

镀金光纤布拉格光栅传感器用于锂离子电池原位检测的可行性

刘延超¹, 方进¹, 徐翀², 魏斌², 官亦标², 范茂松², 闫旭锋¹, 高超²

¹北京交通大学电气工程学院, 北京 100044;

²中国电力科学研究院储能与电工新技术研究所, 北京 100192

摘要 提出了一种在锂离子电池制作过程中粘贴镀金光纤布拉格光栅(FBG)传感器的锂离子电池原位检测方法, 该方法可用于采集锂离子电池的初始物理量。研究了将镀金 FBG 传感器埋入锂离子电池的位置及方法, 分析了埋入镀金 FBG 传感器后电池的性能。对锂离子电池进行了充放电实验, 并拆封了实验所用的电池样本。实验结果表明, 镀金 FBG 传感器可用于一般环境下的温度采集; 锂离子电池中 FBG 传感器的镀金层遭到腐蚀, 导致 FBG 传感器的波长产生漂移, 镀金层避免了裸 FBG 传感器的结构受到破坏, 因此对 FBG 传感器重新标定后, 可采集电池内部的温度。该研究为应用于锂离子电池原位检测的 FBG 传感器的选择提供了参考。

关键词 光纤光学; 锂离子电池; 原位检测技术; 光纤布拉格光栅传感器; 传感器标定; 充放电实验

中图分类号 TM930.12; TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.040602

Feasibility of Gold-Plated Fiber Bragg Grating Sensors Used in Lithium Ion Battery *in-Situ* Detection

Liu Yanchao¹, Fang Jin¹, Xu Chong², Wei Bin², Guan Yibiao²,
Fan Maosong², Yan Xufeng¹, Gao Chao²

¹ School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

² Energy Storage and Electrotechnics Department, China Electric Power Research Institute, Institute of Energy Storage and Electrical Engineering New Technology, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Abstract A method of lithium ion battery *in-situ* detection is proposed. In the proposed method, gold-plated fiber Bragg grating(FBG) sensors are embedded in the making process of lithium ion batteries to acquire the initial physical quantities of lithium ion batteries. The position and the method for the FBG sensor embedded in lithium ion battery are studied, and the performance of battery embedded with gold-plated FBG sensor is analyzed. The charge-discharge experiments for lithium ion batteries are carried out, and the battery samples used in experiments are unpacked. The experimental results show that gold-plated FBG sensors can be used in the temperature collection in general environment. The gold-plated layer structure in the lithium ion battery is corroded, which results in wavelength drift. The bare FBG's structure is not destroyed due to the presence of the gold-plated layer, so the internal temperature of battery can be collected after re-calibrating FBG sensor. This research provides a reference for the FBG sensor used in *in-situ* detection for lithium ion batteries.

Key words fiber optics; lithium ion battery; *in-situ* detection technology; fiber Bragg grating sensor; sensor calibration; charge-discharge experiments

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 060.2330

收稿日期: 2016-09-13; 收到修改稿日期: 2016-12-03

基金项目: 国网公司科技项目(DG71-15-038)

作者简介: 刘延超(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事多功能光纤传感器应用方面的研究。E-mail: 14121433@bjtu.edu.cn

导师简介: 方进(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感测量、超导技术、电网储能变流技术方面的研究。E-mail: fangseer@sina.com

1 引言

锂离子电池使用过程中的安全问题一直是研究人员关注的焦点^[1],现有的电池监控手段只能对电池的电压、温度等外特性参数进行监测。电池内部存在复杂的反应和性能衰退机制,根据外特性参数很难直接得到电池的安全状态及其所处的寿命阶段,且无法对电池寿命周期内使用的全过程进行跟踪诊断,更无法对电池进行安全预警^[2]。因此,根据基于电池本征的电化学特性来研究电池原位检测技术越发重要。

电池原位检测是指在不破坏、不扰动或少扰动电池原有状态的情况下,在电池原始安装位置处通过检测传感器等手段测定特定的指标参数,进而准确分析和判断电池的实时性能和状态^[3]。检测传感器是电池原位检测系统的重要组成部分,针对储能电池内部的特殊化学物质及工作环境,检测传感器必须满足以下条件:1) 尽量避免对电池产生电磁干扰;2) 传感器材料具有耐腐蚀性;3) 体积小,电绝缘性能好。作为一种光纤传感器件,光纤布拉格光栅(FBG)波长的变化与外界物理量(如温度、应力等)的变化成比例,常用于对温度、应力等物理参数的测量^[4]。FBG具有易弯曲、耐腐蚀、耐高温、安全性高、易串接复用、对宿主材料结构性能影响小等特点,广泛应用于土木工程、石油化工、航空航天等工程领域^[5-6]。此外,FBG还具有抗电磁干扰和体积小等优势^[7],在锂离子电池原位检测中有广阔的应用前景。

本文提出了一种在锂离子电池制作过程中埋入镀金 FBG 传感器的锂离子电池原位检测方法,实现了对锂离子电池初始物理量的采集,给出了实验中采用的样品及器材,探索了将 FBG 传感器埋入锂离子电池的位置及方法,分析了埋入 FBG 传感器后电池的性能。本文研究对象是层叠式锂离子电池内部的温度参量,并对锂离子电池进行了充放电及拆封实验。

2 实验系统与样品试制

2.1 实验系统及器材

所涉及的实验系统主要有 FBG 标定系统及锂离子电池原位检测系统。图 1 为 FBG 标定系统实物连接图,FBG 标定系统主要用于 FBG 传感器的标定。锂离子电池原位检测系统由 FBG 传感系统及锂离子电池充放电系统构成。如图 1 所示,实验系统主要由解调仪(SM125)、温度监控器(218S)、主机(PC)、高低温箱和电池充放电测试仪构成。解调仪用于解调 FBG 波长;温度监控器配合铂电阻(PT100)使用,用于采集标定环境的温度^[8];主机用于采集、计算并显示温度与波长数据;高低温箱用于提供标定实验与温度对比实验所需的环境温度;电池充放电测试仪用于对锂离子电池进行充放电。

2.2 传感器试制

FBG 传感器的选择主要考虑以下两个因素:1) 锂离子电池电解液的主要成分是六氟磷酸锂,是一种具

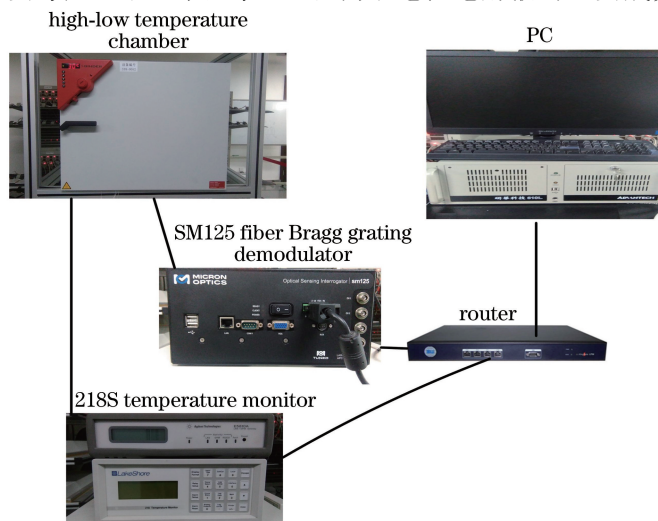


图 1 FBG 标定系统实物连接图

Fig. 1 Physical connection diagram of FBG calibration system

有腐蚀性的强酸^[9],因此 FBG 传感器的涂覆或封装材料必须具有很好的耐腐蚀性;2)把 FBG 传感器的传感部分粘贴到层叠式锂离子电池内部,粘贴完成后需要对电池进行封装,为了不影响电池封装后的性能,传感器的尺寸是需要考虑的一个重要因素。基于以上分析,向 FBG 传感器制作厂家提出了试制要求,厂家提供了直接在光栅区镀金的 FBG 传感器,如图 2 所示。

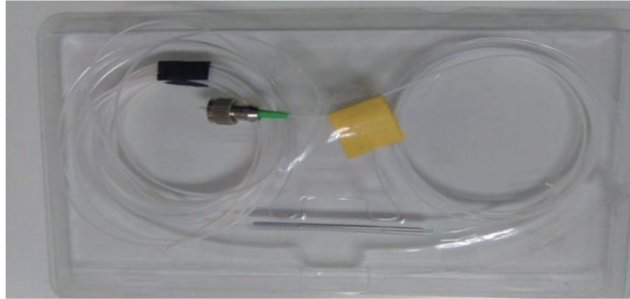


图 2 光栅区镀金的 FBG 传感器

Fig. 2 FBG sensor with gold-plated grating area

为了测试试制的 FBG 传感器在室温下是否能够很好地进行测量,将标定过的试制 FBG 传感器和经过标定的铂电阻同时放入高低温箱中,同时测量它们的温度。图 3 为实验采集到的温度-时间变化曲线。由图 3 可知,试制的 FBG 传感器与铂电阻的温度-时间变化曲线基本一致,可见试制的 FBG 传感器可以很好地用于室温下的测量。

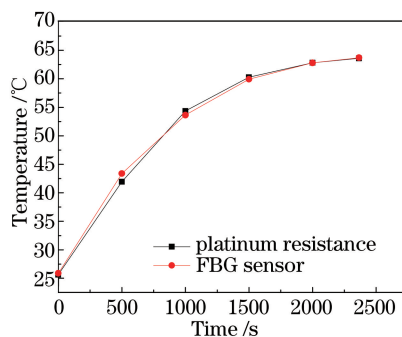


图 3 FBG 传感器与铂电阻的温度-时间变化曲线

Fig. 3 Temperature-time curves of FBG sensor and platinum resistance

3 传感器的埋入与性能分析

3.1 传感器的埋入

在层叠式锂离子电池的制作过程中,将试制的 FBG 传感器埋入锂离子电池内部,埋入位置及方式是实验的关键。锂离子电池主要由正极片、负极片、电解液及向外引出的极耳构成^[10]。图 4 为锂离子电池制作过程中未进行封装的层叠式锂离子电池的局部结构示意图,电池正、负极片的材料不同,且错位交叉层叠在一起,正极片与负极片之间由薄膜隔开,电池的正、负极片为对称结构^[11],此处只给出正极片的局部结构。图 4 中电池向外引出的正极耳是通过高温设备焊接在正极片上的,焊接过程中会在正、负极片上产生焊点,焊点为电池工作时内部最易发热的部分,因此测量焊点处的温度具有重要的实际意义。在电池制作过程中,把 FBG 传感器的传感栅区粘贴在正、负极片焊点上。为了不影响电池的性能,直接用小部分高温胶带对 FBG 传感器进行粘贴固定;为了便于测量,粘贴 FBG 传感器时应使传感器的传输光纤方向与电池极耳方向相反,FBG 传感器的具体埋入位置实物图如图 5 所示。将 FBG 传感器粘贴完毕后,对电池进行封装,得到粘贴有 FBG 传感器的待测锂离子电池,实物图如图 6 所示。

3.2 埋入电池后传感器的性能分析

锂离子电池的封装是一个复杂的过程,为了验证埋入锂离子电池内的 FBG 传感器是否依然可以正常进行

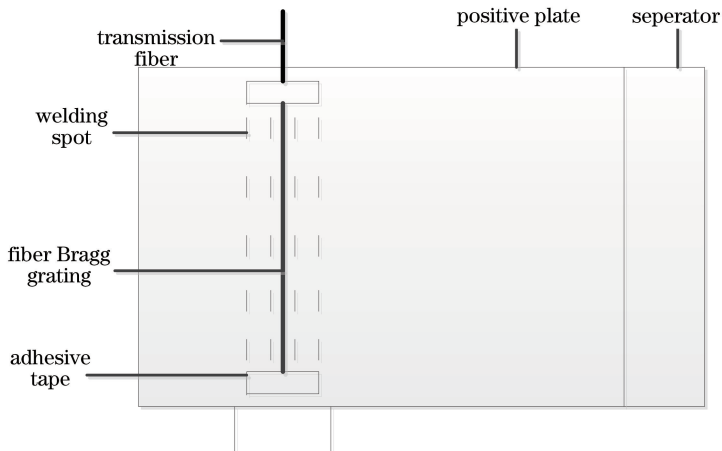


图 4 未进行封装的层叠式锂离子电池的局部结构示意图

Fig. 4 Local structural diagram of unencapsulated cascading lithium ion battery

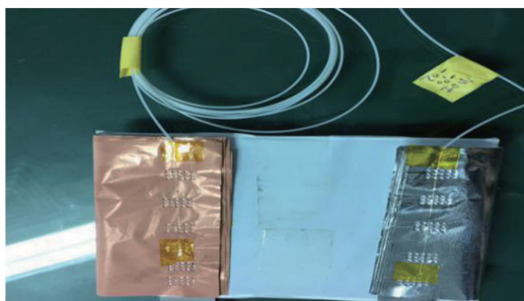


图 5 传感器的埋入位置实物图

Fig. 5 Physical picture of embedded position of sensor

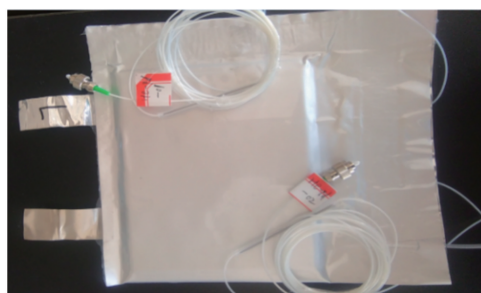


图 6 埋入传感器的锂离子电池实物图

Fig. 6 Physical picture of lithium ion battery embedded with sensor

温度测量,再次进行第 2.2 节中的温度对比实验,对比待测电池中 FBG 传感器与铂电阻的温度-时间变化曲线,实验结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,待测电池内的 FBG 传感器与铂电阻的温度-时间变化曲线相差很大,FBG 传感器的温度数值不再准确,表明锂离子电池的封装过程对 FBG 传感器的性能产生了影响。

为了解决 FBG 传感器埋入电池后温度采集不准确的问题,尝试在待测电池内部重新标定 FBG 传感器,再对重新标定后的 FBG 传感器与铂电阻进行温度对比实验,验证重新标定后电池内的 FBG 传感器是否可以正常使用。将待测电池与铂电阻同时放入高低温箱中,并对 FBG 传感器进行重新标定,得到如图 8 所示的标定曲线。由图 8 可以看出,重新标定后的 FBG 传感器的温度和波长的变化具有非常好的线性度,证明电池封装过程并未破坏 FBG 传感器的光栅结构。

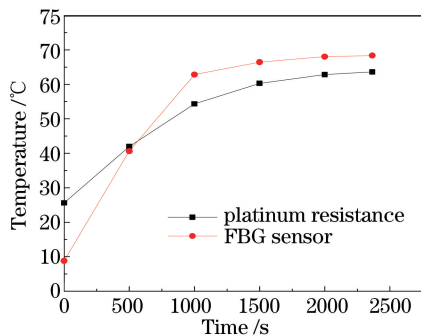


图 7 电池内 FBG 传感器与铂电阻的温度-时间变化曲线
Fig. 7 Temperature-time curves of FBG sensor embedded in battery and platinum resistance

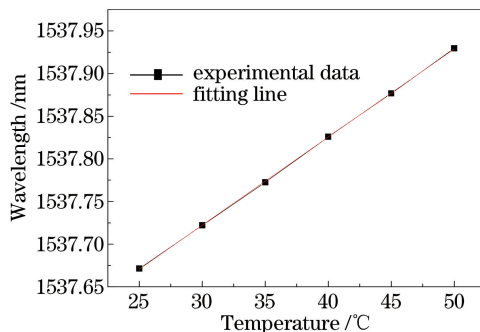


图 8 重新标定后的 FBG 传感器的温度-波长拟合曲线
Fig. 8 Temperature-wavelength fitting curve of re-calibrated FBG sensor

将重新标定后的 FBG 传感器与铂电阻放入高低温箱中,再次进行温度对比实验,得到如图 9 所示的温度-时间变化曲线。由图 9 可以看出,重新标定后的 FBG 传感器和铂电阻的温度-时间曲线的变化趋势基本一致,两个曲线不重合的原因是电池封皮隔热使电池内部温升滞后于外部温升,可见 FBG 传感器在电池内重新标定后可以正常使用。

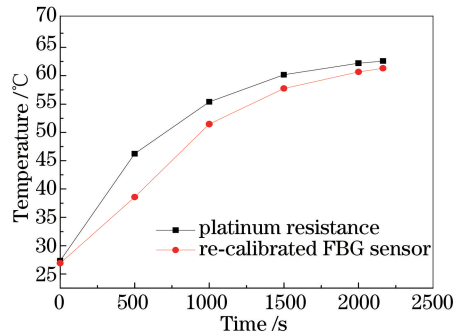


图 9 重新标定的 FBG 传感器与铂电阻的温度-时间变化曲线

Fig. 9 Temperature-time curves of re-calibrated FBG sensor and platinum resistance

4 光纤在锂离子电池中的检测实验及分析

4.1 锂离子电池充放电实验

对锂离子电池进行充放电实验是研究其性能和安全性基础^[12]。设计了两种基于锂离子电池充放电的实验方案来验证基于 FBG 传感器的锂离子电池原位检测技术的可行性。方案 1 的实施过程为:在内部粘贴有 FBG 传感器的锂离子电池外部的对应位置粘贴一个经过标定的相同类型的光纤温度传感器,对电池进行循环充放电实验,采集充放电过程中电池内、外部的温度数据,观察内、外部的温度变化是否一致;方案 2 的实施过程为:直接对内部粘贴有传感器的锂离子电池进行循环充放电实验,采集充放电过程中正、负极耳的温度数据,观察正、负极耳的温度变化趋势。两种方案中电池循环充放电的实验周期为 11,选取了充放电实验中 4 个周期的温度数据进行研究,得到如图 10、11 所示的结果。为了验证实验数据的可靠性,在相同条件下对方案 1、2 均进行多次重复实验,由于多次实验所得的结果基本一致,因此这里只给出了其中一次实验的结果。

由图 10 可以看出,在充放电过程中,电池内部与外部的温度均随充放电电压呈周期性变化,电池内、外温度的变化趋势基本一致,电池的外部温度低于内部温度,且外部温度的变化稍微滞后于内部温度的变化,这是由于电池的封皮具有隔热作用。以上数据证明了基于 FBG 传感器的储能电池原位检测技术具有可行性。

由图 11 可以看出,电池正、负极耳的温度均随电池充放电电压的变化呈现周期性变化,变化趋势稳定,且负极耳的温度变化滞后于正极耳的温度变化,证明了基于 FBG 传感器的储能电池原位检测技术具有可行性。

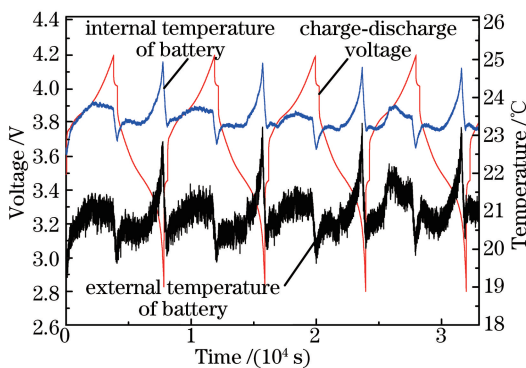


图 10 电池内、外部温度随充放电电压的变化

Fig. 10 Variations in temperatures inside and outside battery with charge-discharge voltage

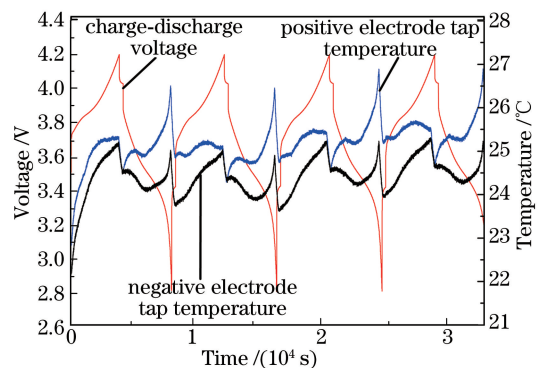


图 11 电池正、负极耳的温度随充放电电压的变化

Fig. 11 Variations in temperatures of positive and negative pole ear's of battery with charge-discharge voltage

4.2 锂离子电池的拆封

为了分析镀金 FBG 传感器埋入电池后波长产生漂移的原因,将实验中采用的电池样品进行拆封,取出埋入的镀金 FBG 传感器并观察其结构变化。图 12 为显微镜下观察到的实验所用的镀金 FBG 传感器的结构图。

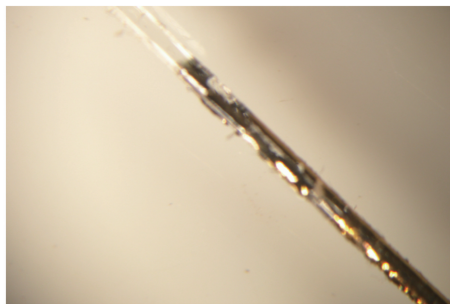


图 12 显微镜下观察到的镀金 FBG 传感器

Fig. 12 Gold-plated FBG sensor observed with microscope

由图 12 可以看出,FBG 传感器的镀金层遭到了电池电解液的腐蚀破坏,除镀金层外,FBG 传感器的光栅等其他结构并没有遭到破坏,这便是 FBG 传感器埋入电池后波长产生了漂移、但经重新标定后还可以正常使用的原因。

5 结 论

提出了一种基于镀金 FBG 传感器的锂离子电池原位检测方法,介绍了 FBG 传感器的标定方法,探索了在锂离子电池中粘贴 FBG 传感器的位置及方法。实验结果表明,根据实际应用需求试制的镀金 FBG 传感器可在正常环境下使用;FBG 传感器埋入电池后,中心波长产生一定的漂移,导致温度测量不准确,但在电池内部重新标定 FBG 传感器后仍可以正常使用;通过拆除电池样本,发现 FBG 传感器的镀金层遭到电解液的腐蚀破坏,而 FBG 传感器的光栅等其他结构未受到破坏,因此镀金层可对裸 FBG 传感器起到一定的保护作用,镀金 FBG 传感器可以短期应用于锂离子电池原位检测中。上述研究结果为应用于锂离子电池原位检测的 FBG 传感器的选择提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Zhang Chuanxi. Research progress in safety characteristics of high power lithium-ion batteries[J]. Marine Electric and Electronic Engineering, 2009, 29(4): 52-53.
张传喜. 锂离子动力电池安全性研究进展[J]. 船电技术, 2009, 29(4): 52-53.
- [2] Wang Tingting. Development and application of multifactorial aging model for lithium-ion battery[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 2-4.
王婷婷. 锂离子电池多因素老化模型的建立和应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 2-4.
- [3] Xu Zhanxian, Li Peichun. In-situ testing technology[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(5): 203-204.
许占显, 李佩春. 原位检测技术[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 203-204.
- [4] Zhang Xuhui, Wang Lutang, Fang Nian. Study on power frequency electric-field measurements based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020603.
张旭辉, 王陆唐, 方 捻. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020603.
- [5] Chen Yong, Yang Kai, Liu Huanlin. A self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805008.
陈 勇, 杨 凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805008.
- [6] Wang Qiaoni, Yang Yuanhong, He Jun, *et al.* Study of fiber Bragg grating regeneration process and regeneration model[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0306001.
王巧妮, 杨远洪, 何 俊, 等. 光纤布拉格光栅再生过程及模型研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0306001.
- [7] Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor

- [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805005.
- 田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.
- [8] Gao Xingjun. Study on application of optical fiber sensing technology in high-temperature superconducting cables[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 12-13.
- 高兴军. 光纤传感技术在高温超导电缆中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 12-13.
- [9] Zhao Weijuan, Xu Weiguo, Qi Hai, *et al.* Research progress in electrolyte of lithium ion battery for two times[J]. Organic Fluorine Industry, 2013, 22(1): 16-17.
- 赵卫娟, 徐卫国, 齐海, 等. 锂离子二次电池电解质研究进展[J]. 有机氟工业, 2013, 22(1): 16-17.
- [10] Lai Yanqing, Li Xiangyuan, Li Jing, *et al.* Research of Li-ion battery technology with LiFePO₄ as cathode material[J]. Chinese Battery Industry, 2008, 13(3): 147-151.
- 赖延清, 李祥元, 李晶, 等. LiFePO₄ 锂离子电池的制备工艺研究[J]. 电池工艺, 2008, 13(3): 147-151.
- [11] Tang Zhiyuan, Ruan Yanli. Progress in capacity fade mechanism of lithium ion battery[J]. Progress in Chemistry, 2005, 17(1): 2-3.
- 唐致远, 阮艳莉. 锂离子电池容量衰减机理的研究进展[J]. 化学进展, 2005, 17(1): 2-3.
- [12] Li Jia, Zhang Jian, Zhang Xigui, *et al.* Study on the performance of lithium ion battery after storage[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(7): 553-554.
- 李佳, 张建, 张熙贵, 等. 储存后锂离子电池的性能研究[J]. 电源技术, 2009, 33(7): 553-554.