

文章编号 1004-924X(2016)05-0971-08

老化处理对塑料光纤传感器光传输及灵敏度的影响

钟年丙*, 李超楠, 刘 洋, 邱思炜, 梁小勃, 王 鑫, 王庆智

1. 重庆理工大学 光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054;
2. 重庆理工大学 重庆市现代光电检测技术与仪器重点实验室, 重庆 400054)

摘要:为了提高正规包层-纤芯类倏逝波塑料光纤传感器的灵敏度,本文对传感器敏感区在真空和水浴中进行了老化处理。老化处理时,先将光纤部分区域的保护层去除;然后将这种裸光纤作为传感器的敏感区,对其进行真空和蒸馏水老化处理。对比研究了传感器敏感区经真空和蒸馏水老化不同时间后的光传输特性及灵敏度,分析了老化处理对传感器光传输特性与灵敏度的影响机理。研究表明:老化处理后,塑料光纤纤芯折射率及材料成分发生了变化,由此改变了光纤内部光传输模式及光纤表面有效倏逝场透射深度与传播长度,从而降低了传感器的光传输性能。传感器对葡萄糖溶液的灵敏度随着老化时间的延长先增大后减少,在真空中 105 °C 老化处理 20 min 后的灵敏度达到最高 $-0.0042/\text{g} \cdot (100\text{ mL})^{-1}$,高于蒸馏水老化处理后的传感器灵敏度。研究结果对高灵敏度正规包层-纤芯类塑料光纤倏逝波传感器的研制提供了技术支撑。

关键词:光纤传感器;倏逝波传感器;塑料光纤;正规包层-纤芯结构;老化处理;灵敏度;光传输

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.0971

Effects of ageing treatment on light transmission and sensitivity of plastic optical fiber sensors

ZHONG Nian-bing*, LI Chao-nan, LIU Yang, QIU Si-wei,
LIANG Xiao-bo, WANG Xin, WANG Qing-zhi

1. Chongqing Key Laboratory of Fiber Optic Sensor and Photodetector, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
 2. Chongqing Key Laboratory of Modern Photoelectric Detection Technology and Instrument, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)
- * Corresponding author, E-mail: zhongnianbing@163.com

Abstract: To improve the sensitivity of a plastic optical fiber (POF) evanescent wave sensor with the normal core-cladding structure, the sensitive region of the sensor was aged in vacuum and distilled water. In the ageing treatment, the partial coating of the POF was removed firstly, the uncoated region with the normal core-cladding structure was employed as the sensing region of the sensor, then the sensing region of the sensor was aged in vacuum and distilled water, respectively. The light transmission and sensitivity of the sensor after ageing different time in vacuum and distilled water were compared, and the effects of ageing treatment on the light transmission and sensitivity of the

收稿日期:2015-11-26;修订日期:2016-02-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51406020)

sensor were analyzed. The research indicates that after ageing treatment, the core refractive index of the POF and the material composition are changed, which allows the light transmission mode in the optic fiber, the penetration depth and transmission length of the effective evanescent wave at the surface of sensing region to be changed, so that the light transmission property is dropped. The experimental results also show that the sensitivity of the aged sensor in the glucose solutions firstly is increased, subsequently decreased with the increase of the ageing time, and the maximum sensitivity in the vacuum has reached $-0.0042/\text{g} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$ at temperature of 105°C and ageing time for 20 min, higher than that of sensors with the ageing treatment in the distilled water. The research provides technological supports for developments of POF evanescent wave sensors with higher sensitivity and normal core-cladding structures.

Key words: optical fiber sensor; evanescent wave sensor; plastic optical fiber; normal cladding-core structure; aging treatment; sensitivity; light transmission

1 引言

塑料光纤由于具有加工容易、弯曲性能好、直径大、操作方便、价格低廉、便于连接等优点,已广泛运用到光纤传感及局域网中的短距离通信、室内计算机、有线电视网等领域^[1-2]。基于塑料光纤的倏逝波传感器,利用光纤表面倏逝波场与外界环境介质发生作用来实现环境成分信息及含量的测量^[3]。目前,光纤倏逝波传感器被广泛地应用于电化学、化工及生物分子探测等领域^[5-7]。由于倏逝场的渗入深度范围只有数十纳米至几百纳米,所以传感器只探测位于倏逝场范围内物质的相关信息,而溶液中远离光纤表面的物质对测量结果几乎没有贡献^[4]。

为提高光纤倏逝波传感器的灵敏度,研究者们相继开发了 D 形、锥形、C 形、U 形、S 形倏逝波传感器^[8-9]。在这些传感器的制备过程中,通常需将光纤包层甚至部分纤芯去除以增强光纤表面的倏逝场强度,即加强倏逝场与环境介质的作用强度,从而提高传感器的灵敏度^[7]。然而,由于塑料光纤的纤芯材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),PMMA 遇酒精或三氯甲烷溶液会溶解^[10-11],因此,通过去除光纤包层甚至部分纤芯来提高传感器灵敏度的方法不适用于发酵制乙醇、乙醇燃料及三氯甲烷水质检测等领域。虽然锥形、C 形、U 形等倏逝波传感器可采用正规光纤制作敏感区,即感应区具有包层-纤芯结构,但是由于塑料光纤的抗热氧化能力及热稳定性差,其光传输特性会受老化时间的影响。Sato 等^[12]发现,PMMA 阶

跃折射率聚合物光纤光衰减随着老化时间的延长而增大。Tanio 等^[13]和储九荣等^[14]指出,老化处理后塑料光纤总损耗的增加主要是因为光纤纤芯局部 PMMA 取向松弛、收缩,形成结晶区或半结晶区,导致密度增加从而产生散射损耗。目前,关于老化处理对塑料光纤光传输特性的影响及机理研究有很多,但是这些研究中光纤老化通常是在空气或真空环境中进行的。而有关真空和蒸馏水老化时间对倏逝波光传感器灵敏度影响的相关报道却很少。由于 PMMA 具有吸水性^[15],开展感应区在真空和蒸馏水中老化不同时间后对传感器光传输特性及灵敏度影响的研究,对提高传感器的灵敏度及应用范围具有重要价值。

本文对正规包层-纤芯类倏逝波塑料光纤传感器的敏感区在真空和水浴中进行了老化处理,研究了经不同老化时间后传感器的光传输特性及灵敏度,并分析了老化处理对光纤光传输特性及传感器灵敏度的影响机理,从而为提高其灵敏度奠定基础。

2 理论分析

2.1 光传输理论

由 Lambert-Beer 定律可知,倏逝波光经过弱吸收介质后,输入和输出光强之间满足:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} e^{-\xi(n)L}, \quad (1)$$

式中: I_{in} 为入射光强, L 为传感器区域(去除包层部分)的长度, $\xi(n)$ 为环境介质对倏逝波的衰减系数。 $\xi(n)$ 的具体表达式为:

$$\xi(n) = \frac{\alpha \lambda n \cos \theta' \cot \theta'}{2\pi r n_2 \cos \theta_c (\cos^2 \theta_c - \cos^2 \theta' \sin^2 \theta_\varphi)^{1/2}} \quad (2)$$

式中: α 为外界环境介质容积的吸收系数, λ 为光源波长, n 为环境介质的折射率, θ' 为经老化处理后传感器敏感区纤芯与包层分界面的界面入射夹角, r 为光纤半径, n_2 为经老化后光纤的折射率, θ_c 为正规光纤纤芯与包层分界面的全反射临界角, θ_φ 为偏斜角。从式(2)可以看出, 当 $\theta_\varphi = \pi/2$ 时, ξ 达到最大; $\theta_\varphi = 0$ 时, ξ 最小。考虑光纤倏逝波传感器的最低灵敏度和精度, 因此取 $\theta_\varphi = 0$ 。将 $\sin \theta_c = n/n_2$ 带入式(2), 经整理得:

$$\xi(n) = \frac{n\alpha\lambda}{2r\pi(n_2 - n^2)} \cos \theta' \cot \theta' \quad (3)$$

由式(3)和式(1)得到倏逝波光纤经过环境介质后输出光强的修正表达式为:

$$I_{out} = I_{in} \exp\left[-\frac{n\alpha\lambda L}{2r\pi(n_2 - n^2)} \cos \theta' \cot \theta'\right] \quad (4)$$

当环境介质的折射率小于光纤敏感区的折射率(n_1), 即 $(n/n_1) < 1$ 时, 式(4)可进行泰勒展开。保留泰勒展开式的前两项, 得到传感器敏感区经老化处理后的传输光强:

$$I'_{out} = I_{in} \exp\left[-\frac{\alpha\lambda L}{r\pi n_2^2} \cos \theta' \cot \theta' \left(n + \frac{n^3}{n_2^2}\right)\right] = I_{in} \exp\left[-K' \left(n + \frac{n^3}{n_2^2}\right)\right] \quad (5)$$

其中:

$$K' = \frac{\alpha\lambda L}{r\pi n_2^2} \cos \theta' \cot \theta' \quad (6)$$

同理, 可得到传感器敏感区未经老化处理的传输光强:

$$I_{out} = I_{in} \exp\left[-\frac{\alpha\lambda L}{r\pi n_2^2} \cos \theta_1 \cot \theta_1 \left(n + \frac{n^3}{n_1^2}\right)\right] = I_{in} \exp\left[-K \left(n + \frac{n^3}{n_1^2}\right)\right] \quad (7)$$

其中:

$$K = \frac{\alpha\lambda L}{r\pi n_2^2} \cos \theta_1 \cot \theta_1 \quad (8)$$

由式(5)和式(7)可以看出, 当传感器的特征参数 r, λ 和 L , 以及外界环境介质容积吸收吸收 α 确定后, 传感器输出光强主要受外界环境介质折射率 n , 光纤纤芯折射率 n_1 (n_2) 及界面入射角 θ_1 (θ') 的影响。

2.2 传感器灵敏度参数

光纤倏逝波传感器的灵敏度依赖于倏逝场的

衰减量。倏逝场的衰减量受有效倏逝场衰减系数 ξ 、透射深度 D_p 和在裸光纤区域的传播长度 L_{ew} 的影响, 且 ξ, D_p 和 L_{ew} 越大传感器越灵敏。2.1 节已详细研究了倏逝场衰减系数, 下面主要研究有效倏逝场透射深度和在裸光纤区域的传播长度。

2.2.1 有效倏逝场透射深度

有效倏逝场透射深度是影响倏逝场与环境介质的作用强度, 进而影响传感器灵敏度的一个重要参数。对于未经老化处理的正规光纤, 当光束在光纤纤芯与环境介质界面上的入射角大于全反射临界角, 即 $\theta_i \geq \theta_c$ 时, 有效倏逝场透射深度为:

$$D_p = \frac{L}{2\pi[n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n^2]^{1/2}} \quad (9)$$

对于老化处理后的传感器, 当 $\theta_i \geq \theta_c$ 时, 有效倏逝场透射深度为:

$$D'_p = \frac{L}{2\pi[n_2^2 \sin^2 \theta' - n^2]^{1/2}} \quad (10)$$

2.2.2 有效倏逝场在裸光纤区域的传播长度

在光束入射到光纤纤芯与环境介质的分界面后, 产生的倏逝场会被外界吸收。为了获得有效的倏逝波长度, 首先研究全反射点的个数。本文定义光束在光纤内传播时, 通过两个全内反射时的距离为 l , 因此, 在整个敏感区长度 L 内, 反射点的个数为:

$$N = \frac{2L}{l} = \frac{2L}{2r \tan \theta_i}, \quad \theta_i = \theta_1 \text{ 或 } \theta' \quad (11)$$

由式(11)和式(9)可知, 对于未经老化处理的光纤, 倏逝波在裸光纤区的传播长度为:

$$L_{ew} = N \frac{2D_p}{\tan \theta_1} = \frac{L\lambda}{2\pi r \tan \theta_1 [n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n^2]^{1/2} \tan \left[\arcsin \left(\frac{n}{n_1} \sin \theta_1 \right) \right]} \quad (12)$$

由式(10)和式(11)可知, 对于老化处理后的光纤, 倏逝波在裸光纤区的传播长度为:

$$L'_{ew} = N \frac{2D'_p}{\tan \theta'} = \frac{L\lambda}{2\pi r \tan \theta' [n_2^2 \sin^2 \theta' - n^2]^{1/2} \tan \left[\arcsin \left(\frac{n}{n_2} \sin \theta' \right) \right]} \quad (13)$$

从式(9)和式(12)可以看出, 当传感器特征参

数 r, λ 和 L 确定后,传感器的有效倏逝场透射深度 D_p 和在裸光纤区域的传播长度 L_{ew} 主要受外界环境介质的折射率 n , 光纤纤芯折射率 $n_1 (n_2)$ 和界面入射角 $\theta_1 (\theta')$ 的影响。

3 实验材料及系统

3.1 实验材料

实验用光纤为阶跃型塑料光纤,纤芯、包层和护套材料分别为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、氟树脂和黑色聚乙烯(PE),纤芯折射率为 1.49,数值孔径为 0.5,包层直径为 2 000 μm ,保护层直径为 3 800 μm ,工作温度为 $-50 \sim +70$ $^{\circ}\text{C}$ 。传感器敏感区为去除护套材料的正规裸光纤,裸光纤长度为 5 cm。实验过程中,为了避免裸光纤热处理过程发生弯曲,首先将光纤置于内径为 2.5 mm、热变形小的不锈钢管内,然后对它进行干燥和蒸馏水恒温老化处理,老化处理温度为 PMMA 玻璃化温度 105 $^{\circ}\text{C}$ 。

实验中,光纤的干燥老化处理采用真空干燥箱(DZF-6020,上海齐欣科学仪器有限公司,中国),控温为 $+5 \sim 250$ $^{\circ}\text{C}$,控温精度为 ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$,真空度为 133 Pa。光纤的蒸馏水老化处理采用高精度冷热恒温水浴槽(BILON-CXWD-505,天津比朗实验仪器制造有限公司,中国),控温为 $-40 \sim 200$ $^{\circ}\text{C}$,控温精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$,工作容积为 5 L,加热功率为 1 500 W,0 $^{\circ}\text{C}$ 制冷量为 900 W。老化处理后的光纤即为实验测试用的样品光纤。

3.2 实验系统

如图 1 所示,实验系统由老化处理后的塑料光纤、光源、光纤耦合器、样品池、光分路器、光谱仪、光功率计、蠕动泵、恒温水浴和储液瓶等组成。光源为 AvaLight-DHS 型氙-卤钨灯(氙灯为 10 W,卤钨灯为 15 W),光谱波段为 215 ~ 2 500 nm。光源发出的光经过光耦合器进入塑料光纤,在塑料光纤中以全反射方式向前传播。当光束传输到裸光纤区时,部分光透射至被测液中,经被测液吸收和反射后传输到光分路器,然后由正规光纤传输到光谱仪和光功率计,分别进行传输光谱和光强的测量。实验用光谱仪(AvaSpec-2048,爱万提斯,荷兰)的光谱波段为 200~1 100 nm,分辨

率为 0.04~20 nm,杂散光 $< 0.1\%$,信噪比为 200:1。高分辨率光功率计(UV 0.2, Newport Corporation, 美国)的光谱波段为 200~1 100 nm,功率为 100 pW ~ 0.2 W,不确定度为 1%~4%。样品池为金属密闭系统,用于减少外界环境对测量结果的影响。葡萄糖溶液为表征传感器灵敏度的测试液,浓度为 0~12.5 g/100 mL,温度由恒温水浴控制在 (30 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$;在传感器性能测试时,储液瓶中的葡萄糖溶液由蠕动泵以 50 mL/min 的流速泵入样品池。

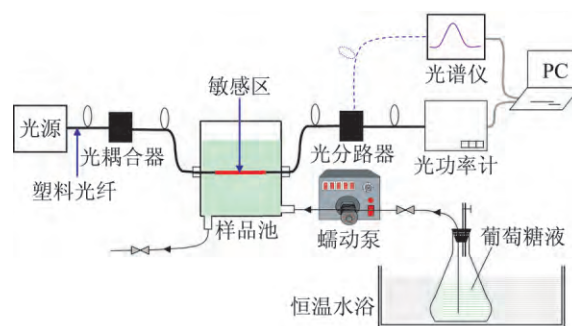


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

4 实验结果与讨论

为获得高灵敏度正规包层-纤芯类倏逝波塑料光纤传感器,对比研究了样品光纤传感器的光传输特性及传感器对葡萄糖溶液的响应特性。为了便于量化比较,本文采用输出光强相对变化量(Relative Change of Transmitted Light Intensity, RCTLI)分析传感器的灵敏度。其中, $RCTLI_T$ 定义为 $RCTLI_T = (I_T - I_0)/I_0$, I_0 为未经老化处理的样品光纤在 30 $^{\circ}\text{C}$ 时的输出光强, I_T 为老化 $T(\text{min})$ 后的输出光强。定义 $RCTLI_j(j=1,2) = (I_j - I_{j0})/I_{j0}$, I_j 为传感器在葡萄糖溶液(浓度为 0~12.5 g/100 mL)中的输出光强, I_{j0} 为传感器在葡萄糖浓度为 0 g/100 mL 时的输出光强。

4.1 真空和水浴老化时间对光传输特性的影响

首先将光纤在真空干燥箱和水浴槽中进行恒温老化处理,观测时间间隔为 5 min,老化处理后传感器的传输光强如图 2 所示。

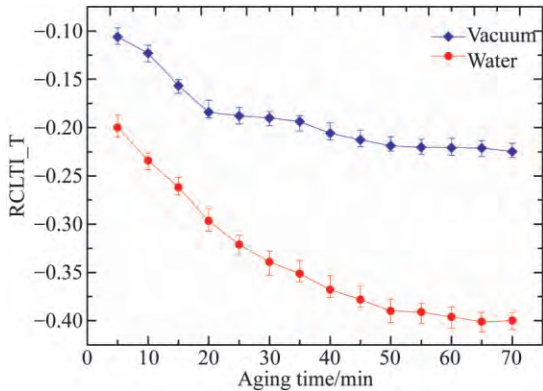


图 2 真空和水浴老化时间对传输光强的影响

Fig. 2 Effects of aging time in vacuum and water bath on transmitted light intensity of Plastic Optical Fibers(POFs)

从图 2 可以看出,随着老化时间的延长,样品光纤的光传输强度减弱。其原因在于随着老化时间的延长,光纤纤芯 PMMA 材料逐渐玻璃化,折射率减少(如图 3 所示),即光纤纤芯折射率由 n_1 减少为 n_2 ,导致光纤内部光传输模式发生变化(如图 4 所示);同时由于纤芯折射率减小,光束在正规光纤区与老化区界面上的入射角 φ 增大为 φ' ,从而导致正规光纤纤芯与包层界面的光束入射角 θ 减少,老化处理后纤芯与包层界面的入射角为 θ' 。由式(6)和式(8)可知, $K' > K$,当外界环境介质折射率一定时,有 $I'_{out} < I_{out}$ 。此外,PMMA 材料由于热氧化反应产生了共轭羰基^[16],从而增加了额外的光吸收和散射损耗,因此,经老化处理后传感器的输出光强减弱。

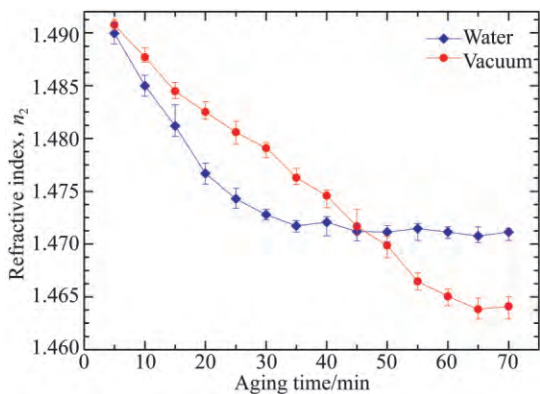


图 3 老化时间对光纤纤芯折射率的影响

Fig. 3 Effects of aging time in vacuum and water bath on refractive index of POFs

实验采用阿贝尔折射仪进行折射率测量(NAR-1T solid, ATAGO, 日本),仪器可测折射率为 1.300 0~1.700 0,精度为 $\pm 0.000 2$ 。图 3 中,老化时间小于 45 min 时,蒸馏水老化处理后光纤的折射率小于真空老化处理后的折射率,主要是因为 PMMA 材料具有吸水性^[17]。光束在正规光纤和经老化处理光纤中的传输路径如图 4 所示。

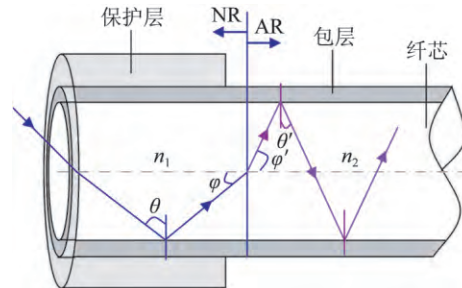
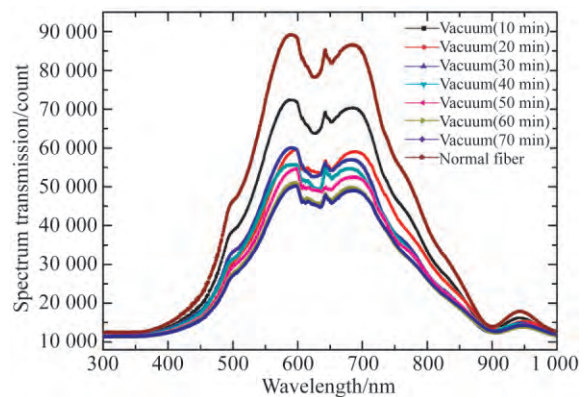


图 4 光传输路径示意图(NR 为正规光纤,AR 为老化后的光纤)

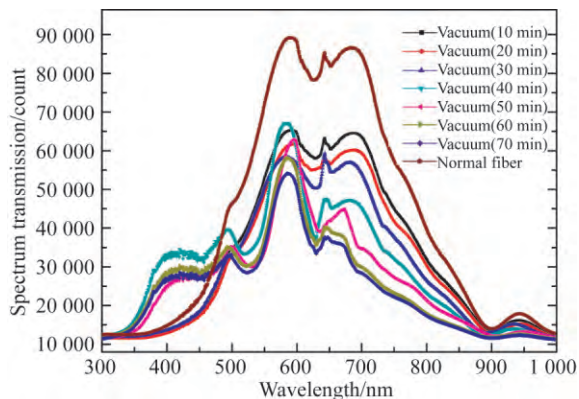
Fig. 4 Light transmission modes in POFs (NR and AR are normal fiber and aged fiber respectively)

从图 2 中还可以看出:真空老化前 20 min, RCLTI_T 随着老化时间的增加快速减小;在老化处理 20 min 时,传输光强减少为初始光强的 81.6%(RCLTI_T=0.184),随后 RCLTI_T 随着老化时间的增加缓慢减小。水浴老化前 50 min, RCLTI_T 随着老化时间的增加快速减小;在老化处理 50 min 时,传输光强减少为初始光强的 61.0%(RCLTI_T=0.310),随后 RCLTI_T 随着老化时间的增加缓慢减小。



(a) 真空老化后传感器的传输光谱

(a) Transmitted spectra of POF sensors aged in vacuum



(b) 水浴中老化后的传输光谱

(b) Transmitted spectra of POF sensors aged in water bath

图 5 老化处理后传感器的传输光谱

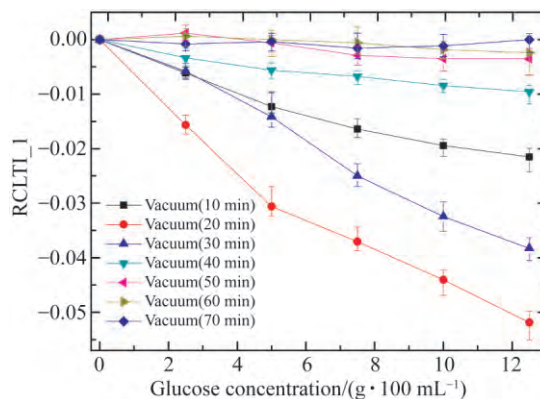
Fig. 5 Transmitted spectra of aged POF sensors

图 5 给出了老化处理后传感器的传输光谱。从图 5 可以看出,真空老化处理后传感器的光谱传输随着老化时间的延长而减弱,且变化形状具有一致性,即老化处理时间对传感器光谱传输性能的影响具有一致性。而在水浴老化处理后(老化 50 min)传感器的传输光谱特性发生了较大的变化,尤其对于 600~750 nm 的光谱,随着老化时间的延长衰减尤为明显。其原因在于 PMMA 材料具有吸水性,当裸光纤浸入蒸馏水后,随着老化时间的延长,PMMA 含水量增加,吸收的水分子将在 PMMA 中发生聚集及不均匀分布,导致光纤内部 600~750 nm 的光谱吸收和散射增强^[15,18]。

4.2 老化处理对传感器性能的影响

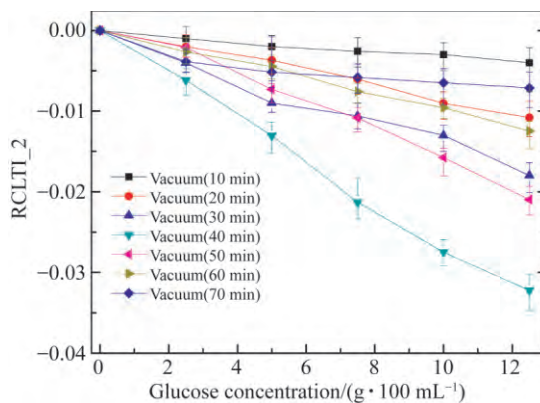
为了研究真空和蒸馏水老化时间对传感器灵敏度的影响,实验对比测试了老化处理后传感器对葡萄糖溶液的响应特性,如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出,真空老化处理后,传感器输出光强的相对变化量(RCLTI_1)对葡萄糖溶液的响应随着老化时间先增大,然后减小;在老化时间为 20 min 时,传感器对葡萄糖溶液的灵敏度达到最高 $-0.0042/g \cdot (100 mL)^{-1}$ 。从图 6(b)可以看出,水浴老化处理后,传感器灵敏度(RCLTI_2 变化量)也随着老化时间先增大,然后减少;当老化时间为 40 min 时,传感器对葡萄糖溶液的灵敏度最高,为 $-0.0026/g \cdot (100 mL)^{-1}$ 。



(a) 真空老化后传感器对葡萄糖溶液的响应

(a) Response of POF sensors aged in vacuum to glucose solution



(b) 水浴老化后传感器对葡萄糖溶液的响应

(b) Response of POF sensors aged in water bath to glucose solution

图 6 老化处理后传感器对葡萄糖溶液的响应特性

Fig. 6 Responses of aged POF sensors to glucose solution

随着老化时间的延长,光纤纤芯的折射率逐渐减小(图 4),光束在光纤纤芯与包层界面的入射角由 θ 减少为 θ' ,导致光纤内部传输的高阶模光束不再满足全反射而逐渐逃逸光纤,增大了光纤与葡萄糖溶液界面的光强,且光纤表面的光强随着老化处理后光纤纤芯折射率的减少而增大。由式(6)~式(13)可知,随着光纤纤芯折射率和界面入射角的减少,老化处理后光纤传感器的有效倏逝波衰减系数、透射深度和在裸光纤区域的传播长度增大。因此,传感器对葡萄糖的灵敏度随着老化时间的延长而增大。传感器灵敏度降低的原因:随着老化时间的进一步延长,光纤内部形成了不均匀的结晶区且共轭羰基含量增加,散射损耗增强^[14],即光纤对光谱的有效传输质量降低,如图 2 和图 5 所示。由文献[19-20]可知,倏

逝波衰减系数即传感器灵敏度随光纤内部的有效传输光强的减少而减少。同时随着老化时间的延长,PMMA 将完成玻璃化转变,即光纤纤芯折射率不再发生变化。综合上述两个方面的因素可知,在老化处理超过一定时间后,传感器的灵敏度将随着老化时间的延长而减少,并最终趋于稳定。

水浴处理后传感器对葡萄糖溶液的灵敏度小于真空处理后的传感器,其原因在于蒸馏水处理后传感器对 600~750 nm 光谱的传输能力较差,导致光纤表面倏逝场中包含 600~750 nm 的光谱信号弱,因此传感器灵敏度低。此外,水浴老化处理中传感器对葡萄糖溶液的灵敏度达到最高时所需的时间大于真空中的老化时间,这是由于 PMMA 具有吸水性,导致光纤纤芯折射率的变化量小于真空老化时的变化量,如图 3 所示;同时,水浴老化后光纤对光束的有效传输能力低于真空老化后的光传输能力。因此,蒸馏水老化处理后光纤表面倏逝场的增大速度低于真空老化时的速度,且倏逝场强度低于真空老化后光纤表面的倏逝场强度;传感器对葡萄糖溶液的最大灵敏度响

应时间呈现出差异,且传感器水浴老化后对葡萄糖溶液的灵敏度更低。

5 结 论

本文对比研究了真空和蒸馏水条件下老化时间对正规包层-纤芯类倏逝波塑料光纤传感器的光传输特性及灵敏度的影响,并分析了老化处理对传感器光传输特性及灵敏度的影响机理。理论分析及实验结果表明:老化处理后,塑料光纤内部的光传输模式及光纤表面的有效倏逝场透射深度和有效倏逝场的传播长度因折射率减少及光纤成分的变化而变化;传感器的透射光强及光谱传输能力随着老化时间的延长而减小,但对葡萄糖溶液的灵敏度随着老化时间的延长先增大后减少,在真空中老化处理 20 min 后传感器灵敏度达到最高 $-0.0042/g \cdot (100\text{ mL})^{-1}$,大于水浴老化处理后的灵敏度。该结果对研制高灵敏度正规包层-纤芯类塑料光纤倏逝波传感器具有一定的理论意义和实用价值。

参考文献:

- [1] GARITO A F, WANG J, GAO R. Effects of random perturbations in plastic optical fibers [J]. *Science*, 1998, 281(5379):962-967.
- [2] MIZUNO Y, HAYASHI N, TANAKA H, *et al.*. Propagation mechanism of polymer optical fiber fuse [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:4800.
- [3] CHENG C, LIU J, ZHANG C, *et al.*. An overview of infrared spectroscopy based on continuous wavelet transform combined with machine learning algorithms: application to Chinese medicines, plant classification, and cancer diagnosis [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2010, 45(2):148-164.
- [4] 钟年丙,廖强,朱恂,等. 超声技术在石英光纤腐蚀中的运用 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5):988-995.
ZHONG N B, LIAO Q, ZHU X, *et al.*. Application of ultrasonic technology to etching silica optical fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):988-995. (in Chinese)
- [5] AVINO S, RICHMOND C, GIORGINI A, *et al.*. High-sensitivity ring-down evanescent-wave sensing in fiber resonators [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(19):5725-5728.
- [6] LOU J, XU H Z, XU B, *et al.*. Fiber-optic evanescent wave sensor with a segmented structure [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(19):4200-4205.
- [7] ZHONG N B, LIAO Q, ZHU X, *et al.*. A fiber-optic sensor for accurately monitoring biofilm growth in a hydrogen production photobioreactor [J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(8):3994-4001.
- [8] LUO J, YAO J, LU Y G, *et al.*. A silver nanoparticle-modified evanescent field optical fiber sensor for methylene blue detection [J]. *Sensors*, 2013, 13(3):3986-3997.
- [9] 刘洋,钟年丙,陈明,等. 准确测量微藻生物量的塑料光纤倏逝波传感器 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10z):151-158.
LIU Y, ZHONG N B, CHEN M, *et al.*. Plastic optical fiber evanescent wave sensor for accurate measurement of microalgae biomass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10z):151-158. (in Chinese)
- [10] ZHANG Q L, HOOGENBOOM R. Polymers with upper critical solution temperature behavior in alcohol/water solvent mixtures [J]. *Progress in Polymer Science*, 2015, 48:122-142.
- [11] YANG Y H, DAN Y. Preparation of PMMA/

- SiO₂ composite particles via emulsion polymerization [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2003, 281(8):794-799.
- [12] SATO M, ISHIGURE T, KOIKE Y. Thermally stable high-bandwidth graded-index polymer optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(7):952-958.
- [13] TANIO N, KATO H, KOIKE Y, *et al.*. Physical aging and light scattering of low-loss poly (methyl methacrylate) glass [J]. *Polymer Journal*, 1998, 30:56-59.
- [14] 储九荣, 钟力生, 徐传骥. 热老化对 PMMA 塑料光纤损耗的影响 [J]. *塑料工业*, 2005, 33:190-195.
CHU J R, ZHONG L SH, XU CH X. Influence of heat aging on attenuation of PMMA polymer optical fiber [J]. *China Plastics Industry*, 2005, 33:190-195. (in Chinese)
- [15] ISHIGURE T, SATO M, KONDO A, *et al.*. Graded-index polymer optical fiber with high temperature and high humidity stability [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20:1818-1825.
- [16] ZHONG N B, LIAO Q, ZHU X, *et al.*. Temperature-independent polymer optical fiber evanescent wave sensor [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:11508.
- [17] TAKEZAWA Y, TANNO S, TAKETANI N, *et al.*. Analysis of thermal degradation for plastic optical fibers [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1991, 42:2811-2817.
- [18] WATANABE T, OOBA N, HIDA Y, *et al.*. Influence of humidity on refractive index of polymers for optical waveguide and its temperature dependence [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(13):1533-1535.
- [19] LUO S W, CHANG T L, TSAI H Y. Fabrication of glass micro-prisms using ultra-fast laser pulses with chemical etching process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2):220-225.
- [20] ZHONG N B, LIAO Q, ZHU X, *et al.*. Effects of surface roughness on optical properties and sensitivity of fiber-optic evanescent wave sensors [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17):3937-3945.

作者简介:



李超楠(1995-),女,河南夏邑人,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 15310670348@163.com

导师简介:



钟年丙(1981-),男,重庆云阳人,博士,副教授,硕士生导师,2006年、2010年于重庆理工大学分别获得学士、硕士学位,2013年于重庆大学获得博士学位,主要从事光纤传感、光纤生物材料、微生物能源等方面的研究。E-mail: zhongnianbing@163.com; pxlb08@cqut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)