

作者简介: 孙义斌(1984-), 男, 工程师, 工学硕士, 从事光纤光栅解调仪表方面的研究。

图1中,信号1,2,3分别为测量FBG、参考波长和标准具信号。这三个信号由光电探测器获得,三路信号强度 U 随时间 t 的变化情况如图2所示。

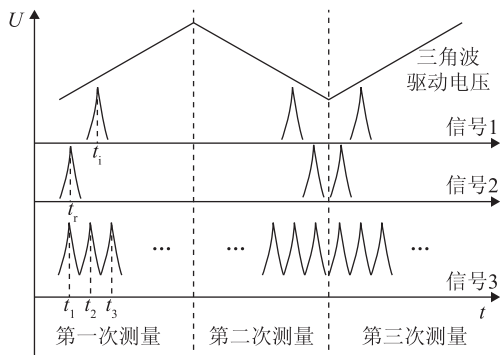


图2 三路信号强度随时间变化情况

图2中,横轴为时间变量,纵轴为信号强度, t_i 是测量FBG峰值时间, t_r 是参考波长峰值时间, $t_1, t_2, t_3, \dots$ 是标准具各峰值时间。三角波驱动电压的一个上升过程或者一个下降过程,即为一个完整解调过程,所以图2中显示了三次测量过程,我们选取第一次测量过程进行计算,主要计算方法是利用各脉冲峰值对应的时间来计算测量FBG传感器测得的波长值。由于选用的标准具器件其输出信号为等间距的峰值系统,两个波峰间距约为0.8 nm,参考波长的峰值 λ_r 也是已知的,而与波长对应的时间变量都可从示波器上得到,由于系统中核心器件FP滤波器存在迟滞性,以及其本身容性负载带来驱动电压的非线性等问题,不能简单的通过时间量绝对值的关系来推倒对应时刻波长值,所以需引入最小范围差值计算的方法。即在已知 t_i, t_r 和 $t_1, t_2, t_3, \dots$ 以及 λ_r 和标准具峰值波长值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 的前提下,利用最小范围插值算法可以精确地求出测量FBG的波长值 λ_i ^[4]。

具体方法为:查找与 t_i 最接近的两个标准具峰值时间 t_a, t_b ,利用 t_r 时刻对应的波长 λ_r ,找到与 λ_r 最近的标准具峰值,根据标准具产品信息提供的峰值表(提前录入程序内),查表数出 t_a, t_b 时刻所对应的标准具波长峰值 λ_a, λ_b ,得到以上条件后,由线性插值公式可求得 λ_i 。即

$$\frac{\lambda_i - \lambda_a}{t_i - t_a} = \frac{\lambda_b - \lambda_a}{t_b - t_a} \quad (1)$$

2 波长参考器件

目前F-P腔解调仪表中使用的标准具器件信道间隔一般为100 GHz,即每两个相邻透过峰之间的间隔为

800 pm,如果采用普通的FBG传感器作为参考波长,其中心波长随温度变化的趋势约为10 pm/℃。在环境温度变化较小的情况下,存在中心波长偏移从而导致解调数据存在较大误差的问题;当环境温度变化较大时,参考FBG的中心波长产生较大偏移,很可能移出标准具上与参考FBG相邻的两个透过峰中的一个,从而导致解调数据错误。所以针对温度对FBG中心波长的影响,解调仪表中需要选用一种受温度影响较小的波长参考器件。

目前,国外仪表中使用的波长参考器件一般为GASCELL气体吸收式器件(见图3),其有非常稳定的温度特性,一般采用几种气体按照一定的比例混合封装,从而达到控制中心波长的目的。这种波长参考器件体积结构比较小巧,适合用于机载化解调仪表中。由于这种气体吸收器件中填充的气体一般为乙炔、氰化氢及一氧化碳,常温下乙炔极易燃,而氰化氢则为剧毒气体,所以国内暂无厂家可以生产。目前尚未找到合适的途径在国外购买,且器件价格昂贵,不适于降低仪表研发的成本。

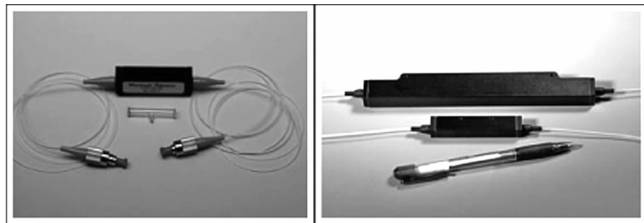


图3 GASCELL气体吸收式器件

目前,国内解调仪表中应用的波长参考器件一般是一种直接购买的基于多光束干涉原理的产品,此种产品经过恒温处理及加入滤光片,在一定温度范围内受温度影响较小,但体积较大,并且插入损耗较大,较适合实验室应用,不适于应用到机载小型化仪表中。

为适应仪表小型化要求,最好能够采用某种方法固定FBG的中心波长使其有稳定的中心波长值,而FBG中心波长随温度变化的现象非常明显,主要原因在于光纤在环境温度变化时表现出来的热胀冷缩现象以及其本身对于温度变化所特有的热敏现象。

本设计方案是利用负热膨胀系数材料热缩冷胀的性质来弥补FBG在环境温度变化下的热胀冷缩和热敏现象。

3 钨酸锆负热膨胀材料

自然界中存在一种材料,随着温度变化,其物

理特性呈现与常规热胀冷缩相反的现象,即热缩冷胀,称之为负热膨胀材料^[5]。钨酸锆(ZrW_2O_8)就是一种典型的负热膨胀材料,其在很大的温度范围内($-200 \sim 800\text{ }^\circ\text{C}$)具有较大的各向同性负热膨胀特点。

ZrW_2O_8 材料之所以会产生负膨胀现象,主要原因是 $\text{M}-\text{O}-\text{M}$ 中氧原子的横向热运动,其分子结构如图4所示。由于氧原子振动垂直于两个金属原子的连线,当温度升高时,氧原子运动加剧,两个金属原子距离缩短,从而导致体积的整体缩小。 ZrW_2O_8 负膨胀原理就是基于这种模型。

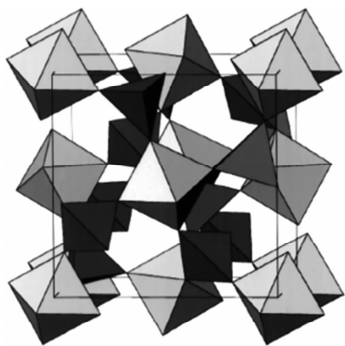


图4 立方 ZrW_2O_8 的晶体结构

这种材料的制备方法比较复杂,其在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 以下具有很高的动力学稳定性。查阅文献资料得知,在 $-200 \sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内 ZrW_2O_8 的线膨胀系数基本上恒为 $-8.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[6]。

本文应用到的负热膨胀系数材料为钨酸锆(ZrW_2O_8),由江苏大学材料学院提供,根据他们提供的材料性能数据显示,此材料在 $15 \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的体膨胀系数为 $-24.81 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,各向同性,不会发生相变,表面可以抛光,抛光后表面如玻璃一样光滑。

4 膨胀系数理论计算

外界温度的改变引起波长漂移的原因主要有光纤热膨胀效应、光纤热光效应以及光纤内部热应力引起的弹光效应^[1]。

Bragg 波长 λ 与温度 T 的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(\alpha - \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{d\nu} \frac{d\nu}{dT} \right) \Delta T \quad (2)$$

式中: α 为光纤材料的体膨胀系数; ν 为光纤归一化频率; n_{eff} 为光纤光栅反向耦合模的有效折射率。公式(2)可简写为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = K_t \Delta T \quad (3)$$

式中: K_t 为 FBG 的温度灵敏系数,通常 $K_t = 9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

本文采用 $15 \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的温度灵敏系数,材料体膨胀系数为 $\alpha = -24.81 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,同时设线膨胀系数为 β ,材料形状为立方体,边长为 L ,体积为 V ,根据体积关系式列方程得

$$[L(1+\beta)]^3 = V(1+\alpha) \quad (4)$$

由于 α 和 β 数量级都在 10^{-6} ,因此对公式(4)整理并忽略高次项,得到

$$\beta = \frac{\alpha}{3} \quad (5)$$

所以材料线膨胀系数约为 $-8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,绝对值与 FBG 的膨胀系数较吻合。从理论上能够达到设计目的。

5 材料与 FBG 粘贴性能测试实验及分析

为了达到设计目的,如图5所示制作一个光纤夹持装置,用来保持光纤在粘贴过程中能够保持受力状态。将材料与光栅置于中间平台部分,光纤在两端夹持部分夹紧,通过转动手轮,移动夹持部分,从而给予光纤一定的拉力,并可以在很长一段时间内保持住拉力效果。给 FBG 预加一定应力的目的是为了能够配合负热材料的特性,给予 FBG 充分的波长变化空间。

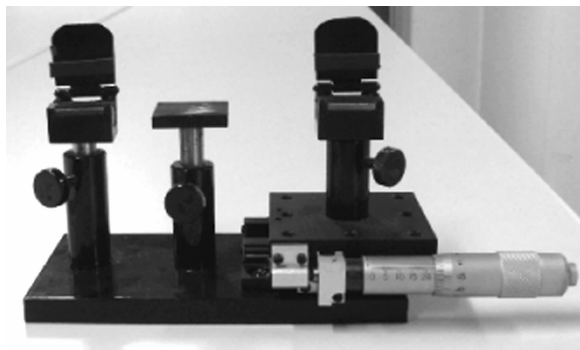


图5 光纤夹持装置

5.1 第一次实验

用 MOI 公司生产的光纤光栅解调仪表 SI425 全程观察,FBG 初始中心波长是 1572.9 nm ,加一定的应力,经过一段时间后,稳定在 1573.507 nm ,此时用强力胶将光纤两端很小一部分粘贴在材料表面,待胶充分固化后,把应力卸载后,观察 SI425 显示的中心波长为 1573.443 nm ,将粘贴好的 FBG 连同材料一起放到 $70 \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 热水里,观察 SI425 读数变为 1573.5 nm ,中心波长增加了 57 pm ,从热水中取出来,放到室温下

稳定后,中心波长显示为 1572.901 nm,预加应力全部消失,此时很容易就能将 FBG 连同固化后的强力胶从材料表面取下,分析原因是材料受潮后,强力胶脱落。

5.2 第二次实验

针对实验一出现的问题改进设计方案,在材料两端开两个小孔,用螺钉穿过,固定上两个小的金属片,将 FBG 粘贴在金属片上,这样可以防止因材料关系导致的粘贴不牢固。选用的 FBG 初始中心波长为 1555.101 nm,这次所加应力比第一次要大,把光纤两端用强力胶粘贴在材料两边的金属片上,粘贴部分很小,中心波长为 1556.131 nm,固化后去掉应力,发现中心波长迅速减少到 1555.376 nm。分析原因为粘贴点过小,本次实验所用到的负热材料尺寸较小,在工艺上较难控制粘贴点,从而导致 FBG 在粘贴时可用部分很少,如果强力胶放的太多,会顺着光纤流到中心光栅处,固化后在 SI425 上会解调出多个中心波长的啁啾光栅现象(实验中出现了此现象)。

5.3 第三次实验

采用环氧树脂胶粘贴 FBG。在材料的一侧用环氧树脂将整个 FBG 与材料黏合,经过约 40 h 的固化以保证环氧树脂与材料分子间的充分黏合。图 6 中最上面的材料粘贴面颜色较深,是因为这块材料之前经过了砂纸打磨处理,但就打磨的效果可以看出材料的致密度并不是很高。



图6 负膨胀材料与 FBG 贴合效果图

实验的目的是要测试 FBG 与负热材料粘贴后中心波长值随温度变化的情况,为了确保实验数据的准确性,此实验在温箱中进行,并且选了一个常温(20℃)下中心波长值为 1550.505 nm 的 FBG 做为参考进行比对。

将与材料粘贴好的三个 FBG 以及比对 FBG 一起放入温箱中,温箱的温度设置为随时间线性变化,用 SI425 全程记录这四个 FBG 中心波长(分别记为 λ_{c1} , λ_{c2} , λ_{c3} , λ_{c4})随温度变化的数据,测试记录了从 10℃

到 70℃ 的变化情况,以每 5℃ 为节点取一组数据,数据如表 1 所示。

表1 温度 T 与中心波长值 λ_c 的关系

$T/^\circ\text{C}$	中心波长值 λ_c/nm			
	λ_{c1}	λ_{c2}	λ_{c3}	λ_{c4}
10	1543.542	1545.598	1549.201	1550.414
15	1543.574	1545.633	1549.241	1550.469
20	1543.601	1545.664	1549.269	1550.505
25	1543.644	1545.702	1549.308	1550.553
30	1543.671	1545.729	1549.357	1550.602
35	1543.711	1545.787	1549.396	1550.654
40	1543.747	1545.826	1549.437	1550.699
45	1543.775	1545.851	1549.413	1550.747
50	1543.806	1545.883	1549.384	1550.798
55	1543.847	1545.868	1549.399	1550.844
60	1543.873	1545.821	1549.344	1550.895
65	1543.901	1545.831	1549.335	1550.938
70	1543.935	1545.841	1549.362	1551.006

将表 1 中列出的数据进行处理,以便直观地比出变化趋势,并进行描点做图,四个 FBG 的变化曲线图分别如图 7 所示。

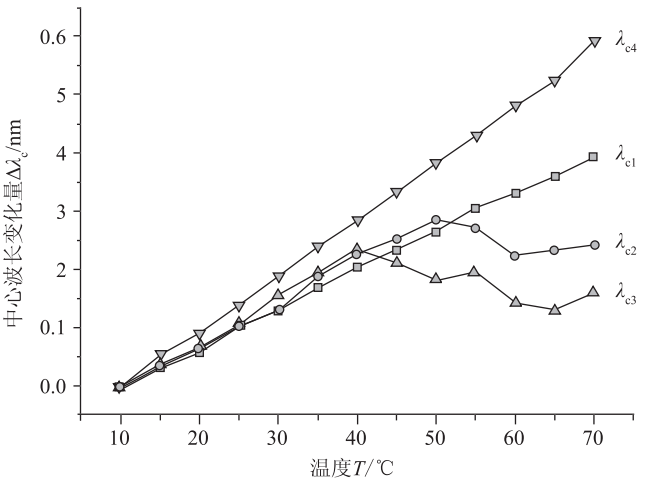


图7 中心波长随温度变化归一化曲线图

图 7 中已经分别标出了四条曲线对应的 FBG 中心波长值,可以看出,在温度随时间变化成线性关系时,未与负热材料粘贴的 1550 nm FBG 的中心波长随温度变化基本呈现线性关系,并且变化量约为 10 pm/℃,与理论值吻合,数据可靠性较高。其他三条曲线斜率

均低于 1550 nm FBG, 说明负热材料受热收缩的特性在一定程度上弥补了光纤光栅的热灵敏现象, 从曲线上来看, 在 40 ℃ 之后, 随着温度变化, 材料的负膨胀特性尤为明显, 正常 FBG 在温度升高 60 ℃ 的情况下, 中心波长一般会增大 600 pm 左右, 而加入负热材料后, 实际效果可以将波长增长控制在 200 ~ 300 pm 左右, 起到了控制中心波长受温度影响的作用。F-P 腔解调仪表应用到的标准具采用国际标准窗口分布, 每两个透过波长值之间的间隔是 800 pm, 只要确保参考波长在温度变化下中心波长值的变化量小于 ± 400 pm, 就可以满足所设计的解调系统的算法实现。在 10 ~ 70 ℃ 加入负热材料做为参考波长的设计方案是可行的。

本文所设计的 F-P 腔解调仪旨在满足机载设备需求, 考虑到机载设备存在低温影响情况, 用上述几个 FBG 在温箱中做了负温度的冲击重复实验, 温度从 -50 ℃ 到 10 ℃。从 SI425 显示的数据来看, 负膨胀材料在低温冲击下很难补偿 FBG 中心波长值随温度的变化, 由于实验失败, 本文中并没有给出负温度下的实验数据。

负温度实验结束后, 打开温箱取出试验件, 发现三个试验件全部出现了相同的问题, 所有材料都沿着环氧树脂的粘贴面断裂, 如图 8 所示。

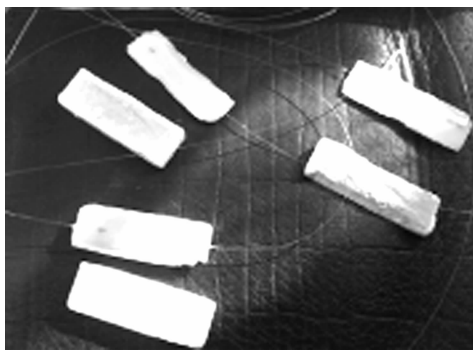


图 8 材料沿粘贴面断裂实物图

出现上述现象的原因可能是由于温箱内湿度过大, 在负温度时导致材料的特性发生了改变, 但主要原因

应该与材料本身的致密度有关, 在环氧树脂粘贴牢固的情况下, 材料的致密度直接关系到热胀冷缩和热缩冷胀两种反作用力的抵消效果, 当材料的致密度不高时, 在两种反作用力的相互作用下, 粘贴部分没有出现脱离, 反而是材料本身承受不住这种反复作用力, 从而出现断裂情况。

6 结论

本文通过利用负热膨胀材料制备波长参考器件的试验研究, 得到如下结论:

1) 在 10 ~ 70 ℃ 范围内, 负热膨胀材料对 FBG 波长变化的抵消作用比较明显, 但在低温环境下, 负热材料的作用没有表现出来, 且在低温下材料很容易碎裂。

2) 波长参考器件是 F-P 腔解调仪表中一个重要的组成部分, 本文中提出的方法在一定程度上解决了 FBG 随温度变化的问题, 且可以制作体积很小的波长参考器件, 但此种方法对负热材料的特性有着较高的要求, 需要材料的致密度很高, 并且在粘贴工艺方面, 也需要进行更多的实验选取合适的粘贴方法。

参考文献

- [1] 饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 杜卫冲, 郑建成. 一种测定光纤光栅布拉格反射波长位移的简单方法[J]. 光学学报, 1996, 16(11): 1636 - 1640.
- [3] 谢芳, 王慧琴. 用光纤 F-P 滤波器解调的光纤光栅传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2003, 14(4): 359 - 362.
- [4] Serge M Melle, Liu Kexing, Raymond M Measures. A Passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensor[J]. IEEE Photo. Tech. Lett, 1992, 4(5): 516 - 518.
- [5] 徐伟, 徐桂芳, 管艾荣. 负热膨胀填料钨酸锆对环氧封装材料性能影响[J]. 热固性树脂, 2008, 23(1): 22 - 25.
- [6] 谢修好, 黄承亚. 负热膨胀材料钨酸锆研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(3): 49 - 53.

《宇航计测技术》2016 年第 1 期目次

数据链测试仿真评估中的信道与链路干扰仿真技术
军车辆外部射频干扰试验测试技术研究
在片功率参数校准方法研究
卫星双向时间传递调制解调器跟踪环路设计
宽带高性能 SMA 匹配负载的研制
基于北斗定位的多义路径识别解决方案
抗振晶体振荡器的仿真设计
氢原子钟电离谱线对振荡信号的影响

多频 GNSS 电离层折射误差修正方法
一种基于数字采样技术的电压波动测量系统
一种改进型导电塑料电位计研制
一种小阻值电阻测量装置的研究与设计
多通道数字电感传感器的设计
直流电源输出端耦合的高频分量测试方法
LabVIEWd 在锂离子电池测试系统中的应用研究