

超声和光纤传感技术在固态电池中的应用进展与挑战

黄 锴¹, 李林昊¹, 黄 宇¹, 毛恒山², 于逸飞¹, 沈 越¹, 黄云辉¹

(1. 华中科技大学, 武汉 430074; 2. 中国电建新能源有限公司, 北京 100029)

摘 要: 随着固态电池向高能量密度和高安全性方向快速发展, 对其内部复杂界面的演化过程与失效行为的实时监测提出了更高要求。然而, 传统传感技术难以适应固态电池刚性界面和固固接触的特性, 在原位检测灵敏度与适配性方面仍存在诸多挑战。本文综述了超声与光纤传感技术在固态电池中的最新应用进展, 即超声技术凭借其无损检测优势, 可动态解析电极-电解质界面的接触状态、裂纹演化及气体生成过程; 光纤传感技术则可通过与电极或电解质集成, 实现对电池内部应力分布、温度梯度以及化学副产物变化的实时监测, 为界面优化与失效机制研究提供新思路。同时从界面特性、力学特性和物化特性 3 个方面系统总结了这 2 类传感技术在固态电池中的应用现状, 并探讨其未来的发展机遇与面临的关键挑战。

关键词: 锂离子电池; 固态电解质; 光纤传感; 超声检测技术

中图分类号: TM911 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)06-1456-13

网络出版时间: 2025-05-29



在全球气候变化加剧与化石能源危机双重压力下, 发展新能源技术已成为实现碳中和战略的必由之路。预计到 2030 年, 全球新能源汽车销量将突破 2800 万辆, 市场渗透率达 35% 以上。作为电动汽车的“动力心脏”和储能系统的“能量细胞”, 锂离子电池凭借其能量密度、循环稳定性及成熟的产业生态, 已在动力与储能领域占据主导地位。然而, 受制于石墨负极理论容量极限[372 (mA·h)/g]及有机电解液热稳定性不佳, 传统锂离子电池体系已接近其理论性能极限, 通常能量密度 < 350 (W·h)/kg, 难以满足下一代电动交通工具对续航里程与安全性的进阶需求。

为突破上述瓶颈, 亟需开发具备比容量更高的负极材料。锂金属电池凭借其高理论比容量(3860 (mA·h)/g)和低电化学电位(-3.04 V vs. SHE)被视为是实现高能量密度储能体系的关键技术路线之

一。然而, 在液态电解质体系中, 锂枝晶的生长以及库仑效率偏低, 导致电池性能快速衰减, 并带来严重的安全隐患。在此背景下, 固态电池(SSBs)通过采用固态电解质(SSEs)全面替代易燃有机电解液, 从根本上规避了热失控风险。同时, 搭配高电压正极与高比能负极体系, 能量密度有望突破 500 (W·h)/kg^[1]。尽管如此, 固态电池产业化进程面临 3 大核心挑战^[2-4]: 1) 电极/电解质固-固界面接触劣化导致的阻抗累积; 2) 锂枝晶沿晶界或结构缺陷穿透引发的短路风险; 3) 循环过程中界面副反应产气引发的机械失效。为有效应对上述问题, 亟需对电池内部多物理场演化行为开展原位、动态和多维度的精准表征与机制解析。

目前, 已发展了多物理场的物理量智能传感及监测技术, 包含电、热、气、声、光、力、磁等多个物理量。其中, 超声和光纤传感技术凭借各自独

收稿日期: 2025-04-29。 修订日期: 2025-05-12。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2406004); 国家自然科学基金(22179045, 52394173, 52394174); 榆林创新能源革命科技计划(No.E411070316); 湖北省国际合作项目(No.2024EHA044); 中国电建新能源有限公司重点科技项目(10ITDJXNY202024026)。

第一作者: 黄 锴(1994), 男, 博士研究生。

李林昊(1997), 男, 博士研究生。

通信作者: 于逸飞(1989), 女, 博士, 教授。

沈 越(1983), 男, 博士, 教授。

黄云辉(1966), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-04-29. Revised date: 2025-05-12.

First author: HUANG Kai (1994-), male, Doctoral candidate.

LI Linhao (1997-), male, Doctoral candidate.

E-mail: kailhh@hust.edu.cn; linhao_xue@hust.edu.cn

Correspondent author: YU Yifei (1989-), female, Ph. D., Professor.

SHEN Yue (1983-), male, Ph. D., Professor.

HUANG Yunhui (1966-), male, male, Ph. D., Professor.

E-mail: yuyf@hust.edu.cn; shenyue1213@hust.edu.cn; huangyh@hust.edu.cn

特的技术优势和应用边界, 已被广泛应用于电池状态感知和监测。超声检测技术凭借其优异的穿透能力以及及对微小缺陷、气体的敏感响应, 在电池监测领域取得显著进展。通过分析声速变化、衰减特征及声发射信号, 可实时获取电池内部气体分布、微裂纹形成及电极/电解质界面退化等关键信息^[5]; 光纤传感则凭借其抗电磁干扰、高绝缘性、微型化结构及多参数解耦能力, 在复杂环境监测与能源系统管理等领域展现出独特优势^[6]。随着材料科学、微纳加工技术与人工智能算法的深度融合, 光纤传感已突破单一物理量检测的局限, 正逐步发展为具备多维度感知功能的“光纤上的实验室”(Lab-on-Fiber)系统^[7]。电池科学与传感器工程的深度融合, 为电池状态诊断和智能化管理提供了前所未有的机遇, 其在电池内部的原位应用不仅推动了传感机制的持续创新, 也为构建新一代高安全性、高可靠性的能源系统提供了关键支撑。

作为新兴的原位监测手段, 超声与光纤传感技术相比传统电池原位表征方法具有诸多优势。超声技术具备无损、高效、低成本等特点, 可灵敏探测电池内部孔隙演化、气体生成及电解质润湿等现象, 弥补了传统技术在穿透深度和响应速度方面的不足。光纤传感技术则可实现电池内部结构相变、离子迁移和应力等参数的实时监测, 具备抗电磁干扰能力, 成本低、植入灵活, 尤其适用于对封闭电池体系的长周期原位探测需求。尽管已有不少综述聚焦锂离子电池的超声和光纤监测技术, 但针对其在固态电池中的应用相对较少。

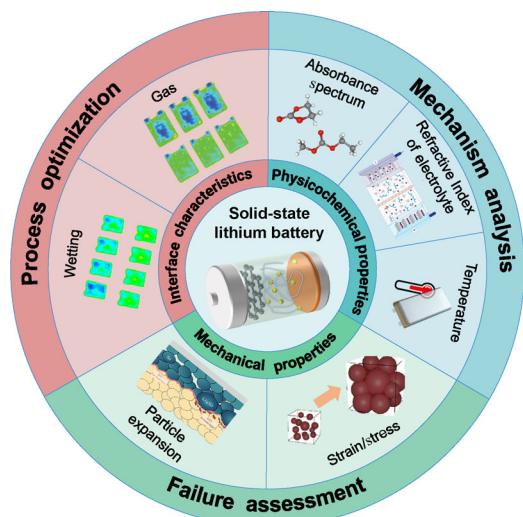


图 1 超声和光纤固态电池监测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic and fiber-optic SSBs monitoring

本文系统梳理了超声和光纤传感技术在固态电

池的界面特性、材料力学特性、材料物化特性 3 个方面的最新进展, 也结合本团队的相关工作进行了归纳总结, 并进一步展望了其于智能电池系统融合的发展趋势与面临的关键挑战。

1 超声和光纤技术在固态电池中的应用概述

1.1 超声电池检测基本原理

作为应用最为广泛的无损检测技术之一, 超声检测凭借其快速发展的技术体系与普适性优势, 在工业与科研领域占据重要地位^[8]。其基本原理基于频率高于 20 kHz 的机械波与材料介质的相互作用机制。该频段的机械振动波在介质中传播时表现出良好的穿透性与指向性, 其能量传播特性受介质密度、弹性模量等本征参数调控^[9]。当超声波传播路径遭遇材料内部界面、缺陷或组织不均匀区域时, 将产生反射、折射、散射等多种界面效应^[10]。凭借非侵入式检测与多参数敏感的独特优势, 超声技术为固态电池内部状态监测提供了创新手段。超声波与物质相互作用时产生的声阻抗、衰减系数(α)及飞行时间(ToF)等特征参数, 可同步反映材料密度(ρ)、弹性模量(E)及界面形态的实时变化^[11]。相较于电化学阻抗谱、X 射线断层扫描等技术, 超声方法具备空间分辨率能力与更快的响应速率, 适用于封装体系电池内部力学演变和产气过程的原位追踪。

基于上述原理, 超声检测系统通过压电换能器实现声信号到电信号的转换, 所接收的回波信号携带了材料内部结构特征信息, 如图 2 所示。通过时域分析、波幅调制及空间扫描重构等信号处理方法, 可分别获得反映材料内部特征的一维时域波形(A 扫)、二维截面图像(B 扫, X-Z、Y-Z 平面)以及二维平面数据(C 扫)^[12]。超声的多种成像模式使其在生物医学成像、工业探伤、材料性能表征及地质结构分析等领域具有不可替代性的优势^[13]。

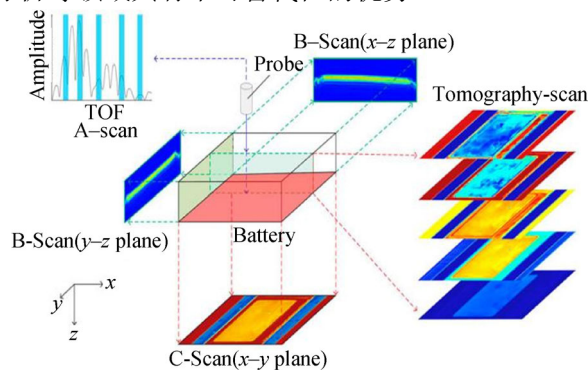


图 2 不同超声成像模式原理图^[12]

Fig. 2 Schematic diagram of different ultrasound imaging modes^[12]

超声波场是指超声波能量在介质中形成的特定空间分布区域,其物理特征由声压、声强、声阻抗等参数共同描述^[14]。其中,其中: ρ 为材料密度; V 为材料声速,声阻抗(Z)作为关键特征参数,表征介质对声波传播的阻碍作用,其数学表达为:

$$Z = \rho \times V \quad (1)$$

在超声检测系统中,接收端显示的信号幅度本质是压电换能器转换的电压信号幅值,其与超声场中声压呈线性正相关。超声场中任意点的动态声压(P)可定义为:

$$P = P_1 - P_0 \quad (2)$$

其中: P_1 为超声波存在时该点的瞬时声压; P_0 为无超声波激励状态下的静态压力。该动态声压表征了超声波传播引起的局部压力扰动。超声波在介质中传播时,受吸收、散射及扩散效应影响,其能量随传播距离呈指数衰减规律,数学描述为:

$$P_x = P_x^* e^{-\alpha x} \quad (3)$$

其中: P_x 为距波源 x 处的声压幅值; α 为介质衰减系数,其物理意义表征单位距离内声能损失率, α 与介质微观结构(如晶界、孔隙率)及超声波频率密切相关。

飞行时间定义为超声波从发射至接收的全程耗时,其与传播路径长度 L 及介质声速 V 满足关系式(4),该关系表明,对于特定材料,ToF与材料厚度呈正比;而在厚度恒定的情况下,ToF的变化可反映材料弹性性能的演化,如裂纹导致的模量下降。

$$\text{ToF} = \frac{L}{V} = \frac{L}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (4)$$

在超声检测技术中,声阻抗、声压及飞行时间构成表征介质特性与能量传递行为的核心参数体系。声阻抗通过量化声波在不同介质界面的反射与透射行为评估气体或孔隙;声压幅值及其衰减规律直接关联声波场能量分布,为缺陷尺寸与材料均匀性评估提供依据;飞行时间则利用声波传播的时间延迟,实现对材料厚度、弹性模量等参数的非接触式反演。三者协同支撑超声检测,在电池界面失效诊断、内部缺陷定位及力学性能退化监测等多场景下的应用优化。超声检测的分辨率主要受限于超声波的频率与波长之间的关系以及探测器的性能。通常,高频激励(即波长较短)能够实现亚毫米级的空间分辨率,有助于识别更细微的结构特征,但同时也会降低穿透深度,并可能引起信噪比下降,因此,

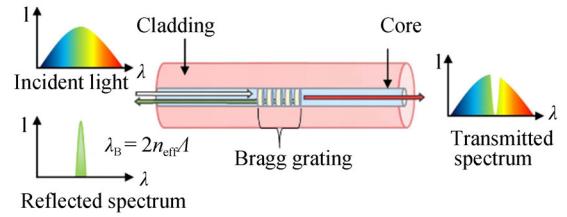
需要在分辨率和检测深度之间进行合理权衡。通过配合高灵敏度的探测器与自适应滤波等信号处理算法,可增强微弱信号的提取能力,从而提升在复杂介质中识别微小缺陷的检测极限。

1.2 光纤电池检测基本原理

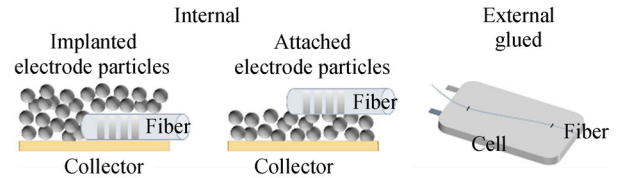
研究人员也在积极探索光纤传感技术在固态电池中的应用前景。在“光纤上的实验室”技术体系中,布拉格光纤光栅(FBG)因其制备工艺成熟、反射信号强、灵敏度高优势,受到广泛关注。作为一种可植入式微型光栅传感器,FBG已广泛应用于电池温度与应力/应变的原位监测。

FBG的光栅结构是基于衍射光栅原理,沿光纤纵向周期性调制纤芯折射率形成的。图3为FBG光纤光栅传感器。由图3a可见,当光在光栅区域内沿轴向传播时,满足特定条件的反射光波相干叠加,形成特征性的布拉格反射峰(λ_B),反射波长 λ_B 由光栅布拉格方程^[15–16]决定:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (5)$$



(a) Basic Principles of FBG Sensing



(b) Different encapsulation methods of FBG sensors

图3 FBG光纤光栅传感器:(a)FBG传感基本原理^[19];(b)FBG传感器不同封装方式^[20]

Fig. 3 FBG fiber grating sensor: (a) FBG sensing principle^[19]; (b) Different packaging methods of FBG sensors integrated into batteries^[20]

其中: n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率; Λ 为2个相邻光栅平面之间的距离,称为光栅周期。当外部应力或应变的波动导致光纤拉伸或压缩时,纤芯中的周期性光栅结构发生变化,导致布拉格峰的中心波长发生偏移。考虑温度变化对折射率与光栅周期的共同影响,该波长偏移量可表示为^[17–18]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (6)$$

其中: P_e 为有效应变光学常数; $\Delta\varepsilon$ 为环境造成的光纤应变变化量; α 为光纤的热膨胀系数; ξ 为光

纤的热光系数。FBG 传感器对应力或应变和温度等物理参数表现出交叉敏感性。为消除温度对布拉格中心波长的干扰, 研究中常采用 2 组具有不同应力和温度敏感系数的 FBG 传感器进行同步监测, 利用灵敏度矩阵对温度与应变信号进行解耦; 或者通过将系统置于恒温环境中, 避免电池在长周期循环过程中受环境温度波动影响。在有效抑制温度干扰后, 中心波长的变化可进一步转换为^[15]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n_{\text{eff}}^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]}{2}\right) \Delta\varepsilon \quad (7)$$

其中: p_{11} 和 p_{12} 为应变光学系数; ν 为泊松比。对于硅系光纤传感器, 这些材料特性是已被设计好的 ($n_{\text{eff}} = 1.45$, $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.17$)^[19], 再通过胡克定律 $\sigma = \varepsilon E$ (其中: E 为光纤的杨氏模量, 约为 69.9 GPa) 计算, 即可将应变转化为应力。

2 超声和光纤传感技术在固态电池中的应用

2.1 界面特性评估

固态电池中, 界面接触劣化与产气行为是引发性能衰退的核心问题, 其检测面临 2 大难点: 一是界面失效机制难解耦, 化学钝化层生成与物理接触损失往往交织发生, 传统电化学方法难以明确区分主导因素; 二是缺乏对产气行为的动态原位可视化监测手段, 密闭封装体系内气体析出难以原位追踪, 且微量气体的空间分布与界面副反应关联性不明。超声检测技术具备无损、高灵敏度及对气体空隙敏感等优势, 可实现对电极-电解质界面接触状态的有效评估, 并有望构建其与产气行为之间的动态映射关系, 从而为失效机制解析提供独特且可量化的视角。

Huo 等^[21]利用本团队自主研制的超声成像技术 (见图 4a), 揭示了 PEO 基电解质/锂金属界面的失效主因是钝化层生成而非物理接触劣化, 且循环初期界面接触电阻由于“活化”而降低。Pei 等^[22]利用该技术对比自修复电解质与传统体系, 结果发现前者的超声信号峰峰值显著提升, 证实动态二硫键的引入可修复界面微裂纹, 使锂对称电池循环寿命突破 6000 h, 如图 4b 所示。针对复合电解质体系, Wei 等^[23]证实采用全偶联铜聚酞菁金属 (CuPcLi) 改性后, 可显著降低 PVDF-b-PTFE (PVT) 基电解质的界面副反应速率 (见图 4c)。此外, Jiang^[24]以及 Li 等^[25] 分别通过引入二维金属磷硫化物与锂皂石片实现界面改性, 并利用超声成像技术验证了上述改性在提升界

面接触稳定性方面的显著效果。

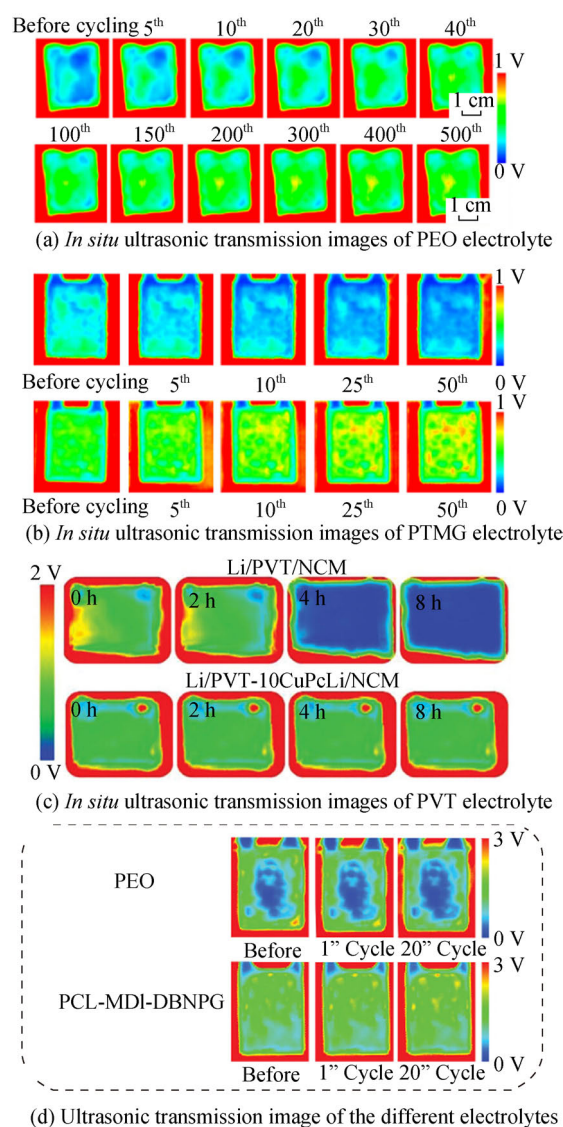


图 4 超声技术用于固态电解质界面评估: (a) 超声成像聚合物失效评估示意图^[21]; (b) 二硫键修饰 PTMG 电解质前后超声循环产气对比^[22]; (c) CuPcLi 改性 PVDF 电解质产气评估^[23]; (d) PCL 改性电解质评估^[26]

Fig. 4 Application of Ultrasonic Technology in Solid-State Electrolyte Interface Evaluation: (a) Schematic of ultrasonic imaging for polymer failure assessment^[21]; (b) Comparison of gas generation in ultrasonic cycles before and after disulfide-modified PEO electrolyte^[22]; (c) Gas generation evaluation of CuF₂-modified PEO electrolyte^[23]; (d) Assessment of PCL-modified electrolyte^[26]

Wu 等^[26]发现了聚己内酯二醇改性电解质循环产气速率出现显著降低 (见图 4d), Chen 等^[27]结合超声与电化学阻抗谱 (EIS) 证实纤维素/B₂O₃复合体系的气体抑制效果。Wang 等^[28]则通过超声成像技术证实了 PVDF-PTFE 改性界面的气体生成更少, 显著优于传统体系。此外, Hou 等^[29]与 Wang 等^[30]分

别通过超声技术证实, 单离子导电电解质和 LiI 添加剂不仅可有效抑制产气, 还能改善电解质润湿性。总体上, 上述研究表明超声成像技术作为一种无损、可视化手段, 为固态电解质改性策略效果的快速评估提供了可靠支撑。

依托本团队自主研制的超声电池成像扫描仪, 本团队对某商业 3 A·h 聚合物电解质的原位固化过程进行了研究, 并对 2 种不同工艺(电池 A 和电池 B)在原位聚合均匀性方面进行了对比分析。

图 5 为原位聚合软包电池超声检测结果。由图 5 可见, 聚合前, 液态电解质充分浸润电极/隔膜孔隙, 超声图像中表现出高透射率特征(绿色信号); 聚合后, 随着固-固界面的形成, 多相界面接触劣化, 超声图像中出现明显的低透射率特征(白色信号)。对比发现, 电池 A 的聚合效果优于电池 B, 表现为低透射率区域显著较小, 表明其聚合物交联更均匀、界面接触更充分。超声图像中低透射率区域与聚合物交联程度呈正相关, 为原位聚合工艺的无损优化与质量评价提供了有效手段。

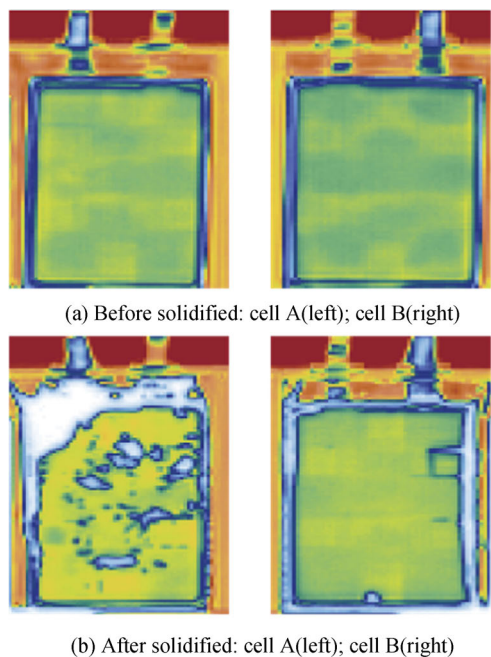


图 5 原位聚合软包电池超声检测结果

Fig. 5 Ultrasonic testing results of *in-situ* polymerized pouch cell

2.2 力学特性评估

固态电解质在循环过程中常伴随微观损伤的隐匿演化, 如锂枝晶穿透、电极微裂纹等早期损伤尺度微小($<10\ \mu\text{m}$), 且常被封装结构遮蔽, 难以直接观测^[31]。此外, 充放电过程中的应力演化、相变诱导的体积膨胀与电解质脆性断裂相互耦合, 使得传

统单一传感手段难以全面解析。在力学特性评估方面, 超声技术通过分析透射或反射声波的多种特性, 如材料声速、衰减强度、声发射强度等可以获取材料颗粒膨胀程度等信息; 光纤传感则可以通过内置或外置的方法实现原位监测, 通过分析光信号频率偏移信息, 定量获取材料的应力/应变状态^[32–33], 通过构建力学-电化学耦合模型, 可以有效揭示电解质损伤及演化机制, 有望为固态电池材料的性能评价与失效机制研究提供了新颖的技术路径与理论支撑。

在超声监测方面, Daniel 等^[34]通过原位超声成像技术对硅基固态电极的力学-形态演变过程进行了动态解析。该研究构建了 ToF 与弹性模量之间的数学模型, 揭示了硅在锂化过程中由晶态向非晶态合金的相变过程伴随弹性模量的显著骤降(见图 6a)。此外, 作者发现首次循环中硅的不可逆膨胀填充电极孔隙, 导致超声信号明显增强。随着循环推进, 孔隙演化呈现出“微孔优先响应-大孔滞后扩展”的非均质特征, 而初期循环中微分容量曲线的峰值锐化表明电极接触界面经历“磨合效应”后逐步趋于均匀化(见图 6b)。该研究通过声波的透射与反射信号协同分析, 实现了微米尺度下应力分布与孔隙率演变的同步可视化映射, 为高容量负极材料的结构设计与机械适配提供了关键理论支持。Schmidt 等^[35]开发的脉冲回波超声技术, 首次实现锂镧锆氧化物(LLZO)电解质锂枝晶穿透的原位无损监测。通过追踪声波传播速度(V_l)的微小变化(灵敏度达 0.1%), 揭示了锂枝晶诱发微裂纹的动态演化过程: 在短路发生前数分钟, V_l 下降 0.1%~0.2%, 对应弹性模量从 133 GPa 降低至 132.8 GPa, 表明微裂纹或枝晶通道形成, 如图 6c 所示。进一步地, 作者结合扫描电子显微镜观察结果, 验证了裂纹扩展行为与电解质中初始缺陷尺寸密切相关, 并建立了弹性模量变化与微裂纹密度之间的关联模型。

Musiak 等^[36]提出的高频连续超声相位分析法(频率范围为 4.5~6.6 MHz)。实现了固态锂离子电池($\text{LiCoO}_2\|\text{LiPON}\|\text{Li}$)电荷状态(SoC)的实时无损监测。该方法通过捕捉电极材料嵌锂/脱锂过程中弹性模量与密度变化引发的相位偏移, 建立相位-SoC 直接映射关系。与传统脉冲超声($<2\ \text{MHz}$)相比, 该方法显著提高了对 LiCoO_2 晶格结构微小变化的探测灵敏度, 并实现了更高时间分辨率的动态追踪, 如图 7a 所示。针对固态电池特性, 该方法其有效克服液体体系声波散射干扰, 精准关联 LiPON/Li 界面弹性波动与电化学状态, 同时初步验证相位响应与容

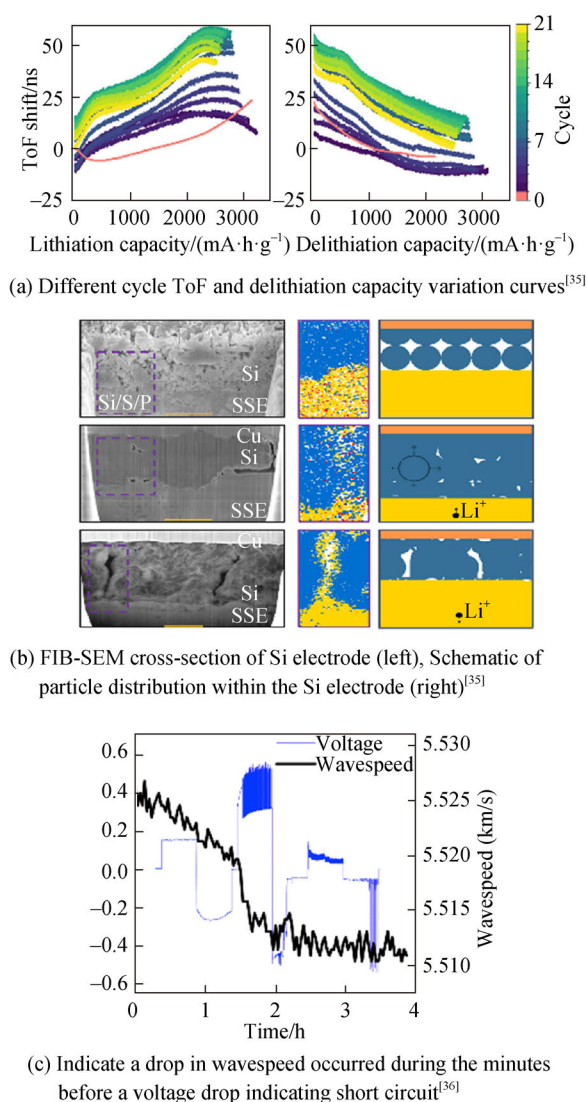


图 6 超声技术监测固态电池中硅负极充放电应力演变过程
Fig. 6 Ultrasonic technology monitors the evolution of stress in silicon anodes of solid-state batteries during charge and discharge cycles

量衰减的潜在关联性(见图 7b), 为锂枝晶生长与界面副反应的声学特征构建电池健康状态(SoH)评估方法提供了有效途径。

在光纤传感方面, Tarascon 等^[19]基于植入式光纤传感器, 深入研究了液态电解质电池和全固态锂电池内部的应力演变。在该研究中, 作者将 FBG 传感器分别集成到 Swagelok 电池和扣式电池中, 包括含液态电解质的 Si 基和 InLi_x 电极电池, 以及全固态的 $\text{InLi}_x\|\text{LPS}\|\text{LTO}$ 电池。在将 FBG 传感器置于 InLi_x 电极表面或内部进行研究时, 植入式 FBG 测量到的最大压力变化约为附着式 FBG 的 2 倍, 这一结果与 Bae 等^[37]的研究趋势一致。然而, 在含有液态电解质的 InLi_x 电极的应力研究当中, 并未在

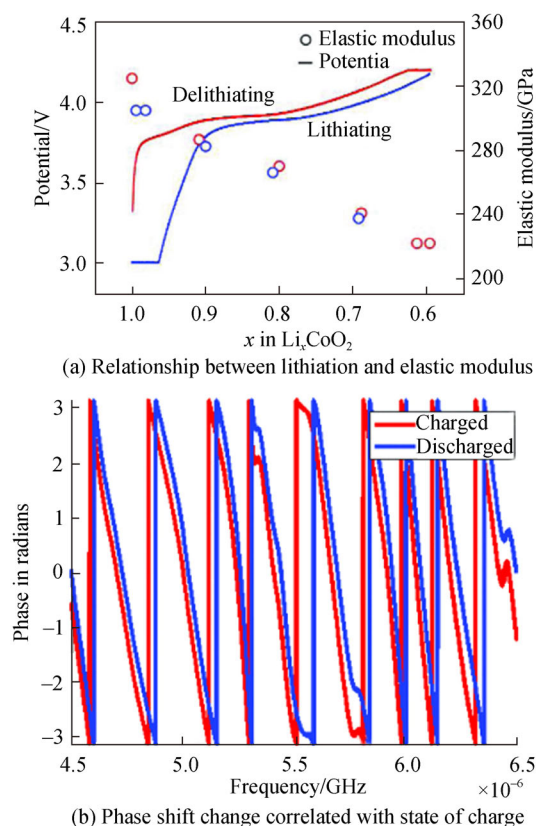


图 7 低频超声技术用于固态电池监测^[37]: (a) 锂化程度与弹性模量曲线; (b) 充放电过程相位变化曲线
Fig. 7 Low-frequency ultrasound technology for solid-state battery monitoring^[37]: (a) Lithiation degree versus elastic modulus curve; (b) Phase change curve during charge-discharge process

FBG 的光谱特征变化中观测到明显的双折射效应(见图 8a)。作者将这一现象归因于锂驱动的各向异性应力更适用于 2D(石墨)而不是 3D(InLi_x)主体结构。与液态电解质体系相比, 全固态电池中的电化学-机械问题更为严重。因此, 为进一步理解电极内部及界面处的应力特征和“消失”的双折射效应, 作者组装了 $\text{InLi}_x\|\text{LPS}\|\text{LTO}$ 全固态电池, 将 FBG 传感器嵌入负极或置于负极-固态电解质界面以此监测电池循环过程中的应力变化。在固态电池中, 往往通过施加外部压力来缓解界面接触不良。然而, 在施压过程中 FBG 光谱显示了光信号的剧烈变化, 即在低压(0~2.5 MPa)下只存在 1 个布拉格共振峰, 但随着压力的增加, 布拉格共振峰分裂为 2 个峰, 且双峰间距也在不断增加, 直到压力施加至 9 MPa, 如图 8b 所示。这一现象归因为 FBG 的双折射效应, 即光纤的椭圆形变打破了其原本的对称性, 在不同方向上的有效折射率不再相同。具体来说, 会产生 2 个不同的折射率分量 n_x 和 n_y , 其中 x 偏振方向的

折射率变化远大于 y 偏振方向的折射率变化。因此，当外部压力积累至一定阈值时，布拉格峰将发生分裂。FBG 的双折射效应可由如下公式表示^[38]：

$$B = \frac{|n_{\parallel} - n_{\perp}|}{n_{\text{eff}}} = B_0 + \frac{|\Delta n_y - \Delta n_x|}{n_{\text{eff}}} \quad (8)$$

其中： $n_{\parallel}$ 和 $n_{\perp}$ 为外加载荷的平行方向和垂直方向的

折射率； Δn_y 和 Δn_x 分别为由外加荷载所引起的 x 和 y 方向偏振光的折射率变化； B_0 为光纤光栅引入的双折射，但对于低双折射 FBG，可以忽略不计。这表明，在双折射率效应的作用下可以分离 FBG 光谱中双峰的中心波长 λ_x 和 λ_y ，这突破了传统压电传感器的局限，可以实现对电极轴向和纵向应力的原位监测。

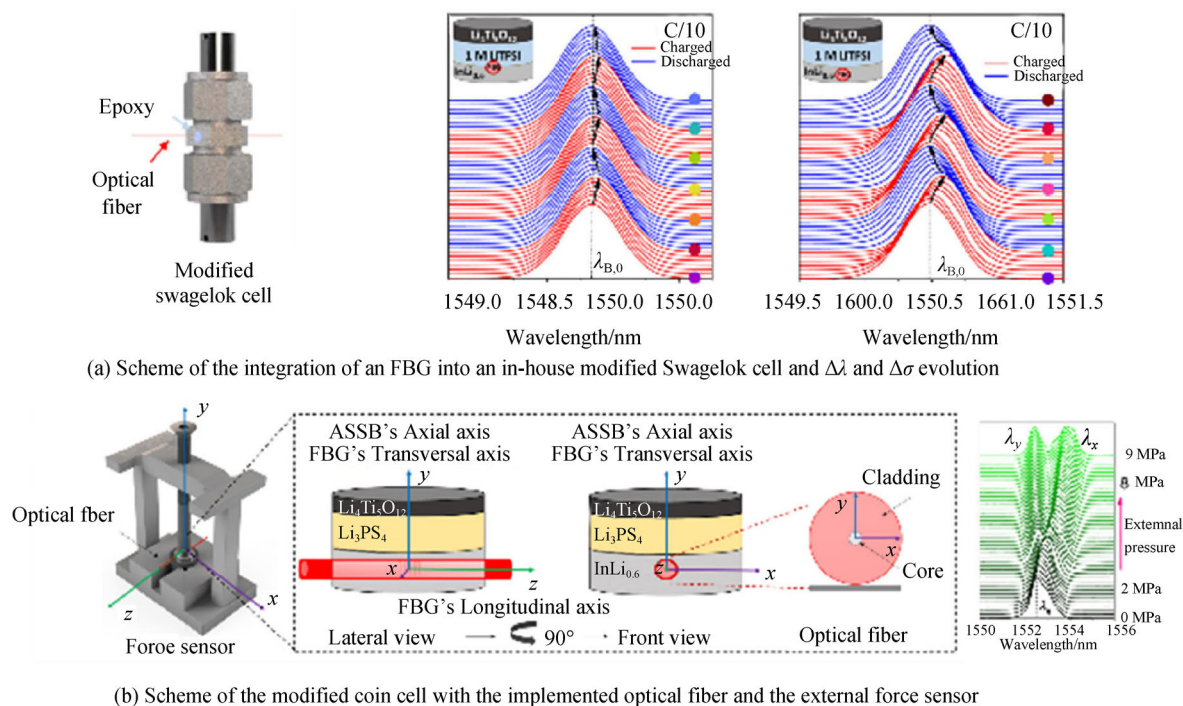


图 8 FBG 用于固态电池监测装置^[19]

Fig. 8 FBG for solid-state battery monitoring device^[19]

图 9 为 FBG 双折射效应在电池应力监测中的应用。由图 9a 可见，在充放电过程中，FBG 在 8 MPa 的外部压力下激发 FBG 双折射效应，其中 λ_x 和 λ_y 随电化学信号变化，表现出较高的可逆性。此外，从峰值分离 λ_x 和 λ_y 的差值和从 FBG 校准获得的应力响应特征，可以计算出该特定 $\text{InLi}_x\|\text{LPS}$ 界面的横向界面应力，该界面应力在第 1 次充电结束时非线性增加到 4 MPa 的峰值，远大于电池外部所测得的应力响应，并在随后的放电中，应力也以非完全线性的方式几乎恢复到零，表明电池内部机械应力存在一定的积累，如图 9b 所示。FBG 双折射效应为分析固态电池运行中的电极与电解质界面的应力方向提供了有力工具。该研究帮助揭示固态电池内部复杂的应力分布，进而优化电池设计和材料选择，减少应力集中和裂纹的发生，从而提升电池性能和安全性。

在先前嵌入式 FBG 的研究基础中，不少研究人

员也针对不同电池体系中的内部应力演变展开了研究。Huang 等^[39]通过嵌入式 FBG 传感器首次对锂硫 (Li-S) 电池中的正极应力演变进行了实时原位监测，系统地研究了 Li-S 电池中 3 种经典机制的应力演变，包括固-液-固、固-固和准固态机制。研究结果表明，在充放电过程中硫正极在固-固机制下应力变化最大，在固-液-固机制下应力变化最小(见图 10a)。FBG 应力演变曲线与 Li-S 电池 3 种典型机制下电化学反应过程中公认相变过程非常吻合。其中，基于硫化聚丙烯腈(PANS)正极材料的固-固机制下的应力演变在速率和幅度上都比其他机制更剧烈，而固-液-固机制下的 KB/S 正极经历的机械变化最小。这些结果为评估 Li-S 电池中的机制提供了全新的见解和思考，并从化学机械应力的角度指导了未来 Li-S 电池领域的工作。除开对 FBG 封装位置 and 不同电极材料的研究与探讨，相关研究人员也在进一步改进光纤光栅结构本身，以此提高

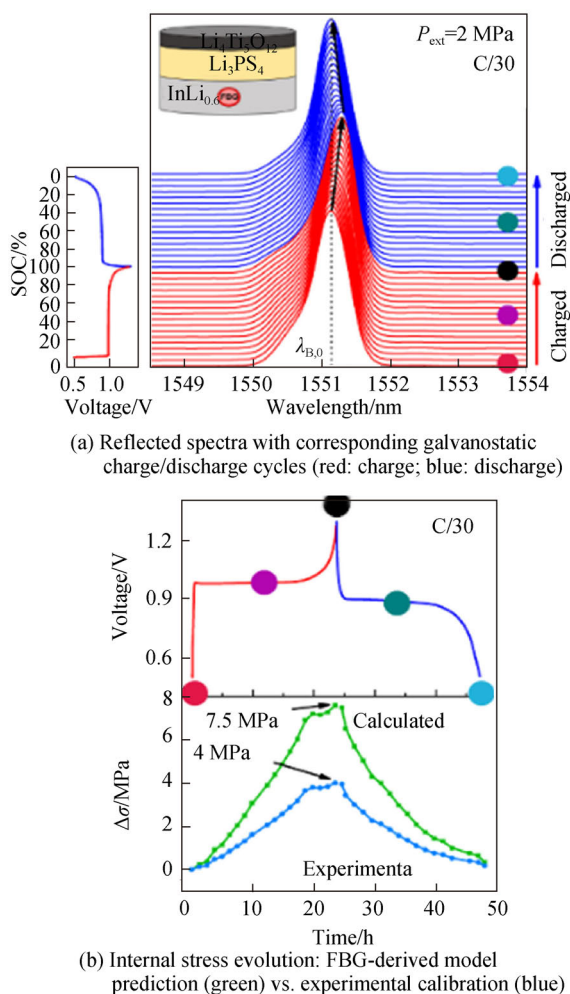


图 9 FBG 双折射效应在电池应力监测中的应用^[19]: (a) 位于固态电解质界面处的 FBG 二维堆叠光谱随电化学信号的变化; (e) 内部 FBG 传感器获得的 λ_x 和 λ_y 演变和计算所得的横向应力演变, 以及电压曲线

Fig. 9 Application of FBG Birefringence Effect in Battery Stress Monitoring^[19]: (a) Changes in the two-dimensional stacked spectrum of FBG located at the solid electrolyte interface with electrochemical signals; (e) Evolution of λ_x and λ_y obtained from internal FBG sensors and the calculated lateral stress evolution, along with the voltage curve

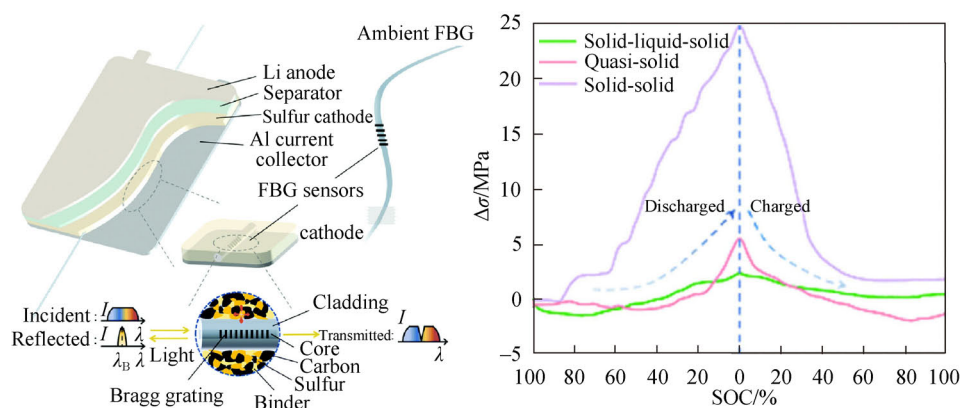
光纤传感器和固态电池的兼容性。Wang 等^[40]在固态锂金属电池的不同位置嵌入芯径为 250 μm 的 FBG 传感器,如图 10b 所示, 以此研究 FBG 对电池电化学性能的影响, 包括电荷转移电阻(R_{ct})、循环寿命和容量保持率。结果表明, 传统 FBG 传感器的存在会增加 R_{ct} , 降低容量保持率和循环寿命, 并且传感器与电极材料的界面接触不良也会导致电极材料起皱、活性物质脱落、界面分层和空洞生长等问题。因此, 他们提出采用 NaOH 溶液在水热条件下腐蚀光纤的方法, 将光纤布拉格光栅(FBG)传感器直径从

250 μm 减小到 30 μm , 形成微光纤布拉格光栅(MFBG)传感器。如图 10c 和图 10d 所示, 通过将 MFBG 传感器放置在固态锂金属电池的不同界面, 测试其对电池电化学性能的影响, 结果显示 R_{ct} 降低, 容量保持率提高。该研究工作增强了传感器与电极材料的尺寸兼容性, 解决了传统 FBG 传感器与固态电极材料兼容性差的问题。

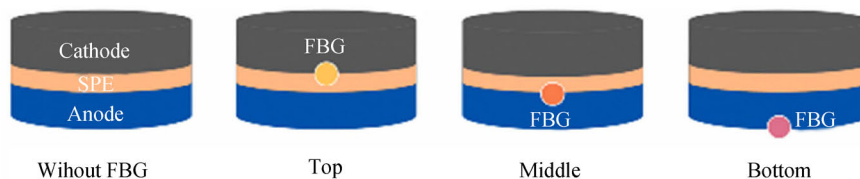
2.3 物化特性评估

在固态电池中, 内部物理与化学特性的隐蔽性演变对传统监测技术提出了严峻挑战。表面温度测量难以准确反映内部的热积聚与梯度分布, 而电化学信号亦难以直接关联至微观尺度上的化学活性变化。上述难题促使超声和光纤传感技术的迅速发展。通过内嵌式布局, 光纤布拉格光栅与光纤法布里-珀罗谐振腔可在锂电池内部构建具有毫米级分辨率的温度-气压传感网络, 预警电池热失控风险, 识别电池热失控风险^[41]; 同时, 基于光纤折射率调制效应及近红外光谱响应特性, 可同步监测应力场与化学活性演变的动态过程。尽管上述光纤传感技术在液态电解质体系中已实现多物理场协同监测, 但由于固态电解质的力学刚性和有限的光学穿透深度, 其在固态电池中的应用目前难度较大, 目前, 主要研究仅限于温度分布的测量。超声检测技术通过高频声波与材料微观结构之间的相互作用, 建立了弹性波传播特性与体相物化参数之间的直接联系, 可实现对电池 SoC/SoH 的精准估算。然而, 受限当前固态电池尺寸、结构复杂性及声学特性等因素, 针对大容量固态电池的超声状态监测研究仍处于起步阶段, 亟需进一步深入探索与优化。

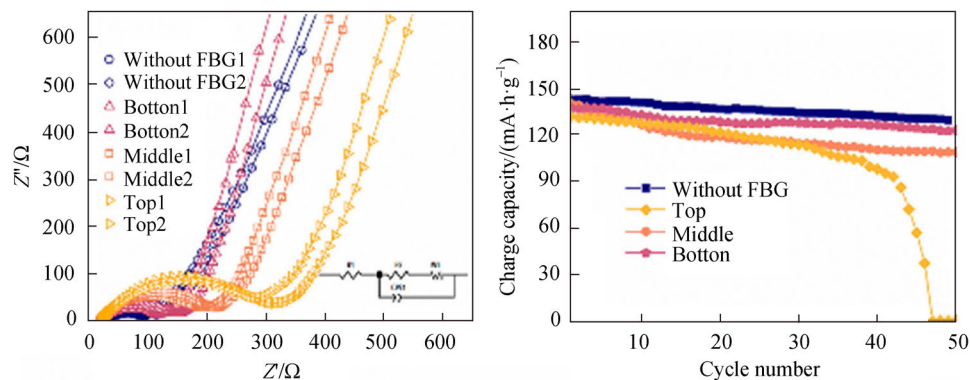
Xi 等^[42]通过嵌入短光纤布拉格光栅(sFBG)传感器, 实现了固态电池内部温度与应变的原位实时监测(见图 10a)。采用 2 个 sFBG 传感器协同工作: sFBG1 通过石英毛细管隔离应变以专测温度, sFBG2 同时感知温度与应变, 通过解耦算法分离二者影响。校准结果显示, sFBG2 的应变灵敏度为 1.04 $\text{pm}/\mu\epsilon$, sFBG1 与 sFBG2 的温度灵敏度分别为 11.7 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 和 11.3 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。在 1.5 mA 恒流充放电实验中, 如图 10b 和图 10c 所示, 电池内部最大温度变化为 0.42 $^\circ\text{C}$, 最大应变变化达 11.5 $\mu\epsilon$, 且应变波动与锂枝晶形成相关。作者进一步通过扫描电子显微镜照片证实, 充放电后锂金属表面出现枝晶突起, 验证了应变变化的微观机制。该研究为固态电池的安全监测提供了高精度、抗干扰的光纤传感方法。



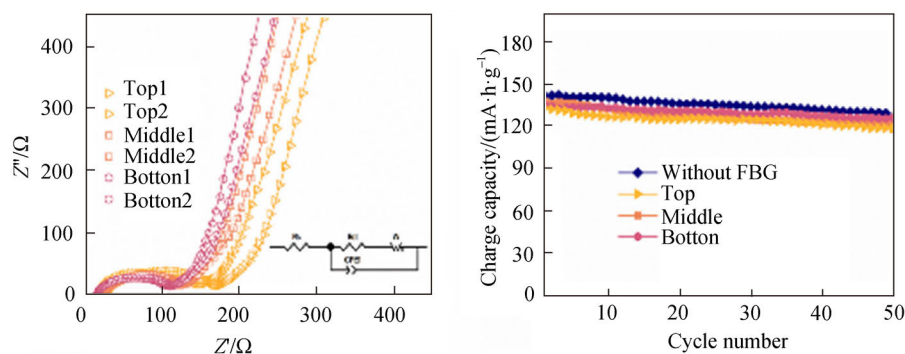
(a) Schematic of the cell embedded with FBG(left) and three mechanisms(right) during one complete discharge-charge



(b) Diagram of the unmodified cell and FBG



(c) Nyquist plot(left) and capacity(right) comparison for a battery with a 30 μm thick FBG



(d) Nyquist plot(left) and capacity(right) comparison for a battery with a 250 μm thick FBG

图 10 FBG 传感器用于固态电池检测^[40]: (a)植入 FBG 传感器的 Li-S 软包电池示意图(左)以及 3 种机制下 Li-S 电池的局部应力分布曲线比较(右); (b)传统 FBG 传感器放置于锂金属电池的不同位置示意图; (c)30 μm 厚度 FBG 的电池 Nyquist 图(左)及容量对比(右); (d)250 μm 厚度 FBG 的电池 Nyquist 图(左)及容量(右)对比

Fig. 10 FBG sensors for solid-state battery detection^[40]: (a) Schematic of a Li-S pouch cell with an implanted FBG sensor (left) and comparison of local stress distribution curves in Li-S batteries under three mechanisms (right); (b) Schematic of traditional FBG sensors placed at different positions in a lithium metal battery; (c) Nyquist plot (left) and capacity comparison (right) of a battery with a 30 μm thick FBG; (d) Nyquist plot (left) and capacity (right) comparison of a battery with a 250 μm thick FBG

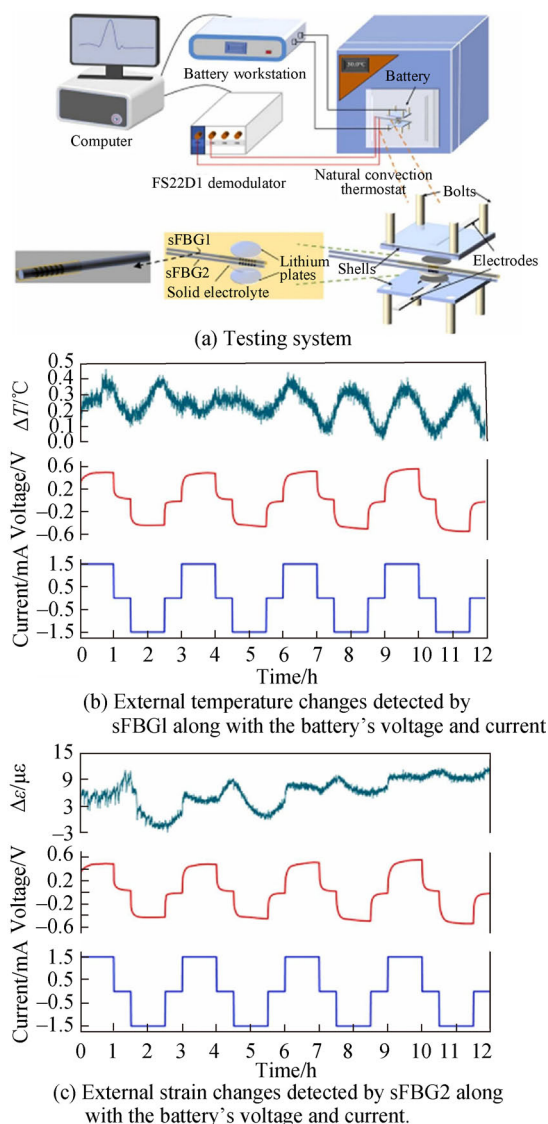


图 11 植入 FBG 同步测量固态电池温度和应力^[42]: (a)测试系统; (b)sFBG1 检测到的外部温度变化及电池的电压和电流; (c) sFBG2 检测到的外部应变变化及电池的电压和电流

Fig. 11 Implantation of FBG for synchronous measurement of temperature and stress in solid-state batteries^[42]: (a) Testing system; (b) External temperature changes detected by sFBG1 along with the battery's voltage and current; (c) External strain changes detected by sFBG2 along with the battery's voltage and current

3 结论与展望

开发无损原位固体电池表征方法是厘清固态电池机械失效和固-固界面反应的有效手段。在此背景下, 超声与光纤传感技术凭借其独特的多物理量感知能力, 为固态电池内部状态的可视化与量化诊断提供了创新解决方案。超声检测通过声波与材料微结构的相互作用, 可动态捕获气体生成、电解质裂纹扩展等界面演变行为; 而光纤传感技术则依托其

抗电磁干扰、微型化及多参数解耦特性, 能够实时监测电池内部温度场、应力分布等关键参数。因此, 本文从界面特性(气体、界面接触)、力学特性(材料裂纹、应力/应变)、物化特性(温度、折射率、分子吸收光谱)3 个方面综述了现有超声和光纤传感的固态电池研究进展。虽然基于超声和光纤传感的电池检测技术已取得了明显进展, 但针对固态电池固-固界面特性的无损原位监测技术仍需要进一步完善和优化。此外, 在固态电池监测中, 利用超声和光纤传感技术实现对界面接触状态、裂纹、产气、应力分布、温度梯度及副反应等多物理场变化的实时感知, 虽具有潜力, 但由于各类信号在时域、频域上存在一定交叉, 且物理机制相互耦合, 导致精确区分这些变化特征具有较大挑战。

未来研究需着重突破以下维度, 主要如下:

1) 在界面特性层面。现有监测方法多聚焦于单一物理量, 难以揭示固态电池内部多场耦合效应引发的复杂反应过程。因此, 应开发高灵敏度的复合传感策略。例如, 搭建超声-光纤-差分电化学质谱 (DEMS) 联用系统, 可实现界面气体析出动力学与接触应力演变的同步捕获, 从而克服单一物理量监测在复杂界面反应表征中的局限性。

2) 在力学特性层面。固态锂枝晶穿透电解质引发的裂纹扩展行为存在跨尺度特征, 现有手段无法关联微区断裂与宏观力学性能衰退。应开发高精度声学成像与分布式光纤传感网络, 实现锂枝晶穿透电解质裂纹扩展路径的跨尺度(微米至毫米级)动态追踪, 并建立微观材料力学失效与电极性能衰减定量关联模型;

3) 在物化特性层面。受限于固态电解质不透光、硬质等特性, 需进一步开发新型融合光纤光谱分析(如拉曼散射、近红外吸收)等特性检测技术, 构建原位数据库, 支撑固态电解质相变、界面副反应产物的原位识别, 同时开发超声三维重构成像技术, 实现电解质多维度解析。

传感器微型化封装工艺、多物理场信号解耦算法以及电池-传感器一体化集成方案, 将成为突破技术实用化瓶颈的关键。通过材料科学、传感工程与人工智能的深度交叉, 未来有望发展出具备自诊断功能的“智能电池”, 实现器件失效的早期预警与寿命预测, 从而加速固态电池的产业化进程。

参考文献:

- [1] ZHAO Q, STALIN S, ZHAO C Z, et al. Designing solid-state electrolytes for safe, energy-dense batteries[J]. Nat Rev Mater, 2020, 5:

- 229–252.
- [2] NIU C J, LIU D Y, LOCHALA J A, et al. Balancing interfacial reactions to achieve long cycle life in high-energy lithium metal batteries[J]. *Nat Energy*, 2021, 6: 723–732.
 - [3] XU L, TANG S, CHENG Y, et al. Interfaces in solid-state lithium batteries[J]. *Joule*, 2018, 2(10): 1991–2015.
 - [4] 贾婉卿, 孙歌, 姚诗余, 等. 锂离子电池中有机–无机复合固态电解质的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(1): 121–133.
JIA Wanqing, SUN Ge, YAO Shiyu, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(1): 121–133.
 - [5] WANG Y Y, LAI X, CHEN Q W, et al. Progress and challenges in ultrasonic technology for state estimation and defect detection of lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Mater*, 2024, 69: 103430.
 - [6] ZHANG Y, LI Y P, GUO Z Z, et al. Health monitoring by optical fiber sensing technology for rechargeable batteries[J]. *eScience*, 2024, 4(1): 100174.
 - [7] HUANG J Q, BOLES S T, TARASCON J M. Sensing as the key to battery lifetime and sustainability[J]. *Nat Sustain*, 2022, 5: 194–204.
 - [8] ZAREI A, PILLA S. Laser ultrasonics for nondestructive testing of composite materials and structures: A review[J]. *Ultrasonics*, 2024, 136: 107163.
 - [9] YANG H J, YANG L, YANG Z Y, et al. Ultrasonic detection methods for mechanical characterization and damage diagnosis of advanced composite materials: A review[J]. *Compos Struct*, 2023, 324: 117554.
 - [10] JODHANI J, HANDA A, GAUTAM A, et al. Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review[J]. *Mater Today Proc*, 2023, 78: 627–632.
 - [11] FORDHAM A, MILOJEVIC Z, GILES E, et al. Correlative non-destructive techniques to investigate aging and orientation effects in automotive Li-ion pouch cells[J]. *Joule*, 2023, 7(11): 2622–2652.
 - [12] YI M C, JIANG F C, LU L G, et al. Ultrasonic tomography study of metal defect detection in lithium-ion battery[J]. *Front Energy Res*, 2021, 9: 806929.
 - [13] FAN Z K, BAI K R, CHEN C. Ultrasonic testing in the field of engineering joining[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2024, 132(9): 4135–4160.
 - [14] CAO P L, HAO C C, MA C, et al. Physical field simulation of the ultrasonic radiation method: An investigation of the vessel, probe position and power[J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 76: 105626.
 - [15] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *J Light Technol*, 1997, 15(8): 1442–1463.
 - [16] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J Light Technol*, 1997, 15(8): 1263–1276.
 - [17] OTHONOS A. Fiber Bragg gratings[J]. *Rev Sci Instrum*, 1997, 68(12): 4309–4341.
 - [18] M. M, B. ALLIL R C S, A. B, et al. A guide to fiber bragg grating sensors[C]//Cuadrado-Laborde C. InTech, 2013.
 - [19] ALBERO BLANQUER L, MARCHINI F, SEITZ J R, et al. Optical sensors for operando stress monitoring in lithium-based batteries containing solid-state or liquid electrolytes[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 1153.
 - [20] LEE Y G, FUJIKI S, JUNG C, et al. High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver–carbon composite anodes[J]. *Nat Energy*, 2020, 5: 299–308.
 - [21] HUO H Y, HUANG K, LUO W, et al. Evaluating interfacial stability in solid-state pouch cells via ultrasonic imaging[J]. *ACS Energy Lett*, 2022, 7(2): 650–658.
 - [22] PEI F, WU L, ZHANG Y, et al. Interfacial self-healing polymer electrolytes for long-cycle solid-state lithium-sulfur batteries[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 351.
 - [23] WEI Y, LIU T H, ZHOU W J, et al. Enabling all-solid-state Li metal batteries operated at 30 °C by molecular regulation of polymer electrolyte[J]. *Adv Energy Mater*, 2023, 13(10): 2203547.
 - [24] JIANG B W, LI F Q, HOU T Y, et al. Polymer electrolytes shielded by 2D $\text{Li}_{0.46}\text{Mn}_{0.77}\text{PS}_3$ Li^+ -conductors for all-solid-state lithium-metal batteries[J]. *Energy Storage Mater*, 2023, 56: 183–191.
 - [25] LI J H, LI F Q, LI D G, et al. Negatively charged laponite sheets enhanced solid polymer electrolytes for long-cycling lithium-metal batteries[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(3): 4044–4052.
 - [26] WU L, PEI F, CHENG D M, et al. Flame-retardant polyurethane-based solid-state polymer electrolytes enabled by covalent bonding for lithium metal batteries[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(16): 2310084.
 - [27] CHENG H, CAO J B, LI F Q, et al. Inorganic-rich interphase induced by boric oxide solid acid toward long cyclic solid-state lithium-metal batteries[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(1): 2307677.
 - [28] WANG H N, CHENG H, LI D G, et al. Lithiated copper polyphthalocyanine with extended π -conjugation induces LiF-rich solid electrolyte interphase toward long-life solid-state lithium-metal batteries[J]. *Adv Energy Mater*, 2023, 13(16): 2204425.
 - [29] HOU T Y, QIAN Y M, LI D G, et al. Electronegativity-induced single-ion conducting polymer electrolyte for solid-state lithium batteries[J]. *Energy Environ Mater*, 2023, 6(4): e12428.
 - [30] WANG H N, HOU T Y, CHENG H, et al. Bifunctional LiI additive for poly(ethylene oxide) electrolyte with high ionic conductivity and stable interfacial chemistry[J]. *J Energy Chem*, 2022, 71: 218–224.
 - [31] KALNAUS S, DUDNEY N J, WESTOVER A S, et al. Solid-state batteries: The critical role of mechanics[J]. *Science*, 2023, 381(6664): eabg5998.
 - [32] YU Y F, VERGORI E, MADDAR F, et al. Real-time monitoring of internal structural deformation and thermal events in lithium-ion cell via embedded distributed optical fibre[J]. *J Power Sources*, 2022, 521: 230957.
 - [33] LI K, HUANG Y, HAN G C, et al. Real-time electrochemical-strain distribution and state-of-charge mapping via distributed optical fiber for lithium-ion batteries[J]. *J Power Sources*, 2024, 624: 235526.
 - [34] SUN K, et al. Chemo-mechanics and morphological dynamics of Si electrodes in all-solid-state Li-ion batteries[J]. *ACS Energy Lett*, 2025, 10(3): 1229–1234.
 - [35] SCHMIDT R D, SAKAMOTO J. In-situ, non-destructive acoustic characterization of solid state electrolyte cells[J]. *J Power Sources*, 2016, 324: 126–133.
 - [36] MUSIAK M, LI Z S. Real time ultrasonic monitoring of solid-state lithium-ion cells in the frequency domain[C]//2021 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). Detroit (Romulus), MI, USA. IEEE, 2021: 1–5.
 - [37] BAE D C, MANANDHAR A, KIESEL D P, et al. Monitoring the strain evolution of lithium-ion battery electrodes using an optical fiber Bragg grating sensor[J]. *Energy Technol*, 2016, 4(7): 851–855.
 - [38] GAFSI R, EL-SHERIF M A. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. *Opt Fiber Technol*, 2000, 6(3): 299–323.
 - [39] MIAO Z Y, LI Y P, XIAO X P, et al. Direct optical fiber monitor on stress evolution of the sulfur-based cathodes for lithium–sulfur batteries[J]. *Energy Environ Sci*, 2022, 15(5): 2029–2038.
 - [40] GUO J, ZHU K J, WU Q, et al. Microfiber sensor integrated inside

- solid-state lithium-metal batteries for reducing invasiveness[J]. *J Power Sources*, 2024, 599: 234231.
- [41] MEI W X, LIU Z, WANG C D, et al. operando monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-on-fiber technologies[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 5251.
- [42] XI J W, LI J Z, SUN H, et al. *In-situ* monitoring of internal temperature and strain of solid-state battery based on optical fiber sensors[J]. *Sens Actuat A Phys*, 2022, 347: 113888.

Advances and Challenges in Application of Ultrasound and Optical Fiber Technologies in Solid-State Batteries

HUANG Kai¹, LI Linhao¹, HUANG Yu¹, MAO Hengshan², YU Yifei¹, SHEN Yue¹, HUANG Yunhui¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. POWERCHINA RENEWABLE ENERGY CO., LTD, Beijing 100029, China)

Extended Abstract

With the increasing global demand for electric vehicles and large-scale energy storage systems, solid-state batteries (SSBs) have emerged as a promising alternative to conventional lithium-ion batteries due to their enhanced safety and energy density. The rigid nature of solid-state electrolytes (SSEs) allows SSBs to avoid flammable liquid electrolytes and minimize the risk of thermal runaway. However, the complexity of solid-solid interfaces, the growth of lithium dendrites, and poor interfacial contact during battery operation pose significant challenges to their performance and longevity. Understanding these internal phenomena in real time thus becomes a critical research priority.

Ultrasound and optical fiber sensing technologies are increasingly recognized as effective tools for in-situ, non-destructive, and real-time monitoring of internal battery behaviors. Compared with conventional electrochemical and spectroscopic methods, these techniques provide unique advantages in terms of spatial resolution, penetration depth, and multiparameter detection. This review outlines the fundamental principles, technological advancements, and practical applications of both ultrasound and optical fiber sensors in the context of solid-state batteries.

Ultrasound technology utilizes high-frequency mechanical waves to analyze internal structural changes. Some parameters such as acoustic impedance, attenuation, and time-of-flight (ToF) provide valuable insights into material density, elastic modulus, and crack formation. These features allow ultrasound to dynamically evaluate gas evolution, pore formation, and interfacial degradation within batteries. For instance, customized ultrasonic imaging systems are developed to detect gas generation rates and interfacial contact loss in SSEs, enabling accurate assessments of degradation mechanisms. Research from our group indicates that ultrasound can effectively distinguish between chemical passivation and physical delamination at the electrode-electrolyte interface and track the impact of polymer cross-linking on interface uniformity during in-situ polymerization.

Optical fiber sensing, especially fiber Bragg grating (FBG) technology, offers a high sensitivity to strain and temperature, making it well-suited for harsh battery environments. Embedded within cells, FBG sensors enable real-time monitoring of stress evolution and thermal distribution across electrodes and interfaces. Their immunity to electromagnetic interference, compact form factor, and low cost enhance their applicability in sealed battery systems. FBG sensors can effectively decouple strain and temperature responses via analyzing wavelength shifts induced by mechanical or thermal stimuli. Advanced designs, such as micro-FBGs with reduced diameters, further improve integration with battery components, minimizing interference with electrochemical performance. Beyond mechanical and interfacial diagnostics, these sensing technologies also allow for monitoring of key physicochemical parameters like internal temperature gradients, refractive index changes, and byproduct formation through distributed optical networks and acoustic mapping. Recent developments on lab-on-fiber platforms, which integrate Raman scattering and near-infrared spectroscopy with structural sensing, offer a multimodal approach for revealing degradation mechanisms and supporting real-time diagnostics in solid-state batteries.

As emerging in-situ monitoring technologies, ultrasound and optical fiber sensing have significant advantages over conventional battery characterization methods. Ultrasound provides a non-destructive, efficient, and cost-effective means to sensitively detect internal pore evolution, gas generation, and electrolyte wetting, addressing limitations in penetration depth and response speed of conventional techniques. Optical fiber sensing enables real-time monitoring of structural phase transitions, ion migration, and stress distribution within batteries, with intense electromagnetic immunity, low cost, and flexible integration-particularly suited for long-term in-situ monitoring of sealed battery systems. While many reviews focus on the application of these techniques in lithium-ion batteries, their use in solid-state batteries remains relatively underexplored. This review systematically represents recent development and application of ultrasound and optical fiber sensing technologies to solid-state batteries from three perspectives, i.e., interfacial behavior, mechanical properties, and physicochemical characteristics. It also summarizes relevant work conducted by our research team and discusses future integration with intelligent battery systems, highlighting key opportunities and remaining challenges.

Summary and prospects Ultrasound and optical fiber sensing technologies are poised to play a transformative role in the next

generation of battery diagnostics. Their unique ability to perform high-resolution, real-time, and multi-physics monitoring of internal battery phenomena represents a significant advancement over conventional diagnostic approaches. These sensing techniques offer some possibilities for tracking complex degradation mechanisms and enabling proactive battery management strategies. Despite the notable progress achieved in recent years, several critical technical challenges persist. First, signal decoupling in complex environments, in which multiple physical processes such as gas evolution, crack propagation, and stress accumulation occur simultaneously, remains a considerable obstacle. Distinguishing these overlapping signals requires advanced data processing and modeling techniques. Second, the development on integrated, multi-sensor platforms that combine ultrasound, fiber-optic, and electrochemical sensors is still at a nascent stage. Such hybrid systems have a potential to provide more comprehensive and cross-validated data but require further innovation in sensor compatibility and system integration. Third, translating lab-scale sensing systems into practical applications for large-format battery packs demands further progress in miniaturization, cost-effectiveness, and long-term operational stability under dynamic conditions. Future research efforts should focus on three pivotal areas. At the interface level, there is a pressing need to develop multi-parameter sensing systems capable of simultaneously capturing interfacial gas release, contact resistance changes, and local stress distribution. At the mechanical level, high-resolution ultrasonic imaging combined with distributed optical fiber networks can enable real-time, spatially resolved tracking of crack initiation and propagation from micro-scale to macro-scale. At the physicochemical level, integrating spectroscopic methods such as Raman or near-infrared spectroscopy-with ultrasound and optical fiber sensing can unlock deeper insights into phase transitions, compositional changes, and side reactions. Solid-state batteries can achieve real-time diagnostics and early fault detection via utilizing advanced sensing data intelligence and material innovations, accelerating their path to reliable commercial deployment.

Keywords lithium-ion battery; solid-state electrolyte; optical fiber sensing; ultrasonic testing technology