

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.03.06

基于 CO₂ 激光焊接的高温光纤压力传感器的研制

张慧君, 隋广慧

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了满足高温环境下的压力测量需求, 研制了一种基于 CO₂ 激光焊接的高温 F-P 光纤压力传感器。介绍了 MEMS 压力敏感结构的制作过程, 分析了传感器各组件之间的焊接工艺, 实现了高温 F-P 光纤压力传感器的无胶化封装。在此基础上, 对传感器的温度特性和高温压力性能进行了研究。结果表明, 采用 CO₂ 激光焊接封装的传感器可靠性高, 在高温下信号传输正常, 未出现光谱能量衰减现象。温度达 300 °C 时, 传感器在 0 ~ 2.5 MPa 范围内的测量误差小于 0.2% FS, 能够实现高温压力的准确测量。但温度对传感器的影响不可忽略, 在实际应用过程中需对传感器进行温度补偿。

关键词: 光纤压力传感器; 高温; 激光焊接

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)03-0030-04

Development of High Temperature Optical Fiber Pressure Sensor Based on CO₂ Laser Welding

ZHANG Huijun, SUI Guanghui

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to meet the pressure measurement requirements in high temperature environments, a high temperature F-P (Fabry-Perot) optical fiber pressure sensor based on CO₂ laser welding was developed. The manufacturing process of the MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) pressure sensitive structure was introduced, the welding process between the sensor components was studied, and the no-adhesive packaging of the high temperature F-P optical fiber pressure sensor was achieved. On this basis, the temperature characteristics and high temperature pressure performance of the sensor were studied. The research results showed that the sensor packaged by CO₂ laser welding has high reliability, and the sensor signal was transmitted normally at high temperature with no spectral energy attenuation phenomenon. In the environment of 300 °C, the measurement error of the sensor in the pressure range of 0 ~ 2.5 MPa was less than 0.2% FS, which realized the accurate measurement of high temperature pressure. However, the influence of temperature on the sensor cannot be ignored, and the sensor needs to be temperature compensated in the application.

Key words: fiber optic pressure sensor; high temperature; laser welding

0 引言

近年来, 光纤传感技术作为一种新兴的测试手段, 受到了国内外研究机构的广泛关注。与传统的电学传感器相比, 光纤传感器具有重量轻、体积小、抗电磁干扰能力强等优点, 已在航空航天、石油、爆炸等多个领域中显现出独特的优势^[1-4]。高温 F-P 光纤压力传感器是基于法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 干涉原理的一类光纤传感器^[5], 其动态响应高、耐温性能好, 能够适应恶劣工作环境, 可用于航空发动机高温动态压力的测量, 为发动机的故障监测提供技术保障^[6-7]。

目前, 常见的高温 F-P 光纤压力传感器多采用高温胶进行封装, 虽能够满足耐高温的使用要求, 但胶黏剂在高温下产生的热应力较大, 且稳定性差, 容易

对光信号的传输造成影响, 进而导致传感器性能降低甚至失效。本文研制了一种基于 CO₂ 激光焊接的高温 F-P 光纤压力传感器, 通过激光热熔的原理将传感器组件粘接在一起, 可靠性高、性能良好, 能够实现高温压力的准确测量。

1 传感器工作原理

如图 1 所示, 高温 F-P 光纤压力传感器由敏感结构、准直管、光纤三部分组成, 其材料主要成分为 Si, SiO₂, 具有良好的耐温特性。其工作原理是: 当入射光进入光纤后, 光在组成 F-P 腔的多个界面上发生反射 (分别为 R_1 , R_2 , R_3 , R_4), 反射光之间彼此发生干涉, 形成复合 F-P 腔的干涉信号^[8-9]。当外界压力作用在感压膜片时, 膜片产生变形, F-P 腔的腔长随之发

生变化,进而引起干涉信号的变化。通过探测干涉信号的变化,可以解调得出外界压力的大小。

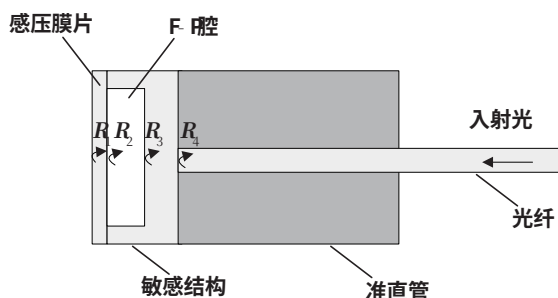


图1 高温 F-P 光纤压力传感器结构示意图

根据弹性力学原理,传感器的灵敏度 Y 为

$$Y = \frac{\Delta d}{\Delta P} = \frac{3}{16} \frac{(1 - \mu^2) r^4}{E \cdot h^3} \quad (1)$$

式中: Δd 为膜片的形变量, nm; ΔP 为外界压力的变化量, kPa; h 为膜片的厚度, nm; E 为膜片材料的杨氏模量, kPa; r 为膜片的有效半径, nm; μ 为膜片材料

的泊松比。膜片厚度越小,有效半径越大,传感器的灵敏度越高。

2 传感器制作

2.1 敏感结构制备

传感器的敏感结构包括感压膜片和基底两部分,由 MEMS 工艺制备而成,如图 2 所示。主要制备过程是:在洁净的基底表面溅射一定厚度的金属镍,如图 2(a)所示;在金属镍表面旋涂光刻胶,光刻显影,形成 F-P 腔刻蚀窗口,如图 2(b)所示;以光刻胶为刻蚀掩膜,湿法腐蚀金属镍,如图 2(c)所示;以光刻胶和金属镍为刻蚀掩膜,采用高密度等离子体刻蚀技术干法刻蚀基底,刻蚀出具有一定深度的圆形凹槽,如图 2(d)所示;将刻蚀好的基底表面进行表面处理,同时与另一基片进行键合,如图 2(e)所示;将上层材料进行减薄抛光,直至上层膜片的厚度及表面粗糙度达到设计要求,如图 2(f)所示。

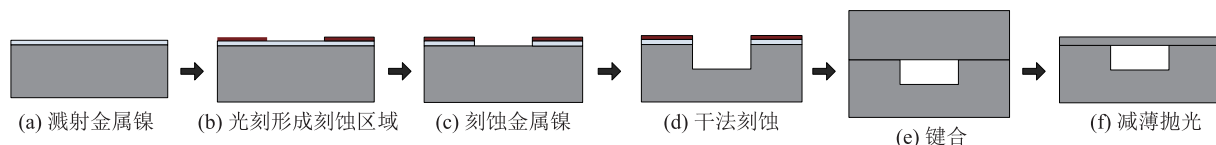


图2 压力敏感结构 MEMS 工艺流程

2.2 传感器焊接

根据光纤压力传感器结构微小的特点,设计了具有多维调节功能、夹持功能和信号解调功能的激光焊接系统,如图 3 所示。焊接系统主要由 CO_2 激光器、微位移平台、CCD 显微相机、解调仪等部分组成。其中,微位移平台用于将光纤传感器的各组件进行精密对准组装;CCD 显微相机用于对光纤传感器的组装和焊接过程进行显微视频监测;解调仪对光纤压力传感器返回的干涉光谱信号进行实时监测,并实时解调传感器的腔长、对比度等参数。

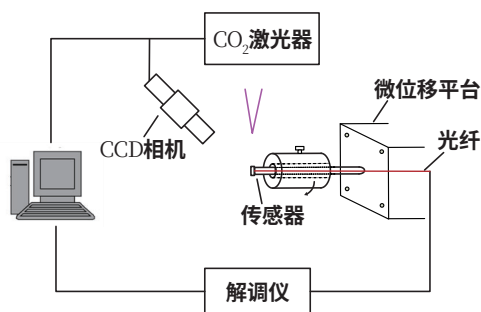


图3 激光焊接系统

为①焊接敏感结构与准直管:将准直管和敏感结构进行精密对准,发射一定功率的 CO_2 激光脉冲对其进行点焊预固定,之后再行 360° 密封焊接,保证焊接的可靠性;②焊接准直管与光纤:将切割好的光纤穿入上述焊接后的准直管中,直至光纤端面与敏感结构底面接触。发射一定功率的激光脉冲,对光纤与准直管进行预固定和 360° 密封焊接;③记录光谱及腔长值,完成传感器的焊接。焊接过程如图 4 所示。

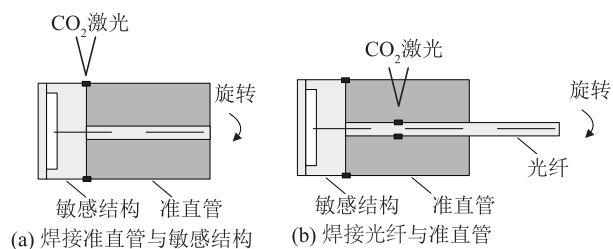


图4 传感器激光焊接过程示意图

激光焊接是将材料熔化粘接在一起的过程,由于光纤直径为 0.125 mm,与准直管外径尺寸差异较大,其焊接的难点在于既要实现光纤与准直管的可靠焊接,又不能影响传感器信号的传输。当设定的激光能量较

利用 CO_2 激光焊接系统对传感器进行焊接的过程

小时,由于准直管管壁较厚,光纤表面吸收的能量不足以使其软化,导致光纤无法与准直管熔融在一起;而激光能量太大时,光纤可能发生弯曲或断裂,从而造成传感器光谱质量下降。因此,需要对激光焊接参数(占空比和脉冲时间)进行筛选,图5是采用最佳参数焊接得到的传感器实物图。

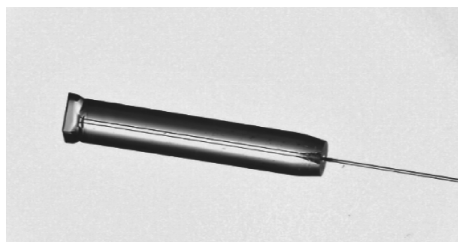


图5 传感器实物图

3 试验结果及分析

3.1 温度特性

将经过焊接封装后的传感器放入高温检定炉内,对其温度特性进行测试。设置高温炉温度由25℃缓慢升至300℃,当温度达到设定值时,保温60 min,记录传感器在不同温度下的光谱图和腔长值。图6是传感器在25℃和300℃下的光谱图,可以看出传感器在高温下的光谱信号正常,且光谱能量没有发生衰减。由此表明,该传感器封装可靠,温度升高未对传感器信号的有效传输造成影响。

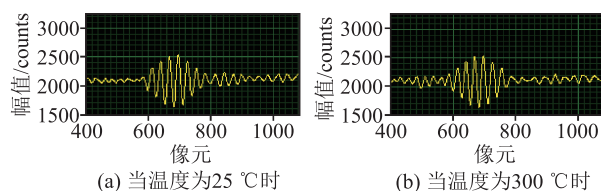


图6 传感器光谱图

图7是温度从25℃升至300℃时的传感器腔长-温度变化曲线,拟合方程 $Y = 0.000948941X^2 + 0.43569X + 19754.728$, $R^2 = 0.99948$ 。可以看出,随着温度的升高,传感器的腔长值不断增大,原因是材料的热膨胀导致传感器在高温下产生了零点漂移。温度从25℃升至300℃时,传感器的腔长变化量为211 nm,带来的压力测量误差约为86 kPa,因此在高温测试环境中应考虑零点漂移这一影响因素。

3.2 高温压力测试

利用高温静态压力测试装置对传感器进行高温下的压力测试,其安装示意图如图8所示。传感器前端的传感头位于高温密封压力管腔中,尾端连接解调仪,

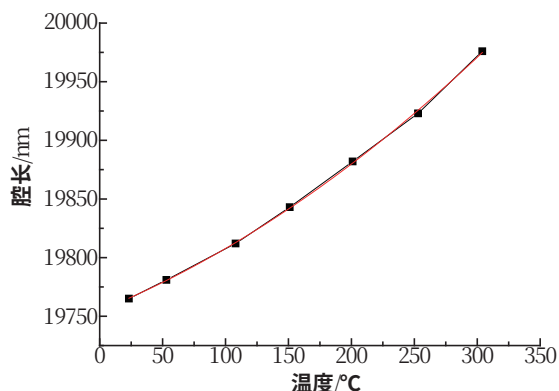


图7 传感器腔长-温度变化曲线

标准压力发生器和高温检定炉分别提供标准压力和高温环境。当温度到达设定值后,在当前温度下保温30 min,然后调节标准压力发生器,以0.4 MPa为一级,增加压力至2.5 MPa,之后再调节标准压力发生器,将压力从2.5 MPa减小至0 MPa,此为一个循环。重复3个循环,记录各压力稳定点下的仪表输出值,完成传感器在该温度下的压力测试。

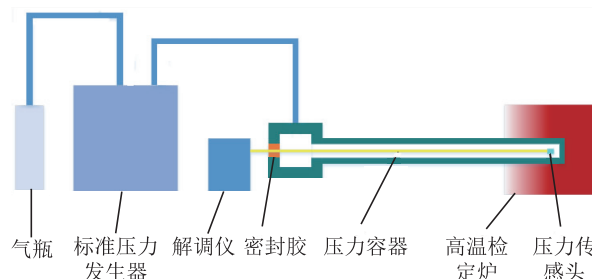


图8 传感器高温压力测试安装示意图

图9是传感器在25℃和300℃下的腔长-压力变化曲线,分别对其进行线性拟合,两曲线的线性度均可达0.9999。对测试数据进行处理可得,在0~2.5 MPa压力范围内,传感器的测量误差均小于0.2% FS,能够实现最高300℃下压力的准确测量。

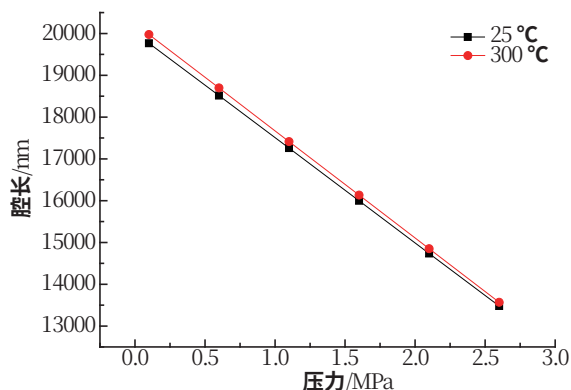


图9 不同温度下传感器的腔长-压力曲线

图 10 是传感器压力灵敏度随温度变化曲线, 拟合方程为 $Y=0.00000066X^2-0.000048X+2.51624$, $R^2=0.99936$ 。由图 10 可以看出, 压力灵敏度随着温度的升高而变大, 这是由于膜片的杨氏模量在高温下发生变化导致的^[10]。随着温度的升高, 膜片的杨氏模量减小, 导致传感器的压力灵敏度增大。

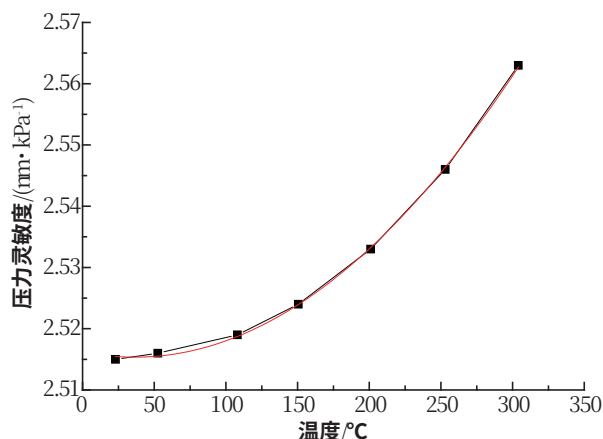


图 10 传感器压力灵敏度-温度变化曲线

综上所述, 温度变化对传感器的零点和压力灵敏度均有影响。在实际测试过程中, 应根据图 7 及图 10 两个拟合曲线, 对传感器进行温度补偿。

4 结论

设计了一种基于 CO_2 激光焊接的高温 F-P 光纤压力传感器, 研究了传感器的制作过程及焊接工艺, 并对其性能进行了测试。研究表明, 激光焊接的方法能够实现高温 F-P 光纤压力传感器的可靠封装。且在最高温度 300 °C 下, 传感器性能稳定, 在 0 ~ 2.5 MPa 范围内的测量误差小于 0.2 % FS。此外, 温度变化对传感器的零点和压力灵敏度均有一定的影响。为了避免由温度带来的测量误差, 在测试过程中需对环

境温度进行实时测量, 从而对传感器进行温度补偿。

参考文献

- [1] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [2] 庄须叶, 黄涛, 邓勇刚, 等. 光纤传感技术在油田开发中的应用进展[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 161-172.
- [3] 由泽伟, 王源, 孙阳阳, 等. 光纤光栅传感器在爆炸冲击测量中的应用[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 614-618.
- [4] 刘劲. 基于光纤 F-P 腔的水下冲击波压力传感器的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [5] 高红春, 唐才杰, 蓝天, 等. 高温光纤法珀压力传感器研究进展[J]. 仪表技术与传感器, 2020, 12: 26-31.
- [6] Palmer M, Davis M, Engelbrecht G, et al. Un-Cooled Fiber-Optic Pressure Sensor for Turbine Engines, Operation to 1922°F and 500psig. [C]// 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2013.
- [7] Davis M, Castellucci M, Palmer M, et al. A Miniature, High Temperature, High Frequency Fiber Optic Pressure Sensor for Scramjet Flow Characterization[C]// 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012.
- [8] 姜丽娟, 江俊峰, 刘铁根, 等. 具有复合式法珀腔的光纤压力传感器的解调[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 283-287.
- [9] 郑志霞, 黄元庆. 基于 F-P 腔干涉的膜片式光纤微机电系统压力传感器[J]. 光子学报, 2012(12): 1488-1492.
- [10] Hopcroft M A, Nix W D, Kenny T W. What is the Young's Modulus of Silicon? [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(2): 229-238.

收稿日期: 2021-03-31

基金项目: 工信部民用飞机专项科研项目(MJ-2015-J-99)

引用格式: 张慧君, 隋广慧. 基于 CO_2 激光焊接的高温光纤压力传感器的研制[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 30-33.