中国科学: 化学 2026 年 第 56 卷 第 6 期: 1835 ~ 1847
SCIENTIA SINICA Chimica chemcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 中国科学院化学研究所70周年所庆专刊

基于原位成像技术的储能器件热行为研究进展

姜兆轩[1,2], 文锐[1,2*]

1. 中国科学院化学研究所, 北京分子科学国家研究中心, 纳米结构与纳米技术实验室, 北京 100190
2. 中国科学院大学, 北京 100049
*通讯作者, E-mail: ruiwen@iccas.ac.cn

收稿日期: 2026-02-28; 接受日期: 2026-04-24; 网络版发表日期: 2026-05-29
国家自然科学基金(编号: 22425403, 22421001)、中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDB1040300)和中国科学院基础研究青年科学家(编号: YSBR-058)资助项目

摘要 电化学储能器件作为驱动全球能源结构转型、助力碳中和目标达成的重要支撑, 其热安全问题仍是制约高能量密度发展的关键瓶颈. 在储能-释能的过程中, 伴随着不可逆的热损失, 热量不断积聚, 且该过程呈现强非均匀性与动态耦合特性, 传统点状测温方法难以捕捉瞬态热分布, 破坏性拆解分析则无法解析实际工况下的传热路径. 为此, 原位成像技术的突破性应用为精准表征储能器件热行为提供了独特视角. 本文系统阐述了红外热成像、锁相热成像、X射线计算机断层扫描与红外热成像联用以及传感技术等一系列原位分析方法的最新进展, 聚焦于储能器件充放电过程中热场的动态演化规律以及结构-热演变跨尺度协同的可视化表征与机制解析. 在此基础上, 前瞻性地探讨了扫描热显微镜在微区热物性测量、多模态原位分析系统集成以及人工智能赋能的器件热管理决策优化等前沿方向中的应用, 为深化储能器件的热失控机制认知及高安全设计提供理论依据与技术支持.

关键词 原位成像技术, 热分析, 产热行为, 热安全, 电化学储能

1 引言

储能器件是实现电能、化学能等能量形式转换与存储的核心装置, 品类丰富且应用场景多元, 涵盖锂离子电池、液流电池、超级电容器等诸多类型, 已在能源存储、动力供给等不同领域中承担起关键作用. 近年来, 锂离子电池(Li-ion batteries, LIBs)因其卓越的性能被广泛应用于电动汽车、消费电子产品及大型储能系统[1,2]. 随着其应用场景的不断拓展, 对电池的性能稳定性、使用寿命及安全可靠性提出了更高要求[3~5]. 在影响LIBs性能、寿命与安全性的诸多外部因素中, 温度是核心关键因素之一; 若监测与调控不当, 不仅会造成电池性能衰减、寿命缩短, 更可能引发火灾、爆炸等严重安全事故, 极大制约动力电池的安全应用[6~8]. 值得注意的是, 各类储能器件的产热行为均具有非均匀性[9]. 充放电过程中产生的焦耳热和反应热导致内部温度显著高于表面温度, 形成由内向外的温度梯度. 这种温度梯度会加剧电流分布不均, 诱发局部热点, 进而加速电池老化失效[10~12]. 因此, 为了精准捕捉器件内部真实热状态、规避温度梯度引发的系

引用格式: Jiang Z, Wen R. Research progress on thermal behavior of energy storage devices based on *in-situ* imaging techniques. *Sci Sin Chim*, 2026, 56: 1835–1847, doi: 10.1360/SSC-2026-0046

© 2026 《中国科学》杂志社

列老化与安全风险, 亟需对其产热行为进行实时、精准的监测. 这将为追溯产热来源、解析热分布特征及动态演化规律提供关键数据支撑, 进而指导热管理系统的优化设计, 提升器件热安全性能与循环寿命, 推动储能器件的规模化应用[13,14].

然而, 储能器件热行为监测的技术仍面临诸多挑战. 传统的离线、点式测温方法无法捕捉这一动态过程中关键的温度梯度与瞬时热点的形成与演化, 严重制约了对器件热失效机制的深入解析与精准预警[15~17]. 发展能够在器件原位工作状态下, 对其从宏观到微观尺度温度场进行实时、可视化观测的先进成像技术, 已成为储能器件研究领域迫在眉睫的关键任务.

原位成像技术的核心优势在于, 它能够将温度、热流等物理量的测量与电池的动态电化学过程(如充放电、短路、热失控)进行精确关联, 并开展多维度的可视化分析, 进而揭示“电-化学-热-力”多场耦合的内在作用机制. 近年来, 一系列前沿成像技术被成功应用于此领域, 为储能器件热安全的跨尺度解析提供有力的技术支撑.

目前, 研究人员已探索了多种原位测温的成像方法, 具体来说, 红外热成像(infrared thermal imaging, IR)是主流的宏观表面温度监测技术, 被广泛用于原位追踪储能器件表面温度的分布和演化情况[18~22]; 锁相热成像(lock-in thermography, LIT)通过原位施加周期热激励, 实现了对早期微短路的深度分辨与高灵敏度成像[23~25]. 通过将X射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography, X-ray CT)与红外热成像进行联用, 能够同步获取内部结构演变与外部热场的动态响应, 为揭示热失控的起源与传播机制提供了直接证据[26,27]. 在内部检测方面, 能够深入器件内部、实现原位精准监测的嵌入式传感技术应运而生, 为储能器件内部温度测量提供可靠支撑[28~30]; 扫描热显微镜(scanning thermal microscopy, SThm)更是将成像推进至纳米量级, 有望实现在储能器件原位工况条件下, 实现电极材料表面局部热特性的纳米尺度空间成像[31~33], 为优化热管理系统提供了微观视角.

尽管各类原位成像技术各展所长, 推动了储能器件热管理研究的边界, 但目前尚缺乏一个系统的框架来梳理和比较这些技术的适用场景与未来发展. 鉴于此, 本文将聚焦于储能器件热演化行为解析的原位成像分析技术, 通过对现有的主流及新兴技术进行深度剖析, 系统梳理并分析各类表征方法的研究现状与核心优缺点. 以期为储能器件热安全的精准解析、热管理系统的优化提供技术参考.

2 成像分析技术

2.1 红外热成像

红外热成像技术以黑体辐射定律为核心理论基础, 利用物体向外辐射红外线能量的发射功率、特征波长与自身温度之间的定量对应关系, 由于不同温度区域的辐射强度、特征波长存在显著差异, 红外热成像技术借助红外探测器对被测物体表面发射的红外辐射信号进行全域捕获, 先将接收到的辐射信号转化为可识别的电信号, 再通过一系列标准化处理流程, 将这些电信号转换为物体表面的温度值, 最终将红外辐射信号转化为一幅直观的二维温度分布图像. 该技术的表征精度由空间分辨率与温度分辨率两大核心指标共同决定. 其中空间分辨率以红外焦平面阵列像素规格为核心表征, 温度分辨率则以噪声等效温差(NETD)为评价指标, 传统工业级红外热成像技术的基础规格为320×240像素, 像元尺寸多为12 μm. 温度分辨率通常在50~100毫开尔文(mK), 可识别≥0.1 °C的局部温升异常. 在储能器件温度监测领域, 该技术为解析不同体系(器件类型、材料体系、封装形式)、不同工况(充放电倍率、环境温度、循环寿命)下被测物体表面温度场分布特征、温度梯度及瞬态热演化过程提供了直接的可视化表征手段, 成为原位热成像技术体系中最基础且核心的组成部分.

为系统解析储能器件充放电过程中的热演化规律并指导结构优化设计, 研究者借助红外热成像技术开展了一系列原位表征研究. 针对圆柱形电池, Du等[34]通过改装电池顶部为红外光学玻璃, 如图1a所示, 实现圆柱形18650电池内部截面二维温度场的原位可视化, 揭示了圆柱形电池“中心-边缘”径向温度不均的特征. 针对软包电池, Wang等[35]通过红外热成像技术搭配T型热电偶校准, 并设置遮光装置消除环境干扰, 系统示意图如图1b所示[36], 实现了14650、18650、26650系列圆柱形电池在不同放电倍率下表面温度分布与动态变化的精准捕捉, 测量误差≤0.1 °C. Chu等[37]以20 Ah磷酸铁锂(LFP)软包电池为研究对象, 通过红

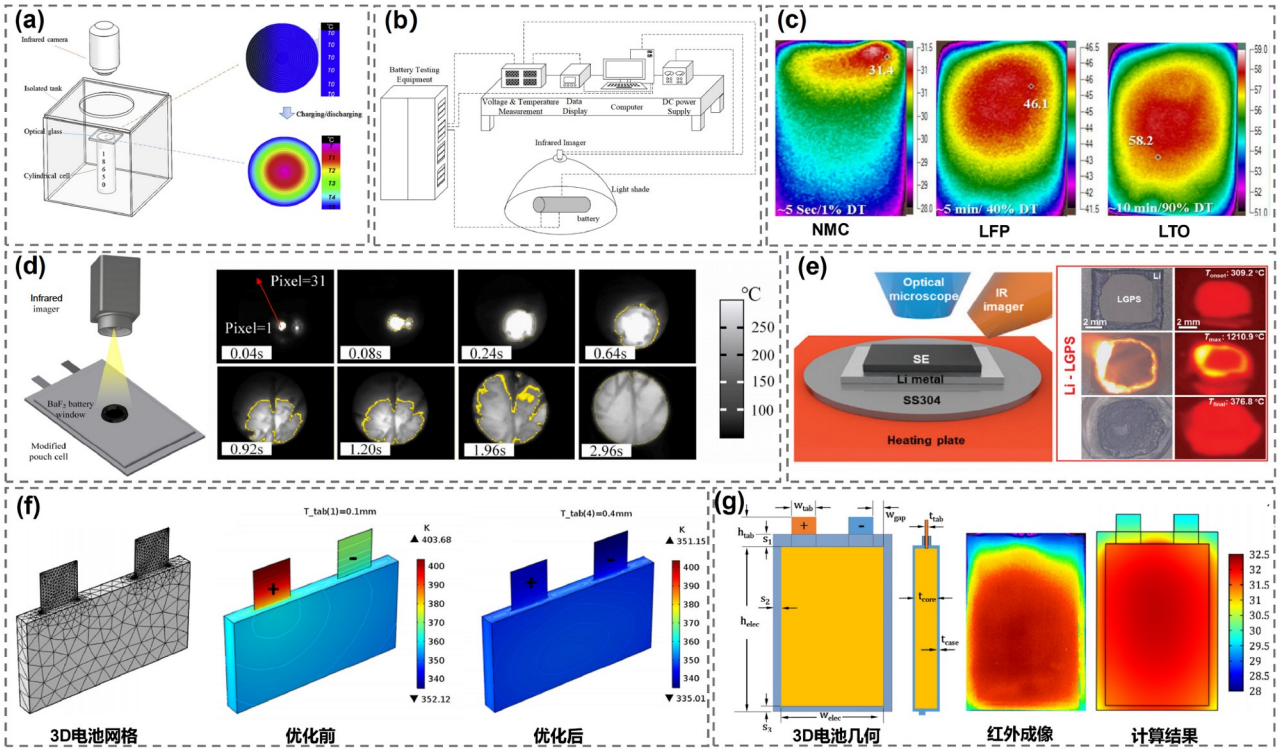


图 1　(网络版彩图)红外热成像技术在储能电池中的应用. (a) 截面温度原位可视化实验装置图及电池在1 C放电倍率下对应的红外热成像图[34]. (b) 电化学测试及红外成像联用系统原理示意图[36]. (c) 5倍额定电流放电过程中的实时红外热成像序列图[38]. (d) 电池内短路过程内部温度的红外成像测试装置示意图及对应热成像图[40]. (e) 原位光学显微镜-红外热成像联用平台示意图及Li/LGPS固态电解质反应过程的测试结果图[39]. (f) 三维热模型的网格划分示意图及优化前后电池放电末期的温度场分布云图[21]. (g) 3D电池模型及其模拟计算与红外热像仪实测的表面温度分布对比图[41]

Figure 1　(Color online) Applications of infrared thermal imaging technology in energy storage batteries. (a) A schematic diagram of the experimental setup to visualize the section's temperature directly and infrared images at 1 C discharging rate [34]. (b) Schematic diagram of the experiment system [36]. (c) IR images during discharge at 5 It [38]. (d) Schematic view for infra-red imaging of internal temperature and infra-red images for ISC processes of the cell [40]. (e) Schematic illustration of an *in situ* OM-thermal infrared imager platform and corresponding results of the reaction between metallic Li and LGPS [39]. (f) The grid of the 3D thermal model and the temperature field of the battery at the end of discharge, before and after optimization [21]. (g) Surface temperature distribution obtained by simulation and IR camera [41].

外热成像捕捉到电池不仅存在极耳附近温度最高, 对角区域温度最低的空间梯度, 还存在时间上随电流方向变化而周期性波动的特征; Goutam等[38]对比了镍钴锰酸锂(NMC)、LFP以及钛酸锂(LTO)三种商业软包电池的表面温度分布演变规律, 如图1c所示, 最热区域位置因电池类型而异.

与此同时, 红外热成像技术可捕捉从电池内部短路(ISC)至热失控的全过程, 为热失控预警与失效机制研究提供关键数据. Wu等[40]以1 Ah软包电池为研究对象, 通过BaF_2玻璃窗口实现原位红外热成像, 如图1d所示, 首次完整记录了铝-负极(Al-An)型ISC引发热失控的动态过程: ISC触发后0.6 s形成局部热点, 1.5 s出现气体生成迹象, 1.9 s发生燃烧, 且基于热成像数据建立了热失控触发的关键判据: 温度超过150 °C的热点面积达到50 mm^2, 且该区域大部分放热副反应热量在约2 s内集中释放, 电池极易发生热失控, 为锂电池ISC相关安全风险的早期预警提供了定量依据. Yan等[39]利用自主搭建的光学显微镜-热红外成像(optical microscopy thermal infrared imaging, OM-TII)联用平台, 如图1e所示, 在严格控制水氧的惰性气氛中, 对硫化物固态电解质($Li_{10}GeP2S_{12}$$Li_{10}GeP_2S_{12}$与$Li_6PS_5Cl$)与金属锂的高温界面反应进行了实时、同步的原位观测, 并精准记录了反应的起始温度、局部最高温度及自加热速率等关键热力学参数. 通过光学图像直接捕捉了LGPS与Li在约300 °C时发生的剧烈燃烧与火焰现象, 测得的反应最高温度达1210.9 °C, 最大加热速率高达

4833.1 °C s^{-1}. 而相比之下, Li/LPSCl体系在400 °C下仍保持稳定. 通过直观现象与定量数据相结合的方法, 为揭示热失控机制提供了至关重要的证据支持.

红外热成像技术测得的温度时空分布数据还可作为模型验证与参数反演的依据, 为电化学-热耦合模型的校准与参数优化提供数据支持. 以红外热成像的表面温度数据作为实验基准, 图1f展示了Mei等[21]所构建的三维电-热耦合模型, 其温度分布模拟结果与红外实测的表面最高温度偏差<2 °C. Chu等[37]基于测得的电池表面温度与动态电压数据, 通过迭代优化算法, 对Newman-Tobias电化学-热耦合模型的核心参数进行校准, 使模型对温度分布的预测误差控制在0.2 K以内. 此外, Goutam等[41]通过热成像数据验证了所构建的电化学-热耦合模型的可靠性, 通过模拟测试进行优化设计, 发现适当加宽、加厚极耳, 能显著降低电池整体温度, 如图1g所示, 对电池结构设计有重要的指导意义. Giammichele等[42]利用熵热系数结合表面温度变化数据, 在产热模拟中分离出可逆热与不可逆热, 修正了传统模拟中忽略可逆热的偏差.

红外热成像非侵入性、空间全域的核心特性, 使其成为储能器件动态热行为监测、失效机制研究及热仿真模型验证的关键技术工具. 但传统红外热成像仍存在微观检测能力不足和易受环境反射干扰等局限. 为破解上述技术瓶颈, 一系列进阶表征技术应运, 从多维度为储能器件热安全研究提供了更为深层次的技术支撑.

2.2 锁相热成像

锁相热成像技术通过向被测对象主动施加周期性激励, 利用热扩散长度与频率的定量关系, 实现不同深度热信号的选择性探测, 其技术原理如图2a所示. 相较于传统红外热成像, 锁相热成像技术通过主动施加周期性激励, 结合锁相放大技术进行相位锁定, 同时将与激励信号同频同相的热响应信号从环境热噪声、设备系统噪声中精准分离, 可有效抑制背景噪声干扰, 分辨率具备明确优势: 空间分辨率方面, 主流配置采用640×512像素的铟锑化物(InSb)红外焦平面阵列探测器, 搭配28 mm焦距镜头及0.625 ms积分时间, 在10 Hz激励频率下, 可实现亚毫米级微区热分布识别; 温度分辨率方面, 依托锁相放大的信号增强效应, NETD可稳定达到mK量级, 测量误差可低至0.07~0.08 K, 能够精准捕捉微瓦级热功率变化引发的微小温度波动. 锁相热成像的空间分辨率和温度分辨率均为传统红外热成像的3~5倍, 尤其在微弱热信号探测与微区表征中优势不可替代. 实验测试装置图及测得的表面温度分布红外图像如图2b所示.

Robinson等[24]通过热响应振幅图表征电池不同区域对周期性电激励的热响应强弱, 以相位滞后图反映热响应相对电激励信号的时间延迟程度. 该团队针对0.04~0.1 Hz的激励频率区间, 系统分析了电池的温度振幅与相位滞后特征图像, 发现振幅图像中显著的低响应区域, 与相位滞后图中高相位角度区域空间对应, 该特征与气囊形成引发的局部热阻抗异常高度吻合, 如图2c所示, 实现了对65 °C高温存储7天后的老化电池内部气囊缺陷的精准识别. Michalowski等[43]则聚焦于石墨负极的老化行为表征, 利用锁相热成像技术发现, 当电池容量衰减至初始值的60%时, 石墨负极对应的成像区域出现明显环纹结构, 结合热信号振幅的差异性分析, 可精准识别电极表面活性物质成分不均的问题, 为锂电池老化缺陷的非破坏性检测提供了新思路. Lin等[25]进一步将锁相热成像获取的温度分布特征与电池内部固相扩散过程相关联, 如图2e所示, 通过分析20 Ah LFP软包电池温度分布的凹度变化, 反推出固态扩散时间, 且证实该参数与电池老化程度存在定量关联, 实现了从宏观温度到微观老化参数的反演, 为器件安全评估提供了技术支撑.

锁相热成像技术不仅能突破传统红外的分辨率极限, 实现亚毫米级缺陷的非破坏性检测, 还可通过缺陷识别深入解析热失效机制, 关键参数推导优化热管理策略, 成为储能器件热安全性监测从“定性描述”向“定量解析”升级的关键技术.

2.3 X射线计算机断层扫描与红外热成像联用技术

红外热成像技术作为储能器件热行为表征的基础手段, 凭借非接触式探测优势实现了储能器件表面温度分布的实时可视化, 但受限于被动探测原理, 难以穿透外部封装层, 获取内部结构信息, 无法解释温度出现异常的根本原因. X射线计算机断层扫描基于不同物质对X射线吸收衰减系数的差异实现材料与结构的区分. X射线束穿透被测对象时会沿传播路径发生衰减, 探测器接收的信号强度与X射线在穿透路径上的衰减程度相对应; 通过射线源与探测器相对物体的

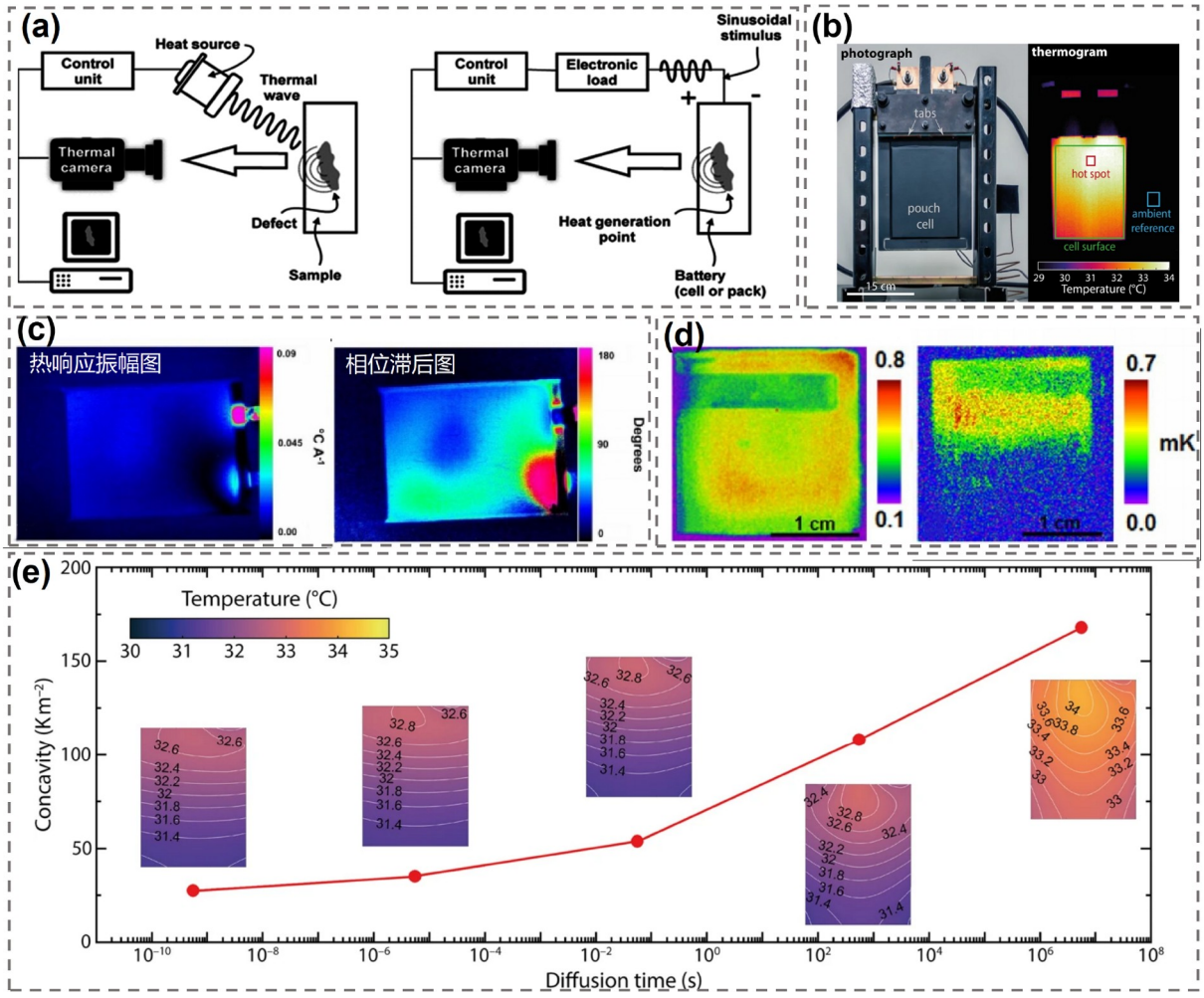


图 2　(网络版彩图)基于锁相热成像技术的储能器件热行为研究. (a) 红外热成像技术与锁相热成像技术原理示意图[24]. (b) 锁相热成像实验测试装置图及表面温度分布红外图像[25]. (c) 在0.1 Hz激发频率下老化电池的相位滞后及振幅响应图像[24]. (d) 在1 Hz激发频率下, 老化石墨电极和成分不均电极的振幅图像[43]. (e) 固态扩散时间与表面温度分布关系图[25]

Figure 2　(Color online) Lock-in thermography-based method for thermal performance study of energy storage devices. (a) Schematic diagram of the principles of infrared thermal imaging technology and lock-in thermal imaging technology [24]. (b) Experimental setup diagram of lock-in thermal imaging and infrared image of the surface temperature distribution [25]. (c) Phase lag and amplitude response images of the aged battery under an excitation frequency of 0.1 Hz [24]. (d) Amplitude images of the aged graphite electrode and the electrode with uneven composition under an excitation frequency of 1 Hz [43]. (e) Relationship diagram between solid-state diffusion time and surface temperature distribution [25].

旋转扫描, 可从多角度获取大量投影数据, 再经算法处理反演得到三维的衰减系数分布, 进而重建出物体内部结构的模型. 该技术可在无损条件下透视内部任意截面, 直观表征缺陷的空间形态、精确位置与分布特征, 可为器件温度异常提供直接的结构溯源依据. 将其与红外热成像技术联用, 能够实现内部结构可视化与表面热行为监测的双向互补, 推动储能器件安全监测技术从“温度解析”向“根源溯源”方向升级. 从技术逻辑上看, 该联用技术精准承接了锁相热成像技术对温度的精准捕捉能力, 同时依托X-ray CT的结构表征优势, 为温度异常的产生提供了直接的结构解释, 形成了从异常捕捉到根源追溯的完整技术链条. 同时, 该联用技术的分辨率性能具备明确优势, X-ray CT提供微米级结构空间分辨率, 红外热成像提供mK级温度分辨率, 二者联用后可实现亚毫米级的热分布与微米级的结构精准匹配, 是当前储能器件热安全解析与性能优化研究的关键技术路径.

2014年, Robinson等[44]针对商用18650电池分别开

展了红外热成像与X射线断层扫描实验，通过红外热成像发现电池放电过程中，随着放电速率的增加，沿电池纵轴的温度分布异质性逐渐增强的现象，结合X-ray CT提供的结构信息，对电池内部结构进行分析并定位发热区域对应于电池盖部分. 同年，Finegan等[26]将两种技术进行实时联用，在高速同步辐射X射线断层扫描的同时同步采集红外热成像信号，追踪锂离子电池热失控发生与蔓延过程中内部结构损伤过程，如图3b所示. 通过对比有无支撑的电池结构，证实了内部支撑能显著提升锂电池热失控后的结构稳定性；但会加速局部热量的聚集与传导，使电池更早热失控. 针对机械滥用诱发锂离子电池热失控的失效机制，Finegan等[45]通过设计带集成热电偶的不锈钢钉，如图3d(1)所示. 图3d(2)展示了利用高速同步辐射X射线成像技术可视化热失控的起始与蔓延过程，穿刺初期立即触发热失控，1.9060 s时电极组件产生裂纹并引发正负极接触面积扩大，热失控沿电极组件外层纵向快速传播形成锥形反应区，后续随活性材料流化分解，热失控产物向电池泄爆口流动，带动热量从穿刺点向极耳方向传递. 图3d(3)中通过同步红外成像技术和嵌入不锈钢钉尖端的热电偶分别记录表面与内部温度，竖直钉穿时内部温度可达900 °C以上，且内外温度差最大

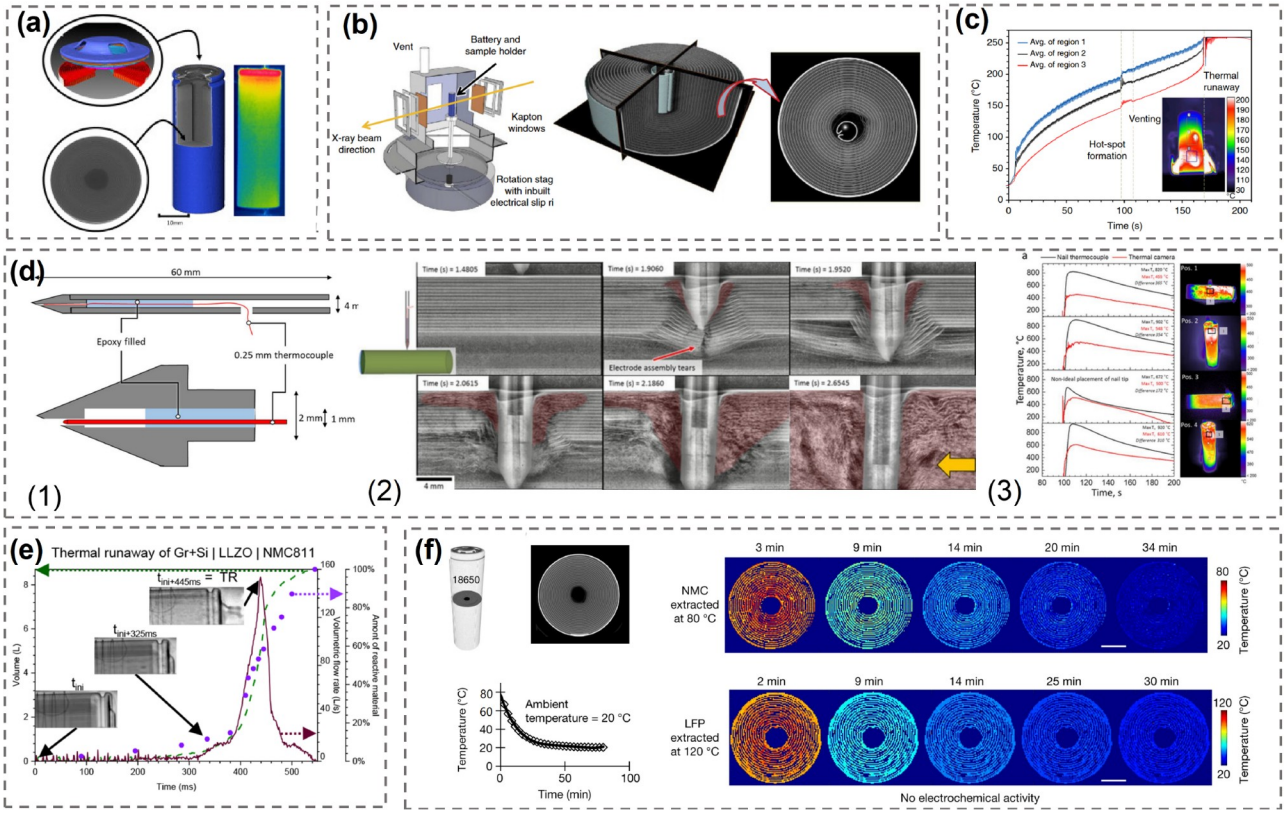


图 3 (网络版彩图) X射线计算机断层扫描与红外热成像联用技术在电池热特性研究中的应用探索. (a) 18650电池的X射线断层扫描3D渲染图及表面温度分布图[44]. (b) 原位X射线计算机断层扫描实验装置示意图及电池单元的三维重建图[26]. (c) 原位X射线计算机断层扫描实验装置示意图及电池单元的三维重建图[26]. (d) 不锈钢钉穿刺测试过程中测得的X射线图、温度变化曲线及热成像图[45]. (e) 热失控过程中红外热成像测得温度分布内嵌X射线断层扫描电池的3D结构图[47]. (f) 18650型NMC和LFP电池在冷却过程中的时空温度映射[48]

Figure 3 (Color online) Exploration of the application of X-ray computed tomography and infrared thermography technology in the research on thermal properties of batteries. (a) X-ray tomography 3D rendered images and surface temperature distribution maps of the 18650 battery [44]. (b) The schematic diagram of the *in-situ* X-ray computed tomography experimental setup and the three-dimensional reconstruction image of the battery cell [26]. (c) Schematic of the *in-situ* X-ray CT experimental apparatus and 3D reconstruction of the battery cell [26]. (d) Time-stamped radiographs、temperature profiles, and thermal images were measured during the stainless steel nail penetration test [45]. (e) Infrared thermography temperature distribution during thermal runaway embedded within the X-ray CT 3D structural image of the battery [47]. (f) Spatiotemporal temperature mapping of 18650-type NMC and LFP batteries during the cooling process [48].

可达365 °C. 对比在四个不同位置进行钉刺测试过程中的温度分布, 表明穿钉位置直接决定温度分布规律, 极耳区域为表面高温区. 研究揭示了18650电池在不同位置和方向进行钉刺测试时, 其热失控与内部结构变化的差异性特征. 针对锂电池内部短路诱导热失控的位置不可预测、难以精准监测的问题, Finegan等[46]通过高速X射线成像发现短路触发后, 电池在0.05 s内形成气袋, 导致电极层间剥离; 0.2 s内隔膜融化, 加剧热失控传播; 2 s内突破250 °C, 并结合热成像定位热失控起始于Cu-Al复合垫片周边的应力集中点. Charbonnel等[47]进一步聚焦于全固态电池, 图3e展示了实验过程中该技术成功捕捉到电池自放热行为及失控过程中颗粒、电极层剥离、气体与电极颗粒一波式喷射及正极极耳断裂等连续现象. Heenan等[48]通过X射线衍射(XRD)晶格参数的测量来监测电池内部Cu集流体的热致晶格膨胀, 与断层扫描的空间重建能力结合, 如图3f所示, 将晶格参数变化转化为空间温度分布, 实现电池内部温度的精准量化与可视化.

传统红外热成像技术构建了储能器件热行为可视化的核心表征手段, 锁相热成像技术通过主动激励与相位检测, 进一步解析热源位置、热物性参数及界面缺陷, 实现微观缺陷与产热机制的耦合量化解析, 侧重产热机理的深度表征; X-ray CT与红外热成像联用技术则依托结构-温度的双向联动, 将内部结构三维成像与表面温度场监测相结合, 通过结构演变为温度异常提供直接的空间溯源. 三者共同构成了储能器件外部热场监测的关键原位分析技术体系, 为产热机制解析、热管理设计及性能优化提供核心支撑.

2.4　先进的成像传感技术

储能器件作为封闭的电化学与热力学耦合系统, 其内部多维度状态与关键参数难以通过外部测量直接表征. 随着储能器件热行为监测精确度要求的不断提升, 研究人员逐渐聚焦于内部温度的直接检测技术研发. 而能够直接捕获储能器件内部物理信息(如温度、应变及压力)的先进传感技术, 已成为该研究方向中极具发展潜力的技术分支. 截至目前, 研究人员已开发多种适用于储能器件内部温度监测的传感技术, 各类技术均具备独特的应用优势与场景适配性.

基于光纤传感的成像测温技术以瑞利散射、热光效应为核心理论基础, 通过分布式光纤传感器(distributed fiber optical sensor, DFOS)与光学频率域反射仪(optical frequency domain reflectometry, OFDR)等系统完成信号解析, 结合信号放大、降噪校准等标准化处理流程, 能够实现储能器件内部温度的分布式、可视化表征. 通过不断优化光纤设计与传感布局, 该技术的空间分辨率可达到亚毫米级, 通过特定光纤排布能实现电极全域温度分布的测试. 借助锁相放大与光学信号增强效应, 其温度分辨率可稳定达到mK级, 经进一步优化后, 可实现≤0.35 K的温度测量根均方误差.

虽然光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器属于离散光栅测点, 本身无法实现空间温度成像. 但通过在电池内嵌入多根FBG, 覆盖电池的极耳、中部、边缘等区域, 可形成离散测点阵列; 传感器采集各点的温度数据后, 通过空间插值算法填充测点间的温度信息, 便可生成电池内部/外部的温度分布热图. Unterkofler等[30]将带有聚酰亚胺涂层的熔融石英毛细管封装的光纤布拉格光栅温度传感器集成到软包锂离子电池中. 如图4a所示, 封装后的FBG传感器有效隔离了外部压力的应变影响, 能在不同压力载荷下以空间分辨率测量软包电池内部的温度变化. FBG传感器基于布拉格光栅的波长选择性反射, 通过有限个离散光栅测点获取靶向位置温度数据, Rayleigh传感器则是利用光纤中瑞利散射信号随距离变化的特性利用光纤本征的折射率随机不均匀性产生的弹性瑞利散射效应, 结合OFDR技术, 在不同位置收集背散射光, 获取光纤路径上各点的温度信息. Huang等[49]将3个FBG与Rayleigh传感器嵌入18650电池中, 对比准分布式FBG与全分布式Rayleigh传感器在不同倍率工况下锂电池温度监测的性能, 如图4b所示. 相比之下, FBG的温度测试精度高(0.1 °C)、采集速率更快, 能更灵敏地捕捉温度的快速波动, 而Rayleigh传感器优势是空间分辨率高(0.65 mm), 可实现全分布式温度成像. Kim等[50]提出一种混合测量方案, 开发了基于FBG与OFDR融合的远程分布式测温传感器, 并通过加装高反射镜提升信噪比, 如图4c所示. 该方案利用两种技术的优势, 实现电池内部温度的全角度、高精度监测. Wang等[51]将DFOS结合OFDR系统, 通过在3D打印基底中集成DFOS, 设计一体化功能极片, 在不影响电池使用寿命的同时, 原位获取温度、压力等内部关键参数. 通过U型、S型不同光纤布局, 精准绘制电极表面的温度分布和动态演变情况. 图4e展示了Kim等[52]设计的一种基于碲(Te)的热

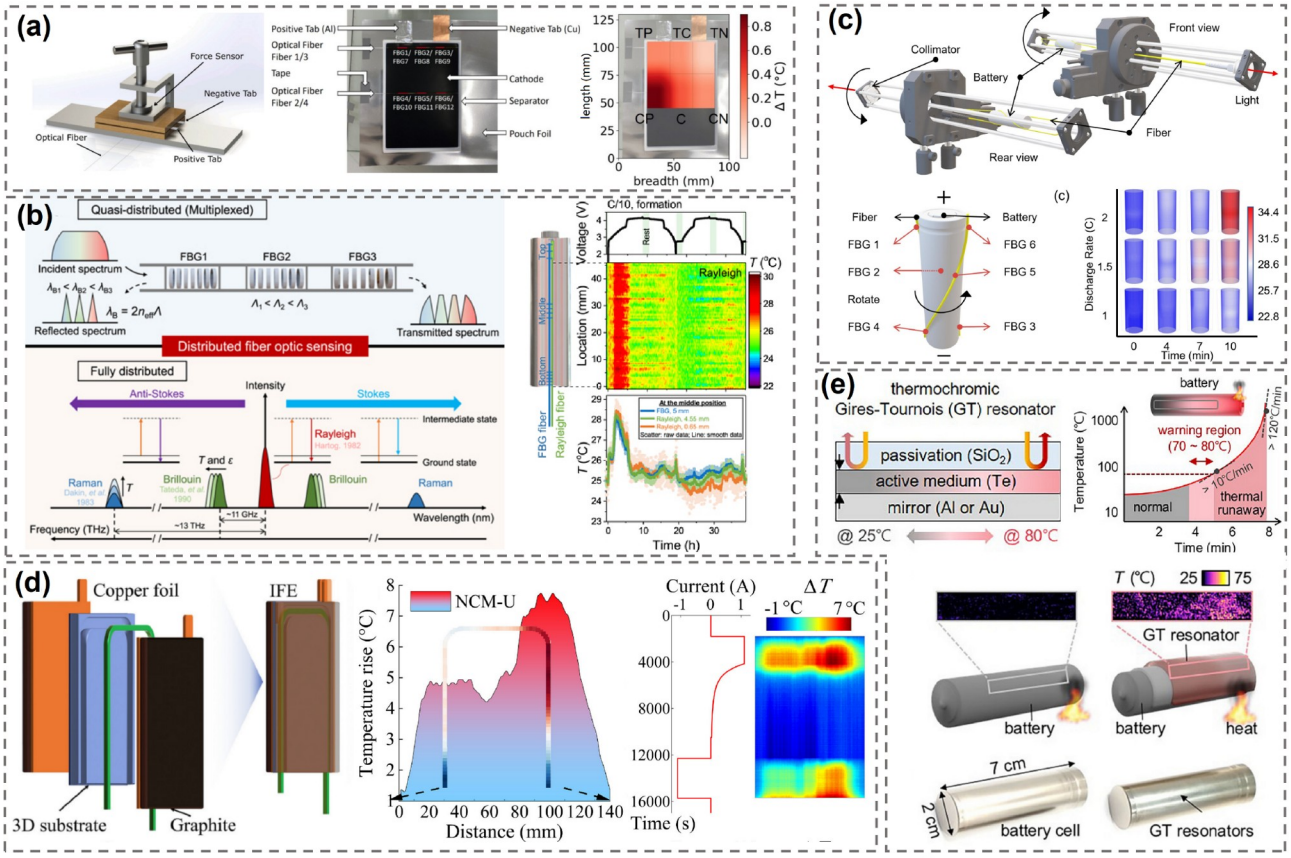


图 4 (网络版彩图)创新传感驱动的电池热行为表征. (a) 采用光纤布拉格光栅传感器的软包电池组装装置、内部结构示意图及在40 kPa下充放电的空间温度分布图[30]. (b) 准分布式FBG与全分布式Rayleigh传感器原理概述及测试结果对比图[49]. (c) 采用OFDR传感器测试旋转电池的3D装置图及不同倍率下温度随时间变化结果图[50]. (d) 一体化功能极片电池结构及充放电过程中的温度映射图[51]. (e) 采用GT谐振器集成于电池表面的示意图及温度监测图[52]

Figure 4 (Color online) Innovation-sensing-driven thermal behavior characterization of batteries. (a) Assembly device, internal structure schematic diagram of the pouch battery equipped with Fiber Bragg Grating sensors, and spatial temperature distribution map during charge-discharge under 40 kPa [30]. (b) The outline and test result comparison diagram of quasi-distributed FBG and fully distributed Rayleigh sensors [49]. (c) A 3D render of the fully assembled battery rotation experimental setup using OFDR sensors, and temporal evolution of battery temperature under various discharge rates [50]. (d) The lithium-ion battery with IFE and temperature mapping diagram during charge-discharge processes [51]. (e) Schematic and temperature monitoring diagram of the GT resonator integrated on the battery surface [52].

致变色Gires-Tournois (GT)共振器作为温度传感器, 利用Te在80 °C以下固态-准液态的部分熔化相变导致其折射率显著变化, 通过检测反射率变化与温度的定量关联, 结合光学成像与光谱分析, 实现17 ms超快速响应、35 μm空间的可视化温度监测. 将其直接沉积于电池表面, 在火焰加热边缘模拟热失控时, 通过颜色变化直观呈现热量在电池表面的传播过程.

尽管现有光学传感技术在储能器件温度监测方面展现出显著优势, 但仍存在若干挑战和未开发的潜力领域. 未来研究应聚焦以下三大关键方向: (1) 深化光纤布拉格光栅与光频域反射技术的集成优化, 研发更为高效可靠的电池温度监测系统; (2) 推动传感维度多元化, 通过压电传感器、接触式位移传感器等多类型传感器件, 探寻与电池内部温度高度相关的物理信号, 进而提升测试的准确性; (3) 推进传感器模块化设计, 实现与现有电池热管理系统架构的无缝集成, 助力温度监测与热控制功能的协同调控.

2.5 扫描热显微镜

扫描热显微镜作为扫描探针显微镜(scanning probe microscopy, SPM)的重要分支, 是目前唯一能在纳米尺度范围内提供高空间分辨率的热物性测量技

术，其核心优势在于将样品形貌成像与热物性分析精准结合，为微纳尺度热行为研究提供了不可替代的工具. 该技术以热敏探针为核心传感元件，探针通常为悬臂梁结构，针尖附近沉积有薄膜电阻，该电阻兼具加热器与电阻温度计双重功能，其工作原理基于金属电阻率的温度依赖性，通过监测探针电阻变化即可反推温度信息；同时搭配激光-反射镜-光电探测器或压电悬臂梁检测系统, 实时捕捉针尖-样品间的微弱相互作用力与纳米级偏转，将形貌成像与热物性分析相结合, 测量可分为两种模式: 温度对比(被动模式)和热导率对比(主动模式). 在被动模式下, 探针作为被动温度传感器, 不主动加热, 依靠与样品表面的热交换达到热平衡, 通过探针自身温度与样品表面温度的关联, 即可反推样品表面温度分布; 主动模式下, 探针同时扮演加热器与温度传感器的双重角色，通过外部电路对探针和样品进行加热，探针温度取决于其与样品之间的热传导特性，可据此推算出样品表面的热导率分布[33,53,54]. 图5a所示为扫描热显微镜的示意图.

SThM凭借其高空间分辨率的优势, 自20世纪90年代以来在多种能源与纳米材料领域得到广泛应用. 2020年Datye等[31]通过SThM在纳米尺度下观测到过渡金属硫族化合物存储器件表面温度分布，图5b展示了通过配备温度敏感电阻的Pd探针，当输入功率为2.5 mW时, 表面温升33~39 K, 热点位置与原子力显微镜(AFM)观测到的顶电极凸起对应，证实导电塞区域为加热中心，清晰地揭示了施加电压过程中导电插件形成的局部加热现象. 基于SThM测得的表面温升数据进行3D电-热模拟，为器件热行为提供关键量化参

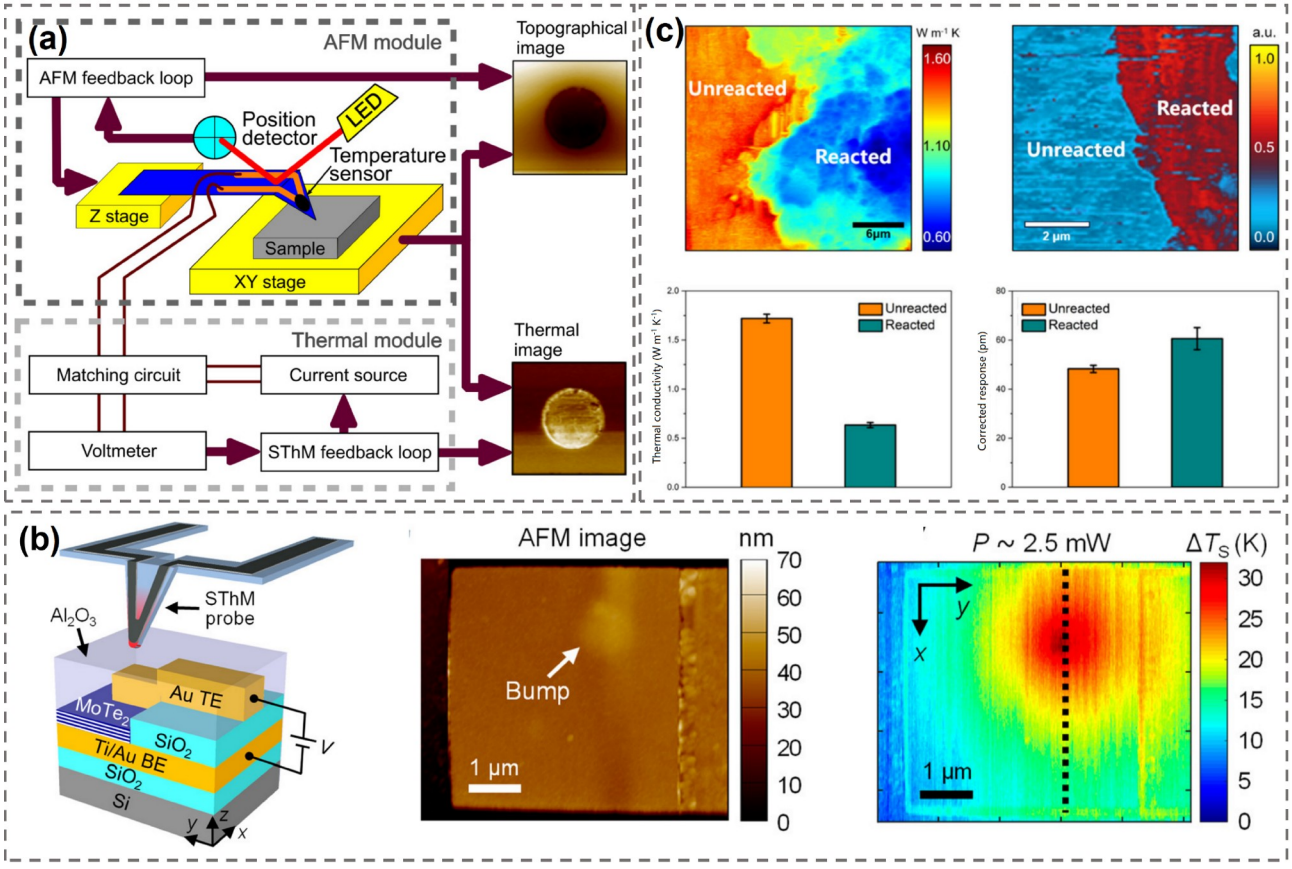


图 5　(网络版彩图)扫描热显微镜的原理及应用. (a) 扫描热显微镜示意图[33]. (b) 老化LATP的热导率和热膨胀响应分布图及反应前后相柱状图[32]. (c) $MoTe_2$器件的SThM测试示意图; 顶部电极区域的AFM及SThM图像[31]

Figure 5　(Color online) Principles and applications of scanning thermal microscopy. (a) Schematic diagram of the SThM [33]. (b) Thermal conductivity mapping of aged LATP and bar graph for the unreacted and reacted phases [32]. (c) Schematic of SThM setup for the $MoTe_2$ device; AFM and SThM images of the top electrode region [31].

数. 2025年, Wang等[32]将该技术成功应用于锂电池固态电解质领域, 聚焦NASICON型固体电解质$Li_{1.4}Al_{0.4}Ti_{1.6}(PO_4)_3$ (LATP)与锂金属组装后的纳米尺度老化机制, 针对传统研究忽视热特性及其耦合效应的不足, 将SThM与扫描热离子显微镜(STIM)、AFM等技术联用, 系统探究了LATP老化过程中的热-力学-电化学耦合行为. 研究发现, LATP在5次循环后会形成$Li_3Al_{0.4}Ti_{1.6}(PO_4)_3$次生相, 通过SThM表征精准捕获到该次生相与未反应LATP的热导率差异: 从初始的1.72显著降至0.63 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$, 揭示了LATP与锂金属循环后形成的二次相在热导率上的显著变化, 如图5c所示, 同时, SThM获取的热导率数据与STIM的热膨胀响应、AFM的力学模量表征及宏观红外热成像结果相互印证, 为揭示热导率降低引发局部热积累、结合热膨胀与力学性能不匹配加剧界面接触恶化的热-力学耦合老化机制提供了直接实验依据, 填补了传统研究忽视热特性对固体电解质降解影响的空白.

扫描热显微镜在储能器件热安全研究中的应用潜力日益凸显, 其核心优势在于接触式测量的高灵敏度以及同步获取热学参数与微观形貌的多维度解析能力. 未来可通过但不限于以下三方面拓展: (1) 以纳米级空间分辨与毫开尔文级温度灵敏度, 精准捕获关键区域的微观温度分布与动态热演化; (2) 借助主动热传导模式定量表征核心组件的热导率, 为器件内部异常热积累提供数据支撑; (3) 推动热成像技术与拉曼光谱等先进表征技术结合, 实现多模态、跨尺度信息的协同检测, 为电极产热分析及性能优化提供微观视角.

3 总结与展望

储能器件原位热成像表征技术的发展围绕着精准捕捉热演化行为和深度解析产热机制的核心需求逐步演进, 目前已形成了从基础可视化到精准定量化、从表面监测到内部溯源的技术体系. 本文聚焦储能器件热行为的原位分析技术, 系统梳理了传统红外热成像、锁相热成像、X-ray CT联用及传感技术的研究进展, 探讨了SThM核心潜力技术的发展方向.

未来, 随着原位分析技术的不断革新, 储能器件内部反应机制正逐步清晰, 热成像分析技术也将朝着“更高精度、更多维度、更强集成、更广应用”的方向持续突破, 为器件安全性与寿命优化提供更坚实的技术支撑. 具体而言, 一方面需进一步优化锁相热成像技术的信号抗干扰能力与空间分辨率, 深化扫描热显微镜在微观尺度产热行为与结构演化关联分析中的应用; 另一方面要积极探索原位热成像技术与拉曼光谱、微观结构表征等先进技术手段的融合发展, 构建“电化学性能-产热行为-结构演化”的跨尺度关联, 为全面解析储能器件失效机制提供多维度技术支撑. 同时, 需突破传感器微型化、兼容性与长期稳定性等核心技术瓶颈, 开发兼具高空间分辨与快速响应能力的嵌入式测温技术, 实现对储能器件内部关键区域温度的直接、实时监测. 此外, 还应推动人工智能与热管理的深度融合, 通过原位表征获取的多维热演化数据与AI算法耦合, 实现对储能器件热安全状态的精准预判、早期预警及动态调控.

参考文献

1 Tomaszewska A, Chu Z, Feng X, O'Kane S, Liu X, Chen J, Ji C, Endler E, Li R, Liu L, Li Y, Zheng S, Vetterlein S, Gao M, Du J, Parkes M, Ouyang M, Marinescu M, Offer G, Wu B. *eTransportation*, 2019, 1: 100011

2 Amici J, Asinari P, Ayerbe E, Barboux P, Bayle-Guillemaud P, Behm RJ, Berecibar M, Berg E, Bhowmik A, Bodoardo S, Castelli IE, Cekic-Laskovic I, Christensen R, Clark S, Diehm R, Dominko R, Fichtner M, Franco AA, Grimaud A, Guillet N, Hahlin M, Hartmann S, Heiries V, Hermansson K, Heuer A, Jana S, Jabbour L, Kallo J, Latz A, Lorrmann H, Løvvik OM, Lyonnard S, Meeus M, Paillard E, Perraud S, Placke T, Punckt C, Raccurt O, Ruhland J, Sheridan E, Stein H, Tarascon JM, Trapp V, Vegge T, Weil M, Wenzel W, Winter M, Wolf A, Edström K. *Adv Energy Mater*, 2022, 12: 2102785

3 Wang Q, Mao B, Stoliarov SI, Sun J. *Prog Energy Combust Sci*, 2019, 73: 95–131

4 Yang C, Shi HJ. *Int J Low-Carbon Technologies*, 2023, 18: 1134–1139

5 Jindal P, Bhattacharya J. *J Electrochem Soc*, 2019, 166: A2165–A2193

6 Huang Y, Zhao Y, Bai W, Cao Y, Xu W, Shen X, Wang Z. *Process Saf Environ Protection*, 2024, 191: 1483–1494

7 Feng X, Zheng S, Ren D, He X, Wang L, Cui H, Liu X, Jin C, Zhang F, Xu C, Hsu H, Gao S, Chen T, Li Y, Wang T, Wang H, Li M, Ouyang M.

Appl Energy, 2019, 246: 53–64
8 Li Y, Liu X, Wang L, Feng X, Ren D, Wu Y, Xu G, Lu L, Hou J, Zhang W, Wang Y, Xu W, Ren Y, Wang Z, Huang J, Meng X, Han X, Wang H, He X, Chen Z, Amine K, Ouyang M. *Nano Energy*, 2021, 85: 105878
9 Chen S, Shen Y, Li D, Tian G, Li Y, Ma X, Shuai S. *J Energy Storage*, 2025, 140: 118950
10 Liu Y, Zhu Y, Cui Y. *Nat Energy*, 2019, 4: 540–550
11 Friedrich F, Zünd T, Hoefling A, Tübke J, Gasteiger HA. *J Electrochem Soc*, 2022, 169: 040547
12 Friedrich F, Kunz A, Jossen A, Gasteiger HA. *J Electrochem Soc*, 2023, 170: 050506
13 Wu W, Wang S, Wu W, Chen K, Hong S, Lai Y. *Energy Convers Manage*, 2019, 182: 262–281
14 Kim J, Oh J, Lee H. *Appl Therm Eng*, 2019, 149: 192–212
15 Spinner NS, Hinnant KM, Mazurick R, Brandon A, Rose-Pehrsson SL, Tuttle SG. *J Power Sources*, 2016, 312: 1–11
16 Spitthoff L, Shearing PR, Burheim OS. *Energies*, 2021, 14: 1248
17 Waldmann T, Wohlfahrt-Mehrens M. *ECS Electrochem Lett*, 2014, 4: A1–A3
18 Kafadarova N, Sotirov S, Herbst F, Stoynova A, Rizanov S. *Batteries*, 2023, 9: 519
19 Goutam S, Timmermans JM, Omar N, Bossche P, Van Mierlo J. *Energies*, 2015, 8: 8175–8192
20 Rani MFH, Razlan ZM, Shahriman AB, Ibrahim Z, Wan WK. *Int J Heat Mass Transfer*, 2020, 153: 119595
21 Mei W, Chen H, Sun J, Wang Q. *Appl Therm Eng*, 2018, 142: 148–165
22 Waldmann T, Bisle G, Hogg BI, Stumpp S, Danzer MA, Kasper M, Axmann P, Wohlfahrt-Mehrens M. *J Electrochem Soc*, 2015, 162: A921–A927
23 Kumtepeli V, Wojtala ME, Tredenick EC, Monroe CW, Howey DA. *J Power Sources*, 2026, 663: 238764
24 Robinson JB, Engebretsen E, Finegan DP, Darr J, Hinds G, Shearing PR, Brett DJL. *ECS Electrochem Lett*, 2015, 4: A106–A109
25 Lin J, Chu HN, Howey DA, Monroe CW. *Commun Eng*, 2022, 1: 1
26 Finegan DP, Scheel M, Robinson JB, Tjaden B, Hunt I, Mason TJ, Millichamp J, Di Michiel M, Offer GJ, Hinds G, Brett DJL, Shearing PR. *Nat Commun*, 2015, 6: 6924
27 Sebők D, Stravová Z, Ballai G, Tóth Á, Papp SJ, Zikmund T, Kaiser J, Slávik A, Kukovecz Á. *J Energy Storage*, 2025, 136: 118589
28 Wang W, Zhang Y, Xie B, Huang L, Dong S, Xu G, Cui G. *Adv Energy Mater*, 2024, 14: 2304173
29 Zheng Y, Che Y, Hu X, Sui X, Stroe DI, Teodorescu R. *Prog Energy Combust Sci*, 2024, 100: 101120
30 Unterkofler J, Swaschnig P, Glanz G, Klambauer R, Bergmann A. *J Energy Storage*, 2024, 98: 113089
31 Datye IM, Rojo MM, Yalon E, Deshmukh S, Mleczko MJ, Pop E. *Nano Lett*, 2020, 20: 1461–1467
32 Wang X, Wang F, Zhu Q, Cheng M, Song C, Li Y, Lu Z, Jin H, Huang B. *Nano Lett*, 2025, 25: 8533–8540
33 Bodzenta J, Kaźmierczak-Bałata A, Harris K. *J Appl Phys*, 2020, 127: 031103
34 Du X, Wu Q, Wang YN, Pan TS, Wei YM, Chen HS, Song WL, Fang DN. *J Power Sources*, 2020, 446: 227343
35 Wang S, Li K, Tian Y, Wang J, Wu Y, Ji S. *Appl Therm Eng*, 2019, 154: 676–685
36 Li K, Wu Y, Wang J, Wang S. *Energy Procedia*, 2017, 142: 3338–3343
37 Chu HN, Kim SU, Rahimian SK, Siegel JB, Monroe CW. *J Power Sources*, 2020, 453: 227787
38 Goutam S, Timmermans JM, Omar N, Van den Bossche P, Van Mierlo J, Rodriguez L, Nieto N, Swierczynski MJ. Surface temperature evolution and the location of maximum and average surface temperature of a lithium-ion pouch cell under variable load profiles. In: *European Electric Vehicle Congress*. Brussels, 2014
39 Yan J, Yao J, Zhao J, Yu Z, Ye Z, Zhang L, Wang Z, Zhang X, Rong Z, Kong D, Sun J, Li W, Wang J, Gao D, Huang J, Tang Y. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: 2421918
40 Wu Q, Yang L, Li N, Chen Y, Wang Q, Song WL, Feng X, Wei Y, Chen HS. *J Power Sources*, 2022, 540: 231602
41 Goutam S, Nikolian A, Jaguemont J, Smekens J, Omar N, Van Dan Bossche P, Van Mierlo J. *Appl Therm Eng*, 2017, 126: 796–808
42 Giammichele L, D'Alessandro V, Falone M, Ricci R. *Appl Therm Eng*, 2022, 205: 117974
43 Michalowski P, Gräfenstein A, Knipper M, Plaggenborg T, Schwenzel J, Parisi J. *J Electrochem Soc*, 2017, 164: A2251–A2255
44 Robinson JB, Darr JA, Eastwood DS, Hinds G, Lee PD, Shearing PR, Taiwo OO, Brett DJL. *J Power Sources*, 2014, 252: 51–57
45 Finegan DP, Tjaden B, M. M. Heenan T, Jervis R, Michiel MD, Rack A, Hinds G, Brett DJL, Shearing PR. *J Electrochem Soc*, 2017, 164:

A3285–A3291
46 Finegan DP, Darcy E, Keyser M, Tjaden B, Heenan TMM, Jervis R, Bailey JJ, Malik R, Vo NT, Magdysyuk OV, Atwood R, Drakopoulos M, DiMichiel M, Rack A, Hinds G, Brett DJL, Shearing PR. *Energy Environ Sci*, 2017, 10: 1377–1388
47 Charbonnel J, Darmet N, Deilhes C, Broche L, Reytier M, Thivel PX, Vincent R. *ACS Appl Energy Mater*, 2022, 5: 10862–10871
48 Heenan TMM, Mombrini I, Llewellyn A, Checchia S, Tan C, Johnson MJ, Jnawali A, Garbarino G, Jervis R, Brett DJL, Di Michiel M, Shearing PR. *Nature*, 2023, 617: 507–512
49 Huang J, Blanquer LA, Gervillié C, Tarascon JM. *J Electrochem Soc*, 2021, 168: 060520
50 Kim J, Lee S, Lee T, Yoo J. *Measurement*, 2023, 221: 113457
51 Wang X, Zhu J, Wei X, Wang D, Xu W, Jin Y, Dai H. *Energy Storage Mater*, 2024, 65: 103160
52 Kim HM, Lee JH, Kim J, Kim G, Han JH, Ko JH, Song YM, Jeong HH. *Adv Mater*, 2025, 37: 2511261
53 Alikin D, Zakharchuk K, Xie W, Romanyuk K, Pereira MJ, Arias-Serrano BI, Weidenkaff A, Kholkin A, Kovalevsky AV, Tselev A. *Small Methods*, 2023, 7: 2201516
54 Kim K, Chung J, Hwang G, Kwon O, Lee JS. *ACS Nano*, 2011, 5: 8700–8709

Research progress on thermal behavior of energy storage devices based on *in-situ* imaging techniques

Zhaoxuan Jiang[1,2], Rui Wen[1,2*]

[1] *CAS Key Laboratory of Molecular Nanostructure and Nanotechnology, Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*
[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
**Corresponding author (email: ruiwen@iccas.ac.cn)*

Abstract: Electrochemical energy storage devices serve as a core pillar for driving the global energy transition and advancing the achievement of carbon neutrality goals. However, thermal safety issues remain a critical bottleneck restricting the development of high-energy-density energy storage systems. Heat generation and irreversible thermal loss inevitably occur during the charge-discharge cycle, leading to continuous heat accumulation with strongly heterogeneous characteristics and dynamic coupling effects. Traditional point-based temperature measurement methods fail to capture transient thermal distribution, while destructive disassembly analysis cannot elucidate heat transfer pathways under real operating conditions. In this context, the innovative application of *in-situ* imaging technologies provides a unique approach for the accurate characterization of thermal behaviors in energy storage devices. This review systematically summarizes the latest advances in a series of *in-situ* analytical techniques, including infrared thermography, lock-in thermography, combined X-ray computed tomography and infrared thermography, and advanced sensing technologies. It focuses on the dynamic evolution of thermal behaviors during charging and discharging, as well as the visualized characterization and mechanism analysis of cross-scale coupling between internal structures and thermal fields. Furthermore, this paper prospectively discusses cutting-edge research directions, such as microscale thermophysical property measurement via scanning thermal microscopy, the integration of multi-modal *in-situ* analysis systems, and artificial intelligence-empowered optimization of thermal management strategies. This work aims to provide theoretical foundations and technical references for an in-depth understanding of thermal runaway mechanisms and the high-safety structural design of next-generation energy storage devices.

Keywords: *in-situ* imaging techniques, thermal analysis, heat generation behavior, thermal safety, electrochemical energy storage

doi: 10.1360/SSC-2026-0046