

含碰撞缺陷的锂离子电池电化学性能衰退 及安全性*

高游^{1,2}, 郑若昕^{1,2}, 姜宇新^{1,2}, 王璐冰^{1,2}

(1. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学机械工程与力学学院力学与工程科学系, 浙江 宁波 315211)

摘要: 不可避免的碰撞会导致电动汽车锂离子电池 (lithium-ion battery, LIB) 出现缺陷, 为了确认碰撞后的缺陷电池能否继续使用, 重点研究缺陷电池的机械性能、电化学性能、安全边界及其衰退机理。首先, 使用不同的压头通过准静态加载和落锤冲击制备了 3 种典型的缺陷电池, 即压痕、50% 偏置压缩和平板压缩缺陷电池。随后, 分别通过准静态平板压缩和充电/放电循环评估其机械和电化学响应。结果发现, 缺陷电池的机械性能显著下降, 包括内部短路位移、短路载荷和能量吸收能力下降。相较于新电池, 缺陷电池还表现出明显的电化学性能退化, 包括更严重的容量衰退。此外, 通过拆解电池解释了其降解机制, 基于隔膜厚度提出电池的机械失效标准。最后, 还讨论了加载速度和缺陷类型对缺陷电池性能的影响。加载速度越高, 缺陷电池的性能退化越严重, 这与惯性效应有关。不同类型的缺陷会导致隔膜厚度和石墨分层的变化, 从而造成不同程度的退化。

关键词: 缺陷锂离子电池; 容量衰减; 安全准则; 机械缺陷; 动态冲击

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 1303530

文献标识码: A

Electrochemical performance degradation and safety of lithium-ion batteries containing defects induced by collision

GAO You^{1,2}, ZHENG Ruoxin^{1,2}, JIANG Yuxin^{1,2}, WANG Lubing^{1,2}

(1. Key Laboratory Impact & Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University,

Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. Department of Mechanics and Engineering Science, Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics,

Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Unavoidable electric vehicle collisions can cause defects in lithium-ion batteries (LIBs), and whether defective batteries after minor collisions can continue to be used is still unknown. In this work, we focus on the mechanical performance and electrochemical performance of defective batteries, safety boundaries, and its failure mechanism. Firstly, three typical defective cells, namely indentation, 50% offset compression and plate compression defect cells, are prepared by quasi-static loading and drop hammer impact with different indenters. These defective batteries did not exhibit voltage drops or temperature increases, indicating that no internal short circuits occurred. Subsequently, their mechanical and electrochemical responses were evaluated through quasi-static plate compression at a loading rate of 1 mm/min and 1C charge/discharge cycling, respectively. It was found that defective batteries exhibited significant deterioration in mechanical performance, including earlier onset of internal short circuit, reduced short circuit force, and decreased energy absorption capacity. Defective batteries also exhibited significant electrochemical performance degradation, with greater capacity loss during cycling compared to new batteries. Further, its

*收稿日期: 2024-09-30; 修回日期: 2024-12-00

基金项目: 国家自然科学基金 (12472384)

第一作者: 高游 (1997-), 男, 硕士, 2211090102@nbu.edu.cn

通信作者: 王璐冰 (1993-), 女, 博士, 副教授, wanglubing@nbu.edu.cn

degradation mechanism is explained through disassembling the cells. The separator of defective batteries exhibited significant thinning, making it more prone to rupture under secondary loading. Therefore, the mechanical failure criterion of the battery was proposed based on the separator thickness. After 500 cycles, graphite delamination was observed in the defective batteries, whereas the defective batteries without cycling only exhibited cracking. Therefore, the degradation of electrochemical performance in defective batteries is caused by the combined effects of initial defects and cyclic aging stress. The effects of loading speed and defect type on the performance of defective cells are also discussed. Defective batteries subjected to higher loading rates exhibit greater performance degradation, which is related to inertia effects. Different types of defects lead to variations in separator thickness and graphite delamination, resulting in different levels of degradation. Results are instructive for the study of safety identification and treatment of defective lithium-ion batteries.

Keywords: defective lithium-ion batteries; capacity degradation; safety principle; mechanical defects; dynamic impact

由于能源濒临枯竭和生态环境的双重压力，全球正积极推动电动汽车的发展，以减少对石油的依赖并缓解环境污染带来的挑战^[1-4]。近年来，锂离子电池凭借其优越的循环寿命、无记忆效应和高能量密度，成为汽车能源的重要发展方向^[5-8]。随着电动汽车数量的快速增长，锂离子电池在碰撞安全性方面的关注度日益提升^[9-13]。汽车碰撞会造成直接的起火爆炸事故，引起人民群众的担忧，但更多的事故是汽车刮蹭、托底等。发生轻微碰撞的锂电池通常不会出现电压下降和温度升高等短路现象，因此无法被电池管理系统（battery management system, BMS）检测到。这种不可检测性使电动汽车中锂电池组的更换和回收变得更加复杂。因此，研究机械缺陷电池的性能变化并揭示其失效机理对电池安全具有重要意义。

当前机械缺陷电池的安全性已受到学者们的广泛关注，Shuai 等^[14]对不同变形下的锂离子电池进行了脉冲充放电实验，并提出了一种新的等效电路模型，该模型能够预测外部变形过程中电池的动态电响应。Wang 等^[15]制造了不同深度的径向缺陷电池，并评估了这些电池的容量衰减。他们发现电池变形越大，容量衰减越快。基于这些研究，Liu 等^[16]构建了一个耦合机械-电化学实验平台，以探索机械缺陷对锂离子电池循环寿命、充放电性能和电化学阻抗的影响。考虑到锂离子电池在维修过程中可能受到异物侵入的情况，Jia 等^[17]引入了一种新缺陷（螺钉压痕），并通过短期循环曲线对比了缺陷电池与新电池。他们发现，有缺陷的电池表现出显著的性能退化，包括容量损失和漏电流。此外，Chen 等^[18]研究了锂离子电池在重复冲击下的动态机械行为，揭示了电池短路故障与冲击速度、冲击能量以及冲击次数之间的关系。朱瑞卿等^[19]设计了对锂电池的不同能量的多次冲击实验，通过电化学检测和内部损伤观察，发现了与隔膜破坏程度相关的延迟失效和立即失效两种模式，并且还说明了电极的机械完整性在多次冲击实验中对电池性能具有重要意义。魏和光等^[20]通过对受冲击载荷后未失效的电池进行二次加载实验和电性能表征发现，受到高冲击能量的电池即使没有明显失效，但是其容量和内阻也会急剧衰退，并且在承受二次加载时，其失效位移、峰值承载力和吸能能力会产生衰减，力学性能下降明显。Zhou 等^[21]对锂电池进行了不同能量水平的冲击，并检测了这些电池的机电耦合响应和容量退化，发现了由外壳破损、隔膜破损和二者同时破损引起的 3 种典型的性能演变模式。前述研究均发现锂电池在准静态压缩下能承受较大的变形而不失效，但是在动态冲击下承受变形的能力较弱^[22-23]，那么动态载荷下电池的损伤情况以及其剩余使用寿命如何是非常关键的。然而，现有研究主要侧重于现象的描述，缺乏深入的解释，并且目前尚未建立关于有缺陷电池的安全界限，更缺少动态下的研究。这些机制解释的不足以及未能确定安全界限，阻碍了对电池使用的有效指导。

本文中，对各种缺陷电池的安全行为进行全面研究，包括缺陷深度、加载速度和缺陷类型；通过拆解电池，分析缺陷电池的机械和电化学衰退特性；此外，开发基于缺陷电池隔膜厚度的机械安全标准。

1 方法

1.1 锂离子电池样品

选择 21700 圆柱形锂离子电池作为实验样品。该锂离子电池样品的直径为 21 mm，长度为 70 mm，内部卷芯长度为 65 mm；充电状态为 10%，标称容量为 4.9 Ah，充电截止电压为 4.2 V，放电截止电压为 2.5 V，标称电压为 3.6 V；隔膜材料为聚丙烯(PP)，正/极集流体材料为 Al/Cu，正/负极活性材料为 NCM ($\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}$)/石墨。将全新的电池样品首先以 0.1C 的放电倍率从标称电压放电至截止电压，然后以 0.1C 的充电倍率充电至 10% 的充电状态 (state of charge, SOC)，如图 1 所示。10% 充电状态下电池性能稳定，且利于后续的拆解实验进行性能衰退机理分析。

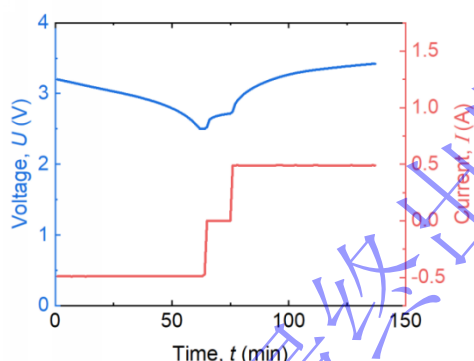


图 1 全新锂离子电池的放充电电压和电流时间历程曲线

Fig.1 Variation of voltage and current of a new lithium-ion battery with time during discharging and charging

1.2 实验方法

首先，通过准静态压缩和落锤冲击制备了 3 种缺陷电池，如图 2(a)所示，分别考虑了常见的压痕缺陷、50%偏置压缩缺陷和平板压缩缺陷。为此，将电池样品放在测试平台上，用压头以 1 mm/min、1 和 6 m/s 的速度进行加载，其中 1 mm/min 的加载在准静态压缩设备上实现，1 和 6 m/s 的加载在落锤设备上实现。用载荷和位移传感器分别同步记录力和位移。同时，将阴极和阳极片与安捷伦 34420A 纳伏电压表相连，以监测压缩过程中的电压波动。此外，在去除塑料薄膜后，将 2 个工作频率为 50 Hz 的 K 型热电偶固定到电池侧面的中心处 (图 2(b))，以检测温度的变化。值得注意的是，这些电池在制造缺陷时并没有出现任何相关的电压下降或温度升高，这表明它们存在缺陷但没有损坏，电池管理系统无法对其进行监测。

接着，对缺陷电池进行机械性能和电化学性能表征，并通过电池拆解进行相关机理的解释。为探究缺陷电池的机械性能，对其进行了准静态径向平板压缩实验，如图 2(b)所示。加载速度设定为 1 mm/min，力、位移由载荷和位移传感器同步记录；电压波动被安捷伦 34420A 纳伏电压表记录；电池温度被 LR8431-30 同步记录。隔膜的厚度对锂离子电池的机械安全性起着重要作用，因为在预加载后，隔膜的厚度并不均匀，呈现加载区域中间薄、两边厚的分布的特点。隔膜最薄的部分在二次加载时会首先破裂，所以隔膜最薄的部分是机械安全性的首要关注点。因此，拆解有缺陷电池后使用千分尺测量了隔膜的厚度，以揭示机械性能下降的机理。而缺陷电池的正极有轻微裂痕，负极虽有石墨脱粘或裂痕但缺陷部分仍有石墨，所以二次加载后隔膜破裂会引起正极-负极^[24]的内短路形式。

最后，用 LANHE CT6001A 充放电设备进行充放电循环，表征缺陷电池的电化学特性 (图 2(c))。对电池以 1C 的倍率进行了 500 次充放电循环测试，每 50 次循环后测量其 0.1C 容量。为了排除环境温度的影响，所有缺陷电池的实验都在 25 °C 的恒温箱中进行。此外，为了研究电化学特性

的降解机制，在手套箱中拆解了循环老化后的缺陷电池，观察其内部形貌。

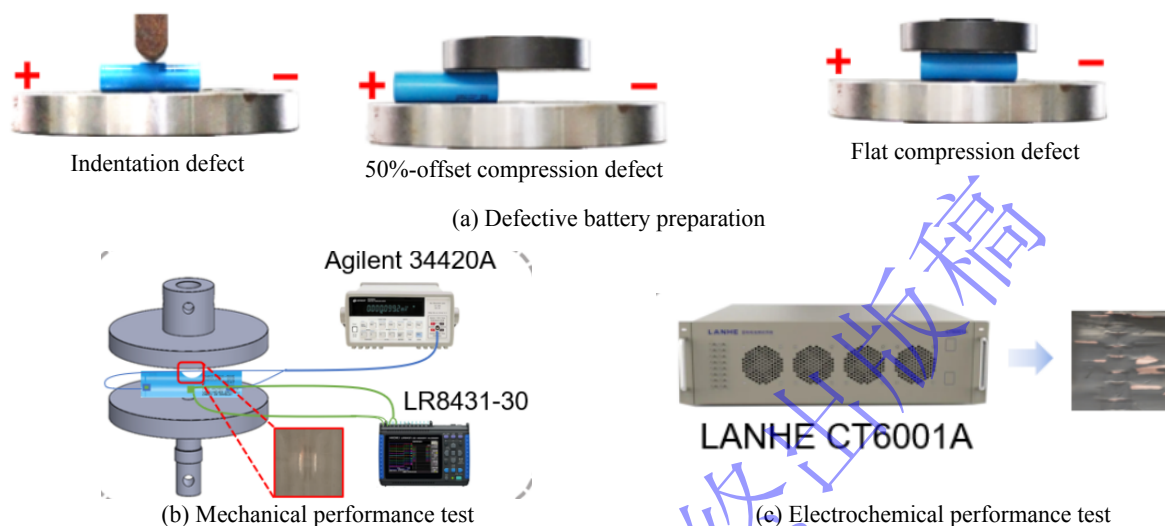


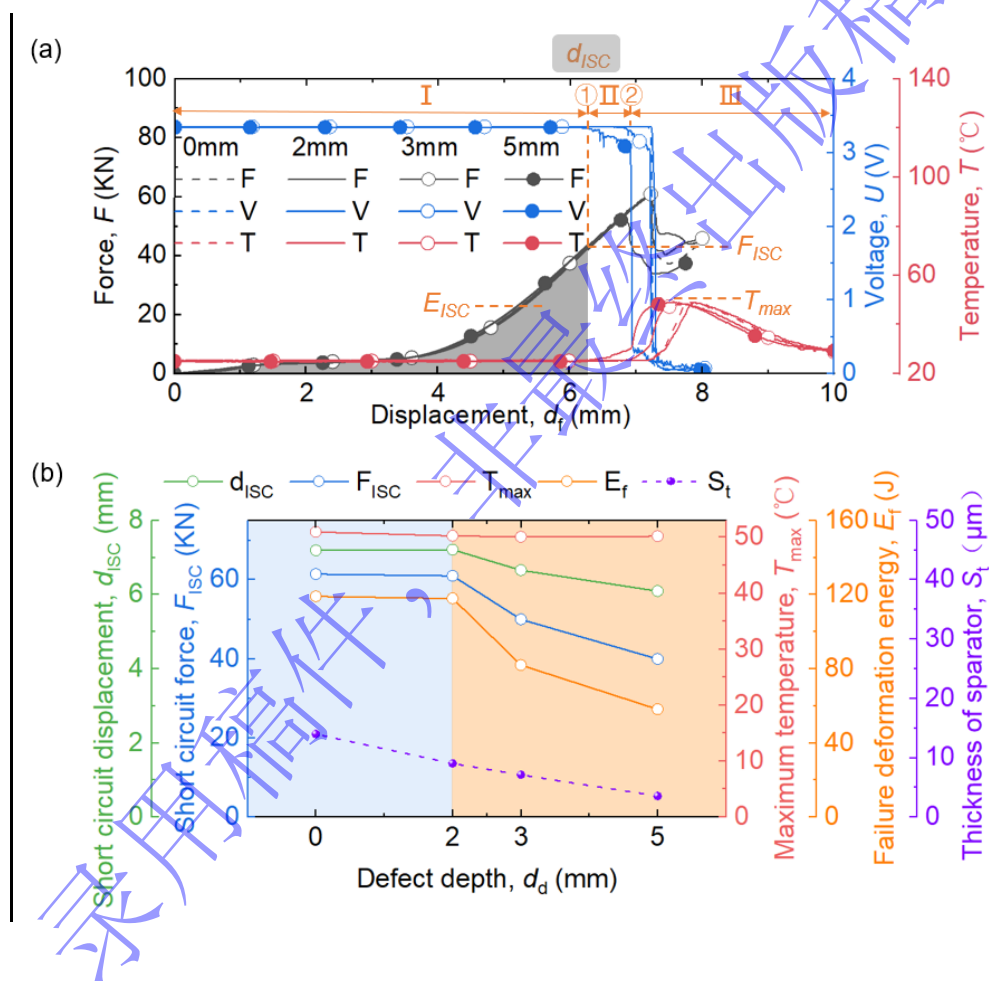
图2 缺陷锂离子电池的制备及其机械性能和电化学性能的测试
Fig.2 Preparation of defective lithium-ion batteries and testing of their mechanical and electrochemical properties

2 压痕缺陷电池实验结果

图3(a)展示了0、2、3、5 mm 准静态压痕缺陷电池在准静态平板压缩下的机械-电化学-热耦合响应，可以看出，除失效点外，不同深度缺陷电池的耦合响应趋势基本相同。对于5 mm 深度缺陷电池，电压首先保持在3.34 V，然后在点①处逐渐下降，最后在点②处剧烈下降。因此，5 mm 深度缺陷电池的响应可以分为3个阶段：阶段Ⅰ（电压恒定）、阶段Ⅱ（电压逐渐下降）和阶段Ⅲ（电压剧烈下降）。在点①处的对应位移和力分别定义为短路位移 d_{ISC} 和短路力 F_{ISC} 。从0 mm 到短路位移上的力的积分定义为失效变形成能 E ，用于分析缺陷电池的能量吸收能力。新电池的表面温度在阶段Ⅰ保持在25 °C，并在短路发生时逐渐升高到最高温度（ T_{max} ）50.2 °C。为了更好地研究缺陷深度的影响，提取了5个关键参数，即 T_{max} 、 d_{ISC} 、 F_{ISC} 、 E 以及缺陷处隔膜厚度 S_f 随缺陷深度的变化（图3(b)）。其中，隔膜厚度是拆解有缺陷的电池后测得。 T_{max} 随着缺陷深度的变化保持恒定，这表明锂离子电池（LIBs）的短路模式和面积是一致的^[25]。 d_{ISC} 最初保持恒定，当缺陷深度达到2 mm 时开始减小，因此2 mm 是压痕缺陷电池的机械安全边界。通过对隔膜厚度的分析发现，随着缺陷深度的增加，隔膜的压缩程度增大导致厚度减小和孔隙率增加，隔膜阻碍电子移动的能力也随之下降^[26]。所以，较薄的隔膜在二次加载过程中更容易破裂，增加了短路提前的风险。通过测量发现2 mm 缺陷深度下，隔膜厚度为8.9 μm 。当隔膜初始厚度薄于8.9 μm 时，缺陷电池二次加载时的短路风险增加，因此，将隔膜厚度8.9 μm 作为缺陷电池机械安全的判据。 F_{ISC} 和 E_f 也在缺陷深度达到2 mm 时开始减小，表明大变形降低了LIB 的承载能力和能量吸收能力。

为了研究缺陷电池的电化学性能，进行了电池的循环实验（图3(c)）。新电池的0.1C 容量在500 个循环中从4.9 Ah 逐渐减少到4.29 Ah。新电池的容量退化是由固体电解质界面（solid electrolyte interface, SEI）膜的形成、锂离子的损失和活性材料的损失引起的^[27-28]，属于锂离子电池的自然循环老化。缺陷深度小于3 mm 的电池的容量退化行为与新电池相同，表明轻微的形变不影响电池的容量。

然而，对于缺陷深度为 5 mm 的电池，其容量从第 100 个循环出现显著下降，在第 500 个循环减少到 3.31 Ah。为了更好地说明，提取电池在第 500 个循环时的容量保持率 R_C （当前容量/初始容量），如图 3(d)所示。容量保持率随着缺陷深度的变化先保持不变，在缺陷深度达到 3 mm 后开始下降。因此，缺陷电池的电化学安全边界为 3 mm。为了揭示其电化学衰退机制，拆解对比了循环前和第 500 个循环后的缺陷电池，发现缺陷电池的正极活性材料仅有轻微的裂痕，而负极活性材料部分出现了粉碎脱粘。具体来说，缺陷深度为 5 mm 的缺陷电池在第 500 个循环后，其负极出现石墨脱落造成了容量的衰减（图 3(d)）。进一步，提取不同缺陷深度下的石墨保持率 R_G （仍附着在铜上的石墨面积占负极面积的百分比），如图 3(d)所示。通过 Photoshop 软件统计负极图片上石墨的像素点数 N_G 和负极像素点数 N_N ，来计算 R_G （ $R_G = N_G/N_N$ ），发现第 500 个循环时的容量保持率与石墨保持率的趋势相同。进一步证实缺陷电池的电化学退化主要是由负极石墨的脱落引起的。



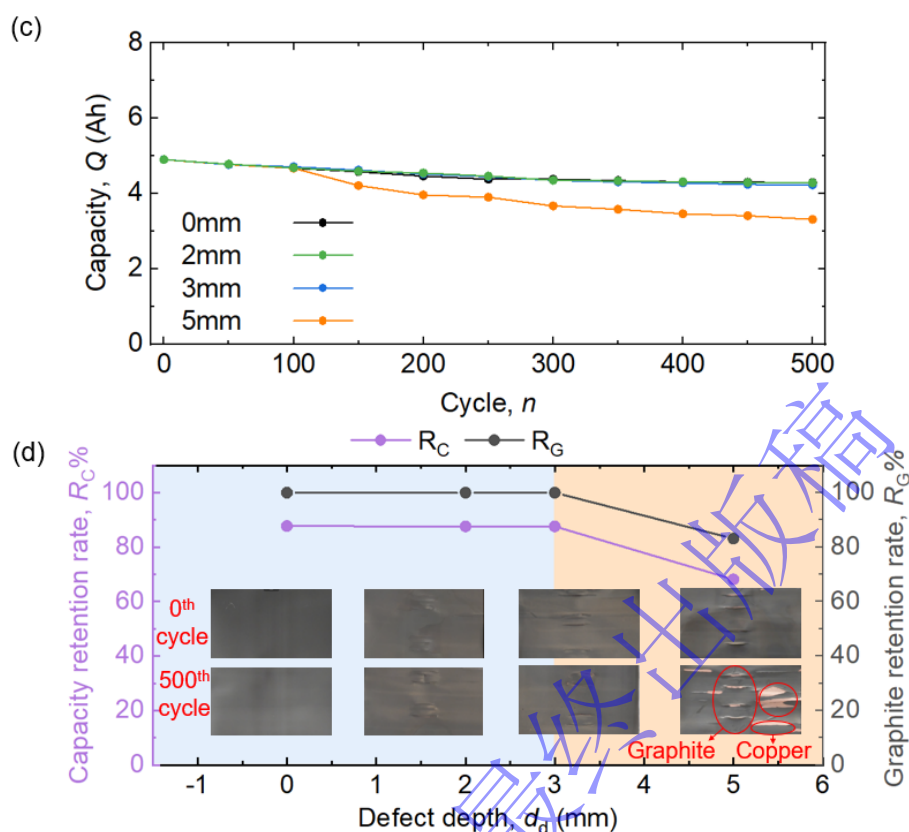


图3 不同缺陷深度下压痕缺陷电池的实验结果

(a)机械性能; (b)机械关键参数; (c)电化学性能; (d)容量保持率和石墨保持率

Fig.3 Experimental results of indentation defect cells under different defect depths

(a) mechanical performance, (b) mechanical critical parameters. (c) electrochemical performance. (d) capacity retention and graphite retention rate.

3 讨论

3.1 加载速度的影响

锂电池在动态加载下的短路比准静态加载下明显提前^[29-30], 为探究加载速度对缺陷电池剩余寿命及安全性能的影响, 对比了不同缺陷加载速度 (1 mm/min、1 和 6 m/s) 造成的压痕缺陷电池在准静态平压下的力-电-热耦合响应, 如图 4(a)~(d)所示。实验结果表明, 当缺陷深度小于 2 mm 时, 加载速度对压痕缺陷电池的机械安全性影响较小。但是 6 m/s 产生的 2 mm 缺陷会让锂电池的微短路位移提前, 这说明虽然高加载速度下 2 mm 缺陷电池的机械性能没有明显的变化, 但是内部已经出现了微损伤。随着缺陷深度的增加, 加载速度对于缺陷电池的影响逐渐增大。当加载速度增大到 6 m/s 时, 3 mm-5 mm 缺陷电池出现了明显的短路提前。结果表明加载速度对缺陷电池的影响随着缺陷深度的增大而放大。为了进一步探究加载速度的影响, 以 3 mm 缺陷为例, 提取不同加载速度下各项关键性能参数如图 4(e)所示。当加载速度小于 1 m/s 时, 短路位移、短路载荷和失效变形能保持不变, 而加载速度达到 6 m/s 时, 短路位移、短路载荷和失效变形能出现下降。随着加载速度的增加, 即使缺陷深度相同, 锂电池也会产生更严重的损伤。这与高速冲击下的惯性效应以及材料应变率效应相关。相较于低速加载, 高速冲击下材料的惯性和应变率更大。而负极石墨为脆性材料, 因此它更容易产生粉碎脱粘, 形成的锋利断面容易在二次加载中刺破隔膜, 提前触发短路。因此, 动态加载造成的

缺陷是电池安全性能研究的关键。

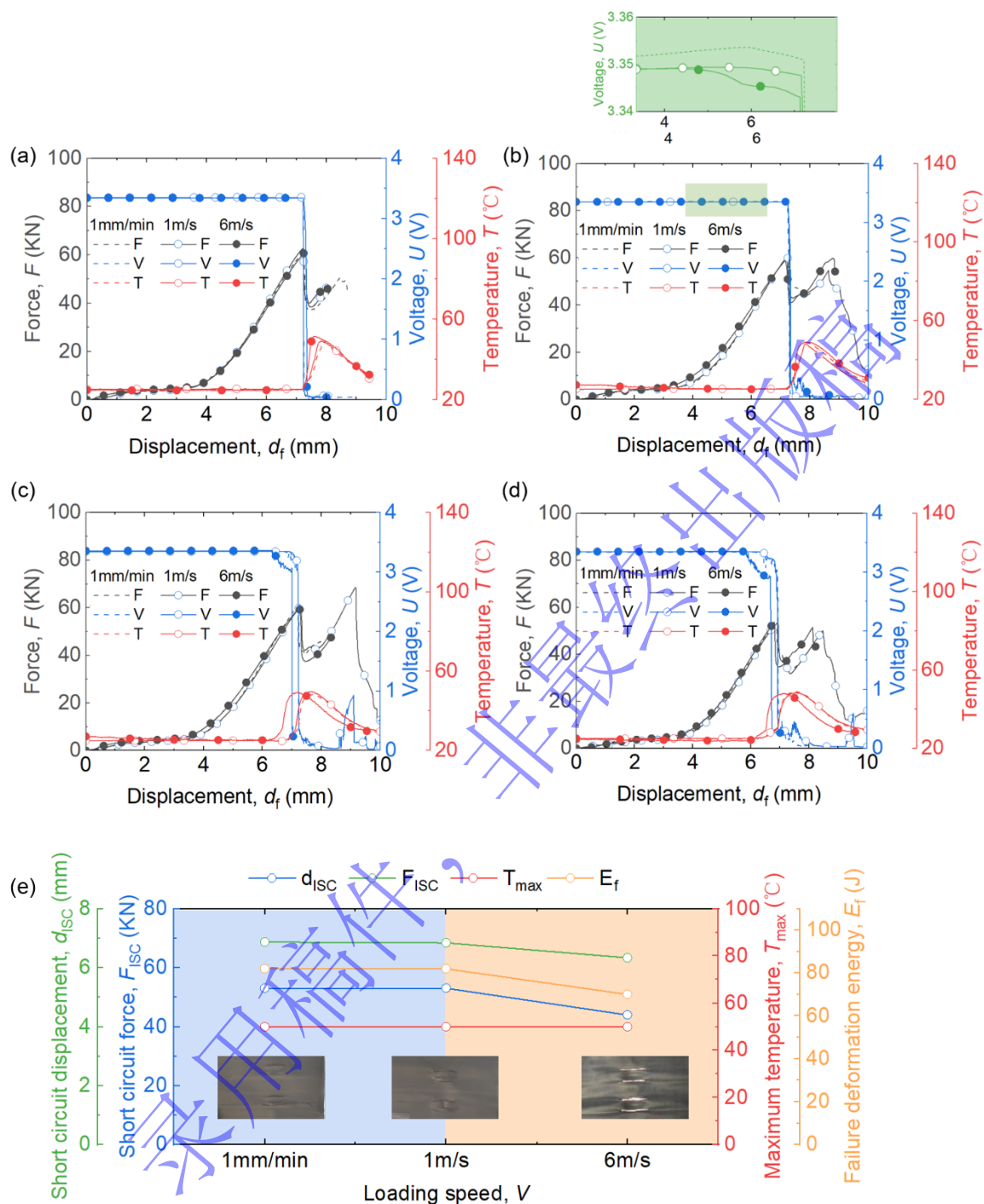


图 4 不同缺陷加载速度下压痕缺陷电池的实验结果:

(a)0mm 缺陷; (b)2mm 缺陷; (c)3mm 缺陷; (d)5mm 缺陷; (e): 3mm 缺陷电池的机械关键参数

Fig. 4 Experimental results of indentation defective cells under different loading speeds:

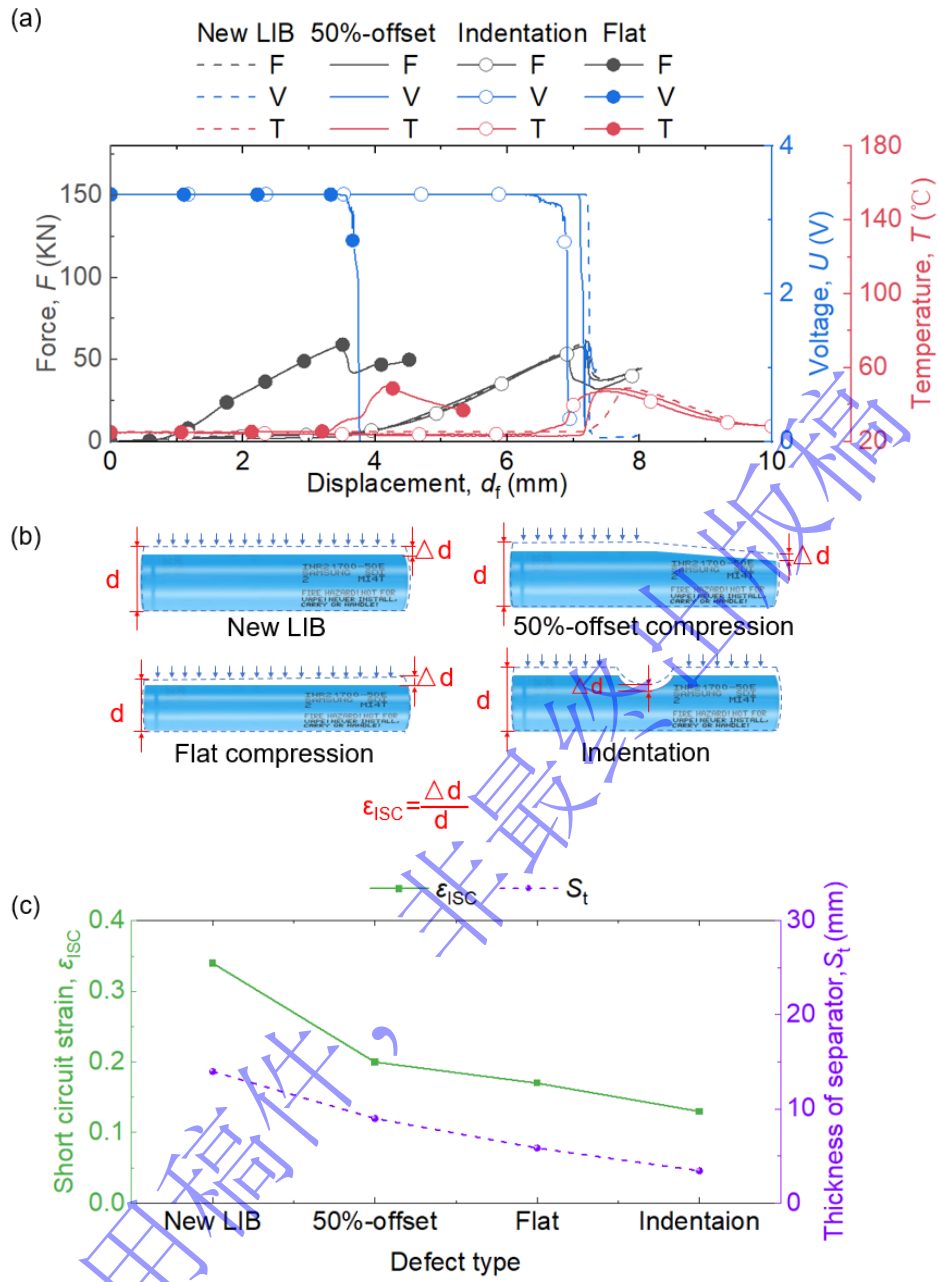
(a) 0mm-defect; (b) 2mm-defect; (c) 3mm-defect; (d) 5mm-defect; (e) mechanical critical parameters of 3mm-defect cell

3.2 缺陷类型的影响

锂离子电池 (LIBs) 受到各种外物的机械碰撞, 会导致不同类型的初始缺陷。因此, 本节分析了 1 mm/min 下 3 种典型缺陷类型, 即压痕、50%偏置压缩和平板压缩对剩余使用寿命及安全性能的

影响。对比了 5 mm 缺陷深度下, 3 种缺陷类型电池在平压下的力-电压-温度耦合响应(图 5a)。结果显示, 不同缺陷类型的力-电-热响应具有相同的趋势, 它们的短路力和最高温度相同。然而, 值得注意的是, 平板压缩缺陷电池的屈服点与其他电池显著不同。平板压缩缺陷电池的屈服位移为 0.8 mm, 比其他缺陷电池提前约 3 mm。平板压缩缺陷电池在制造缺陷时会产生整体形变, 这使得电池在二次加载时与平板压头接触的是缺陷部分, 这部分的隔膜已经变薄, 电池也更容易失效。压痕缺陷电池在缺陷制造时产生的是局部缺陷, 在二次加载时与平板压头首先接触的是无缺陷部分, 因此二次加载过程中, 同样的加载位移下, 对缺陷部分的压缩程度较低, 使得压痕缺陷电池的二次加载安全性强于平压缺陷电池。为了更好地讨论缺陷类型对短路的影响, 不再使用简单的 d_{ISC} 标准, 而是提出了短路应变 ε_{ISC} 的概念。定义 ε_{ISC} 为第二次加载中缺陷区域的压缩位移与缺陷电池直径的比值, 即 $\varepsilon_{ISC} = \Delta d/d$ (图 5b)。其中, d 为缺陷电池直径, Δd 为缺陷部分最大压缩位移。缺陷部分的隔膜厚度 t_s 越小, 电池越容易在二次加载中短路, 达到短路时所需的应变 ε_{ISC} 越小。因此, 在准静态缺陷下, 隔膜厚度可以作为评估各种缺陷电池机械安全性的统一标准。进一步, 提取隔膜厚度 S_t 和短路应变 ε_{ISC} 随缺陷类型变化的曲线如图 5c 所示。结果表明, ε_{ISC} 确与 S_t 成正相关, 顺序为新电池 > 50% 偏置压缩 > 平板压缩 > 压痕。此外, 新电池、50% 偏置压缩电池、平板压缩电池和压痕电池的 E_f 值分别为 119 J、102 J、85 J 和 61 J。值得注意的是, 尽管平板压缩缺陷电池的短路位移 (3.5 mm) 小于压痕缺陷电池 (6.2 mm), 但其仍具有较大的能量吸收能力 ($E = 85$ J)。

此外, 还评估了这些电池的容量衰减, 以探讨缺陷类型如何影响电化学性能(图 5d)。结果显示, 经过 500 次循环后, 不同电池的容量依次为: 新电池 (4.32 Ah)、50% 偏置压缩电池 (3.95 Ah)、平板压缩电池 (3.49 Ah) 和压痕电池 (3.34 Ah)。对于压痕缺陷电池, 容量在第 100 次循环后出现异常衰减, 低于平压缺陷电池 (200 次) 和 50% 偏置压缩缺陷电池 (300 次)。这表明压痕缺陷电池在循环老化中的初始损伤最大。为了进一步阐明缺陷电池容量衰减的机制, 计算了第 500 次循环时的容量保持率和石墨保持率(图 5e)。石墨保持率的顺序与容量保持率一致, 这验证了之前提出的石墨脱落导致容量衰减的机制。



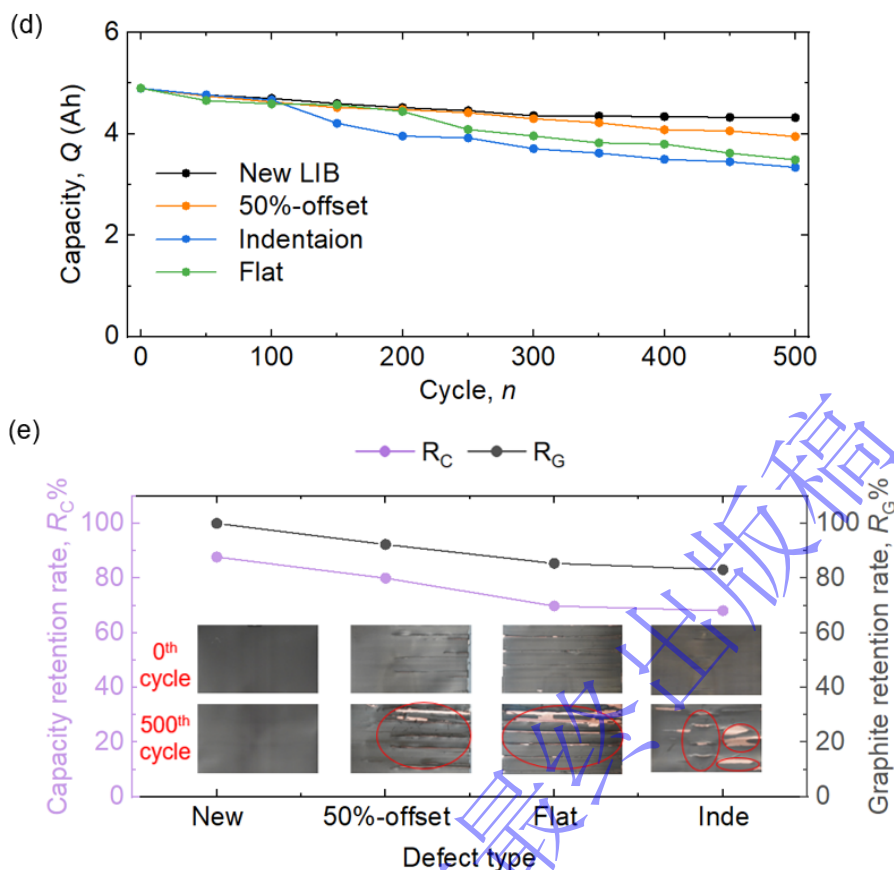


图 5 不同缺陷类型下缺陷电池的实验结果：(a)机械性能；(b)短路应变 ϵ_{ISC} ；(c)机械关键参数；(d)电化学性能；(e)容量保持率和石墨保持率

Fig.5 Experimental results of defect cells under different defect types. (a) mechanical performance, (b) short circuit strain ϵ_{ISC} . (c) mechanical critical parameter. (d) electrochemical performance. (e) capacity retention rate and graphite retention rate.

4 结 论

缺陷电池的安全性随缺陷深度的增加而降低。对于压痕缺陷电池，机械安全边界和循环安全边界分别为 2 mm（压缩率为 9.5%）和 3 mm（14.3%）。通过拆解实验确定了隔膜薄化降低机械安全性的机制和石墨脱粘降低电化学性能的机制。根据量化隔膜厚度，确定了缺陷电池（准静态预载）机械特性的失效准则（隔膜厚度为 8.9 μm ）。相比于缺陷电池（准静态预载），高冲击速度的缺陷电池（动态预载）具有更高的危险性。由于惯性以及材料的动态效应，缺陷电池（动态预载）的负极颗粒更容易脱落，使得隔膜在二次加载的过程中容易被刺破而触发提前短路。提出了短路应变来评估不同缺陷类型电池的机械性能：新电池 > 50%偏置压缩 > 平板压缩 > 压痕，还评估了其循环容量的衰减，阐明了循环过程中石墨脱粘引起容量下降的机制。上述结果有助于探索缺陷锂电池的性能变化和退化机制，以及锂电池的碰撞安全设计。

参考文献：

- [1] COMELLO S, GLENK G, REICHELSTEIN S. Transitioning to clean energy transportation services: life-cycle cost analysis for vehicle fleets [J]. Applied Energy, 2021, 285: 116408. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116408.
- [2] MANIRATHINAM T, NARAYANAMOORTHY S, GEETHA S, et al. Assessing performance and satisfaction of micro-

- mobility in smart cities for sustainable clean energy transportation using novel APPRESAL method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 436: 140372. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140372.
- [3] CHU S, MAJUMDAR A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future [J]. *Nature*, 2012, 488(7411): 294-303. DOI: 10.1038/nature11475.
- [4] CHEN B, XIONG R, LI H L, et al. Pathways for sustainable energy transition [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 1564-1571. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.372.
- [5] GANDOMAN F H, JAGUEMONT J, GOUTAM S, et al. Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: basics, progress, and challenges [J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113343. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113343.
- [6] TAO J J, WANG S L, CAO W, et al. A comprehensive review of state-of-charge and state-of-health estimation for lithium-ion battery energy storage systems [J]. *Ionics*, 2024, 30(10): 5903-5927. DOI: 10.1007/s11581-024-05686-z.
- [7] ZUBI G, DUFO-LÓPEZ R, CARVALHO M, et al. The lithium-ion battery: state of the art and future perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 89: 292-308. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002.
- [8] DIOUF B, PODE R. Potential of lithium-ion batteries in renewable energy [J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 375-380. DOI: 10.1016/j.renene.2014.11.058.
- [9] LIU B H, JIA Y K, 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. DOI: 10.1039/C8TA08997C.
- [10] RUIZ V, PFRANG A, KRISTON A, et al. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1427-1452. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.195.
- [11] SEVARIN A, FASCHING M, RAFFLER M, et al. Influence of cell selection and orientation within the traction battery on the crash safety of electric-powered two-wheelers [J]. *Batteries*, 2023, 9(4): 195. DOI: 10.3390/batteries9040195.
- [12] SUN P Y, BISSCHOP R, NIU H C, et al. A review of battery fires in electric vehicles [J]. *Fire Technology*, 2020, 56(4): 1361-1410. DOI: 10.1007/s10694-019-00944-3.
- [13] XING Y Y, LI Q M. Evaluation of the mechanical shock testing standards for electric vehicle batteries [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 194: 105077. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.105077.
- [14] SHUAI W Q, LI E Y, WANG H. An equivalent circuit model of a deformed Li-ion battery with parameter identification [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(11): 8372-8387. DOI: 10.1002/er.5500.
- [15] WANG G W, WU J J, ZHENG Z J, et al. Effect of deformation on safety and capacity of li-ion batteries [J]. *Batteries*, 2022, 8(11): 235. DOI: 10.3390/batteries8110235.
- [16] LIU J, MA Z C, GUO Z X, et al. Experimental investigation on mechanical-electrochemical coupling properties of cylindrical lithium-ion batteries [J]. *Energy*, 2024, 293: 130536. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130536.
- [17] JIA Y K, LIU B H, HONG Z G, et al. Safety issues of defective lithium-ion batteries: identification and risk evaluation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(25): 12472-12484. DOI: 10.1039/D0TA04171H.
- [18] CHEN X P, YUAN Q, WANG T, et al. Experimental study on the dynamic behavior of prismatic lithium-ion battery upon repeated impact [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 115: 104667. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104667.
- [19] 朱瑞卿, 胡玲玲, 周名哲. 锂电池多次冲击下的失效模式及损伤机制 [J]. *固体力学学报*, 2023, 44(6): 795-804. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2023.032.
- ZHU R Q, HU L L, ZHOU M Z. Failure modes and damage mechanisms of lithium-ion batteries under repeated impacts [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2023, 44(6): 795-804. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2023.032.
- [20] 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*, 2024. 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*, 2024. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0312.
- [21] 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. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.141192.
- [22] 顾丽蓉, 王敬德, 张新春, 等. 挤压/冲击工况下圆柱形锂离子电池失效的影响因素分析 [J]. *高压物理学报*, 2024, 38(4): 045301. DOI: 10.11858/gywlb.20240708.
- GU L R, WANG J D, ZHANG X C, et al. Analysis of influencing factors of failure for cylindrical lithium-ion batteries under compression/impact conditions [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(4): 045301. DOI: 10.11858/gywlb.20240708.
- [23] LIU B H, JIA Y K, YUAN C H, 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.
- [24] LI J N, LI W, SONG J Y, et al. Accurate measurement of the contact resistance during internal short circuit in lithium-ion batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2022, 169(2): 020505. DOI: 10.1149/1945-7111/ac4c79.
- [25] SANTHANAGOPALAN S, RAMADASS P, ZHANG J. Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 550-557. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.05.002.
- [26] YUAN C H, WANG L B, YIN S, et al. Generalized separator failure criteria for internal short circuit of lithium-ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 467: 228360. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228360.
- [27] LIU J L, DUAN Q L, QI K Z, et al. Capacity fading mechanisms and state of health prediction of commercial lithium-ion battery in total lifespan [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46: 103910. DOI: 10.1016/j.est.2021.103910.
- [28] REDONDO-IGLESIAS E, VENET P, PELISSIER S. Modelling lithium-ion battery ageing in electric vehicle applications—calendar and cycling ageing combination effects [J]. *Batteries*, 2020, 6(1): 14. DOI: 10.3390/batteries6010014.
- [29] LIU Y J, XIA Y, XING B B, et al. Mechanical-electrical-thermal responses of lithium-ion pouch cells under dynamic loading: a comparative study between fresh cells and aged ones [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 166: 104237. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104237.
- [30] WANG L B, LI J P, CHEN J Y, et al. Revealing the internal short circuit mechanisms in lithium-ion batteries upon dynamic loading based on multiphysics simulation [J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121790. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121790.