

中文引用格式:付举,史家吉,马星阳,等. 光纤传感器在锂离子电池安全监测中的应用与挑战[J]. 中国安全科学学报,2026,36(3): 113-120.

英文引用格式:FU Ju, SHI Jiayi, MA Xingyang, et al. Applications and challenges of fiber optic sensors in lithium-ion battery safety monitoring[J]. China Safety Science Journal, 2026,36(3):113-120.

光纤传感器在锂离子电池安全监测中的应用与挑战^{*}

付举^{1,2,3}副教授,史家吉^{1,2,3},马星阳^{1,2,3},谢雯娜^{1,2,3},谢松^{**1,2,3}教授

(1 中国民用航空飞行学院 民航安全与工程学院,四川 广汉 618307;

2 民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室,四川 广汉 618307;

3 四川省全电通航飞行器关键技术工程研究中心,四川 广汉 618307)

中图分类号:X946

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0239

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3014400);国家自然科学基金资助(22379162);民航安全能力建设项目(MHAQ2024035);四川省科技计划项目(2025YFHZ0037)。

【摘要】 为解决现有电池管理系统难以获取锂离子电池内部温度梯度、结构应变及产气等关键信号,导致安全监测与热失控早期预警能力不足的问题,系统综述光纤传感器在锂离子电池安全监测中的应用与挑战。首先,梳理电池安全监测的关键参数与需求,明确温度、应变、气体及电解液状态等可表征失效演化的监测对象;其次,归纳对比光纤布拉格光栅(FBG)、倾斜光纤光栅(TFBG)、光纤倏逝波(FOEW)及分布式光纤传感(DOFS)等典型技术的原理与性能特征;然后,按应用场景总结上述技术在温度/应变原位监测、界面折射率与老化评估、特征产气检测及热失控风险识别中的研究进展;最后,提炼目前在集成兼容性、多参数交叉敏感与信号解耦、长期稳定性与标定及成本等方面的共性障碍,并提出相应发展方向。研究结果表明:光纤传感技术可监测锂离子电池温度的多点位、毫秒级、 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 精度、 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{e}$ 级的应变面、0.12%精度实时原位在线的产气、 10^{-3} 级的原位电解液折射率。通过多参数、原位、实时监测的数据导入和处理,可提升对锂电池热失控早期预警能力。

【关键词】 光纤传感器; 锂离子电池; 安全监测; 热失控; 原位监测

Applications and challenges of fiber optic sensors in lithium-ion battery safety monitoring

FU Ju^{1,2,3}, SHI Jiayi^{1,2,3}, MA Xingyang^{1,2,3}, XIE Wenna^{1,2,3}, XIE Song^{1,2,3}

(1 College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China; 2 Civil Aircraft Fire Science and Safety Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Guanghan Sichuan 618307, China; 3 Sichuan Key Technology Engineering Research Center for All-electric Navigable Aircraft, Guanghan Sichuan 618307, China)

Abstract: To address the inability of existing battery management systems in acquiring internal temperature gradients, structural strain, and gas generation signals in lithium-ion cells, which result in inadequate safety monitoring and early-warning capability against thermal runaway, a systematic review of

* 文章编号:1003-3033(2026)03-0113-08; 收稿日期:2025-10-23; 修稿日期:2025-12-29

** 通信作者:谢松(1986—),男,四川自贡人,博士,教授,主要从事锂离子电池的热安全监测及预警研究。E-mail:xiesongam@163.com。

fiber optic sensors for lithium-ion battery safety monitoring and the challenges they face was provided. First, key safety-related monitoring parameters, including temperature, strain, gas evolution, and electrolyte state, were identified. Second, the principles and characteristics of representative sensing technologies, such as Fiber Bragg Gratings (FBG), Tilted Fiber Bragg Gratings (TFBG), Fiber Optic Evanescent Wave Sensing (FOEW), and Distributed Optic Fiber Sensing (DOFS), were reviewed. Third, the research progress in in-situ temperature and strain monitoring, electrolyte state evaluation, gas detection, and thermal runaway risk identification for each technology was summarized. Finally, major challenges in practical application, including integration compatibility, multi-parameter cross-sensitivity, long-term stability, and cost, were discussed. The survey reveals that fiber-optic sensing enables multi-point, millisecond-scale temperature monitoring with $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ accuracy, strain mapping at $\pm 0.1\text{ }\mu\epsilon$ resolution, in-situ gas detection at 0.12% precision, and electrolyte refractive-index tracking down to 10^{-3} . Feeding these multi-parameter, in-situ, real-time data into advanced algorithms can significantly enhance early-warning capability for lithium-ion battery thermal runaway.

Keywords: fiber optic sensors; lithium-ion batteries; safety monitoring; thermal runaway; in-situ monitoring

0 引言

随着锂离子电池在电动航空器、电动汽车及储能系统中的广泛应用,其在复杂工况下的安全风险日益凸显,热失控诱发的火灾与爆炸事故已成为制约电池规模化应用的重要因素^[1]。因此,精准感知并早期安全预警电池内部状态,是提升锂离子电池安全性的关键^[2]。

现有电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 主要依赖电压、电流及表面温度等有限参数,难以表征电池内部温度梯度、结构应变及产气等与失效演化密切相关的信息^[3]。光纤传感技术,凭借其独特优势在结构健康监测、医疗诊断和航空航天等多个领域得到广泛应用^[4]。因其具有抗电磁干扰、耐高温高压及原位与分布式测量能力,为锂离子电池多参数的实时安全监测提供了新的技术路径^[5]。

近年来,光纤传感器在锂离子电池温度、应变、气体及电解液状态监测等方面取得了显著进展,但其在集成方式、长期应用稳定性、信号交叉敏感及成本等方面仍面临工程化挑战。基于此,笔者拟系统

综述光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG)、倾斜光纤光栅 (Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG) 及光纤倏逝波 (Fiber Optic Evanescent Wave sensing, FOEW) 及分布式光纤传感 (Distributed Optic Fiber Sensing, DOFS) 等典型光纤传感技术在锂离子电池安全监测中的应用现状,分析其关键瓶颈及未来发展方向。

1 光纤传感器基础

1.1 光纤传感器原理

光纤传感器以光纤为载体,通过外界物理或化学环境变化引起的光学信号特征实现高精度测量,具备耐高温、抗电磁干扰及可原位集成等特点,适用于锂离子电池内部极端工况下的状态监测。

1.2 主流光纤传感技术类别对比

针对锂离子电池安全监测的不同需求^[6],目前研究中主要集中于 FBG、TFBG、FOEW 及 DOFS 等技术类型。这些光纤传感技术因其不同的物理机制而展现出各自的特点和适用性^[7]。以上主流光纤传感技术的对比见表 1。

表 1 主流光纤传感技术的对比

Table 1 Comparison of mainstream fiber optic sensing technologies

技术类型	灵敏度	空间分辨率	多参数能力	成本	应用场景
FBG	高	点式/准分布式	有限	中	温度/应变监测
TFBG	很高	点式	强	较高	化学/折射率监测
FOEW	高	点式	中	中	气体/液体监测
DOFS	中	0.01 ~ 1 m	弱	高	温度场分布监测

2 锂离子电池安全监测的关键参数

2.1 温度监测的重要性与方法

在锂离子电池安全管理体系中,温度是目前最成熟、也是唯一被广泛实时采集的运行参数^[8]。然而,现有温度监测方法主要采用热电偶、热敏电阻、阻抗测温 and 红外热成像等技术^[9],多依赖表面或少量离散测点,难以表征电池内部温度梯度及局部热点的演化过程^[10]。研究表明:热失控往往起始于局部区域,其早期温升信号在传统监测体系中易被平均或掩盖,在快速升温段,热电偶 1 Hz 采样间隔内温升误差超过 8 ℃,而千赫兹的高速 FBG 阵列可在毫秒内进行采用,将误差压缩至±0.1 ℃^[11-12]。而且,光纤传感技术凭借其抗电磁干扰、耐高温及分布式测量能力,可完成电池内部或关键界面的连续温

度场监测,形成面测试能力^[13],为识别热失控早期弱信号提供新路径。

2.2 应变参数的意义与监测方法

锂离子电池在遭遇异常充放电时,内部材料会有显著的体积及应力变化,该信号往往早于宏观热异常,是电池安全监测的重要信号^[14]。然而,传统应变监测方法^[15]在强电磁、高温及密闭环境中的适用性有限,难以用于电池内部原位测量。而以 FBG 为基础的光纤应变传感技术,通过嵌入或贴装方式可实现微应变级的高精度电池结构变形的实时监测^[16]。例如:NASCIMENTO 等^[17]通过结合 FBG 与法布里-珀罗干涉仪,将监测精度提升至±0.1 ℃和±0.1 με,显著提升了应变与温度参数的分辨能力。常见应变监测技术在锂离子电池安全监测中的适用性及优缺点见表 2。

表 2 应变监测技术的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of strain monitoring technology

监测技术	优点	缺点
应变计 ^[18]	成本低;有效性高;适应性强	容易受到热和电磁干扰
贴片式 FBG ^[19-20]	高灵敏度和高精度;轻量化和柔性设计	交叉敏感;难以了解内部电化学变化
数字图像法 ^[21]	非接触式测量;精度高;不受尺寸限制	响应低;装置复杂;不适合实时监控
嵌入式 FBG ^[22-23]	不受强电磁和腐蚀环境干扰;检测更灵敏准确	操作复杂;价格昂贵;交叉敏感

2.3 气体监测的技术与挑战

产气行为是锂离子电池热失控演化的核心特征^[24-25]。尽管气相色谱及半导体传感技术^[26]已趋成熟,但受限于设备体积、电磁敏感性及非原位部署等瓶颈,难以捕捉电池内部受限空间内的瞬态产气动态^[27]。相比之下,光纤气体传感技术凭借本质安

全、抗电磁干扰及高集成度等优势,通过倏逝波增强、功能化涂层或光谱吸收机制,对可灵敏表征特定热失控特征气体(如 CO、CO₂),精度可达 0.12%^[28]。这种从离线分析向原位监测的转变,为电池早期故障预警提供了高保真度的物理判据。不同气体监测方法的优缺点对比见表 3。

表 3 几种气体解决方案技术的优缺点

Table 3 Advantages and disadvantages of the solution technology

监测技术	优点	缺点
半导体传感器 ^[29-30]	成本低;集成化;多路复用能力	存在火花危险问题;灵敏度相对较低
气相色谱仪 ^[31]	高精度;可多气体同时检测	难应用现场中;成本高;样品需预处理
光纤气体传感器 ^[32]	实时远程监控;多路复用	响应时间较长;成本较高;需要校准
声波气体传感器 ^[33]	可以在室温下工作;设备小型化	分布式应用困难;对气体的选择性差

2.4 电解液折射率监测的作用及方法

电解液折射率(Refractive Index, RI)作为反映锂离子电池内部化学状态、反应过程及老化程度的关键参数,其变化可为热失控预警和健康状态评估提供重要依据^[34]。传统监测方法^[35]如离子色谱法和电感耦合等离子体质谱法虽精度较高,但设备昂贵且无法

支持在线监测^[36]。光纤传感器凭借其高精度、抗干扰、耐腐蚀等特性,可实时检测电解液 RI 微小变化,精度可达 10⁻³ 数量级,为电池安全监控提供有效手段^[37]。该技术在实际应用中仍面临长期稳定性与系统兼容性等挑战,但随着技术进步,基于光纤的 RI 监测有望成为电池安全管理的重要组成部分。

3 光纤传感器在锂离子电池监测中的应用与挑战

光纤传感技术在锂离子电池安全监测中的应用研究,已从早期的单参数实验验证逐步发展为多参数、原位与工况相关的系统探索。不同类型光纤传感器在温度、应变、气体及电解液状态监测中展现出各自优势,但其工程化应用仍受到传感器集成方式、长期稳定性及成本等因素制约。本章围绕 FBG、TFBG 及 FOEW 等典型技术,重点分析其在电池安全监测中的应用成效与关键挑战。

3.1 FBG 传感器的应用

FBG 传感器是目前在锂离子电池安全监测中研究最为成熟、工程潜力最明确的光纤传感技术,其核心优势在于温度与应变监测的高灵敏度及多点复用能力。

3.1.1 内部温度监测

锂离子电池热失控的预警高度依赖于对其内部温度动态演化的精准捕捉^[38]。传统的表面测温难以克服热惯性引起的信号滞后,因此,研究重点已转向利用 FBG 传感器实时解析内部热点。

针对 FBG 对温度与应力的交叉敏感难题,冒燕等^[39]利用法布里-珀罗空气腔提出物理层面的信号解耦方法,确保了充放电循环中温升检测的线性度;HUANG Feixia 等^[40]则通过玻璃毛细管封装技术,构建了内外联动的监测阵列,有效隔离了电解液腐蚀并量化了电池径向温差。在极端工况方面,MEI Wenxin 等^[41]进一步利用法布里-珀罗干涉混合传感器,成功捕捉了热失控诱发过程中高达 510 ℃ 的瞬态温度及压力突变,揭示了不同 SOC 下的热产率差异,为安全管理系统提供了数据支持。

3.1.2 应变与力学行为监测

电极活性材料在嵌脱锂过程中的体积效应是诱发结构失效与容量衰减的根源。相比表面贴装,利用嵌入式 FBG 传感器原位监测电化学-力学耦合行为,已成为揭示电池内部损伤机制的关键。

针对 FBG 的增敏与解耦需求,PENG Jun 等^[42]利用杠杆放大原理设计了集成封装结构,精准捕捉对应变动态及早期结构损伤,并完成热-力信号解耦。在微观机制方面,ZHANG Yi 等^[43]通过原位植入 FBG 解析了硅电极在循环中的应力演变,证实了微米级界面效应对力学传递的有效性,为评估高容量电极的机械稳定性和疲劳寿命提供了直接判据。

3.1.3 温度-力耦合多参数同步监测

锂离子电池内部电化学反应伴随着热能释放与活性物质的体积变分,表现为高度耦合的热-力演化过程。单一参数的监测难以完整描述电池的亚稳态特征,因此,构建具有多维度感知能力的光纤传感网络成为实现精准状态估计的关键。

NASCIMENTO 等^[44]通过在电池表面构建分布式 FBG 传感矩阵,利用不同功能组分的传感器阵列解耦映射温度场与双向应变场。该研究在倍率放电实验中验证了传感网络对局部过热及异常膨胀的快速捕捉能力,证实了准 DOFS 在复杂工况下多参数原位解析的可行性。这种从“点探测”向“面感知”的转变,为热失控预警提供了更高维度的特征判据。

3.2 TFBG 传感器的应用

TFBG 通过倾斜光栅结构诱导强烈的包层模耦合,使其对环境折射率具有极高的敏感性,且具备天然的温度-力自解耦潜力。在锂电池监测领域,TFBG 已从“体相感知”拓展至内部“电极-电解质界面机制研究”的跨越。

3.2.1 界面传质动力学与锂枝晶原位监测

阳极界面传质是不均匀锂沉积的诱因。HAN Xile 等^[45]利用 TFBG 传感器捕获了阳极附近微观区域的 RI 突变,对原位监测纳米级界面传质动力学及锂枝晶早期生长行为。该研究证明:TFBG 不仅是物理传感器,更是探知电化学界面离子浓度梯度演化的有效工具。然而,目前仍存在传感器的空间覆盖有限与枝晶生长随机分布间的矛盾。

3.2.2 电解液组分演化与老化评估

电解液的分解与容量衰减具有高度相关性。HUANG Jiaqiang 等^[46]通过将 TFBG 集成于电芯中心空隙,消除了力学干扰,利用包层模谐振峰的移动精确追踪了电解液 RI 随循环周期的演变特征,并建立了 RI 偏移与容量损失间的线性映射模型,为健康状态估计提供了新的物理判据。

3.3 FOEW 传感器的应用

FOEW 传感技术利用光纤表面衰减场与外部介质的相互作用,实现了对界面折射率及化学组分的高灵敏度表征。其核心优势在于无需改变光纤物理结构即可通过表层场交互获取电解液及气相组分的动态演化信息。

3.3.1 界面离子动力学与容量衰减诊断

电解液 RI 的微观波动是评估电池动力学性能的重要指标。GHANNOUM 等^[47]通过将 FOEW 传感器植入软包电池,揭示了充放电循环中光透射率

与石墨负极表面锂离子浓度演化的高度相关性。该研究证实,光信号的动态响应可作为表征库仑效率及活性锂损失的原位判据,无需电压参比,为电池容量与健康状态的协同估计提供了界面力学以外的化学动力学判据。

3.3.2 功能化修饰与选择性产气监测

针对电池失效初期的特征产气,研究重点已转向对 FOEW 表面的功能化修饰。KIM 等^[48]开发了一种基于 ZIF-8 金属有机框架 (Metal-Organic Framework, MOF) 涂层的多模 FOEW 传感器。利用 MOF 材料的多孔吸附特性,实现了对 CO₂ 的高灵敏度、可逆性监测。这种特异性吸附配合倏逝场调制的方案,显著提升了传感器在多组分复杂环境中的响应速度与检测限。

3.4 共性技术挑战

综上所述,FBG、TFBG 及 FOEW 等光纤传感技术在锂离子电池安全监测中已展现出对温度、应变及界面化学状态的高灵敏感知能力,为揭示电池内部热-力-化学耦合机理提供了重要技术手段。然而,从技术本体层面看,其进一步应用仍面临若干共性挑战。

首先,传感信号的物理代表性问题仍有待系统评估。限于光纤尺度、封装方式及界面力学匹配特性,传感器获取的局部信号能否真实反映电芯整体状态,仍依赖于多尺度模型与实验验证的协同支撑。

其次,多参数交叉敏感与信号解耦仍是核心技术瓶颈。尽管通过多传感单元组合或结构设计可在一定程度上使温度、应变及折射率信号得以分离,但系统复杂性随之显著增加,限制了其在高密度传感场景下的可扩展性。

此外,传感器长期稳定性与工况适应性问题尚未完全解决。光纤在高温、高压、电解液腐蚀及长期循环条件下的性能漂移,仍可能对监测可靠性产生影响,亟需在材料、封装及标定策略方面进一步优化。

4 展 望

面向锂离子电池安全监测的工程应用需求,光

纤传感技术的发展正由单一参数感知向系统级、多维度安全感知演进。未来研究需进一步从系统集成、数据方法与工程标准化等层面推动其应用落地。

1) 系统层面,光纤传感器有望与 BMS 深度融合,构建覆盖单体、电池模组及系统级的多尺度感知网络,以关键安全参数的连续获取与协同解析为基础,推动安全监测模式由被动响应向主动预警转变。

2) 数据与方法层面,随着传感节点数量和数据维度的增加,传统基于阈值的安全判据已难以满足复杂工况需求。未来应结合物理机理模型与数据驱动方法,发展模型约束下的智能诊断策略,将光纤传感获得的温度、应变及界面等信息转化为对热失控、结构失效及寿命衰减的定量预测。

3) 工程化与产业化层面,亟需突破传感器植入对产线兼容性和电芯一致性的影响,建立统一的传感器封装、布设及标定规范。通过“实验室验证—工程样机—示范应用”逐级推进,逐步实现光纤传感技术在动力电池与储能系统中的规模化应用。

5 结 论

1) 在温度监测方面,光纤不仅响应速度达毫秒级,还可完成多点面监测,并将误差控制在±0.1℃以内,为其工程应用奠定基础。在应变监测方面,光纤监测精度可达±0.1 με,且可与热信号复用,形成多参数监测能力,构建从力学到电化学的因果链,使预警逻辑从症状转向根源。在气体监测方面,光纤可对特定热失控特征气体实现 0.12%精度的实时在线监测,并具有远程和多路复用的监测能力。在 RI 监测方面,光纤响应灵敏度达 10⁻³ 量级,且可原位在线监测,提供了无电压参比的电池容量和健康状态估算的新方法。

2) 光纤传感器在锂离子电池安全监测中的优势显著,未来应用前景广阔,特别是在提高电池安全性、延长使用寿命、提升智能化水平方面有巨大潜力。随着技术的不断成熟和创新,未来光纤传感器将为电池高效、可靠、安全运行提供强有力保障。同时,光纤传感器的发展也将推动锂离子电池技术整体进步,为现代电子设备、电动汽车和储能系统等领域的发展提供重要支持。

参 考 文 献

[1] 王志,殷波,史波波,等. 纵向通风下锂离子电池热失控气体扩散特性[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9):

138–144.

WANG Zhi, YIN Bo, SHI Bobo, et al. Diffusion characteristics of thermal runaway gas from lithium-ion batteries under longitudinal ventilation[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(9): 138–144.

- [2] 许彬,李志远,徐伯乐,等. 基于光纤光栅的锂电池安全监测应用效果研究[J]. *武汉理工大学学报:信息与管理工程版*, 2022, 44(5): 745–751.
- XU Bin, LI Zhiyuan, XU Bole, et al. Research on application effect of lithium-ion battery safety monitoring based on fiber bragg grating[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering*, 2022, 44(5): 745–751.
- [3] FLEMING J, AMIETSAJEW T, MCTURK E, et al. Development and evaluation of in situ instrumentation for cylindrical Li-ion cells using fibre optic sensors[J]. *HardwareX*, 2018, 3: 100–109.
- [4] 韩冲,李继繁,宋文华. 光纤光栅温度监测系统在锂电池储能站安全预警中的应用研究[J]. *南开大学学报:自然科学版*, 2020, 53(5): 21–25.
- HAN Chong, LI Jifan, SONG Wenhua. Research on application of fiber grating temperature monitoring system in safety early warning of lithium battery energy storage station[J]. *Journal of Nankai University: Natural Science*, 2020, 53(5): 21–25.
- [5] YU Yifei, VINCENT T, SANSOM J, et al. Distributed internal thermal monitoring of lithium ion batteries with fibre sensors[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022; DOI: 10.1016/j.est.2022.104291.
- [6] HEDMAN J, NILEBO D, LARSSON L E, et al. Fibre optic sensor for characterisation of lithium-ion batteries[J]. *ChemSusChem*, 2020, 13(21): 5 731–5 739.
- [7] WAHL M S, SPITTHOFF L, MURI H I, et al. The importance of optical fibres for internal temperature sensing in lithium-ion batteries during operation[J]. *Energies*, 2021, 14; DOI: 10.3390/en14123617.
- [8] 陆豪宇,沈文锋,吕大伍,等. 锂电池热失控安全防护研究进展[J]. *材料导报*, 2025, 39(14): 5–23.
- LU Haoyu, SHEN Wenfeng, LYU Dawu, et al. Research progress on safety strategies for thermal runaway in lithium ion batteries[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(14): 5–23.
- [9] LI Dezhi, WANG Licheng, DUAN Chongxiong, et al. Temperature prediction of lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectrum: a review [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(8): 10 372–10 388.
- [10] KAFADAROVA N, SOTIROV S, HERBST F, et al. A system for determining the surface temperature of cylindrical lithium-ion batteries using a thermal imaging camera[J]. *Batteries*, 2023, 9(10); DOI: 10.3390/batteries9100519.
- [11] GULSOY B, VINCENT T A, SANSOM J E H, et al. In-situ temperature monitoring of a lithium-ion battery using an embedded thermocouple for smart battery applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022; DOI: 10.1016/j.est.2022.105260.
- [12] SUN Baichuan, XU Gaobin, XU Ji, et al. A strain-resistant flexible thermistor sensor array based on CNT/MXene hybrid materials for lithium-ion battery and human temperature monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 368; DOI: 10.1016/j.sna.2024.115059.
- [13] YU Yifei, VINCENT T, SANSOM J, et al. Distributed internal thermal monitoring of lithium ion batteries with fibre sensors[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50; DOI: 10.1016/j.est.2022.104291.
- [14] REN Dongsheng, XIE Leqiong, WANG Li, et al. A practical approach to predict volume deformation of lithium-ion batteries from crystal structure changes of electrode materials[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(5): 7 732–7 740.
- [15] KRAUSE T, NUSKO D, BAUERMANN P L, et al. Methods for quantifying expansion in lithium-ion battery cells resulting from cycling: a review[J]. *Energies*, 2024, 17(7); DOI: 10.3390/en17071566.
- [16] SOMMER L W, RAGHAVAN A, KIESEL P, et al. Embedded fiber optic sensing for accurate state estimation in advanced battery management systems[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2014, 1681: 1–7.
- [17] NASCIMENTO M, NOVAIS S, DING M S, et al. Internal strain and temperature discrimination with optical fiber hybrid sensors in Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 410: 1–9.
- [18] HENDRICKS C, SOOD B, PECHT M. Lithium-ion battery strain gauge monitoring and depth of discharge estimation[J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2023, 20(1); DOI: 10.1115/1.4054340.

- [19] NOVAIS S, NASCIMENTO M, GRANDE L, et al. Internal and external temperature monitoring of a Li-ion battery with fiber Bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2016, 16 (9): DOI: 10.3390/s16091394.
- [20] NASCIMENTO M, NOVAIS S, LEITÃO C, et al. Lithium batteries temperature and strain fiber monitoring[C]. 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. SPIE, 2015: 1 060–1 063.
- [21] KOCSIS S S, SZABÓ M, SZALAI S, et al. Deformation analysis of different lithium battery designs using the DIC technique[J]. *Energies*, 2024, 17(2): DOI:10.3390/en17020323.
- [22] SOMMER L W, KIESEL P, GANGULI A, et al. Fast and slow ion diffusion processes in lithium ion pouch cells during cycling observed with fiber optic strain sensors[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 296: 46–52.
- [23] LI Hanyang, WEI Feng, LI Yanzeng, et al. Optical fiber sensor based on upconversion nanoparticles for internal temperature monitoring of Li-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(41): 14 757–14 765.
- [24] DEY A. Semiconductor metal oxide gas sensors: a review[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2018, 229: 206–217.
- [25] ZHANG Qingsong, LIU Tiantian, HAO Chaolong, et al. In situ Raman investigation on gas components and explosion risk of thermal runaway emission from lithium-ion battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: DOI: 10.1016/j.est.2022.105905.
- [26] GACHOT G, RIBIÈRE P, MATHIRON D, et al. Gas chromatography/mass spectrometry as a suitable tool for the Li-ion battery electrolyte degradation mechanisms study[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(2): 478–485.
- [27] KOCH S, FILL A, BIRKE K P. Comprehensive gas analysis on large scale automotive lithium-ion cells in thermal runaway[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 398: 106–112.
- [28] THOMAS A, RONALD N. A review: application and implementation of optic fibre sensors for gas detection [J]. *Sensors*, 2021, 21 (20): DOI: 10.3390/s21206755.
- [29] ZHANG Jian, QIN Ziyu, ZENG Dawen, et al. Metal-oxide-semiconductor based gas sensors: screening, preparation, and integration[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, 19(9): 6 313–6 329.
- [30] GOVARDHAN K, GRACE A N. Metal/metal oxide doped semiconductor based metal oxide gas sensors:a review[J]. *Sensor Letters*, 2016, 14(8): 741–750.
- [31] ONG R C Y, MARRIOTT P J. A review of basic concepts in comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. *Journal of Chromatographic Science*, 2002, 40(5): 276–291.
- [32] CHEN Xuanren, LIN Gan, GUO Xin. Optical fiber-based gas sensing for early warning of thermal runaway in lithium-ion batteries[J]. *Advanced Sensor Research*, 2023, 2(12): DOI: 10.1002/adsr.202300055.
- [33] KUMAR A, PRAJESH R. The potential of acoustic wave devices for gas sensing applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 339: DOI: 10.1016/j.sna.2022.113498.
- [34] WANG Qiansong, JIANG Lihua, YU Yan, et al. Progress of enhancing the safety of lithium ion battery from the electrolyte aspect[J]. *Nano Energy*, 2019, 55: 93–114.
- [35] TERBORG L, WEBER S, BLASKE F, et al. Investigation of thermal aging and hydrolysis mechanisms in commercial lithium ion battery electrolyte[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 242: 832–837.
- [36] XUE Xiaobin, HAN Xile, LI Wanjun, et al. Operando battery monitoring: lab-on-fiber electrochemical sensing technologies[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18 (9): DOI: 10.1002/lpor.202301298.
- [37] NEDJALKOV A, MEYER J, GRAFENSTEIN A, et al. Refractive index measurement of lithium ion battery electrolyte with etched surface cladding waveguide Bragg gratings and cell electrode state monitoring by optical strain sensors[J]. *Batteries*, 2019, 5(1): DOI: 10.3390/batteries5010030.
- [38] 贺元骅, 赵逸明, 张俐恒, 等. 辐射对流散热下大尺寸三元锂电池热模型[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(6): 49–55.
- HE Yuanhua, ZHAO Yiming, ZHANG Liheng, et al. Research on thermal model of large format ternary lithium battery under radiation convection heat dissipation[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(6): 49–55.
- [39] 冒燕, 童杏林, 卢世刚, 等. 植入式锂离子电池光纤布拉格光栅温度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(17): 169–175.
- MAO Yan, TONG Xinglin, LU Shigang, et al. Implantable fiber bragg grating temperature sensor inside lithium-ion battery[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(17): 169–175.

[40] HUANG Feixia, GU Bowen, WU Qiang, et al. Real-time monitoring of internal temperature of a lithium-ion battery using embedded fiber Bragg gratings[J]. Chinese Optics Letters, 2024, 22(9): DOI: 10.3788/COL202422.091202.

[41] MEI Wenxin, LIU Zhi, WANG Chengdong. et al. Operando monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-on-fiber technologies[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): DOI: 10.1038/s41467-023-40995-3.

[42] PENG Jun, ZHOU Xing, JIA Shuhai, et al. High precision strain monitoring for lithium ion batteries based on fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Power Sources, 2019, 433: DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.226692.

[43] ZHANG Yi, XIAO Xiangpeng, CHEN Weilun, et al. In operando monitoring the stress evolution of silicon anode electrodes during battery operation via optical fiber sensors [J]. Small, 2024, 20 (29): DOI: 10.1002/sml.202311299.

[44] NASCIMENTO M, FERREIRA M S, PINTO J L. Simultaneous sensing of temperature and Bi-directional strain in a prismatic Li-ion battery[J]. Batteries, 2018, 4(2): DOI: 10.3390/batteries4020023.

[45] HAN Xile, ZHONG Hai, LI Kaiwei, et al. Operando monitoring of dendrite formation in lithium metal batteries via ultrasensitive tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1):153-166.

[46] HUANG Jiaqiang, HAN Xile, LIU Fu, et al. Monitoring battery electrolyte chemistry via in-operando tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(12): 6 464-6 475.

[47] GHANNOUM A R, NIEVA P. Graphite lithiation and capacity fade monitoring of lithium ion batteries using optical fibers[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: DOI: 10.1016/j.est.2020.101233.

[48] KIM K J, LU Ping, CULP J T, et al. Metal-organic framework thin film coated optical fiber sensors: a novel waveguide-based chemical sensing platform[J]. ACS Sensors, 2018, 3(2): 386-394.

作者简介： 付 举 （1990—）,女,四川成都人,博士,副教授,主要从事锂离子电池关键材料研发、电池监测及预警等方面的研究。E-mail:fj2020@cafuc.edu.cn。

