先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022072701

锂离子电池参数监测中的光纤传感技术

王龙宁*，彭 俊，贾书海
（西安交通大学 机械工程学院，西安 710100）

摘 要： 近年来锂离子电池安全事故频发对锂离子电池产业带来比较严重的影响，为减少此类事故发生，可采用电池管理系统对锂离子电池进行安全管理，保证其正常运作。管理过程中利用传感器对电池参数进行监测十分必要，光纤传感器具有体积小、抗电磁干扰能力强、可分布式测量等优势，可实现对锂离子电池的精准监测。文章从锂离子电池监测需求出发，简要介绍了三种主流光纤传感原理，并综述了各种用于锂离子电池监测的光纤传感最新研究成果，最后对光纤传感技术在锂离子电池参数监测中的应用做了展望。

关键词： 锂离子电池；安全管理；光纤传感；参数监测
中图分类号： TP212 **文章编号：** 1001－5868(2022)04－0714－09

Optical Fiber Sensing Technology in Lithium-Ion Battery Parameter Monitoring

WANG Longning, PENG Jun, JIA Shuhai
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710100, CHN)

Abstract: In recent years, the frequent occurrence of lithium-ion battery safety accidents has brought serious negative impact on the lithium-ion battery industry. In order to reduce the occurrence of such accidents, the battery management system can be used to safely manage the lithium-ion battery and ensure its normal operation. It is very necessary to use sensors to monitor battery parameters in the management process. Optical fiber sensors have the advantages of small size, strong anti-electromagnetic interference ability, and distributed measurement, which can realize accurate monitoring of lithium-ion batteries. Starting from the monitoring needs of lithium-ion batteries, this paper briefly introduced three mainstream optical fiber sensing principles, and summarized the latest research results of various optical fiber sensing for lithium-ion battery monitoring. Finally, the application of fiber optic sensing technology in monitoring lithium-ion battery parameters was prospected.

Key words: lithium-ion batteries; safety management; fiber optic sensing; parameter monitoring

0 引言

锂离子电池凭借其能量密度与功率密度大、能量转换效率高、循环寿命长、自放电低和环境友好等诸多优点，已广泛应用于各个领域[1-2]。作为实现双碳目标和节能减排的主战场[3-4]，锂离子电池还有很大的发展空间。

锂离子电池虽然有诸多优点，但其频繁发生的安全性问题不容忽视，已经严重影响了产业的发展。为保证锂离子电池稳定运行，除提高电池本身的安全稳定性外，还需从电池安全状态的实时评估和预测着手，进行电池的安全风险早期预警技术研究，从源头上降低电池系统的事故风险[5-6]。

电池管理系统（Battery Management System，BMS）可对电池参数进行实时监测，并基于监测数

收稿日期：2022－07－28.
基金项目：国家电网有限公司科技项目“储能锂离子电池智能监测技术研究”资助项目(5108-202218280A-2-84-XG).
* 通信作者：王龙宁 E-mail：871915527@qq.com

据进行状态估计及安全预警。目前以电学参数监测为主的传统 BMS 已逐渐凸显出瓶颈，因此，国内外学者开始探索更加安全高效的电池管理技术，其中基于多参数传感的智能锂离子电池是未来发展方向之一[7-9]。因此，监测电池的非电学参数亦是评估电池状态及安全预警的一个重要途径。

当前锂离子电池系统中，温度监测多采用热电偶、铂电阻等传统电子类传感器，其存在单点测量、成本高、传感系统复杂等缺点，而且只针对具有代表性的点进行温度监测，无法反映每个电池的温升状态；应变监测多采用应变片、测厚仪等传统电子类传感器，其存在辅助设备多、信号线束庞杂、无法实现电池单体分布式测量、抗电磁干扰差、易产生温度跳变而引发误报警等缺点；压力监测多采用压力传感器置于电池外部，存在无法可靠反映真实电池压力等缺点。因此，亟待开发能够用于电池温度、应变和压力测量的新型传感器件，且传感器件要兼具抗电磁干扰强、体积小、易实现分布式测量、方便植入电池内部等特点，光纤传感器无疑是最佳选择。此外，光纤传感器还可以利用光学效应直接对电池电极状态进行监测。2020 年欧盟提出了未来电池发展规划 BATTERY 2030+，其中提到光纤传感是未来智能电池功能集成的重要组成部分[10-11]。

目前用于锂离子电池参数测量的光纤传感技术主要有：布拉格光纤光栅传感、光纤倏逝波传感、光纤 F-P 腔传感、特种光纤光栅传感等。

本文首先总结归纳了现有用于锂离子电池参数监测的光纤传感方法，然后综述了各种光纤传感方法在锂离子电池参数监测中的研究现状，分析了当前光纤传感器在锂离子电池非电学参数监测中的不足，最后对光纤传感技术在锂离子电池非电学参数监测中的应用进行展望。

1　光纤传感原理

1.1　光纤光栅传感

光纤光栅是通过一定方法使光纤纤芯的折射率发生轴向周期性调制而形成的衍射光栅，按照其本身光学参数的不同，可以分为布拉格光纤光栅[12-13]、长周期光纤光栅[14-15]、啁啾光纤光栅[16-17]、倾斜光纤光栅[18-19]及相移光纤光栅[20-21]等。由光纤光栅理论可知，布拉格光纤光栅反射波长可表示为[22]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，λ_B 为反射波长，n_{eff} 为有效折射率，Λ 为光栅周期。

当宽带光源入射布拉格光纤光栅时，光通过每一个折射率变化段都会产生一定量的反射光，当光栅周期约为入射波长的一半时，所有的折射率变化段的反射光相干叠加成一个最大反射的特定波长，形成窄带反射光谱，光谱的中心波长即布拉格波长，其工作原理如图 1 所示。当有效折射率发生变化或光栅周期受到调制时，反射光谱的中心波长会发生漂移。

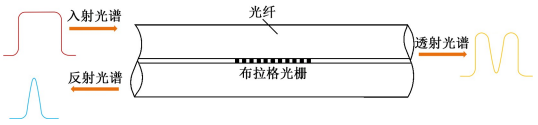


图 1　布拉格光纤光栅工作原理

由式(1)可见，布拉格反射波长与光栅周期和导波模式的有效折射率呈现线性关系，布拉格反射波长随光栅处的应变与温度变化而改变，波长漂移量与温度和应变的关系如式(2)所示。

$$\begin{cases}\dfrac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha+\xi)\Delta T + (1-P_e)\Delta\varepsilon \\ \alpha = \dfrac{1}{\Lambda}\dfrac{\mathrm{d}\Lambda}{\mathrm{d}T},\ \xi = \dfrac{1}{n}\dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T},\ P_e = -\dfrac{1}{n}\dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\varepsilon}\end{cases} \tag{2}$$

式中，α 为光纤的热膨胀系数，ξ 为光纤的热光系数，P_e 为光纤的弹光系数。

由上可见，布拉格反射光的中心波长会随着温度或应变，或者两者兼有的变化而变化，反射光进入光纤光栅解调仪后被解调出波长信号 λ，因此随着传感部位的温度或应变的变化，可得到不同的测试波长信号，以此起到监测锂离子电池的温度和应力的作用。

1.2　光纤倏逝波传感

当光以合适的角度入射至光纤时会以全内反射方式在光纤内部进行传输，在传输的过程中会产生倏逝波，可表示为[23-26]

$$E = E_0\exp\left(-\frac{\delta}{d_p}\right) \tag{3}$$

式中，δ 为倏逝波到界面的距离，d_p 为穿透深度。

作为传感器使用时，将光纤进行特殊工艺加工，当光通过传感区域时，由于被测介质的散射或吸收等作用，从而影响倏逝波的穿透深度，倏逝波的能量产生损失，通过检测传输光的特性就能得到被测量的相关信息。

以微纳光纤为例，将单模光纤进行拉制处理，即

可得到微纳结构光纤[27-29]。其包括单模光纤区、锥型区域、腰部区域。腰部区域直径较小，为主要传感区，在腰部区域与空气的界面处会有一部分光渗透到空气中，形成倏逝波传感，如图 2 所示。

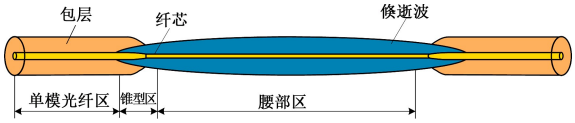
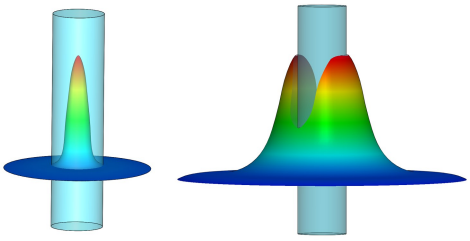


图 2 倏逝波示意图

理论分析中，可将微纳光纤简化为纤芯-空气两层圆柱形光波导结构[30]。其中，腰部区域的光纤直径 D 决定空气中倏逝波场的占比大小，当入射光为 1.55 μm，光纤直径逐渐减小时，光场逐渐穿透至空气层。其中，光纤直径为 1.2 和 0.6 μm 时的 Z 轴坡印廷矢量三维图如图 3 所示。



(a) $D=1.2\ \mu m$ (b) $D=0.6\ \mu m$

图 3 Z 轴方向坡印廷矢量

以锥型区具体分析，纤芯以锥形过渡至传感段，增加了传感区的面积和倏逝波的透射深度，提高了灵敏度，锥型区倏逝波传感如图 4 所示。

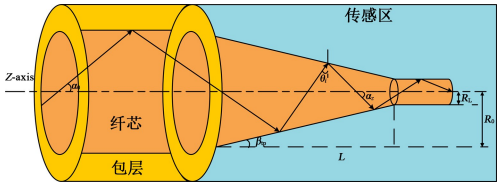


图 4 锥型区倏逝波传感示意图

由上可见，倏逝波强度会随着其穿透深度的变化而变化，而其穿透深度又会随被测介质产生变化，因此随着传感部位的被测介质的变化，可得到不同的倏逝波信号，达到对锂离子电池的温度和应力等进行监测的作用[31]。

1.3 光纤 F-P 腔传感

法布里-珀罗谐振腔(Fabry-Pérot Cavity)简称 F-P 谐振腔，是光学谐振腔的一种。典型的光纤 F-P 腔传感原理如图 5 所示[32]。

根据谐振腔介质不同，可以把光纤 F-P 腔传感器分为本征型光纤法珀干涉传感器(Intrinsic Fabry-Perot Interferometer，IFPI)和非本征型光纤法珀干涉传感器(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer，EFPI)两种[33-36]。

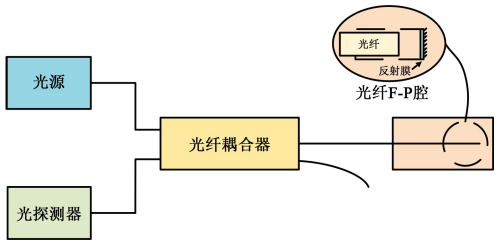


图 5 F-P 腔传感原理示意图

IFPI 中，两反射面之间的干涉仪由单模光纤或多模光纤构成，如图 6 所示；而 EFPI 中，干涉仪由其他非光纤的介质构成，如图 7 所示。

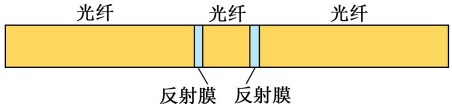


图 6 IFPI 结构图

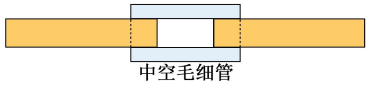


图 7 EFPI 结构图

以 EFPI 中双光纤空气腔为例，光线在其内部传输路径如图 8 所示。

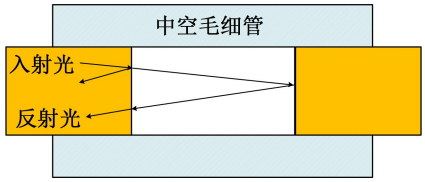


图 8 EFPI 双光纤空气腔光线传播路线

根据解调时所利用的光学参量不同，光纤 F-P 传感器的解调方式主要分为强度解调和相位解调。以强度解调为例，若光纤 F-P 传感器中的光源是波长为 λ 的恒定单色光源，当用光电探测器对反射光进行接收时，以传感器腔长 l 为横坐标，光强 I_R 为纵坐标(归一化)，当腔镜反射率 R 值较低时，光电探测器接收到的光强信号如公式(4)所示。

$$I_R \approx 2R\left[1-\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}l\right)\right]\cdot I_0 \tag{4}$$

式中，I_R 为输出光强信号，I_0 为输入光强信号，l 为腔长。由于 λ 和 R 为定值，因此强度型光纤 F-P 传感器的输出光强信号 I_R 是输入腔长 l 的单变量函数，其光强输出曲线如图 9 所示。图 9 中 Δ 区域的较小范围内，光强 I_R 是 l 的单值函数，适合进行传

输传感。

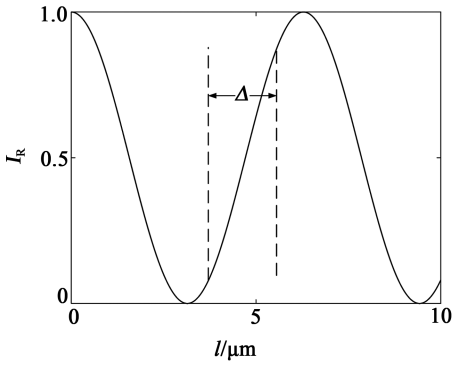


图 9　归一化强度与腔长关系图

在标定了 R，I_0 之后，只要用光电探测器获得输出光强 I_R，即可直接求出腔长 l，从而得出被测量数值，实现锂离子电池传感。

相位解调根据 F-P 腔多光束干涉谱的相位实现解调，可分为光谱解调法和相关解调法。

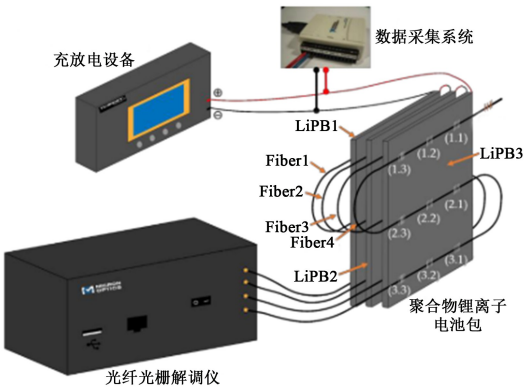
2　锂离子电池温度监测传感技术

2.1　锂离子电池温度监测的目的和意义

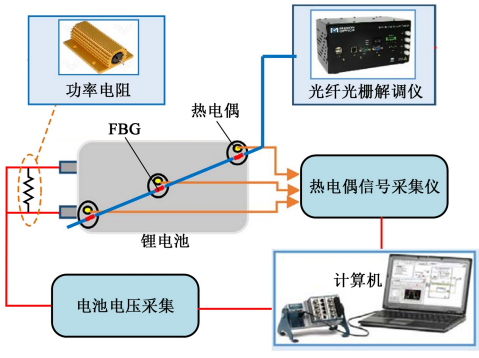
温度是锂离子电池最为重要的参数之一，锂离子电池在充放电循环中会产生热量，热量积累会使得电池内部周围环境温度升高，过热的运行环境会影响电池的循环性能和使用寿命。产生的热量若不能及时散去很可能导致安全事故，如热失控、燃烧、爆炸等。近年来随着锂离子电池的大规模应用且锂离子电池的安全事故频发，越来越多的人意识到目前的电池温度监测手段和电池管理系统存在不足，并开始探索电池温度监测的新型传感技术，主要包括微型电子传感器与光纤传感器。

2.2　基于光纤传感的锂离子电池温度监测研究进展

光纤传感是电池温度监测常用的方式，其中光纤光栅作为传感单元的研究较多，也有采用光纤微型 F-P 腔干涉结构进行温度传感。2013 年，葡萄牙阿威罗大学 Yang 等最早探索了光纤光栅传感器在锂离子电池温度监测中的可行性，采用光纤光栅传感网络测量多个纽扣锂离子电池表面正负两极的温度[37]。2014 年，同一机构的 Novais 等将光纤光栅埋入锂离子电池内部及粘贴在表面，同时监测锂离子电池内部和外部的温度变化，结果表明内部温度要比外部温度高 4 ℃ 左右，但内部温度和外部温度具有相同的变化趋势[38]。2015 年，Nascimento 等将光纤光栅传感器贴在柱状 18650 锂离子电池表面进行温度测量，并采用参考光栅补偿温度实现了电池温度和应变的同时测量[39]。他们还用 4 个 FBG 阵列（含 9 个光栅）对聚合物锂离子电池的 3 块电芯表面不同位置的温度进行了准分布式测量，并根据不同位置的温度分布得出电池包不同表面的热力云图[40]。2019 年，他们还采用了 5 个光纤光栅阵列对手机锂离子电池表面不同位置的温度进行测量，并且将 FBG 测量结果与热电偶测量结果进行了对比，验证了 FBG 测量电池温度的可行性和准确性[41-43]。为了解决电池内部温度和应变交叉敏感的问题，其团队还设计了光纤 F-P 腔级联 FBG 传感结构，并实现了电池内部温度的精准测量[44]。英国华威大学的 Amietszajew 等将光纤光栅植入到 18650 柱状电池芯部以监测锂离子电池的温度变化，另外还采用热电偶测量了电池表面的温度变化，结果显示芯部温度比表面高 5 ℃ 左右[45]。美国北卡罗来纳州立大学 Kim 等将光纤光栅植入柱状电池内部电极表面测量其温度变化，以研究温度对电池电极材料的电化学性能和机械性能衰退的影响[46]。其中部分利用光纤光栅进行锂离子电池温度监测的传感系统如图 10 所示。



（a）　同时测量三块电池的温度分布[40]



（b）　锂离子电池表面多点测温[41]

图 10　基于光纤光栅的锂离子电池温度测量实验设置及测量系统

近年来，国内一些高校和科研院所也先后进行了相关探索。2017 年，中国电力科学研究院与北京交通大学在国内首先进行了基于光纤光栅传感的锂离子电池温度测量研究，探索了将镀金光纤光栅植入锂离子电池内部进行温度原位测量的可行性[47]。2020 年，中国科学院上海光机所研究人员将多个光纤光栅埋入锂离子软包电池内部，实现了对锂离子电池内部温度场的分布式测量，并将测量结果与理论模拟分析进行了对比，对不同运行环境下锂离子电池温度场的分布状态进行了分析，实验结果与模拟结果一致性良好，还对电池运行健康状态进行了预警和评估[48]。

3 锂离子电池应变监测传感技术

3.1 锂离子电池应变监测的目的和意义

锂离子电池在充电时，锂离子从阳极材料中脱出经过电解液嵌入到阴极材料中，放电时相反，锂离子从阴极向阳极移动，如图 11 所示。

锂离子的嵌入和脱出，会导致正负极材料的体积发生变化。以常见的三元体系为例，在脱锂的过程中晶胞体积会发生 5%～10%的收缩，而石墨材料在锂离子嵌入过程中会发生 10%～20%的体积膨胀，这些材料层面的体积变化最终会转变为电芯层面的体积变化，从而在电池内部产生膨胀和收缩应力并在外部表现为一定的应变变化[49-50]。应力应变测量方法可分为两大类：1)电学法，即采用应变片或测厚仪等电子类传感器件测量电池厚度变化；2)光学法，如采用激光或光纤传感方法监测电池内外应变。

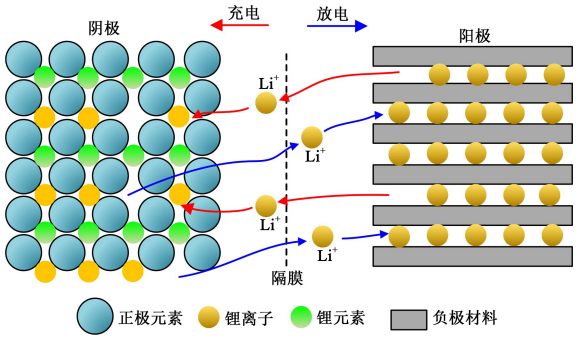


图 11 充放电时锂离子嵌入和脱出过程示意图

3.2 基于光纤传感的锂离子电池应变监测研究进展

在各种测量电池应变的光学方法中，采用激光位移传感器以及数字图像相关方法测量应变仅在实验室环境下适用，具有工程应用前景的测量方法是光纤传感技术，该方法也成为近年来的研究热点。2014 年，美国的帕罗奥多研究中心的 Sommer 等首次提出采用光纤光栅测量锂离子电池的外部应变，将一个光纤光栅紧固在电池表面，另一个光纤光栅用导热胶粘贴在同一位置作为温度补偿光栅，此外还在电池表面布置了应变片和热电偶进行对比测量，研究结果表明：光纤光栅测量结果和热电偶和应变片测量结果具有良好的一致性。还研究了充放电循环中锂离子的扩散行为[51-53]，如图 12 所示。

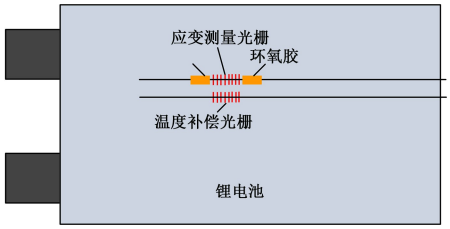
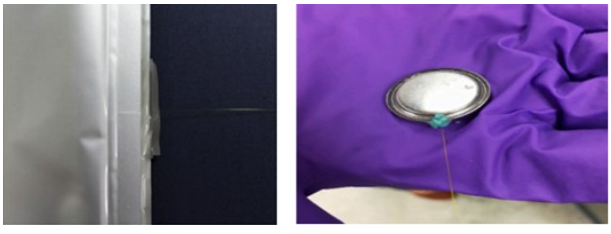


图 12 光纤光栅测量锂离子电池外部应变示意图[53]

2016 年，韩国材料科学研究所 Bae 等用光纤光栅监测了锂离子电池电极应变演化过程，并研究了将光纤光栅贴在电极表面和植入电极内部两种布置方式的差异性，结果表明：二者的应力变化趋势相同，但植入式光纤光栅测量的应力更大[54]。2017 年，帕罗奥多研究中心的 Raghavan 等将光纤光栅埋入锂离子电池内部以测量电池的温度和应变，并研究了不同直径的光纤植入对电池密封性能的影响，最后采用光纤光栅测量的应变数据对电池的状态进行了估计[55-56]。美国戴顿大学研究院的 Fortier 等将光纤光栅植入纽扣电池电极与隔膜之间实现了内部应变原位监测[57]，如图 13 所示。



(a) 光纤光栅植入软包电池[56] (b) 光纤光栅植入钮扣电池[57]

图 13 光纤光栅测量锂离子电池内部应变

4 锂离子电池压力监测传感技术

4.1 锂离子电池压力监测的目的和意义

当锂离子电池充电时间过长或充电电压过高以及在发生热失控的早期阶段，电池内部会发生化学反应而产生不同程度的产气鼓胀，气体累积将导致锂离子电池内部气体压力升高，使锂离子电池使用存在潜在隐患，严重时甚至会引起爆炸、燃烧等剧烈

反应，造成不必要的财产及人身健康损失。因此，监测压力变化能够在一定程度上早期预警锂离子电池的热失控行为，为电池安全提供保障。目前锂离子电池压力监测主要采用植入式传感器，按原理主要分为光纤传感器以及电子式传感器。

4.2　基于光纤传感的锂离子电池压力监测研究进展

2020 年，法兰西公学院的 Huang 等[58]将常规光纤光栅植入柱状锂离子电池中，同时监测了电池的内部温度、应变和压力状况，并通过对照实验方法消除了应变作用，从而得到由温度和压力带来的光栅变化，此时由于光栅受温度和压力两个参数的影响无法解耦，于是引入微结构光纤光栅，通过对比两种光纤结构波长变换关系，从而分别解耦出电池内部温度和压力对光纤栅区的影响。他们指出，单结构下多参数无法解耦是基于光纤传感的锂离子电池压力监测研究较少的可能原因之一。

由于存在以上问题，光纤传感在锂离子电池压力监测方面并未大量普及，为解决锂离子电池内部压力问题，部分学者采用电子式压力传感器植入电池内部进行相关研究。2020 年，德国慕尼黑大学的 Julius Schmitt 等首次证明了集成到电池组中的小型压力传感器可以用于测量大尺寸棱柱电池内部气体压力，并且表明此种测量方法可以在长期循环期间监测气体压力，而不会导致电池过早失效或加速老化[59]。2021 年，清华大学的 Zhang 等通过热滥用实验对商用棱柱电池进行了测试，结果表明最大气压出现时间比最高温度平均早 290 s，这可以作为电池升温的预警信号。通过引入 P-T 系数，分阶段阐述了电池内压随温度变化的关系。研究结果对电池热安全设计具有指导意义[60]。

5　锂离子电池电极监测传感技术

除了使用光纤传感器对电池内非电学参数进行监测以评估电池健康状态之外，部分学者还采用光纤传感器对电极进行直接监测。2016 年，滑铁卢大学的 Ghannoum 等将光纤传感器嵌入电池内部石墨阳极处，利用光纤倏逝波原理，在近红外波段下监测石墨电极在锂化过程中的折射率变化，证明了光纤传感器在测量电池 SOC 方面的能力[61]，如图 14，15 所示。2017 年，他们还介绍了用于监测锂离子电池充电状态（SOC）和健康状态（SOH）的光纤倏逝波传感器（FOEWS）的制作，并研究了 FOEWS 对石墨阳极的物理影响，对比了袋式电池、Swagelok 电池以及用石墨浆料完全包裹 FOEWS 时的测量效果，得出结论为压力变大时，FOEWS 与石墨电极之间的相互作用变大，传感器的灵敏度变高[62]。

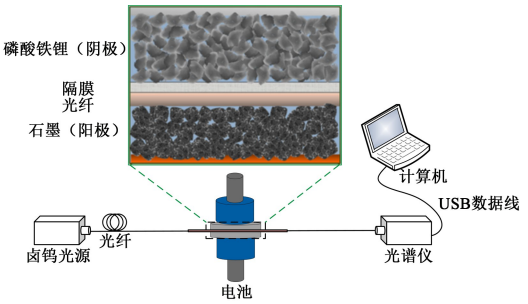


图 14　光纤倏逝波光谱实验装置示意图[61]

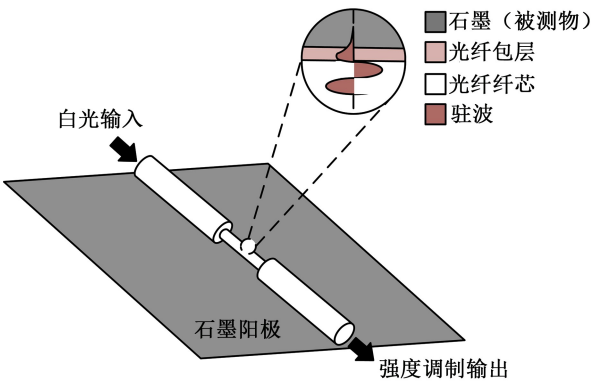


图 15　光纤传感器及驻波模式和指数衰减倏逝波[61]

除了对石墨阳极进行监测，还有学者进行了 FOEWS 在锂离子电池阴极监测方面的研究。2020 年，乌普萨拉大学的 Hedman 等介绍了 FOEWS 与 Swagelok 电池中阴极材料磷酸铁锂之间的相互作用，利用循环伏安法探究了电极材料在充放电过程中被氧化还原时光信号的变化，进一步证明了 FOEWS 可用于动态条件下监测锂离子电池的 SOC 和电极特性[26]。2021 年，他们研究了使用 FOEWS 监测袋状电池中的磷酸铁锂阴极，结果表明，与 Swagelok 电池相比，袋状电池受光纤影响较小，循环条件下运行良好，再次证明了 Ghannoum 等的研究，且证明了光纤传感器在商用电池上大规模使用的可能性[63]。

6　总结与展望

光纤传感器可以解决传统电子式传感器易受电磁干扰、无法实现分布式测量等问题，近年来研究人员进行了大量光纤传感器在锂离子电池非电学参数监测方面的研究，并取得了相当显著的研究成果与进展。但当前研究只是初步探索了采用裸光纤光栅

贴在电池表面或者植入电池内部进行温度或者应变监测的可行性。而未经封装保护的裸光栅脆弱易断,灵敏度低,易受外界机械振动等干扰,无法精确感知电池微小状态的变化,因此其工程应用价值还有待提高。

研制高可靠性、高灵敏度且具有耐腐蚀封装的光纤非电学参数监测传感器,为提高电池状态估计精度和提升电池系统安全管理水平提供新思路,并实现工业化应用,将成为锂离子电池非电学参数监测领域未来重要的研究方向。

参考文献:

[1] Zhou D, Shanmikaraj D, Tkacheva A, et al. Polymer electrolytes for lithium-based batteries: Advances and prospects[J]. Chem., 2019, 5(9): 2326-2352.

[2] Zubi G, Dufo-Lopez R, Carvalho M, et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 89: 292-308.

[3] Gur T M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(10): 2696-2767.

[4] Larcher D, Tarascon J M. Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage[J]. Nature Chemistry, 2015, 7(1): 19-29.

[5] Wu W X, Wang S F, Wu W, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 262-281.

[6] Wei J W, Dong G Z, Chen Z H, et al. System state estimation and optimal energy control framework for multicell lithium-ion battery system[J]. Appl. Energy, 2017, 187: 37-49.

[7] Lawder M T, Suthar B, Northrop P W C, et al. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications[J]. Proc. of the IEEE, 2014, 102(6): 1014-1030.

[8] Rahimi-Eichi H, Ojha U, Baronti F, et al. Battery management system an overview of its application in the smart grid and electric vehicles [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 4-16.

[9] Hu X, Deng Z, Lin X, et al. Research directions for next-generation battery management solutions in automotive applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 152: 111695.

[10] Edstrom K, Ayerbe E, Castelli I E, et al. Editorial to the special issue: How to reinvent the ways to invent the batteries of the future-the battery 2030+large-scale research initiative roadmap[J]. Adv. Energy Materials, 2022, 12(17): 2200644.

[11] Fichtner M, Edstrom K, Ayerbe E, et al. Rechargeable batteries of the future-The state of the art from a BATTERY 2030+ perspective[J]. Adv. Energy Materials, 2021: 10.1002/aenm.202102904.

[12] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. J. of Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1263-1276.

[13] Ma Z, Chen X Y. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis[J]. Sensors, 2019, 19(1): 55.

[14] Janxzuk-Richter M, Dominik M, Razniecka E, et al. Long-period fiber grating sensor for detection of viruses [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 250: 32-38.

[15] Patrick H J, Williams G M, Kersey A D, et al. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1996, 8(9): 1223-1225.

[16] Ouellette F. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical wave-guides[J]. Opt. Lett., 1987, 12(10): 847-849.

[17] Tosi D. Review of chirped fiber Bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2147.

[18] Albert J, Shao L Y, Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Laser & Photon. Reviews, 2013, 7(1): 83-108.

[19] Lao J J, Sun P, Liu F, et al. In situ plasmonic optical fiber detection of the state of charge of supercapacitors for renewable energy storage[J]. Light-Science & Applications, 2018, 7(1): 11.

[20] Sun X Y, Zeng L, Du H F, et al. Phase-shifted gratings fabricated with femtosecond laser by overlapped two types of fiber Bragg gratings[J]. Opt. and Laser Technol., 2020, 124.

[21] Wei L, Lit J W Y. Phase-shifted Bragg grating filters with symmetrical structures[J]. J. of Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1405-1410.

[22] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. J. of Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1277-1294.

[23] 张 宁. 基于纳米钯膜的微毛细管倏逝波氢气传感器[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Zhang Ning. Microcapillary evanescent wave hydrogen sensor based on nano-palladium membrane [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[24] 王 敏, 戴世勋, 张培晴, 等. 基于中红外光纤的倏逝波传感研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(4): 1117-1131.
Wang Min, Dai Shixun, Zhang Peiqing, et al. Research progress of evanescent wave sensing based on mid-infrared fiber [J]. J. of Silicate, 2022, 50(4): 1117-1131.

[25] 杜　磊. 基于特殊光纤结构和磁流体的磁场传感研究[D]. 西安：西北工业大学，2015.
Du Lei. Research on magnetic field sensing based on special optical fiber structure and magnetic fluid [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.

[26] Hedman J, Nilebo D, Langhammer E L, et al. Fibre optic sensor for characterisation of lithium-ion batteries [J]. Chemsuschem, 2020, 13(21): 5731-5739.

[27] 卫正统. 微纳光纤倏逝场特性及微污染传感技术研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2013.
Wei Zhengtong. Research on evanescent field characteristics of micro-nano optical fibers and micro-pollution sensing technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.

[28] 李宇航. 基于倏逝场特性的微纳光纤器件研究[D]. 杭州：浙江大学，2008.
Li Yuhang. Research on micro-nano optical fiber devices based on evanescent field characteristics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[29] 何　应，马欲飞，佟　瑶，等. 光纤倏逝波型石英增强光声光谱技术[J]. 物理学报，2018，67(2)：75-81.
He Ying, Ma Yufei, Tong Yao, et al. Fiber-optic evanescent-wave quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(2): 75-81.

[30] Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. Opt. Express, 2004, 12(6): 1025-1035.

[31] Hedman J, Nilebo D, Larsson Langhammer E, et al. Fibre optic sensor for characterisation of lithium-ion batteries[J]. Chemsuschem, 2020, 13(21): 5731-5739.

[32] 王文辕. 白光 F-P 光纤传感器的研制[D]. 秦皇岛：燕山大学，2005.
Wang Wenyuan. Development of white light F-P optical fiber sensor[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2005.

[33] 杨　洋. 光纤 F-P 干涉传感器高分辨动态解调技术及应用研究[D]. 大连：大连理工大学，2020.
Yang Yang. Research on high-resolution dynamic demodulation technology and application of optical fiber F-P interferometric sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[34] 夏　霁. 光纤 F-P 传感器偏振切换调制相位解调技术研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2016.
Xia Ji. Research on polarization switching modulation and phase demodulation technology of fiber F-P sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.

[35] 成　龙. 基于宽频光源和 FP 腔的 CO_2 检测方案研究设计[D]. 上海：中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所)，2018.
Jackie Chan. Research and design of CO_2 detection scheme based on broadband light source and FP cavity[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.

[36] 朱英昊. 光纤 Fabry-Perot 腔结构的表面张力传感与测量研究[D]. 杭州：中国计量学院，2015.
Zhu Yinghao. Surface tension sensing and measurement of optical fiber Fabry-Perot cavity structure [D]. Hangzhou: China Institute of Jiliang, 2015.

[37] Yang G, C Leitao, Li Y H, et al. Real-time temperature measurement with fiber Bragg sensors in lithium batteries for safety usage[J]. Measurement, 2013, 46(9): 3166-3172.

[38] 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): 1394.

[39] Nascimento M, Novais S, C Leitao, et al. Lithium batteries temperature and strain fiber monitoring[C]// Proc. of the 24th Inter. Conf. on Optical Fibre Sensors (OFS), 2015.

[40] Nascimento M, Paixao T, Ferreira M S, et al. Thermal mapping of a lithium polymer batteries pack with FBGs network[J]. Batteries-Basel, 2018, 4(4): 67.

[41] Nascimento M, Ferreira M S, Pinto J L. Real time thermal monitoring of lithium batteries with fiber sensors and thermocouples: A comparative study [J]. Measurement, 2017, 111: 260-263.

[42] Nascimento M, Ferreira M S, Pinto J L. Simultaneous sensing of temperature and bi-directional strain in a prismatic Li-ion battery[J]. Batteries-Basel, 2018, 4(2).

[43] Nascimento M, Ferreira M S, Pinto J L. Temperature fiber sensing of Li-ion batteries under different environmental and operating conditions[J]. Appl. Thermal Engineering, 2019, 149: 1236-1243.

[44] Nascimento M, Novais S, Ding M S, et al. Internal strain and temperature discrimination with optical fiber hybrid sensors in Li-ion batteries[J]. J. of Power Sources, 2019, 410: 1-9.

[45] Amietszajew T, Mcturk E, Fleming J, et al. Understanding the limits of rapid charging using instrumented commercial 18650 high-energy Li-ion cells [J]. Electrochimica Acta, 2018, 263: 346-352.

[46] Kim S, Wee J, Peters K, et al. Multiphysics coupling in lithium-ion batteries with reconstructed porous microstructures[J]. J. of Physical Chemistry C, 2018, 122(10): 5280-5290.

[47] Liu Y, Fang J, Xu C, et al. Feasibility of gold-plated fiber Bragg grating sensors used in lithium ion battery in-situ detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040602-1-040602-7.

[48] Zhou W, Ye Q, Ye L, et al. Distributed optical fiber in-situ monitoring technology for a healthy temperature field in lithium ion batteries[J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(12): 1204002.

[49] Mukhopadhyay A, Sheldon B W. Deformation and stress in electrode materials for Li-ion batteries [J]. Progress in Materials Science, 2014, 63: 58-116.

[50] Sethuraman V A, Hardwick L J, Srinivasan V, et al. Surface structural disordering in graphite upon lithium intercalation/deintercalation[J]. J. of Power Sources, 2010, 195(11): 3655-3660.

[51] 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): 1-7.

[52] Sommer L W, Raghavan A, Kiesel P, et al. Monitoring of intercalation stages in lithium-ion cells over charge-discharge cycles with fiber optic sensors[J]. J. of the Electrochemical Society, 2015, 162(14): A2664-A2669.

[53] 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]. J. of Power Sources, 2015, 296: 46-52.

[54] Bae C J, Manandhar A, Kiesel P, et al. Monitoring the strain evolution of lithium-ion battery electrodes using an optical fiber Bragg grating sensor[J]. Energy Technology, 2016, 4(7): 851-855.

[55] Ganguli A, Saha B, Raghavan A, et al. Embedded fiber-optic sensing for accurate internal monitoring of cell state in advanced battery management systems part 2: Internal cell signals and utility for state estimation[J]. J. of Power Sources, 2017, 341: 474-482.

[56] Raghavan A, Kiesel P, Sommer L W, et al. Embedded fiber-optic sensing for accurate internal monitoring of cell state in advanced battery management systems part 1: Cell embedding method and performance[J]. J. of Power Sources, 2017, 341: 466-473.

[57] Fortier A, Tsao M, Williard N D, et al. Preliminary study on integration of fiber optic Bragg grating sensors in Li-ion batteries and in situ strain and temperature monitoring of battery cells[J]. Energies, 2017, 10(7): 838.

[58] Huang J Q, Blanquer L A, Bonefacino J, et al. Operando decoding of chemical and thermal events in commercial Na(Li)-ion cells via optical sensors[J]. Nature Energy, 2020, 5(9): 674-683.

[59] Schmitt J, Kraft B, Schmidt J P, et al. Measurement of gas pressure inside large-format prismatic lithium-ion cells during operation and cycle aging[J]. J. of Power Sources, 2020, 478(14): 228661.

[60] Zhang Y J, Wang H W, Wang Y, et al. Thermal abusive experimental research on the large-format lithium-ion battery using a buried dual-sensor[J]. J. of Energy Storage, 2021, 33(4): 102156.

[61] Ghannoum A, Norris R C, Iyer K, et al. Optical characterization of commercial lithiated graphite battery electrodes and in situ fiber optic evanescent wave spectroscopy[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2016, 8(29): 18763-18769.

[62] Ghannoum A, Nieva P, Yu A P, et al. Development of embedded fiber-optic evanescent wave sensors for optical characterization of graphite anodes in lithium-ion batteries[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2017, 9(47): 41284-41290.

[63] Hedman J, Bjorefors F. Fiber optic monitoring of composite lithium iron phosphate cathodes in pouch cell batteries[J]. ACS Appl. Energy Materials, 2022, 5(1): 870-881.

作者简介：

王龙宁(1999—)，男，山东省济宁市人，博士研究生，主要研究方向为光学传感器制备及其在锂离子电池中的应用；

彭　俊(1991—)，男，陕西省安康市人，博士，主要研究方向为光纤传感技术；

贾书海(1969—)，男，陕西省西安市人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光学精密测量技术。