位移时停止加载，压头返回至初始位置，每组测试至少重复 3 次，以保证数据的重复性。

表 2　实验条件与参数信息

Table 2　Information on experimental conditions and parameters

Exp.	SOC/%	Indenter velocity/ (mm·min^{-1})	Displacement/ mm	Indentation positions/ mm	Indenter size/ mm
1	100	10	13	30	5.0
2	20, 40, 60	10	13	30	5.0
3	40	2, 10, 20	13	30	5.0
4	20	10	13	10, 20, 30, 45, 55	5.0
5	20, 40, 60	10	13	30	5.0, 7.5, 10.0

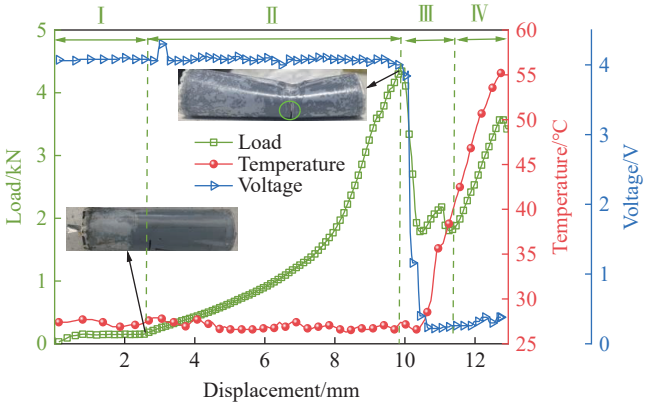
2　实验结果与讨论

2.1　热失控过程分析

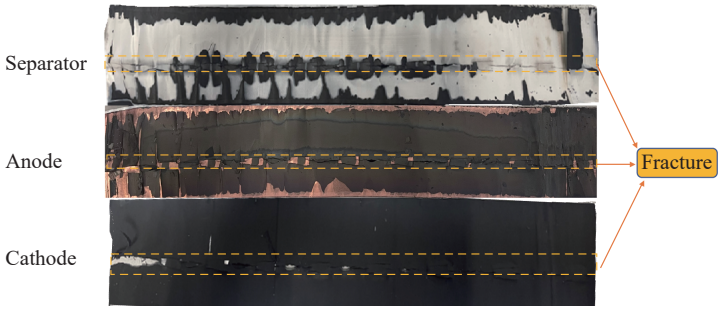
图 3 给出了第 1 组实验结果。可以看出，电池的力-电-热响应曲线可分为 4 个阶段。第Ⅰ阶段为密实化阶段（侵入量在 2.6 mm 以内），其特征是载荷缓慢上升，因为电池外壳与内芯以及内芯层与层之间存在间隙，在压缩过程中间隙缩小，发生了密实化。第Ⅰ阶段结束时，对电池进行拆解，发现内芯没有发生明显形变。第Ⅱ阶段为指数上升阶段（侵入量在 2.6～9.9 mm 区间），电池各组件的间隙被压实，载荷以指数形式快速上升至电池极限载荷 4.34 kN。第Ⅲ阶段为载荷下降阶段，侵入量为 9.9 mm 时载荷迅速下降至 1.82 kN，当极限载荷出现时，对电池进行拆解，发现载荷下降的主要原因是内芯各层发生断裂，电池完全失效。图 3(b)为电池失效时的拆解图像，可以看出，隔膜、正极和负极均断裂，且裂痕是沿着内芯卷绕方向的一条直线。第Ⅳ阶段为载荷上升阶段，此阶段电池内芯断裂部分已压实，内芯和钢外壳共同承受挤压载荷，载荷快速上升。

此外，对比图 3(a) 中力-电-热曲线可以看出，载荷下降、电压下降和温度上升几乎同时发生，电压下降主要是由于内芯各层发生断裂致使正负极接触发生内短路，温度上升主要是由于电池发生内短路产生焦耳热。电池局部压痕下，载荷下降、电压下降和温度升高有高度相关性，表明其机械和电化学性能存在密切联系。值得注意的是，图 3(a) 中温度仅上升至 55.6 ℃，主要是因为电池发生内短路后，不会立即发生热失控反应，热失控反应过程会随着时间而变化，在压头压缩至 13 mm 时，内短路仅发生了 13 s，此时未发生明显热失控现象。

针对这一现象，本研究详细分析了电池内短路后温度的变化规律。图 4(a) 为第 1 组电池表面最高温度随着时间的变化曲线，图 4(b) 为压痕后的电池形貌。可以看出，电池发生了剧烈的热失控现象，且压痕附近出现了大量灼烧痕迹。



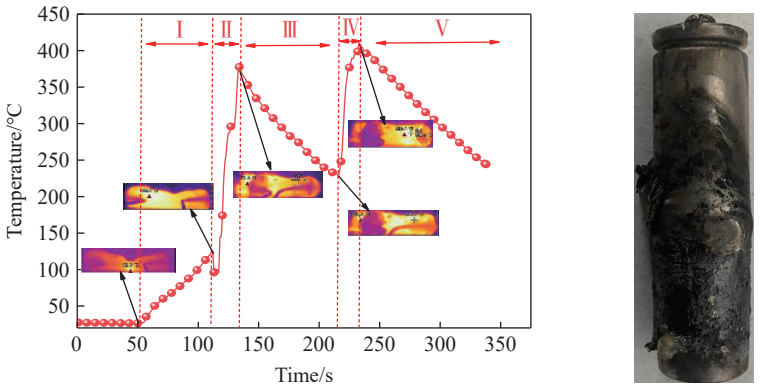
(a) Comparison of load/voltage/temperature-displacement curves



(b) Separator, anode and cathode results at load drop points

图 3　锂电池的压痕实验结果

Fig. 3　Experimental results of lithium battery under indentation



(a) Maximum temperature-time curve　　(b) After indentation

图 4　第 1 组实验测得的热失控过程

Fig. 4　Thermal runaway process of Exp. 1

根据电池失效后的温度变化特征，结合图 4(a) 中电池表面最高温度-时间变化曲线与图 5 所示的电池表面热成像图，将温度变化过程分为 5 个阶段。第Ⅰ阶段为温度缓慢上升阶段，由图 5 可知，50 s 时压痕位置所对应的电池底部最先短路，内短路产生焦耳热，热量从短路处向整个电池单体扩散，此阶段电池的最高温度上升了 100 ℃ 左右，且最高温度出现在压痕附近，达到 125.5 ℃，没有发生明显的热失控现象。第Ⅱ阶段为电池热失控发生阶段，此阶段发生在短路后 65 s 左右并持续 20 s，热量主要由热失控副反应产生，电池表面的最高温度上升了 252.1 ℃，达到 377.6 ℃，且最高温度出现在电池正极一侧，热量逐渐积累，从电池的正极安全阀持续喷出大量刺鼻性白烟，并伴随剧烈的爆炸声。第Ⅲ阶段为电池散热阶段，电池安全阀打开后，热量释放[18]，正极一端的温度从 365.7 ℃ 下降至 227.0 ℃。第Ⅳ阶段为温度再次上升阶段，经第Ⅲ阶段散热后，电池内部的热失控副反应并未完全结束，负极端的温度持续上

升，当负极端温度高于正极端温度时，电池表面最高温度出现在负极端，并且由于热失控反应，温度持续上升，文献 [19] 中也出现了类似的现象。第Ⅴ阶段为热失控反应结束阶段，此阶段电池的热失控反应完全结束，电池温度随着时间的增加呈下降趋势。

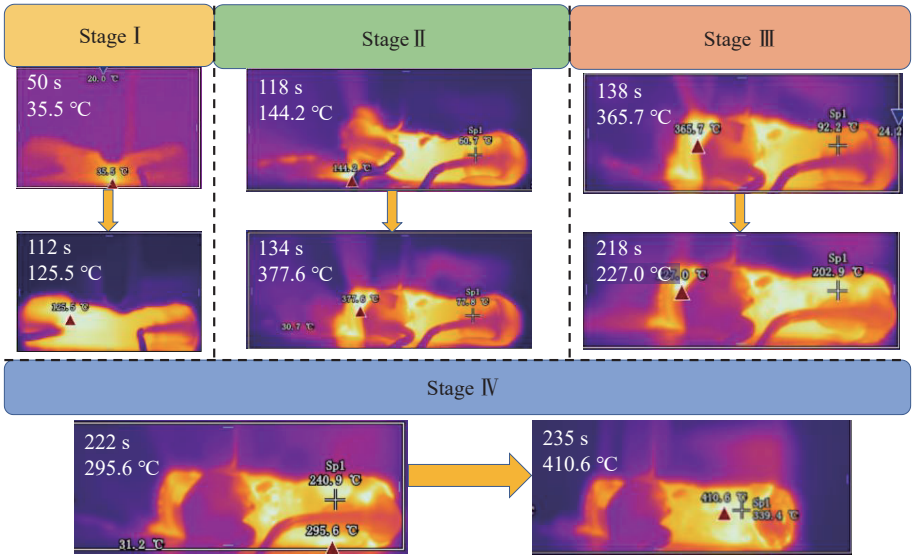


图 5　电池压痕滥用热成像图

Fig. 5　Thermograph of the battery under local indentation

2.2　SOC 和压头加载速度对锂电池安全性能的影响

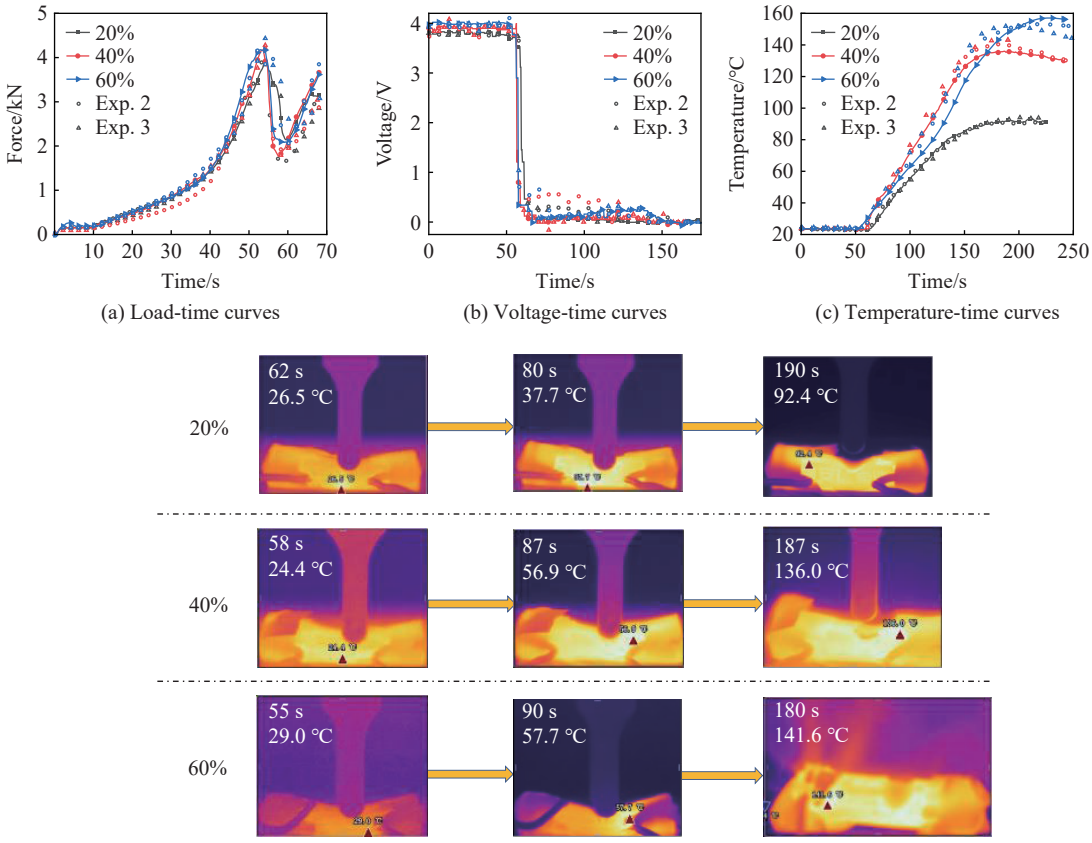
图 6 给出了第 2 组实验结果。对比分析发现，电池所承受的极限载荷和最高温度等参数与 SOC 存在密切联系，下面将分析 SOC 对电池安全性能的影响。

图 6(a) 为不同 SOC 下电池的载荷-时间曲线。在局部压痕下 SOC 对电池的机械性能有一定影响，电池的极限承载力随着 SOC 的增大而增大，SOC 为 60% 时的极限载荷比 SOC 为 20% 时的极限载荷高 7.3%，而 SOC 对载荷下降点的影响并不明显。上述行为的主要原因是锂离子的嵌入，在较高的 SOC 中负极颗粒层更加致密，导致电池承受载荷的能力增强[20]。

图 6(b) 为不同 SOC 下电池的电压-时间曲线。压降点能够直观地反映电池的内短路失效，本研究将压降点定义为电池的端电压发生骤降时的时间点。在压痕滥用下，电池 SOC 对其失效点有一定影响，随着 SOC 的增大，电压的下降点提前，电池更容易失效，但在本实验中 SOC 对电压下降点的影响不大。

图 6(c) 为不同 SOC 下电池的温度-时间曲线。电池 SOC 对温度有较大的影响，电池的最高温度随着 SOC 的增大而增大，当 SOC 为 60% 时，最高温度达到 157 ℃；当 SOC 为 20% 时，最高温度为 92 ℃。图 6(d) 为电池在不同 SOC 下的温度热成像演变图。当 SOC 为 20% 和 40% 时，并未出现明显的热失控现象（爆炸、白烟等）；当 SOC 为 60% 时，发生了明显的热失控现象，电池发出爆鸣声，正极安全阀喷出白色浓烟，温度急剧上升。

图 7 给出了第 3 组实验结果。图 7(a) 为电池在不同加载速度下的载荷-位移曲线。观察实验曲线可以发现，在变形量达到 9.6 mm 之前，载荷-位移曲线的重合度很高，但是电池所承受的极限载荷（F_{max}）会随着加载速度的增加而增大。当加载速度从 2 mm/min 提升到 20 mm/min 时，极限载荷提升了 35.6%。图 7(b) 为电池在不同加载速度下的电压-位移曲线。可以看出，加载速度越高，电池发生短路时对应的变形量越大。由于电池的结构刚度随着应变率的升高而增大，当加载速度较高时，电池所承受的极限载荷增加，而在短路之前电池所受的载荷曲线有较高的重合度，所以电池失效时对应的变形量变大，与文献 [18] 中电池在径向平面挤压下所得结论类似。图 7(c) 为电池在不同加载速度下的温度-时间曲线。可以看出，加载速度与电池温度也有一定的联系，加载速度越大，电池失效后达到的温度越高，电池内部反应越剧烈。

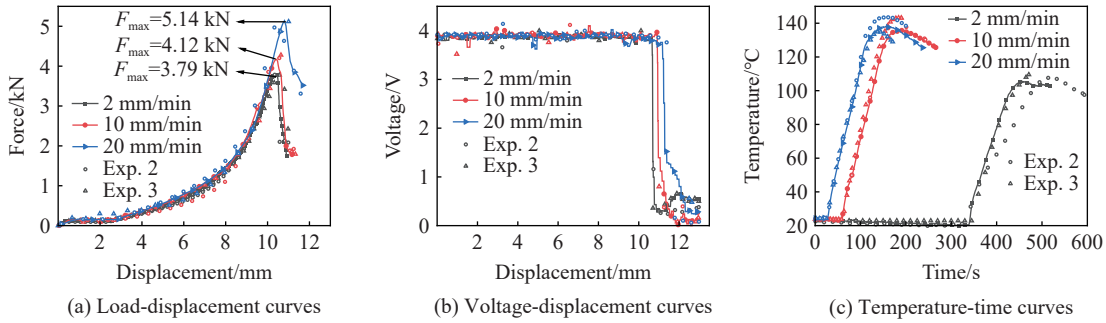


(a) Load-time curves　(b) Voltage-time curves　(c) Temperature-time curves

(d) Thermal images of the battery surface

图 6　不同 SOC 下电池的力-电-热响应

Fig. 6　Force-electric-thermal responses of the battery with different SOCs



(a) Load-displacement curves　(b) Voltage-displacement curves　(c) Temperature-time curves

图 7　不同加载速度下电池的力-电-热响应

Fig. 7　Force-electric-thermal responses of the battery under different loading velocities

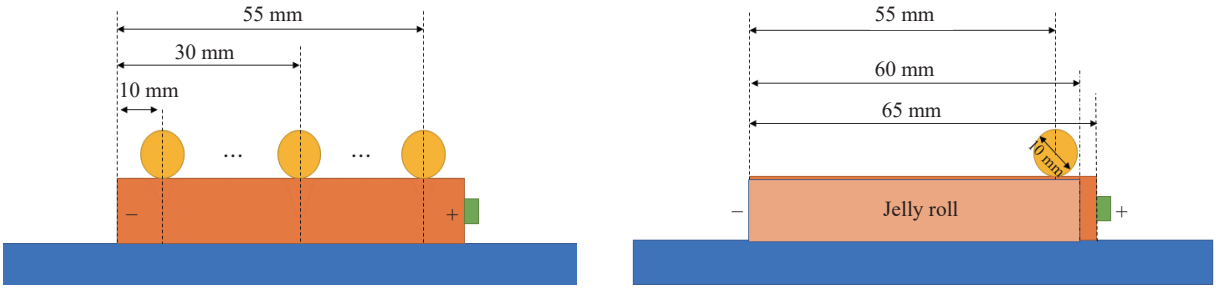
综上分析，SOC 和加载速度对锂电池力-电-热响应有一定的影响，但影响程度有所差异。其中，SOC 主要对电池的温度以及热失控反应的剧烈程度有较大影响，而对其力学响应的影响不大；加载速度对电池的极限载荷和压降点的大小有较大影响，与 SOC 相比，加载速度对热失控反应的影响有限。

2.3　压痕位置对锂电池安全性能的影响

为了探究不同压痕位置对锂电池安全性能的影响，设计了第 4 组测试实验。压痕位置距负极 10、20、30、45 和 55 mm，如图 8(a) 所示。图 9 给出了锂电池在不同压痕位置工况下的力-电-热响应。

图 9(a) 显示了锂电池在不同压痕位置工况下的力学响应。在加载前期，电池载荷曲线的重合度较高；加载 45 s(变形量 7.5 mm)之后，压痕位置将对力学响应产生较大的影响，压痕位置位于 10 和 55 mm 时的极限载荷远大于 30、20 和 45 mm 时的极限载荷，且压痕位置位于 20 和 45 mm 时的极限载荷大于

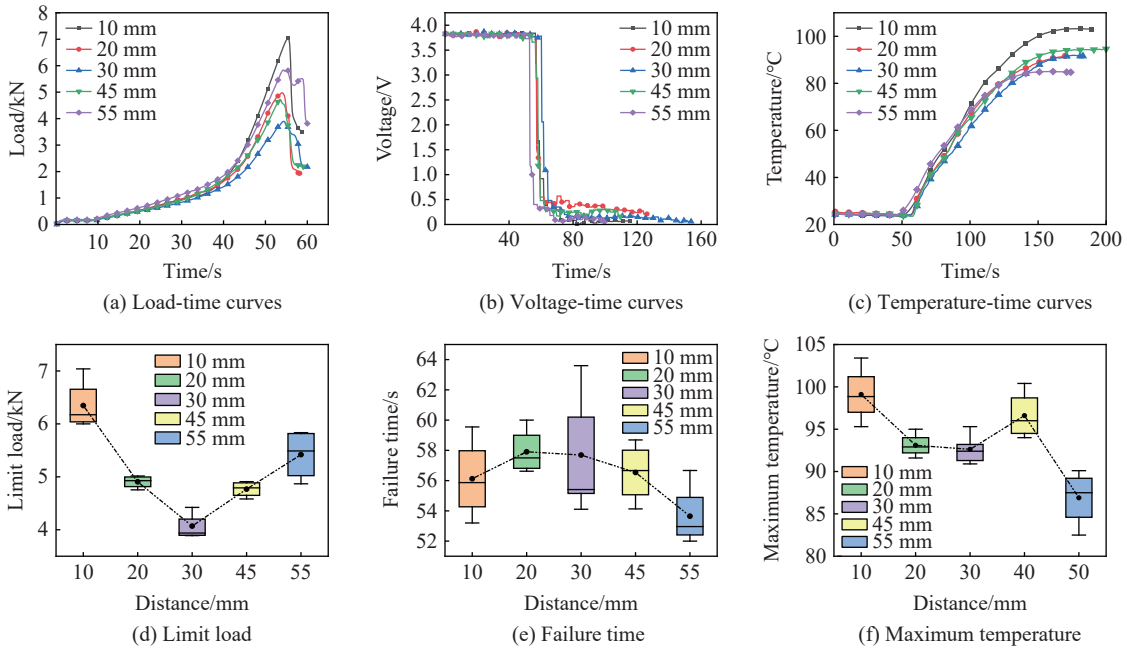
位于 30 mm 时的极限载荷，且压痕位置靠近电池两端时，载荷的上升斜率也较大。图 9(d) 为多组实验在不同压痕位置工况下的电池极限载荷箱线图，可以看出，压痕位置对电池极限载荷的影响具有明显的规律性，即压痕位置越接近电池轴向中心，极限载荷越小，反之，则极限载荷越大。



(a) Different indentation positions　　(b) 55 mm from the negative electrode

图 8　压痕位置示意图

Fig. 8　Schematic diagram of the indentation location



(a) Load-time curves　(b) Voltage-time curves　(c) Temperature-time curves

(d) Limit load　(e) Failure time　(f) Maximum temperature

图 9　不同压痕位置工况下锂电池的力-电-热响应

Fig. 9　Force-electric-thermal responses of the battery under different indentation locations

图 9(b) 显示了锂电池在不同压痕位置工况下的电学响应。当压痕位置处于 55 mm(距离正极 10 mm)时，电池最先短路失效；而压痕位置处于 30 mm 时，电池最晚发生短路失效。这主要是由电池内部结构决定的。如图 8(b) 所示，电池长度为 65 mm，内芯长度为 60 mm，由于内芯与电池负极端紧贴，所以内芯与正极端存在 5 mm 左右的间隙，压头半径为 5 mm，压头位置正好在内芯的顶端，而内芯顶端与正极一端存在间隙，导致在加载过程中产生有限的滑移和应力集中[12]，在相同的变形量下，局部应变更大，更容易导致隔膜失效，内短路的发生也会提前。同理，在相同的变形量下，压痕位置在电池正中间时，局部应变更小，内短路较晚发生。图 9(e) 为多组实验在不同压痕位置工况下电池失效时间点的分布箱线图，可见，压痕位置接近电池正极一端时更容易发生短路。

图 9(c) 显示了不同压痕位置工况下锂电池的温度特征。可以看出，压痕位置对电池温度产生了一定的影响。当压痕位置位于 10 mm 时，电池的最高温度达到 104 ℃；而压痕位置位于 55 mm 时，最高温度仅为 86 ℃。这主要是由于当压痕位置处于 55 mm 时，内芯可能发生滑移[12]，导致内部断裂程度较

小，内短路产生的热量较小。图 9(f) 为多组实验在不同压痕位置工况下的电池最高温度箱线图，由此验证了上述规律的正确性。当压痕位置距离电池正极端 10 mm 时，温度较低；而压痕位置接近负极端时，温度较高，容易引起热失控现象。图 10 为不同压痕位置工况下锂电池的热成像图。当 SOC 为 20% 时，压痕位置靠近负极时，电池表面温度最高，而压痕位置接近正极时，电池表面温度最低，且未发生热失控现象；当 SOC 为 40%，压痕位置距离负极 10 mm 时，引发了热失控现象，从正极安全阀喷出白烟，而图 6(d) 显示，压痕位置距离负极端 30 mm 时，并未发生明显的热失控。

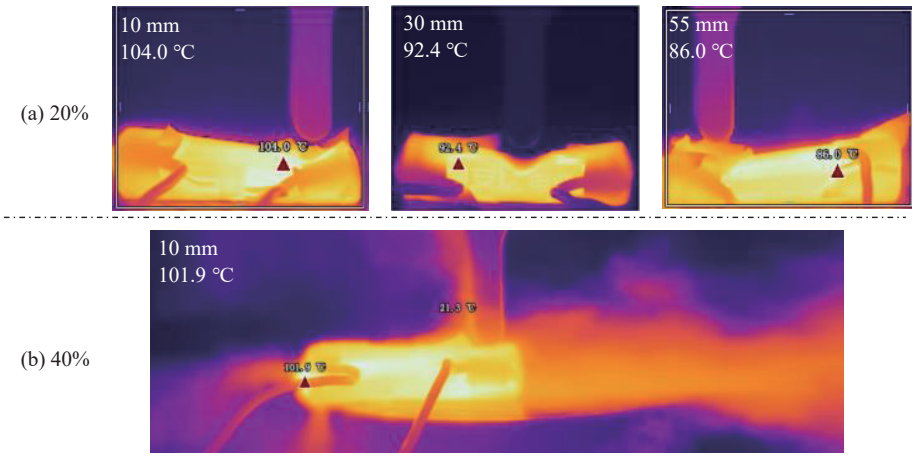


图 10　不同压痕位置工况下不同 SOC 的锂电池的热成像

Fig. 10　Thermal images of lithium battery with different SOCs under different indentation positions

2.4　压头尺寸对锂电池安全性能的影响

为了探究压头尺寸对锂电池安全性能的影响，设计了第 5 组实验，分别在 SOC 为 20%、40% 和 60% 的情况下采用压头半径分别为 5.0、7.5 和 10.0 mm 的 3 种压头进行压痕实验，压痕位置距负极 30 mm 不变，加载速度设置为 10 mm/min。图 11 显示了第 5 组实验中 SOC 为 20% 时的力-电-热响应结果。可见，压头尺寸对锂电池的力-电-热响应具有一定的影响，下面将详细分析压头尺寸对锂电池安全性能的影响。

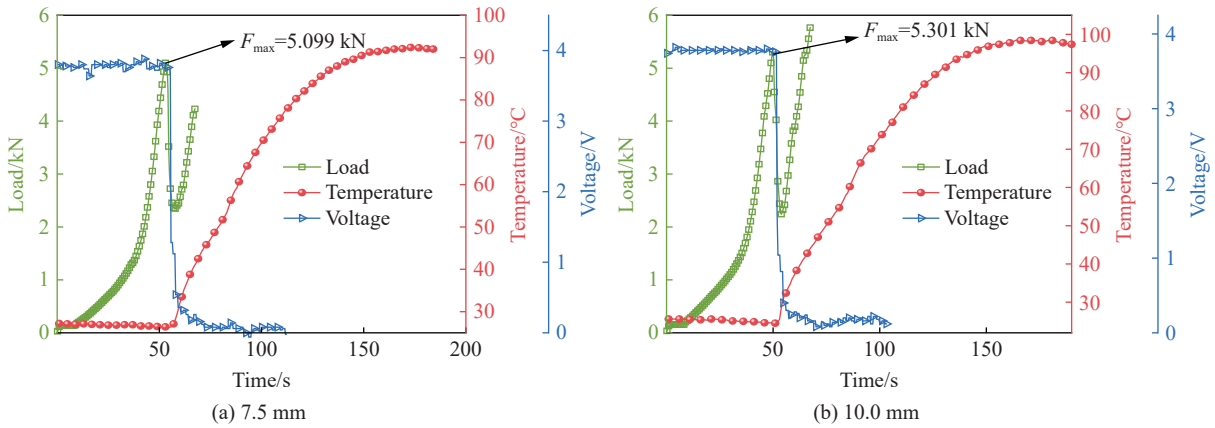


图 11　第 5 组实验测得的力-电-热响应

Fig. 11　Force-electric-thermal responses of Exp. 5

图 12(a) 给出了 SOC 为 20%、40% 和 60% 时不同压头尺寸工况下锂电池的极限载荷箱线图。实验结果表明，电池极限载荷随着压头尺寸的增大而增大，且在不同 SOC 下均表现出一致性。在 SOC 为 20% 的工况下，当压头半径为 5.0 mm 时，电池平均极限载荷为 4.069 kN，压头半径为 10.0 mm 时，电池平均极限载荷为 6.482 kN，提升了 59.3%；类似地，当 SOC 为40% 时，电池平均极限载荷提升了 53.4%，

当 SOC 为 60% 时，电池平均极限载荷提升了 52.9%。其中，SOC 和压头尺寸对电池极限载荷的耦合影响中，压头尺寸占主导地位。从机理上分析，SOC 导致极限载荷升高的原因是较高 SOC 中负极颗粒层更加致密，致使电池承受载荷的能力增强，而压头尺寸导致极限载荷升高的原因是直接改变压头与电池的接触面积，与接触面积相比，载荷受负极颗粒层致密性的影响较小。

图 12(b) 给出了 SOC 为 20%、40% 和 60% 时不同压头尺寸工况下锂电池的失效时间点。实验结果表明，压头尺寸对电池的压降点/失效时间点的影响有限。在多次重复实验中，电池的平均压降点随着压头尺寸的增加而增大。电池的压降点随压头尺寸呈规律性变化的主要原因是，在相同的变形下，尺寸较小的压头与电池接触的面积较小，更易发生应力集中[21]，导致隔膜更易失效，进而引起电池内短路。

本实验中由于压头尺寸较为接近，压头与电池的接触面积相差不大，导致 3 种压头下电池失效时间较为接近，实验数据呈现的规律性并不明显。为了进一步证明上述分析，设置了 5 组径向平面压缩实验，设置电池的 SOC 为 20%，压头加载速度为 10 mm/min。图 12(c) 为局部压痕与径向平面压缩短路失效点对比，平面压缩时的平均压降点比压头半径为 5.0 mm 的局部压痕时增大了 7.8 s。

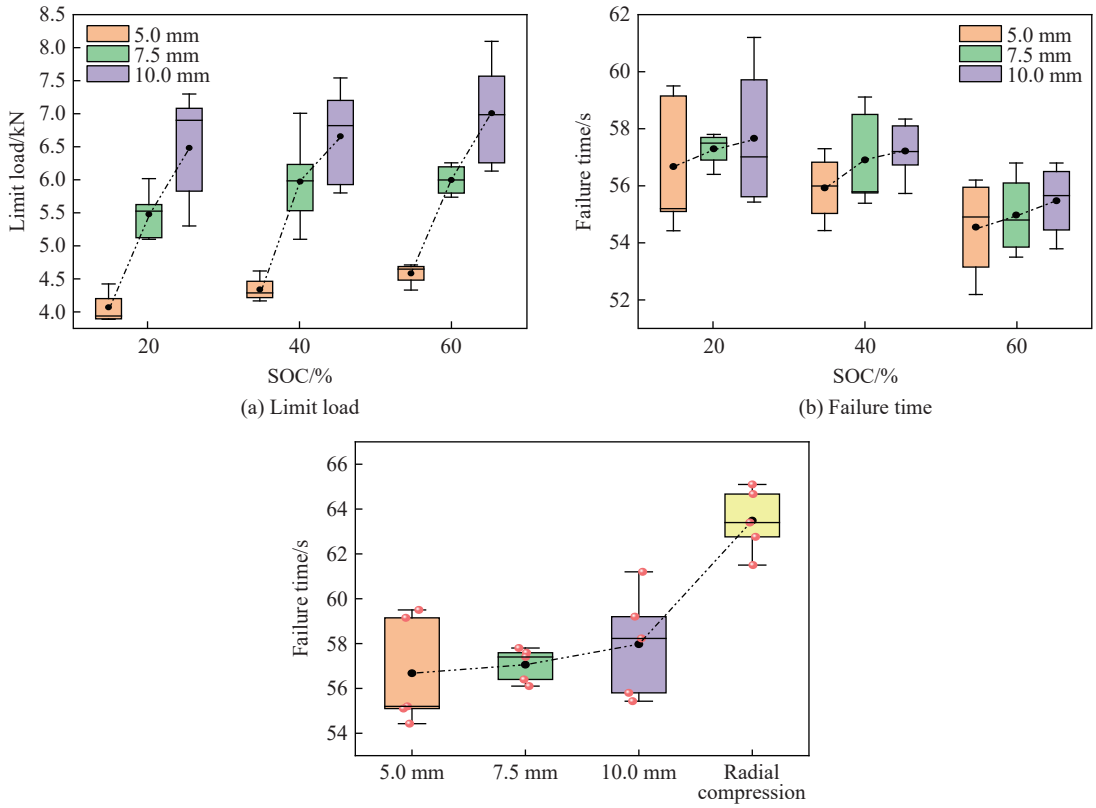


图 12　不同压头半径和 SOC 下锂电池的力-电响应特征

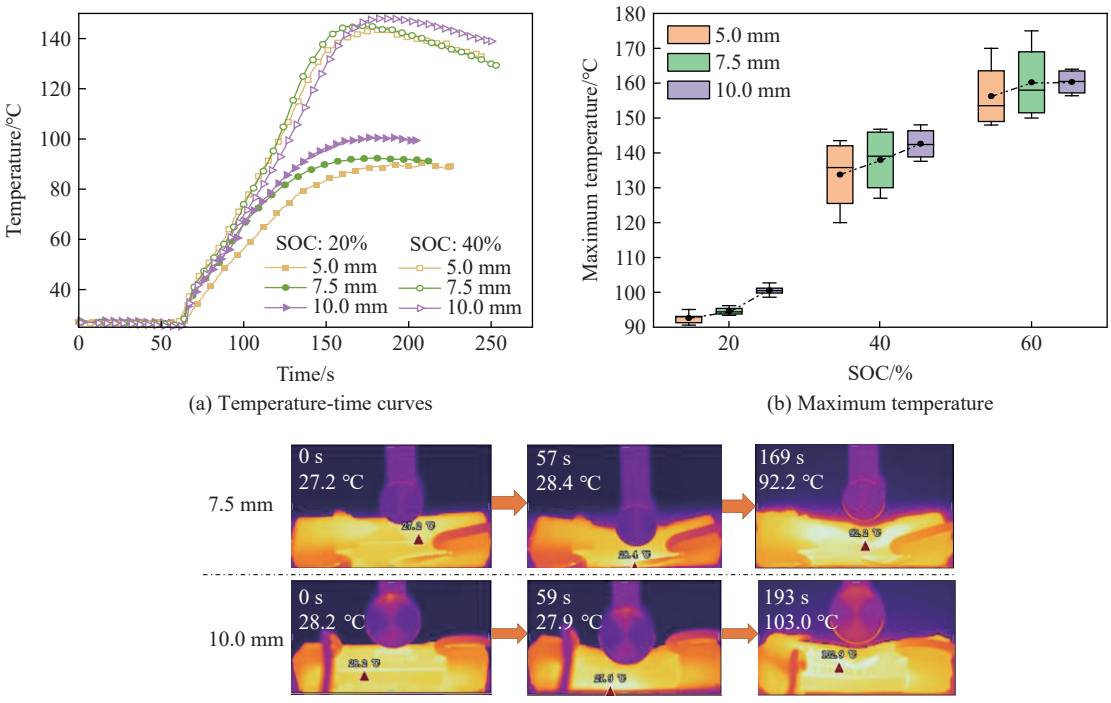
Fig. 12　Force-electric response characteristics of batteries with different SOCs under different indenter radii conditions

从平面压缩的失效机理来看：当电池被整体挤压时，电池内部的正负极材料扭曲变形，电池整体受力均匀，且隔膜具有延展性，被挤压后不易断裂，最终的电池失效是内部材料损伤不断累积而引发的内部短路失效；而局部压痕下，压头与电池表面的接触面积小，电极材料和隔膜更容易发生应力集中，从而发生断裂破坏，电压也更早下降到零。这进一步印证了影响电池失效时间点的主要原因是压头与电池的接触面积不同，文献 [22] 通过仿真分析也得出了相同的规律。

图 13 显示了电池在不同压头半径和 SOC 下的温度特征。图 13(a) 给出了 SOC 为 20% 和 40% 时不同压头半径工况下的电池温度-时间曲线。在相同的 SOC 下，电池温度随着压头半径的增大而升高。对于 SOC 为 20% 的电池，当压头半径为 5.0 mm 时，电池的最高温度为 92 ℃，当压头半径为 10.0 mm

时，电池的最高温度达到 103 ℃，主要是由于压头与电池的接触面积增大，致使内短路区域增大，最终导致电池温度升高。

图 13(b) 为不同压头半径下多组实验得到的电池最高温度箱线图。在相同的 SOC 下，电池的平均最高温度随着压头半径的增大而升高。SOC 为 20% 时不同压头尺寸工况下电池的热成像如图 13(c) 所示。可以看到：当压头半径为 7.5 mm 时，57 s 时电池局部温度升高，发生内短路，169 s 时电池温度达到最大值；当压头半径为 10.0 mm 时，59 s 时电池内短路，193 s 时达到最高温度，电池达到最高温度所需时间随着压头半径的增大而增加。SOC 和压头半径对电池温度的耦合影响中，SOC 占主导作用，而压头尺寸的影响非常有限。从机理分析来看，SOC 越高，正负极材料的反应活性越高，从而引发更剧烈的热失控副反应，导致温度升高；压头尺寸越大，压头与电池的接触面积越大，短路区域增加，进而使温度升高，与正负极材料的活性相比，短路区域面积对温度的影响较小。



(a) Temperature-time curves　　(b) Maximum temperature

(c) Thermal images of batteries with the SOC of 20% under different indenter radii conditions

图 13　不同压头半径和 SOC 下锂电池的温度特征

Fig. 13　Temperature characteristics of lithium batteries with different SOCs under different indenter radii conditions

综合上述分析，压头尺寸对电池力-电-热响应影响的主要原因是压头与电池之间接触面积的变化。压头尺寸对电池的力学响应有较大影响，压头半径增加 5.0 mm，电池的平均极限载荷增加 50%～60%；压头尺寸对电池的电-热响应影响不大，压头半径增加 5.0 mm，电池的平均失效时间仅增加 1～2 s，平均最高温度增加 6～10 ℃。在 SOC 和压头尺寸对电池力-热-电响应的耦合作用中，电池的力学响应主要取决于压头尺寸，而 SOC 的影响较小；电池的温度响应主要取决于 SOC，压头半径对温度的影响非常有限。

3　结　论

通过搭建的锂电池机械滥用实验装置，对圆柱形 18650 锂电池在局部压痕下的热失控行为进行了研究，分析了锂电池的失效过程及热失控演变规律，重点讨论了在局部压痕下不同控制因素对锂电池安全性能的影响，得到如下结论。

(1) 电池承受载荷下降、电压下降和温度上升的同时发生可作为判断局部压痕下电池是否失效的依据；电池失效后，并不会立即发生热失控，存在一定的反应时间，短路失效后表现出明显的热失控演

变规律，可为电池热失控预警系统的设计提供重要的参考价值。

(2) 在局部压痕工况下，电池热失控反应的剧烈程度主要随着 SOC 的增加而增加，而加载速度主要决定电池的失效时间和极限载荷，加载速度越高，电池越快短路失效，并且与其他参数相比，SOC 是决定热失控反应剧烈程度的关键因素，SOC 和加载速度可作为热失控预警算法设计的重要指标。

(3) 圆柱形锂电池靠近负极一端受到机械损伤时更易发生热失控等安全事故，并且电池受到机械损伤的面积较大时温度会更高，在实际电池包的防碰撞设计中，应避免电池受到大面积机械损伤和负极一端的碰撞。

本研究所采用的实验方法和实验平台可为锂电池安全性测试提供参考，所获得的结果和提出的建议可为锂电池包的结构设计和热失控预警系统等相关安全设计提供有益的参考。

参考文献：

[1] LAI X, JIN C Y, YI W, et al. Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: recent advances and perspectives [J]. Energy Storage Materials, 2021, 35: 470–499.

[2] PARLIKAR A, TRUONG C N, JOSSEN A, et al. The carbon footprint of island grids with lithium-ion battery systems: an analysis based on levelized emissions of energy supply [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 149: 111353.

[3] HUANG L W, ZHANG Z S, WANG Z P, et al. Thermal runaway behavior during overcharge for large-format lithium-ion batteries with different packaging patterns [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100811.

[4] FENG X N, OUYANG M G, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review [J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246–267.

[5] HUANG W S, FENG X N, HAN X B, et al. Questions and answers relating to lithium-ion battery safety issues [J]. Cell Reports Physical Science, 2021, 2(1): 100285.

[6] 李红刚, 张超, 曹俊超, 等. 锂离子电池碰撞安全仿真方法的研究进展与展望 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 121–144.
LI H G, ZHANG C, CAO J C, et al. Advances and perspectives on modeling methods for collision safety of lithium-ion batteries [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 121–144.

[7] ZHOU D, LI H G, LI Z H, et al. Toward the performance evolution of lithium-ion battery upon impact loading [J]. Electrochimica Acta, 2022, 432: 141192.

[8] LI H G, ZHOU D, CAO J C, et al. On the damage and performance degradation of multifunctional sandwich structure embedded with lithium-ion batteries under impact loading [J]. Journal of Power Sources, 2023, 581: 233509.

[9] 郝鑫, 杜建华, 梁浩斌, 等. 锂离子电池冲击挤压后安全特性研究综述 [J]. 消防科学与技术, 2021, 40(7): 963–967.
HAO X, DU J H, LIANG H B, et al. A review of the safety characteristics of lithium-ion batteries after impact extrusion [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(7): 963–967.

[10] 刘首彤, 黄沛丰, 白中浩. 锂离子电池机械滥用失效机理及仿真模型研究进展 [J]. 汽车工程, 2022, 44(4): 465–475.
LIU S T, HUANG P F, BAI Z H. A review on research progress in failure mechanism and simulation model of li-ion battery related to mechanical abuse [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(4): 465–475.

[11] LIU B H, DUAN X D, YUAN C H, et al. Quantifying and modeling of stress-driven short-circuits in lithium-ion batteries in electrified vehicles [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(11): 7102–7113.

[12] YUAN C H, GAO X, WONG H K, et al. A multiphysics computational framework for cylindrical battery behavior upon mechanical loading based on LS-DYNA [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(6): A1160.

[13] ZHU X Q, 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.

[14] 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.
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.

[15] VOYIADJIS G Z, AKBARI E, ŁUCZAK B, et al. Towards determining an engineering stress-strain curve and damage of the

cylindrical lithium-ion battery using the cylindrical indentation test [J]. Batteries, 2023, 9(4): 233.

[16] LI H G, ZHOU D, ZHANG M H, et al. Multi-field interpretation of internal short circuit and thermal runaway behavior for lithium-ion batteries under mechanical abuse [J]. Energy, 2023, 263: 126027.

[17] LI H G, ZHOU D, DU C L, et al. Parametric study on the safety behavior of mechanically induced short circuit for lithium-ion pouch batteries [J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2021, 18(2): 020904.

[18] 范文杰, 薛鹏程, 王根伟, 等. 压缩载荷作用下锂离子电池的安全性能 [J]. 高压物理学报, 2019, 33(6): 065901.
FAN W J, XUE P C, WANG G W, et al. Safety performance of power lithium ion battery under compressive load [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6): 065901.

[19] WANG Q S, MAO B B, STOLIAROV S I, et al. A review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73: 95–131.

[20] PAN Z X, SEDLATSCHEK T, XIA Y. Effect of state-of-charge and air exposure on tensile mechanical properties of lithium-ion battery electrodes [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2020, 167(9): 090517.

[21] DUAN X D, WANG H C, JIA Y K, et al. A multiphysics understanding of internal short circuit mechanisms in lithium-ion batteries upon mechanical stress abuse [J]. Energy Storage Materials, 2022, 45: 667–679.

[22] LI H G, LIU B H, ZHOU D, et al. Coupled mechanical-electrochemical-thermal study on the short-circuit mechanism of lithium-ion batteries under mechanical abuse [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(12): 120501.

Experimental Study on the Safety Performance of Cylindrical Lithium-Ion Batteries under Local Indentation

LI Jie[1], ZHANG Yunlong[2], YUAN Boxing[2], TANG Yuanhui[3], HE Yongquan[3]

（1. *School of Energy and Electrical Engineering*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *Shaanxi*, *China*;
2. *School of Electronics and Control Engineering*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *Shaanxi*, *China*;
3. *Shaanxi Institute of Metrology Science*, *Xi'an* 710199, *Shaanxi*, *China*）

Abstract: Local compression of lithium-ion battery (LIB) is the primary form of damage during automotive collisions. In order to investigate the safety performance of 18650 LIBs under local indentation, a custom-made mechanical abuse experimental platform was used to conduct local indentation experiments. The failure mechanism was analyzed through progressive compression, and the failure process and thermal runaway evolution rules were obtained. The effects of the state of charge (SOC), loading velocity, indentation position and indenter size on the safety performance of LIBs were also discussed. The results show that the batteries exhibit a clear thermal runaway pattern under local indentation, and this phenomenon will not occur immediately after the failure, there is a certain reaction time. The SOC is positively correlated with the intensity of thermal runaway, and the failure time of the battery depends on the loading velocity. Moreover, thermal runaway is more likely to occur when the negative electrode end of the battery is damaged, and the temperature is higher when the damaged area is larger. Finally, based on the experimental results, some useful suggestions for the safety design of the battery packs were provided.

Keywords: lithium-ion batteries; local indentation; failure mechanism; thermal runaway; safety performance