

文章编号 1004-924X(2016)增-0066-08

## 水浴处理对塑料光纤传感器灵敏度及 温度独立性的影响

李超楠, 钟年丙\*, 汪正坤, 王鑫, 梁小勃

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:**为了获得灵敏度高且温度独立的塑料光纤传感器,采用研磨法制备了D形光纤,对D形区域进行升温-降温循环水浴处理,并将水浴处理后的光纤制备成U形传感器。研究了U形区域的不同直径及曲率对传感器灵敏度的影响,并对比分析了未经温度处理和升温-降温循环水浴处理后的塑料光纤传感器在葡萄糖溶液中对温度的依赖性。研究表明:传感器灵敏度受U区直径和U区弯曲曲率的控制,当U区直径和曲率分别为 $1\ 500\ \mu\text{m}$ 和 $0.025\ \text{mm}^{-1}$ 时,传感器对葡萄糖溶液( $25\ ^\circ\text{C}$ )的灵敏度达到最高 $0.017\ \text{/g}\cdot(100\ \text{mL})^{-1}$ ;经温度处理后,传感器对观测区域葡萄糖溶液在 $25\ ^\circ\text{C}$ 和 $65\ ^\circ\text{C}$ 输出光强相对变化量的最大相对误差由未经温度处理的 $140.1\%$ 降低至 $9.7\%$ ,说明对塑料光纤进行升温-降温循环水浴处理能显著改善其对温度的依赖性。

**关键词:**塑料光纤;U形传感器;水浴处理;蒸馏水老化处理;灵敏度;温度独立性;光传输

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0066

## Effects of water-heat treatment sensitivity and temperature-independent of plastic optical fiber sensor

LI Chao-nan, ZHONG Nian-bing\*, WANG Zheng-kun, WANG Xin, LIANG Xiao-bo

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; pxlb08@cqut.edu.cn

**Abstract:** In order to acquire U-shaped plastic optical fiber sensor with high sensitivity and independent temperature, the grinding method was used to prepare D-shaped optical fiber, then heating-cooling circulating treatment in water bath was implemented to D-shape area. Afterwards the optical fiber was made into U-shape sensor. The influence of U-shape area with different diameters and curvatures on sensor sensitivity was analyzed, as well as the dependence of plastic optical fiber on temperature in glucose solutions with and without the heating-cooling circulating treatment. The results show that the sensor sensitivity is controlled by the diameter and curvature of U-shaped region. The maximum

收稿日期:2016-05-23;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51406020);重庆市教委科学技术研究资助项目(No. KJ1600901);重庆市科委科学技术研究资助项目(No. cstc2016jcyjA0871)

sensitivity of the sensor in glucose solution (25 °C) reaches  $0.017 / \text{g} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$  when U-area diameter and curvature are  $1\ 500 \mu\text{m}$  and  $0.025 \text{ mm}^{-1}$ . In addition, the Maximum Relative Error(MRE) of the Relative Change of Transmitted Light Intensity(RCTLI) of the sensor in glucose solution decreases from 140.1% at 25 °C to 9.7% at 65 °C, which indicates that water heating-cooling circulating treatment can relieve the temperature sensitivity of the plastic optical fiber.

**Key words:** plastic optical fiber; U-shape sensor; water-heat treatment; aging treatment of distilled water; sensitivity; temperature independence; optical transmission

## 1 引 言

近年来,随着工艺技术的不断进步,塑料光纤的光学性能得到了极大的改善,更是拥有了媲美石英光纤的传输特性。同时,塑料光纤具有易加工、弯曲性能好、直径大、操作方便、价格低廉、便于连接等优点,已广泛地运用于传感、通信及医学等领域<sup>[1-3]</sup>。在塑料光纤传感器中,U形塑料光纤传感器是利用U形区域的内外表面透射出的光与外界相互作用,从而实现对外界环境参量的测量<sup>[4]</sup>。与正规光纤相比,U形结构改变了光束入射在光纤与环境介质界面上的角度,使光线的传输模式发生了变化,从而让更多模式的光束耦合进入环境介质,增强了光纤表面光和环境介质间的作用强度,因此U形光纤传感器的灵敏度高于直行光纤倏逝波传感器的灵敏度<sup>[4-5]</sup>。

关于U形光纤传感器灵敏度,Chu等<sup>[6]</sup>研究指出传感器灵敏度随着光纤探头U区曲率半径的减少而增大;Prabhakar等<sup>[7]</sup>也研究发现,当U形塑料光纤传感器弯曲半径从2 mm减少到1 mm时传感器灵敏度可以提高2倍。滕传新等<sup>[8]</sup>用热熔拉法将商用塑料光纤直接拉直成微/纳光纤,并对宏弯曲结构光纤的折射率传感特性进行研究结果表明,宏弯曲的塑料微/纳光纤对较低折射率液体的折射率变化更为敏感;曲率半径较大的微/纳塑料光纤具有更高的折射率传感灵敏度,并且对一定弯曲曲率下的光纤,光纤直径越小传感器对液体折射率的灵敏度越高。文献<sup>[9-11]</sup>研究表明,去除光纤包层甚至部分纤芯可进一步提高传感器的灵敏度,因为去除光纤包层后,能增强纤芯表面倏逝场与环境介质的作用强度。虽然塑料光纤传感器的灵敏度可通过改变U区的弯曲半径和直径进行调控,但是由于塑料光纤的热稳定性及机械强度差<sup>[12-13]</sup>,光纤光谱传输特性易受温度的影响,从而导致传感器测量结果的稳定性、

准确性和灵敏度随温度发生变化<sup>[14-15]</sup>。关于温度对塑料光纤传感器性能影响方面的影响,虽然作者前期报道了老化处理对塑料光纤传感器光传输及灵敏度的影响,但文献<sup>[16]</sup>的研究对象为正规包层-纤芯塑料光纤。为了获得灵敏度高且具有温度独立的U形塑料光纤传感器,本文采用研磨法制备了D形光纤,对D形区域进行升温-降温循环水浴处理,将水浴处理后的光纤制备成U形传感器;并研究了U形区域光纤直径及曲率对传感器灵敏度的影响,并分析了未经温度处理和经过升温-降温循环水浴处理后传感器对温度的依赖性。本文研究对推动塑料光纤传感器的工程化应用具有重要的意义。

## 2 实验材料及系统

### 2.1 光纤材料及U形探头

实验用塑料光纤(江西大圣塑料光纤有限公司)纤芯折射率为1.49,数值孔径为0.5,包层直径为 $2\ 000 \mu\text{m}$ ,保护层直径为 $3\ 800 \mu\text{m}$ ,工作温度为 $-50 \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

U形探头的制备过程如下:①利用美工刀将光纤保护层去除5 cm;②将去除包层的光纤固定在与光纤直径相当的凹槽中,该凹槽由有机玻璃板加工制备;③采用光纤研磨机对裸光纤进行研磨,氧化铝研磨纸的粒度为 $2 \mu\text{m}$ ,研磨后的裸光纤为D形结构,如图1所示。图中 $D_r$ 为研磨深度, $2000 - D_r$ 为研磨后光纤的直径;④为了获得温度独立的光纤传感器,根据作者前期的研究结果,将D形光纤放入高精度冷热恒温水浴槽中进行了7次升温-降温循环处理,温度为 $-5 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,升降温速率为 $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ;⑤将经过升降温水浴处理后的光纤及参考光纤(未经研磨和温度处理的裸光纤)制成不同弯曲半径的U形光纤。在制备U形光纤时,为了避免光纤折断,需先将光纤放入温度大于 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水浴中进行软化处理,再按实

验要求制备出不同弯曲曲率的 U 形光纤传感器,本文中 U 区曲率为  $0.000 \sim 0.070 \text{ mm}^{-1}$ 。

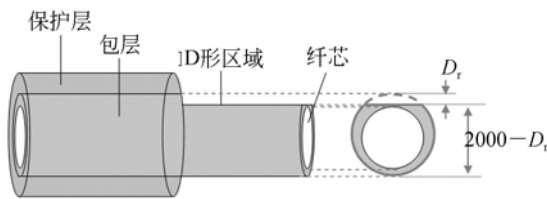


图 1 D形塑料光纤结构

Fig. 1 Structure of D-shaped plastic optical fiber

## 2.2 实验系统

实验系统框图如图 2 所示,该系统由光源、光纤耦合器、U 形塑料光纤传感器、光功率计等组成。光源为 AvaLight-DHS 型氙-卤钨灯(氙灯 10 W, 卤钨灯 15 W),光谱为  $215 \sim 2500 \text{ nm}$ 。光源发出的光经过光耦合器耦合进入塑料光纤,在塑料光纤中以全反射方式向前传播,当光束传输到 U 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探测器。光探测器采用高分辨率的光功率计(UV 0.2, Newport Corporation, 美国),功率计的可探光谱波段为  $200 \sim 1100 \text{ nm}$ ,可探功率为  $100 \text{ pW} \sim 0.2 \text{ W}$ ,不确定度为  $1\% \sim 4\%$ 。实验过程中,采用葡萄糖溶液作为被测液,用于表征传感器的灵敏度,葡萄糖溶液的浓度为  $0 \sim 12.5 \text{ g}/100 \text{ ml}$ 。

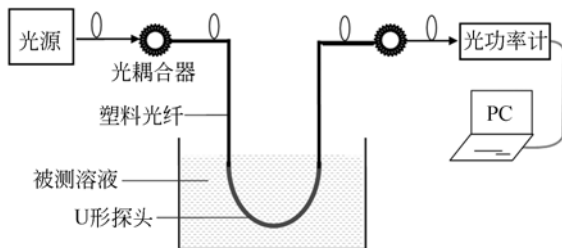


图 2 U 形探头及塑料光纤传感器测量系统

Fig. 2 Measurement system of U-shaped plastic fiber sensor

## 3 实验结果与讨论

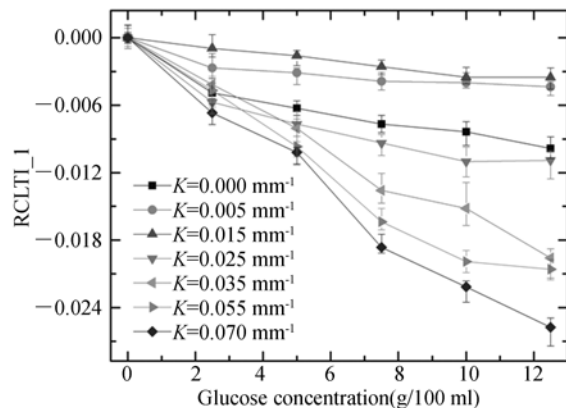
为获得灵敏度高且温度独立的 U 形塑料光纤传感器,首先研究 U 区光纤直径( $2000 - D_r$ )及曲率对传感器灵敏度的影响,然后对比分析未经温度处理和经过升温-降温循环水浴处理后温度

对传感器输出信号的影响。为了便于比较,本文采用输出光强相对变化量(Relative Change of Transmitted Light Intensity, RCTLI)对传感器灵敏度进行分析。 $RCTLI_j$  ( $j=1, 2, \dots, 7$ )定义  $RCTLI_j = (I_j - I_{j0})/I_{j0}$ ,其中  $I_j$  为传感器在葡萄糖溶液浓度不为 0 时浓度范围的输出光强,  $I_{j0}$  为传感器在葡萄糖浓度为  $0 \text{ g}/100 \text{ ml}$  时的输出光强  $j=1, 2, 3, \dots, 7$ 。T 定义  $RCTLI_T = (I_T - I_0)/I_0$ ,其中  $I_T$  为温度 T 时传感器的输出光强,  $I_0$  为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时传感器的输出光强。

### 3.1 U 区直径及曲率对传感器灵敏度的影响

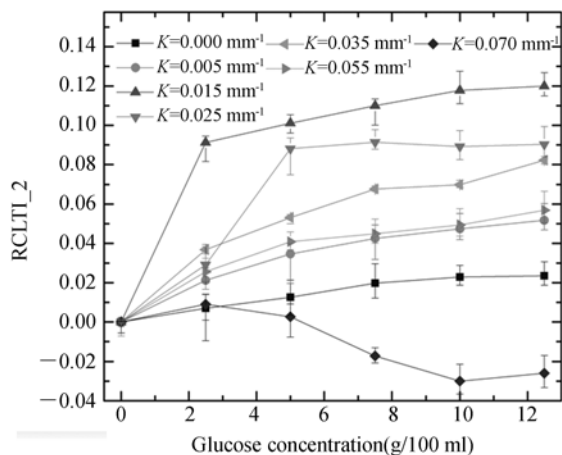
为研究 U 区光纤直径及曲率两参数对传感器灵敏度的影响,首先制备了 U 区直径为  $2000, 1750, 1500, 1250 \text{ }\mu\text{m}$  的光纤(即  $D_r$  分别为  $0, 250, 500, 750 \text{ }\mu\text{m}$  的光纤),并利用获得的 D 形光纤制备了不同曲率半径的 U 形光纤。U 区直径及曲率对传感器灵敏度的影响如图 3 所示。

从图 2(a)可以看出,未经研磨的裸光纤,传感器输出光强的相对变化量,即传感器对葡萄糖的灵敏度随着曲率的增大而增大(灵敏度随着弯曲半径的减少而增大),与现有研究文献[6-7]报道一致。然而当光纤的包层甚至部分纤芯去除之后,对于不同直径下传感器对葡萄糖溶液的响应情况不同。其中,对于  $D_r = 250 \text{ }\mu\text{m}$  的传感器,  $RCTLI_2$  随着葡萄糖浓度的增大而增加,传感器灵敏度随着曲率的增大先增大后减少,并在  $K = 0.015 \text{ mm}^{-1}$  时传感器灵敏度最高;对于  $D_r = 500 \text{ }\mu\text{m}$  的传感器,  $RCTLI_3$  随着葡萄糖浓度的增大而减少,且传感器灵敏度随着 U 区曲率的增大而减少,并在  $K = 0.025 \text{ mm}^{-1}$  时传感器灵敏度最高;

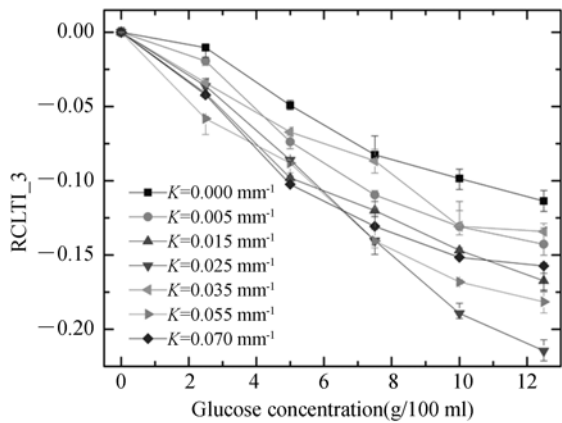


(a)  $RCTLI_1$  与葡萄糖浓度之间的关系曲线( $D_r = 0 \text{ }\mu\text{m}$ )

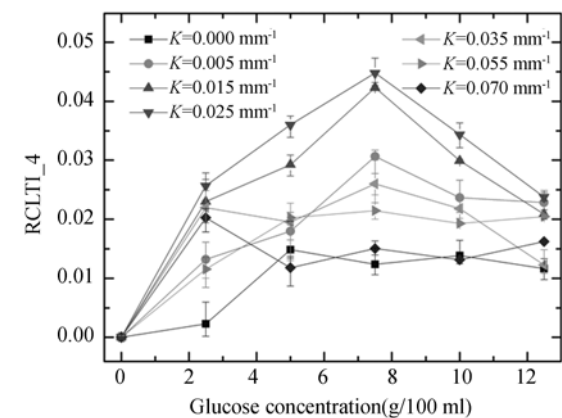
(a)  $RCTLI_1$  of sensors as a function of glucose concentration ( $D_r = 0 \text{ }\mu\text{m}$ )



(b)RCLTI<sub>2</sub>与葡萄糖浓度之间的关系曲线( $D_r=250 \mu\text{m}$ )  
(b)RCLTI<sub>2</sub> of sensors as a function of glucose concentration ( $D_r=250 \mu\text{m}$ )



(c)RCLTI<sub>3</sub>与葡萄糖浓度之间的关系曲线( $D_r=500 \mu\text{m}$ )  
(c)RCLTI<sub>3</sub> of sensors as a function of glucose concentration ( $D_r=500 \mu\text{m}$ )



(d)RCLTI<sub>4</sub>与葡萄糖浓度之间的关系曲线( $D_r=750 \mu\text{m}$ )  
(d)RCLTI<sub>4</sub> of sensors as a function of glucose concentration ( $D_r=750 \mu\text{m}$ )

图 3 不同光纤直径及曲率下传感器的灵敏度

Fig. 3 Sensitivities of sensors with different diameters and curvatures

然而对于  $D_r=750 \mu\text{m}$  的传感器, RCLTI<sub>4</sub> 随着葡萄糖浓度的增大先增大后减少, 且传感器灵敏度随着 U 区曲率的增大而减少, 并在  $K=0.025 \text{ mm}^{-1}$  时传感器灵敏度最高。为了便于分析 U 区直径对传感器灵敏度的影响, 将图 3(a)~3(d) 中 RCLTI<sub>1</sub> 至 RCLTI<sub>4</sub> 随葡萄糖浓度变化量最大的曲线置于图 4。

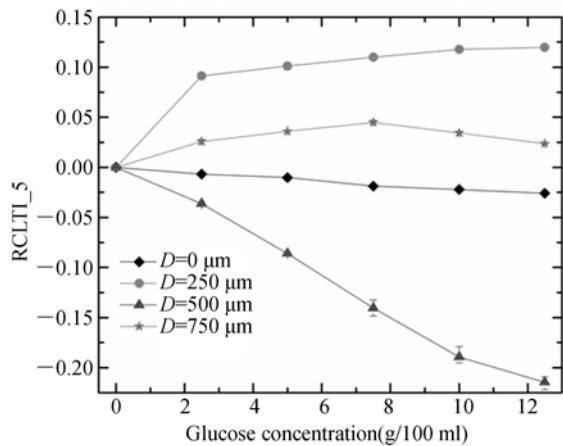


图 4 不同光纤直径下传感器的灵敏度

Fig. 4 Sensitivity of sensor with different removed diameters

从图 4 中可以看出, 当光纤研磨直径为  $D_r=500 \mu\text{m}$ , 即研磨后光纤直径为  $1500 \mu\text{m}$ , U 区曲率  $K=0.025 \text{ mm}^{-1}$  时, 传感器对葡萄糖溶液的灵敏度最高, 达到  $0.017 \text{ g}/100 \text{ mL}$ 。为分析传感器灵敏度受 U 区直径和曲率影响的原因, 本文给出了光束在 U 形光纤中的传输路径示意图, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 对于 U 形光纤, 当光束由正规光纤区域传输到 U 形区域时, 光束在正规光纤纤芯与包层界面的入射  $\theta$  将减少至光纤外表面和内表面界面入射角  $\Phi'$  和  $\varphi'$ 。界面入射角的减少导致部分在正规光纤区域满足全反射的光进入 U 区后不再满足全反射, 从而逃逸光纤, 因此, 增大了光纤表面的光强, 从而提高了传感器的灵敏度, 如图 3(a) 所示。当光纤包层和部分纤芯被去除之后, 光束在光纤与外界环境界面的入射角将由  $\Phi'$  和  $\varphi'$  进一步减少至  $\Phi$  和  $\varphi$ 。界面入射角的进一步减少将导致更多的光束逃逸光纤, 因此, 研磨后光纤传感器的灵敏度得到进一步的提高, 如图 3(b)~3(d) 和图 4 所示。研磨后光纤传感器的灵敏度随着研磨深度  $D_r$  的增大先增加后减

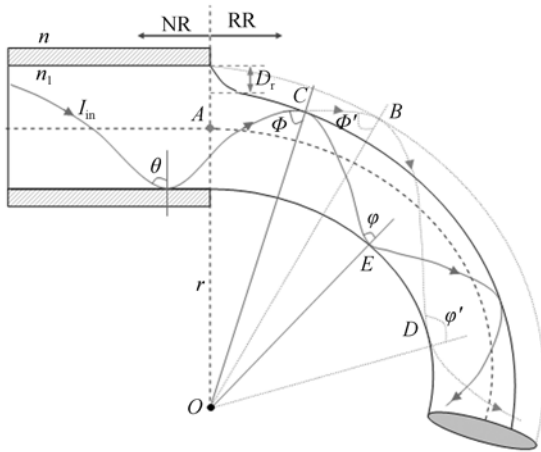


图 5 光传输路径示意图(NR 为正规光纤,RR 为研磨光纤)

Fig. 5 Schematic diagram of light transmission in fiber (NR: normal region; RR: removed region)

少,其原因在于研磨后的光纤即使是直行光纤( $K=0.000 \text{ mm}^{-1}$ ),光纤的传输光强也会随着研磨深度  $D_r$  的增大而衰减,如图 6 所示。

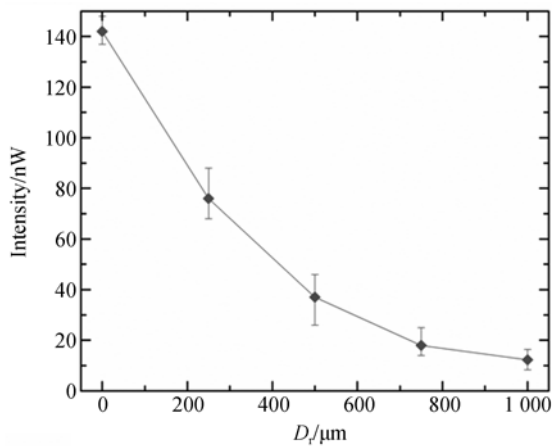


图 6 不同研磨深度下光纤的传输光强

Fig. 6 Transmitted light intensity of fiber as a function of removed thickness

从图 6 可以看出,当光纤研磨厚度  $D_r=750 \mu\text{m}$  时,传输光纤衰减为未经研磨光纤的 8.4%。其损失的光强主要是在正规区域与研磨区域的分界面逃逸光纤,如图 5 所示,因此导致 U 区光纤内部的有效传输光强减弱。虽然正规光纤研磨越深越有利于光纤内部的光束透射到光纤与外界环境的界面,从而增强光纤表面光束与外界环境介质的作用强度,提高传感器灵敏度。但是由文献

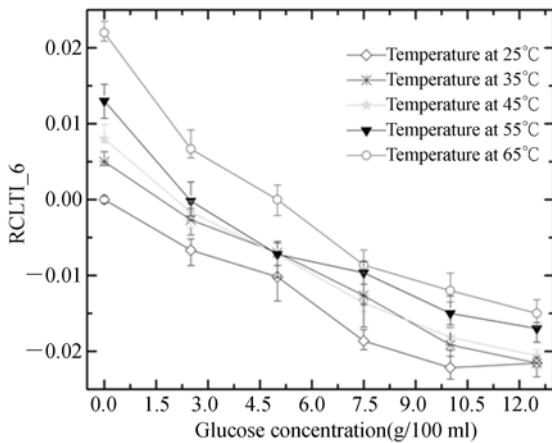
[17-18]可知,由于 U 区光纤内部有效传输光强的减弱,倏逝波衰减系数即传感器灵敏度将随光纤有效传输光强的减少而减少,即传感器灵敏度将随光纤研磨厚度的增大而减少。因此,综合上述两个方面原因可以发现,U 形传感器的灵敏度并非一味随着光纤研磨深度的增大而增大,而是存在临界研磨深度  $D_{rc}$ 。该临界深度由光纤传感器敏感区(U 区)的内部有效传输光强和表面有效释放光强共同决定,当它们都较大时的研磨深度为最佳研磨深度  $D_{rc}$ ,本文中  $D_{rc}=500 \mu\text{m}$ 。因此,当研磨深度小于  $500 \mu\text{m}$  时,U 形传感器的最大灵敏度随着  $D_{rc}$  的增大而增大;当研磨深度大于  $500 \mu\text{m}$  时,U 形传感器的最大灵敏度随着  $D_{rc}$  的增大而减少。

此外,对于图 3(b)和图 3(d)中,RCLTI\_2 和部分 RCLTI\_4 随着葡萄糖浓度的增大而增大可解释为,在特定葡萄糖浓度范围,对于一定研磨厚度的光纤,当光束传输到 U 区光纤与葡萄糖溶解分界面后反射回光纤内部的光强大于衰减光强(葡萄糖溶液吸收),且随着葡萄糖浓度的增大,反射光强越大,因此透射光强增加、RCLTI 增大。对于图 3(a)、图 3(c)和图 3(d)中,RCLTI\_1、RCLTI\_3 及部分 RCLTI\_4 随着葡萄糖浓度的增大而减少可解释为,光纤表面倏逝波强度较大,折射光和散射光强较弱;因此,倏逝波衰减量大于反射回光纤中的光强,并且倏逝波衰减光强与反射回光纤中光强之差随着葡萄糖浓度的增大而增大,因此 RCLTI 随着葡萄糖浓度的增大而减少。同时,对于 U 形传感器,当  $D_r=500 \mu\text{m}$  和  $K=0.025 \text{ mm}^{-1}$  时,U 区表面的倏逝波强度最大,因此随着葡萄糖浓度的增大;光衰减量变化最为显著,传感器灵敏度最高,如图 3(c)和图 4 所示。

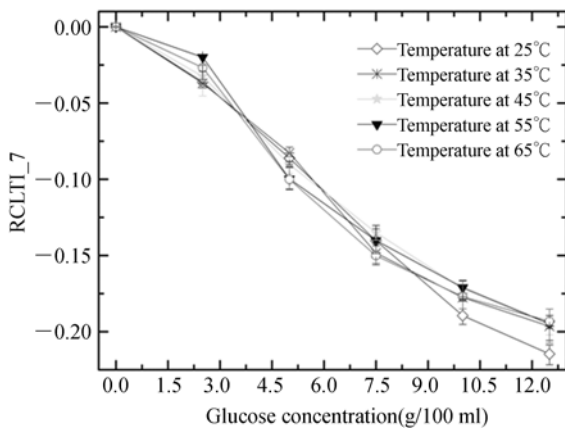
### 3.2 温度对传感器性能的影响

为了研究温度对传感器性能(传感器对温度的依赖性)的影响,对比测试了未经温度处理的裸光纤 U 形传感器(裸区长度、U 区直径及曲率分别为  $5 \text{ mm}$ 、 $2000 \mu\text{m}$  和  $K=0.070 \text{ mm}^{-1}$ )和经过 7 次升温-降温循环水浴处理后 U 形光纤传感器(裸区长度、U 区直径及曲率分别为  $5.1500 \mu\text{m}$  和  $K=0.025 \text{ mm}^{-1}$ )在不同温度下对葡萄糖的响应,实验结果如图 7 所示。

从图 7(a)中可以看出,RCLTI\_6 的变化量随着温度的增加而增大,即传感器灵敏度随着温度



(a)未经温度处理的传感器对葡萄糖的响应  
(a)Response curves of sensors without temperature treatment in glucose concentration



(b)经升温-降温循环水浴处理后传感器对葡萄糖的响应  
(b)Response curves of sensors subjected to heating-cooling treatment in glucose concentration

图 7 U 形光纤传感器对不同温度下葡萄糖溶液的响应曲线

Fig. 7 Response curves of U-shaped fiber-optic sensors in glucose solutions with different temperatures

的升高而增大,与现有的研究结果相违背。因为葡萄糖溶液的折射率随着温度的增大而减少<sup>[19]</sup>,当将裸光纤置于该溶液时,溶液折射率的减小使光纤内部光束的高阶模进入溶液中的数量减少,从而降低传感器的灵敏度。而图 7(a)中观察的实验结果可从图 8 中得到解释。图 8 中曲线分别为  $D_r=0 \mu\text{m}$  及  $K=0.070 \text{ mm}^{-1}$ ,  $D_r=500 \mu\text{m}$  及  $K=0.025 \text{ mm}^{-1}$  时 U 形光纤传输光强相对变化量与温度之间的关系。

从图 8 可以看出,随着温度的增加,未经温度

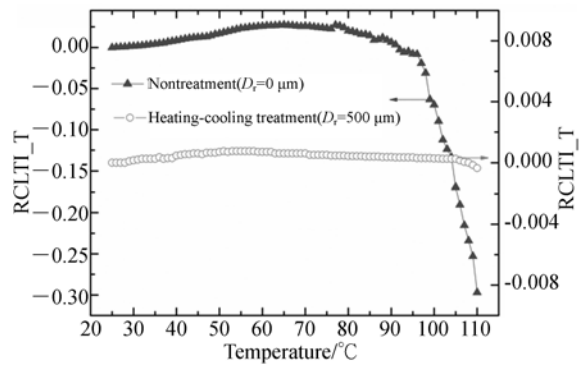


图 8 温度对光纤传输光强的影响

Fig. 8 Effect of temperature on the transmitted light intensity of fiber

处理的光纤,在 25~65 °C 内 RCLTI\_T 随着温度的升高而增大;当温度超过 65 °C 后 RCLTI\_T 随着温度的升高而减少,尤其是接近塑料光纤的玻璃化温度  $T_g=100 \text{ }^\circ\text{C}$  左右时,RCLTI\_T 迅速衰减。由于在 25~65 °C 内 RCLTI\_T 随着温度的升高而增大,即光纤内部传输的有效光强增大,从而增大了 U 区光纤与葡萄糖界面的光强<sup>[18]</sup>,因此未经温度处理的光纤传感器灵敏度随着温度的升高而增大,且在葡萄糖浓度为 0 g/100 ml 时,传感器在 65 °C 的 RCLTI\_6 远大于 25 °C。此外,从图 7(a)中还可以看出,在葡萄糖浓度为 0~12.5 g/100 ml 的溶液中,传感器输出信号的最大相对误差达到 140.1%。可见未经温度处理的塑料光纤传感器输出结果受温度的影响更为显著。

从图 7(b)中可以看出,在葡萄糖浓度为 0~12.5 g/100 ml 的溶液中,经过升温-降温循环水浴处理后 U 形光纤传感器的输出信号 RCLTI\_7 随着温度的增加而减少。当葡萄糖浓度为 0 g/100 ml 时,传感器在 65 °C 时的 RCLTI\_7 接近于 25°C。在整个观测区域,传感器输出信号的最大相对误差为 9.7%,该误差来源于温度升高导致溶液中葡萄糖分子之间的间距增大,光纤表面光与葡萄糖分子的作用强度减弱;而非由于光纤内部传输光强受温度的影响,如图 8 所示。因为经过温度处理后光纤已完成了玻璃化转变<sup>[20-21]</sup>,光纤纤芯材料折射率不再发生变化<sup>[16]</sup>,U 区光纤内部传输光强也不再受温度的影响。由此可见,经过升温-降温循环水浴处理后的 U 形光纤传感器具有温度独立性。

## 4 结 论

本文研究了 U 形光纤传感器敏感区不同研磨深度和弯曲曲率对传感器灵敏度的影响,对比分析了未经温度处理和经过升温-降温循环水浴处理后 U 形光纤传感器输出信号对温度的依赖性。研究表明:U 形光纤传感器的灵敏度受敏感区研磨后光纤直径和弯曲曲率的影响。对于研磨厚的光纤传感器存在临界研磨深度  $D_{rc}$ ,当研磨深度小于  $D_{rc}$ 时,传感器的灵敏度随着  $D_{rc}$ 的增大而增大;当研磨深度大于  $D_{rc}$ 时,传感器的灵敏度随着  $D_{rc}$ 的增大而减少。同时,改变研磨区域的

弯曲曲率可进一步提高传感器的灵敏度。本文中当  $D_r=500 \mu\text{m}$  和  $K=0.025 \text{ mm}^{-1}$ 时,传感器对葡萄糖溶液的灵敏度达到  $0.017 /\text{g} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$ 。此外,经升温-降温循环水浴处理后的传感器具有温度独立性,传感器对观测区域葡萄糖溶液在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  输出光强相对变化量的最大相对误差为  $9.7\%$ 。可见对于塑料光纤 U 形传感器,优化 U 区光纤的研磨深度和弯曲曲率可提高传感器的灵敏度;对光纤进行升温-降温循环水浴处理,可降低传感器对温度的依赖性,从而提高传感器测量结果的稳定性和准确性。本文的研究结果可为高灵敏度及温度独立性塑料光纤传感器的研制提供技术支撑。

## 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(8):1146-1149.
- [3] 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)
- [4] KHIJWANIA S K, SRINIVASAN K L, SINGH J P. An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005,104(2):217-222.
- [5] GASIOR K, MARTYNKIEN T, URBANCZYK W. Effect of constructional parameters on the performance of a surface plasmon resonance sensor based on a multimode polymer optical fiber [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(35): 8167-8174.
- [6] CHU F H, CAI H W, RONGHUI QU R H, *et al.*. Dissolved oxygen sensor by using Ru-fluorescence indicator and a U-shaped plastic optical fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008,6(6):401-404.
- [7] PRABHAKAR A, MUKHERJI S. Investigation of the effect of curvature on sensitivity of bio/chemical sensors based on embedded polymer semicircular waveguides [J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2012,171-172(9): 1303-1311.
- [8] 滕传新,夏洪运,景宁,等. 微/纳米塑料光纤的制备及其折射率传感特性研究 [J]. *光电子·激光*, 2013(1):1-5.  
TENG CH X, XIA H Y, JING N, *et al.*. Fabrication of the micro-/nano-POF and its refractive index sensing properties [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013(1):1-5. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] WU Y, YAO, B C, ZHANG A Q, *et al.*. Graphene-based D-shaped fiber multicore mode interferometer for hemical gas sensing [J]. *Optics Letters*, 2014, 20(39):6030-6033.
- [11] 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.
- [12] DAI X H, HE J, LIU Z, *et al.*. Stability of high-bandwidth graded-index polymer optical fiber [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 91 (4): 2330-2334.
- [13] ZHONG N B, LIAO Q, ZHU X, *et al.*. Tempera-

- ture-independent polymer optical fiber evanescent wave sensor [J]. *Scientific Reports*, 2015,5:11508.
- [14] MAKINO K, KADO T, INOUE A, *et al.*. Low loss graded index polymer optical fiber with high stability under damp heat conditions [J]. *Optics Express*, 2012,20(12):12893-12898.
- [15] YOON M S, KIM H J, KIM S J, *et al.*. Influence of the waist diameters on transmission characteristics and strain sensitivity of microtapered long-period fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 2013,38(15):2669-2672.
- [16] 钟年丙,李超楠,刘洋,等.老化处理对塑料光纤传感器光传输及灵敏度的影响 [J]. *光学精密工程*, 2016,24(5):9-15.
- ZHONG N B, LI CH N, LIU Y, *et al.*. Effects of ageing treatment on light transmission and sensitivity of plastic optical fiber sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(5):9-15. (in Chinese)
- [17] LUO 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.
- [18] ZHONG N B, ZHU X, LIAO Q, *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.
- [19] LU P, MEN L, SOOLEY K, *et al.*. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94 (13): 131110.
- [20] PETERS, K. Polymer optical fiber sensors—a review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(20): 13002-1-17.
- [21] KOVAČEVIĆ, M S, SAVOVIĆ S, DJORDJEVIĆ A, *et al.*. Measurements of growth and decay of radiation induced attenuation during the irradiation and recovery of plastic optical fibres [J]. *Optics and Laser Technology*, 2013,47:148-151.

## 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