

## 光纤多参数传感器研究

刘统玉<sup>1,2</sup>, 李振<sup>1</sup>, 孟祥军<sup>3</sup>, 赵林<sup>1</sup>, 王富奇<sup>4</sup>, 董果凤<sup>1</sup>, 王纪强<sup>1</sup>

(1. 山东省光纤传感技术重点实验室, 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250103;

2. 山东微感光电子有限公司, 山东 济南 250103; 3. 兖矿集团有限公司, 山东 济宁 272000;

4. 兖州煤业股份有限公司, 山东 济宁 272000)

**摘要:** 基于光纤 Bragg 光栅 (FBG) 检测原理, 研发了适用于地下空间安全监测应用的光纤风速、温度、湿度等多参数传感器。光纤风速传感器基于激光致热光纤热线式流量检测原理, 对于低风速有较高的灵敏度, 风速从 0 变化到 0.5 m/s 时, FBG 波长变化量为 800 pm, 采用解调精度为 1 pm 的光纤光栅解调仪, 风速分辨率为 0.7 mm/s。光纤湿度传感器通过在 FBG 光栅表面均匀涂覆湿度敏感的聚酰亚胺溶液, 湿度变化导致光纤应变变化进而实现湿度测量。对新型光纤光栅温湿度传感器的性能参数进行测试, 实验测试结果显示, 传感器监测灵敏度为 4.2 pm/%RH, 检测精度小于±3%RH。

**关键词:** 光纤传感; 地下空间; 风速; 温湿度

**中图分类号:** TN 253

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2020039

## Study on optical fiber multi-parameter sensor

LIU Tongyu<sup>1,2</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, MENG Xiangjun<sup>3</sup>, ZHAO Lin<sup>1</sup>,  
WANG Fuqi<sup>4</sup>, DONG Guofeng<sup>1</sup>, WANG Jiqiang<sup>1</sup>

1. The Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Qilu Technology University (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250103, China

2. Shandong Micro-Sensor Photonics Ltd., Jinan 250103, China

3. Yanzhou Mining Group Co., Ltd., Jining 272000, China

4. Yanzhou Coal Mining Company Limited, Jining 272000, China

**Abstract:** Based on the principle of fiber Bragg grating detection, an optical fiber sensor for detecting wind speed and temperature and humidity in underground space was designed. The designed optical fiber wind speed sensor was based on the thermal flow detection method, which has high sensitivity to low wind speed. For the speed rising from 0 to 0.5 m/s, the wavelength variation is about 800 pm. For the demodulator with sensitivity of 1 pm, the speed resolution is 0.7 mm/s. Fiber optic humidity sensor was fabricated by uniform surface coating of FBG element in polyimide solution, and detection sensitivity of 4.2 pm/% RH was achieved with accuracy less than  $\pm 3\%$  RH.

**Key words:** optical fiber sensor, underground space, wind speed, temperature and humidity

### 1 引言

煤炭作为我国最大的能源支撑, 在整个工业领域发展中具有举足轻重的作用。安全运营是矿山健

康发展的前提。随着煤矿信息化、机械化和智能化水平的提高, 新的智能化煤矿设备、通信技术和煤矿安全监测监控系统的逐渐普及, 我国矿山事故发生率大幅下降<sup>[1]</sup>。然而, 冲击地压、火灾、水灾、

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-01-17

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFC0804400); 山东省自然科学基金资助项目 (No.ZR2016QZ006)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0804400), The Natural Science Foundation of Shandong Province (No.ZR2016QZ006)

瓦斯泄漏等事故一旦发生, 会严重威胁井下工作人员的生命安全, 给社会带来严重的经济财产损失, 煤矿安全监测监控系统亟需性能更高的传感器。火灾是矿山地下空间的主要灾种, 其产生的高温、烟雾和有害气体是灾害救助的最大难题, 也是造成损失的主要因素; 准确实时地监测控制矿井风流, 可以有效地降温、防火灭火、疏散有害气体以及防止次生瓦斯爆炸等事故。近年来, 随着煤矿不断向深部开拓, 深井作业采掘工作面空气温度和湿度升高, 严重影响工人身体健康, 恶化电气设备运行环境, 构成新的安全生产隐患。因此, 对井下温湿度及风速的实时在线监测, 不但有助于减少火灾爆炸事故, 而且能够显著改善井下工作环境, 延长设备寿命, 提高生产效率。

矿用风速传感器主要分为热线式、叶轮式、差压式与超声漩涡式<sup>[2]</sup>。热线式风速传感器通过风流经发热元件时带走的热量与风速成正比的原理测量风速, 但井下环境恶劣, 流体动力干扰等影响因素较多, 且易损坏热线<sup>[3]</sup>。叶轮式风速传感器通过测量转动速率实现风速测量, 存在最低启动风速, 无法检测微风, 且转动结构易受污染影响叶轮转动阻力, 造成较大的测量误差, 适用于中速测量, 其机械转动机理也使传感器的使用寿命有限<sup>[4]</sup>。差压风速传感器是目前主要采用的矿用风速传感器, 结构简单, 价格较低, 但是受检测原理所限其量程有限、易堵塞<sup>[6]</sup>。另外, 传统的风速传感器都直接或间接地通过电信号与风速的对应关系实现风速测量, 在矿井下大功率变频环境下, 电信号传输易受电磁场干扰影响测量精度<sup>[7-8]</sup>。

温湿度传感器主要有毛发式、干湿球式、压阻式、电容式及电阻式等<sup>[9]</sup>。毛发式及干湿球式传感器是最早应用于温湿度监测的温湿度计量设备, 其应用广泛, 但测量精度较低(最大误差 $\pm 8\%$  RH)。压阻式温湿度传感器存在固定的温度漂移, 长期稳定性差。随着技术的进步, 电容式及电阻式温湿度传感器由于测量精度高, 响应速度快, 目前被广泛应用于仓储、医药、电力、矿山等领域的温湿度监测<sup>[10-12]</sup>。实际使用过程中, 现有传感器存在以下不足。灵敏度不高, 存在温度漂移、零点漂移, 需要进行相应误差补偿; 易受电磁信号干扰, 安装调试复杂, 不便于远距离传输; 同时, 由于传感器本身的非绝缘性, 在进行温湿度检测时引入了新的安全隐患, 因此难以对特殊环境的温湿度参数进行有效

检测。

光纤传感技术以光纤作为信号感知和信号传输载体, 普通传输光纤不会影响传输光波的频率特性; 同时, 光纤光栅传感系统以频率为信号数据采集要素, 从本质上避免了光强起伏引起的干扰。光纤光栅传感器响应快, 动态范围大, 不受光缆接头等损耗影响, 具有本质安全、抗电磁干扰等突出优点, 特别适合易燃易爆等危险场合应用<sup>[13-14]</sup>。针对地下空间安全监控需求, 本文开展了基于光纤光栅检测原理的风速、温湿度传感器研发, 实现了矿山微风、低风检测以及高灵敏度温湿度检测的技术需求。

## 2 光纤 Bragg 光栅传感及解调

### 2.1 光纤 Bragg 光栅传感原理

光纤 Bragg 光栅 (FBG, fiber Bragg grating) 是一段纤芯中具有折射率周期性变化结构的光纤, 是利用光纤的光敏特性制成的。由于石英光纤具有紫外光敏特性, 故可在光纤上直接制作光波导结构形成光纤波导器件, 相当于在纤芯内有一个窄带滤波器或者反射镜。基于光纤光栅传感器的传感过程是通过外界参量对 Bragg 中心波长的调制来获取传感信息, 是一种波长调制型光纤传感器。FBG 结构如图 1 所示, 其中, 内层为纤芯结构, 外层为包层结构, 纤芯的折射率比包层的折射率稍大。图 1 中,  $\Lambda$  为光栅的周期, 当光波通过 FBG 传感器时, 特定波长的光被光纤光栅反射回去, 其他波长的光则透过<sup>[14]</sup>。

根据光纤耦合模理论, 光纤 Bragg 光栅的谐振方程为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中,  $\lambda_B$  为光纤 Bragg 中心波长,  $n_{\text{eff}}$  为纤芯有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期。由式(1)可知, FBG 传感器中心波长由其纤芯有效折射率和光栅周期共同决定。对式(1)微分得

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

由式(2)可知, 当  $n_{\text{eff}}$  或  $\Lambda$  改变时, 光纤 Bragg 中心波长会发生漂移。

无论是对光栅进行拉伸还是压缩, 均会导致光栅周期  $\Lambda$  发生变化。光纤本身具有的弹光效应决定了其有效折射率  $n_{\text{eff}}$  会随外界应力状态的变化而变化。应力应变引起的光纤 Bragg 波长漂移如式(3)所示。

$$\Delta\lambda_{B_s} = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\varepsilon = K\Delta\varepsilon \quad (3)$$

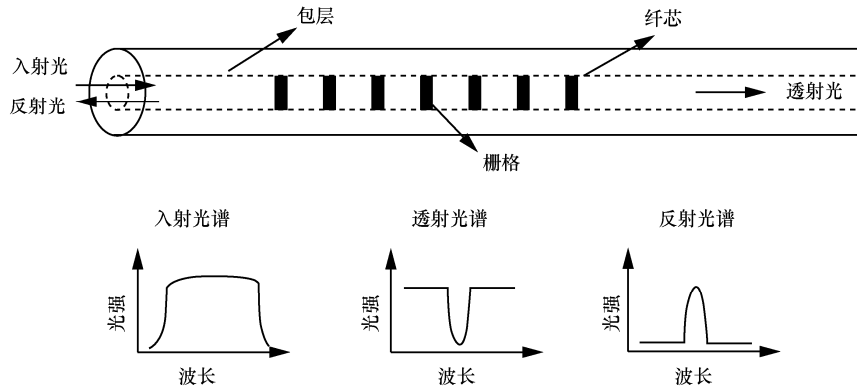


图 1 光纤 Bragg 光栅结构示意图

其中,  $P_e$  为 FBG 的弹光系数,  $K$  为测量应变的灵敏度,  $\Delta\varepsilon$  表示光栅应变。

温度变化引起的光纤 Bragg 波长漂移如式(4)所示。

$$\Delta\lambda_{B_r} = K_T \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (4)$$

其中,  $K_T$  为温度灵敏系数,  $\alpha$  为 FBG 的热膨胀系数,  $\zeta$  为 FBG 的热光系数,  $\Delta T$  表示温度变化。在同种温度环境下, 采用光纤光栅温度补偿传感器可以克服温度对应变测量的影响。因此, 应力应变成为引起光栅 Bragg 波长漂移的最直接外界因素。当光纤光栅温度、应力或磁场改变时, 都会导致反射中心波长的变化<sup>[14]</sup>。因此, 通过测量光纤光栅中心波长的变化就可以反映外界被测信号的变化。

### 2.2 FBG 传感网络复用及解调原理

FBG 传感网络系统包括传感部分和解调部分, 解调部分是传感网络化的基础, 其中传感光栅的复用是关键技术。复用技术使多个传感器共用同一光源和解调系统, 从而降低成本, 简化设备。通常情况下, 可以通过对光载波的频谱、幅度、相位或偏振情况进行调制编码。简单的 FBG 传感网络复用

的原理如图 2 所示。

解调是影响光纤传感实用化的关键。传感过程通过外界参量对光纤光栅中心波长的调制来实现; 而解调过程则相反, 它是将反射波长的变化量转化为未知的外界参量信息的过程。图 2 中激光器发出脉冲光通过光分路器到达感知终端 FBG 传感器阵列, FBG 传感器感应外界环境温度、应变, 使产生的反射光波长  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  发生改变, 通过对 FBG 传感器波长监测及多通道的波分复用, 实现光纤多参数传感网络的实时在线监测。

### 3 光纤风速传感器

#### 3.1 光纤风速传感器设计

光纤热线传感器探头结构及检测原理如图 3 所示。一根普通光纤 Bragg 光栅 (FBG) 与掺铈光纤并排插入铜管内, 铜管内径为 0.6 mm, 壁厚 0.1 mm, 内部注满硅油。普通单模光纤光栅与快速光栅解调仪连接, 其中心波长为 1 550 nm, 掺铈光纤在 1 480/1 550 nm 泵浦光源的激光抽运下, 将光能转化为热能, 从而使 FBG 周围温度升高, 其中心波长发生红移; 当流体流经铜管表面时发

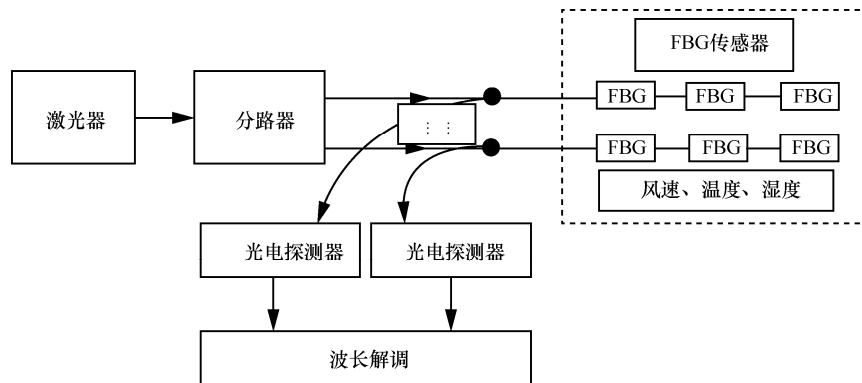


图 2 FBG 传感网络复用的原理

生对流传热，热量散失，FBG 周围温度降低，其中心波长发生蓝移。

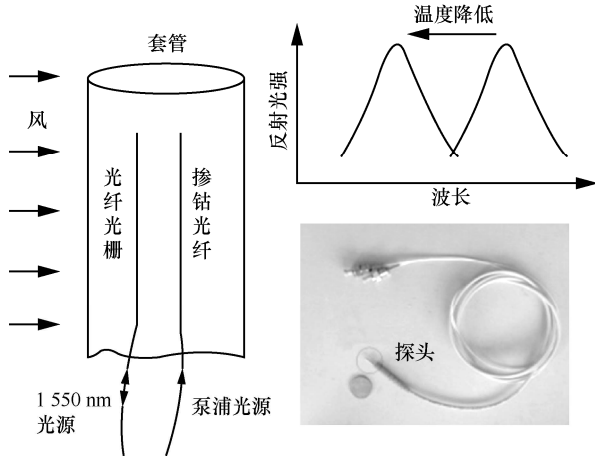


图 3 传感器探头结构及检测原理

铜管一端由绝热材料固定，固体导热可忽略不计，掺锗光纤通过光热转化效应产生的热量为  $Q$ 。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (5)$$

其中， $Q_1$  为被铜管吸收的热量； $Q_2$  为与外界流体进行热交换的热量，包括热传导损耗  $Q_{\text{cond}}$ 、对流损耗  $Q_{\text{conv}}$  和热辐射损耗  $Q_{\text{radi}}$ 。铜管直径为 0.6 mm，与光纤直径 0.125 mm 具有相同数量级，且铜管中注入良导体硅油，因此可将 FBG 所处温度场等同于铜管内壁温度分布。铜的导热系数为  $m$ ，表面传热系数为  $h$ 。由传热学可知，当固体内部导热热阻远小于其表面换热热阻时，任何时刻固体内部温度趋于一致，可以认为整个固体在同一时刻均处于同一温度下，由毕渥数  $Bi$  作为参考标准<sup>[15]</sup>。

$$Bi = \frac{hl_1}{\lambda} \quad (6)$$

其中， $l_1$  为铜管特征长度，此处近似为铜管壁厚。

因此，光纤热线传感探头可按集中参数法建立传热模型，所求解温度仅是时间的一元函数，与空间坐标无关，即可认为铜管沿轴向无温度梯度。辐射换热如式(7)所示。

$$Q_{\text{radi}} = \varepsilon\delta S(t_w^4 - t_0^4) \quad (7)$$

其中，铜的辐射发射率  $\varepsilon=0.03$ ，黑体辐射常数  $\delta=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，铜管外表面积  $S=2.512 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ，最大温升  $t_w=473 \text{ K}$ ， $t_0=300 \text{ K}$ ，可得  $Q_{\text{radi}}=1.8 \text{ mW}$ 。

而总功率为 300 mW 左右，因此可忽略辐射传热影响。 $Q=Q_1+Q_{\text{conv}}$  为非稳态、有内热源传热模型，其导数微分方程为

$$Q' = \rho c V \frac{\partial t}{\partial \tau} + hA(t - t_0) \quad (8)$$

当传感器在一定功率下达到稳态平衡时，温度  $t=t_w$ ，可得

$$Q' = -hA(t_w - t_0) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)，可得

$$hA(t_w - t) = \rho c V \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (10)$$

当传感器达到稳态平衡时，其自身温度不再变化，内热源产生的热量等于对流散失的热量，可得

$$Q = hA\Delta t \quad (11)$$

由光纤传感原理可知

$$\lambda = \lambda_0 + k\Delta t \quad (12)$$

其中， $k$  为光纤光栅温度系数。

表面传热系数  $h$  取决于塞努尔数  $N_u$ ， $h = \frac{N_u k_w}{l_1}$ ，

其中， $k_w$  为流体导热系数。在工程应用中，通常选用较简洁的热耗散计算式——King 定律<sup>[15]</sup>表示  $N_u$ ，如式(13)所示。

$$N_u = A_c + B_c R_c^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

基于式(10)~式(13)，传感器动态范围（对应于所用光纤光栅波长的变化） $\Delta\lambda$  和传感器响应时间  $\tau$  如式(14)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\lambda &= \frac{kv^{\frac{1}{2}}l_2Q}{k_w \left( A_c v^{\frac{1}{2}} + B_c l_2^{\frac{1}{2}} u^{\frac{1}{2}} \right) A} \\ \tau &= \frac{\rho c V v^{\frac{1}{2}} l_2}{\left( A_c v^{\frac{1}{2}} + B_c l_2^{\frac{1}{2}} u^{\frac{1}{2}} \right) A} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

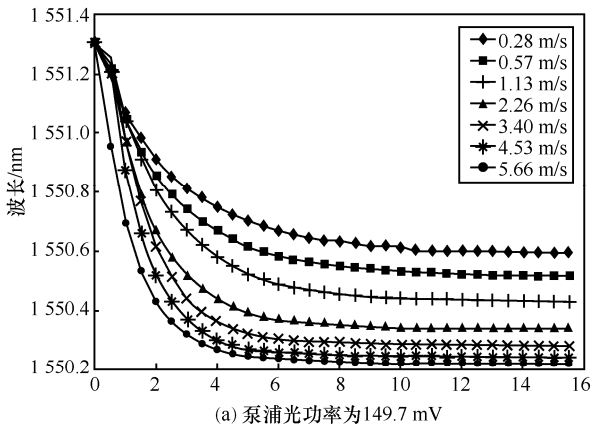
其中， $A_c$ 、 $B_c$  是取决于流体状态的常数， $\Delta\lambda$  为光栅波长变化， $u$  为速度， $\rho c V$  为探头热容量（ $\rho$ 、 $c$ 、 $V$  分别为探头封装材料密度、比热容和体积）， $v$  为空气粘度系数， $A$  为探头有效面积， $l_2$  为传感元件的特征长度。由式(14)可以看出，光纤光栅的波长变化与所用套管的散热面积和风速成反比，传感器响应时间与套管的热容器成正比，与套管的散热面积

和风速成反比。

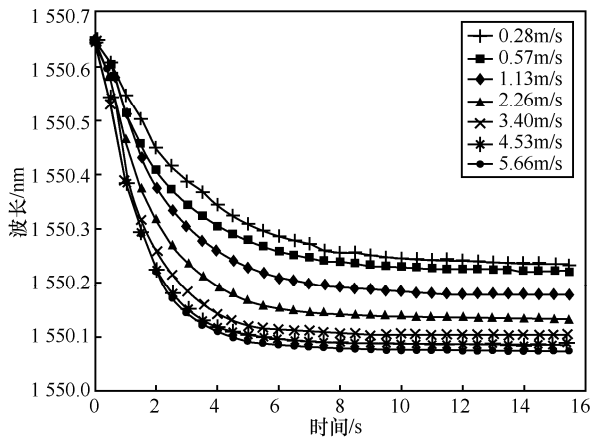
### 3.2 光纤风速传感器测试

根据 2.1 节所述自制光纤热线传感探头，传感器实验装置参数如下：泵浦光源为 1 480/1 550 nm，其功率为 0~500 mW 可调；解调仪为 1 kHz 快速光纤光栅解调仪；泵浦光源与传感探头内的掺杂光纤连接，解调仪与传感探头内的光纤光栅连接，传感探头置于风洞中。

在泵浦光功率分别为 149.7 mW、80 mW 的条件下，用光栅解调仪记录不同风速对应的波长漂移，结果如图 4 所示。



(a) 泵浦光功率为 149.7 mW



(b) 泵浦光功率为 80 mW

图 4 不同风速对应的波长漂移

从图 4 可以看出，传感器探头的响应时间随着风速的增加而减少，波长动态范围也随之增加。对风速与光纤光栅波长漂移量呈非线性变化。在 0.28~5.66 m/s，泵浦光功率为 147.9 mW、80 mW 时，FBG 波长漂移在 2.5 s 内达到最大波长变化的 63%。

从图 4 还可以看出，随着风速的增加，光纤光栅波长漂移量呈非线性变化，在较低的风速范围内其对风速的灵敏度较高，泵浦光源功率越

高，光栅波长漂移范围越大，风速检测灵敏度越高。如果使用精度为 1 pm 的商用光纤光栅解调仪提取测量数据，在泵浦功率 149.7 mW 下，当风速在 0~0.57 m/s 范围内时，传感系统的灵敏度为 1 370 pm/(m·s<sup>-1</sup>)，此时传感器最高分辨率达到 0.7 mm/s；当风速在 0.57~2.26 m/s 范围内时，传感系统的灵敏度为 109 pm/(m·s<sup>-1</sup>)；当风速在 2.66~5.66 m/s 范围内的灵敏度为 33 pm/(m·s<sup>-1</sup>)。由此可知，该装置非常适合于微风监测。

分析泵浦光功率为 80 mW 时的波长变化数据可以发现，各曲线的前 5 个数据具有良好的线性，即不同速度下的拟合曲线起始阶段斜率与速度呈线性相关，如图 5 所示。根据这一线性相关性，可以为进一步缩短传感器响应时间提供研究方向。

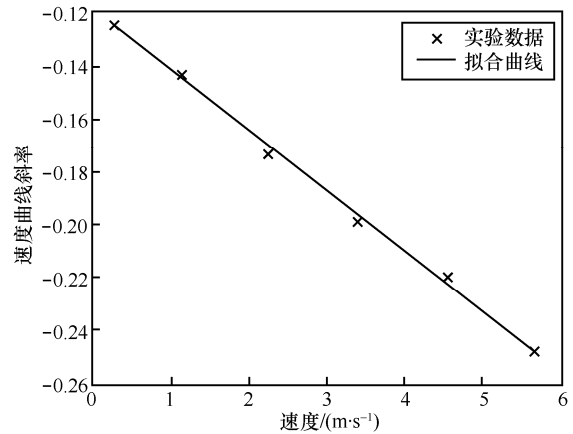


图 5 波长变化曲线斜率及其拟合曲线

## 4 光纤温湿度传感器

### 4.1 光纤温湿度传感器设计

依据热光效应、热膨胀效应，温度会导致光栅有效折射率和光栅间距的变化。环境中湿度变化将导致湿敏薄膜膨胀或收缩，由于湿敏薄膜和光栅之间的相互作用，引起被涂覆光栅的应变，使光栅有效折射率和光栅间距发生变化。综合考虑湿度、温度引起的光栅轴向应变、弹光效应、热光效应，光纤光栅中心波长关于温、湿度的关系式可简化为

$$\Delta\lambda = (1 - P_e)\alpha_{RH} + [(1 - P_e)\alpha_T + \xi]\Delta T \quad (15)$$

其中， $P_e$ 、 $\xi$  分别为光栅的弹光系数、热光系数， $\alpha_{RH}$ 、 $\alpha_T$  分别为光栅的湿度膨胀系数和温度膨胀系数。本文将涂覆湿敏材料后的光纤光栅简称为湿度光栅。湿度光栅的弹光系数、热光系数、湿度膨胀系数和温度膨胀系数均为常数，光纤光栅的中心波

长变化  $\Delta\lambda_H$  为

$$\lambda_H = k_{HT}\Delta T + k_{HH}\Delta H \quad (16)$$

其中,  $k_{HT}$ 、 $k_{HH}$  分别为湿度光栅对温度和相对湿度的灵敏度系数, 如式(17)所示。

$$\begin{aligned} k_{HT} &= [(1 - P_e)\alpha_T + \xi] \\ k_{HH} &= (1 - P_e)\alpha_{RH} \end{aligned} \quad (17)$$

本文将未涂覆的光纤光栅简称为温度光栅。温度光栅的中心波长变化  $\Delta\lambda_T$  为

$$\lambda_T = k_{TT}\Delta T + k_{TH}\Delta H \quad (18)$$

其中,  $k_{TT}$ 、 $k_{TH}$  分别为温度光栅对温度和相对湿度的灵敏度系数, 未涂覆的光纤光栅的湿度膨胀系数  $\alpha_{RH}$  趋近于 0。

$$\begin{aligned} k_{TT} &= [(1 - P_e)\alpha_T + \xi] \\ k_{TH} &= (1 - P_e)\alpha_{RH} \end{aligned} \quad (19)$$

联立式(16)、式(18)和式(19), 可得环境温湿度与 2 种光纤光栅中心波长的关系, 分别如式(20)和式(21)所示。

$$\Delta T = \frac{1}{k_{TT}} \Delta\lambda_T \quad (20)$$

$$\Delta RH = -\frac{1}{k_{TT}k_{HH}} k_{HT}\Delta\lambda_T + \frac{1}{k_{HH}} \Delta\lambda_H \quad (21)$$

由此可知, 通过解调仪实时测量 2 种光纤光栅的波长, 对波长数据进行线性拟合和温度补偿即可得到当前环境温湿度数值。

传感器封装采用聚酰亚胺作为湿敏材料, 并采用提拉涂覆法对光栅进行涂覆镀膜, 对涂覆后的光栅进行加热处理, 聚酰亚胺脱水固化, 在光纤光栅表面形成聚酰亚胺薄膜。在实验中不断优化提拉速度、溶液粘度、固化时间等参数, 通过改变涂覆次数可以获得不同厚度的均匀聚酰亚胺薄膜, 实现对不同传感器的灵敏度控制。最后, 根据传感器在现场的具体应用环境要求, 传感器本身及内部光纤固定采用 SLA 光敏树脂材料对光栅进行结构化封装。

#### 4.2 光纤温湿度传感器测试

在恒温条件下, 饱和盐溶液可在液面处达到三相平衡状态, 在液面上方形成恒定的湿度环境。本节实验通过恒温恒湿箱和饱和盐溶液产生温湿度恒定的环境, 对传感器的灵敏度和响应时间进行测试。保持 25℃ 的恒温条件下, 把传感器分别置于 LiBr (6.4% RH)、LiCl (11.3% RH)、MgCl<sub>2</sub>

(32.8% RH)、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (43.2% RH)、NaBr (57.6% RH)、NaCl (75.3% RH)、KCl (84.2% RH)、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (97.3% RH) 饱和盐溶液, 监测传感器湿度光栅波长随湿度变化曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 随着环境湿度的增加, 传感器波长逐渐增加, 传感器对湿度变化具有良好的响应特性。

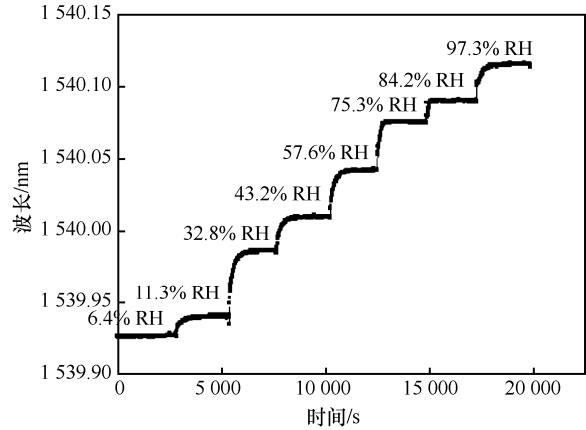


图 6 湿度光栅响应曲线

为进一步对传感器进行标定测试, 任选 3 个温湿度传感器, 保持 25℃ 的恒温条件下, 把传感器分别置于 LiCl (11.3% RH)、CH<sub>3</sub>COOK (22.5% RH)、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (43.2% RH)、NaBr (57.6% RH)、KI (68.9% RH)、KCl (84.2% RH) 饱和盐溶液, 待溶液内部温湿度平衡后, 以 25℃、11.3% RH 为基准, 3 个传感器 ( $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ) 湿度光栅波长随湿度的变化曲线如图 7 所示。对 3 个传感器波长随湿度变化曲线进行线性拟合, 拟合函数分别为  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 。

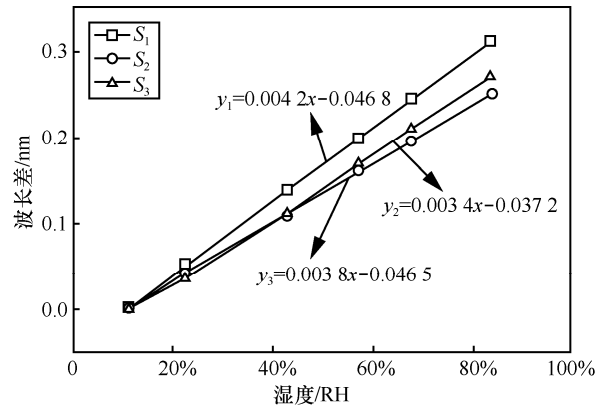


图 7 传感器标定曲线

由图 7 可知, 传感器对湿度的响应具有良好的线性度, 且传感器在 11.3% RH~84.2% RH 范围内, 中心波长变化  $\Delta\lambda$  为 0.25~0.31 nm, 传感器湿度检

测灵敏度为 3.4 pm/%RH~4.2 pm/% RH。

根据传感器标定系数对传感器监测环境湿度与标准值进行误差分析，两者的监测误差曲线如图 8 所示。由此可见，传感器对环境湿度值的响应与标准值一致，且检测误差小于±3% RH。

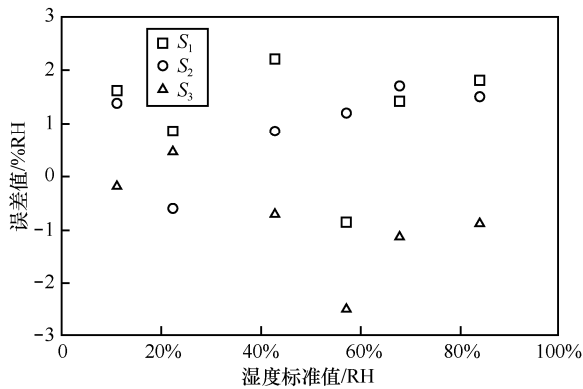


图 8 传感器误差曲线

固定 25℃ 恒温条件下，把传感器依次放入湿度变化值大于 40% RH 的饱和盐溶液，当湿度发生改变时，传感器的湿度光栅波长随之发生偏移，待湿度光栅波长稳定后，以传感器在一定湿度值下，光栅波长总偏移量的 63%所需的时间作为传感器响应时间<sup>[16]</sup>，如图 9 所示。由图 9 数据计算可得，传感器响应时间为 150 s。

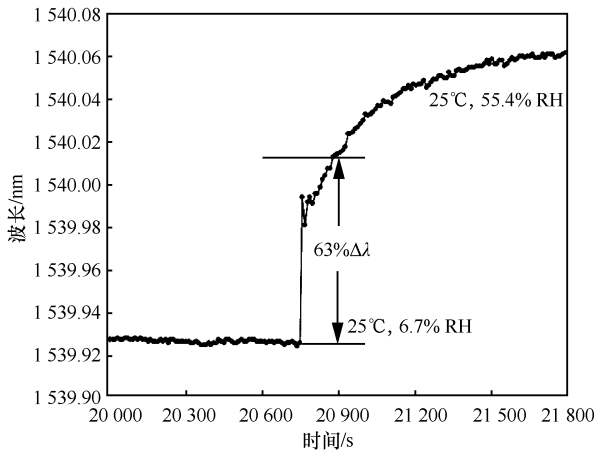


图 9 传感器响应时间

## 5 结束语

本文基于光纤光栅检测原理热线传感特性，研发了适用于地下空间安全监测应用的光纤风速传感器。分析了传感器量程、响应时间的影响参数，并通过实验证明光纤风速传感器对于低风速有较

高的灵敏度，当风速为 0.5 m/s 时，风速分辨率为 0.7 mm/s。光纤温湿度传感器在 FBG 光栅表面均匀涂覆湿度敏感的聚酰亚胺溶液，湿度变化导致光纤应变变化进而实现湿度测量。对新型光纤光栅温湿度传感器的性能参数进行测试，实验测试结果显示传感器监测灵敏度 4.2 pm/%RH，检测精度小于±3% RH。

## 参考文献:

- [1] 丁恩杰, 金雷, 陈迪. 互联网+感知矿山安全监控系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 129-134.  
DING E J, JING L, CHEN D. Study on safety monitoring and control system of internet + perception mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 129-134.
- [2] 潘竟涛, 赵丹, 李宗翔, 等. 大明矿通风系统故障源诊断及风速传感器的布置[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 153-158.  
PAN J T, ZHAO D, LI Z X. Fault source diagnosis for ventilation system and air[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 153-158.
- [3] CAI Z Y, VAN V R, SUY H, et al. A phase-domain readout circuit for a CMOS-compatible thermal-conductivity-based carbon dioxide sensor[C]// 2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference. IEEE, 2018: 332-334.
- [4] 王昌, 倪家升, 王纪强, 等. 风力发电中全光纤风速传感器及制作工艺研究[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 689-692.  
WANG CH, NI J S, WANG J Q. All-fiber velocity sensors applied in wind power[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 689-692.
- [5] LI S H, SUN X J, ZHANG R W. Simulation of frequency discrimination and retrieval of wind speed for the bistatic doppler wind lidar[J]. Optik - International Journal for Light & Electron Optics, 2019, 179: 796-803.
- [6] 李振, 王纪强, 赵林. 基于差压原理的矿用光纤光栅风速传感器[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 251-256.  
LI Z, WANG J Q, ZHAO L. Mine wind speed sensor using fiber Bragg grating based on differential pressure principle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 251-256.
- [7] YURCHENKO A V, MEKHTIYEV A D, BULATBAYEV F N. the model of a fiber-optic sensor for monitoring mechanical stresses in mine workings[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, 54: 528-533.
- [8] 孙淮清, 王建中. 流量测量节流装置设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
SUN H Q, WANG J Z. Design Manual of flow measurement and throttling device [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [9] LEE C Y, LEE G B. Humidity sensors: a review[J]. Sensor Letters, 2005, 3(1-4): 1-15.
- [10] FARAHANI H, WAGIRAN R, HAMIDON M. Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review[J]. Sensors, 2014, 14(5): 7881-7939.

- [11] 程军. 传感器及实用检测技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.  
CHEN J. Sensor and practical detection technology [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2008: 130-138.
- [12] LIN Y, GONG Y, WU H J. Polyimide-coated fiber bragg grating for relative humidity sensing[J]. Photonic Sensors, 2015, 5(1): 60-66.
- [13] LI Z, WANG J Q, ZHAO L. High sensitivity 'hot-wire'-based gas velocity sensor for safe monitoring in mining applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(24): 10192-10198.
- [14] 廖延彪, 黎敏. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
LIAO Y B, LI M. Optical fiber sensing technology and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
YANG S M, TAO W S. Heat transfer [M]. Higher education press, 2006.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 湿度传感器校准规范: JJF 1076—2001[S]. 北京: 中国计量出版社, 2002.  
General Administration of quality supervision, inspection and Quarantine of the people's Republic of China. JJF 1076-2001 humidity sensor calibration specification[S](2001-11-30) [2020-01-17].

## [作者简介]



刘统玉（1963—），男，山东济宁人，博士，山东省科学院研究员，主要研究方向为光纤传感技术。



孟祥军（1963—），男，山东济宁人，博士，兖矿集团有限公司研究员，主要研究方向为煤炭安全高效开采技术。



赵林（1981—），男，山东淄博人，山东省科学院激光研究所副研究员，主要研究方向为光纤温湿度传感器及管道泄漏监测技术。



王富奇（1964—），男，河南南阳人，兖矿集团有限公司研究员，主要研究方向为煤炭安全防控技术。



董果凤（1989—），女，山东聊城人，山东省科学院激光研究所研究实习员，主要研究方向为光纤温湿度传感器及矿用粉尘在线监测技术。



李振（1989—），男，山东济宁人，山东省科学院激光研究所助理研究员，主要研究方向为光纤风速/流量传感技术研究与应用。



王纪强（1980—），男，山东莱芜人，博士，山东省科学院激光研究所副研究员，主要研究方向为光纤传感器及应用。