

激光与光电子学进展

植入式锂离子电池光纤布拉格光栅温度传感器

冒燕^{1,4}, 童杏林^{2,4*}, 卢世刚³, 褚维达^{2,4}¹武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070;²武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 湖北 武汉 430070;³上海大学材料基因组工程研究院, 上海 200444;⁴日照武汉理工大生物医药暨新材料研究院, 山东 日照 276826

摘要 锂离子电池运行期间尤其在放电倍率下产生的热量会导致温度大幅上升, 仅仅依赖于单体电池表面的温度监测不能为电池管理系统提供最准确、最可靠的传感数据。对锂离子电池原位监测是防止锂离子电池热失控的最有效的方法之一, 将传感器置于锂离子电池的热源核心处, 可第一时间感知温度变化。在 18650 圆柱体锂离子电池内部中心处埋入光纤复合温度传感器, 利用同一根光纤上的法布里-珀罗空气腔消除布拉格光栅传感机理固有的温度与应力交叉敏感, 实验结果表明, 在电池充放电阶段可以实时监测电池内部温度变化, 光纤传感器与电池内部电芯相容性较好, 可以满足大尺度锂离子电池集成组件的健康状态长期监测。

关键词 光纤光学与光通信; 光纤传感; 锂离子电池; 法布里-珀罗干涉; 布拉格光栅; 原位监测

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221764

Implantable Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Inside Lithium-Ion Battery

Mao Yan^{1,4}, Tong Xinglin^{2,4*}, Lu Shigang³, Chu Weida^{2,4}¹School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;²National Engineering Research Center for Fiber Optic Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;³Materials Genome Institute, Shanghai University, Shanghai 200444, China;⁴Rizhao Biomedicine and New Materials Research Institute of Wuhan University of Technology, Rizhao 276826, Shandong, China

Abstract In the operation of lithium-ion batteries, particularly at the high discharge rate, the temperature of the battery significantly increases owing to heat generation. The most accurate and reliable sensor data for the battery management system (BMS) cannot be obtained by relying solely on temperature monitoring of the surface of individual cells. *In-situ* monitoring of lithium-ion batteries is one of the most effective methods to prevent the thermal runaway of lithium-ion batteries. A sensor is implanted in the heat source core of the lithium-ion battery, and the temperature change can be sensed immediately. A fiber optic composite temperature sensor is embedded in the inner center of the 18650 cylindrical lithium-ion battery, and the cross sensitivity of temperature and stress inherent in the Bragg grating sensing mechanism is eliminated using the Fabry-Perot (F-P) air cavity on the same fiber. The experimental results show that the internal temperature change of the battery can be monitored in real time in the charge and discharge stages, and the optical fiber sensor is compatible with the internal cell of the battery. This can facilitate the long-term health monitoring of large-scale lithium-ion battery-integrated components.

Key words fiber optics and optical communication; optical fiber sensing; lithium-ion battery; Fabry-Perot interference; Bragg grating; *in-situ* monitoring

1 引言

锂离子电池与其他化学物质电池相比, 具有高能

量密度、高电压、循环寿命次数多、轻微的记忆效应等优点^[1-2], 已成为移动通信设备、新能源汽车、分布式电网储能系统^[3]等热点应用领域的的首选二次电池。然

收稿日期: 2022-06-04; 修回日期: 2022-06-16; 录用日期: 2022-06-23; 网络首发日期: 2022-07-03

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020MF111)、中央高校基本科研业务费专项基金(2019IVA045)

通信作者: *tongxinglin@whut.edu.cn

而,与热相关的性能和安全问题仍然存在严峻挑战^[4],如电池运行期间温度超过某个阈值,会因为一系列相互反馈的放热反应^[5]而导致电池及应用系统不安全的问题。

对锂离子电池运行的监测研究,已由表面和原位监测发展到对电极表面的电动力学^[6-7]的微尺度监测,但从长期安全性的大规模商业应用角度出发,电池内部原位物理参量的监测研究仍具有挑战性和重要意义。由于锂离子电池的热物理性质,电池内部可能会形成相当大的温度梯度^[8]。如 18650 型锂离子电池的“果冻卷”几何形状会导致径向内部温度梯度约为 5~15 °C,在快速充/放电或强对流加热/冷却期间,温度梯度甚至更高^[9-11]。与电池表面测量相比,置于内部电化学界面上的传感器可以更快、更准确地检测温度变化^[12],有助于电池管理系统(BMS)完成电池健康状况估计和主动控制^[13]。

根据温度传感器的工作机理不同,用于电池内部原位监测的温度传感器可以分为电学和光学传感器,其中以热电偶为代表的电类温度传感器受到国内外研究人员的关注。Forgez 等^[14]通过钻孔进入胶冻辊的中心孔,将外径为 1 mm 的热电偶插入 26650 尺寸的圆柱形电池的中心。张剑波等^[15]利用嵌入式热电偶测量了两个大型袋式电池的温度分布。为了防止热电偶在锂离子电池内部的腐蚀性电化学环境中失效,文献^[9]中使用一种特殊的帕利烯蒸发器在探头上涂覆了一层 10 μm 的帕利烯。与电学传感器相比,光学传感器在锂离子电池原位监测的安全性方面,更具有优越性和友好的相容性。

近几年,光纤传感器作为锂离子电池监测应用中最具潜力的光学传感器,受到了研究人员的高度关注和青睐^[16-17]。光纤传感器具有直径超细、抗电磁干扰、介电击穿强度高、易于形成分布式传感网络等优点,在恶劣工作环境中体现出较好的稳健性。普通石英光纤的主要材料为耐腐蚀 SiO₂,包层最大耐温值约 120 °C,采用耐腐蚀性聚酰亚胺作为涂覆层后,耐温值可达 350 °C,石英玻璃为纤芯的电导率为 10⁻¹⁷ S/m,介电击穿强度为 43 kV/mm,因此石英光纤具备在电化学能量存储与转换中实现温度传感的良好条件。Bae 等^[18]在电极浆料沉积之前,将光纤布拉格光栅(FBG)传感器连接到集电器上,使其直接集成到电极材料本身中,直接监测锂离子电池电极的应变演变。Novais 等^[19]在软包锂离子电池中植入 FBG 温度传感器,监测不同放电速率 *C* 时恒电流循环过程中内部温度变化。文献^[20]探讨了 FBG 传感器在币形锂离子电池中的集成,传感器置于币形电池内部的电极和分离层之间,位于电化学最活跃的区域。以上针对锂离子电池内部温度监测的嵌入式光纤传感器,主要针对袋式软包大电池,采用与锂离子电池制造的同步植入方法,但存在内部电解液的化学作用,会缩减光纤传感器的使用寿命。

本文针对动力工具以及储能系统等领域中,应用最为广泛的 18650 型锂电池原位温度监测的迫切需求,提出和设计了一种面向圆柱式锂离子电池内部温度变化的光纤原位监测方法。采用后期植入密封方法将光纤法布里-珀罗(F-P)腔和 FBG 复用温度传感器埋入 18650 型锂电池“果冻卷”芯处,实时监测电池内部热源处的温度变化,可有效降低电解液对复用温度传感器的损伤,延长传感器工作寿命,同时为大尺度集成化锂离子电池组件系统的分布式传感网络的设计提供技术路线。

2 FBG 传感器测温原理

2.1 FBG 敏感特性

光纤光栅制作方法主要有横向全息曝光法、相位掩模法、逐点写入法和在线写入法等^[21]。本文采用成本低、适合批量生产的相位掩模法,利用紫外准分子激光器作为写入光源,该方法制备的光纤光栅的折射率调制在大于 200 °C 高温环境才会逐渐退化,因此,完全满足锂离子电池内部温度监测低于 100 °C 范围的预警要求。

FBG 的反射光是由入射光在相位光栅不同位置反射的光产生相长干涉的结果,由耦合模理论可知,满足 FBG 特定反射条件的光的中心波长与有效折射率和光栅周期的关系^[22]为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为传感光纤纤芯的有效折射率; Λ 为空间相位光栅周期; λ_B 为 FBG 反射光的中心波长。 n_{eff} 和 Λ 等特征参数都会随着外部温度和应力等物理量的变化而变化,从而导致反射光的中心波长发生改变,通过检测中心波长的漂移量就可以实现对外部环境中各种相关参数的监测,这就是 FBG 传感器用于传感检测的基本原理^[23-24],如图 1 所示。

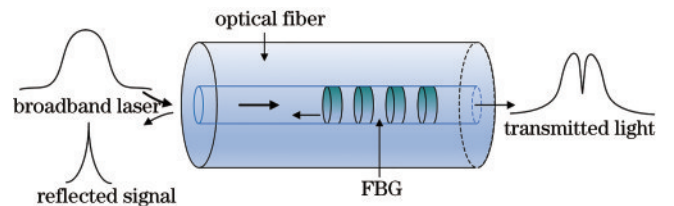


图 1 FBG 传感原理

Fig. 1 Sensing principle of FBG

当所处的环境温度发生变化时,FBG 中心波长会随温度发生漂移:

$$\Delta\lambda_{B1} = (\zeta + \alpha_f)(2n_{\text{eff}}\Lambda)\Delta T = (\zeta + \alpha_f)\Delta T\lambda_B, \quad (2)$$

式中, α_f 和 ζ 分别表示光纤的热膨胀系数和热光系数。如果光纤光栅的环境温度不变,则由应力引起的中心波长偏移为

$$\Delta\lambda_{B2} = (1 - P_e)(2n_{\text{eff}}\Lambda)\Delta\epsilon = (1 - P_e)\Delta\epsilon\lambda_B, \quad (3)$$

式中: $P_e = [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]/2$ 表示有效弹性光学

系数; μ 为泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为弹性光学系数; $\Delta\epsilon$ 为光纤光栅的应变变量。如果FBG同时受到环境温度和应力的影响,则中心波长的漂移量为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{FBG}} &= \Delta\lambda_{\text{B1}} + \Delta\lambda_{\text{B2}} = \\ & (\zeta + \alpha_f) \lambda_B \Delta T + (1 - P_e) \lambda_B \Delta\epsilon = \\ & K_{T\text{-FBG}} \Delta T + K_{\epsilon\text{-FBG}} \Delta\epsilon, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $K_{\epsilon\text{-FBG}}$ 为应变敏感系数; $K_{T\text{-FBG}}$ 为温度敏感系数。对于特定的光纤,这两个系数均为常数。

2.2 基于光纤F-P腔的交叉敏感消除原理

尽管植入式FBG温度传感器在18650锂离子电池内部的中心处,但锂离子电池在充放电时,局部仍然可能会产生应变导致FBG交叉敏感,本文在FBG附近设计一种微型气泡F-P腔,利用F-P空气腔对温度的变化不敏感特性^[25],求得同一测温点的应力变化,消除由应力引起FBG中心波长的漂移导致的测量误差,从而实现对FBG的温度补偿。

由两端单模光纤熔接而成的空气腔组成的F-P干涉仪,光纤端面与空气界面的反射率仅为4%,可以认为是低精细度F-P干涉仪,其基本结构如图2所示。

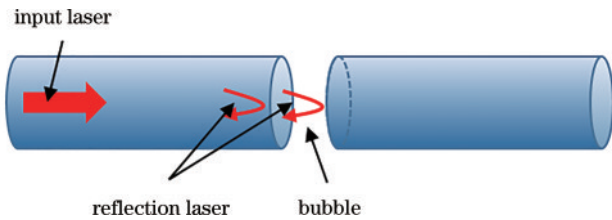


图2 光纤F-P空气腔结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of optical fiber F-P air chamber

干涉光谱中对于特定级次 m 的波谷波长为

$$\lambda_m = \frac{4nL}{2m+1}, \quad (5)$$

式中: n 为空气折射率; L 表示光纤F-P气泡腔的腔长; m 为干涉的次数。求波长 λ_m 对温度 T 的导数:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_m}{dT} &= \frac{4}{2m+1} \left(\frac{dn}{dT} \cdot L + \frac{dL}{dT} \cdot n \right) = \\ & \frac{\lambda_m}{nL} \left(\frac{dn}{dT} \cdot L + \frac{dL}{dT} \cdot n \right) = \\ & \lambda_m \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} + \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $n=1$; $\frac{dn}{dT}$ 为空气的折射率温度系数,也称为热光系数,近似等于 $-0.86 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; $\frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT}$ 为石英的热膨胀系数,等于 $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; 波长 λ_m 按1550 nm计算,则可求得式(6)为

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = -0.48 (\text{pm}/^\circ\text{C}). \quad (7)$$

因此,光纤F-P气泡腔的干涉光谱对温度具有不敏感性,波谷波长的变化可以看成只与应变有关,变化关系为

$$\Delta\lambda_m = K_{\text{FP}} \Delta\epsilon. \quad (8)$$

式(8)与式(4)联立方程组,其中系数 $K_{T\text{-FBG}}$ 、 $K_{\epsilon\text{-FBG}}$ 和 K_{FP} 均可认为已知,通过实测 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 和 $\Delta\lambda_m$,即可求得 ΔT 。

可见,当F-P空气腔与FBG制备在同一光纤上时,即可构成具有温度补偿的温度传感器,其反射光谱如图3所示,其中,较强的窄带峰为光栅的反射光谱,呈正弦变化的为光纤F-P气泡腔的干涉光谱,当电池充放电时,存在内部升温 and 可能的局部应变,光栅的反射光谱和干涉光谱均会发生漂移,利用干涉光谱的变化量消除FBG测温时存在的交叉敏感,对FBG实现温度补偿,减小由局部应变引起的温度测量误差。

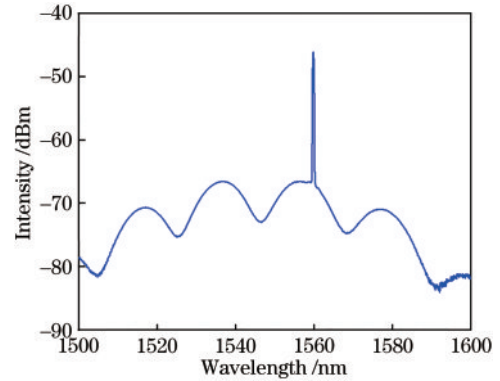


图3 FBG复合传感器的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectrum of FBG composite sensor

3 复合传感器的制备、植入和校准

3.1 传感器的制备

利用氢氟酸先熔接F-P空气腔后制备FBG的步骤如下:

1) 准备两段单模光纤(SMF)(型号:康宁SMF-28e,其中一端含有FC/APC接头),剥去长度约3 cm的涂敷层(便于后期FBG刻制),将光纤端面处理平整干净后,放入深度约为1 cm、体积浓度为40%的氢氟酸溶液中,腐蚀5 min;

2) 从氢氟酸溶液中取出,放入清水中清洗2 min,再用体积浓度为99%的酒精擦拭;

3) 按照图4的连接关系,将上述经过腐蚀的两段光纤放入光纤熔接机(OFFS:光贝F7)中;

4) 打开发光二极管(LED)宽带光源(3 dB带宽等于46.7 nm)和光谱仪(OSA:AQ6370B),设置光谱仪的测量参数,其中波长扫描带宽设置为200 nm,采用自动熔接方式放电熔接(默认强度为37),光纤外围包层在瞬间高温下融化黏接在一起,被腐蚀的光纤纤芯微凹点储存的微量气体在高温下膨胀挤压周围熔融石英形成微气泡,放大图像如图5所示。

5) 自动熔接完成后,注意观察F-P干涉光谱,也

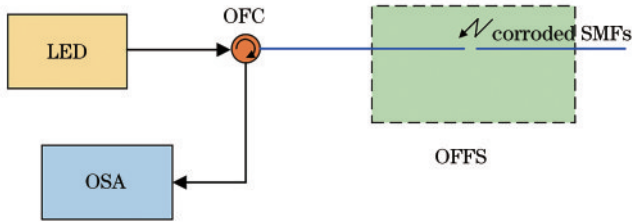


图 4 在线熔接 F-P 空气腔连接关系图

Fig. 4 Connection relationship of on-line fusion F-P air chamber
可以根据干涉条纹的数量与 F-P 腔长的关系微调气泡

的空气腔大小,利用手动熔接模式,调节左/右马达,对光纤的轴向施加拉力后放电,微调前后的干涉光谱如图 6 所示。在氢氟酸浓度、腐蚀时间、放电强度等制备工艺参数一致的前提下,自动熔接模式实现批量制作空气 F-P 腔更具有优势。

6) 利用相位掩模版法在 F-P 空气腔一侧(靠近 FC/APC 接头方向)刻制 FBG,其光栅周期 $\Lambda=0.5387 \mu\text{m}$,栅格数量 $m=18563$,中心波长 $\lambda_B=1558.99 \text{ nm}$,然后在光纤的包层外壁涂覆聚酰亚胺形成具有防腐的保护层。

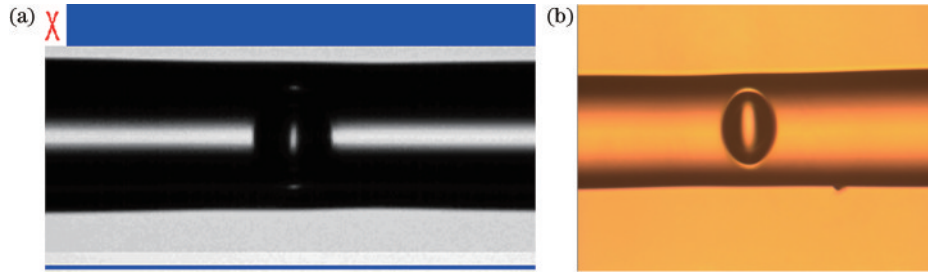


图 5 微小 F-P 空气腔放大后的细微图像。(a) 光纤熔接机保存图像;(b) CCD 显微镜图像

Fig. 5 Magnified fine images of tiny F-P air chamber. (a) Image saved by optical fiber fusion splicer; (b) CCD microscope image

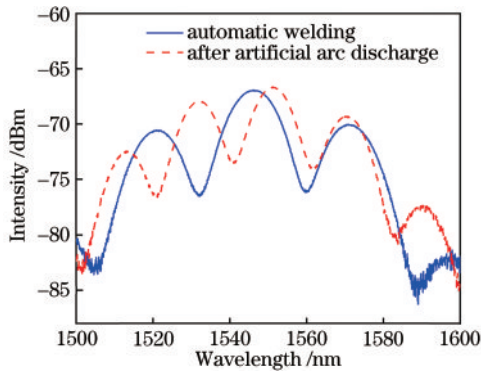


图 6 再次放电前后测试的 F-P 干涉光谱对比

Fig. 6 Comparison of F-P interference spectra before and after re-discharge

3.2 应力消除测试实验

考虑到电池内部温度变化范围小以及微小气泡 F-P 腔对温度不敏感性,只需求出在相同应变条件下气泡 F-P 腔干涉光谱变化量与 FBG 中心波长漂移量的线性关系,即通过式(4)和式(7)从 $\Delta\lambda_B$ 中减去 $\Delta\lambda_{B2}$ 消除应变对 FBG 中心波长的影响。基于空气 F-P 腔应变消除 FBG 交叉敏感的测试实验原理:将制备好的光纤传感器两端固定于两个三维光学高精度微动台上,只需调节其中一个微动台,另一个固定不动。在环境温度不变的条件下,复合传感器受相同应力时,空气泡在光纤轴向的长度改变会导致 F-P 干涉谱发生变化,同时 FBG 中心波长发生漂移,利用光谱仪观测两者的变化量。以步进为 $100 \mu\epsilon$ 调节三维微动台,最大测量范围为 $1000 \mu\epsilon$,重复以上实验步骤,利用线性拟合求出 FBG 与 F-P 腔的应变系数 $K_{\epsilon\text{-FBG}}$ 和 K_{FP} ,或 F-P

腔干涉光谱变化量 $\Delta\lambda_m$ 与 FBG 中心波长漂移量 $\Delta\lambda_{B2}$ 的线性关系。

将表 1 中的实验数据进行线性拟合,如图 7 所示,图中采用“●”符号和“■”符号分别表示 FBG 中心波长变化量和 F-P 腔干涉光谱漂移量的实验数据的线性拟合度均大于 99.8%,应变敏感系数之比 $K_{\epsilon\text{-FBG}}/K_{\text{FP}}=$

表 1 光谱实验数据

Table 1 Spectral experimental data

Dependent variable / $\mu\epsilon$	$\Delta\lambda_{B2} / \text{nm}$	$\Delta\lambda_m / \text{nm}$	Dependent variable / $\mu\epsilon$	$\Delta\lambda_{B2} / \text{nm}$	$\Delta\lambda_m / \text{nm}$
100	0.112	0.34	600	0.092	1.52
200	0.084	0.56	700	0.088	1.78
300	0.100	0.78	800	0.088	2.06
400	0.092	1.00	900	0.080	2.32
500	0.092	1.26	1000	0.080	2.52

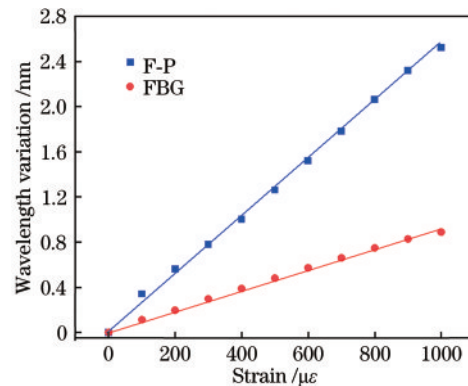


图 7 应力消除测试数据拟合

Fig. 7 Test data fitting for stress relieving

0.359, 可见两者之间的变化量存在较好的线性关系。由于植入式 F-P/FBG 复合传感器位于圆柱形 18650 型锂离子电池的胶状卷芯中, 在温度变化时产生的局部应变变量不会太大, 表 1 中的应变测量范围完全满足 FBG 的温度补偿要求。

3.3 传感器的植入及校准

文献[26]提出在锂离子电池制造过程中同步埋入具有聚酰亚胺涂覆层的 FBG 的实验方法, 分析了 FBG 在电解液浸泡后的存活状态特征, 利用光学显微镜下观察了涂覆聚酰亚胺的 FBG 传感器埋入前后的表面变化。实验表明, 受电解液侵蚀 48 h 后, FBG 传感器的反射光谱虽然没有受到影响, 但聚酰亚胺涂层仍有轻微损伤。因此, 本文为了最大程度降低电解液对 FBG 温度传感器的化学腐蚀, 采用后期植入 FBG 温度传感器的制备方法, 传感器植入位置示意图如

图 8(a) 所示, 位于圆柱锂离子电池卷芯的圆心, 传感器的边缘沿轴向距离负极为约 27 mm 处, 光纤光栅的敏感长度约为 10 mm, 基本处于轴向的中间位置, 植入后内部剖面效果图如图 8(b) 所示。

FBG 温度传感器后期植入法的步骤具体如下:

- 1) 使用小尺寸工具在电池负极金属面的圆心处开孔, 孔的直径约为 1 mm;
- 2) 将电池在常温环境下静置 24 h, 使得电池内外温度与常温一致;
- 3) 将涂覆层为聚酰亚胺的光纤传感器缓慢插入电池的卷芯处;
- 4) 使用紫外固化胶水封住负极的圆心小孔;
- 5) 监测 F-P 空气腔干涉光谱的变化, 判断内部卷芯对光纤传感器是否产生应力, 重新记录干涉光谱的波谷数据作为初始值, 即完成传感器的校准。

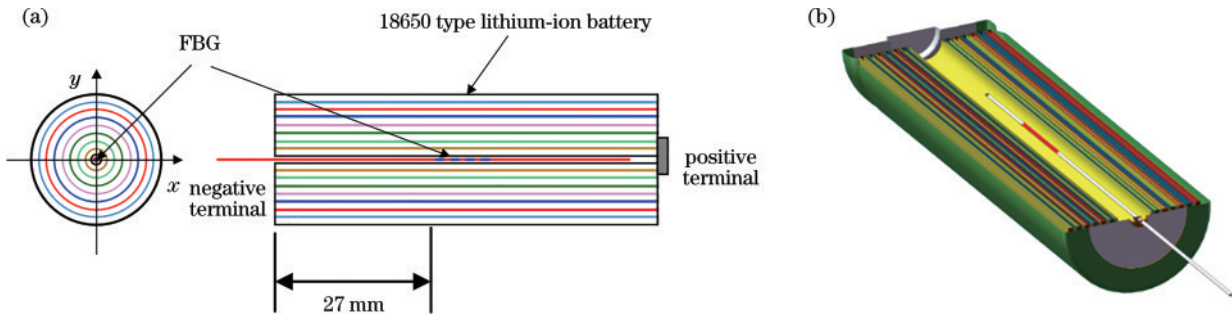


图 8 传感器植入单体锂离子电池的示意图。(a) 传感器植入位置;(b) 传感器植入后的三维效果图

Fig. 8 Schematic diagram of sensor implantation into single lithium-ion battery. (a) Implantation position of sensor; (b) three-dimensional view of sensor after implantation

4 实验系统构建

如图 9 所示, 实验系统由宽带扫描激光器(BCL)、光纤环形器(OFC)、传感信号解调器(SSD)、18650 型锂离子电池、数字电压表(DV)和充放电装置(CADD)组成。BCL 工作波长为 30 nm, 满足反射光谱监测要求。SSD 可以通过同步控制软件(SCS)控制 BCL, 并将测量的温度数据实时传输到计算机。DV (型号: UT61D+, UNI-T) 的采样频率为 1 Hz, 电压数据通过

通用串行总线(USB)串口发送到计算机。CADD 具有设定充放电电流值、充电饱和电压和放电截止电压的功能。实验中使用的 18650 电池容量为 1500 mAh, 放电截止电压为 2.75 V。

5 实验结果与分析

5.1 充电阶段的测试与分析

充电测试采用恒流恒压(CCCV)的工作方式, 即充电初期阶段采用恒流充电模式对锂离子电池进行充电, 当达到设置电压后转而控制电压不变而不断降低充电电流直到电流达到设置值, 充电电流分别为 1 A 和 2 A 的实验结果如图 10 所示。

1 A 充电实验的电池初始电压为 2.813 V, 在充电进行到 12 s 时, FBG 传感器监测到 0.1 °C 的升高, 在充电进行到 428 s 时, FBG 传感器监测到 1 °C 的升高, 在充电进行到 2395 s, 大约 40 min 时, 达到最高升温 4.0 °C, 一直保持到 2807 s, 这一时间阶段的锂离子电池电压从 4.056 V 变化到 4.103 V, 电压变化缓慢。随后的升温逐渐降低到 3.5 °C, 直到电压达到 4.2 V 时, FBG 传感器监测到的升温稍有波动, 波动范围为 0.1 °C。可见, 在整个 1 A 充电期间, 最高升温为 4.0 °C, 然后会随着电压升高缓慢, 温度逐渐地降低。

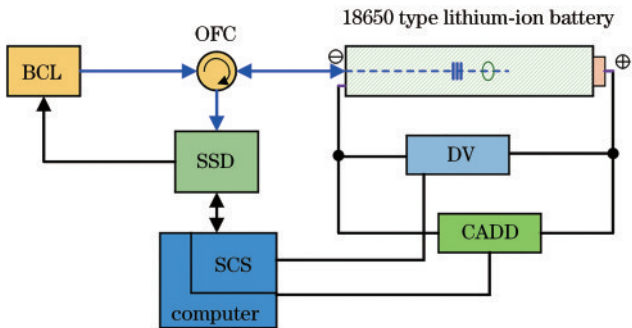


图 9 植入式传感器实验系统测试框图

Fig. 9 Test block diagram of implantable sensor experimental system

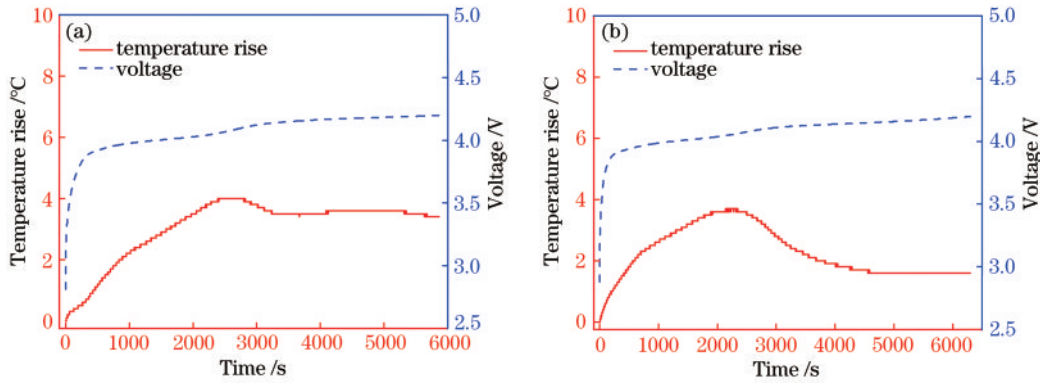


图 10 不同充电电流的温度和电压变化曲线。(a) 充电电流为 1 A 的测试曲线;(b) 充电电流为 2 A 的测试曲线
Fig. 10 Temperature and voltage variation curves under different charging currents. (a) Test curve with charging current of 1 A;

(b) test curve with charging current of 2 A

充电电流为 2 A 与充电电流为 1 A 的电压和温度变化趋势曲线相似。电池的初始电压为 2.88 V,在充电进行到 13 s 时,FBG 传感器监测到 0.1 °C 的温度升高,在充电进行到 193 s 时,FBG 传感器监测到 1 °C 的升高,在充电进行到 2143 s,大约 36 min 时,达到最高升温 3.7 °C,一直保持到 2348 s,这个时间阶段的电压从 4.047 V 变化到 4.062 V,当电池电压为 4.149 V 时,FBG 传感器监测到的升温减小到 1.6 °C,直到电压为 4.2 V 电池内部温度值保持不变。

5.2 放电阶段的测试与分析

放电实验与充电实验使用的是同一支电池,放电实验重点是分析埋入 FBG 温度传感器后放电时间是否满足电池容量的指标要求,验证植入式 FBG 温度传感器与锂离子电池内部电芯之间的相容性,电池在 1 C 放电倍率运行时的电流为 1500 mA。

放电倍率为 1 C 的电压和温度变化曲线如图 11(a) 所示,电池初始电压为 4.212 V,放电进行到 17 s 时,FBG 传感器监测到电池内部 0.1 °C 的升温。随后一直持续增加,一直到 3775 s 时,电压降到 2.763 V,电池内部升温为 11.5 °C。

放电倍率为 2 C 的电压和温度变化曲线如图 11(b) 所示,与放电电流为 1 C 的实验相比,温度上升更快,在放电进行到 463 s 时,FBG 传感器监测到电池内部 10 °C 的升温。在放电进行到 1818 s 时,电压降低到 2.754 V,此时电池内部温度达到 19.1 °C 的升温。

由 1 C 和 2 C 放电实验可知,在电池 4.2 V 电压状态下放电至 2.75 V 截止电压的时间分别为 3775 s 和 1818 s,均满足电池容量在 1 C 和 2 C 放电倍率下 3600 s 和 1800 s 的指标要求。实验表明,植入式 FBG 温度传感器与锂离子电池之间具有较好的相容性。

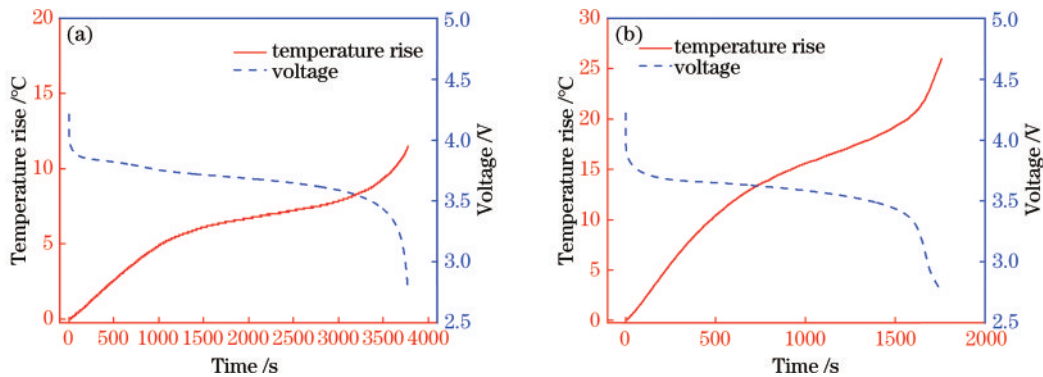


图 11 不同放电倍率的温度和电压变化曲线。(a) 放电倍率为 1 C 的测试曲线;(b) 放电倍率为 2 C 的测试曲线
Fig.11 Temperature and voltage variation curves under different discharge rates. (a) Test curve with discharge rate of 1 C; (b) test curve with discharge rate of 2 C

6 结 论

制作了一种用于圆柱体锂离子电池内部监测温度的植入式光纤传感器,采用后期钻孔埋入的方式,有效减少电解液对光纤涂覆层的化学腐蚀损伤,利用气泡 F-P 腔实现对 FBG 传感器的温度补偿,消除了温度与应力的交叉敏感性。与电学传感器相比,该传感器具

有更高的可靠性和抗电磁干扰能力,与锂离子电池之间具有较好的相容性,可以实时监测锂离子电池在不同操作阶段的电池卷芯中的温度变化。

参 考 文 献

- [1] 周炜航,叶青,叶蕾,等. 锂离子电池内温度场健康状态分布式光纤原位监测技术研究[J]. 中国激光, 2020,

- 47(12): 1204002.
- Zhou W H, Ye Q, Ye L, et al. Distributed optical fiber *in-situ* monitoring technology for a healthy temperature field in lithium ion batteries[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204002.
- [2] Ludwig S, Zilberman I, Oberbauer A, et al. Adaptive method for sensorless temperature estimation over the lifetime of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2022, 521: 230864.
- [3] Deshpande V M, Bhattacharya R, Subbarao K. Sensor placement with optimal precision for temperature estimation of battery systems[J]. IEEE Control Systems Letters, 2022, 6: 1082-1087.
- [4] Mutyala M S K, Zhao J Z, Li J Y, et al. *In-situ* temperature measurement in lithium ion battery by transferable flexible thin film thermocouples[J]. Journal of Power Sources, 2014, 260: 43-49.
- [5] Wang Q S, Ping P, Zhao X J, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2012, 208: 210-224.
- [6] Wang R L, Zhang H Z, Liu Q Y, et al. Operando monitoring of ion activities in aqueous batteries with plasmonic fiber-optic sensors[J]. Nature Communications, 2022, 13: 547.
- [7] Liu D Q, Shadik Z, Lin R Q, et al. Review of recent development of *in situ*/operando characterization techniques for lithium battery research[J]. Advanced Materials, 2019, 31(28): 1806620.
- [8] Martiny N, Rheinfeld A, Geder J, et al. Development of an all Kapton-based thin-film thermocouple matrix for *in situ* temperature measurement in a lithium ion pouch cell [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(10): 3377-3384.
- [9] Zhang G S, Cao L, Ge S H, et al. *In situ* measurement of radial temperature distributions in cylindrical Li-ion cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(10): A1499-A1507.
- [10] Chen S C, Wang Y Y, Wan C C. Thermal analysis of spirally wound lithium batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(4): A637-A648.
- [11] Shah K, Drake S J, Wetz D A, et al. An experimentally validated transient thermal model for cylindrical Li-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2014, 271: 262-268.
- [12] Zhang G S, Cao L, Ge S H, et al. Reaction temperature sensing (RTS)-based control for Li-ion battery safety[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18237.
- [13] Chalise D, Shah K, Halama T, et al. An experimentally validated method for temperature prediction during cyclic [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 122: 89-96.
- [14] Forgez C, Do D V, Friedrich G, et al. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9): 2961-2968.
- [15] Li Z, Zhang J B, Wu B, et al. Examining temporal and spatial variations of internal temperature in large-format laminated battery with embedded thermocouples[J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 536-553.
- [16] Peng J, Zhou X, Jia S H, et al. High precision strain monitoring for lithium ion batteries based on fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Power Sources, 2019, 433: 226692.
- [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, 410/411: 1-9.
- [18] 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.
- [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): 1394.
- [20] Fortier A, Tsao M, Williard N, 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.
- [21] 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306002.
- Chen Z Y, He J, Xu X Z, et al. High-temperature sensor array based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser point-by-point method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306002.
- [22] 童杏林, 何为, 张翠, 等. 光纤光栅与光纤法珀传感器在航空航天领域的研究与应用进展[J]. 激光杂志, 2018, 39(7): 1-7.
- Tong X L, He W, Zhang C, et al. Research and application progress of fiber Bragg grating and Fabry-Perot sensors in the field of aeronautics and astronautics [J]. Laser Journal, 2018, 39(7): 1-7.
- [23] Zhang X Z, Sun F, Jiang J F, et al. High-precision FBG demodulation using amplitude ratio curve with sharp peak [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47: 7-14.
- [24] 何为, 张翠, 童杏林, 等. 用于轴瓦温度监测的无线耦合光纤布拉格光栅传感器[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0906008.
- He W, Zhang C, Tong X L, et al. Wirelessly coupled fiber-Bragg-grating sensor for bushing-temperature monitoring[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0906008.
- [25] Li E B, Peng G D, Ding X. High spatial resolution fiber-optic Fizeau interferometric strain sensor based on an in-fiber spherical microcavity[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(10): 101117.
- [26] 褚维达, 童杏林, 冒燕, 等. 锂离子电池内部植入光纤光栅传感器存活实验研究[J]. 激光杂志, 2021, 42(8): 19-22.
- Chu W D, Tong X L, Mao Y, et al. Experimental study on survival of fiber Bragg grating sensor implanted in lithium ion battery[J]. Laser Journal, 2021, 42(8): 19-22.