储能测试与评价

X射线断层扫描技术在电池失效分析中的应用

许厚德[1]，封文聪[2]，陈 伟[2]，罗 雯[1,2]
（[1]武汉理工大学材料科学与工程学院，湖北 武汉 430070；[2]武汉理工大学材料复合新技术全国重点实验室，湖北 武汉 430070）

摘 要：随着新能源汽车与便携式储能设备的快速迭代，高安全、长寿命电池成为产业研发核心，而内部缺陷引发的失效问题是制约其性能升级的关键瓶颈。传统破坏性检测难以兼顾试样完整性与动态过程捕捉，无法满足失效机理精准解析的需求，需要高效无损可视化技术提供支撑。本文聚焦X射线CT高精度无损成像技术，阐述其在电池失效分析中的应用机制，包括在不破坏电池的前提下，通过二维断层切片或三维模型呈现内部结构及缺损状况，完成电极界面剥离、活性物质团聚等缺陷分析与内层微观尺寸精准测量。同时重点介绍其在锂电池（过充过放、高低温工况）与水系电池（枝晶生长、析气副反应）等典型场景下的失效检测应用，通过动态追踪缺陷萌生扩展过程，构建缺陷演变与性能衰减的关联机制。最后，本文归纳了X射线CT技术的核心优势与应用价值，展望了多表征联用、智能化分析、标准化与产业化落地的核心发展方向，为高安全长寿命电池的研发与产业应用提供理论与实践支撑。

关键词：X射线断层扫描技术；电池；失效分析；三维成像
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0192
中图分类号：TM 912 文献标志码：A 文章编号：2095-4239（2026）08-3366-16

The application of X-ray computed tomography in battery failure analysis

XU Houde[1], FENG Wencong[2], CHEN Wei[2], LUO Wen[1,2]
([1]School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; [2]State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: With the rapid iterative development of electric vehicles and portable energy storage devices, high-safety, long-cycle-life batteries have become a central focus of industrial research and development. At the same time, failure caused by internal defects has become a major performance bottleneck. Conventional destructive testing approaches cannot balance sample integrity with the observation of dynamic processes, and therefore fails to fully meet the need for accurate failure mechanism analysis. Therefore, there remains a strong demand for novel nondestructive visualization approaches. This paper focuses on X-ray computed tomography (CT), a high-precision nondestructive imaging technology, and explains its role in battery failure analysis. Without damaging the battery, X-ray CT can reveal internal structures

收稿日期：2026-03-05；修改稿日期：2026-04-30。
基金项目：国家重点研发计划（2022YFB2404300）。
第一作者：许厚德（2003—），男，硕士研究生，研究方向为水系电池与原位表征，E-mail：373938@whut.edu.cn；通信作者：罗雯，教授，研究方向为电池材料与电子器件，E-mail：luowen_1991@whut.edu.cn。
引用本文：许厚德, 封文聪, 陈伟, 等. X射线断层扫描技术在电池失效分析中的应用[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3366-3381.
Citation：XU Houde, FENG Wencong, CHEN Wei, et al. The application of X-ray computed tomography in battery failure analysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3366-3381.

and defect states—such as electrode interface delamination and active material agglomeration—through 2D tomographic slices or 3D models, enabling precise measurement of internal microstructural dimensions. The paper also highlights applications of X-ray CT in failure detection, including for lithium batteries subjected to overcharge, overdischarge, and high/low temperature operating conditions, as well as aqueous batteries experiencing dendrite growth and gas-evolution side reactions. By dynamically tracking defect initiation and propagation, X-ray CT helps establish the relationship between defect evolution and performance degradation. Finally, this paper summarizes the main advantages and application value of X-ray CT and outlines future development directions, including multimodal characterization coupling, intelligent data analysis, standardization, and industrial application.

Keywords: X-ray computed tomography (X-ray CT) technology; batteries; failure analysis; 3D imaging

随着移动电子设备、电动汽车与规模化储能产业的快速发展，高性能储能电池已成为新能源领域的核心支撑。其中，锂离子电池凭借高能量密度、长循环寿命等优势，已在交通运输、移动通信、航空航天、便携式电子设备等领域占据市场主导地位，成为当前储能技术研究与产业应用的核心体系[1-2]。随着新能源汽车与高端储能场景对电池性能要求的持续提升，进一步提升锂离子电池的能量密度、循环稳定性与安全可靠性，已成为学术界与产业界共同关注的问题。与此同时，水系电池凭借本征高安全性、低成本、环境友好及高离子电导率等独特优势，在大规模固定式储能、低功耗便携式电子设备等领域具备应用前景，成为新型储能电池体系的新兴研究方向[3]。

然而，电池在制备、服役全生命周期中，由内部微观缺陷萌生、扩展引发的性能衰减与安全事故，已成为制约其性能升级与规模化应用的核心瓶颈。电池失效是电化学反应、热效应与力学响应多场耦合的复杂过程，涵盖从纳米级活性颗粒开裂、界面结构劣化，到微米级枝晶生长、产气膨胀，再到宏观电芯形变、内短路热失控的多尺度演化过程。精准解析失效机理、实现缺陷早期预警，高度依赖高性能的表征检测技术，但当前主流的电池失效分析表征手段仍面临诸多难以突破的技术难题。

传统破坏性表征技术需对电池进行切割、抛光等侵入式预处理，不仅破坏了样品的原始结构与服役状态，无法实现缺陷演化过程的动态追踪，还易因样品制备引入人工干扰，难以厘清失效行为的因果关系。常规无损检测手段虽可保留样品完整性，但存在空间分辨率不足、三维空间定位能力缺失、微纳尺度早期缺陷识别能力弱等问题，无法实现缺陷的精准量化与多尺度关联分析。而原位表征技术方面，现有手段难以适配电池真实充放电、高低温、滥用工况等复杂服役环境，无法同步实现结构演化的动态追踪、多维度信息的同步获取与全生命周期失效链路的完整构建，严重制约了电池失效机理的深度解析与安全防护技术的开发。

X射线计算机断层扫描（X-ray computed tomography，X射线CT）检测是一种利用X射线进行内部结构成像的非接触式无损技术[4]。相较于传统表征手段，X射线CT技术应用于电池失效分析具有一些独特优势。其一，全尺度非破坏性表征能力，可在不破坏电池结构、不改变样品原始服役状态的前提下，实现从宏观电芯装配缺陷到微观活性颗粒损伤的跨尺度成像，解决了传统破坏性检测无法兼顾样品完整性与微观结构解析的难点。其二，三维可视化与精准定量化分析能力，通过多角度投影数据重构获得二维断层切片与三维结构模型，可精准定位内部缺陷的空间位置、尺寸与分布特征，定量分析孔隙率、颗粒尺寸分布、裂纹扩展程度、界面剥离厚度等关键参数，弥补了常规无损检测定量能力不足、缺陷定位模糊的缺陷。其三，原位动态追踪能力，可适配充放电、高低温、过充过放等多种原位服役工况，动态追踪缺陷从萌生、扩展到最终失效的全生命周期演化过程，厘清缺陷演变与电池性能衰减的内在关联，为失效机理的精准解析提供了直接的实验支撑。其四，宽体系多场景适配性，可覆盖锂离子电池、固态电池、水系电

池等主流储能电池体系，适配循环老化、滥用工况、极端环境服役等多种典型失效场景，为不同体系电池的失效机制研究提供了统一的高性能表征平台[5-9]。

基于此，本文聚焦X射线CT高精度无损成像技术，系统阐述其在电池失效分析中的应用机制，梳理其在锂电池、水系电池等典型体系与服役场景下的失效检测应用进展，归纳当前技术应用面临的核心瓶颈，并展望其未来发展方向，以期为高安全长寿命储能电池的研发与产业化应用提供理论与实践支撑。

1 X射线CT技术

1.1 X射线CT技术检测电池的基本原理及应用

X射线CT成像的基本原理是通过利用X射线在穿透样品过程中的衰减规律来获取物体的内部结构信息。图1示意了X射线CT用于电池检测的工作原理，即基于X射线穿透物质时的衰减特性，其核心装置包含X射线源、可360°旋转的电池样品台、射线探测器及数据处理系统。因电池内部不同组分对X射线的吸收能力存在差异——铜/铝集流体、活性物质团聚体等原子序数或密度较高的组分吸收强，会使穿透后的射线强度弱，对应探测器接收的弱信号在图像中呈亮区，而电解液、隔膜或产气等吸收弱的组分则对应暗区。检测时样品台带动电池逐步旋转，多角度采集投影图像，形成记录全角度衰减信息的正弦图，随后通过滤波反投影等算法对正弦图重构，得到电池的二维断层切片或三维模型，进而直观呈现电极界面剥离、枝晶生长、产气等内部结构与缺陷，为电池失效分析提供支撑[10]。

在电池研究中，X射线CT技术通常包括二维X射线投影成像和三维X射线CT两类[11-12]，二维X射线投影成像通过单次X射线穿透获取二维图像，主要用于快速筛查电池宏观结构特征，优势是扫描速度快、操作简便、检测成本低，但缺乏空间深度信息，易因内部结构重叠导致缺陷定位模糊，难以满足微观分析需求。三维X射线CT通过多角度投影数据重构二维断层切片或三维模型，可精准定位电池内部枝晶生长、微裂纹、电极界面剥离等微观缺陷，还能定量分析孔隙率、颗粒尺寸等参数并动态追踪缺陷演变，其局限在于扫描与数据重构耗时较长、设备成本高、数据处理复杂，难以适配生产线实时快速检测，更适用于实验室深入研究。

按照空间分辨率与视场范围，X射线CT可进一步分为微米级成像与纳米级成像两类。微米级成像适配电芯、极片尺度的结构完整性评估，可清晰识别电池壳体、集流极耳、配套电子元件等宏观结构与装配缺陷，精准定位电芯内部的空洞、夹杂物等缺陷，量化极片悬伸量、阳极偏转的尺寸与均匀性，也可直观表征极片微米尺度的裂纹、界面剥离等循环失效特征；纳米级成像则聚焦电极微纳结构细节的精准解析，可捕捉活性颗粒破裂、微裂纹萌生等微观失效源，是解析颗粒级降解机制的核心手段[11]。

针对微米级成像分辨率不足、纳米级成像视场狭窄，二者分辨率与视场难以兼顾的技术瓶颈，可采用X射线显微镜（XRM）与X射线CT联用的方法实现突破。其核心原理是通过XRM发挥几何光学放大作用，突破单独X射线CT在高分辨率成像时视场受限的瓶颈，实现对电池特定微区的精准放大成像，再结合X射线CT的多角度投影数据采集与重构算法，将放大后的微区信息与全样品结构信息融合，生成兼具高分辨率与完整空间维度的三维图像。相较于单一技术，该联用方法既规避了微米CT与纳米CT的固有局限，又保留了二者非破坏性的核心优势，实现高分辨率微区观测与全样品三维结构表征的协同，可完成从宏观电芯到微观颗粒的全尺度结构表征，既能精准捕捉微观失效源，又能追踪其与宏观性能衰减的关联，同时支持孔隙率、颗粒尺寸分布等关键参数的定量分析，为解析电池失效机制、优化电极结构设计提供更全面的实验依据[13]。其全尺度检测效果如图2所示，既能清晰识别电池壳体、集流极耳、配套电子元件等宏观结构与装配缺陷，精准定位电芯内部的空洞、夹杂物等缺陷，量化极片悬伸量、阳极偏转的尺寸与均匀性，也可直观表征电极界面剥离这一典型循环失效特征，为电池制备工艺质控、全生命周期失效机理解析提供全面的可视化与定量化支撑。

1.2 X射线CT技术检测电池的特点

尽管目前已有多种常规工具被广泛应用于电化学设备或材料的形貌表征，但X射线CT凭借其特点展现出其他技术难以比拟的显著优势。聚焦离子束-扫描电子显微镜（FIB-SEM）、透射电子显微镜

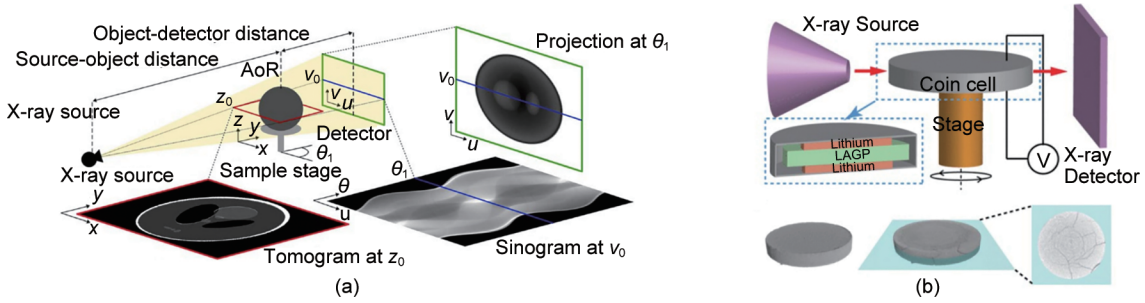

图1　X射线CT工作基本原理图[10]：(a) X射线CT工作原理；(b) X射线CT成像的实验装置

Fig. 1　Diagrams of X-ray computed tomography working principle[10]: (a) X-ray computed tomography working principle; (b) Experimental setup of X-ray computed tomography imaging

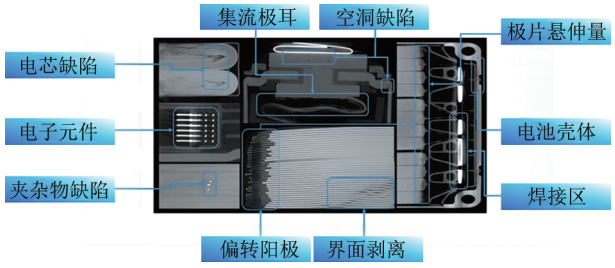

图2　对电池单元及模块组件进行X射线CT检测[13]

Fig. 2　X-ray computed tomography inspection of cell and module components[13]

（TEM）以及二次离子质谱仪等传统手段通常需要在真空环境下操作，这一条件限制使得对于大多数需要保持原始结构的电池体系而言，开展原位研究及实际工况下的观测变得极为困难。此外，上述这些依赖三维重建的技术往往具有破坏性，它们要求对样本进行侵入式预处理，例如切割、抛光或镀膜，而重建后数据的精确分割尤其具有挑战性——原因在于材料内部孔隙结构的存在可能导致成像时的信号穿透与干扰，从而难以准确识别和量化孔隙的尺寸、分布与连通性。

相比之下，X射线CT作为一种非破坏性、非侵入式的成像手段，无需真空条件即可获取样品内部高分辨率的三维图像，这使其适用于对实际电池系统在工作状态或原位环境下的形态变化进行动态监测与定量分析。不仅如此，CT技术还能够依据材料对X射线吸收能力的差异，对不同组分进行区分与图像分割，从而支持对特定电极材料或界面区域的动态过程开展深入研究。表1中就X射线CT与几种常见的电池表征技术进行了系统对比，可为方法选择提供参考。

需要指出的是，尽管X射线CT在断层成像领域具备诸多优势，但对于大多数实验室级别的CT系统而言，其空间分辨率仍相对有限，同时也无法提供化学成分的直接信息，这使得研究人员在探索电池系统中诸如电极/电解质界面等关键区域的精细结构与反应机制时依然面临较大挑战。不过，值得注意的是，CT技术作为一种在电化学领域应用较新的工具，正随着高分辨率纳米CT系统的持续开发与推广而迅速发展。预计在不久的将来，随着成像精度和分割算法的不断提升，X射线CT将能够实现更高清晰度的三维成像与更准确的物质区分，从而逐步成为电池表征中一项常规且强大的分析工具。

表1　材料科学中的常见断层扫描技术

Table 1　Common tomography techniques in materials science

技术	分辨率	视场 (FOV)	破坏性/非破坏性	真空级别	提取的信息
X射线计算机断层扫描（X-ray CT）[14-20]	约10 nm	约100 μm	非破坏性	无需	孔隙率、表面积、迂曲度、三维结构
低温电子断层扫描[21]	约1 nm	约100 nm	破坏性	约10^{-8} kPa	三维纳米结构
聚焦离子束断层扫描（FIB）[22]	约10 nm	约10 μm	破坏性	约10^{-6} kPa	孔隙率、表面积
原子探针断层扫描[23]	约1 Å	约100 nm	破坏性	约10^{-11} kPa	原子排列
核磁共振成像（NMR imaging）[24]	约1 mm	约10 cm	非破坏性	无需	三维断层成像
飞行时间二次离子质谱法[25]	约10 nm	约10 μm	破坏性	约10^{-8} kPa	化学组成

1.3 X射线CT技术的挑战与难点

结合随机生成和电化学建模等工具，有助于揭示不同电池体系的结构-性能关联与潜在限制。然而，在将该方法广泛应用于所有类型的系统之前，仍需要解决一些技术问题。原则上，在处理敏感材料时，分析的所有步骤都必须在保护气氛下进行，这就需要仔细设计样品和转移装置。此外，尽管以纳米级分辨率研究感兴趣区域的可能性使这种方法变得强大，但对于高分辨率工具即纳米CT甚至透射电子显微镜来说，减小样品尺寸仍然是一个挑战，并且经常需要具有比FIB更高的研磨能力的工具，例如等离子体FIB、激光等离子体FIB或宽离子束研磨。与此同时，商用电池的金属外壳、铜/铝集流体等高原子序数组分对X射线存在显著吸收与遮挡效应，会造成内部成像伪影、信号衰减与关键区域失真，已成为原位失效表征的重要瓶颈。相关研究表明，不锈钢外壳与多层集流体的强吸收会大幅降低内部有效射线强度，不仅难以清晰识别界面反应、枝晶生长与产气等失效特征，还会导致定量分析出现明显偏差，且提升X射线能量虽可增强穿透性，但会进一步降低低原子序数组分的成像对比度，难以兼顾穿透深度与分辨率平衡[26-28]。

针对上述瓶颈，现有研究主要通过多技术联用的相关断层扫描策略实现突破。Apeleo Zubiri等人[29]将实验室规模的纳米CT与电子断层扫描相结合，提出一种将电子断层扫描的较高分辨率与纳米CT的更宽视野相结合的成像策略。该研究通过使用更高分辨率的电子断层扫描数据的分割作为训练数据集，机器学习辅助的从CT数据中分割沸石颗粒孔道的精度得到了显著的改善。在电池领域，少数研究成功地将相关断层扫描应用于电极复合材料或隔膜[30-32]。高对比度吸收X射线层析和层析X射线CT相结合，能够获得硅复合阳极的详细微观结构，其中硅颗粒与石墨和碳黏结域区分开来，甚至能够分辨出固体-电解液界面层[29]。然后，使用获得的数据集对单个硅颗粒的电荷分布状态进行建模，在阴极侧，FIB横截面被用来帮助分割$LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$电极的纳米CT数据，这使得孔洞网络和碳键合结构域得以解析[30]。然后，这些信息被成功地与较低分辨率的微型CT扫描相结合，以评估电极的弯曲系数。结合锂离子电池隔膜的X射线CT数据与扫描电子显微镜的横断面图，可在隔膜的多孔网络中随机生成纤维；这些纤维因尺寸过小，无法通过微米级X射线CT直接观察，但研究证实其对有效扩散系数的预测具有重大影响[32]。

2 X射线CT技术在电池失效分析中的技术应用案例

2.1 锂电池的失效分析

锂电池失效是电化学反应、热效应与力学响应多场耦合的复杂过程，其核心失效模式可分为滥用工况诱导的突发失效、循环过程中的渐进式失效两大类[33]。X射线CT凭借无损、多尺度、动态追踪的核心优势，已成为解析锂电池多尺度失效机制的关键工具，相关研究主要围绕三个核心科学问题展开。

2.1.1 过充/过放工况下产气-结构失效的耦合机制

过充/过放是锂电池服役过程中最常见的滥用工况之一，其核心失效链路是电化学反应副反应引发产气、集流体腐蚀，进而诱发结构变形与内短路风险。X射线CT技术为厘清产气行为的演化规律、量化其对结构失效的影响提供了核心支撑。针对过充过程中的产气行为，现有研究表明，副反应产气是过充失效早期结构破坏的核心诱因，产气量与电池荷电状态（SOC）呈正相关，严重过充时产气速率呈指数级增长。因观测工况与CT时间分辨率的差异，不同层面的研究可以实现过充产气失效的全周期机制解析。Finegan等人[34]采用高速X射线CT与热成像联用技术，聚焦过充诱导热失控的瞬态过程，实现了秒级动态追踪，首次捕捉到产气积累引发的电极活性层分层、电池壳体膨胀的连续过程，明确了产气是热失控早期结构破坏的前置诱因，为电池热失控安全防护阈值的设定提供了瞬态数据支撑。图3清晰地展示了因气体积累引发的电极活性层分层现象、气体的形成过程以及随之发生的电池壳体膨胀。同样，Zhang等人[35]则针对渐进式过充的全周期过程，通过实验室级X射线CT系统分析了SOC与产气行为的定量关系，发现随SOC升高，产气引发的电极分离、极片弯曲程度显著加剧，且在严重过充条件下，产气速率呈指数级增长，进一步放大电池失效风险，该研究为电池管理系统（BMS）的过充预警提供了全周期量化依据。两项研究的差异核心在于观测场景的不同，高速CT适配热失控的瞬态过程，可捕捉产气的动态演

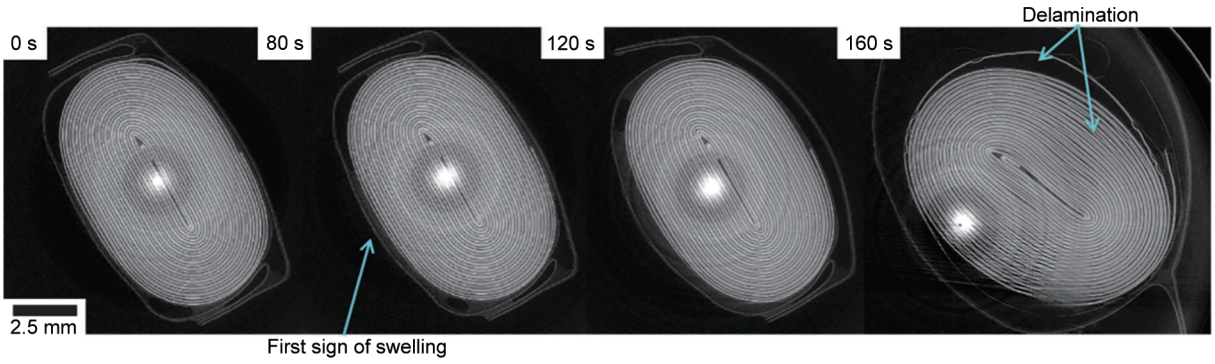

图3　电池过充过程中连续CT所得的带时间戳的水平电池切片[33]

Fig. 3　Time-stamp horizontal cell slices obtained from continuous CT during overcharging of the batteries[33]

化。常规实验室CT更适合长周期渐进式失效的追踪，可实现产气量的精准量化。

针对过放工况的失效机制，现有研究通过X射线CT技术，厘清了过放失效集流体腐蚀，产气膨胀，结构坍塌的核心链路，同时形成了多维度的补充结论。Carter等人[36]通过多尺度CT成像，捕捉到过放后铜枝晶与铜化合物沉积的空间分布特征（图4），完善了铜集流体溶解、迁移、沉积的全过程演化规律。Zhang等人[37]则进一步证实，过放过程不仅会诱发产气膨胀与集流体腐蚀，还会伴随电池温度的急剧变化，明确了热-电耦合对过放失效的促进作用。针对极端工况，Chen等人[38]拓展了低温高倍率场景下的失效研究，证实低温环境下石墨负极动力学迟缓会加剧锂金属沉积与电极结构变形，显著放大过放失效风险；Gao等人[39]则通过X射线CT与表面应变监测技术联用，量化了过放过程中产气孔隙率与电极表面应变的关联，揭示了从产气膨胀到应变累积再到结构开裂的递进失效机制，实现了电化学-力学耦合过程的同步解析。现有研究仍存在一定局限，多数研究聚焦单体电池的过放失效，对电池模组中串并联工况下的过放失效差异性研究不足。同时CT成像对铜枝晶的识别受限于分辨率，纳米级铜枝晶的早期萌生过程仍难以精准捕捉，无法实现过放失效的早期预警[40]。

2.1.2　循环诱导的多尺度机械失效演化规律

锂电池循环过程中，锂离子嵌入和脱出会引发活性物质的膨胀与收缩，诱发从纳米级颗粒裂纹到宏观电芯形变的多尺度机械失效，是电池容量渐进式衰减的核心诱因。X射线CT技术可实现机械失效从萌生到扩展的全链条追踪，相关研究已构建了微观颗粒、介观电极、宏观电芯的多尺度失效理论框架（图5）。

在介观电极级失效层面，现有研究明确了应力集中是电极界面失效的核心诱因。Finegan等人[34]将X射线CT与数字体积相关（DVC）技术联用，精准追踪了锂化过程中电极材料的三维位移与应变场，明确了集流体与活性层的位移不协调引发的应力集中，是电极裂纹萌生、活性层剥落的核心诱因，揭示了应力集中→裂纹扩展→界面剥离→容量衰减的电极级失效路径。Bond等人[11]的研究进一步验证了这一机制，同时发现循环过程中电极裂纹的扩展具有显著的各向异性，与锂离子传输方向高度相关。Komini等人[41]则通过X射线CT定量表征，明确了循环过程中电极颗粒接触面积的衰减规律，阐明了颗粒接触损失对电极接触电阻上升、性能衰减的影响机制，进一步完善了电极级循环失效的定量评价体系。现有研究明确了电极级失效的核心机制，但对于不同体系电极的失效临界应变阈值，仍缺乏系统的量化对比，且多数研究基于非原位测试，原位工况下电极应变的动态演化规律仍需进一步完善。

在微观颗粒级失效层面，活性颗粒的微裂纹萌生与扩展，是电极结构失效的源头。Wade等人[42]通过非原位XRD与X射线CT联用，首次证实了首周充电过程中富镍正极颗粒的微裂纹萌生现象，且裂纹密度与宽度随充电电压升高、循环老化程度加深呈显著上升趋势，结合物相分析结果，明确了机械裂纹与电化学性能衰退的强关联性。Ziesche等人[43]则通过多尺度CT成像，实现了从电芯整体到活性颗粒的跨尺度结构重建，进一步量化了颗粒开裂程度与容量衰减的定量关系，补充了颗粒级失效对宏观性能的贡献权重。两项研究形成了良好互

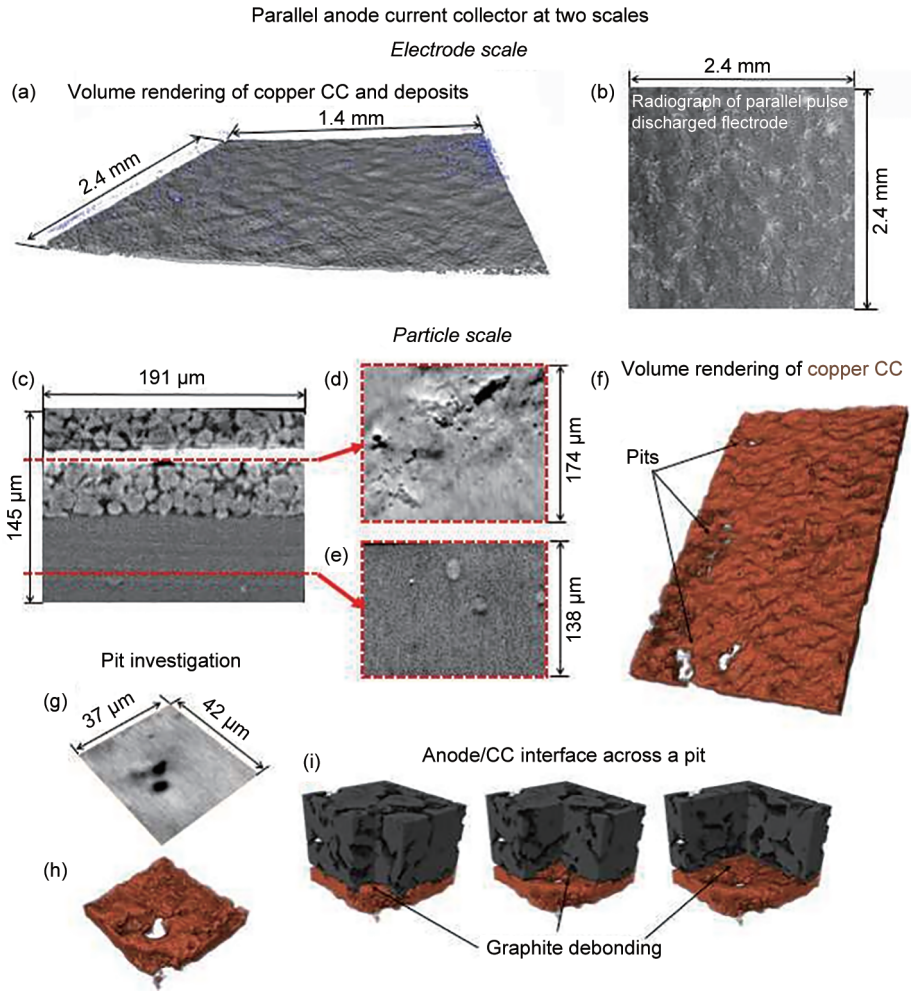

图4　过放工况：铜集流体腐蚀−铜枝晶生长−结构坍塌的多尺度成像铜损伤的电极鳞片分析：(a) 铜集流体（灰色）与铜沉积物（紫色）的体积渲染图；**(b)** 电极鳞片扫描的单张射线照片。**(c)** 铜损伤的颗粒尺度分析；**(d)** 平行电极的横截面切片；**(e)** 含铜沉积物的铜层与三层隔膜横向切片；**(f)** 集流体的体积渲染图。单个凹坑检测结果：**(g)** 颗粒尺度切片区域大凹坑，**(h)** 该区域集流体的体积渲染图，以及 **(i)** 凹坑内阳极材料的体积渲染图，可见部分脱黏现象[36]

Fig. 4　Over-discharge operating conditions: Multi-scale imaging of copper current collector corrosion-copper dendrite growth-structural collapse. Analysis of electrode scale formation due to copper damage: (a) Volume rendering of copper current collector (gray) and copper deposits (purple); (b) Single-ray image of electrode scale scanning; (c) Particle-scale analysis of copper damage; (d) Cross-sectional view of parallel electrodes; (e) Lateral section of copper layer containing deposits and three-layer separator; (f) Volume rendering of current collector. Individual pit detection results: (g) Large pit in particle-scale section area; (h) Volume rendering of current collector in said region; (i) Volume rendering of anode material within pit showing partial delamination phenomena[36]

补，前述工作聚焦首周充放电的早期失效，明确了裂纹萌生的临界条件。后续工作则针对长循环过程中的渐进式失效，量化了裂纹扩展的性能影响，共同构建了从颗粒开裂到活性位点丧失再到容量衰减的失效链路。

针对颗粒级失效表征的标准化难题，Paul 等人[44]基于 XRM 与 X 射线 CT 联用的全尺度表征体系，建立了低分辨率全电芯批量缺陷统计到高分辨率单颗粒损伤解析的标准化表征流程，极大提升了颗粒级失效统计的代表性与准确性，其针对不同上限截止电压下 NMC811 正极的表征结果如图 6 所示，清晰呈现了充电电压升高对正极颗粒开裂的加剧作用。Pfrang 等人[45]还进一步验证了短扫描时间下 X 射线 CT 对阴极颗粒的精准分辨能力，可直接量化颗粒的不对称性、球形度和局部表面粗糙度等形貌参数与电化学活性衰减的关联，为颗粒级失效

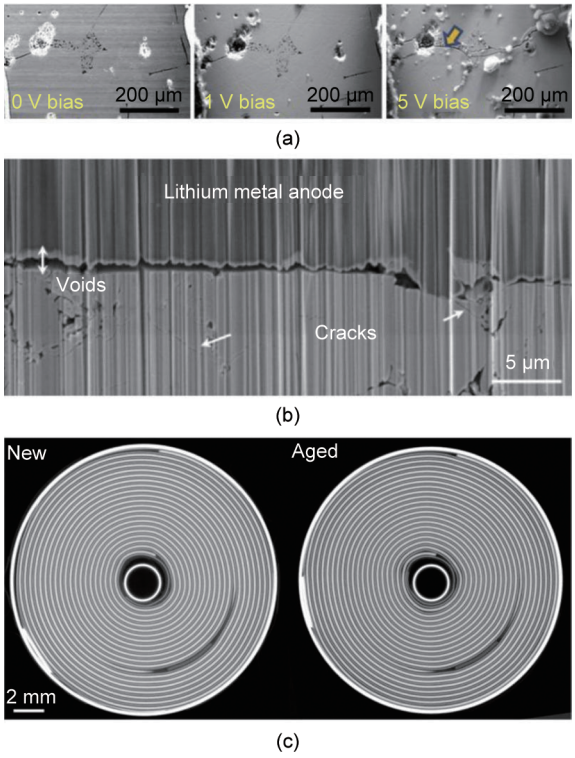

图5　锂离子电池的机械损伤：(a) 电极开裂[11]；(b) 固态电解质损伤[14]；(c) 电池体积变化[45]

Fig. 5　Mechanical damage in lithium-ion batteries: (a) Electrode cracks[11]; (b) Solid electrolyte damage[14]; (c) Battery volume change[45]

的高通量快速评价提供了可行方案。

在宏观电芯级失效层面，X射线CT技术实现了商用电池循环形变的可视化与量化。例如可以通过高分辨率微焦点X射线CT，研究商用18650电池长循环后会出现的电芯卷芯的显著形变与局部塌陷[45]。此外，该技术也可以用来观测热失控前兆下的宏观机械失效，研究发现电池内置安全机制失效后，会出现电极断裂、壳体变形等不可逆结构破坏，且模组中单电芯的机械失效会引发连锁反应，显著放大热失控风险[46]。然而，现有研究多聚焦圆柱电芯，针对软包、方形电芯的循环形变特征与失效机制仍缺乏系统性对比，是后续研究的重要方向之一。如图7所示，X射线CT可清晰捕捉热效应与循环应力共同作用下电池内部产生的形变、裂纹与结构畸变特征，直观呈现热-力耦合下电池从内部微缺陷到宏观结构失效的演变过程。该表征方法可有效识别热诱导结构损伤，为阐明锂电池在高温与循环载荷下的机械失效路径、提升电池热安全与结构可靠性提供重要支撑。

2.1.3　固态电池电解质-界面的力学-化学耦合失效机制

固态电池的核心失效瓶颈，在于固态电解质（SSE）的微观损伤与电极-SSE界面的稳定性劣化，而传统表征手段难以实现无损、动态的界面过程追踪，X射线CT技术为解析其力学-化学耦合失效机制提供了核心支撑。如图8(a)和(b)所示，X射线CT可清晰呈现固态电池电极颗粒的微裂纹形貌与三维空间分布，实现对电解质颗粒内部损伤的直观可视化与定量表征。该成像结果能够精准识别循环过程中产生的微裂纹萌生、扩展与贯通行为，为揭示固态电解质力学-化学耦合失效机制、评估电解质结构稳定性提供关键的可视化依据，同时可为固态电池界面设计与电解质材料改性提供直观的数据支撑。现有研究主要从电解质本体与电极-电解质界面两个维度展开。

在电解质本体失效方面，Hao团队[48]采用X射线纳米CT技术，实现了石榴石基SSE中锂枝晶形态的精确识别与空间分离，研究发现SSE的弹性模量、断裂韧性等力学性能，与外场电化学驱动力共同决定了微裂纹萌生然后扩展再到锂枝晶生长的演化过程，通过高分辨率成像量化了锂枝晶与SSE微观损伤的空间关联特征，为SSE材料的力学性能优化提供了核心方向。

在电极-电解质界面失效方面，Tippens等[14]借助原位X射线CT技术，动态监测了电化学循环中电极-SSE界面相生长引发的机械损伤，研究表明，界面副反应导致的材料断裂对电池阻抗上升的影响，远超界面本征电阻。同时通过CT三维重构与图像分割（图9），定量分析了循环过程中SSE颗粒内部裂纹体积与数量的变化规律，为全固态电池的界面失效以及SSE机械损伤的机制解析提供了直观可靠的实验依据。在此基础上，Yoon等人[49]采用原位X射线CT，动态捕捉了循环过程中界面空隙的萌生、扩展与融合过程，明确了界面形态演化与离子传输效率的关联机制，聚焦可变形第二相对界面稳定性的调控作用，证实第二相可通过形变填充界面空隙、抑制界面裂纹萌生，为固态电池界面改性策略提供了创新性思路。然而，现有研究仍存在明显技术瓶颈，纳米CT对SSE中纳米级界面相的识别能力仍有不足，且多数研究基于纽扣电池体系，面向软包固态电池的大尺寸界面失效表征仍缺

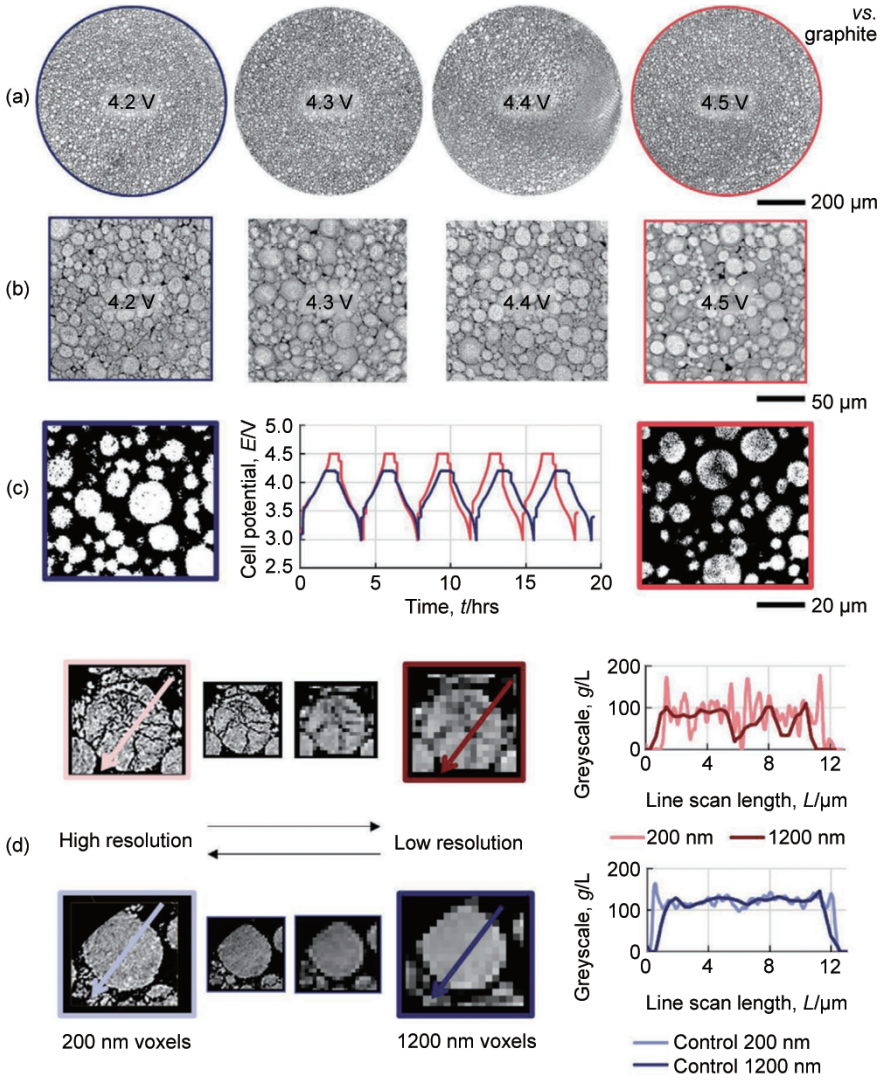

图6 利用X射线CT评估在不同上限截止电压下NMC811正极中电极级和颗粒级的降解情况：(a) 电极级的3D灰度体积渲染图（各向同性体素长度为1.57 μm）；(b) 颗粒级的3D灰度体积渲染图（各向同性体素长度为206 nm）；(c) 从4.2 V和4.5 V结构中提取的2D灰度正交切片，采用相同的灰度阈值以显示灰度变化，并附有随时间变化的电化学电池电势曲线图；(d) 有缺陷颗粒（红色）和原始颗粒（蓝色）的两个示例，以及它们在不同成像分辨率下的颗粒内灰度变化[44]

Fig. 6 Using X-ray computed tomography to assess electrode- and particle- level degradation in NMC811 cathodes taken to various upper cut-off voltages: (a) 3D grayscale volume rendered at the electrode level (1.57 μm isotropic voxel length); (b) 3D grayscale volume renders at the particle level (206 nm isotropic voxel length); and (c) 2D gray- scale ortho-slices taken from 4.2 V and 4.5 V structures with the same grayscale threshold applied to display grayscale variations; accompanied by the electrochemical cell potential plotted with respect to time; (d) two examples of a defective (red) and pristine (blue) particle and their intra-particle grayscale variation with respect to imaging resolution (Color figure online)[44]

乏成熟的技术方案。

2.2 水系电池的失效分析

水系电池凭借低成本、高安全性、环境友好及高离子电导率等优势，在大规模储能、便携式电子设备等领域极具应用潜力[3]。但循环过程中易出现负极枝晶生长、析气副反应、电极结构损伤、隔膜破损等失效问题，严重制约其长循环稳定性[50]。X射线计算机断层扫描技术以无损、三维可视化、动态追踪为核心优势，能突破传统表征局限，捕捉电池内部结构演化规律，为解析失效机制、优化电池设计提供关键支撑。电极失效是水系锌基电池的最常见且最具代表性失效形式之一，涵盖锌负极的多效耦合劣化与正极的结构功能衰退，通过X射线CT技术可清晰追踪两类电极的失效路径与关联

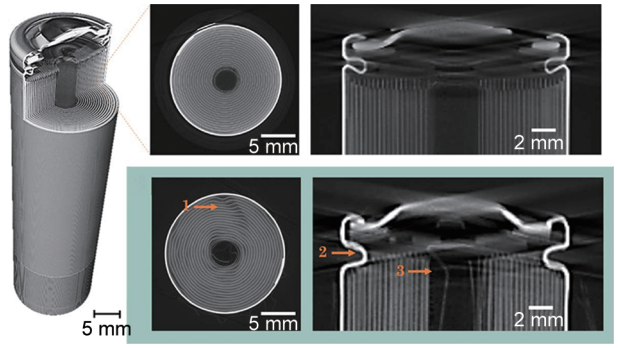

图7　热效应引发形变的X射线CT扫描图[47]

Fig. 7　X-ray CT scan of the deformations caused by the thermal event[47]

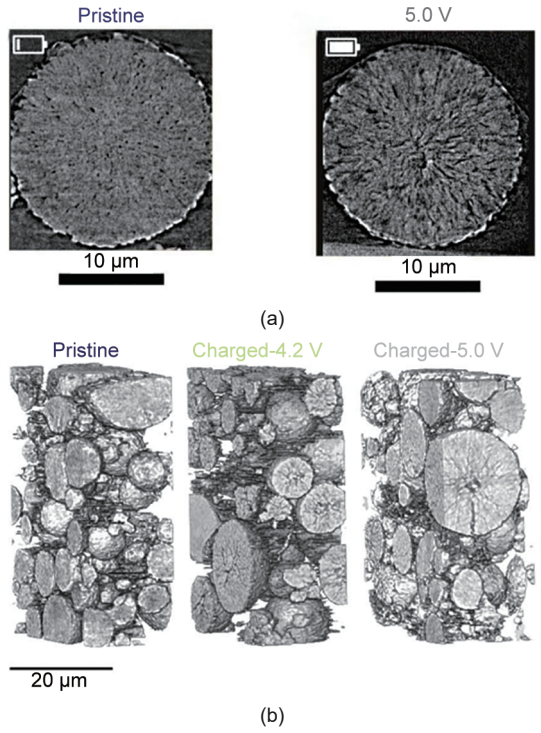

图8　锂电池力学缺陷的X射线CT成像：(a) 电极颗粒裂纹的X射线CT成像；(b) 基于X射线CT的电极裂化三维体绘制结果[11]

Fig. 8　X-ray CT imaging of mechanical defects in lithium batteries: (a) X-ray CT of electrode particle cracks; (b) A 3D volume rendering of electrode degradation based on X-CT[11]

机制。

2.2.1　锌负极枝晶-析气-体积膨胀的协同失效机制

锌负极的多过程耦合劣化是水系锌基电池最核心的失效诱因。现有研究通过X射线CT技术，已构建了锌负极枝晶生长、析气副反应、体积膨胀协同失效的核心理论框架，并形成了多维度的实验验证与优化方案。Liang等人[3]通过系统研究，率先构建了该协同失效的核心理论框架，明确了锌负极多过程耦合劣化是电池性能衰减的核心诱因，同时指出正极退化与负极劣化的协同效应会进一步加速电池性能衰减，为后续研究奠定了核心理论基础。基于该理论框架，后续研究通过原位X射线CT技术，从集流体工程、电极结构设计两个方面，对协同失效机制进行了多方面的实验验证与补充。

在集流体工程研究方面，Scharf等人[50]采用原位X射线显微CT对Zn-AgO水系电池开展长循环失效分析，通过成像精准区分Zn、ZnO及电解液、黏结剂和孔隙区域，首次证实集流体寄生析气是电池循环与储存过程中的关键失效因素，明确了不同集流体的电化学兼容性差异，会显著影响Zn负极腐蚀、ZnO生成及体积膨胀行为。其研究结果如图10所示，清晰呈现了镀锡/镀金不锈钢、镀黄铜/镀金镍等不同集流体对锌负极循环性能的影响，以及循环后锌负极的微观形貌演化与副产物分布特征。后续研究进一步量化了集流体析气对ZnO生成与Zn活性物质损耗的影响，提出了电化学兼容集流体优化策略，为长循环电池的负极设计提供了关键参考[51]。

在电极结构设计研究方面，Di Milano等人[27]通过原位X射线显微CT，系统分析了不同电解液体系与电极结构下锌负极的体积形变、ZnO副产物生长及活性颗粒消耗规律，建立了锌负极形状变化与电池循环寿命的定量关联模型。其后续研究进一步借助相位衬度模式下的原位X射线显微CT，对3D多孔锌海绵电极的循环形态演变开展原位监测，揭示了多孔海绵结构可通过缓解局部电流密度集中、抑制锌枝晶生长，进而提升电池长期循环稳定性的核心机制，为高稳定锌负极的结构设计提供了直接实验支撑[52]。

现有研究仍存在明显局限，多数原位CT研究基于实验室改造的薄型电池，与真实致密电池的服役工况存在显著差异，已有研究证实真实电池构型中界面气泡与枝晶生长行为，与实验室测试电池存在显著不同，因此现有成果向产业化应用的转化仍需进一步验证[26]。

2.2.2　正负极协同失效的主导机制辨析

针对正极失效的核心机制，现有研究通过X射线CT表征证实，MnO_2、V_2O_5等主流正极材料在循

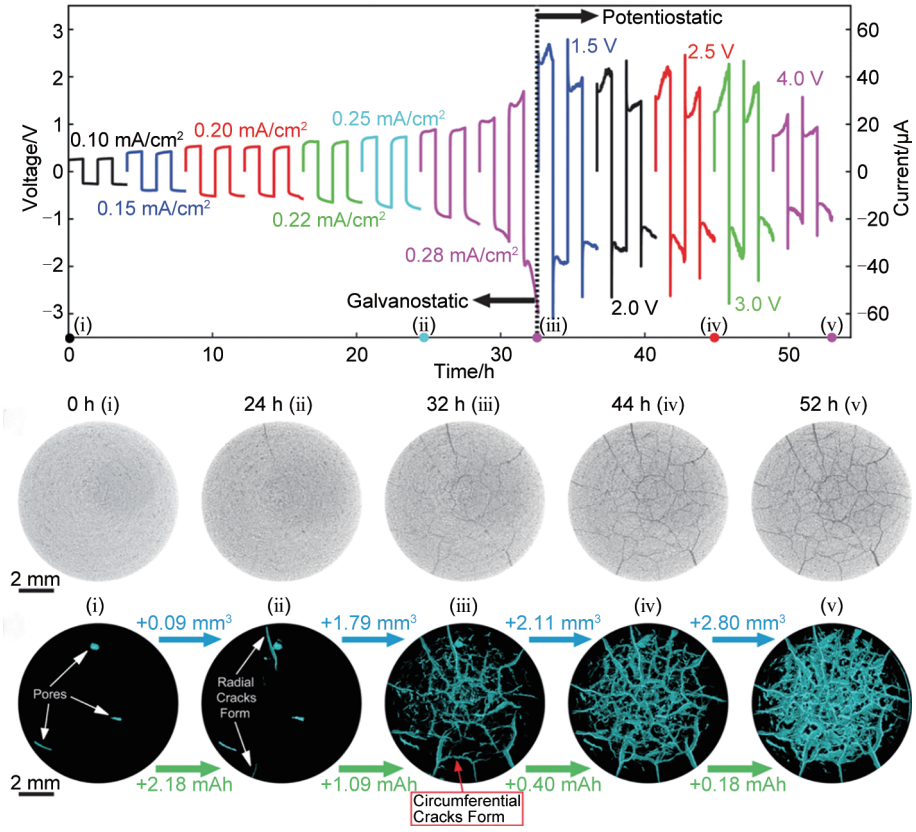

图9 LAGP颗粒的裂纹体积及裂纹数量[14]

Fig. 9 The crack volume and number of cracks within the LAGP particles[14]

环过程中，会发生晶相转变、层间膨胀或活性物质溶解，最终导致结构坍塌与功能失效[51]。Mara等人[53]通过原位X射线CT技术，首次量化了电压与正极裂纹扩展的非线性关系，证实充电后期的电压变化会显著加剧正极裂纹生成，提出了水系电池正极退化的电压致裂机制，为正极材料的结构优化提供了重要理论依据。

针对正负极协同失效的联动效应，现有研究进一步明确了二者的正反馈恶性循环机制。Yufit等人[54]通过多尺度断层扫描研究，发现锌负极枝晶生长与正极活性物质消耗存在显著关联效应，正极活性物质溶解会导致电极反应不均、局部电流密度集中，进一步加剧负极枝晶生长，形成正极退化到负极劣化导致性能加速衰减的恶性循环。在此基础上，He等人[55]结合X射线CT表征与电极替换实验，直接证实了正极退化在协同失效中的主导作用。在Zn，MnO_2电池性能衰减后，更换新鲜MnO_2正极可显著恢复电池容量，而仅更换锌负极无明显改善，为水系锌基电池的性能优化指明了核心方向。

2.2.3 隔膜-界面失效的多路径机制解析

界面稳定性下降与隔膜功能失效是水系电池失效的重要传导路径，X射线CT技术能精准捕捉这一跨电极、跨界面的复杂演化过程，揭示其对电池整体性能的影响机制。Liang等人[3]与Lang等人[56]率先构建了隔膜-界面失效的理论框架，明确了隔膜破损与界面劣化是连接电极局部失效与电池整体失效的关键环节。隔膜破损会直接引发正负极接触与内部短路，界面劣化则会阻碍离子传输、屏蔽活性反应位点，二者共同加剧电池失效。

针对隔膜破损的核心机制，现有研究通过X射线CT与多技术联用，完善了电化学刺穿与机械磨损的双路径失效模型。Du等人[57]将X射线CT与原位数字光学显微镜技术联用，构建了多尺度可视化分析平台，实时捕捉锌枝晶的动态生长与溶解行为，发现枝晶生长至临界尺寸会刺穿隔膜引发内短路，且该过程与电流密度密切相关。Osenberg等人[58]通过桌面级CT与高分辨率同步辐射CT联用，进一步完善了隔膜破损的双路径机制，证实隔膜破损并非仅由枝晶电化学刺穿导致，正极脱落的活性

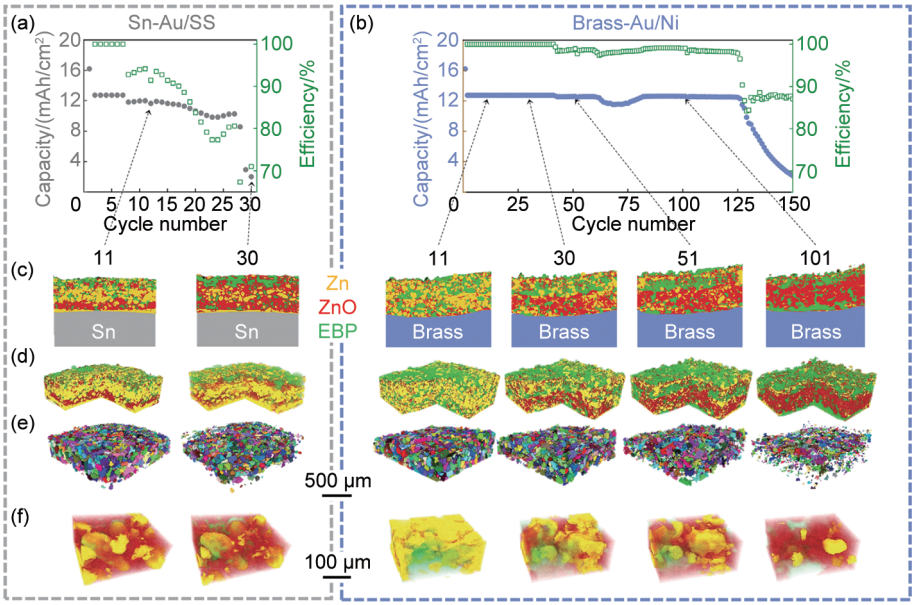

图10　X射线CT对锌负极协同失效的分析。具有 (a) 镀锡和镀金的不锈钢集流体以及 (b) 镀黄铜和镀金的镍集流体的原位微CT电池的电化学循环性能。在指定循环次数下的微CT分析：(c) 锌阳极的彩色XZ切片，(d) 锌阳极的彩色角切3D重建体积，(e) 分段的锌颗粒，以及 (f) 彩色的颗粒比例3D渲染图。XZ切片和体积渲染中锌（黄色）、氧化锌（红色）和电解质-黏结剂孔隙（EBP）（绿色）的分割基于全局阈值。图 (e) 中的锌颗粒被不清晰地着色以展示单个颗粒的分离[50]

Fig. 10　Analysis of Zinc Anode Synergistic Failure by X-ray CT. (a) Sn and Au coated stainless-steel current collectors and (b) Brass and Au coated Ni current collectors. MicroCT analysis at specified cycles: (c) colorized XZ slices of Zn anode, (d) colorized corner-cut 3D reconstructed volumes of Zn anode, (e) segmented Zn particles, and (f) colorized particle scale 3D renderings. Segmentation of Zn (yellow), ZnO (red), and electrolyte-binder-pore (EBP) (green) in XZ slices and volume rendering is based on global thresholding. Zn particles in (e) are indistinctly colorized to showcase separation of individual particles[50]

物质颗粒会对隔膜产生机械刮擦，造成隔膜结构损伤，两种机制共同导致隔膜功能丧失。

针对界面失效的核心机制，现有研究通过原位X射线CT，厘清了界面副反应对电池性能的影响规律。Pu等人[59]通过原位X射线CT，首次捕捉到界面气泡活性，锌位点屏蔽的关键失效路径，发现老化后负极表面气泡融合会导致部分锌无法正常剥离溶解，而脱气实验可有效恢复电池容量，CT图像也证实脱气后隔膜残留锌量显著减少，为界面失效的修复提供了直接实验证据。Dai等人[26]通过同步辐射X射线CT，对比了真实致密电池与实验室改造测试电池的界面行为差异，证实真实构型中均匀电场可显著抑制三相界面副反应，同时明确了正极集流体界面退化对电池失效的重要贡献，补充了界面失效的多源性。此外，相关研究进一步证实，电极孔隙率演化与界面接触状态密切相关，循环过程中孔隙堵塞会导致界面反应不均，进一步加剧界面劣化与电极结构损伤[59]。

基于上述界面失效机制的研究，原位X射线CT技术进一步实现了封装工况对界面-隔膜失效影响的可视化量化，为电池封装工艺优化提供了支撑。如图11所示，采用原位X射线CT可动态追踪压力型与非压力型锌基软包电池在充放电、老化过程中的负极形貌演变与界面结构变化，清晰呈现锌沉积溶解行为、电极体积膨胀及界面气泡演化的全周期规律。该表征可直观区分不同装配压力下锌负极的失效模式差异，精准识别枝晶生长、界面接触劣化及隔膜失效的核心路径，为揭示水系锌电池界面-隔膜协同失效机制、优化电池封装与压力调控策略提供了直观可靠的原位可视化依据[60]。

上述研究成果证实，X射线CT技术在水系锌基电池的电极结构优化、失效机制诊断、可靠性提升及寿命评估等方面具有广泛的应用前景，为高性能水系电池的研发提供了关键技术支撑[57]。

3　结论与展望

本文主要介绍了X射线CT技术在电池失效分析领域的应用，该技术核心优势在于非破坏性、三

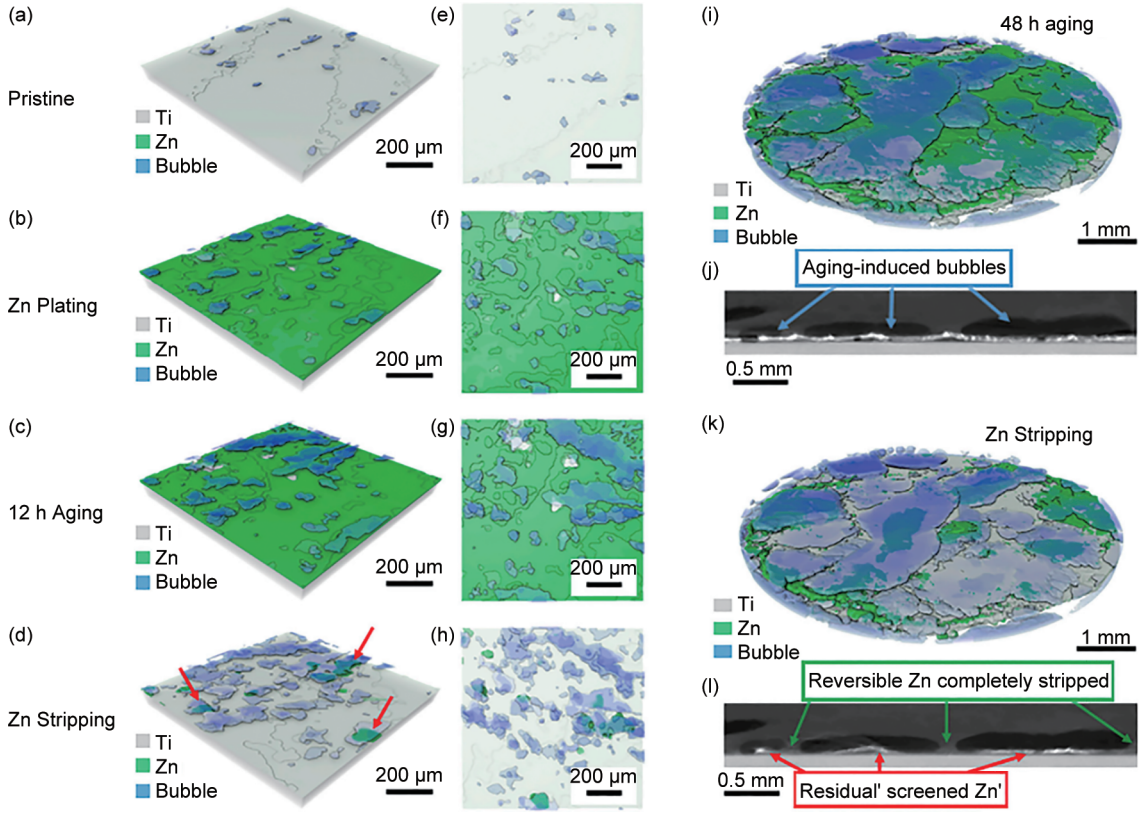

图 11　X 射线 CT 对隔膜-界面失效分析：(a)～(h) 压力型锌/钛软包电池阳极的原位扫描图像，采用 XCT 技术获取，完整呈现了以下循环过程：(a) 和 (e) 初始状态、(b) 和 (f) 充电阶段、(c) 和 (g) 12 小时老化过程以及 (d) 和 (h) 放电阶段。(a)～(d) 侧视角度三维渲染图像，(e)～(h) 俯视角度三维渲染图像。(i)～(l) 非压力型锌/钛软包电池阳极在充电后及 48 小时老化后的状态，(k)～(l) 放电后状态。(i) 和 (k) 侧视角度三维渲染图像；(j) 和 (l) 原位断层扫描横截面图。电池以 10 mA/cm² 的电流密度进行充放电，阳极锌负载量为 4 mAh/cm²[60]

Fig. 11　X-ray CT Analysis of Diaphragm-Interface Failure: (a)—(h) *In-situ* scanning images of pressure-type zinc/titanium pouch battery anodes obtained using XCT technology, comprehensively demonstrating the following cycling processes: (a) and (e) initial state, (b) and (f) charging phase, (c) and (g) 12-hour aging process, and (d) and (h) discharge phase. (a)—(d) Three-dimensional rendering images from side view angles, (e)—(h) three-dimensional rendering images from top view angles. (i)—(l) Post-charging and 48-hour aging states of non-pressure-type zinc/titanium pouch battery anodes, (k)—(l) post-discharge states. (i) and (k) Three-dimensional rendering images from side view angles; (j) and (l) *In-situ* tomographic cross-sectional images. The batteries were charged and discharged at a current density of 10 mA/cm², with an anode zinc loading capacity of 4 mAh/cm²[60]

维可视化、多尺度跨维度表征与动态过程追踪。可以实现从纳米级活性颗粒损伤到宏观电芯形变的全尺度结构表征，精准捕捉电极界面剥离、枝晶生长、产气膨胀等典型失效特征，完成孔隙率、裂纹扩展程度等关键参数的定量化分析。同时通过原位测试可以动态追踪缺陷全生命周期演化过程，厘清缺陷演变与电池性能衰减的内在关联，为各类储能电池的失效机理解析、结构优化与安全设计提供关键技术支撑。

然而，当前 X 射线 CT 技术在电池失效分析的科研与产业化应用中仍存在以下核心瓶颈。一是多模态联用与全维度信息获取能力不足，单一 CT 仅能实现结构形貌表征，无法直接获取材料化学组成、晶体结构等关键信息。二是真实服役工况适配性差，现有研究多基于实验室简化电池体系开展，与商用电池真实充放电、温湿度、载荷等服役工况差异显著，难以还原电池实际使用中的失效动态演化全过程。三是海量数据处理效率与标准化水平不足，高通量、高分辨率 CT 检测会产生高维图像数据，人工判读与传统处理方式效率低、误差大，且缺乏统一的数据分析与评价标准。四是检测分辨率与设备普及性难以兼顾，高分辨率纳米 CT 购置运

维成本高、机时稀缺，而常规实验室微米CT无法捕捉纳米级早期失效缺陷，难以支撑电池失效早期预警与全生命周期健康管理研究。

针对上述瓶颈，未来研究有望从以下相关方向实现突破。一是开发多模态原位联用技术[61]，搭建X射线CT与XRD、拉曼光谱、电化学原位测试等联用的一体化表征系统，同步实时获取电池结构形貌、化学成分、晶体结构与电化学性能信息，破解多源数据融合难题。二是构建适配真实工况的原位表征体系，加快专用原位样品台工程化开发与高可靠封装技术迭代，还原商用电池真实服役环境。三是建立AI赋能的智能化数据分析体系，开发基于机器学习的CT图像自动分割、缺陷智能识别、特征精准量化算法，解决海量数据处理效率低、标准化不足的行业痛点。四是构建分级协同的设备研发与应用体系，加快高分辨率纳米CT自主研发与成本优化，推动高端设备规模化普及，兼顾检测分辨率、分析效率与应用成本，为电池失效分析与高性能电池开发提供全场景支撑。

参 考 文 献

[1] ZHANG M, LIU Y S, LI D Z, et al. Electrochemical impedance spectroscopy: A new chapter in the fast and accurate estimation of the state of health for lithium-ion batteries[J]. Energies, 2023, 16(4): 1599. DOI:10.3390/en16041599.

[2] OWEN R E, ROBINSON J B, WEAVING J S, et al. operando ultrasonic monitoring of lithium-ion battery temperature and behaviour at different cycling rates and under drive cycle conditions[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169 (4): 040563. DOI:10.1149/1945-7111/ac6833.

[3] LIANG Y L, YAO Y. Designing modern aqueous batteries[J]. Nature Reviews Materials, 2023, 8(2): 109-122. DOI: 10.1038/s41578-022-00511-3.

[4] SHEN S H, HUANG L, TONG X L, et al. A powerful one-step puffing carbonization method for construction of versatile carbon composites with high-efficiency energy storage[J]. Advanced Materials, 2021, 33(40): 2102796. DOI: 10.1002/adma. 20210 2796.

[5] SHEN S H, CHEN Y B, ZHOU J C, et al. Microbe-mediated biosynthesis of multidimensional carbon-based materials for energy storage applications[J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(19): 2204259. DOI:10.1002/aenm.202204259.

[6] LI C, ZHENG C, CAO F, et al. The development trend of graphene derivatives[J]. Journal of Electronic Materials, 2022, 51 (8): 4107-4114. DOI:10.1007/s11664-022-09687-4.

[7] HU S, XU J K, LV M C, et al. The application of industrial CT detection technology in defects inspection of lithium ion battery [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2083(3): 032075. DOI:10.1088/1742-6596/2083/3/032075.

[8] LIU B, ZHANG Y, WANG Z L, et al. Coupling a sponge metal fibers skeleton with *in situ* surface engineering to achieve advanced electrodes for flexible lithium-sulfur batteries[J]. Advanced Materials, 2020, 32(34): 2003657. DOI: 10.1002/adma.202003657.

[9] LIU Q, XU R G, MU D B, et al. Progress in electrolyte and interface of hard carbon and graphite anode for sodium-ion battery[J]. Carbon Energy, 2022, 4(3): 458-479. DOI: 10.1002/cey2.120.

[10] CHEN W H, CHEN X P, CHEN W H, et al. *In situ* atomic force microscopy and X-ray computed tomography characterization of all-solid-state lithium batteries: Both local and overall[J]. Energy Technology, 2023, 11(4): 2201372. DOI:10.1002/ente.202201372.

[11] BOND T, GAUTHIER R, GASILOV S, et al. *In-situ* computed tomography of particle microcracking and electrode damage in cycled NMC622/graphite pouch cell batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(8): 080531. DOI: 10.1149/1945-7111/ac8a22.

[12] ZEMEK M, ŠALPLACHTA J, ZIKMUND T, et al. Automatic marker-free estimation methods for the axis of rotation in sub-micron X-ray computed tomography[J]. Tomography of Materials and Structures, 2023, 1: 100002. DOI: 10.1016/j. tmater. 2022.100002.

[13] VILLARRAGA-GÓMEZ H, BEGUN D L, BHATTAD P, et al. Assessing rechargeable batteries with 3D X-ray microscopy, computed tomography, and nanotomography[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2022, 37(5): 519-535. DOI: 10.1080/10589759.2022.2070165.

[14] TIPPENS J, MIERS J C, AFSHAR A, et al. Visualizing chemomechanical degradation of a solid-state battery electrolyte [J]. ACS Energy Letters, 2019, 4(6): 1475-1483.

[15] FALCH K V, LYUBOMIRSKY M, CASARI D, et al. Zernike phase contrast in high-energy X-ray transmission microscopy based on refractive optics[J]. Ultramicroscopy, 2018, 184: 267-273. DOI: 10.1016/j.ultramic.2017.10.001.

[16] ZEISS. Submicron X-ray imaging: maintain high resolution even at large working distances: ZEISS Xradia Versa 510[EB/OL]. (2020-09-27). https://www. zeiss. com/microscopy/en/products/x-ray-microscopy/xradia-versa.html.

[17] VARSLOT T, KINGSTON A, MYERS G, et al. High-resolution helical cone-beam micro-CT with theoretically-exact reconstruction from experimental data[J]. Medical Physics, 2011, 38(10): 5459-5476. DOI:10.1118/1.3633900.

[18] LI T Y, KANG H X, ZHOU X W, et al. Three-dimensional reconstruction and analysis of all-solid Li-ion battery electrode using synchrotron transmission X-ray microscopy tomography[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(20): 16927-16931. DOI:10.1021/acsami.7b18962.

[19] GHORBANI KASHKOOLI A, FOREMAN E, FARHAD S, et al. Synchrotron X-ray nano computed tomography based simulation

of stress evolution in $LiMn_2O_4$ electrodes[J]. Electrochimica Acta, 2017, 247: 1103-1116. DOI:10.1016/j.electacta.2017.07.089.

[20] DE ANDRADE V, NIKITIN V, WOJCIK M, et al. Fast X-ray nanotomography with sub-10 nm resolution as a powerful imaging tool for nanotechnology and energy storage applications [J]. Advanced Materials, 2021, 33(21): 2008653. DOI: 10.1002/adma.202008653.

[21] OIKONOMOU C M, CHANG Y W, JENSEN G J. A new view into prokaryotic cell biology from electron cryotomography[J]. Nature Reviews Microbiology, 2016, 14(4): 205-220. DOI: 10.1038/nrmicro.2016.7.

[22] LEE J, WYNN T A, SCHROEDER M A, et al. Cryogenic focused ion beam characterization of lithium metal anodes[J]. ACS Energy Letters, 2019, 4(2): 489-493.

[23] SEIDMAN D N. Three-dimensional atom-probe tomography: Advances and applications[J]. Annual Review of Materials Research, 2007, 37: 127-158. DOI: 10.1146/annurev. matsci. 37.052506.084200.

[24] BORGIA G C, CAMAITI M, CERRI F, et al. Study of water penetration in rock materials by Nuclear Magnetic Resonance Tomography: Hydrophobic treatment effects[J]. Journal of Cultural Heritage, 2000, 1(2): 127-132. DOI:10.1016/S1296-2074(00)00156-4.

[25] WALTHER F, KOERVER R, FUCHS T, et al. Visualization of the interfacial decomposition of composite cathodes in argyrodite-based all-solid-state batteries using time-of-flight secondary-ion mass spectrometry[J]. Chemistry of Materials, 2019, 31(10): 3745-3755.

[26] DAI Y H, HE H Z, OUYANG M Z, et al. *In-operando* X-ray imaging for sobering examination of aqueous zinc metal batteries [J]. Nano-Micro Letters, 2025, 18(1): 85. DOI: 10.1007/s40820-025-01911-0.

[27] DI MILANO P, BOZZINI B, et al. X-ray microtomographic studies of the shape change of rechargeable Zn battery anodes[J]. e-Journal of nondestructive testing, 2022, 27(3): DOI: 10.58286/26648.

[28] HUANG C J, OH J A S, VICENCIO M, et al. X-ray micro-computed tomography for structural analysis of all-solid-state battery at pouch cell level[J]. ACS Energy Letters, 2025, 10(7): 3459-3470.

[29] APELEO ZUBIRI B, WIRTH J, DROBEK D, et al. Correlative laboratory nano-CT and 360° electron tomography of macropore structures in hierarchical zeolites[J]. Advanced Materials Interfaces, 2021, 8(4): 2001154. DOI:10.1002/admi.202001154.

[30] MÜLLER S, LIPPUNER M, VEREZHAK M, et al. Multimodal nanoscale tomographic imaging for battery electrodes[J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(28): 1904119. DOI: 10.1002/aenm.201904119.

[31] DAEMI S R, TAN C, VOLKENANDT T, et al. Visualizing the carbon binder phase of battery electrodes in three dimensions[J]. ACS Applied Energy Materials, 2018, 1(8): 3702-3710.

[32] XU H Y, USSEGLIO-VIRETTA F, KENCH S, et al. Microstructure reconstruction of battery polymer separators by fusing 2D and 3D image data for transport property analysis[J]. Journal of Power Sources, 2020, 480: 229101. DOI:10.1016/j.jpowsour.2020.229101.

[33] ZIEGLER A, OESER D, HEIN T, et al. Run to failure: Aging of commercial battery cells beyond their end of life[J]. Energies, 2020, 13(8): 1858. DOI:10.3390/en13081858.

[34] FINEGAN D P, SCHEEL M, ROBINSON J B, et al. Investigating lithium-ion battery materials during overcharge-induced thermal runaway: An operando and multi-scale X-ray CT study[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(45): 30912-30919. DOI:10.1039/c6cp04251a.

[35] ZHANG X F, LI L F, XU W. Analysis of gas production in overcharged lithium battery by X-ray computed tomography[J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2021, 18(2): 021013. DOI:10.1115/1.4049131.

[36] CARTER R, HUHMAN B, LOVE C T, et al. X-ray computed tomography comparison of individual and parallel assembled commercial lithium iron phosphate batteries at end of life after high rate cycling[J]. Journal of Power Sources, 2018, 381: 46-55. DOI:10.1016/j.jpowsour.2018.01.087.

[37] ZHANG X F, LI L F, LI S Q. Research on overdischarge lithium-ion battery based on X-ray computed tomography[J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2023, 20(4): 041004. DOI:10.1115/1.4056271.

[38] CHEN C C, WEI Y, ZHAO Z B, et al. Investigation of the swelling failure of lithium-ion battery packs at low temperatures using 2D/3D X-ray computed tomography[J]. Electrochimica Acta, 2019, 305: 65-71. DOI:10.1016/j.electacta.2019.03.038.

[39] GAO X L, BAO Z M, ZHANG L S, et al. Seeing the unseen: Real-time tracking of battery cycling-to-failure *via* surface strain[J]. Joule, 2026, 10(3): 102272. DOI:10.1016/j.joule.2025.102272.

[40] ZHU K, WANG X, LIU Y, et al. X-ray CT investigation of separator failure in lithium-ion batteries under mechanical abuse and overcharge coupling[J]. Journal of Power Sources, 2020, 464: 228510.

[41] KOMINI S, GOSTICK J T, LIU H, et al. Quantification of particle contact loss in lithium-ion battery electrodes using X-ray computed tomography[J]. J. Power Sources, 2019, 438: 226978.

[42] WADE A, LLEWELLYN A V, HEENAN T M M, et al. First cycle cracking behaviour within Ni-rich cathodes during high-voltage charging[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2023, 170 (7): 070513. DOI:10.1149/1945-7111/ace130.

[43] ZIESCHE R F, ARLT T, FINEGAN D P, et al. 4D imaging of lithium-batteries using correlative neutron and X-ray tomography with a virtual unrolling technique[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-11. DOI:10.1038/s41467-019-13943-3

[44] PAUL R, HEENAN T M M, JERVIS R, et al. Standardized X-ray computed tomography workflow for quantifying degradation in NMC811 cathodes[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2022, 169(10): 100542. DOI:10.1149/1945-7111/ac9b33.

[45] 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. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.03.065.

[46] PATEL D, ROBINSON J B, BALL S, et al. Thermal runaway of a Li-ion battery studied by combined ARC and multi-length scale X-ray CT[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(9): 090511. DOI:10.1149/1945-7111/ab7fb6.

[47] PITTA BAUERMANN L, MÜNCH J, KROLL M, et al. Nondestructive defect detection in battery pouch cells: A comparative study of scanning acoustic microscopy and X-ray computed tomography[J]. Energy Technology, 2023, 11(12): 2300323. DOI:10.1002/ente.202300323.

[48] HAO S, BAILEY J J, IACOVIELLO F, et al. 3D imaging of lithium protrusions in solid-state lithium batteries using X-ray computed tomography[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(10): 2007564. DOI:10.1002/adfm.202007564.

[49] YOON S G, VISHNUGOPI B S, NELSON D L, et al. Interface morphogenesis with a deformable secondary phase in solid-state lithium batteries[J]. Science, 2025, 388(6751): 1062-1068. DOI: 10.1126/science.adt5229.

[50] SCHARF J, YIN L, REDQUEST C, et al. Investigating degradation modes in Zn-AgO aqueous batteries with *in situ* X-ray micro computed tomography[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11 (33): 2101327. DOI:10.1002/aenm.202101327.

[51] ZHANG L, HOU Y L. Comprehensive analyses of aqueous Zn metal batteries: Characterization methods, simulations, and theoretical calculations[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11 (13): 2003823. DOI:10.1002/aenm.202003823.

[52] BOZZINI B, MELE C, VENEZIANO A, et al. Morphological evolution of Zn-sponge electrodes monitored by *in situ* X-ray computed microtomography[J]. ACS Applied Energy Materials, 2020, 3(5): 4931-4940.

[53] MARA T S, RAU D C, SHEARING P R, et al. Non-linear cracking response to voltage revealed by operando X-ray tomography in polycrystalline NMC811[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2026, 14(5): 2189-2201. DOI:10.1039/d5ta08739b.

[54] YUFIT V, TARIQ F, EASTWOOD D S, et al. operando visualization and multi-scale tomography studies of dendrite formation and dissolution in zinc batteries[J]. Joule, 2019, 3(2): 485-502. DOI:10.1016/j.joule.2018.11.002.

[55] HE G J, WANG Y, CHEN X, et al. Re-evaluating the failure mechanism of aqueous zinc metal batteries under real-service configurations[J]. Advanced Energy Materials, 2026, 16(5): 2502891. DOI:10.1002/aenm.202502891.

[56] LANG J T, KULKARNI D, FOSTER C W, et al. X-ray tomography applied to electrochemical devices and electrocatalysis[J]. Chemical Reviews, 2023, 123(16): 9880-9914. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00873.

[57] DU W J, ZHANG Z Y, IACOVIELLO F, et al. Observation of Zn dendrite growth *via* operando digital microscopy and time-lapse tomography[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(11): 14196-14205.

[58] OSENBERG M, MANKE I, HILGER A, et al. An X-ray tomographic study of rechargeable Zn/MnO_2 batteries[J]. Materials, 2018, 11(9): 1486. DOI:10.3390/ma11091486.

[59] PU S D, HU B K, LI Z X, et al. Decoupling, quantifying, and restoring aging-induced Zn-anode losses in rechargeable aqueous zinc batteries[J]. Joule, 2023, 7(2): 366-379. DOI: 10.1016/j.joule.2023.01.010.

[60] WECKELMANN L, DZIECIOL K, KÖNIG C, et al. A novel pressurized*operando*battery cell for laboratory X-ray computed tomography[J]. Methods in Microscopy, 2025, 2(4): 417-430. DOI: 10.1515/mim-2025-0010.

[61] ZIESCHE R F, ARLT T, FINEGAN D P, et al. 4D imaging of lithium-batteries using correlative neutron and X-ray tomography with a virtual unrolling technique[J]. Nature Communications, 2020, 11: 777. DOI:10.1038/s41467-019-13943-3.