

文章编号:1673-9469(2025)06-0097-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.012

基于聚酰亚胺涂覆技术的FBG湿度计性能研究

郭玉君¹,李旺军²,徐成华¹,丁伟³,卜争军³,孙梦雅²

(1.江苏省地质局第一地质大队,江苏南京210041;2.河海大学地球科学与工程学院,江苏南京211100;
3.江苏省地质隧道与地下工程科技有限公司,江苏南京210041)

摘要:为研究聚酰亚胺涂覆的光纤布拉格光栅(FBG)湿度计在使用过程中的性能特征,利用饱和盐溶液控制环境湿度,测试了FBG中心波长随相对湿度的变化特征,研究了温度对湿度灵敏度系数的影响。结果表明:(1)在34.7%~93.1%相对湿度范围内,聚酰亚胺涂覆的FBG湿度计对湿度变化均具有较好的响应。在升温、降温过程,中心波长与相对湿度具有明显的线性关系,湿度灵敏度系数范围为5.1~15.7 pm/%。(2)聚酰亚胺涂覆厚度越大,湿度灵敏度越高,中心波长与相对湿度的线性相关程度也更高。(3)以2号和4号湿度计为例,当温度变化20℃时,两个湿度计湿度灵敏度系数的相对误差分别为4.82%和3.11%,温度对湿度灵敏度系数的影响很小,在实际测量中,温度变化不大时可忽略其对湿度灵敏度系数的影响。(4)以2号和4号湿度计为例,通过室内试验得到了温度灵敏度系数和湿度灵敏度系数,建立了用于同时测量温度与湿度的数学矩阵,使FBG湿度计能够实现对环境温度和湿度的同时测量。

关键词:聚酰亚胺;饱和盐溶液;FBG;湿度计;灵敏度系数

中图分类号:TU411

文献标识码:A

Study on Performance of FBG Hygrometer Based on Polyimide Coating Technology

GUO Yujun¹, LI Wangjun², XU Chenghua¹, DING Wei³, BU Zhengjun³, SUN Mengya²

(1. The First Geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau, Nanjing, Jiangsu 210041, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 3. Jiangsu Geological Tunnel and Underground Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210041, China)

Abstract: In order to study the performance characteristics of polyimide-coated Fiber Bragg Grating (FBG) hygrometer, the saturated salt solution was used to control the ambient humidity, and the variation of FBG center wavelength with relative humidity was tested. The effect of temperature on the sensitivity coefficient of humidity was studied, and the simultaneous measurement of temperature and humidity by this hygrometer was achieved. The results showed that: (1) Within the humidity range of 34.7% to 93.1% in the experimental design, the polyimide-coated FBG humidity meter had a good response to humidity changes. During the humidification and dehumidification processes, the center wavelength exhibited a clear linear relationship with relative humidity, and the humidity sensitivity coefficient ranged from 5.1 to 15.7 pm/%. (2) The thicker the polyimide coating, the higher the humidity sensitivity, and the linear correlation degree between the center wavelength and relative humidity was also higher. (3) Taking the humidity meters No. 2 and No. 4 as examples, the relative errors of the humidity sensitivity coefficients of the two humidity meters due to a 20℃ temperature change were 4.82% and 3.11% respectively. The influence of temperature on the humidity sensitivity coefficient was very small, and its

收稿日期:2025-04-28

基金项目:中国博士后科学基金特别资助项目(2024T170215);江苏省地质工程环境智能监控工程研究中心开放基金资助项目(2023-ZNJKJJ-02,2023-ZNJKJJ-11)

第一作者:郭玉君(1983—),女,河南周口人,硕士,高级工程师,研究方向为岩土工程设计、边坡地质灾害治理。

effect on the humidity sensitivity coefficient can be ignored when the temperature change was not significant in actual measurement. (4) Taking the humidity meters No. 2 and No. 4 as examples, the temperature sensitivity coefficient and humidity sensitivity coefficient were obtained through indoor experiments, and a mathematical matrix for simultaneously measuring temperature and humidity was established, enabling the FBG humidity meter to achieve simultaneous measurement of environmental temperature and humidity.

Key words: polyimide; saturated salt solution; FBG; hygrometer; sensitivity coefficient

湿度的测量对航空、电力、医药、食品、农业、土木等众多领域具有重要意义。近年来,随着科技的发展,湿度传感器的使用领域不断扩大,对其性能与功能提出了更高的要求^[1]。目前,常用的湿度传感器主要有电解质型湿度传感器、陶瓷型湿度传感器及高分子型湿度传感器,其中高分子型湿度传感器应用最为广泛。根据感湿原理,可将传感器分为电容型湿度传感器^[2]、电阻型湿度传感器^[3]、重量型湿度传感器^[4]、缩胀型湿度传感器^[5]等。但这些传统传感器在测量时均存在一定的局限性,如工作周期短、湿滞性明显、灵敏度较低、抗污能力差、长期监测时易受温度影响等,因此亟需寻找一种高精度、响应快、高耐久性、抗电磁干扰的湿度传感器^[6]。

近年来,光纤湿度传感技术因其体积小、抗电磁干扰、成本低、远距离分布式测量、高耐久性等优点引起了人们的广泛关注^[7]。利用该技术,可以实现大规模、实时的相对湿度测量^[8]。根据测量原理,光纤湿度传感技术通常可分为4类,即光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)^[9]、直接光谱^[10]、倏逝波^[11]和干涉测量技术^[12]。其中,FBG可以实现对应力、应变、含水率等物理量的精准测量,具有良好的应用前景。虽然FBG对环境湿度不敏感,但可以通过涂覆对湿度敏感的复合材料,如聚酰亚胺(Polyimide, PI)^[8]、聚乙烯醇^[13]和有机改性陶瓷(ORMOCER®)^[14],实现湿度测量。

PI因其特殊的分子结构而受到越来越多的关注^[15]。PI-FBG湿度计具有高灵敏度、抗干扰特性和长期稳定性等优点,在矿区生态、隧道安全、地下水位变化等监测领域发挥着重要的作用。段新春等^[16]提出了PI-FBG湿度计,通过室内试验验证了其用于环境湿度测量的可行性。Berruti等^[17]发现PI涂覆的FBG湿度传感器能够在-15~20℃的温度范围内实现高分辨率的湿度测量。Ding等^[18]对PI涂覆FBG湿度传感器的性能进行初步试验研究,证明该类传感器具有良好的相对湿度

和湿度测量能力。已有研究对FBG湿度计的可行性与基础应用做了一些探究,证实了其在湿度测试方面的优越性,但FBG湿度计在试验与应用过程具体表现出的性能如何还不能完全确定。

本文制作了PI涂覆的FBG湿度计,并在实验室中评估其性能。利用饱和盐溶液相对湿度法控制相对湿度,测试了不同湿度下FBG中心波长的变化,研究了温度对湿度灵敏度系数的影响,建立了同时测量温度与湿度的数学矩阵,使FBG湿度计实现对温度和湿度的同时测量。

1 基本原理

1.1 饱和盐溶液相对湿度法

对FBG湿度计进行标定与工作性能测试时,为了准确控制外界环境的湿度,需要用到一系列标准湿度环境。饱和盐溶液相对湿度法可用来实现这一目标^[19]。饱和盐溶液与环境之间不断进行物质交换,当在特定温度与大气压达到平衡时,空气中相对湿度会稳定在某一固定值。通过配制不同类型饱和盐溶液即可获得不同的空气相对湿度。因此,在试验过程中要保证3个条件:外界环境保持某一恒定温度、外界大气压为标准大气压、饱和盐溶液与外界环境达到热力学平衡^[6]。

1.2 聚酰亚胺涂覆的FBG湿度计原理

根据耦合波理论,光束进入光纤后,FBG的频选作用使具有特定波长的光被反射,而其他波长的光则被透射出去。反射光的波长即为中心波长 λ_B ,其值与光纤纤芯的折射率和光纤周期相关^[20-22]:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为中心波长,nm; n 为光纤纤芯的有效折射率; Λ 为光栅周期,nm。

对式(1)求偏微分可得中心波长的相对变化量 $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}$ 。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

式中: $\frac{\Delta n}{n}$ 为相对湿度变化; $\frac{\Delta L}{L}$ 为湿度和温度变化引起 FBG 轴向应变的总和。

FBG 湿度计的基础结构如图 1 所示, FBG_1 是具有 PI 涂覆层的 FBG, 对湿度和温度敏感; FBG_2 处于预拉状态, 在两侧用胶水固定, 因此只对温度敏感。涂覆层与光纤紧密耦合, 由弹性理论可得:

$$\frac{\Delta L}{L} = C\beta\Delta S \quad (3)$$

$$C = \frac{E_H(r_H^2 - r_F^2)(1 - 2\mu_F)}{(1 - 2\mu_H)r_F^2 E_F + (r_H^2 - r_F^2)(1 - 2\mu_F)E_H} \quad (4)$$

式中: C 为应变传递系数; β 为聚酰亚胺的湿膨胀系数; ΔS 为相对湿度变化量, %; μ_H 为聚酰亚胺涂层的泊松比; E_H 为聚酰亚胺涂层的弹性模量, Pa; r_H 为聚酰亚胺薄膜截面半径, μm ; μ_F 为光纤包层的泊松比; E_F 为光纤包层的弹性模量, Pa; r_F 为光纤包层的横截面半径, μm 。

因此, FBG_1 中心波长的相对变化量可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = [C(\alpha_H - \alpha_F) + \xi]\Delta T + C(1 - p_e)\beta\Delta S$$

$$= K_{T1}\Delta T + K_{S1}\Delta S \quad (5)$$

式中: p_e 为光纤的有效弹光系数; ξ 为光纤热光系数; α_H 为聚酰亚胺薄膜的线膨胀系数; α_F 为光纤的线膨胀系数; K_{T1} 为 FBG_1 的温度灵敏度系数; K_{S1} 为 FBG_1 的相对湿度灵敏度系数; ΔT 为相对温度变化量, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于 FBG_2 , 已知 $\beta = 0, K_{S2} = 0$, 因此可得:

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = [(1 - p_e)\alpha_F + \xi]\Delta T = K_{T2}\Delta T \quad (6)$$

式中: K_{T2} 为 FBG_2 的温度灵敏度系数。

联立式 (5) (6), 可解得相对温度变化量 ΔT 和相对湿度变化量 ΔS 。

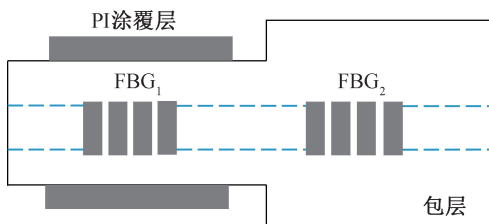


图 1 FBG 湿度传感器的结构

Fig. 1 Structure of the FBG humidity sensor

2 室内试验

2.1 控湿箱的制作

本次试验选用醋酸钾 (CH_3COOK)、氯化镁 (MgCl_2)、碳酸钾 (K_2CO_3)、氯化钠 (NaCl)、氯化钾 (KCl)、硫酸钾 (K_2SO_4) 配制饱和盐溶液, 饱和盐溶液对应的相对湿度范围分别为 34.7%~36.6%、38.7%~38.8%、50.0%~50.4%、73.9%~76.0%、83.4%~83.8%、93.0%~93.1%。将盛有饱和盐溶液的容器放入控湿箱中, 并使用纸胶带及橡皮泥进行密封, 见图 2。本试验的室内温度恒定, 以保证控湿箱内湿度稳定。

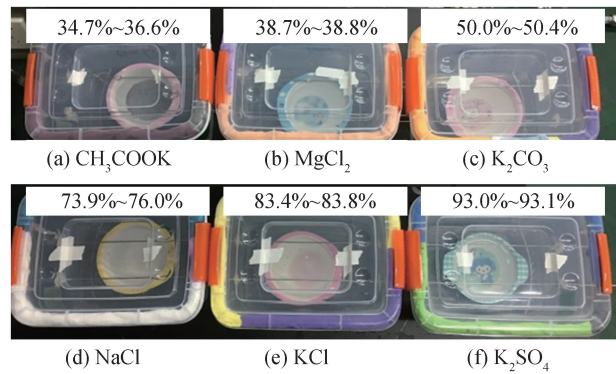


图 2 控湿箱实物图

Fig. 2 Physical diagram of the humidity control box

2.2 模具的制作

湿度计性能易受聚酰亚胺薄膜厚度的影响, 较薄的薄膜可以更好地将应变传递至 FBG, 但受环境的影响也更明显; 较厚的薄膜膨胀更充分, 能产生更显著的应变, 具有更好的重复性, 但是水分扩散路径长, 响应时间慢。因此, 为研究厚度对湿度计性能的影响, 本试验设计了 2 种厚度 (1 mm 和 1.3 mm) 的薄膜。

本试验制作了 5 种玻璃模具, 用于制备厚度均匀、内部含有 FBG 的聚酰亚胺片。玻璃 1 厚 2 mm、长 90 mm、宽 45 mm; 玻璃 2 厚 1 mm、长 30 mm、宽 30 mm; 玻璃 3 厚 1 mm、长 45 mm、宽 25 mm; 玻璃 4 厚 1 mm、长 25 mm、宽 15 mm; 玻璃 5 厚 1.3 mm、长 25 mm、宽 15 mm。其中, 玻璃 1、3 分别制作 1 块, 玻璃 2、4、5 分别制作 2 块。按照如图 3 所示的方式, 用高温固化胶进行固定, 这样玻璃 3 与玻璃 4 (或玻璃 5) 构成长 25 mm、宽 15 mm、高 1 mm (或长 25 mm、宽 15 mm、高 1.3 mm) 的槽。

试验中采用的聚酰胺酸溶液的缩固比为

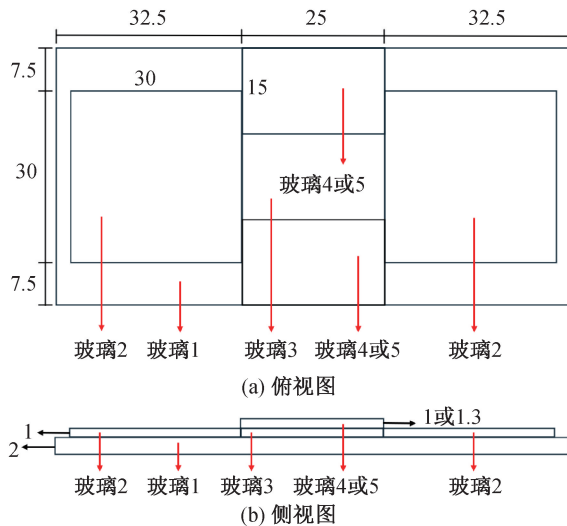


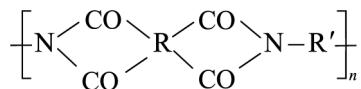
图3 玻璃模具示意图(单位: mm)

Fig. 3 Schematic diagram of glass mold (unit: mm)

20%, FBG 裸丝直径为 $125 \mu\text{m}$, 加上涂覆层后直径分别为 $200 \mu\text{m}$ (玻璃 4)、 $250 \mu\text{m}$ (玻璃 5)。若采用玻璃 4, 聚酰胺酸在槽内加热固化, 体积收缩后形成 $200 \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺, FBG 上、下部有 $37.5 \mu\text{m}$ 厚的膜; 若采用玻璃 5, 聚酰胺酸在槽内加热固化, 体积收缩后形成 $260 \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺, FBG 上部有 $72.5 \mu\text{m}$ 厚的膜, 下部有 $62.5 \mu\text{m}$ 厚的膜。最后用铝质的挡板把玻璃 3 与玻璃 4 (或玻璃 5) 构成的凹槽封起来, 仅留 FBG 穿过的空隙。铝片两端底部开有小孔, FBG 从孔中穿过并置于凹槽中间, 两端用高温胶布拉紧固定, 使光栅部分处于拉紧状态, 且与底面的石英玻璃板平行。

2.3 聚酰亚胺的合成与 FBG 聚酰亚胺膜的制作

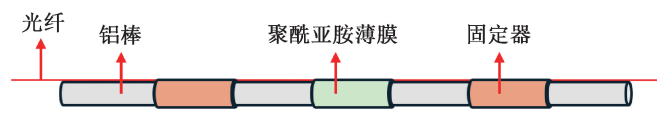
本次试验所采用的湿敏材料为聚酰亚胺, 其通式为



合成聚酰亚胺的方法有一步法、二步法、三步法和气相沉积法^[4-5]。最常用的方法是二步法: 首先通过二酐和二胺反应生成聚酰胺酸, 然后聚酰胺酸再加热脱水成环, 生成聚酰亚胺^[23-24]。本次



(a) 实物图



(b) 示意图

图4 湿度传感元件

Fig. 4 Humidity sensing element

试验采用聚酰胺酸加热固化的方法合成聚酰亚胺, 聚酰胺酸溶液由长春聚明光电有限公司提供。

通过查阅相关资料, 确定了本次试验的亚胺化温度和时间, 具体如下: 从 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$, 持续 1 h ; 再分别加热至 150 、 240 、 $270 \text{ }^\circ\text{C}$, 每个温度下持续 2 h ; 最后冷却至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。聚酰亚胺成型后采用沸煮法进行脱模, 并将其裁剪为长 25 mm 、宽 $3 \sim 4 \text{ mm}$ 的小片, 光栅段置于小片的中间, 然后将传感器固定在细铝棒上, 形成便于在恒湿箱中进行测试的传感元件(图 4)。

2.4 传感器湿度测试

本次试验的环境为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温实验室。实际操作过程中, 饱和盐溶液的湿度与理论值存在一定偏差, 故引入一台相对湿度测量精度为 0.1% 的电子湿度计, 对控湿箱内的湿度进行精准测定。最终制成 4 个 FBG 湿度计。其中, 1 号、3 号是由 1 mm 厚的玻璃模具制成, 2 号、4 号是由 1.3 mm 厚的玻璃模具制成。

经过测试, 发现控湿箱中的湿度变化很小, 可以认为稳定。先将以上 4 个 FBG 湿度计置于室内环境中, FBG 湿度计和光纤温度计接入 FBG 解调仪中, 待数据稳定后, 记录电子湿度计和 FBG 解调仪上的初始数值。再将以上 4 个 FBG 湿度计依次插入控湿箱中, 并迅速用橡皮泥将孔口密封, 见图 5。

最终试验装置如图 6 所示, 待电子湿度计和 FBG 解调仪波长读数都稳定后, 记录控湿箱中的所有读数。然后将所有探头依次放入下一个控湿箱中, 重复以上操作。本次试验设计的湿度变化从小到大, 再从大到小, 对应的饱和盐溶液顺序依次为 $\text{CH}_3\text{COOK} \rightarrow \text{MgCl}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{NaCl} \rightarrow \text{KCl} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{KCl} \rightarrow \text{NaCl} \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{MgCl}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOK}$ 。

为了测定温度对湿度灵敏度系数的影响程度, 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的控湿箱测量后, 将控湿箱温度分别调高到 35 、 $45 \text{ }^\circ\text{C}$, 再重复以上步骤。



(a) 俯视图

(b) 正视图

图 5 控湿箱中的传感探头

Fig. 5 Sensing probe in the constant humidity chamber



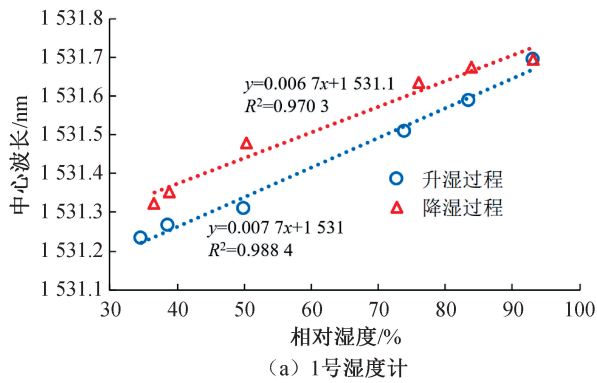
图 6 试验装置图

Fig. 6 Test device diagram

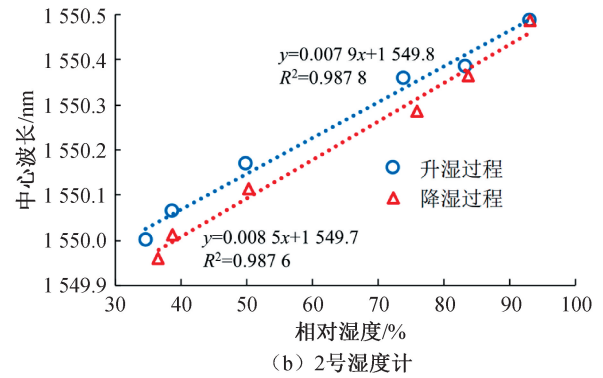
3 试验结果及分析

3.1 升湿、降湿过程湿度计特性

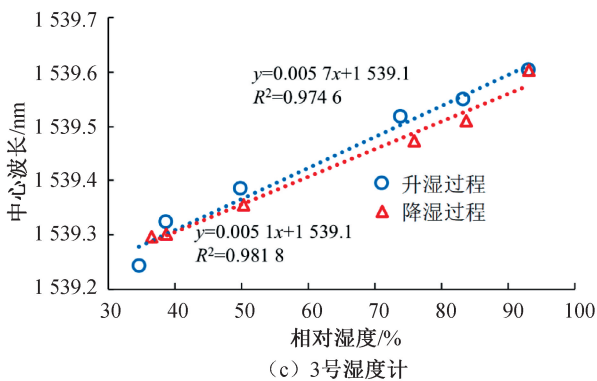
对 FBG 湿度计测得的数据进行温度补偿后, 分别绘制出湿度上升过程(升湿过程)和湿度下降过程(降湿过程)中 1 号、2 号、3 号、4 号 FBG 湿度计的中心波长变化情况, 如图 7 所示。图中直线是利用最小二乘法对散点进行一元线性回归得到的。



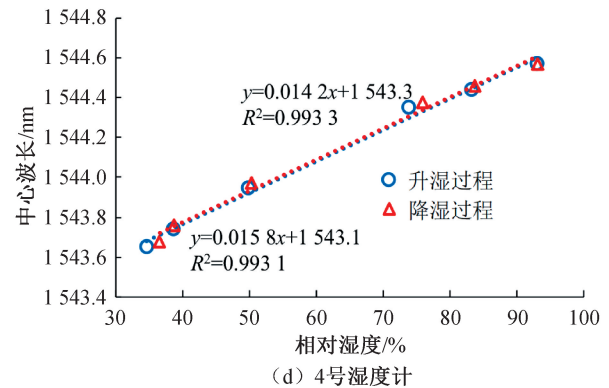
(a) 1号湿度计



(b) 2号湿度计



(c) 3号湿度计



(d) 4号湿度计

图 7 FBG 湿度计在升湿和降湿过程中中心波长变化

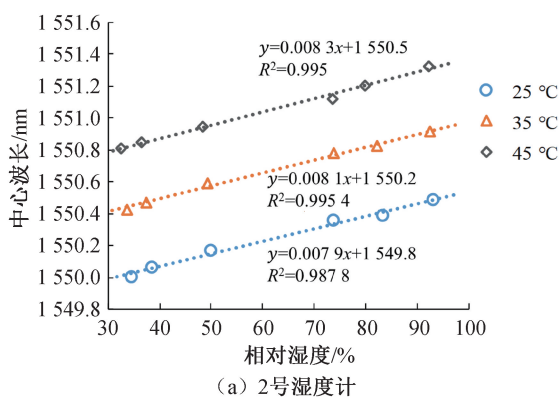
Fig. 7 Central wavelength changes of FBG hygrometer during the humidity increasing and decreasing processes

由图7可以看出,在升湿过程中,随着相对湿度的增加,1—4号湿度计的中心波长均逐渐增大,且中心波长随湿度变化的线性关系较为明显,拟合直线的决定系数分别为0.9884、0.9878、0.9746、0.9917,吻合程度很高,这与理论预期完全一致^[23];此外,从拟合公式和决定系数可以看出,4号湿度计的灵敏度系数最高,为14.2 pm/%;其次是2号湿度计,灵敏度系数为7.9 pm/%;1号、3号湿度计灵敏度系数分别为6.7、5.7 pm/%。总体来讲,4个传感器反应都较为灵敏。

在降湿过程中,随着相对湿度的降低,1—4号湿度计的中心波长均逐渐减小。从拟合公式与决定系数可以看出,4号湿度计的灵敏度最高,为14.2 pm/%,直线拟合度也最好,决定系数达到0.9933,与其升湿过程中的参数很接近,其余湿度计按灵敏度排序依次为2号、1号和3号湿度计。

在升湿和降湿循环过程中,相较于1号和3号湿度计,2号和4号湿度计的线性程度更高,灵敏度也更高。这是因为2号和4号湿度计是用1.3 mm厚的模具制作的,1号和3号湿度计是用1 mm厚模具制作的。模具厚度不同,导致聚酰亚胺涂覆层的厚度不同,因此对湿度变化表现出的敏感程度不同。这与Yeo等^[25]得出的结论相同,即较厚涂层的FBG湿度计具有更高的灵敏度,这是由于较厚层和较大体积的聚酰亚胺湿敏材料可引起较高的应变程度。

由图7还可以看出,1号、2号湿度计在升湿和降湿过程的拟合曲线基本保持平行。在升湿和降湿过程中,1号湿度计灵敏度系数分别为7.7、6.7 pm/%,2号湿度计灵敏度系数分别为7.9、8.5 pm/%,升湿和降湿过程灵敏度系数基本保持一致。但升湿过程和降湿过程中的中心波长存在较明显的差异,可见湿度计的湿滞性还是存在的。



存在湿滞性的主要原因是聚酰亚胺酸亚胺化的加热过程存在问题,这导致羧基(—COOH)含量过少,亚胺化程度过高^[26]。

3号湿度计在升湿、降湿过程中表现出最好的一致性,升湿、降湿过程中拟合曲线的决定系数分别为0.9746、0.9818。湿度灵敏度系数分别为5.7、5.1 pm/%,二者相差很小,两条拟合曲线也最为接近,可见升湿和降湿过程中3号湿度计的参数变化较小,较为稳定。此外,测量散点分布呈现“两头差异小,中间差异大”的特点,较低、较高湿度时的一致性优于中间湿度。

4号湿度计升湿、降湿过程中拟合曲线的决定系数分别为0.9931、0.9933,线性程度较高。湿度灵敏度系数分别为15.7、14.2 pm/%,湿度灵敏度很高。此外,降湿过程的前3个数据点与升湿过程的后3个数据点的重合性很好,在湿度较低时重合性相对降低,说明4号FBG湿度计在高湿度条件时重复稳定性优于低湿度条件。4号湿度计在升湿和降湿过程中的中心波长差为0~31 pm,可见其湿滞性最小,总体性能最优。

3号湿度计的聚酰亚胺薄膜厚度小于4号湿度计,容易受到环境扰动影响,导致重复性较差,在中间湿度条件下出现较大的试验误差。4号湿度计聚酰亚胺薄膜厚度较大,在高湿度条件下膨胀更充分,产生的应变更显著,稳定性优于低湿度条件。

3.2 温度对湿度灵敏度系数的影响

相较于1号、3号FBG湿度计,2号、4号FBG湿度计线性程度更高,灵敏度也更高。因此,选择2号、4号聚酰亚胺涂覆的FBG湿度计在35、45 °C的恒温箱中继续测试,得到不同温度下中心波长与相对湿度的关系,见图8。

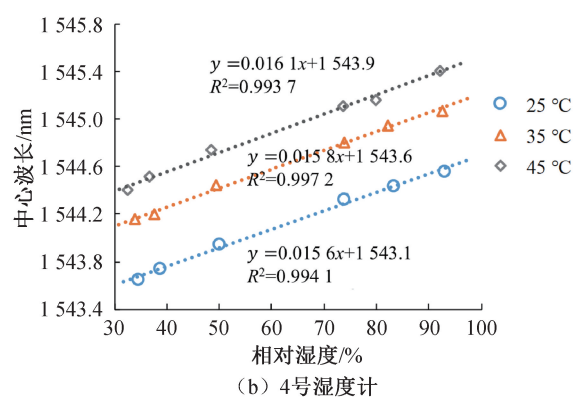


图8 不同温度下相对湿度与中心波长关系

Fig. 8 Relationship between relative humidity and central wavelength at different temperatures

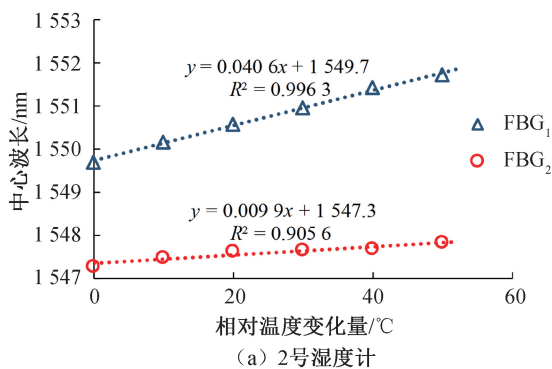
由图 8 可以看出,在不同的温度条件下,2 号、4 号湿度计的中心波长与相对湿度均具有较好的线性关系。2 号湿度计在 25、35、45 °C 时湿度灵敏度系数分别为 7.9、8.1、8.3 pm/%,4 号湿度计在 25、35、45 °C 时湿度灵敏度系数分别为 15.6、15.8、16.1 pm/%,湿度灵敏度系数很接近。对比湿度计在不同温度下的湿度灵敏度系数发现,当温度为 45 °C 时,湿度计的湿度灵敏度最高,其次是 35 °C,最后是 25 °C。因此,在一定温度范围内,温度越高,湿度计的湿度灵敏度越高。

当温度为 25、45 °C 时,2 号湿度计湿度灵敏度系数相差 0.4 pm/%,4 号湿度计湿度灵敏度系数相差 0.5 pm/%。也就是说,当相对湿度变化 1% 时,2 号、4 号湿度计在 45 °C 条件下测得中心波长比 25 °C 条件分别多 0.4 pm 和 0.5 pm,而湿度变化引起的中心波长变化量分别为 8.3 pm 和 16.1 pm,如果不考虑试验过程中 20 °C 的温度变化,误差也仅为 4.82%、3.11%。由此可见,温度对聚酰亚胺涂覆的 FBG 湿度计的灵敏度影响很小,实际测量中若温度变化不大,可以忽略。

3.3 温度灵敏度系数标定

本文以湿度灵敏度较高、重复稳定性较好、中心波长与相对湿度线性程度较高的 4 号湿度计为例,选取 K₂CO₃ 饱和盐溶液控制湿度,对 FBG₂ 与涂覆聚酰亚胺的 FBG₁ 的温度灵敏度系数进行标定,测试在特定湿度下 FBG₁ 与 FBG₂ 湿度计中心波长随温度变化特征。K₂CO₃ 饱和盐溶液所在控湿箱的相对湿度为 50%,测得 FBG₁ 与 FBG₂ 湿度计的中心波长与相对温度变化量的关系曲线如图 9 所示。

由图 9 可以看出,中心波长与相对温度变化量



呈线性关系,与式(5)理论推导结论一致。2 号湿度计中 FBG₁ 与 FBG₂ 的温度灵敏度系数分别为 40.6、9.9 pm/°C;4 号湿度计中 FBG₁ 与 FBG₂ 的温度灵敏度系数分别为 41.9、9.3 pm/°C,两个湿度计的温度灵敏度系数很接近。可以发现,FBG₁ 的温度灵敏度系数均高于 FBG₂,这主要是由于聚酰亚胺涂覆材料的热胀程度高于光纤布拉格光栅,带动 FBG 产生更大的变形,所测得中心波长变化量也就更大。

联立式(5)(6),可得式(7)。观察发现,式(7)是关于 ΔT 和 ΔS 两个未知参量的函数关系式,联立两式即可求得 ΔT 和 ΔS。因此,可以用一个简单的矩阵表示,见式(8)。

$$\begin{cases} \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = K_{T1}\Delta T + K_{S1}\Delta S \\ \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = K_{T2}\Delta T \end{cases} \quad (7)$$

式中:λ₁、λ₂ 分别为 FBG₁ 与 FBG₂ 湿度计的初始中心波长, nm; Δλ₁、Δλ₂ 分别为测得的 FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长变化量, nm。

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{K_{T2} \cdot \lambda_2} \\ \frac{1}{K_{S1} \cdot \lambda_1} & -\frac{K_{T1}}{K_{T2} \cdot \lambda_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据本次试验测得数据,湿度灵敏度系数取升湿与降湿过程的均值。带入式(8),可以得到相对湿度为 50% 时 2 号和 4 号湿度计的表达式,见式(9)(10)。

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.06528 \\ 0.07869 & -0.00265 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.06954 \\ 0.04319 & -0.00291 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

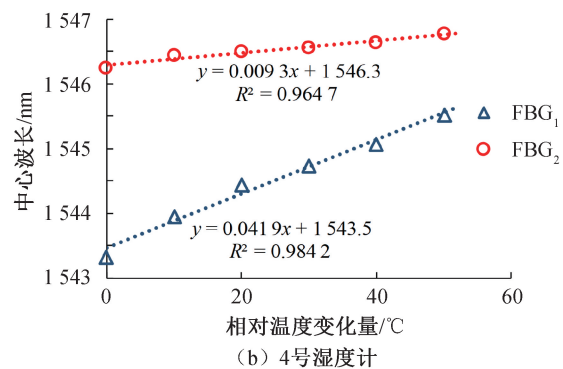


图 9 中心波长变化量与温度变化量关系曲线

Fig. 9 Relationship between the change in central wavelength and the change in temperature

根据式(9)(10)可知,测得 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 后,就可以解得 ΔT 和 ΔS 。本次试验设计的湿度计可以在温度和湿度同时变化时使用,且可以测得温度和湿度变化量。

4 结论

1) 聚酰亚胺涂覆的 FBG 湿度计对湿度变化响应明显,在 34.7%~93.1%相对湿度范围内均表现良好。

2) 在升湿、降湿过程中,FBG 湿度计测得的中心波长与相对湿度呈明显的线性关系。在升湿、降湿循环过程中,4 个 FBG 湿度计存在不同程度的差异性与湿滞性,其中 4 号湿度计的性能最优。

3) 2 号和 4 号湿度计中心波长与相对湿度的线性相关程度和灵敏度均高于 1 号和 3 号湿度计,聚酰亚胺涂覆层较厚的 FBG 湿度计具有更高的灵敏度,其中心波长随相对湿度变化的线性度更好。

4) 当温度变化 20 °C 时,2 号和 4 号湿度计湿度灵敏度系数的相对误差分别为 4.82% 和 3.11%。说明温度对湿度计的测量结果影响很小,在实际测量中可忽略温度的影响。

5) 基于 2 号和 4 号湿度计对温度、湿度响应的灵敏度系数,建立了同时测量环境温度和湿度的数学矩阵,实现了温度和湿度的同时测量。

参考文献:

- [1] QIAN J T, TAN R Q, FENG M X, et al. Humidity sensing using polymers: a critical review of current technologies and emerging trends[J]. *Chemosensors*, 2024, 12(11): 230.
- [2] KIM J H, HONG S M, LEE J S, et al. High sensitivity capacitive humidity sensor with a novel polyimide design fabricated by MEMS technology[C]//IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. IEEE, 2009: 703-706.
- [3] SU P G, LIN P H. Electrical and humidity sensing properties of K+-nano-mica film[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2012, 161(1): 838-844.
- [4] GLÜCK A, HALDER W, LINDNER G, et al. PVDF-excited resonance sensors for gas flow and humidity measurements[J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 1994, 19(1): 554-557.
- [5] 刘崇进,沈家瑞,朱荫兰. 高分子湿度传感器的发展概况和发展方向[J]. *仪表技术与传感器*, 1997(12): 3-6.
- LIU C J, SHEN J R, ZHU Y L. General situations of

- high polymer humidity sensors and its developing direction [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1997(12): 3-6.
- [6] 谷守杰. 含氟聚酰亚胺涂覆的光纤光栅湿度传感器开发及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- GU S J. Development and performance research of fluorinated polyimides coated fiber bragg grating humidity sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [7] JOE H E, YUN H, JO S H, et al. A review on optical fiber sensors for environmental monitoring[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, 5(1): 173-191.
- [8] YEO T L, SUN T, GRATAN K T V. Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 144(2): 280-295.
- [9] KRONENBERG P, RASTOGI P K, GIACCARI P, et al. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(16): 1385-1387.
- [10] POSCH H E, WOLFBEIS O S. Optical sensors, 13: fibre-optic humidity sensor based on fluorescence quenching[J]. *Sensors and Actuators*, 1988, 15(1): 77-83.
- [11] RUSSELL A P, FLETCHER K S. Optical sensor for the determination of moisture[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1985, 170: 209-216.
- [12] ARREGUI F J, LIU Y, MATIAS I R, et al. Optical fiber humidity sensor using a nano Fabry-Perot cavity formed by the ionic self-assembly method[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1999, 59(1): 54-59.
- [13] MIAO Y, LIU B, ZHANG H, et al. Relative humidity sensor based on tilted fiber Bragg grating with polyvinyl alcohol coating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(7): 441-443.
- [14] KORENKO B, ROTHHARDT M, HARTUNG A, et al. Novel fiber-optic relative humidity sensor with thermal compensation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5450-5454.
- [15] ZHANG Q H, DAI M, DING M X, et al. Mechanical properties of BPDA-ODA polyimide fibers [J]. *European Polymer Journal*, 2004, 40(11): 2487-2493.
- [16] 段新春,施斌,孙梦雅,等. FBG 蒸发式湿度计研制及其响应特性研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2018, 54(6): 1075-1084.
- DUAN X C, SHI B, SUN M Y, et al. Study on FBG evaporative hygrometer and its response characteristics [J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 2018, 54(6): 1075-1084.

(下转第 112 页)

- tion Processing Systems(NeurIPS), 2020: 1-10.
- [8] HE K M, FAN H Q, WU Y X, et al. Momentum contrast for unsupervised visual representation learning[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020: 9726-9735.
- [9] GRILL J B, STRUB F, ALTCHÉ F, et al. Bootstrap your own latent-a new approach to self-supervised learning[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, 33: 21271-21284.
- [10] ZBONTAR J, JING L, MISRA I, et al. Barlow twins: self-supervised learning via redundancy reduction[C]//Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning. PMLR, 2021: 12310-12320.
- [11] CHEN X L, HE K M. Exploring simple Siamese representation learning[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021: 15745-15753.
- [12] LIU C, AMODIO M, SHEN L, et al. CUTS: a deep learning and topological framework for multigranular unsupervised medical image segmentation[C]//Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention-MICCAI 2024. Cham: Springer, 2024: 155-165.
- [13] BRUGNONE N, GONOPOLSKIY A, MOYLE M W, et al. Coarse graining of data via inhomogeneous diffusion condensation[C]//2019 IEEE International Conference on Big Data, 2020: 2624-2633.
- [14] KUCHROO M, DISTASIO M, SONG E, et al. Single-cell analysis reveals inflammatory interactions driving macular degeneration[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2589.
- [15] VINCENT L, SOILLE P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583-598.
- [16] FELZENSZWALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient graph-based image segmentation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59: 167-181.
- [17] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11): 2274-2282.
- [18] KIM W, KANEZAKI A, TANAKA M. Unsupervised learning of image segmentation based on differentiable feature clustering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 8055-8068.
- [19] HAMILTON M, ZHANG Z T, HARIHARAN B, et al. Unsupervised semantic segmentation by distilling feature correspondences[PP/OL]. arXiv(2022-03-16) [2024-06-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.08414>. (责任编辑 周雪梅)
- (上接第 104 页)
- [17] BERRUTI G, CONSALES M, GIORDANO M, et al. Radiation hard humidity sensors for high energy physics applications using polyimide-coated fiber Bragg gratings sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 177(11): 94-102.
- [18] DING F X, WANG L T, FANG N, et al. Experimental study on humidity sensing using a FBG sensor with polyimide coating[C]//Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition. IEEE, 2010: 280-281.
- [19] 国际法制计量组织. 饱和盐溶液标准相对湿度值; OIML R121[S]. 北京: 全国物理化学计量技术委员会, 2000. International Organization of Legal Metrology. The standard humidity value relatively of saturated salt solution; OIML R121[S]. Beijing: Metrology Technical Committee on Physical Chemistry (MTC17), 2000.
- [20] HUANG X F, SHENG D R, CEN K F, et al. Low-cost relative humidity sensor based on thermoplastic polyimide-coated fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, 127(2): 518-524.
- [21] 张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. *光子学报*, 2003, 32(10): 1166-1169. ZHANG X D, LI Y L, PENG W D, et al. Design and realization of temperature and relative humidity sensor based on FBG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10): 1166-1169.
- [22] 向光华, 忽满利, 乔学光, 等. 基于聚酰亚胺材料的 FBG 湿度传感特性研究[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(1): 41-45. XIANG G H, HU M L, QIAO X G, et al. Study on the characteristics of FBG humidity sensor based on polyimide[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(1): 41-45.
- [23] 曹红葵. 聚酰亚胺性能及合成方法[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2008, 6(3): 24-26. CAO H K. Properties of polyimide and its synthesis methods[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2008, 6(3): 24-26.
- [24] 丁永红. 聚酰亚胺的合成方法[J]. *化工中间体*, 2011, 8(5): 36-43. DING Y H. Polymerization approach for polyimide preparation[J]. *Chemical Intermediate*, 2011, 8(5): 36-43.
- [25] YEO T L, SUN T, GRATTAN K T V, et al. Polymer-coated fiber Bragg grating for relative humidity sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(5): 1082-1089.
- [26] 崔千红. 聚酰亚胺电容型湿度传感器的研制[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. CUI Q H. Development and fabrication of polyimide capacitive humidity sensors[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (责任编辑 周雪梅)