

# 高压物理学报

## 压缩载荷作用下锂离子电池的安全性能

范文杰 薛鹏程 王根伟 王彬

### Safety Performance of Power Lithium Ion Battery under Compressive Load

FAN Wenjie, XUE Pengcheng, WANG Genwei, WANG Bin

引用本文:

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):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20190752

FAN Wenjie, XUE Pengcheng, WANG Genwei, et al. Safety Performance of Power Lithium Ion Battery under Compressive Load[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20190752

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190752>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 球形孔开孔泡沫铝的力学特性及准静态压缩变形机制

Mechanical Characteristics and Quasi-Static Compression Deformation Mechanism of Open-Cell Aluminum Foam with Spherical Cells

高压物理学报. 2019, 33(1): 014201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180532>

#### 闭孔泡沫铝准静态压剪性能研究

Mechanical Behaviors of Closed-Cell Aluminum Foams under Quasi-Static Compression-Shear Loads

高压物理学报. 2018, 32(3): 034101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170655>

#### 考虑温度效应的泡沫铝准静态压缩本构模型

Constitutive Model of Aluminum Foams Considering Temperature Effect under Quasi-Static Compression

高压物理学报. 2018, 32(4): 044103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170642>

#### 组合装药的撞击安全性与内爆威力试验研究

Experimental Study on Impact Safety and Implosion Energy Release Characteristics of Composed Charge

高压物理学报. 2019, 33(4): 045201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190735>

#### 压剪载荷作用下TB6钛合金的动态力学性能

Dynamic Behavior of TB6 Titanium Alloy under Shear-Compression Loading

高压物理学报. 2019, 33(2): 024206 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190713>

#### 泄压口大小对约束空间爆炸准静态超压载荷的影响规律

Effects of Size of Venting Holes on the Characteristics of Quasi-Static Overpressure in Confined Space

高压物理学报. 2017, 31(5): 619 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.016>

# 压缩载荷作用下锂离子电池的安全性能

范文杰<sup>1</sup>, 薛鹏程<sup>1</sup>, 王根伟<sup>1,2</sup>, 王 彬<sup>1,3</sup>

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院, 应用力学研究所, 山西 太原 030024;

2. 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 布鲁内尔大学物理科学、设计与机械学院, 英国 伦敦 UB83PH)

**摘要:**动力电池的安全性是制约电动汽车快速发展的重要因素之一。以圆柱形 18650 动力锂离子电池为研究对象, 分别从径向和轴向对不同荷电状态的单体电池进行压缩加载实验, 研究了锂离子电池在载荷作用过程中的力学响应、电压变化、温度变化以及失效破坏模式。结果表明: 荷电状态、加载速度以及加载方向的不同都会对锂离子电池的安全性能产生一定的影响。电池在发生较大变形时会出现电解液泄漏和瞬间短路现象, 短路后电池的温度在短时间内会急剧升高。在径向压缩实验中, 当荷电状态较高、加载速度较快时, 电池在发生变形后会出现爆炸喷火等剧烈的热失控现象。研究锂离子电池在受到外载荷作用时的机械完整性对汽车的安全性设计具有十分重要的意义。

**关键词:**锂离子电池; 准静态压缩; 机械完整性; 热失控; 荷电状态

**中图分类号:** O348.3

**文献标识码:** A

随着地球能源濒临枯竭以及生态环境的不断恶化, 电动汽车成为社会未来发展的一个重要选择。法国、挪威、德国等发达国家已经先后制定了传统燃油车禁售时间表<sup>[1]</sup>; 中国也将发展电动汽车作为减少能源依赖和缓解环境污染的一项重要措施, 当前中国电动汽车的销量一直保持高速增长。据中国汽车工业协会统计, 2018 年中国纯电动汽车销量达到 98.6 万辆, 比上年同期增长了 61.7%。锂离子电池因具有能量密度高、循环寿命长、自放电率低以及无记忆效应等优势成为众多电动汽车储能系统的首选。但是由于其制作工艺以及电极材料的限制, 电池在使用过程中受到机械载荷作用发生变形时可能会引发短路失效<sup>[2-7]</sup>。特别是汽车在出现重大交通事故的情况下, 电池组在发生内短路后极易引发连锁反应, 严重时甚至会导致起火燃烧, 燃烧过程中伴随有毒气体的释放, 使得事故救援工作的难度更大<sup>[8]</sup>。近年来, 电动汽车发生交通事故后电池爆炸起火的事件不断见诸媒体。以特斯拉为例, 这款技术领先、销售火爆的电动汽车自 2013 年以来已经发生了 10 起以上因为碰撞导致的整车起火燃烧事故。随着电动汽车的大面积推广, 电动汽车的安全事故也越来越多。总结众多起火燃烧事故的原因可以发现, 绝大多数事故是由电池结构发生破坏失效引起的。因此, 通过了解锂离子电池的结构组成及充放电机理, 研究其在载荷作用下的机械完整性以及在发生较大变形后电池可能出现的性能失效以及热失控对于电动汽车的安全而言至关重要。

为了测试锂离子电池的安全性能, 国际电工委员会(IEC)、国际标准化组织(ISO)等有关组织相继制定了锂离子电池安全测试标准, 中国政府也出台了相关的检测标准来规范动力电池市场<sup>[9]</sup>。常见的锂离子电池安全测试项目主要包括热、电、机械和极端环境适应性等<sup>[10]</sup>。其中, 机械测试是指检测电

\* 收稿日期: 2019-03-30; 修回日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(11872265); 山西省青年科技研究基金(201701D221142)

作者简介: 范文杰(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事动力电池在机械滥用下安全性能研究。

E-mail: 852591416@qq.com

通信作者: 王根伟(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事新能源汽车安全与轻量化研究。

E-mail: gwang@tyut.edu.cn

池在受到外载荷作用时其结构发生较大变形,从而导致内部组件破坏和材料失效,包括隔膜破裂或阴阳极材料脱落等,容易引发电池内部短路、温度变化等一系列的安全性问题<sup>[2]</sup>。

锂离子电池的机械测试最早始于手机电池,美国麻省理工学院的 Sahraei 等<sup>[11]</sup>首先对小容量的软包锂离子电池进行了准静态平面压缩、球形压痕、三点弯曲等力学实验,研究了不同状态下锂离子电池的力学性能。随后, Sahraei 等<sup>[4]</sup>又对 18650 圆柱形单体电池做了大量的压缩加载实验,并建立了 18650 圆柱形单体电池电芯的本构方程和均质化有限元模型。Xu 等<sup>[12]</sup>考虑了 18650 锂离子电池在径向压缩过程中的应变率效应以及荷电状态对电池性能的影响,建立了考虑应变率和荷电状态耦合的电池模型;在此基础上, Xu 等<sup>[13]</sup>又对 3 种不同类型的 18650 锂离子电池进行加载实验,研究了荷电状态和健康状态耦合效应对锂离子电池在机械滥用下电化学失效的影响; Liu 等<sup>[14]</sup>采用实验与仿真分析相结合的方式,研究了不同荷电状态电池在压痕实验中电压、温度、载荷三者对应的变化关系,并描述了短路后电池发生的复杂电化学反应; Wang 等<sup>[15]</sup>在实验的基础之上,通过数值模拟的方式建立了电池的计算模型,该模型可以较好地描述电池的变形和短路,并根据隔膜失效建立了电池发生短路的判据; Zhu 等<sup>[16]</sup>对 18650 锂离子单体电池在轴向压缩下的安全性能进行了研究,发现轴向压缩实验中电池在变形量达到 4 mm 时会发生短路。除了对锂离子单体电池的宏观性能进行研究外,一些学者还从微观层面对电池可能引起的短路问题进行了研究。Zhang 等<sup>[17-18]</sup>通过拆解电池并对电池的外壳、隔膜进行拉伸加载,研究电池壳体和隔膜的力学性能; Wang 等<sup>[19]</sup>研究了电极材料以及集流体等的力学特性,分析荷电状态对电极大学性能的影响,最后建立了考虑应变率和各向异性效应的电极本构模型。由于不同厂商生产的电池存在差异、电池的工作状态以及受到挤压后的破坏情况不同等,电池在发生变形之后的安全性研究仍然存在破坏机理不清晰、破坏现象可重复性差等问题。

本研究以商用镍钴锰酸锂(Nickel Cobalt Manganese, NCM) 18650 单体锂离子电池为研究对象,通过对圆柱形电池进行径向和轴向压缩实验,研究电池在受到不同工况载荷作用后的力学响应以及安全性能变化。实验中采集了不同荷电状态(State-of-Charge, SOC)的电池在准静态压缩过程中的载荷、温度和电压数据,结合观察到的实验现象,对诱发电池热失控的原因进行分析,根据实验结果总结压缩条件下荷电状态和加载速度变化对电池安全性能的影响。

## 1 电池的径向压缩实验

选用试件为国产商用 18650 单体锂离子电池。电池电芯按照隔膜→正极→隔膜→负极的顺序排列卷绕而成,为了提高安全性能,电池内部还配有安全阀、PTC 等元件。其中,隔膜起到隔离正负极的作用,能够避免正负极的直接接触。电芯的最外层是不锈钢材料制成的壳体,对电芯起到保护的作用。

实验加载设备为国产万测电子万能试验机,型号为 ETM 105D,量程 50~100 kN,如图 1 所示;通过数字存储示波器记录加载过程中电压的变化,示波器型号为 Tektronix TBS 1064,带宽 60 MHz,采样频率 1 GHz;通过 Yoseex X 系列红外热像仪测量温度,型号 X640A600MF25,测温范围-20~600 °C,测温精度为±2 °C(或±2%),如图 2 所示。

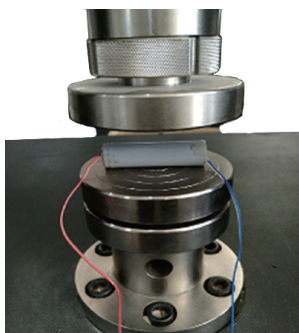


图 1 万能试验机

Fig. 1 Universal testing machine



图 2 红外热像仪

Fig. 2 Infrared thermal camera



### 1.1 不同荷电状态电池的压缩实验

实验选取 20%、40%、60% 和 80% 共 4 种不同荷电状态的锂离子单体电池, 以恒定速度 2 mm/min 对其进行加载。图 3 是不同荷电状态的锂离子电池在加载过程中的载荷-变形曲线。可以看出, 荷电状态对电池的承载能力有一定影响。电池的极限载荷随着荷电状态的增大而增大, 荷电状态为 80% 的锂离子电池比荷电状态为 20% 的锂离子电池的极限载荷提高了 10% 左右。由文献 [20] 可知, 这是因为在充电过程中源源不断的锂离子从正极分离出来嵌入石墨负极的孔隙中, 对于正极来说, 锂离子的缺失只是造成电位的变化, 正极结构并未受到太大影响, 而对负极而言, 锂离子嵌入石墨孔隙中会造成负极结构膨胀, 使得电池的承载能力增强。

电池在压缩过程中结构完整性遭到破坏, 伴有电解液流出。加载后期电池温度在短时间内迅速升高, 并伴有刺激性气体排出, 这是由于电池在压缩过程中内部隔膜发生破裂, 使得正负极直接接触导致内部短路。更严重的是, 在实验过程中发现当电池荷电状态达到 60% 时, 电池在径向压缩过程中还会出现爆鸣现象。图 4 是对荷电状态为 20% 的电池压缩后进行切割得到的剖面图, 可以看到, 锂离子电池结构发生了剪切破坏, 并且极耳处出现明显的分层现象。

图 5 是 4 种不同荷电状态的电池在径向压缩过程中电压与变形量的对应关系。4 条曲线表现出相似的下陷趋势。电池在压缩到一定变形量后电压发生突降并趋近于零, 说明电池内部发生了短路失效。对比曲线还发现, 荷电状态越高, 电池发生短路时所对应的变形量越小。以电压突降作为电池发生破坏的依据, 说明电池在受到外力挤压发生变形时, 高荷电状态的电池更容易发生失效破坏。

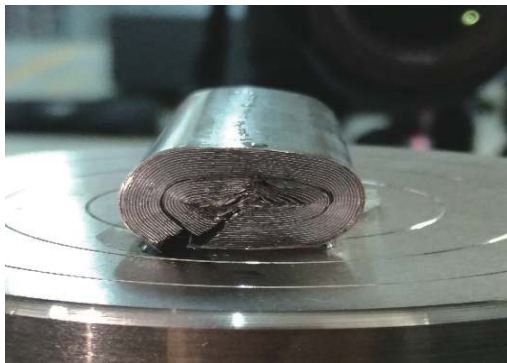


图 4 压缩后锂离子电池的横截面

Fig. 4 Cross section of the deformed lithium ion battery

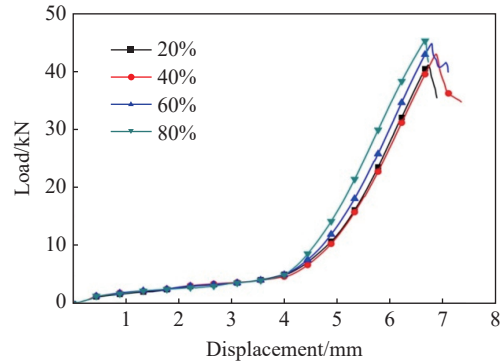


图 3 不同荷电状态电池载荷-变形曲线

Fig. 3 Load-deformation curves of different SOC batteries

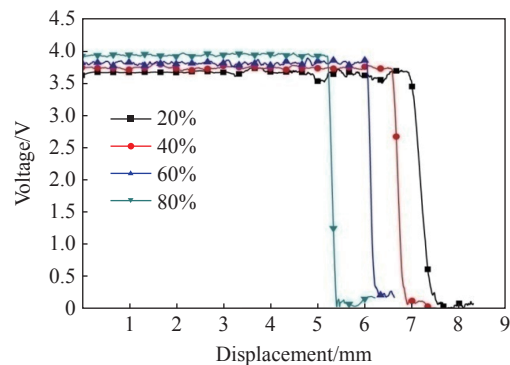


图 5 不同荷电状态电池电压-变形曲线

Fig. 5 Voltage-deformation curves of different SOC batteries

### 1.2 不同加载速度下的径向压缩实验

考虑到加载速度可能会对电池安全性产生一定的影响, 在径向分别采用 2、4 和 8 mm/min (名义应变率分别为 1.85、3.70 和 7.40  $\text{ms}^{-1}$ ) 的速度进行加载, 研究不同速度加载时动力锂离子电池的力学性能以及安全性能。

图 6 是用不同加载速度压缩锂离子电池后得到的载荷-变形曲线。观察实验曲线可以发现, 载荷在变形前期增长较慢, 当变形达到 4.5 mm 左右时载荷的增长速度加快。这是因为电池的外壳与电芯之间以及电芯内部层与层之间存在空隙, 在压缩过程中发生了渐进的密实化, 所以载荷增长缓慢; 当电池内部结构完全密实化后, 载荷上升速度明显加快。在加载前期曲线的重合度比较高, 从载荷缓慢增

加到载荷急速上升之间存在一个拐点。在这个拐点处3种加载速度下的载荷大小几乎相等。对比不同加载速度下的曲线变化,发现电池的极限承载能力随着加载速度的增大而增大,加载速度从2 mm/min增加到8 mm/min时,极限承载能力提高了近26%;此外,电池可承受的极限载荷越大,电池达到极限载荷时所对应的变形量也越大。

图7是不同速度加载相同荷电状态的锂离子单体电池后得到的电压与变形量的对应关系。对比图中曲线可以看出,加载速度越高,电池发生短路失效时对应的变形量越大。在实验过程中发现,荷电状态分别为20%、40%和60%时,电池受到压缩后只是表面温度升高,均未发生爆炸等剧烈热失控现象。对于荷电状态为80%的动力电池,当加载速度达到8 mm/min时,在压缩过程中电池会出现剧烈热失控,试件发生了爆炸喷火现象。温度监测发现,当荷电状态较高且加载速度较快时,电池变形达到一定程度后,电池温度会在短时间内迅速升高,电解液汽化后电池内部压强迅速增大,当压强超过壳体所能承受的强度时,电池结构开始发生破坏。首先是负极一端被炸开,

出现喷火现象,并在很短时间内将整个电池完全引燃,电池内部的能量从负极一端喷射出来。图8是荷电状态为80%时,3种加载速度下电池失效后的表面温度分布,其中图8(c)是电池发生热失控喷完火后的表面温度,内部能量虽然已释放,但电池最高温度仍然达到近270℃。此外,为了研究电池发生热失控时的临界加载速度,先分别以7和6 mm/min的加载速度对荷电状态为80%的电池进行压缩,试件均发生了喷火等剧烈热失控现象,随后以5 mm/min的速度对电池进行压缩加载,发现电池只是出现了轻微的爆鸣声,并未爆炸。考虑到不同电池的能量密度存在微小差异,对于电池发生热失控时加载速度的临界值只能测得其大概范围,并不能得到完全准确的临界速度。本研究通过实验测得的荷电状态为80%的电池在径向压缩过程中发生热失控的临界加载速度在5~6 mm/min之间。值得注意的是,在整个能量聚集以及爆炸喷火过程中,电池正极端的安全阀一直没有起太大的作用,直至最后电池完

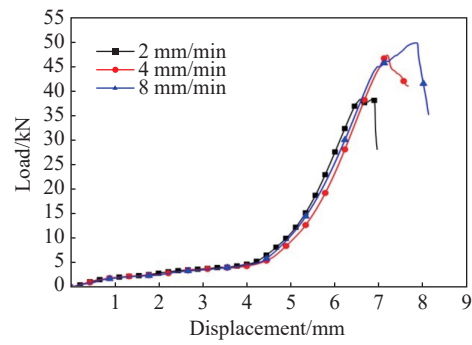


图6 电池在不同加载速度下的载荷-变形曲线  
Fig. 6 Load-deformation curves of battery at different loading speeds

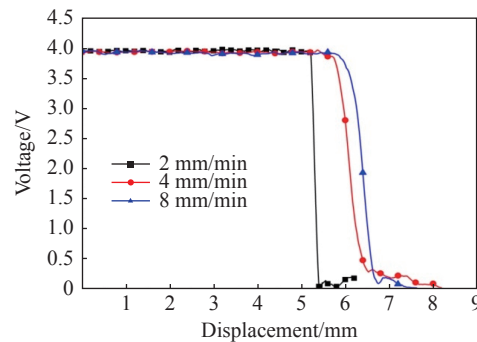
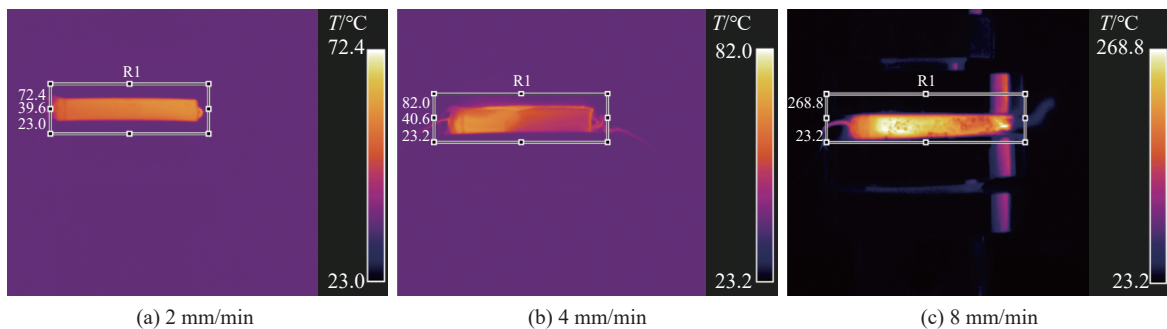


图7 电池在不同加载速度下的电压-变形曲线  
Fig. 7 Voltage-deformation curve of battery at different loading speeds



(a) 2 mm/min (b) 4 mm/min (c) 8 mm/min

图8 不同压缩速度下电池失效后表面温度分布

Fig. 8 Temperature of battery surface after failure at different compression speeds

全被引燃, 安全阀才被打开, 并释放出少量热气, 说明电池在受到比较严重的破坏时, 如果内部能量聚集较快, 安全阀并不一定能起到相应的保护作用。

## 2 电池的轴向压缩实验

由于在径向压缩实验中, 低荷电状态和低加载速度工况下均没有出现热失控现象, 因此在轴向压缩实验中只选择高加载速度和两组高荷电状态电池进行研究。荷电状态分别选取 60% 和 80% 两种, 加载速度选为 8 mm/min。

图 9 是以 8 mm/min 的恒定速度对两种不同荷电状态的单体电池进行轴向压缩后得到的载荷曲线和温度曲线。观察载荷曲线发现, 两组实验中载荷在上升阶段表现出相同的趋势。在加载的前 12 s 内, 载荷上升速度较慢, 当载荷达到 1.5 kN 时, 载荷增加的速度开始变快。这是因为锂离子电池的正极端有安全阀等组件, 电池正极结构与电芯存在间隔, 轴向压缩电池的过程中, 初始阶段主要是电池外壳和安全阀等结构受力, 内部的电芯并未完全受力, 此时载荷增长速度较慢。当变形达到约 1.5 mm 后正极组件被压缩接触到电芯, 此时内部电芯开始整体受力。继续加载电池的承载能力增强, 载荷的增长速度明显加快。对于荷电状态为 60% 的电池, 载荷在最高点处出现波动, 存在两个峰值, 承受的最大载荷为 10.6 kN; 而荷电状态为 80% 电池的载荷只有一个峰值, 最大载荷为 11.6 kN; 这说明轴向压缩时荷电状态越高, 极限载荷越大, 与径向压缩时的结论相吻合。

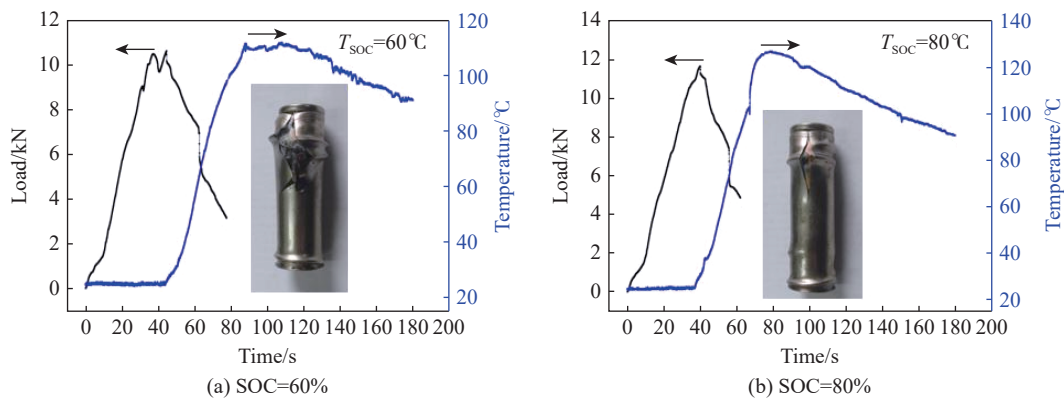


图 9 轴向压缩载荷-时间曲线和温度-时间曲线

Fig. 9 Load-time curve and temperature-time curve of battery under axial compression

此外, 仔细观察不同荷电状态电池在轴向压缩过程中的温度变化情况, 对比载荷和温度曲线的时间轴可以发现, 两组实验都是在载荷达到最大值时温度开始上升, 而且温度变化趋势几乎相同。以温升起始时刻作为电池发生短路破坏的判据, 两组实验数据都表明电池在轴向压缩下载荷达到最大值时内部开始发生短路失效。加载结束后, 荷电状态为 60% 的电池温度在 90 s 内上升到最高 111 °C; 而荷电状态为 80% 的电池最高温度则达到 126 °C。这表明荷电状态越高, 短路时温升越大, 释放出的能量也越多。轴向压缩实验中并未观察到爆炸喷火等严重的热失控现象。实验还发现, 在载荷达到最大值之前电池外壳发生整体变形, 但并未发生明显的破裂。图 9 中电池外壳的破裂均是在载荷达到最大值之后继续加载时发生的。发生破裂的主要原因是电池在发生短路后内部能量在短时间内集聚, 内部压强增大超过壳体的承受能力, 导致壳体发生了破裂。两组实验中电池外壳破裂发生处均靠近正极端。电池破裂后, 在破裂处有热气排出, 电池的隔膜和正负极已经完全被热气穿透并裸露。

## 3 结 论

本研究对 18650 锂离子单体电池进行了径向和轴向的准静态压缩实验, 通过测量其在压缩过程中的载荷、电压以及温度的变化, 分析了荷电状态和加载速度变化对电池力学响应以及安全性能的影响。

响。实验发现,在径向和轴向压缩过程中,电池的极限承载能力均随着荷电状态增加而增大,电池在发生短路时对应的变形量随着荷电状态的增加而减小;对于相同荷电状态的电池,加载速度越快,电池的极限载荷越大,短路时所对应的变形量也越大。电池在轴向和径向压缩过程中均出现了内短路现象,并伴随有电解液的泄漏以及温度的上升。当电池荷电状态为80%、加载速度达到5~6 mm/min时,径向压缩电池会出现爆炸喷火等严重的热失控现象。在轴向压缩实验中,内部发生短路失效时仅在靠近正极端附近发生壳体破裂并缓慢释放出内部能量,并未出现严重的爆炸喷火等现象。这表明加载方向、加载速度以及电池的荷电状态均是导致动力电池剧烈热失控的影响因素,其本质是热量迅速并且大量累积。电池荷电状态越高,发生短路时电池内部聚集的能量越多;加载速度越快,电池内部能量聚集的速率就越快,瞬间爆发的威力也越大。

通过实验研究对锂离子电池在外载荷作用下发生剧烈热失控的条件有了更加清晰的认识,对于动力锂离子电池后续的研发改进、电动汽车中电池模组的安全摆放等都有很好的借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] XI J, LI M, XU M. Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles [J]. *Applied Energy*, 2014, 134: 332–341.
- [2] 许骏, 王璐冰, 刘冰河. 锂离子电池机械完整性研究现状和展望 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(1): 15–29.  
XU J, WANG L B, LIU B H. Review for mechanical integrity of lithium-ion battery [J]. *Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(1): 15–29.
- [3] ZHU J, WIERZBICKI T, LI W. A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 378: 153–168.
- [4] 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.
- [5] KISTERS T, SAHRAEI E, WIERZBICKI T. Dynamic impact tests on lithium-ion cells [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 205–216.
- [6] XIA Y, WIERZBICKI T, SAHRAEI E, et al. Damage of cells and battery packs due to ground impact [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 267: 78–97.
- [7] PFRANG A, KERSYS A, KRISTON A, et al. Long-term cycling induced jelly roll deformation in commercial 18650 cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 392: 168–175.
- [8] 郑文杰. 车用动力电池的挤压力学响应特性研究及碰撞安全性分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 1–2.  
ZHENG W J. Study on compressive mechanical response characteristics and collision safety of automobile power batteries [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 1–2.
- [9] 田君, 田崔钧, 王一拓, 等. 锂离子电池安全性测试与评价方法分析 [J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(6): 1128–1134.  
TIAN J, TIAN C J, WANG Y T, et al. Safety test and evaluation method of lithium ion battery [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(6): 1128–1134.
- [10] 梁国周, 张一鸣, 田爽, 等. 锂离子电池针刺安全性研究概览 [J]. *电源技术*, 2016(12): 2472–2475.  
LIANG G Z, ZHANG Y M, TIAN S, et al. Nail penetration safety test of lithium-ion batteries [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016(12): 2472–2475.
- [11] SAHRAEI E, HILL R, WIERZBICKI T. Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 201(3): 307–321.
- [12] XU J, LIU B, WANG X, et al. Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies [J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 180–189.
- [13] XU J, JIA Y, LIU B, et al. Coupling effect of state-of-health and state-of-charge on the mechanical integrity of lithium-ion batteries [J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 58(4): 633–643.
- [14] LIU B, JIA Y, LI J, et al. Safety issues caused by internal short circuits in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(43): 21475–21484.



- [15] WANG L, 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.
- [16] ZHU J, ZHANG X, SAHRAEI E, et al. Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells under axial compression [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 336: 332–340.
- [17] ZHANG X, WIERZBICKI T. Characterization of plasticity and fracture of shell casing of lithium-ion cylindrical battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 280: 47–56.
- [18] ZHANG X, SAHRAEI E, WANG K. Deformation and failure characteristics of four types of lithium-ion battery separators [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 327: 693–701.
- [19] WANG L, YIN S, ZHANG C, et al. Mechanical characterization and modeling for anodes and cathodes in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 392: 265–273.
- [20] 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.

## Safety Performance of Power Lithium Ion Battery under Compressive Load

FAN Wenjie<sup>1</sup>, XUE Pengcheng<sup>1</sup>, WANG Genwei<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1,3</sup>

- (1. *Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;*  
2. *Key Laboratory of Material Strength and Structure Impact in Shanxi Province, Taiyuan 030024, China;*  
3. *College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University, London UB83PH, UK*)

**Abstract:** The safety of power batteries is one of the important factors that restrict the rapid development of electric vehicles. In this paper, cylindrical 18650 power lithium ion batteries with different state-of-charge (SOC) were compressed in the radial and axial directions respectively to study the mechanical response, voltage change, temperature change and failure process. The results show that the safety performance of lithium-ion batteries was influenced by SOC, loading speed and loading direction. During the process of compression, electrolyte leakage and instantaneous short circuit may occur, and the temperature of the battery will be risen sharply in a short time after short circuit coming up. During the radial compression process, the phenomena of severe thermal runaway such as explosion and fire will happen for combination of higher SOC and higher loading speed. Therefore, it is important to study the mechanical integrity of lithium-ion batteries under external loads for the safety design of automobiles.

**Keywords:** lithium ion battery; quasi-static compression; mechanical integrity; thermal runaway; state-of-charge