

# 用于高温环境的压力式光纤光栅温度传感器设计

黄嘉,陈富云,邓霄冉,赵振刚,李川

昆明理工大学

**摘要:** 针对传统压力式温度计在实际应用中易受电磁干扰和环境温度影响的问题,设计了一种适合高温工作环境的压力式光纤 Bragg 光栅温度传感器。该传感器在压力式温度计的结构基础上将压力敏感元件替换为传压杆及等强度悬臂梁,建立传感器理论数学模型并进行测温试验,将实测值与理论值进行比较,证明该传感器的设计可行,可用于有特殊环境要求的温度检测。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅;温度传感器;压力式;静态特性

**中图分类号:** TG806;TP212

**文献标志码:** A

## Pressure Type Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for High Temperature Environment

Huang Jia, Chen Fuyun, Deng Xiaoran, Zhao Zhengang, Li Chuan

**Abstract:** The traditional pressure thermometer is susceptible to electromagnetic interference, and the accuracy is easily affected by the environmental temperature in practical application. A gas pressure type fiber Bragg grating temperature sensor under high temperature working environment is designed. The sensor is replaced pressure sensitive element with a pressure transmitting rod and cantilever based on the structure of pressure type thermometer. The theoretical mathematical model of sensor is established and the temperature measurement experiment is carried out. By comparing the measured values with the theoretical values, it is proved that the design of the sensor is feasible and it can be used for temperature detection with the special requirements of environment.

**Keywords:** fiber Bragg grating; temperature sensor; pressure type; static characteristics

## 1 引言

随着人们对光纤光栅的深入探究,光纤光栅的制作技术也在不断推进<sup>[1,2]</sup>。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)具有抗电磁干扰能力强、良好的电绝缘性、低耗传输、化学特性稳定、可用于高温环境下的检测等特点,较其他类型的温度传感器更具发展前景<sup>[3]</sup>。

目前通常采用的测温仪表主要有压力式温度计、热电阻传感器、热电偶传感器、光纤温度传感器等类型<sup>[4]</sup>。传统的压力式温度传感器的精度受环境温度影响较大,且很难满足高危测量环境的需求<sup>[5,6]</sup>。2008年,王宏亮等<sup>[7]</sup>设计了一种改进型的高温光纤光栅的传感探头,可用于高温环境下的温度测量;2009年,李阔等<sup>[8]</sup>提出通过调节光纤光栅预松长度的方法,提高了温度传感器在高温测量时的灵敏度;2010年,李川等<sup>[9]</sup>设计了一种用双层套管隔离外加应力应变的光纤光栅温度传感器,该传感器对外加应力应变不敏感,可

实现无外力作用下的温度测量。目前,基于光纤光栅的温度传感器已是运用最广泛的测温技术之一。

本文设计了一种气体压力式光纤 Bragg 光栅温度传感器,可用于高温环境下的温度检测。该传感器在压力式温度计的结构基础上将压力敏感元件替换为传压杆及等强度悬臂梁,提高了测量精度和敏感度,利用温包直接与被测介质接触进行测温试验,进行数据分析得到温度传感器的各项静态性能指标,将试验数据与理论值进行比较以验证传感器设计是否可行,经精密加工后可实现复杂测温环境中的温度检测工作。

## 2 传感器原理与分析

### 2.1 传感器结构

该气体压力式温度传感器主要由等强度悬臂梁、光纤 Bragg 光栅、壳体、传压杆、支架、隔层膜片、毛细管转接头、毛细管、外接光缆、螺纹接头、温包、螺钉、引出孔等组成。其中,两只型号相同的光栅 FBG1、FBG2 粘贴在等强度悬臂梁上、下表面的中轴线上,以消除环境温度变化对测温试验的影响(见

图1)。两只光纤 Bragg 光栅的技术参数:中心波长  $\lambda_{B1} = 1548.891\text{nm}$ ,  $\lambda_{B2} = 1553.206\text{nm}$ ;光栅应变灵敏参数  $S_\varepsilon = 0.78 \times 10^{-6} \mu\varepsilon^{-1}$ ;温度灵敏系数  $S_T = 6.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ;有效弹光系数  $p_\varepsilon = 0.22$ 。

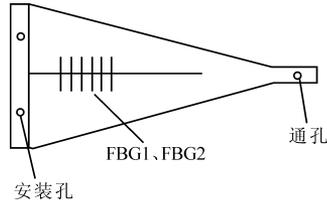


图1 等强度悬臂梁结构

压力式温度计是利用传感器中的感温介质的压力(或体积)随着被测温度的变化而改变的性质来检测温度的<sup>[10]</sup>,气体压力式光纤 Bragg 光栅温度传感器结构见图2。

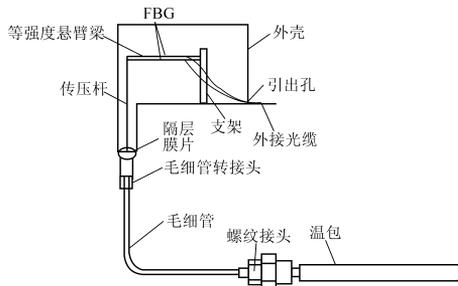


图2 气体压力式光纤 Bragg 光栅温度传感器结构

## 2.2 传感器原理

将温包放入测温介质中,被测温度的变化导致温包内的气体压强发生变化,经过毛细管作用到隔层膜片上,并改变膜片的中心挠度,使与膜片相连的传压杆发生上下运动。由于等强度悬臂梁的自由端与传压杆垂直刚性连接,传压杆运动改变了悬臂梁挠度,并导致悬臂梁上下表面的光纤 Bragg 光栅波长发生位移,通过光纤分析仪可以测出波长位移量,从而计算出被测温度值。理想气体的状态方程<sup>[11,12]</sup>为

$$PV = nRT \quad (1)$$

式中, $P$ 为气体压强; $V$ 为仪表封闭系统体积; $n$ 为温包中气体物质的量; $R$ 为普适气体常数( $R = 8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$ ); $T$ 为气体温度,近似为被测介质的温度。

当温包内的气压发生变化,经毛细管作用在相连的隔层膜片上,膜片上压力  $F_1$  为

$$F_1 = PS = \frac{nRT}{V}S \quad (2)$$

传压杆与等强度悬臂梁自由端相连,压力  $F_1$  经传压杆传递,作用到自由端,使自由端具有相等的力

$F_2$ ,即

$$F_2 = F_1 \quad (3)$$

作用力  $F_2$  与其轴向应变  $\Delta\varepsilon$  关系为

$$\Delta\varepsilon = \frac{6F_2l}{Eb_0h^2} \quad (4)$$

式中, $E$ 为等强度悬臂梁的弹性模量; $b_0$ 为等强度悬臂梁固定端的宽度; $h$ 为等强度悬臂梁的厚度; $l$ 为等强度悬臂梁的长度。

将式(2)、式(3)代入式(4)得到轴向应变  $\Delta\varepsilon$  与温度  $T$  的关系表达式为

$$\Delta\varepsilon = \frac{6lRnS}{Eb_0h^2V}T \quad (5)$$

光纤 Bragg 光栅随悬臂梁的应变发生形变,光纤 Bragg 光栅中心波长移位量  $\Delta\lambda_B$  为

$$\Delta\lambda_B = (S_\varepsilon\Delta\varepsilon + S_T\Delta T)\lambda_B \quad (6)$$

式中, $S_\varepsilon$ 为应变敏感系数; $S_T$ 为温度敏感系数; $\Delta\varepsilon$ 为轴向应变变化量; $\Delta T$ 为温度变化量; $\lambda_B$ 为光纤 Bragg 光栅中心波长。

悬臂梁上的两只光栅消除了环境温度对波长的影响,所以只有应变作用下的波长移位量为

$$\Delta\lambda_{B1,2} = \Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = 2S_\varepsilon\Delta\varepsilon\lambda_B \quad (7)$$

式中, $\Delta\lambda_{B1,2}$ 为两只光栅波长移位量的差值; $\Delta\lambda_{B1}$ 和  $\Delta\lambda_{B2}$ 分别为上、下表面两只光栅的波长移位。

将(7)代入式(4)可得中心波长移位差值  $\Delta\lambda_{B1,2}$ 与作用力  $F_2$  关系为

$$\Delta\lambda_{B1,2} = \frac{12lS_\varepsilon\lambda_B}{Eb_0h^2}F_1 \quad (8)$$

将式(7)代入式(5)可得到中心波长移位  $\Delta\lambda_{B1,2}$ 与待测温度  $T$  的关系为

$$\Delta\lambda_{B1,2} = \frac{12lRnS_\varepsilon\lambda_B}{Eb_0h^2V}T \quad (9)$$

式(9)表示通过检测光纤 Bragg 光栅的波长移位量即可得出相应的被测温度。将测试试验中所有部件的具体参数代入式(9)中,可求得该温度传感器的灵敏度理论值为  $10.2\text{pm}/^\circ\text{C}$ ,最小温度分辨力为  $0.098^\circ\text{C}$ 。

## 2.3 传感器参数

该温度传感器主要部件的参数如下:

①温包:尺寸为  $\phi 14\text{mm} \times 150\text{mm}$  的紫铜圆柱体;

②毛细管:外径  $\phi 1.2\text{mm}$ 、内径  $\phi 0.4\text{mm}$ 、长  $2\text{m}$  的细铜管,并用铜丝编织的包皮作保护层;

③感温介质:以一定的初始压力,在温包、毛细管和弹性元件组成的封闭结构中完全充满的惰性气

体<sup>[13,14]</sup>,该传感器选用氮气作为感温介质;

④隔层膜片:φ24mm、厚度0.3mm的316L不锈钢圆形平膜片;

⑤传压杆:φ4mm×55mm,杆头为锥形头,材料为45钢;

⑥等强度悬臂梁:长度50mm,厚度0.3mm,固定端宽度20mm,材料为316L不锈钢;杨氏模量为200GPa,泊松比0.306。

### 3 试验及结果分析

#### (1) 试验设计

为了验证所设计的温度传感器测量的有效性和稳定性,设计了测温试验。温度测试实验装置如图3所示,主要组成部分有光纤光栅传感网络分析仪、气体压力式FBG温度传感器、温度计、恒温油槽及计算机。根据试验条件和需求,用温度控制面板控制恒温油槽的温度,对温度传感器进行90-180℃温度范围进行测试,研究了温度对光栅中心波长的影响,并通过重复试验来检验传感器的稳定性。

试验时使用型号为HTS-300A的恒温油槽,工作温度范围90-300℃,温度波动度 $\leq \pm 0.01^\circ\text{C}/30\text{min}$ 。选用的光纤光栅网络分析仪是十六通道网络分析仪,波长解调范围为1525-1565nm,分辨率为1pm。

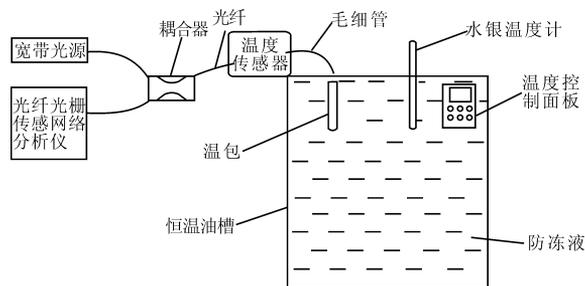


图3 温度测试原理

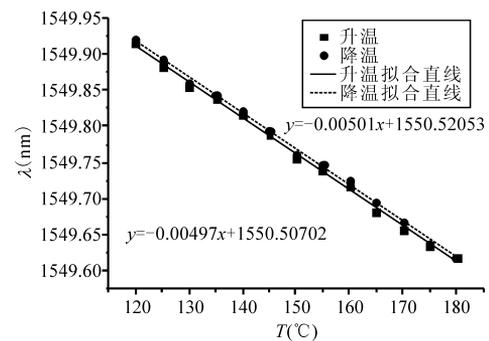
为了得到温度传感器光栅FBG1、FBG2的中心波长随温度变化规律,试验中以5℃为一步,进行三次温度范围为90-180℃的温升试验及180-90℃的降温试验。

#### (2) 试验数据及分析

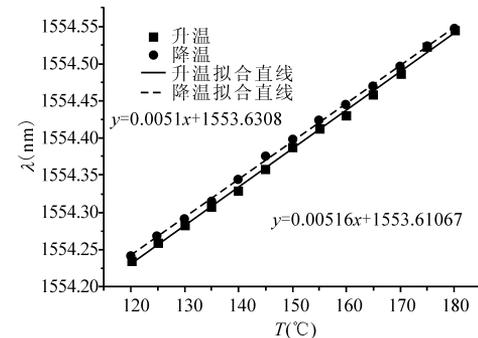
试验中测得三组传感器两只光栅FBG1和FBG2中心波长随温度变化的数据,并得出三次升降温试验的算数平均值及拟合直线,如图4所示。

由图4可知:升温试验中,粘贴在悬臂梁下表面的光栅FBG2中心反射波长增大,上表面的光栅FBG1中心反射波长减小;降温试验中,FBG2的中

心反射波长减小,FBG1的中心反射波长增大。



(a) FBG1三次升降温试验波长位移量的算数平均值



(b) FBG2三次升降温试验波长位移量的算数平均值

图4 三次升降温试验波长位移量的算数平均值

根据光纤光栅的理论特性可知:当光栅受到压力时光栅波长会减小;当光栅受拉时中心波长增大,由此可知试验结果与理论规律相符。

温度传感器的计算式为

$$e_L = \pm \frac{\Delta\lambda_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (10)$$

式中, $\Delta\lambda_{\max}$ 为输出平均校准曲线与拟合直线间的最大偏差; $Y_{FS}$ 为理论满量程输出。

图中光栅的波长总变化量为0.304nm,实测值与理论值的最大波长偏差量为150℃时的0.0052nm。将参数代入式(10)可计算得出该温度传感器的线性度为1.86% FS。

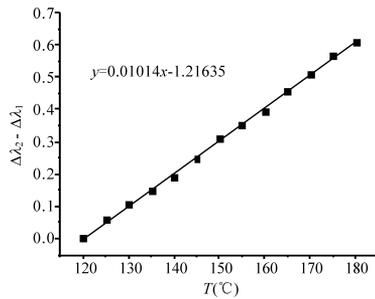
在三次温度测试试验过程中,FBG1和FBG2在升温 and 降温时温度变化及光纤Bragg光栅波长位移量的试验算数平均值见表1。

由表中试验数据可得到升温及降温过程中的波长位移量与温度的关系拟合直线如图5所示。

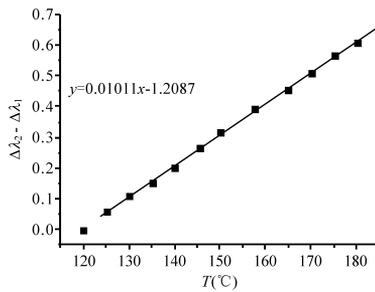
由图5可见,在升温及降温过程中波长位移量与温度变化量基本成线性关系,且数据与理论数据误差不大。由拟合直线斜率可得,该压力式温度传感器升温时温度灵敏度为10.14pm/℃,降温时灵敏度为10.11pm/℃,与理论值10.2pm/℃相比误差不大,证明该传感器的设计可行。

表1 温度试验中波长移量与温度之间的关系

温度 (°C)	升温			降温		
	FBG1 升 温 $\Delta\lambda_1$ (nm)	FBG2 升 温 $\Delta\lambda_2$ (nm)	$\Delta\lambda_2 -$ $\Delta\lambda_1$ (nm)	FBG1 降 温 $\Delta\lambda_1$ (nm)	FBG2 降 温 $\Delta\lambda_2$ (nm)	$\Delta\lambda_2 -$ $\Delta\lambda_1$ (nm)
120	0	0	0	0	0	0
125	-0.032	0.026	0.058	-0.03	0.028	0.058
130	-0.058	0.049	0.107	-0.061	0.05	0.111
135	-0.076	0.073	0.149	-0.078	0.075	0.153
140	-0.098	0.094	0.192	-0.099	0.103	0.202
145	-0.126	0.123	0.249	-0.127	0.134	0.261
150	-0.158	0.152	0.31	-0.16	0.157	0.317
155	-0.175	0.178	0.353	-0.174	0.183	0.357
160	-0.198	0.197	0.395	-0.198	0.204	0.402
165	-0.232	0.224	0.456	-0.227	0.229	0.456
170	-0.257	0.251	0.508	-0.254	0.255	0.509
175	-0.279	0.287	0.566	-0.285	0.283	0.568
180	-0.296	0.312	0.608	-0.304	0.305	0.609



(a) 升温过程中波长位移量与温度变化关系



(b) 降温过程中波长位移量与温度变化关系

图5 升温及降温时波长位移量与温度变化关系

## 4 结语

本文为了解决传统压力式温度计在工业应用中精度受环境温度变化的影响较大且对测温环境要求高的问题,设计了一种气体压力式光纤 Bragg 光栅温度传感器,该温度传感器可用于高温环境下的温度检测。

经过测温试验得出传感器的各项静态性能指标:线性度 1.86% FS,最小温度分辨力 0.098°C,平均温度灵敏度 10.125 pm/°C,证明该传感器的设计可行。该传感器在结构上采用了金属支撑,在未来的实际应用中可对传感器进行整体封装以便使用,

经过精密计算加工后可用于化工、电力系统、石油等对于高要求测温环境的温度检测。

## 参考文献

- [1] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic bragg grating sensors[J]. Proc Spie, 1990, 1169(96): 98-107.
- [2] Zhan Y G, Cai H W, Xiang S Q, et al. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(1): 83-86.
- [3] 阎石, 丁傲, 任亮. 光纤 Bragg 光栅温度传感器光学特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 250-254.
- [4] 杨永军. 温度测量技术现状和发展概述[J]. 计测技术, 2009, 29(4): 62-65.
- [5] 叶永伟, 杨超, 王永兴, 等. 自适应环境温度变化的压力式温度仪表的研制[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5): 1087-1093.
- [6] 李天辉, 魏珊, 于倩, 等. 基于 Pt100 运用查表法实现的高温温度计设计[J]. 电子科技, 2011, 24(10): 52-55.
- [7] 王宏亮, 张晶, 乔学光, 等. 一种耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 传感技术学报, 2008, 21(6): 964-966.
- [8] 李阔, 周振安, 刘爱春, 等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 249-251.
- [9] 李川, 由静, 李英娜, 等. 双套管式光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 大坝与安全, 2009, 36(3): 244-247.
- [10] 魏寿芳. 膨胀式温度计[M]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [11] 杨伯源. 工程弹塑性力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003.
- [12] 陆世英, 张廷凯, 康喜范. 不锈钢[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [13] 韦靖. 浅谈蒸汽压力式温度计和气体压力式温度计的原理、使用与校正[J]. 计量技术, 2005(2): 37-39.
- [14] 白冰, 高福生. 压力式温度计的原理和特性及使用注意事项[J]. 轻工标准与质量, 2017(2): 70-71.

第一作者: 黄嘉, 硕士研究生, 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 650500 昆明市

First Author: Huang Jia, Postgraduate, Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China