

基于变刚度结构的光纤布拉格光栅 低温环境下的温度增敏方法研究^{*}

杨韬略, 王省哲[†]

兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 土木工程与力学学院, 兰州 730000

收稿日期: 2018-07-29; 接收日期: 2018-10-29

【摘要】 光纤布拉格光栅采用非电磁信号测试方式, 具有显著的抗电磁干扰以及可嵌入被测结构内部等特性, 已成为近些年广受关注的光学应变、温度传感与测试新技术. 但在极端条件下 (如超低温环境), 光纤由于受到其自身材料特性的局限, 传感特性不明显甚至限制了其应用. 基于结构变刚度的力学增敏方法, 本文提出了一种适用于低温区的光纤布拉格光栅温度传感增敏的结构设计方法. 研究结果表明: 该传感结构可有效感应低温下的温度变化, 增敏效果明显; 并获得增敏效果随结构材料与几何特性的依赖关系, 经过优化可使得光栅区对温度和应变的敏感性大大提高, 甚至提高 1 个数量级. 最后, 完成了这一增敏结构的设计和制备, 实验验证了所提方法的有效性和可靠性.

关键词: 超低温; 温度传感器; 光纤布拉格光栅; 增敏结构设计; 低温实验

PACS: O39; TH741

Method of Enhancement of Temperaturesensitivity for Fiber Bragg Grating at Low Temperature Based on a Variable Stiffness Structure^{*}

YANG Taolue, WANG Xingzhe[†]

Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Ministry of Education,

College of Civil Engineering and Mechanic, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Received date: 2018-07-29; accepted date: 2018-10-29

【Abstract】 Fiber Bragg Gratings (FBG) have been widely used in optical strain, temperature measurements as one of non-electromagnetic signal testing methods. They have advantage of significant anti-electromagnetic interference and can be embedded inside of the structure. However, under extreme conditions (such as cryogenic temperature), the optical fibers due to the limitations of the material characteristics, their sensing characteristics are invalid which even limit applications. Based on the method of changing structural stiffness, this paper presents a structural design of enhancement of temperature sensitivity for the fiber Bragg grating sensor in low-temperature region. The results show that the FBG can effectively work at low temperature, and the temperature sensitivity is obviously enhanced. The sensitivity dependence on structural material and geometrical properties is obtained, and the sensitivities of the grating region related to temperature and strain are optimized to even increase an order of magnitude. Finally, we completed the design and manufacture of this structure to validate the proposed method.

Keywords: Ultra-low temperature; Temperature sensor; FBG; Sensitivity enhancement structure; Low-temperature experiment

PACS: 7460, 7490, 0290

^{*} 国家自然科学基金项目 (11672120, 11327802) 资助的课题.

[†] xzwang@lzu.edu.cn

1 引言

光纤光栅作为一种新型的传感器件,相比较于传统电、磁传感器件,具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小及信号损耗小等显著优点.1978年,加拿大通信研究中心 Hill 等人首次发现了掺铒光纤具有光敏性,并研制了世界上第一根光纤光栅^[1].随后随着光栅写入技术的改进和优化,光纤光栅的制作成本和周期均大为降低,性能大幅提高,使其在现代工业众多苛刻测量环境下的应用受到广泛的关注.

目前,光纤布拉格光栅(FBG)是使用较广和较为成熟的一种光纤光栅,通过外界物理参量对 FBG 布拉格波长的调制来获取传感信息.由于 FBG 以反射波长作为信号载体(即波长调制),克服了传统电测法的一些弊端^[2],使其作为应变、温度传感器件得到广泛应用.此外,通过在单根光纤上刻入多个不同布拉格波长的光栅,可实现光纤的准分布式测量.通过将光纤光栅埋入到结构的重要部位或内部,在土木建筑工程领域的桥梁、水坝、建筑物的实时应变检测及结构服役过程中的长时检测和监控已得到广泛应用^[3-5].

近些年,研究人员针对 FBG 光纤进行了改进,并基于抗电磁干扰特性而逐渐应用于热核反应堆、超导电机、航空航天等领域.在一些极端条件下,如超导材料与结构等工作的超低温环境,除了结构的应变测量外,温度也是一重要的需要检测的物理量.围绕光纤光栅的温度测量及高灵敏度传感器的设计,国内外已有一些研究^[6-8],但大多仅限于常温区或较小的温度变化区间.由于大多数光纤的主要成分是二氧化硅,在低温下热膨胀数极小,对温度不再敏感.例如,裸光纤光栅在 77 K 以下低温区光栅周期随温度几乎不变化,其对温度的测量失效^[9].采用在低温敏感的聚四氟乙烯材料包覆的方法,Zaynetdinov 等人^[10]设计了可达到 77 K 温区下,甚至更低温度的温度传感器.欧洲核子中心 Chiuchiolo 等^[15],Ramalingam 等人^[16]将 FBG 光纤埋入 Nb₃Sn 低温超导磁体结构中监测应变的变化,以及用于低温(4.2 K)和高背景磁场(8 T)下线圈的应变监测等,证实了光纤测试方法在极端条件下的适用性.基于光腔衰荡原理,Yarai 等人^[17]通过光强度放大实现了 FBG 光纤在 20 °C 下达到 0.02 °C 的温度分辨率.Li 等人^[18]在 77 K 低温下利用 FBG 在氩中微子

实验束流管和低温泵的实验中作为位移传感器来精准监控阀门位置.通过激光辅助无掩模微沉积(LAMM)和化学镀镍等工艺来制备双材料度涂层的组合制造方法,Zhang 等人^[19]实现了 FBG 光纤的温度敏感系数比裸光栅提高两倍.然而,采用传统的温度增敏材料包覆的温度测试方法,对于温度响应的增敏极限受到包覆材料热膨胀极限的限制,并且低温环境下由于包覆材料引起的脱胶等因素使得温度增敏丧失.

本文基于结构变刚度方法提出了一种适用于低温下温度传感增敏的结构设计途径,即将光纤的光栅段封装于一温度和应变敏感的变刚度的结构中,更好地实现 FBG 光纤在超低温区的温度测量,并获得增敏效果随结构材料与几何特性的依赖关系等.进一步的研究结果表明通过优化材料和结构,可使得光栅区对温度的敏感性得到大大提高,甚至提高 1 个数量级.最后制备了这一 FBG 光纤增敏结构,并在液氮低温下进行了测试,验证本文所提方法的有效性和可靠性.

2 光纤布拉格光栅的结构增敏原理与设计

基于麦克斯韦电磁理论及布拉格光栅反射特性,特定的光栅周期和有效折射率仅对波长带宽很窄的一部分光波具有反射作用.考虑一布拉格光栅周期为 Λ 、光纤有的有效折射率 n_{eff} ,则光栅的反射波 λ 可表示为 $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$.

由于光纤材料二氧化硅的温度效应,其折射率随温度(即热光效应)及内部应力或应变的影响(即弹光效应),即 $n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}(T, \epsilon)$.此外,外部载荷或温度的变化也会导致光栅周期发生改变,即 $\Lambda = \Lambda(T, \epsilon)$.由此,对于处于变形及温度场中的裸光纤,其光栅波长的漂移量可表示为弹光效应 $\Delta\lambda_1$ 、热光效应 $\Delta\lambda_2$ 及光栅周期变化 $\Delta\lambda_3$ 的线性叠加,即:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 + \Delta\lambda_3)/\lambda$$

$$= -P_e\epsilon + P_t\Delta T + (\epsilon + \alpha\Delta T) \quad (1)$$

其中 P_e, P_t, α 分别表示光纤材料的弹光系数、热光系数及线热膨胀系数; $\epsilon, \Delta T$ 分别表示光纤光栅处的应变和温度变化.显然,由于布拉格光纤光栅的波长漂移可以同时由温度和应变引起,因此可以用于材料与结构的温度和应变的传感与检测.其次,由公式(1)也可以看出,若要在某一较小温度变化下 ΔT

得到显著的波长漂移,则需要光纤材料 P_t, α 足够大,但这受制于光纤材料本身属性以及不同温区下的属性。

为了能够实现布拉格光纤光栅低温区下的温度传感特性,本文提出了一基于变刚度结构的温度传感增敏方法。图 1 给出这一光纤光栅温度增敏效应的结构示意图,包括多个不同刚度和线热膨胀系数的同心轴圆柱或圆筒套管材料组成。其中在光栅区采用聚合物 1 制成的空心管(长度为 L_0)进行完全固化封装,光栅区的两端的区域(长度均为 L_1)采用金属空心套管进行光纤穿管封装(光纤与内轴金属管不粘连);将光栅区以及两段金属套管采用聚合物 2 的空心套管进行穿管处理,并在金属套管的两端(长度均为 L_2)采用刚性固定,使得内轴和外轴在端部位移满足理想连续连接。通常,由于聚合物的模量远小于金属套管,从而光纤光栅内轴聚合物封装区域的拉压刚度远小于两端的金属区域,使得结构的大部分变形集中于中间的光栅聚合物区域,起到光栅波长的显著增敏效果。

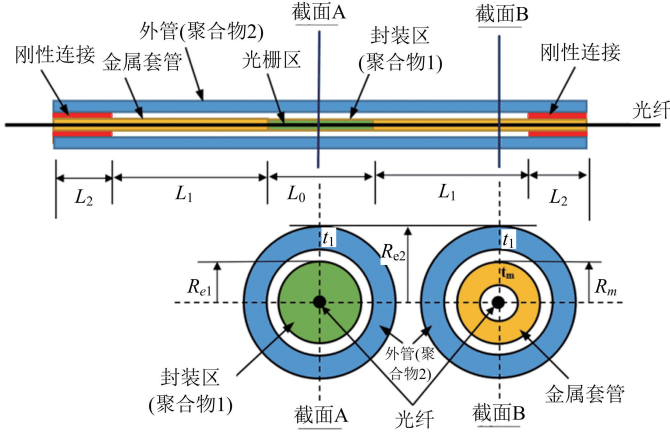


图 1 FBG 变刚度温度增敏结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of variable stiffness structure for enhancement of temperature sensitivity of FBG

3 变刚度结构与增敏效应分析

基于上一节提出的光纤光栅封装及增敏结构,我们进行变温环境下的光栅波长漂移的效应分析。由于光纤光栅区处于聚合物包覆封装以及局部多层复合结构内,其光纤的布拉格反射波长的漂移主要来自包括热光效应,光纤与聚合物 1 包覆物之间失配热应力,整个光栅光纤区域的结构内力或应力而产生的弹光效应,以及光栅区由于包覆材料热膨胀

和增敏结构两者引起的光栅周期的变化,即

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = P_t \Delta T - P_e (\alpha_{e1} - \alpha) \Delta T - P_e \bar{\epsilon} + \bar{\epsilon} + \alpha_{\text{eff}} \Delta T \quad (2)$$

其中 α_{e1} 表示光栅区聚合物的热膨胀系数,在低温区其显著依赖于温度,即 $\alpha_{e1} = \alpha_{e1}(T)$; α_{eff} 为包覆光栅段聚合物和光纤的复合材料的等效热膨胀系数; $\bar{\epsilon}$ 表示增敏结构内光栅区的应变,可得到光栅总的波长漂移为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (P_t + P_e \alpha) \Delta T + (1 - P_e) \alpha_{e1} \Delta T + (1 - P_e) \bar{\epsilon} = \kappa_{T0} \Delta T + \kappa_{T1} \Delta T + (1 - P_e) \bar{\epsilon} \quad (3)$$

其中 κ_{T0}, κ_{T1} 为波长漂移的温度灵敏系数, $(1 - P_e) \bar{\epsilon}$ 为应变引起的波长漂移相关项,从(3)式可以看出:若增大光纤材料的热光系数 P_t , 温度灵敏系数 κ_{T0} 增大,但由于光纤材料一般为二氧化硅,其材料属性基本不变,这一方式对提升温度灵敏系数极为有限;其次,增大光栅区的聚合物包覆材料的热膨胀系数 α_{e1} 能提升温度灵敏系数 κ_{T1} , 这种方式在已有较多研究^[8-10]。此外,针对该式的第三项可以看出,光栅总波长的漂移与应变也密切相关,通过包覆材料以及光栅处的结构设计,进行应变与温度变化的关联,即 $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}(\Delta T)$, 也是可以达到有效增大温度灵敏系数的目的。

假设增敏结构室温下的初始状态无温度应力。考虑整个光纤结构温度降低 ΔT , 由于金属套管的热膨胀系数 α_m 远小于外层聚合物热膨胀系数 α_{e2} , 此时外轴聚合物管收缩,而两端刚性固定约束、内外轴位移连续,则外层聚合物管受轴向拉力,记为 $\bar{F}$ 。相应的应变可表示为

$$\epsilon_2 = \alpha_{e2} \Delta T + \bar{F} / (E_{e2} A_{e2}) \quad (4)$$

这里 A_{e2} 表示外轴聚合物管的有效横截面面积; E_{e2} 为弹性模量,在常温区其一般为常数,低温区则温度对其影响不能忽略,为温度的函数 $E_{e2} = E_{e2}(T)$, 同理 $\alpha_{e2} = \alpha_{e2}(T)$ 。

相反地,内轴的包覆聚合物区域和金属套管组合结构则受到与外轴管大小相等的轴向压力 $\bar{F}$, 不难得到相应的应变分别为

$$\epsilon_m = \alpha_m \Delta T - \bar{F} / (E_m A_m) \quad (5)$$

其中 E_m, A_m 分别表示金属套管区的弹性模量和有效横截面面积; $E_{\text{eff}}, A_{\text{eff}}$ 分别为包覆光栅段聚合物

和光纤的复合材料等效弹性模量和有效横截面积。

基于以上应变分析过程,不难得到结构外轴区域和内轴区域总的变形量为:

$$\bar{L}_2 = \varepsilon_2 (L_0 + 2L_1), \bar{L}_{m1} = 2\varepsilon_m L_1 + \varepsilon_1 L_0 \quad (6)$$

进一步利用结构整体变形协调条件 $\bar{L}_2 = \bar{L}_{m1}$, 可得

$$\bar{F} = \frac{(\alpha_{\text{eff}} - \alpha_{e2}) + 2(\alpha_m - \alpha_{e2})\beta_1}{\frac{1}{E_{\text{eff}}A_{\text{eff}}} + \frac{2\beta_1}{E_m A_m} + \frac{1+2\beta_1}{E_{e2}A_{e2}}} \Delta T \quad (7)$$

其中金属套管区长度与光栅区的长度之比为 $\beta_1 = L_1/L_0$. 将上式代入光栅区的总应变中, 可得

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 &= \left[\alpha_{\text{eff}} - \frac{(\alpha_{\text{eff}} - \alpha_{e2}) + 2(\alpha_m - \alpha_{e2})\beta_1}{1 + \frac{E_{\text{eff}}A_{\text{eff}}}{E_m A_m} 2\beta_1 + \frac{E_{\text{eff}}A_{\text{eff}}}{E_{e2}A_{e2}} (1+2\beta_1)} \right] \Delta T \\ &= \kappa_{T2} \Delta T \end{aligned} \quad (8)$$

将上式代入 (3) 式, 最终可得

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = [\kappa_{T0} + \kappa_{T1} + (1 - P_e) \kappa_{T2}] \Delta T \quad (9)$$

相对于裸光栅光纤的温度增敏系数 κ_{T0} , 本文光栅区温度敏感聚合物包覆以及复合结构设计方法的增敏效率可由增敏因子 η 表示:

$$\eta = [\kappa_{T1} + (1 - P_e) \kappa_{T2}] / \kappa_{T0} \quad (10)$$

4 结果分析、讨论以及实验验证

4.1 理论预测结果

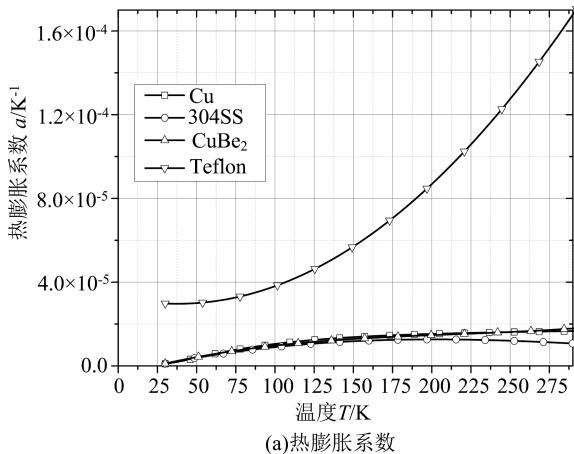
基于建立的变刚度结构光纤布拉格光栅的温度增敏机制和解析表达式, 本节将给出一些影响和提升增敏因子的结果. 结合材料在低温下的性能, 选取

目前较为常用的有机聚合材料特氟龙 (Teflon) 作为包覆材料, 金属套管材料分别选用不锈钢 (304 SS)、铜 (包括纯 Cu 和 CuBe 合金)。

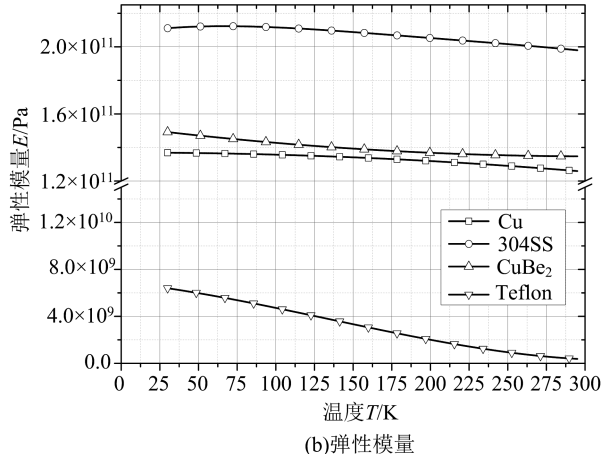
低温环境下, 材料热膨胀系数和弹性模量表现出强的温度依赖性, 可表示为温度的多项式拟合关系:

$$\alpha(T) = \sum_0^4 a_i T^i, E(T) = \sum_0^4 b_i T^i. \text{ 选用文献}^{[13]}$$

以及 MPDB 低温材料数据库^[14] 低温性能参数, 表 1、2 分别给出了不同材料低温下的拟合参数. 为了更直观地显示材料参数的温度依赖关系以及低温下的特性, 图 2 给出了对应的参数随温度变化曲线. 可以看出, 相对于金属材料, 聚合物 Teflon 的热学和力学性能表现出更强的温度依赖性. 考虑到该复合区域光纤半径相对于包覆材料的半径是小量, 其热膨胀系数在低温下也可以忽略不计, 因为在后面的计算中, 为了分析方便起见可以近似选取 $\alpha_{\text{eff}} \approx \alpha_{e1}$, $E_{\text{eff}} \approx E_{e1}$, $A_{\text{eff}} \approx A_{e1}$, 此外, 聚合物热膨胀系数远大于玻璃 $\alpha_{e1} \gg \alpha$, 可忽略光纤热膨胀系数相关项. 对于变刚度结构的几何尺寸, 选取光栅段聚合物包覆长度 $L_0 = 20 \text{ mm}$, 半径 $R_{e1} = 1.39 \text{ mm}$; 内层金属管套的厚度 $t_m = 1 \text{ mm}$, 外层聚合物管套的厚度, 光纤材料的热光系数为 $P_t = 8.3 \times 10^{-6}$, 弹光系数为 $P_e = 0.22$, 考虑到光纤很细并且在低温区随温度的变化很小, 可以近似忽略其温度变化. 此外, 引入 $\beta_2 = R_{e2}/R_{e1}$, $\beta_m = R_m/R_{e1}$ 分别表示外层聚合物套管半径、内层金属套管与光栅区内轴聚合物圆柱半径之比。



(a) 热膨胀系数



(b) 弹性模量

图 2 材料低温属性随温度变化关系

Fig.2 Material properties at low temperature

首先,图3给出了两种温度增敏方式的结果,分别是仅考虑通过聚合物材料包覆(即材料增敏)设计的光栅温度增敏因子($\eta = \kappa_{T1}/\kappa_{T0}$)以及本文所提出的变刚度结构增敏效果的对比(其中聚合物为Teflon,金属为不锈钢304).可以看出,目前文献中较多采用的聚合物包覆增敏方法可以提高增敏效

果,在低温区大概提高3~4倍左右,在接近常温区可以提升10倍左右;而本文提出的结构增敏方式,充分发挥了聚合物包覆增敏效果,同时加入了结构增敏部分,总体增敏效果得到较大幅度提升,在低温区可提高一个数量级,在接近常温区提升幅度可达40~50倍.

表1 低温区各材料的热膨胀系数多项式拟合系数^[13]

Table 1 Polynomial fitting coefficients of thermal expansion coefficients of materials at low temperature					
材料	Teflon	304 SS	CuBe ₂	Cu	
a_0	+3.278e-5	-4.052e-6	-4.647e-6	+2.194e-7	-8.810e-6
a_1	-1.644e-7	+1.880e-7	+2.166e-7	-2.662e-8	+3.292e-7
a_2	+2.173e-9	-6.329e-10	-8.679e-10	+4.801e-10	-1.774e-9
a_3	0	+5.512e-13	+1.340e-12	+6.093e-11	+4.546e-12
a_4	0	0	0	-6.196e-13	-4.484e-15
温区	30.300 K	10.300 K	10.300 K	13.60 K	60.300 K

表2 低温区各材料的弹性模量多项式拟合系数^[14]

Table 2 Polynomial fitting coefficients of elastic modulus of materials at low temperature				
材料	Teflon	304 SS	CuBe ₂	Cu
b_0	6.899e+9	+2.078e+11	+1.525e+11	+1.370e+11
b_1	-1.381e+7	+1.571e+8	-1.164e+8	-3.331e-6
b_2	-1.061e+5	-1.651e+6	+1.903e+5	-1.270e+5
b_3	+2.644e+2	+5.2974e+3	0	0
b_4	0	-6.388e0	0	0
温区	30~295 K	10~295 K	20~310 K	10~300 K

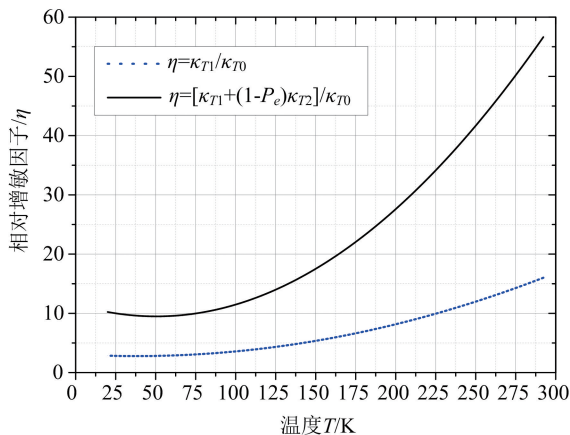


图3 两种增敏方式(聚合物包覆材料增敏、变刚度结构增敏)下增敏因子随温度变化曲线

Fig.3 Sensitivity factors varying with temperature for two methods (polymer coating material, variable stiffness structure)

其次,进一步讨论了变刚度增敏结构的不同几何参数对于增敏效果的影响.结果分析中,当固定某些尺寸时参考 $R_{e2} = 3.0$ mm, $R_m = 1.39$ mm, $L_1 = 40$ mm.图4给出不同几何参数变化下的增敏因子变化曲线.可以看出:随着金属套管与光栅包覆区长度比的增大,温度增敏因子有所增加,在低温区增加幅度较小、温度较高区增加幅值较大(如图4(a));对于外轴聚合物管半径与内轴光栅段包覆聚合物管的半径之比,随着该比值的增大,系统的温度增敏因子有所增加,不同温区的增加幅度也有不同(如图4(b));而对于金属套管与内轴光栅段包覆聚合物管的半径之比而言,随着该比值的增大,增敏效果几乎不变,但较高温区的增敏因子相比低温区的更高(如图4(c)).图5进一步给出了选用不同金属材料套管的温度增敏因子,随着温度的增大增敏因子显著增大,但不同材料的结果几乎相同.由此可见,在该变刚度增敏结构中,对于金属管材料和半径的选择对增敏效果影响不大,在低温下影响甚至可以忽略不计,而其长度以及聚合物套管尺寸的选取对增敏效果具有较大影响.

由图4可知增敏系数 η 随 β_1 与 β_2 增大而增大,约 $\beta_1 = 4$ 与 $\beta_2 = 5$ 处趋于缓和,过大的几何参数意味着传感器尺寸的增加,不利于温度响应.图6给出了在几组较为优化的几何尺寸下的传感器增敏系数随温度的变化曲线,可以明显看出,在低温区温度增敏

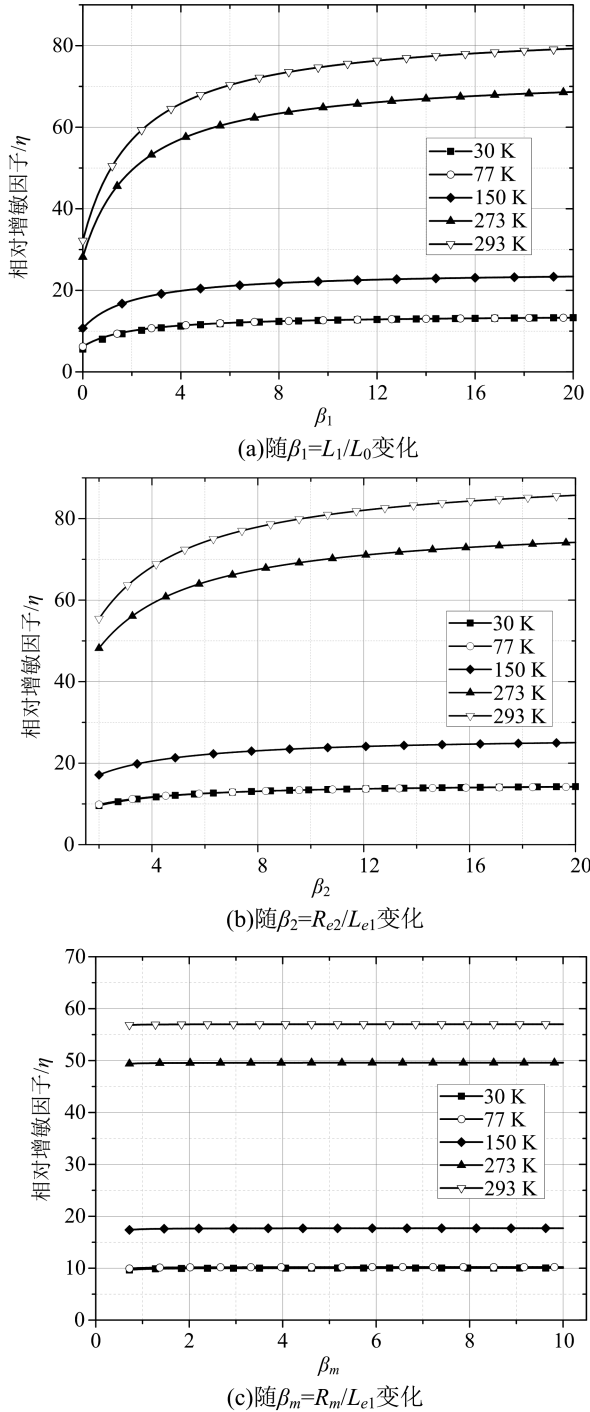


图4 变刚度增敏结构的温度增敏因子随结构几何尺寸变化的依赖关系

Fig. 4 Temperature sensitivity of variable stiffness structure dependence on geometrical dimensions

效果提高了10倍,在常温附近甚至提高到100倍,增敏效果非常显著。

4.2 实验验证

为了进一步验证本文所提方法的有效性,在实验室制备了相应的光纤布拉格光栅温度增敏结构,

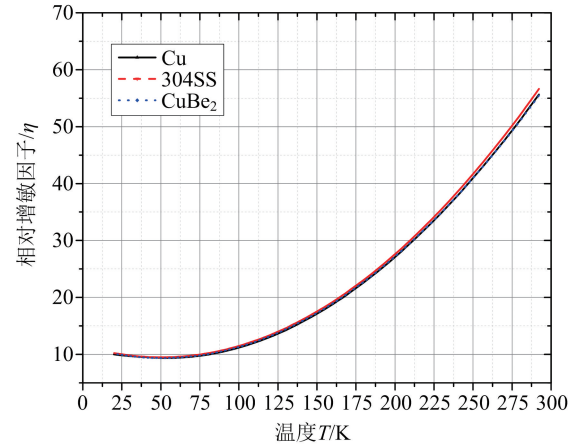


图5 采用不同金属套管材料的增敏因子随温度变化曲线

Fig.5 Sensitivity factor dependence on temperature for different metal materials used in the structure

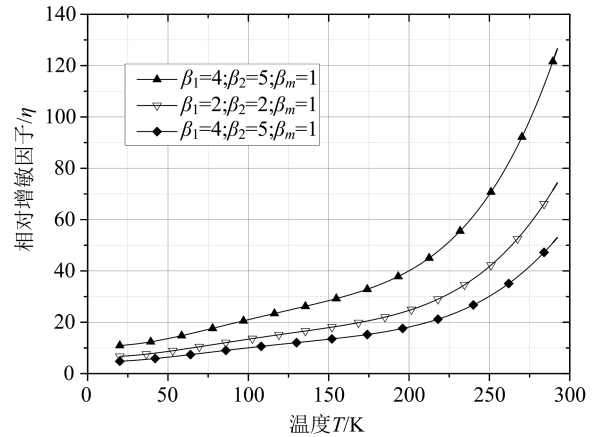


图6 不同尺寸参数下相对增敏因子与温度的关系

Fig.6 Relative sensitization factor and temperature in different size parameters

并在低温液氮温度下开展了实验测试.实验中选取目前较为成熟的 SMF-28 光纤布拉格光栅(光栅中心波长 1550 nm、带宽 0.189 nm、栅区长度为 10 mm,光纤反射率 92% 以上),表面涂有韧性较高的聚合物保护薄层.测试光纤的反射光波调制解调仪器选用 Optical System 200 光谱分析仪(美国 OEtek 公司),具有 8 通道的光纤光栅传感器信号解调、数据采集与处理功能.测试用的变刚度增敏结构几何参数与前面的理论分析一致,材料稍有不同的是光栅区包覆的聚合物选用瑞士 KISLING 公司生产的 ERGO7300 透明双组分环氧树脂胶进行包覆,并与光纤紧密固化连接(如图 7).此外,为了保证结构内、外轴在端部能够实现位移连续,采用了顶丝夹紧的刚性联轴器,保证变化套管的长度而不影响端

部刚性约束条件,也可以采用其他有效的约束处理方式,如焊接、熔接等方式,更为有效地减小结构尺寸.

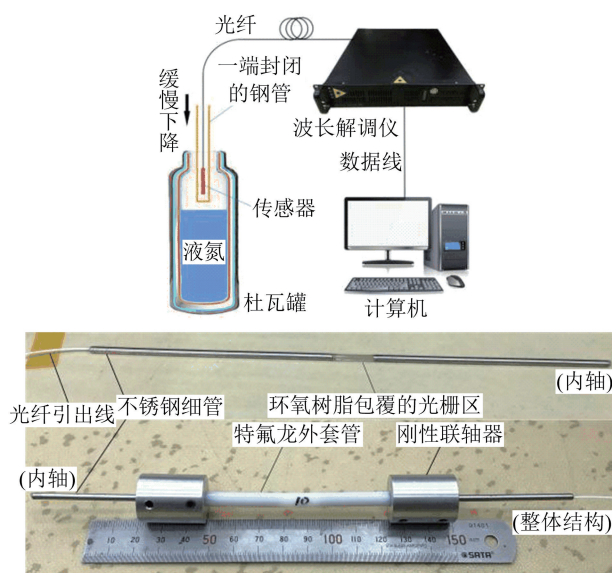


图7 (a)液氮温区的测试系统示意图, (b)制备的变刚度结构的温度增敏光纤传感器

Fig.7 (a) Schematic diagram of experiment system at liquid nitrogen temperature, (b) Temperature-sensitive FBG with variable stiffness structure

在室温下,光纤和结构处于初始状态,光栅的波长对应于出厂标定值,之后进行液氮温区下的实验测试,观测光栅波长的漂移.为了避免直接将结构放入液氮中的冷却冲击影响,实验中将实验样品段先放入一根一端密封一端开口的铜管内,然后将铜管密封一端逐渐放入液氮中,采用铜管壁的热交换冷却管内空气和样品,直至实验温度 77 K.实验预先

对样品进行了反复升降温 3~5 次,使传感器达到稳定状态,具有可靠的重复性后开始进行实验数据采集.所制备的传感器在多次重复测试中也保持了良好的结果一致性.图 8 和表 3 给出了几种不同光纤光栅结构的波长漂移实验测试结果.可以看出,裸光纤光栅 77 K 温度下的相对波长漂移量为大约 -0.002 ,采用聚合物包覆处理的光纤光栅其波长相对漂移量得以提高,约达到裸光纤约 3.7 倍;采用制备的变刚度增敏结构,光栅的波长漂移进一步显著提高,达到裸光纤的 6 倍左右,而且金属套管的长度越大,增敏效果可进一步提升.实验结果表明本文提出的增敏方法是有效的,同时其与理论分析结果的增敏倍数大体吻合,略低于理论预测值.此外,从图中还可以看出,对于包覆了聚合物的光纤以及制备的增敏结构光纤,其测试的波长漂移稳定时间相比于结构简单的裸光纤较长,这是由于随着传感器结构的复杂和尺寸增大,从室温到低温 77 K 的冷却时间较长所致.

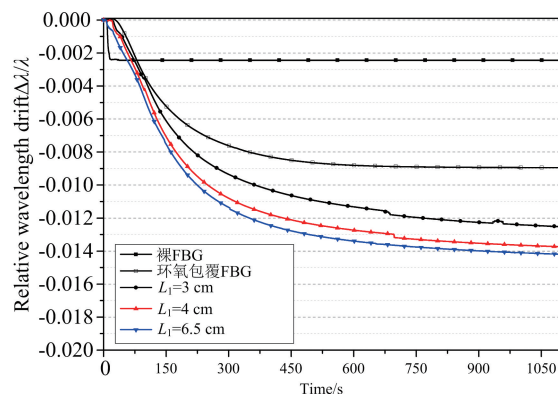


图8 液氮温度下 FBG 波长相对漂移的实验测试结果
Fig.8 Experimental results of relative wavelength drift of FBG at liquid nitrogen temperature

表 3 77 K 下不同结构和尺寸温度敏感性

Table 3 Temperature sensitivity of different structures and dimensions at 77 K

结构	裸光纤	环氧包覆	$L_1 = 3 \text{ cm}$	$L_1 = 4 \text{ cm}$	$L_1 = 6.5 \text{ cm}$
$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	-0.00244	-0.00895	-0.01254	-0.01374	-0.01420
相对增敏因子	1	3.668	5.139	5.631	5.820

5 结 论

基于结构变刚度的力学增敏方法,本文提出了一种适用于低温区下的光纤布拉格光栅温度传感增

敏的结构设计途径,并实现了实验室传感器的制备以及测试.研究表明:该结构增敏可有效感应低温下的温度变化,光栅的波长漂移信号显著增大;聚合物由于低温温度依赖性更显著而对结构的整体温

度增敏效果影响显著;经过优化可使得光栅区对温度和应变的敏感性大大提高,甚至提高 1 个数量级。此外,通过低温 77 K 下的光纤光栅波长的漂移实验测试,验证了本文所提方法的有效性,增敏效果显著

提高,并且实验测试结果与理论预测结果吻合较好。本文的相关研究对极端低温环境下高灵敏度的光纤光栅温度传感器的设计和应用具有重要指导意义。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. *Applied Physics Letters*, **32**(1978), 647.
- [2] 周建华. 光纤光栅传感器应变传递特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [3] 李宏男, 李东升. 地震工程与工程振动, **22**(2002), 82.
- [4] Ou Jin-ping, Zhou Zhi, Wu Zhanjun. *SPIE*, **5129**(2002), 10.
- [5] Kinet D, Goossen K W, Qiu L, et al. *Sensors*, **14**(2014), 7394.
- [6] Hong C Y, Zhang Y F, Zhang M X, et al. *Sensors & Actuators A Physical*, **244**(2016), 184.
- [7] Seo C, Kim T. *Microwave & Optical Technology Letters*, **21**(1999), 162.
- [8] 李阔, 周振安. 地球物理学进展, **23**(2008), 1322.
- [9] James S W, Tatam R P, Twin A, Morgan M, and Noonan P, *Meas. Sci. Technol.*, **13**(2002), 1535.
- [10] Zaynetdinov M, See E M, Geist B, et al. *IEEE Sensors Journal*, **15**(2015), 1908.
- [11] Ecke W, Latka I, Habisreuther T, et al. Fiber Optic Grating Sensors for Structural Health Monitoring at Cryogenic Temperatures[C]//The 14th International Symposium On: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring; International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [12] Latka I, Ecke W, Höfer B, et al. *Cryogenics*, **49**(2009), 490.
- [13] E.D. Marquardt, J.P. Le, and Ray Radebaugh, Cryogenic Material Properties Database[C]//11th International Cryocooler Conference, June 20-22, 2000 Keystone, USA.
- [14] JAHM Software, Inc. MPDB v.7.55 [DB]. www.jahm.com.
- [15] Chiuchiolo A, Bajko M, Perez J C, et al. *IEEE Photonics Journal*, **6**(2014), 1.
- [16] Ramalingam R K, Klaser M, Schneider T, et al. *IEEE Sensors Journal*, **14**(2014), 873.
- [17] Yara A, Hara K. *Japanese Journal of Applied Physics*, **57**(2018), 028002.
- [18] Li J, Neumann H, Ramalingam R. *Cryogenics*, **68**(2015), 36.
- [19] Zhang X, Alemohammad H, Toyserkani E. *Measurement Science & Technology*, **24**(2013), 025106.