

高压物理学报

轴向压缩下圆柱形动力锂离子电池的性能

李梦 柳小伟 张舒 宋辉 王根伟 王彬

Performance of Cylindrical Power Lithium-Ion Battery under Axial Compression

LI Meng, LIU Xiaowei, ZHANG Shu, SONG Hui, WANG Genwei, WANG Bin

引用本文:

李梦, 柳小伟, 张舒, 等. 轴向压缩下圆柱形动力锂离子电池的性能[J]. 高压物理学报, 2021, 35(3):035302. DOI: 10.11858/gywlb.20200647

LI Meng, LIU Xiaowei, ZHANG Shu, et al. Performance of Cylindrical Power Lithium-Ion Battery under Axial Compression[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(3):035302. DOI: 10.11858/gywlb.20200647

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200647>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

压缩载荷作用下锂离子电池的安全性能

Safety Performance of Power Lithium Ion Battery under Compressive Load

高压物理学报. 2019, 33(6): 065901 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190752>

加载角度和线型缺口对锂离子电池隔膜拉伸性能的影响

Effects of Loading Angle and Linear Notch on Tensile Properties of Lithium-Ion Battery Separator

高压物理学报. 2020, 34(1): 015301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190765>

碳纤维增强复合材料层合板的抗冲击性能

Impulsive Resistance of the CFRP/Epoxy Laminate

高压物理学报. 2020, 34(2): 024101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190822>

弹体斜撞击单层金属薄靶的数值仿真

Numerical Study of the Oblique Perforation of Single Thin Metallic Plates

高压物理学报. 2018, 32(4): 045101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180503>

轴向荷载下功能梯度材料圆柱壳的动力屈曲

Dynamic Buckling of Functionally Graded Cylindrical Shells under Axial Loading

高压物理学报. 2018, 32(5): 054102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180502>

无机玻璃动态压缩破坏的离散元模拟

Discrete Element Simulations of Dynamic Compression Failure of Inorganic Glass in SHPB Tests

高压物理学报. 2019, 33(4): 044101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190719>

轴向压缩下圆柱形动力锂离子电池的性能

李 梦^{1,2}, 柳小伟^{1,2}, 张 舒^{1,2}, 宋 辉^{1,2}, 王根伟^{1,2}, 王 彬^{1,3}

(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. 伦敦布鲁内尔大学机械与航空工程系, 英国 伦敦 UB83PH)

摘要: 动力电池的安全问题制约了电动汽车的推广和发展, 轴向压缩是锂离子电池的一种重要的破坏工况。通过实验方法, 研究了 18650 锂离子电池在轴向压缩载荷下的安全性能, 探讨了荷电状态分别为 60%、80%、100% 时电池的载荷、电压、温度的变化特征, 分析了轴向压缩载荷下电池的失效过程。研究表明: 轴向压缩过程中电压均出现特有的台阶式下降, 极限载荷和温度骤升几乎同时发生; 电池正极的凹槽结构诱导电池在靠近正极的侧面破裂。对比轴向压缩实验和径向平板压缩实验发现, 动力电池轴向压缩热失控程度弱于径向平板压缩。

关键词: 圆柱形动力锂离子电池; 轴向压缩; 安全性能; 失效模式

中图分类号: O347

文献标识码: A

21 世纪以来, 随着工业技术的不断进步以及人民生活质量的不断提高, 环境污染问题日益突出。为了缓解环境污染问题, 多个国家将传统燃油车禁售列为未来计划提上日程^[1]。我国制订了多项政策支持新能源汽车的发展。2018 年 6 月, 国务院印发了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》^[2], 提出 2020 年底重点区域城市的公交车全部更换为新能源汽车。我国《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》^[3]进一步提出: 2025 年新能源汽车新车销售量计划达到汽车新车销售总量的 20% 左右, 2035 年纯电动汽车将成为新销售车辆的主流。在政策推动下, 纯电动汽车的销量持续增加, 截至 2019 年底, 全国纯电动汽车的保有量达 310 万辆^[4]。

然而, 近年来, 发生了多起因机械碰撞引发的电动汽车事故, 引发了人们对电动汽车安全的担忧。动力电池系统的安全是电动汽车安全的重要决定性因素之一。在电池系统装配中, 圆柱形电池单体一般是竖直放置、水平堆叠组成模组, 这种独特的排布方式使得电池承受着比较复杂的载荷工况。国外曾有因受到地面异物向上撞击导致电池发生轴向挤压破坏而引发电动汽车起火爆炸的先例。

国内外学者针对电池机械滥用方面做了很多工作。在电池轴向压缩方面, Xia 等^[5] 等对美国电动汽车底部因异物碰撞而导致的电池火灾事故进行了建模分析, 并用 LS-DYNA 软件建立了电池模型, 研究了不同形状压头在轴向加载时电池的变形以及可能的失效模式。Zhu 等^[6] 进行了荷电状态(State of charge, SOC)为零的 18650 锂离子电池的轴向压缩实验, 发现电池在短路前的载荷-位移曲线存在缓慢上升、快速上升、轻微下降和再次快速上升 4 个阶段。他们用有限元模拟揭示其变形过程, 并结合 CT 扫描对模拟结果进行了验证, 发现大部分的变形都发生在电池的顶部, 而电池底部几乎没有变形。杨威^[7] 通过对软包电池从长度、宽度和厚度 3 个方向进行加载来研究加载方向对电池压缩性能的影响, 发现电池在 3 个方向的机械强度明显不同, 电池厚度方向的强度远远大于长度和宽度方向, 这是因为叠层式软包电池在厚度方向上的挤压会发生压实和塑性硬化, 而长度和宽度方向上的挤压容易使电池内芯产生分层屈曲。

* 收稿日期: 2020-12-03; 修回日期: 2020-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(11872265); 山西省自然科学基金(201901D111087)

作者简介: 李 梦(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事动力电池安全性研究. E-mail: 2795997261@qq.com

通信作者: 王根伟(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: gwang@tyut.edu.cn

与轴向压缩相比,对电池径向压缩的研究较多,包括电池的荷电状态、健康状态、加载形式、加载速率等对电池性能的影响,对于方形和软包电池力学性能的研究也有一些成果。Xu等^[8]以18650圆柱形锂离子电池为研究对象,研究了准静态工况下电池的SOC对力学性能的影响,建立了耦合SOC电池计算模型^[9],结果表明电池的力学性能高度依赖于其SOC,进一步研究发现随着电池健康状态的降低,会弱化SOC对其力学性能的影响^[10]。Hao等^[11]利用声发射技术研究了圆柱形锂离子电池在三点弯曲下的失效过程。Dixon等^[12]选用SOC为零的软包电池作为研究对象,研究了电解液、压痕位置、加载速率对电池力学响应的影响,发现与干电池相比,有电解液的软包电池具有较低的载荷且更容易变形。Gao等^[13-14]、张晓婷^[15]先后研究了轻微过充、循环充放电以及低温充电对受平板压缩的锂离子电池性能的影响,发现轻微过充对电池的热失控影响不大,低温充电会使电池的压溃应力降低。电动车机械碰撞事故中,电池受动态载荷破坏,应变率影响不可忽视。Kisters等^[16]进行了软包电池和椭圆形电池动态滥用试验,发现椭圆形电池的临界载荷随着加载速度的增加而增加,而软包电池则降低;同时还研究了电解液对椭圆形电池性能的影响,发现速度越高,干电池的压痕越深,但载荷-位移曲线的斜率没有太大变化;随着加载速度增加,湿电池的失效压痕深度减小,载荷-位移曲线的斜率增加。Xia等^[17]研究了冲击速度和方向对电池模组力学响应的影响,其在Z方向(厚度方向)的承载高于其他两个方向,且其热失控程度比其他两个方向剧烈。Zhu等^[18]研究了干、湿两种锂离子软包电池样品在不同加载速度下的压缩响应,认为湿电池的应变率效应很大程度上来自于电解质。

本研究将从实验角度测试18650锂离子电池在轴向压缩载荷下的安全性能,研究电池在轴向压缩工况下的失效过程,分析锂离子电池在轴向压缩过程中载荷、温度与电压的变化特点;分别选取SOC为60%、80%和100%的锂离子电池,探究SOC对锂离子电池力学性能的影响;最后比较径向平板压缩和轴向压缩两种加载条件下电池热失控的剧烈程度,为电池安全设计与防护提供参考。

1 实验方法

选择商用18650三元NCM锂离子电池,标称容量为2500mAh,其直径为18mm,长度为65mm。圆柱形电池按照隔膜、负极片、隔膜、正极片的顺序排列卷绕,图1给出了电池的轴向和径向计算机断层扫描(CT)图像。其中,隔膜是由聚合物材料制成的薄膜,厚度约为20 μm ,能隔离正负极从而避免短路;正极片由正极涂层和铝箔层叠组成,正极片厚度为167 μm ,铝箔厚度为20 μm ;负极片由负极涂层

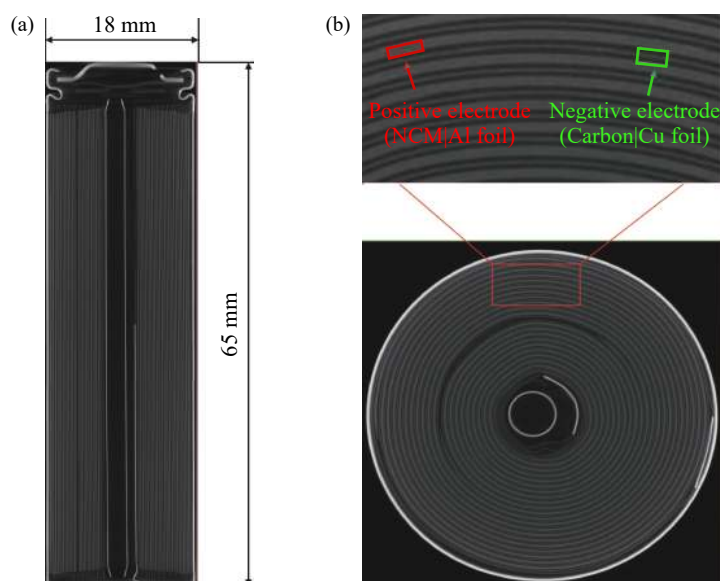


图1 18650锂离子电池的CT图像

Fig. 1 CT image of 18650 lithium-ion battery

和铜箔层叠组成, 负极片厚度为 150 μm , 铜箔厚度为 8 μm 。包裹电芯的最外层硬壳为不锈钢壳体, 能够保护电芯。

为探究 SOC 对轴向压缩电池安全性能的影响, 实验电池选用 3 种 SOC: 60%、80% 和 100%。其中, SOC 为 60%、80% 的电池各选取 5 节, SOC 为 100% 的电池选取 9 节。在轴向压缩实验中, 先采取恒流-恒压的模式将电池充电至实验设定的容量 (60%、80% 和 100%), 然后进行压缩实验。在充放电时常用充放电倍率来表示电流大小, 充放电倍率等于充放电电流除以额定容量, 该实验中充放电电流设置为 500 mA, 即充放电倍率为 0.2 C。具体充放电方案如下: 首先电池以 0.2 C 的恒流方式充电, 该阶段的截止条件为电压达到 4.2 V; 再以 4.2 V 的恒压方式充电, 该阶段的截止条件为电流降至 0.02 C; 然后以 0.2 C 的速率进入恒流放电阶段, 电压降至 2.75 V 作为该阶段的截止条件; 静置 1 min, 最后以恒流-恒压模式充至设定的容量。

在轴向压缩实验过程中, 利用万能材料试验机 (型号为万测 ETM 105D) 记录载荷的变化, 通过数字示波器 (型号为 Tektronix TDS 2024C) 记录电压的变化, 通过红外热像仪 (型号 Yoseex X640A600MF25) 记录电池表面温度的变化。

2 实验结果与分析

2.1 加载速度对电池力学性能的影响

电动汽车行驶速度通常不超过 120 km/h, 圆柱形电池以竖直方式放置, 在行驶过程中当汽车底盘受到撞击时, 其在轴向的加载速度远小于车辆的行驶速度。

以 2、4、6 和 8 mm/min 4 种加载速度加载 SOC 为 100% 的电池, 其载荷-位移曲线如图 2 所示。可以看到, 在加载速度范围内, 随着位移增大, 载荷上升阶段的变化趋势一致, 没有明显的应变率效应。后续实验均采用 8 mm/min 作为加载速度。

由于电芯的正负极材料和隔膜均为多孔材料, 电池在径向压缩过程中的载荷-位移曲线具有典型的多孔材料特征, 因此可将电池内芯视为多孔材料处理, 整个电池可以近似看作内嵌泡沫的圆柱壳。黄睿^[19]研究了在准静态轴向压缩和轴向冲击两种工况下圆管填充泡沫铝的失效模式, 发现两种工况下均发生了圆环变形模式褶皱, 因此可以推测轴向冲击下电池发生了多层褶皱。由于存在正极帽且电池内部不是完全轴对称, 所以不易出现文献 [19] 中的整体渐进屈曲, 而是在发生了若干个环向褶皱后出现局部撕裂。

动力电池在高速冲击下的力学响应可以采用 Zhao^[20] 提出的用于理想刚塑性结构动态塑性响应的无量纲数-响应数 $R_n(n)$ 描述

$$R_n(n) = \frac{\rho v_0^2}{\sigma_0} \left(\frac{L}{H} \right)^2 \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度, v_0 为冲击速度, σ_0 为材料的屈服应力, L 为梁或板的半长, H 为梁或板的厚度。在方形锂离子电池承受冲击加载的工况中, 可用式 (1) 求得响应数作为失效判据。对于圆柱形电池, 可用冲击物的半径 R 代替 L , 式 (1) 变为

$$R_n(n) = \frac{\rho v_0^2}{\sigma_0} \left(\frac{R}{H} \right)^2 \quad (2)$$

通过式 (2) 求得圆柱形锂离子电池受冲击时的响应数, 同样可将其作为失效判据。

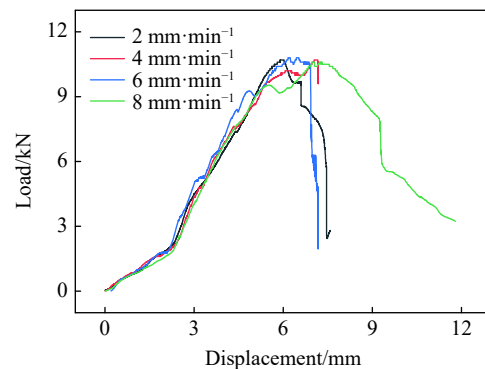


图 2 不同加载速度下 100% SOC 电池的载荷-位移曲线
Fig. 2 Load-displacement curves of 100% SOC battery at different loading speeds

2.2 轴向压缩下电池载荷、电压和温度的变化

如图 3 所示, 以 100% SOC 电池为例对轴向压缩下电池的载荷、电压和温度的变化进行分析。将电池的压缩量与原始长度之比记作压缩比。从图 3 中电池单体的载荷-位移曲线可以看到, 在加载初期, 载荷随位移不断增大而缓慢上升, 在载荷达到 1.8 kN 左右时, 电池高度被压缩了约 2.2 mm(压缩比为 3.4%); 随后载荷随位移增大的变化加快, 直到载荷达到 9.5 kN 时, 为第 1 个峰值载荷, 此时的压缩位移约为 5.4 mm(压缩比为 8.3%); 当压缩位移在 5.5~5.9 mm(压缩比为 8.3%~9.1%)时, 载荷略微下降; 当压缩位移大于 5.9 mm(压缩比为 9.1%)之后, 载荷再次持续上升, 直至载荷达到最大值, 最大载荷约为 10.6 kN, 这时的压缩位移大约为 7.2 mm(压缩比为 11.1%); 最后载荷进入下降阶段。

电压在加载过程中的变化与载荷息息相关。从图 3 中的电压-位移曲线可以发现, 随着载荷增加, 电压会出现台阶式下降。首次电压下降发生在压缩位移为 5.4 mm(压缩比为 8.3%)附近, 电压下降至 2.3 V 左右, 出现短暂的电压平台; 之后电压再次发生台阶式下降, 且最后一次台阶下降对应的位移几乎和最大载荷对应的位移一致。载荷达到最大值时, 电压并没有立刻降为零, 而是经过了一个缓慢的下降过程。

综合分析温度-位移曲线, 在压缩位移为 5.6 mm(压缩比为 8.6%)时, 电池温度初次上升至 52 °C, 这是由于此时电压第一次下降, 电池内部发生了轻微短路, 温升略晚于短路的发生; 随着轴向加载继续进行, 当压缩位移在 7.0~8.3 mm(压缩比为 10.8%~12.8%)之间时, 温度略下降; 当压缩位移约为 8.3 mm(压缩比为 12.8%)时, 温度骤升, 最高达到 118 °C。温度-位移曲线出现了多个毛刺现象, 这主要是由于电池在压缩变形至 7 mm(压缩比为 10.8%)左右时, 靠近正极端侧面发生破裂, 电池内部热量不连续地从破裂处喷出, 而不是一次性喷出。

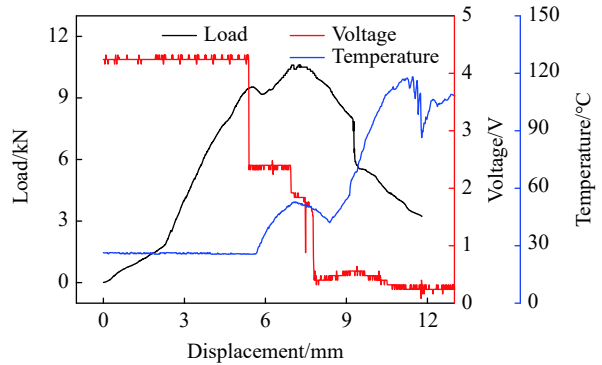


图 3 100% SOC 电池的载荷、电压、温度-位移曲线
Fig. 3 Load-, voltage- and temperature-displacement curves of the 100% SOC battery

2.3 SOC 对轴向压缩电池安全性能的影响

为了研究准静态工况下轴向压缩响应是否与电池的 SOC 有关, 进一步检测了 60% 和 80% SOC 电池的载荷、电压、温度-位移曲线, 如图 4 所示。结合图 3、图 4 可以发现, 不同 SOC 电池的载荷-位移曲线的趋势基本相同; 不同 SOC 电池的电压-位移曲线均出现了台阶式下降现象; 60% 和 80% SOC 电池的温度-位移曲线出现了很多“毛刺”, 同样是由于电池短路时电池外壳的侧面发生破裂时电池内部的热量间断向外喷出导致的。

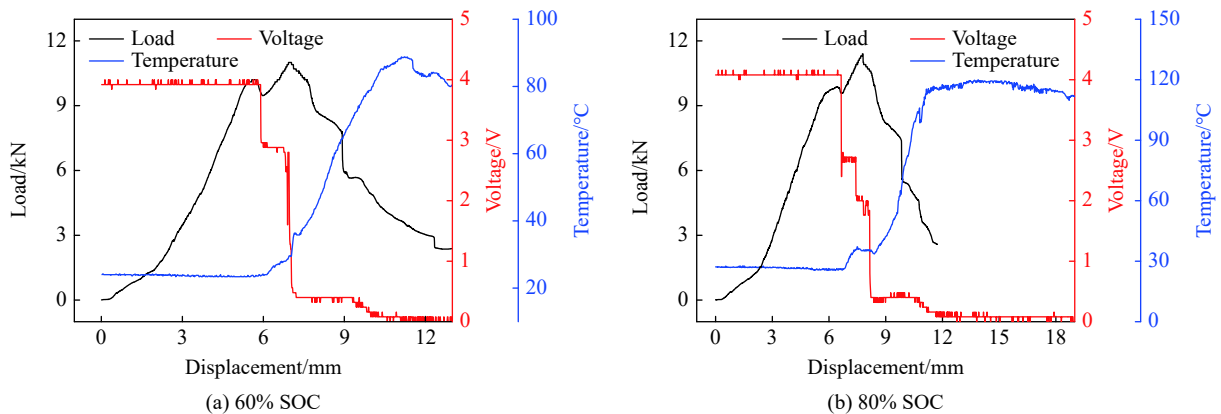


图 4 60% 和 80% SOC 电池的载荷、电压、温度-位移曲线

Fig. 4 Load-, voltage- and temperature-displacement curves of 60% and 80% SOC battery

若将载荷的最大值定义为电池在轴向压缩下的极限载荷, 则随着 SOC 的增大, 电池的极限载荷略微增大, 如图 5 所示。电池失效后达到的最高温度大部分集中在 90~120 °C 范围内, 只有 100% SOC 电池的最高温度达到了 180 °C, 如图 6 所示。

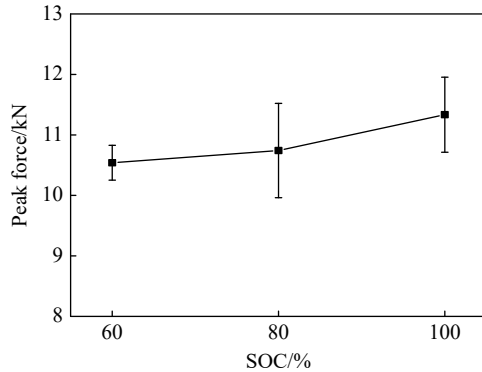


图 5 不同 SOC 电池的峰值力

Fig. 5 Peak force of batteries with different SOC

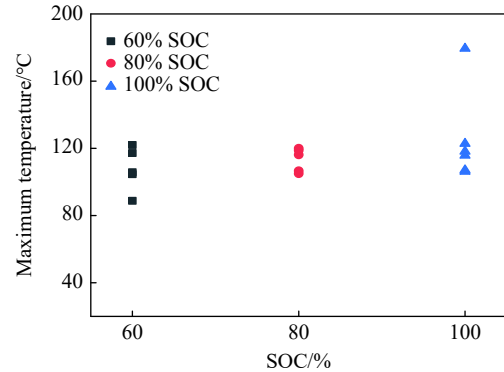


图 6 不同 SOC 电池的最高温度

Fig. 6 Maximum temperature of batteries with different SOC

2.4 轴向压缩下电池的失效过程

如图 7 所示, 以 100% SOC 电池为例, 结合红外热像仪和照相机观察轴向压缩过程中电池的失效过程, 其载荷、温度随位移的变化曲线可以划分成 5 个阶段: 缓慢上升阶段(阶段 I)、快速上升阶段(阶段 II)、略微下降阶段或类平台阶段(阶段 III)、二次快速上升阶段(阶段 IV)以及快速下降阶段(阶段 V), 与 Zhu 等^[6]的实验结果类似。

图 1(a) 显示了电池的正极帽、负极端与电芯之间均有间隙。正极帽的凹槽部位是受力的薄弱部位, 在加载初期(缓慢上升阶段), 正极帽与电芯之间的初始间隙被压缩, 凹槽的上下边发生接触; 快速上升阶段至二次快速上升阶段, 在凹槽与电芯刚接触时, 电芯可看作以压痕形式受力, 随着加载不断增强, 接触面积不断增大, 电池的短路面积也不断增大, 这与电压的台阶式下降现象吻合; 快速下降阶段时, 电池电压已降至低于 1 V, 这时载荷随位移的增加而下降, 短路后的电池内部不断积聚热量, 电池内部的压强不断升高, 电池的内部结构大面积被破坏, 靠近正极的侧表面发生明显的局部褶皱并最终在内压和外载的共同作用下发生破裂。在轴向压缩过程中, 电池电压出现了台阶式下降现象, 这与图 8 所示的电池变形过程中渐进式破坏有关。

结合红外温度成像结果和实物照片可以看出, 当压缩位移在 3.0 mm(压缩比为 4.6%)以内时, 电池变形主要集中在凹槽处, 电池温度几乎不变, 如图 8(a) 所示; 当压缩位移约为 5.3 mm(压缩比为 8.1%)时, 电池正极附近侧面出现了第 1 个环形褶皱, 此时温度变化可以忽略不计, 如图 8(b) 所示; 当压缩位移达到 6.1 mm(压缩比为 9.3%)左右时, 电池侧面在第 1 个褶皱下面形成第 2 个环形褶皱, 同时红外温度成像结果显示此时电池正负极端的温度高于电池其他部位, 说明短路首先从正负极开始, 正极温度更高说明其短路更明显, 如图 8(c) 所示; 当压缩位移增至 6.3 mm(压缩比为 9.7%)时, 电池的最高温度达到 56.4 °C, 红外成像显示此时电池正极端侧面出现了 1 条明亮的高温带, 第 2 个环形褶皱的变形程度加深, 如图 8(d) 所示; 随着电池温度不断上升, 该高温带从正极向负极迅速扩展, 扩展至电池轴向长度约 3/4 处时, 最高温度达到 74 °C, 如图 8(e) 所示; 当最高温度升至 102 °C 时, 电池侧面破裂, 向外喷出

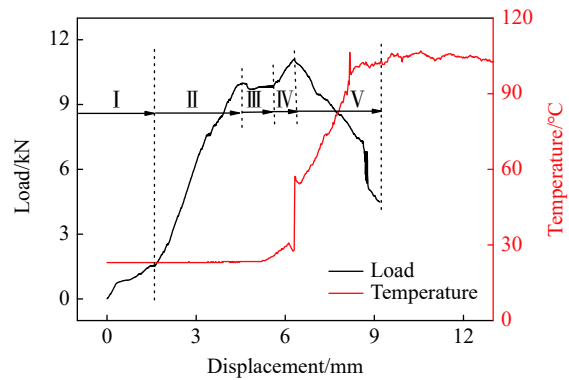


图 7 100% SOC 电池的载荷、温度-位移曲线

Fig. 7 Load-, temperature-displacement curves of the 100% SOC battery

热气, 温度略有上升, 如图 8(f) 所示; 当电池向外喷出热气后, 高温带延伸至负极, 如图 8(g) 所示; 图 8(h) 为破坏后的电池实物, 可以清晰地看到电池靠近正极处的外壳破裂且有电芯向外凸出。

与图 8(h) 类似, 实验中所有的电池均产生了多层褶皱, 内部物质暴露, 破裂位置均靠近正极。如图 9 所示, 电池正极盖帽位置附近的环形凹槽结构是电池受力的薄弱部位, 该结构可能是电池破坏从靠近正极位置开始的诱因。

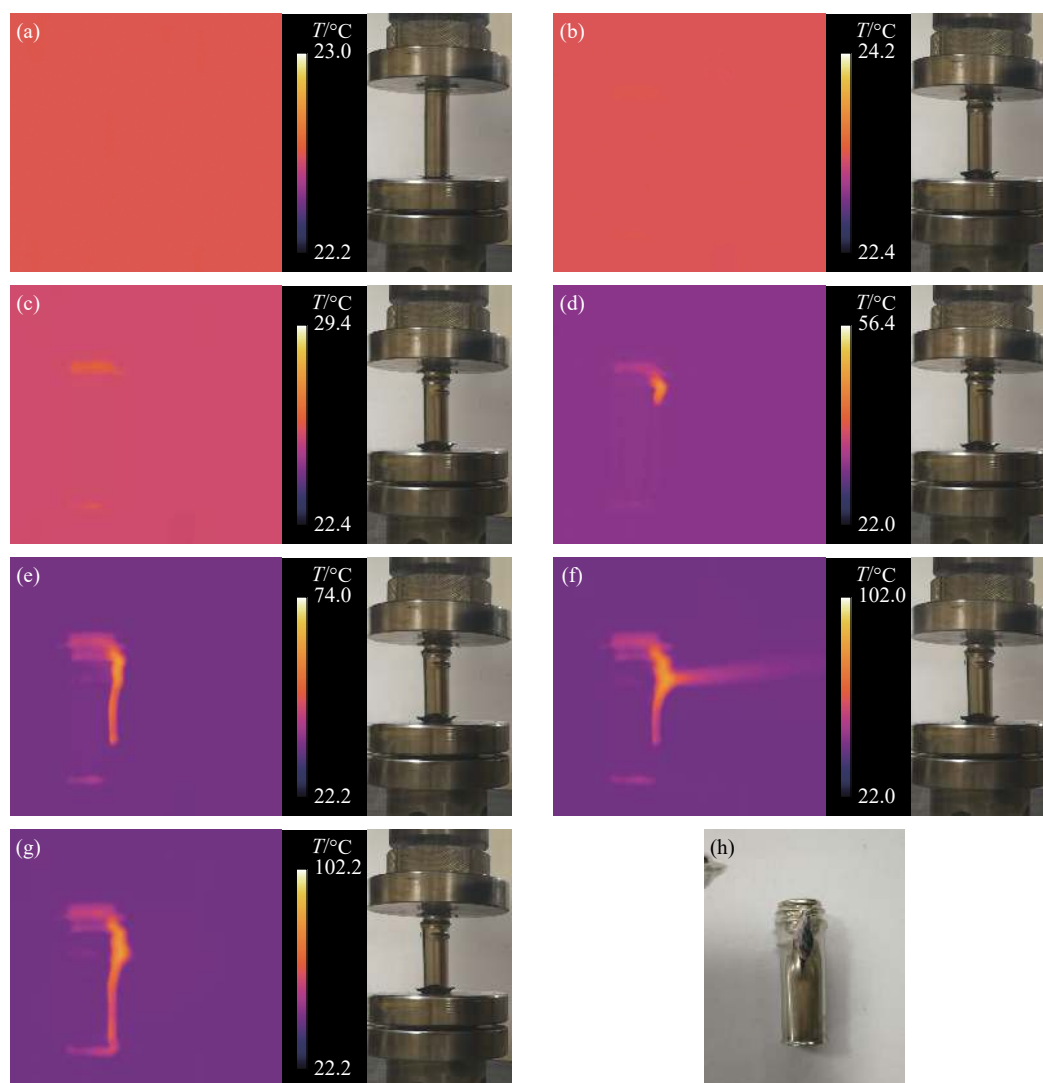


图 8 轴向压缩过程中的电池及其红外成像 (a)~(g) 以及破坏后的电池实物 (h)

Fig. 8 Infrared images and photos of the battery during axial compression (a)–(g) and the battery after destruction (h)

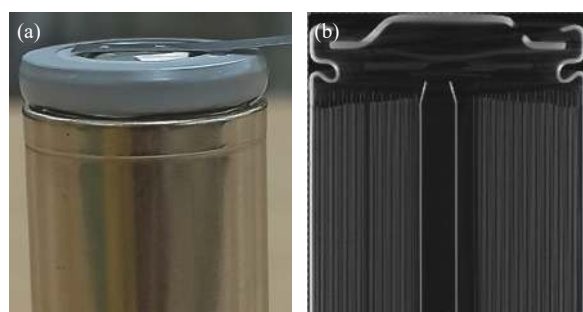


图 9 18650 锂离子电池正极端(a)及 CT 图像(b)

Fig. 9 Positive electrode of 18650 lithium-ion battery (a) and CT image (b)

2.5 电池的轴向压缩与径向平板压缩的比较

与文献 [21] 中的径向平板压缩实验比较发现, 80% SOC 锂离子电池在径向平板压缩中均发生了起火爆炸剧烈热失控现象, 而轴向压缩下的锂离子电池失效时相对温和。电池破坏产生的温升也远低于径向压缩工况, 轴向压缩失效电池的最高温度多处于 90~120 °C, 而径向压缩发生热失控后的最高温度达到 300 °C 以上; 径向平板压缩时电池的极限载荷大于 40 kN, 而轴向压缩电池的极限载荷在 10~12 kN 范围内; 径向平板压缩电池的电压几乎是一次性突降, 而轴向压缩电池的电压呈台阶式下降。

3 结 论

分别选取 SOC 为 60%、80% 和 100% 的 18650 三元锂离子电池进行轴向压缩实验, 同步记录了载荷、电压和温度的变化, 分析电池失效时载荷、电压和温度之间的联系, 讨论了 SOC 对电池安全性能的影响, 并与径向平板压缩电池对比, 得到以下主要结论。

(1) 在本研究的 SOC 取值范围内, 在轴向压缩过程中动力电池的电压均出现台阶式下降, 直至完全短路。电压首次下降发生在载荷达到首次峰值或平台之后, 最大峰值载荷与温度骤升几乎同时发生。峰值载荷随着 SOC 增大而略微增大。

(2) 轴向压缩载荷下电池的失效形式均为侧面首先发生环形褶皱, 进而发生破裂, 破裂的位置均靠近正极。正极端凹槽结构会诱发电池在轴向压缩下从靠近正极处开始破坏。

(3) 轴向压缩下电池的热失控程度比径向平板压缩时温和; 径向平板压缩电池的极限载荷远大于轴向压缩的极限载荷; 轴向压缩时电池的电压呈台阶式下降, 而径向平板压缩电池的电压未出现该现象。

参考文献:

- [1] 闫建涛. 多国将传统燃油车禁售提上日程: 能源替代竞争压力冲击石油行业 [J]. *国际石油经济*, 2018, 26(1): 16–17.
YAN J T. Many countries put the ban on the sale of traditional fuel vehicles on the agenda: the pressure of energy substitution and competition hits the oil industry [J]. *International Petroleum Economics*, 2018, 26(1): 16–17.
- [2] 国务院印发《打赢蓝天保卫战三年行动计划》[J]. *现代城市研究*, 2018(8): 131.
The State Council issued《three-year action plan to fight air pollution》[J]. *Modern Urban Research*, 2018(8): 131.
- [3] 王萌萌. 国务院办公厅印发《新能源汽车产业发展规划 (2021-2035 年)》[EB/OL]. 新华网 (2020-11-02)[2020-12-03]. http://www.xinhuanet.com/politics/2020-11/02/c_1126688263.htm.
- [4] 王炬鹏. 全国私家车保有量首次突破 2 亿辆 新能源汽车保有量达 381 万辆 [EB/OL]. 中国经济网 (2020-01-07)[2020-12-03]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202001/07/t20200107_34064649.shtml.
- [5] 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.
- [6] ZHU J E, ZHANG X W, SAHRAEI E, et al. Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells under axial compression [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 336: 332–340.
- [7] 杨威. 车用动力电池包底部碰撞安全性分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
YANG W. Safety analysis of bottom crash of vehicle power battery pack [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [8] XU J, LIU B H, HU D Y. State of charge dependent mechanical integrity behavior of 18650 lithium-ion batteries [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21829.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] DIXON B, MASON A, SAHRAEI E. Effects of electrolyte, loading rate and location of indentation on mechanical integrity of li-ion pouch cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 396: 412–420.
- [13] GAO Z H, ZHANG X T, XIAO Y, et al. Influence of coupling of overcharge state and short-term cycle on the mechanical integrity behavior of 18650 Li-ion batteries subject to lateral compression [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(10): 5261–5271.
- [14] GAO Z H, ZHANG X T, XIAO Y, et al. Influence of low-temperature charge on the mechanical integrity behavior of 18650 lithium-ion battery cells subject to lateral compression [J]. *Energies*, 2019, 12(5): 797.
- [15] 张晓婷. 圆柱型锂离子电池单体在径向挤压载荷下的力学响应特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
ZHANG X T. Study of the mechanical response characteristics of cylindrical lithium-ion battery cell subject to radial compression [D]. Changchun: Jinlin University, 2019.
- [16] KISTERS T, SAHRAEI E, WIERZBICKI T. Dynamic impact tests on lithium-ion cells [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 205–216.
- [17] XIA Y, CHEN G H, ZHOU Q, et al. Failure behaviours of 100% SOC lithium-ion battery modules under different impact loading conditions [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 82: 149–160.
- [18] ZHU J E, LUO H L, LI W, et al. Mechanism of strengthening of battery resistance under dynamic loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 78–84.
- [19] 黄睿. 轴向载荷下泡沫铝填充薄壁金属管吸能特性的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
HUANG R. Study on energy absorption properties of thin-walled metal tubes filled with aluminum foam under axial load [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [20] ZHAO Y P. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates [J]. *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv)*, 1998, 68(7/8): 524–538.
- [21] 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.

Performance of Cylindrical Power Lithium-Ion Battery under Axial Compression

LI Meng^{1,2}, LIU Xiaowei^{1,2}, ZHANG Shu^{1,2}, SONG Hui^{1,2}, WANG Genwei^{1,2}, WANG Bin^{1,3}

(1. *Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

2. *Key Laboratory of Material Strength and Structure Impact in Shanxi Province, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

3. *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, London Brunel University, London UB83PH, UK*)

Abstract: The safety of power batteries have always restricted the promotion and development of electric vehicles. The axial compression of batteries is an important issue leading to damage. The safety performance of 18650 lithium-ion battery under axial compression was studied by experiments. The characters of load, voltage and temperature of batteries with state of charge of 60%, 80%, and 100% were discussed, and the failure process of the battery under axial compression was analyzed. It was found that the voltage during the axial compression process showed a unique stepped drop, the maximum load and a sudden temperature increase occurred almost simultaneously; the local groove structure of the positive induced the battery to rupture near the positive. Comparing the batteries in axial compression with the batteries of the radial two-plate compression, it was found that the thermal runaway of power battery in axial compression is weaker than that in radial two-plate compression.

Keywords: cylindrical power lithium-ion battery; axial compression; safety properties; failure mode