

双层管式微型光纤光栅传感器封装技术

张锦龙¹, 员琳¹, 韩笑笑¹, 张峰², 樊琳琳²

(1. 河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475000; 2. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要:为满足厦门鹭岛柔直换流站示范工程中换流阀绝缘栅双极型晶体管(IGBT)结温监测系统对光纤光栅传感器的需求,设计了双层管式微型光纤布喇格光栅(FBG)传感器。采用点胶式和灌胶与点胶结合式2种封装方法,实现了直径为1.2mm圆柱形极小尺寸封装,通过搭建实验平台对其进行温度特性标定和重复性测试。实验结果表明:封装后的光纤光栅温度特性良好,二次拟合优度均达到0.999以上,并且均具有很好的重复性;其尺寸和性能完全满足工程现场参数要求,适用于对传感器结构参数和兼容性要求较高的场合。

关键词:光纤光栅;温度传感器;微型双端封装;双层管式

中图分类号: TN915.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)06-0005-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Packaging technology of double-layer tube micro fiber Bragg grating sensor

ZHANG Jinlong¹, YUN Lin¹, HAN Xiaoxiao¹, ZHANG feng², FAN Linlin²

(1. College of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng Henan 475000, China;

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to meet the demand of fiber grating sensor for the converter valve insulated gate bipolar transistor (IGBT) junction temperature monitoring system in the demonstration project of Xiamen Ludao Soft Converter Station, a double-tube micro-fiber Bragg grating (FBG) sensor was designed. Two packaging methods, dispensing and glue-filling combined, were used to realize the cylindrical mini-size package with a diameter of 1.2mm. An experimental platform was built to calibrate its temperature characteristics and test its repeatability. The experimental results show that the temperature characteristics of the packaged fiber grating are good, and the goodness of quadratic fitting is above 0.999, and both have good repeatability. The size and performance of FBG can fully meet the requirements of engineering site parameters, and the double-layer tube micro-fiber FBG sensor suitable for occasions where the sensor structure parameters and compatibility requirements are high.

Key words: fiber Bragg grating; temperature sensor; miniature double-end packaging; double-layer tube

0 引言

柔性直流输电换流阀绝缘栅双极型晶体管(IGBT)是电力系统中的关键设备^[1]。换流阀一旦出现故

障,将导致整个输电系统瘫痪,甚至会发生更大的安全事故^[2]。因此,换流阀的安全运行极其重要。由于IGBT功率模块处于内部电流频繁大规模波动的工作环境,长时间维持大电流工作易导致其内部高温损坏失效。为评估IGBT模块的可靠性并及时调整其工作状态,需要对IGBT模块的温度进行实时监测,这对分析IGBT功率模块的工作寿命以及提高电网工作的可靠性有着极其重要的意义^[3-5]。

由于电力系统中热电偶传感器易失效^[6],本文采用光纤光栅温度传感器对IGBT结温进行实时监测。根据工程需求,将传感器埋设部位设定于螺母外侧深度为1.2mm的槽孔,采用直径不大于1.2mm、长度为

收稿日期:2019-01-24。

基金项目:国家自然科学基金(61675063)资助;河南省科技攻关计划(162102210021)资助;横向项目“柔性直流输电换流阀在线监测以及可靠性提升技术”资助。

作者简介:张锦龙(1977-),男,博士,副教授。河南大学研究生导师,北京邮电大学兼职研究生导师,“光信息传感与智能控制”校重点实验室负责人。主要从事光通信和光传感技术的研究。目前有多项涉及光纤光栅传感器技术、柔性直流高压输电技术等交叉学科的国家基金项目、省部级项目和横向课题在研。



10mm 左右的光纤光栅传感器进行嵌入式安装及布线。传统的双端出纤光纤光栅传感器直径至少为 3mm, 难以满足换流阀中的安装需求, 且工程设定的测量点达数千, 而单端出纤针式传感器只能通过光分路器来完成多点信息的同时采集, 但光分路器插入损耗大、信号提取困难且占据大量测试通道, 线路过于复杂。

因此, 本文将光纤布喇格光栅 (FBG) 施与预应力后, 由外径分别为 0.8mm 和 1.2mm 的毛细钢管封装成双端出纤的微型传感器, 使多个测量点集中在一条线路上, 从而压缩测量通道、简化测试线路; 在采用双层套管封装技术使传感器能精确测量温度的同时, 也不受外力的影响, 并通过实验室搭建平台对传感器的温度特性进行测试, 采用二次多项式拟合以提升测温精度。

1 结构与封装技术

本文选取热胀冷缩系数较大、拉伸压缩性能较好的 304 毛细钢管以及 DG-3S 环氧树脂胶进行封装, DG-3S 剪切强度为 19.61~25.49Mpa, 剥离强度大于 39.2N/cm, 耐温区间为 -60℃~150℃, 满足工程要求。为消除光纤光栅对温度和应力的交叉敏感, 采用双层金属结构对光纤光栅传感器进行封装。当温度变化时, 双金属结构中内管膨胀拉动光栅形变, 外管对外界应力进行缓冲和吸收, 隔绝应力对传感器的影响, 实现温度的精准测量。

封装结构模型如图 1 所示。当有外力作用时, 光纤形变区间为 L_2-L_1 , 外力不会进入封装好的内管中。

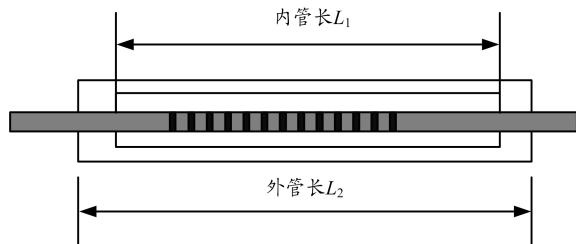


图1 封装结构模型

外界温度的变化使物体出现膨胀或收缩, 当这种膨胀或收缩被约束时, 物体内部就会产生应力, 称为热应力或温度应力^[9]。它分为 3 种情形: 由温度分布不均产生的热应力、压缩热应力和膨胀系数不同造成的热应力^[10]。对于 IGBT 系统中的传感器而言, 热应力表现形式及解决方案如下:

①裸光栅栅区长度与测温区域不匹配, 栅区的不

同部分由于温度分布不均, 内部的每一部分受到相邻部分温度分布的影响不能自由变形从而产生热应力。因此, 结合测量部位, 本文所选光栅长度为 10mm, 避免反射谱展宽, 保障温度可靠性。

②由于传感器需安装在螺母上刻好的槽内, 当传感器受到外部螺母的约束不能自由变形时, 产生压缩热应力。因此选择双层金属管封装, 保护内部已封装好的光纤光栅不受压缩热应力影响, 同时也保护内部结构不受外部应力影响。

1.1 封装结构设计

本文设计了点胶式封装和灌胶与点胶结合封装 2 种封装方式, 其结构如图 2 所示。

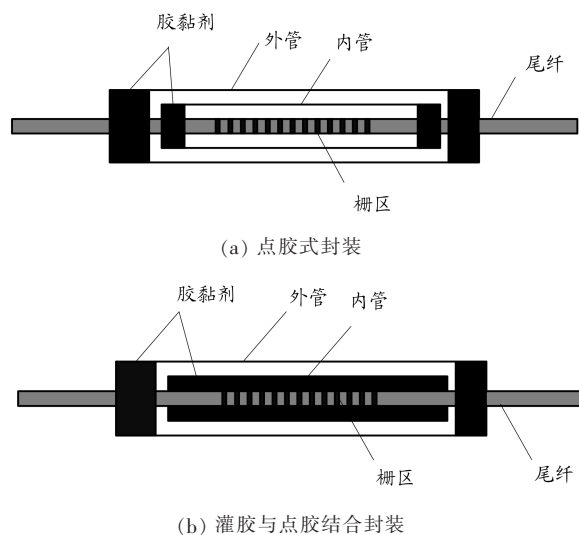


图2 2种封装结构示意图

2 种封装结构均由内外 2 个部分构成, 内部由外径为 0.8mm、内径为 0.6mm 毛细钢管封装的光纤光栅; 外部由外径为 1.2mm、内径为 1.0mm 毛细钢管再次封装。2 层套管均采用胶黏剂与光纤粘连固定, 2 层套管不固定在一起, 保证其内管悬空不受外力。

由于环氧树脂胶在 60℃ 固化需要 4h, 因此本文采取夹具固化的方式进行封装, 夹具结构如图 3 所示。其中, 内侧可调夹具起预拉伸固定的作用; 外侧载纤

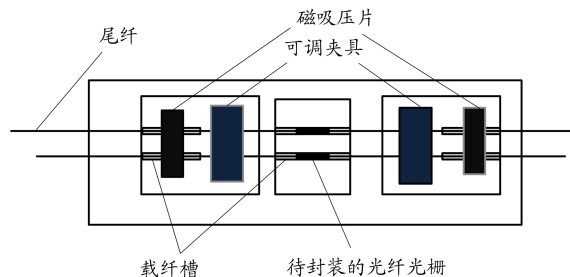


图3 夹具结构示意图

槽上磁吸压片为 TFN 韩国一诺光纤熔接机三合一夹具 FH-40 光纤压板, 起准直固定作用。待封装的光纤光栅及套管左右两侧均有载纤槽, 从而将光纤光栅抬高, 使光纤光栅位于套管中央悬空, 不受外力影响。

1.2 封装技术

◆点胶式封装: 首先将光栅穿过外径为 0.8mm 毛细钢管, 两端预拉伸固定在夹具上; 然后将环氧树脂 A、B 胶按 2:1 的比例混合均匀, 用注胶针管将混合均匀无气泡的环氧树脂胶抽出, 缓慢点在毛细钢管内部约 1~2mm 深处; 60℃加热固化 4h 后, 套入 1.2mm 毛细钢管。在此毛细钢管与光纤连接处点胶, 保证其不与内管粘连, 将其放于夹具上, 60℃加热固化 4h 后取出进行性能测试。

◆灌胶与点胶结合封装: 将光栅穿过外径为 0.8mm 毛细钢管, 用注胶针管将混合均匀无气泡的环氧树脂胶抽出缓慢灌入毛细钢管内部直至溢出, 光栅两端预拉伸固定在夹具上, 60℃加热固化 4h 后取出, 套入 1.2mm 毛细钢管。在此毛细钢管与光纤光栅连接处点胶, 将光纤光栅放于夹具上, 60℃加热固化 4h 后取出。

2 传感器性能测试与分析

本文采用放大自发辐射(ASE)宽带光源、三端口环形器、3dB 耦合器、XMTD203 水浴箱和 AQ6370 光谱分析仪搭建测试系统, 对制备完成的传感器进行测试。测试光路图如图 4 所示。

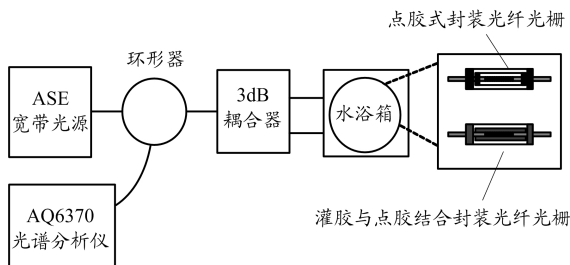


图 4 测试光路图

ASE 宽带光源的波长范围为 1525~1565nm, 光功率长期稳定性为 0.0115(8h), 光功率短期稳定性 0.0039(15min)。三端口环形器波长范围为 1520~1580nm, 隔离度 ≥ 45 dB, 插入损耗 ≤ 0.75 dB。AQ6370 光谱分析仪是对光信号进行高精度扫描的设备, 能够准确地对光信号的功率在各波长上的分布情况进行扫描, 测量精度为 0.01nm, 波长分辨率达 0.02nm, 0.2s(100nm 跨度)快速测量。XMTD203 水浴箱在 0℃~100℃的范围内提供稳定的温度环境, 温度分布均匀且

波动小、感温快, 精度为 0.01℃。

由图 4 可知, 宽带光从 ASE 宽带光源发出后, 经环形器后由耦合器分别入射到点胶式封装光纤光栅和灌胶与点胶结合封装光纤光栅; 封装后的光纤光栅受温度影响产生线性热光效应和热膨胀效应, 造成反射光的波长漂移; 当 AQ6370 光谱分析仪接收到反射光后进行寻峰解调, 得出反射光的中心波长。

我们使用水浴箱进行温度标定, 每 5℃保持 15min, 在温度稳定点测试记录, 对所测试到的数据进行拟合及偏差处理, 其结果(如图 5 所示)显示传感器的温度特性良好。

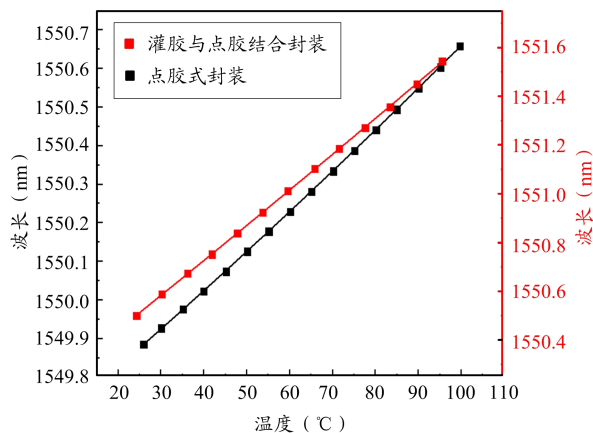


图 5 光纤光栅传感器中心波长与温度的关系曲线

点胶封装前的光纤光栅温度传感器拟合方程为:

$$\lambda = 0.00001297T^2 + 0.00876969T + 1549.63622, R^2 = 0.99977699 \quad (1)$$

点胶式封装的光纤光栅温度传感器拟合方程为:

$$\lambda = 0.00000988T^2 + 0.00928888T + 1549.63753201, R^2 = 0.99988751 \quad (2)$$

灌胶与点胶结合封装前的光纤光栅温度传感器拟合方程为:

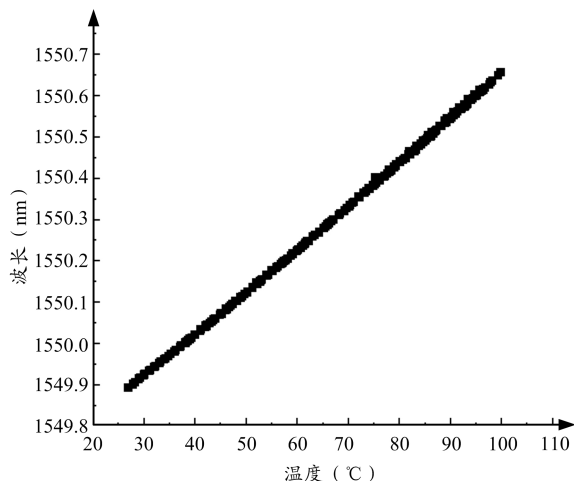
$$\lambda = 0.00007837T^2 + 0.01118307T + 1549.87172222, R^2 = 0.9998 \quad (3)$$

灌胶与点胶结合封装的光纤光栅温度传感器拟合方程为:

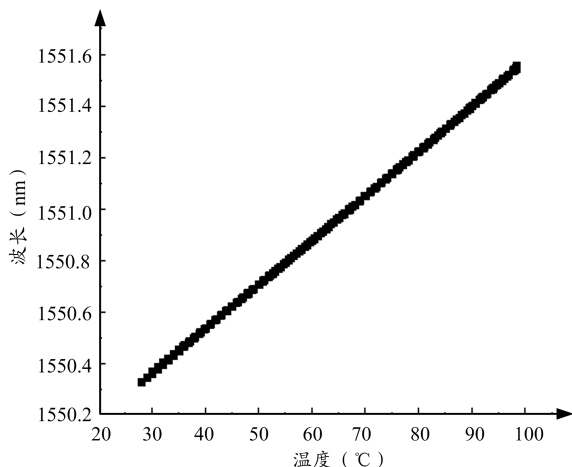
$$\lambda = 0.00000732T^2 + 0.01628781T + 1549.87785219, R^2 = 0.99996278 \quad (4)$$

数据显示: 点胶式封装的温度灵敏度系数比封装前增大了 1.05 倍; 灌胶与点胶结合封装的传感器温度灵敏度系数增大了约 1.6 倍。灌胶与点胶结合封装的光纤光栅传感器回归系数都在 0.999 以上, 能达到 IGBT 结温监测的精度要求。

通过整合多组数据,重复性测试的结果如图 6 所示。可以看出,数据点基本重叠在一起,表明封装后的传感器重复性能良好,满足工程长期使用要求。



(a) 点胶式封装



(b) 灌胶与点胶结合封装

图 6 2 种封装方式的重复性实验结果

3 结束语

本文设计了双层管式双端光纤光栅传感器,分别采用点胶式和灌胶与点胶结合 2 种封装方式。该传感器的双层结构消除了应力对传感器的影响,且封装后直径为 1.2mm 的极小尺寸在满足 IGBT 温度监测系统微型传感器需求的情况下,实现了对温度的精确测量。温度特性和重复性测试结果表明:该传感器温度特性良好,2 种封装的温度与波长二次多项式拟合优度均达 0.999 以上,其中点胶式封装传感器的二次多项式拟合优度达 0.99988751;灌胶与点胶结合封装的传感器二次多项式拟合优度达 0.99996278。2 种封装方式重复性能良好,该传感器可用于 IGBT 结温监测、电力系统中芯片结温的监测等对传感器尺寸要求高的场合。

参考文献:

- [1] 于坤山,谢立军,金锐. IGBT 技术进展及其在柔性直流输电中的应用[J]. 电力系统自动化,2016,40(6):139-143.
- [2] 吉攀攀,胡四全,廖志军,等. 柔性直流输电换流阀运行状态在线监测系统[J]. 电网与清洁能源,2015,31(12):68-72.
- [3] 唐勇,汪波,陈明,等. 高温下的 IGBT 可靠性与在线评估[J]. 电工技术学报,2014,29(6):17-23.
- [4] 徐盛友. 功率模块 IGBT 状态监测及可靠性评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [5] 张树冰,刘雪婷. 功率模块 IGBT 失效机理与寿命预测研究综述[J]. 电气开关,2017,55(5):19-21.
- [6] 耿楠. 热电偶传感器在工程项目中的应用 [J]. 中国高新技术企业,2012(12):51-52.
- [7] 李剑芝,杜彦良,刘晨曦. 采用在线成型工艺的光纤光栅传感器[J]. 光学精密工程,2009,17(9):2069-2075.
- [8] 贾宏志. 光纤光栅传感器的理论和技术研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2001.
- [9] 谢剑锋,张华,宋路发. 基于应力分析的光纤光栅温度传感性能研究[J]. 微计算机信息,2007,23(19):150-151.
- [10] 信思金,柴伟. 光纤 Bragg 光栅温度传感器封装方法研究[J]. 传感器与微系统,2004,23(4):10-12.

《光通信技术》加入 OSID 公告

《光通信技术》期刊自 2018 年 9 月 3 日起加入 国家新闻出版署出版融合发展(武汉)重点实验室提出的 OSID(Open Science Identity)开放科学计划。通过在期刊每篇文章上添加 OSID 开放科学(资源服务)标识码,可以使论文成果更加立体化展现,增强论文质量,促进传播与交流;使作者获得直接拓展学术人脉的渠道,并为作者与研究同领域课题的学者交流互动提供途径。

《光通信技术》编辑部