

Relationship between Temperature and the Response of an Optical Fiber Humidity Sensor Fabricated by Agarose

Hanlang Xu, Zhuoyong Deng, Xiaokang Zhang*

South China University of Technology, Guangzhou
Email: *xkzhang@scut.edu.cn

Received: Feb. 1st, 2013; revised: Feb. 10th, 2013; accepted: Feb. 25th, 2013

Abstract: A doubly cladding single-mode fiber humidity sensor with insertion loss of -0.08 dB and optical power variation of 9.47 dB/% RH in the humidity range from 30% to 100% RH was fabricated by agarose. Its responses to humidity range at the different temperature from 25°C to 34°C were tested with a climatic chamber. Based on the Goff-Gratch formula and the experimental results, it has been confirmed that the agarose coating have a great absorbent capacity in a low relative humidity. The sensor had the sensitivity of 0.3 dB/ $^{\circ}\text{C}$, 0.1 dB/ $^{\circ}\text{C}$ and 0 dB/ $^{\circ}\text{C}$ at the relative humidity of 30% RH, 90% RH and 100% RH, respectively, in the temperature range from 25°C to 34°C . It has also been confirmed that the refractive index of agarose gel was almost equal that of Corning optical fiber cladding material. It was concluded that the temperature of measured gas must be simultaneously monitored in the application of optical fiber humidity sensor and accurate determination of the RH of the gas.

Keywords: Doubly Cladding Single-Mode Optical Fiber Humidity Sensors; Agarose; Saturation Vapor Pressure; Relative Humidity; Temperature

琼脂糖光纤湿度传感器响应特性与温度的关系

许瀚朗, 邓焯泳, 张小康*

华南理工大学, 广州
Email: *xkzhang@scut.edu.cn

收稿日期: 2013年2月1日; 修回日期: 2013年2月10日; 录用日期: 2013年2月25日

摘要: 本文用琼脂糖水凝胶制作了插入损耗为 -0.08 dB、在30%~100% RH相对湿度变化范围的光强变化为15 dB的双包层单模光纤湿度传感器, 在 25°C ~ 34°C 的不同温度条件下, 检测了该传感器输出光强随相对湿度的变化。根据饱和水汽压与温度的关系和实验结果, 证实了被测气体相对湿度较小时, 琼脂糖涂层的吸湿能力强, 对温度变化敏感; 随着相对湿度的升高, 吸湿能力降低。在 25°C ~ 34°C 的温度变化范围内, 被测气体相对湿度分别为30%、90%和100% RH时, 传感器对温度的灵敏度分别为 0.3 dB/ $^{\circ}\text{C}$ 、 0.1 dB/ $^{\circ}\text{C}$ 和 0 dB/ $^{\circ}\text{C}$ 。实验结果还证实, 琼脂糖在饱和吸收水份后的折射率近似等于康宁光纤包层的。本文研究结果说明, 在应用光纤湿度传感器时, 必须同时监测被测气体的温度, 才能严谨地确定被测气体的相对湿度。

关键词: 双包层单模光纤湿度传感器; 琼脂糖; 饱和水汽压; 相对湿度; 温度

1. 引言

湿度传感在环境监测、医药生产与纺织工业等领域有重要的应用价值。光纤湿度传感器与传统的电容

*通讯作者。

或电阻式电量湿度传感器相比, 具有绝缘性能好、抗电磁干扰能力强和安全性高的优点, 它们在武器装备与易燃易爆化学制品的仓储等条件苛刻无法使用电量湿度传感器的领域有广阔发展前途。折射率变化型

光纤湿度传感器基于材料吸水致使其折射率变化原理制成,可检测 100% RH(Relative Humidity, 相对湿度)的高湿度,克服了电量湿度传感测量不能检测高湿度的缺陷^[1,2]。这种湿度传感器具有制作与运行成本低、能实时监测的优势,将在监测混凝土凝固过程中其内部湿度变化、水库大坝内部的渗水状况等领域有独特的应用价值。

已有许多折射率变化型光纤湿度传感器的报道^[1-7]。各种湿敏材料中,琼脂糖在光纤湿度传感器有较多的应用^[1-3,8,9]。我们用琼脂糖作为湿敏材料制作的双包层单模光纤传感器在 30%~100% RH 范围获得了近线性响应,插入损耗仅 0.5 dB,光功率变化达到了 9 dB^[2]。但这些研究工作中,几乎都是在某一温度条件下检测器件对湿度的响应特性,很少文章探讨温度对传感器湿度响应的影响,甚至有报道认为,常温条件下,光纤湿度传感器不需要温度补偿^[6,7]。

本文将根据涉及相对湿度的饱和水气压与温度的关系和光纤湿度传感器的实验结果,分析琼脂糖水凝胶制作的光纤湿度传感器对被测气体相对湿度的响应特性及其与温度的关系,分析温度在光纤相对湿度传感中的作用。

2. 湿度定义及其与温度的关系

湿度是指一定大小空间气体中所含的水蒸气量。常用的有两种表示方法,即绝对湿度和相对湿度。绝对湿度是指一定大小空间中水蒸气的绝对含量,也可称为水气浓度或水气密度。

相对湿度为某一被测气体的水蒸气压与相同温度下饱和蒸气压比值的百分数。常用% RH 表示,

$$\%RH = \left(\frac{e_v}{e_s} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中, e_v 和 e_s 分别表示被测气体中水的蒸气压和相同温度下的饱和水气压。一定大小空间中相对湿度越小,表示空气离饱和态越远,尚有吸收更多水蒸气的能力。即被测气体相对湿度越小,空气越干燥,吸收水蒸气能力越强;反之,相对湿度越大,吸收水蒸气能力越弱,即空气越潮湿。显然,相对湿度给出了大气的潮湿程度,故其使用更广泛。

一定大小空间中的饱和水气压随温度而变。世界气象组织建议的饱和水气压公式是戈夫 - 格雷奇

(Goff-Gratch)公式。假设被测气体的热力学温度为 T , 对平的纯水面,当 $T > 273.15$ K 时,饱和水气压可表示为^[10]:

$$\lg e_v = -a_1 \left(\frac{\tau}{T} - 1 \right) + a_2 \lg \left(\frac{\tau}{T} \right) - a_3 \left[10^{b(1-\tau/\tau)} - 1 \right] + a_4 \left[10^{d(1-\tau/T)} - 1 \right] + \lg(c) \quad (2)$$

式中, $\tau = 373.16$, $a_1 = 7.90298$, $a_2 = 5.02808$, $a_3 = 1.3816 \times 10^{-7}$, $a_4 = 8.1328 \times 10^{-3}$, $b = 11.344$, $d = 3.49149$, $c = 1013.246$, e_s 的单位是 h·Pa(百帕)。图 1 是根据公式(2)得出的、在 0°C~40°C 温度范围内饱和水气压随温度的变化。

3. 光纤湿度传感器的实验研究

实验中用的光纤是康宁 SMF28(8.3/125 μm)裸纤。在一段约 2 米长的光纤中间取 2 cm 长作为传感段区,用光纤钳剥除保护层后,用氢氟酸腐蚀去除部分原有包层,剩余的包层作为内包层,在其外部涂覆湿敏材料作为外包层,从而在传感区构成了双包层结构^[1]。本文制作的双包层结构中的内包层外径为 28 μm 。为保护传感区和便于涂覆材料,在腐蚀后的光纤的两侧分别设置了一条外径为 0.9 mm 的铜线^[11]。用去离子水溶解琼脂糖,将浓度为 5%的琼脂糖水凝胶涂覆在传感区;再将光纤两端分别熔接上尾纤,即完成了折射率变化型双包层单模光纤湿度传感器的制作。让传感器在室温下放置一天后,便可用于实验检测。

图 2 是检测传感器湿度、温度响应特性的实验装置。将光纤传感器放入一个恒温恒湿试验箱中(Binder

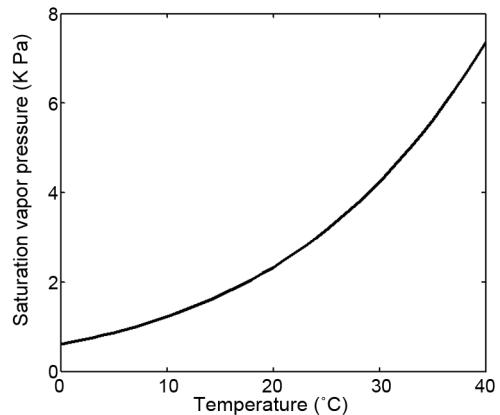


Figure 1. Saturation vapor pressures in the temperature range from 0°C to 40°C

图 1. 在 0°C~40°C 范围内气体饱和水气压随温度的变化

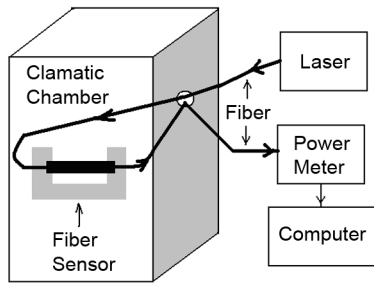


Figure 2. Experiment setup detecting the optical transmission power as a function of the humidity/temperature in ambient air around the sensing head

图 2. 被测气体湿度和温度变化时检测光纤传感器输出光强的实验装置

KBF 240), 光纤的两端分别连接一个台式稳定化光源 (DFB-LD, 1550 nm)与光功率计(均由武汉光迅科技公司提供)。光源的输入功率为 0.08 dBm。

在检测传感器对温湿度的响应之前, 首先对传感器实施老化试验。让试验箱循环运行在 30%~95% RH 之间, 每天完成一次循环, 温度设置在 25°C, 连续工作五天。传感器经历多次低湿度到高湿度的循环后, 使其对湿度有了稳定的响应。然后, 让试验箱从 30%RH 变化到 95% RH, 检测传感器的输出光功率。湿度变化步长为 5% RH, 每一次试验箱的稳定时间约 40 分钟左右。在温度分别为 25°C、28°C、31°C 和 34°C(±0.1°C) 时, 检测了传感器在上述湿度变化范围的输出光功率, 实验结果如图 3 所示。由于试验箱的检测范围有限, 图中 100% RH 的数据是在整个传感区滴上了水之后检测的。如果将传感器段浸入水盘中, 其结果也相同(但要注意避免光纤的弯曲, 以免带来额外损耗)。在光

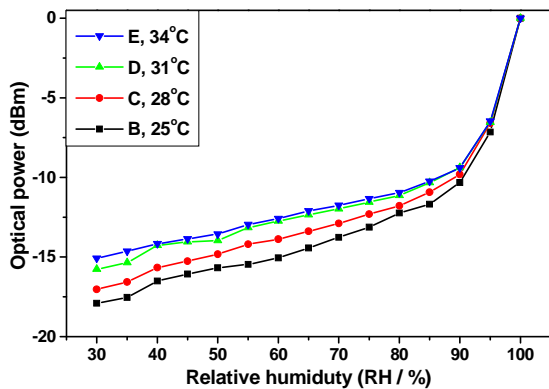


Figure 3. Optical transmission powers of a doubly cladding single-mode fiber humidity sensor versus the RH in ambient air around the sensing head

图 3. 双包层单模光纤传感器输出光强在不同温度下随环境相对湿度的变化

功率计的灵敏度范围内(0.01 dBm), 当不同温度的水滴在传感区后, 相应的输出光功率都相同, 仅有-0.08 dB。

4. 分析与讨论

从图 1 可看出, 温度分别为 20°C 和 30°C 时, 饱和水蒸气压力分别为 2.3379 KPa 和 4.2438 KPa。即, 温度增加 10°C 后, 饱和水蒸气压力增加了约 81%, 因此, 湿敏材料可能吸收的绝对水气也增加了。

图 3 显示, 在同一温度下, 传感器的衰减随相对湿度的增大而降低, 这是因为随着材料吸收水份的增加, 琼脂糖涂层的折射率减小了。当琼脂糖涂层饱和和吸收水分后, 其折射率与光纤原包层的差异达到最小, 即传感器内外包层的折射率差达到最小, 此时传感器的衰减最小。衰减的主要来源有光纤双包层与单包层结合部带来的光场模式耦合损耗、传感器的制作工艺和尾纤与光源的接口。图 3 中在相对湿度 100% RH 时, 传感器的衰减仅-0.08 dB。这说明此时光场的分布十分接近光纤原有的单模分布, 双包层区输出端与单包层光纤的模式耦合损耗很小。即, 琼脂糖涂层饱和吸收水份后, 其折射率已可近似看作等于光纤原包层的折射率。同时, 很小的衰减也说明双包层区由腐蚀方法所获得的界面的光洁度很好。前面讨论的最小衰减值也可称为传感器的插入损耗, 它小于此前的报道^[2]; 此外, 图 3 中属于 34°C 温度下的输出光强变化范围是最小的, 但也达到了 15 dB, 大于此前的报道^[2]。这两方面的进步说明, 相关的制作工艺得到了进一步提高。

从图 3 可看到, 被测气体的相对湿度不变、温度变化时, 传感器输出光强的衰减随温度的变化情况。在相对湿度为 30%、温度变化 9°C(=34°C~25°C)时, 光强衰减的减小量约 2.8 dB。根据公式(2), 相应温度变化导致的饱和水汽压增加了约 2.15 KPa, 那么, 被测气体中的绝对水汽含量增加约 0.65 KPa (=0.3 × 2.15 KPa)。因此, 光强衰减的减小可解释为被测气体中的绝对水汽含量的增加, 导致琼脂糖涂层中的水份也增加了, 因此其折射率减小, 光场模式耦合损耗减小。但在相对湿度为 90%时, 同样的温度升高范围, 被测气体中的绝对水汽含量按比例增加了 1.94 KPa, 但光强衰减的减小仅 0.9 dB。这一结果说明, 在高湿

度下, 琼脂糖涂层的吸收湿气能力下降了, 因此受温度的影响减小了。当整个传感段滴上水(所用的水放置在试验箱内, 使之保持在试验箱所设置的温度上), 传感器输出光强不断增加, 经过一定时间后, 将稳定在一个最大值上, 这时的衰减仅 -0.08 dB, 并且与温度无关。这说明琼脂糖涂层达到了饱和吸收后, 温度对传感器输出光强基本无影响了。

从图 3 还可看到, 4 条曲线均可分为两个近线性响应区, 即 30%~90% RH 和 90%~100% RH。在对传感器进行老化试验和图 3 涉及的实验中, 这种规律具有很好的重复性。采用类似的波导结构, 我们制作过双包层单模光纤温度传感器, 其衰减与折射率变化的关系, 可用波导理论解释^[1,2]。其结构特点是: 外包层厚度超过 125 μm ; 外包层材料在使用的温度范围内随温度变化是线型的。由于图 3 中的线型与温度传感器的衰减曲线不同, 因此, 我们将在下一步的工作中从理论和实验上分析琼脂糖涂层的厚度与传感器衰减特性的关系、分析材料吸湿引起的折射率变化与环境湿度、温度和已有的吸湿状态的关系。但无论如何, 琼脂糖涂层在饱和吸收后使传感器的衰减值达到最小的特点, 可以用于确定一个湿度传感系统的插入损耗和对 100% RH 的定标, 这很有实际应用价值。

根据上述讨论, 在 25°C~34°C 的温度变化范围内, 相对湿度为 30% RH 时, 传感器输出光强的衰减对温度的灵敏度为 0.3 dB/°C; 在相对湿度为 90% RH 时, 为 0.1 dB/°C。

5. 结论

本文制作出了插入损耗为 -0.08 dB、在 30%~100% RH 相对湿度变化范围对应的光强变化为 15 dB 的双包层单模光纤湿度传感器。根据气体饱和水汽压与温度的关系和光纤湿度传感器的实验结果, 分析了用琼脂糖水凝胶制作的光纤湿度传感器对湿度的响应特性与温度的关系。证实了被测气体相对湿度较小时, 琼脂糖涂层的吸湿能力强, 对温度变化敏感; 随着相对湿度的升高, 琼脂糖涂层的吸湿能力降低。在

25°C~34°C 的温度变化范围内, 相对湿度分别为 30% RH、90% RH 和 100% RH 时, 传感器输出光强的衰减对温度的灵敏度分别为 0.3 dB/°C、0.1 dB/°C 和 0 dB/°C。琼脂糖水凝胶在饱和吸收水份后的折射率几乎与康宁光纤包层材料的折射率相同, 这意味着它是一种很适用于光纤传感的湿敏材料。

从本文讨论的光纤湿度传感器对湿度的响应特性与温度的关系以及相对湿度的定义中可看出, 在应用光纤湿度传感器时, 必须同时监测被测气体的温度, 才能严谨地确定被测气体的相对湿度。本文对琼脂糖水凝胶制作的双包层单模光纤湿度传感器的湿度响应特性与温度关系的分析, 将有助于研究光纤湿度传感器的定标方法以及光纤湿度传感系统建立。

参考文献 (References)

- [1] X.-K. Zhang, L. Lan, Z. Kong, et al. Measurable refractive index range for a doubly cladding single mode fiber sensor and its application in temperature and humidity sensing. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7853: 78530H-1~9.
- [2] 张小康, 叶晓靖, 陈志东. 双包层单模光纤传感器及其在温度/湿度传感方面的应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0606 004-1~6.
- [3] C. Barriain, I. R. Matias, F. J. Arregui, et al. Optical fiber humidity sensor based on a tapered fiber coated with agarose gel. *Sensors and Actuators B*, 2000, 69(1): 127-131.
- [4] L. Zhang, F. X. Gu, J. Y. Lou, et al. Fast detection of humidity with a subwavelength diameter fiber taper coated with gelatin film. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13349-13353.
- [5] A. Gaston, I. Lozano, F. Perez, et al. Evanescent wave optical-fiber sensing (temperature, relative humidity, and pH sensors). *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(6): 806-811.
- [6] 李雅娟, 党亚固, 费德君. HEC/PVDF 作为光纤湿度传感器感湿材料性能研究[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(5): 77.
- [7] 金兴良, 荆淼, 赵英等. 温度对 Naf ion-结晶紫光纤湿度传感器性能的影响[J]. *高等学校化学学报*, 2005, 26(5): 844-845.
- [8] J. Mathew, Y. Semenova and G. Farrell. Relative Humidity sensor based on an agarose-infiltrated photonic crystal fiber interferometer. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(5): 1553-1559.
- [9] M. Hernaez, C. R. Zamarreño, C. Fernandez-Valdivielso, et al. Agarose optical fibre humidity sensor based on electromagnetic resonance in the infra-red region. *Physica Status Solidi C*, 2010, 7(11-12): 2767-2769.
- [10] J. Z. Xu, Q. Wei, S. Z. Peng, et al. Error of saturation vapor pressure calculated by different formulas and its effect on calculation of reference evapotranspiration in high latitude cold region. *Procedia Engineering*, 2012, 28: 43-48.
- [11] 张小康, 兰璐, 孔镇等. 光纤温/湿度传感器感湿层及其制备方法与应用[P]. 中国: 201010120549.6, 2011-9-7.