

基于光纤 F-P 腔的耐高温胶固化特性研究

黄蕾霖¹, 邵宇鹰², 庞拂飞^{1*}, 刘奂奂¹, 王海峰²

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 为了研究耐高温胶的固化过程, 基于光纤法布里-珀罗腔(F-P 腔)传感器原理, 将 2 根光纤的端面作为 F-P 腔的 2 个反射腔镜面, 用耐高温胶将其封装入氧化锆陶瓷插芯内, 制作了一个非本征型光纤 F-P 腔结构。通过 6 h 谱形监测, 发现耐高温胶在自然固化过程中使得 F-P 腔长变短, 表明其在固化过程中收缩, 最后趋于稳定, 固化引入腔长的变化随时间呈现指数关系, 时间常数(下降至 1/e)约为 40 min。

关键词: 法布里-珀罗腔; 耐高温胶; 固化特性

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)08-0038-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on curing characteristics of high-temperature resistance adhesive based on fiber-optic Fabry-Perot cavity

HUANG Leilin¹, SHAO Yuying², PANG Fufei^{1*}, LIU Huanhuan¹, WANG haifeng²

(1. Key Lab of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to study the curing process of high-temperature resistant adhesives, based on the principle of fiber-optic Fabry-Perot cavity (F-P cavity) sensor, two end faces of optical fibers are used as two mirrors of F-P cavity, which are encapsulated in zirconia ceramic cores with high temperature resistant adhesives, and an intrinsic optical fiber F-P cavity structure is fabricated. Monitoring by 6 h Spectrum, it is found that the length of F-P cavity became shorter during the natural curing process, which indicated that the shrinkage of F-P cavity tended to be stable, and the change of the length of introducing cavity showed an exponential relationship with time, and the time constant (decreased to 1/e) is about 40 min.

Key words: fiber-optic F-P cavity; high-temperature resistance adhesive; curing characteristics

0 引言

随着我国经济实力不断提升, 综合国力不断增强, 高温环境下的压力测量在军事、航空航天、汽车行业和冶金化工等领域内的需求不断增加。比如, 在汽车引擎燃烧室内, 温度通常能够达到 600 °C 以上; 在航空涡轮发动机内部, 温度能够达到 1000 °C 以上; 而在火箭发动机燃烧室内, 温度甚至能够达到 1700 °C 以

上。如此高的温度, 传统的半导体传感器、电容式传感器等已经无法满足需求^[1,2]。光纤传感器由于具有体积小、质量轻、不受电磁干扰、测量精度高和耐高温等特点而被广泛用于高温环境下的传感。在光纤传感器的制备过程中, 尤其是在非本征型光纤传感器中, 光纤与传感头的连接通常借助于插芯或者毛细管起到衔接的作用, 而为了能将光纤固定在插芯或者毛细管内, 需要使用耐高温胶实现光纤的固定封装^[3-5]。光纤传感精度极高, 耐高温胶固化时间及收缩过程将对光纤传感器特性产生重要影响, 因此对其固化过程进行研究尤为重要。许多光纤技术如喇曼、倏逝波和光纤光栅等已经被报道用于环氧树脂固化的在线监测^[6,7], 由于其固有的小尺寸和高灵敏度, 比传统的监测技术具有明显的优势。本文基于非本征型法布里-珀罗腔(F-P 腔)结构, 使用光纤和氧化锆陶瓷插芯设计并制

收稿日期: 2019-04-24。

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(520970170006)资助。

作者简介: 黄蕾霖(1994-), 女, 硕士, 现就读于上海大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业, 主要从事蓝宝石的键合工艺研究以及传感器的封装与应用研究, 并针对传感器结构进行高温高压的仿真研究。

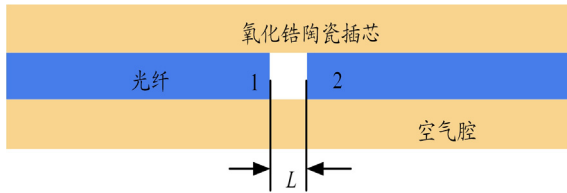
* 通信作者: 庞拂飞(E-mail: ffpang@shu.edu.cn)。



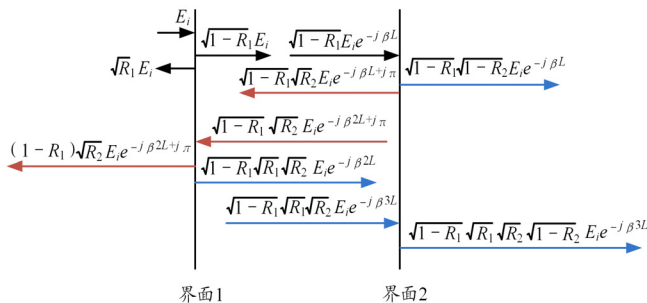
备一个简易的传感头,用于研究耐高温胶在自然固化过程中对光纤传感腔的影响特性。

1 光纤 F-P 腔干涉基本原理

本文所述传感器的原理图如图 1(a)所示,在 2 根切平的单模光纤的端面 1、2 之间构成了一个腔长为 L 的 F-P 腔结构,该空气腔可用于监测耐高温胶固化过程。



(a) 光纤 F-P 腔结构原理图



(b) F-P 腔光传输过程示意图

图 1 F-P 腔结构及光传输过程示意图

图 1(b)显示了 F-P 腔光传输过程。为方便讨论,我们不考虑腔内损耗(主要为空气腔的衍射)和反射面处的传输损耗(主要由粗糙度等表面缺陷引起)。单模光纤在 1550 nm 处的折射率 n_0 近似为 1.45,则在端面 1 和 2 处的反射系数可表示为 $R_1=R_2=R=(n_0-1)^2/(n_0+1)^2\approx 0.034$,为低反射系数,高阶反射的总贡献小于 0.1%,可以忽略不计。因此,总反射电场 E_r 和 E_i 透射电场可以表示为:

$$E_r \approx \sqrt{RE_i} + (1-R) \sqrt{RE_i} e^{j(\pi-2\beta L)} \quad (1)$$

$$E_t \approx (1-R)E_i e^{-j\beta L} + (1-R)RE_i e^{-j\beta L} \quad (2)$$

其中, E_i 为输入电场, β 为光纤传播常数,且 $\beta=2\pi n/\lambda$ 。在端面 2 处,由于光是从光密介质反射,因此有 π 相位的转变。由式(1)和式(2)可以得到归一化反射谱 $R_r(\lambda)$ 和透射谱 $R_t(\lambda)$ 如下:

$$R_r(\lambda) = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 = \left[\sqrt{R} + (1-R) \sqrt{R} e^{j(\pi-2\beta L)} \right]^2$$

$$\left[\sqrt{R} + (1-R) \sqrt{R} e^{j(2\beta L-\pi)} \right]^2 = R + (1-R)^2 - 2R(1-R) \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \quad (3)$$

$$R_t(\lambda) = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = \left[(1-R) e^{-j\beta L} + R(1-R) e^{-j\beta L} \right]^2 \times \left[(1-R) e^{j\beta L} + R(1-R) e^{j\beta L} \right]^2 = (1-R)^2 + R^2(1-R)^2 + 2R(1-R)^2 \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \quad (4)$$

令腔长 $L=260 \mu\text{m}$,得到在 1540~1560 nm 波长范围内反射谱和透射谱呈互补关系。因此,在实际实验研究中,通常研究 F-P 的反射谱特性及其在外界环境中相应的变化来实现对特定参量的监测。

从式(3)可以看出,当腔长变化时,会引起相位差的改变,从而导致反射谱的变化。为了研究腔长变化对反射光谱产生的影响,我们仿真了腔长 $L=260 \mu\text{m}$ 及腔长变短 200 nm 和 400 nm 以及 $L=110 \mu\text{m}$ 的反射谱,如图 2 所示。可以看出,当腔长变短时,会引起反射谱往短波方向移动;当腔长变化量较大时,会引起自由光谱范围(FSR)明显的变化。

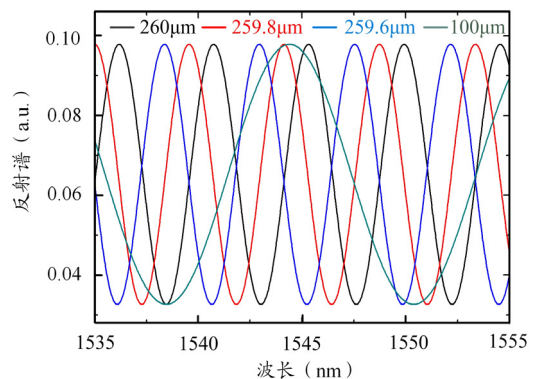


图 2 改变腔长引起 F-P 腔反射谱的漂移及 FSR 的变化

2 光纤 F-P 腔传感器结构设计与制作

2.1 耐高温胶的选取

光纤传感领域对耐高温胶的耐温性能要求越来越高,促进了耐高温胶的发展,市场上已经开发出从耐一百多度的环氧树脂胶到能耐四五百度的聚合物有机硅胶,到现在能耐一千多度的无机胶^[8]。用于光纤传感器封装的耐高温胶,在满足温度要求情况下,应尽量选择热膨胀系数与传感头材质接近的胶。本文选取的是双组分硅酸盐无机胶(C-3 胶),热膨胀系数为 $12.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,这种耐高温胶耐油,耐酸碱,耐热温度为 1460°C ,适用于极端的环境。C-3 胶使用时按照体积比 A 组分(灰白粉末):B 组分(无色流体)为 2:1 配比。

2.2 传感器结构设计与制作

基于上述光纤 F-P 腔反射谱特性,本文设计并制备了用于检测耐高温胶固化特性的传感器。传感器的制作过程如图 3 所示,具体步骤如下:①准备一根约 40 cm 长的单模光纤,在一端量取长度约 5 cm 光纤,将此段用剥线钳剥去涂覆层,并用酒精擦拭干净,然后按图 3(a)所示从外径 2.5 mm 标准氧化铝陶瓷插芯的一端插入,接着在 c 处用切割刀将光纤端面切平,之后将光纤拉至如图 3(b)所示位置。②准备一根跳线,如图 3(c)所示,将 a 端接入传感分析仪,在 b 端量取长度约 2 cm 的光纤,将此段同样用剥线钳将外皮和涂覆层剥去并用酒精擦拭干净,然后用切割刀将端面切平,接着从陶瓷插芯的扩口处缓慢插入,直到在传感分析仪上看出一个较好的 F-P 腔的谱形。③按配比调制耐高温胶,然后将耐高温胶按如图 3(d)所示在插芯的两端将光纤固定。为了减小到达 d 面的光的强度,光纤 cd 段长度选取为 40 cm;同时将光纤 d 处手动折断,可以减弱反射回去的光,避免形成多个 F-P 腔。这样,端面 b 和 c 之间就形成了一个空气腔,当空气腔长度发生变化时,干涉光程差就会发生变化,从而引起反射谱的移动,实现对胶固化过程中收缩特性的在线监测。

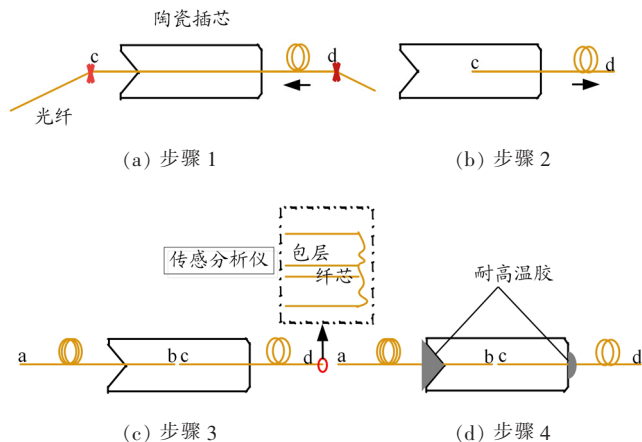


图 3 光纤 F-P 腔传感器制作过程

3 实验结果与分析

为了实现反射谱的监测,本文使用了传感分析仪(SM125),它由扫频光源、光电二极管、信号处理系统以及环形器组成。其中,光源的扫描范围为 1510~1590 nm,光谱的分辨率为 0.005 nm。光纤 F-P 腔结构及反射谱测试装置如图 4 所示。在测试装置中,激光光源从环形器端口 1 进入,通过端口 2 注入 F-P 腔,

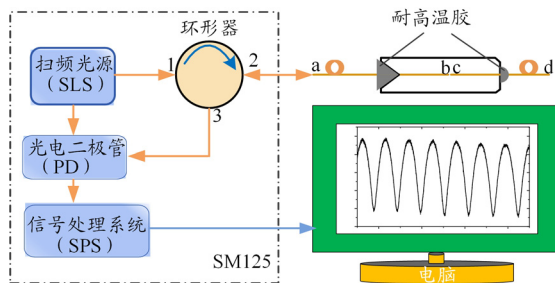


图 4 光纤 F-P 腔结构及反射谱测试装置示意图

在 F-P 腔干涉作用下形成周期性反射光谱;反射光从端口 2 返回,然后经过端口 3 进入到光电二极管中;光电二极管将光信号转换为电信号输出到信号处理系统中,最后输出,实现对 F-P 反射光谱的记录。

实验中将 2 个制作好的传感器静置,如图 5 所示,将刚点上耐高温胶的一刻作为时间零点,记录下此时的谱形,之后每 8 min 左右记录一个数据点,直到 6 h 后谱形趋于稳定。

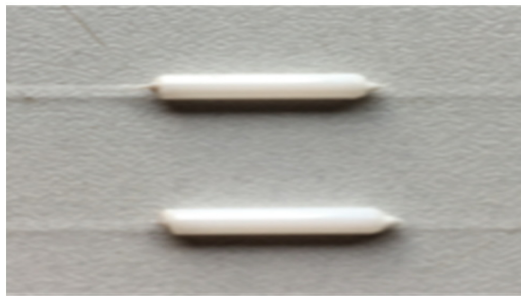


图 5 光纤 F-P 腔传感器实物图

零时刻和 6 h 的反射谱图如图 6 所示。可以看出,经过 6 h 的固化,反射光谱的 FSR 明显变大,表明固化过程中耐高温胶发生收缩引起腔长变短,对比度由 4 dB 变成了 8 dB,这是因为光程变短、光损耗减小。

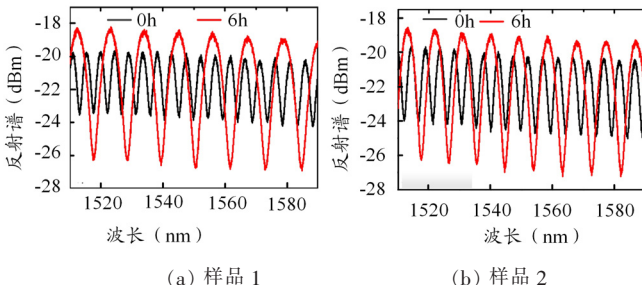


图 6 光纤端面形成的 F-P 腔的反射谱

为进一步分析光谱的频谱特性,本文对图 6 中的光谱进行了快速傅里叶变换,其结果如图 7 所示。可以看出,2 个样品皆只有 1 个主峰,其余峰位为主峰的倍频,表明我们的样品只有 1 个空气腔。根据图 7 中

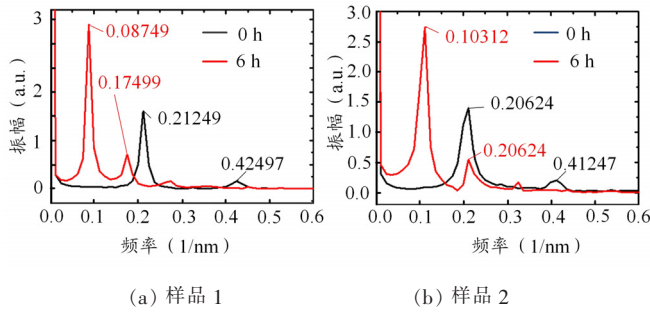


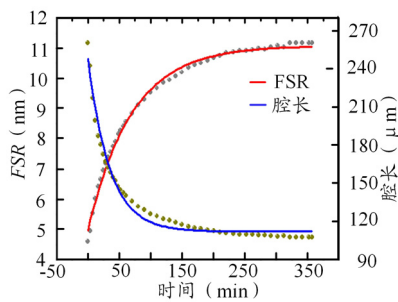
图 7 基于快速傅里叶变换的空间频谱分析

的频率值,利用公式 $FSR = \frac{\lambda^2}{2nL} \frac{1}{f}$,我们分析了 2 个样品 FSR 与腔长的变化情况,如表 1 所示。可以看出,经过 6 h 的固化,对应反射谱的周期都变为原来的 2 倍多。2 个样品的腔长变化量数值较相近,存在区别的主要原因是每个样品胶的填充量会有差别。

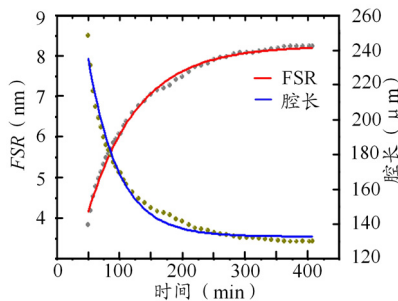
表 1 零时刻及 6 h 对应样品的 FSR 和腔长变化

样品	频率 f (1/nm)	FSR (nm)	腔长 L (μm)	腔长变化量 ΔL (μm)
样品 1	0.212→0.087	4.7→11.4	255→105	150
样品 2	0.206→0.103	4.8→9.7	248→124	124

6 h 的固化过程中腔长变化的情况如图 8 所示。我们对图 8 中的数据进行分析,并用 e 指数曲线分别拟合了 FSR 及腔长与时间的关系,如表 2 所示。各项



(a) 样品 1



(b) 样品 2

图 8 6 h 过程中光纤 F-P 腔 FSR 及腔长的变化情况

参数均很接近,且拟合系数较高。为了得到一个更有价值的拟合函数,本文分别将 2 个样品的 FSR 及腔长做了平均,并同样采用 e 指数拟合,得到 FSR 的拟合函数 $y=10.164-5.096e^{-0.014t}$,拟合系数为 1;腔长拟合函数 $y=122.649+118.325e^{-0.025t}$,拟合系数为 0.99996。从腔长变化函数可以确定耐高温胶收缩的过程,其时间常数(下降至 $1/e$)约为 40 min。

表 2 FSR 及腔长变化与时间的拟合函数

样品	FSR	腔长
样品 1	拟合函数: $y=11.085-6.109e^{-0.014t}$	拟合函数: $y=122.119+135.865e^{-0.029t}$
	拟合系数:0.995	拟合系数:0.981
样品 2	拟合函数: $y=9.249-4.095e^{-0.013t}$	拟合函数: $y=132.837+102.191e^{-0.021t}$
	拟合系数:0.995	拟合系数:0.985

4 结束语

基于光纤 F-P 腔干涉原理,本文设计了一种非本征型 F-P 腔结构,用于在线监测耐高温胶的固化过程。通过 6 h 的数据监测,分析了光谱的移动情况,验证了耐高温胶在自然固化过程中会发生收缩,对光纤的影响是使光纤往靠近 F-P 腔的方向有微米级别的移动,且这种移动在一段时间之后就趋向于饱和,表明耐高温胶此时基本固化。这种基于光纤 F-P 腔传感器的在线监测技术还有望用于其它领域材料的老化、退化等研究中。

参考文献:

- [1] FRAGA M A, FURLAN H, PESSOA R S, et al. Wide bandgap semiconductor thin films for piezoelectric and piezoresistive MEMS sensors applied at high temperatures: an overview [J]. Microsystem Technologies, 2014, 20(1): 9-21.
- [2] YOUNG D J, DU J, ZORMAN C A, et al. High-temperature single-crystal 3C-Si Capacitive pressure sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4(4): 464-470.
- [3] JIAJUN W, BO D, EVAN L, et al. Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. Optics Letters, 2010, 35(5): 619-619.
- [4] CLAUS R O, GUNTHER M F, WANG A, et al. Extrinsic Fabry-Perot sensor for strain and crack opening displacement measurements from -200 to 900℃[J]. Smart Materials & Structures, 1992, 1(3): 237-242.
- [5] CHEN W P, WANG D N, XU B, et al. Multimode fiber Fabry-Perot interferometer tip sensor [C]// International Conference on Optical Communications & Networks 2016 (ICOCN 2016), September 24- 27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2016: 1-3.
- [6] DEGAMBER B, FERNANDO G F. Process Monitoring of Fiber-Reinforced Polymer Composites[J]. MRS Bulletin, 2002, 27(5): 370-380.
- [7] BUGGY S J, CHEHURA E, JAMES S W, et al. Optical fibre grating refractometers for resin cure monitoring [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9: S60-S65.
- [8] 翟海潮. 粘接与表面粘涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.