DOI: 10.11883/bzycj-2017-0253

粉尘质量浓度的光纤光栅传感测量技术*

丁云峰[1],郭永兴[2,3],陈先锋[1],杨冰涛[1],熊 丽[2,3]
(1.武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070;
2.武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室,湖北 武汉 430081;
3.武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室,湖北 武汉 430081)

摘要:粉尘质量浓度是粉尘爆炸的关键因素,针对目前对本质安全、可实时监测预警的粉尘质量浓度测量技术的迫切需求,提出一种基于光纤光栅和光纤准直器的新型测量技术,在阐述其测量理论的基础上,搭建测量和实验装置实物。对 200、300 和 400 目这 3 种粒径规格的小麦粉尘分别开展实验测量,结果表明:所提出的测量技术的光功率输出和粉尘质量浓度呈线性关系;并与标准的称重法得到的粉尘质量浓度开展对比,验证了光纤光栅测量技术的有效性。

关键词:光纤光栅;光纤准直器;粉尘质量浓度检测;安全监测
中图分类号:O389; TN253 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

可燃性粉尘广泛存在于化工、冶金、粮食加工、矿物开采等领域。当粉尘颗粒物质量浓度达到一定程度时,极易引起粉尘爆炸事故,带来灾难性的后果。粉尘质量浓度的监测和预警技术受到了广泛的重视。关于粉尘质量浓度的测量主要依靠称重法、测尘仪等手段。称重法测量准确度高,但过程繁琐,无法快速的反映粉尘的质量浓度状况,不能用于实时监测预警[1];测尘仪是人工在现场持仪器读取粉尘质量浓度,同样无法实现粉尘质量浓度实时预警,而且为带电型仪器,有电荷输出时,易引起环境粉尘燃爆。粉尘质量浓度的测量原理大致有电荷法、电容法、光散射法等[2-10]。赵恩彪等[2]、陈建阁等[3]、赵恩彪等[4]根据粉尘颗粒与流场中金属电极之间的碰撞产生静电荷的原理,研究了基于电荷法的煤粉尘质量浓度测量技术。李静等[5]根据粉尘质量浓度不同时其介电常数不同的原理,研究了电容法测粉尘质量浓度技术,通过电容输出电压表征粉尘质量浓度大小。张珊珊等[6]、高昊等[7]根据激光经过粉尘时产生散射的原理,利用光电探测器检测透过的光强来表征粉尘质量浓度,但上述方法均需要将带电设备置于粉尘现场,存在安全隐患,对防止尘爆非常不利。为此,需要一种本质安全、可实时测量的粉尘质量浓度监测技术。光纤光栅是一种新型光无源器件,以光为传感信号,具备无电检测、不受电磁干扰、精度高、一根光纤可串接多个光栅等优势,是一种本质安全的检测元件,特别符合粉尘环境对监测元件的苛刻要求[11-12]。目前光纤光栅传感在土木工程[13]、机械装备[14]、机器人[15]等领域的安全监测方面已经得到广泛应用,但在粉尘安全监测领域尚无相关研究报道。本文中根据光纤光栅的基本传感原理,结合光纤准直器,提出了一种粉尘质量浓度的测量方法,具备无电、远距离检测等优势,搭建了测量装置并开展了实验测试,可为粉尘质量浓度测量提供新方法和新思路。

1 测量装置与测量原理

1.1 光纤光栅传感原理

图 1 所示为光纤光栅的传感原理:光栅经激光刻写于细微的单模光纤纤芯中,一束宽带光入射于光纤内时,光纤光栅反射特定波长的光信号,即经过光栅后的透射出的光信号出现“塌陷”,而被光栅反射

* **收稿日期**:2017-07-19; **修回日期**:2017-08-17
基金项目:国家自然科学基金(51374164,51605348);
国家重点研发计划(2016YFC0802801,2017YFC0804705);湖北省自然科学基金(2016CFB116)
第一作者:丁云峰(1993—),男,硕士研究生; **通信作者**:陈先锋,cxf618@whut.edu.cn。

回的光信号为峰状光谱，当刻有光栅处的光纤受到温度和轴向应变作用时，该反射光谱产生漂移，中心波长值发生规律性变化。光纤 Bragg 光栅的中心波长值的漂移量与其所处环境温度和所受轴向应变的关系为[16]：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=(\alpha_{\mathrm{f}}+\xi)\Delta T+(1-P_{\mathrm{e}})\Delta\varepsilon \tag{1}$$

式中：λ 为光纤 Bragg 光栅初始的中心波长，$\Delta\lambda$ 为光栅的波长漂移量，α_{f} 为光纤的热膨胀系数，ξ 为光纤材料的热光系数，P_{e} 为光纤的弹光系数。这就是光纤 Bragg 光栅对应变和温度参数的测量原理。

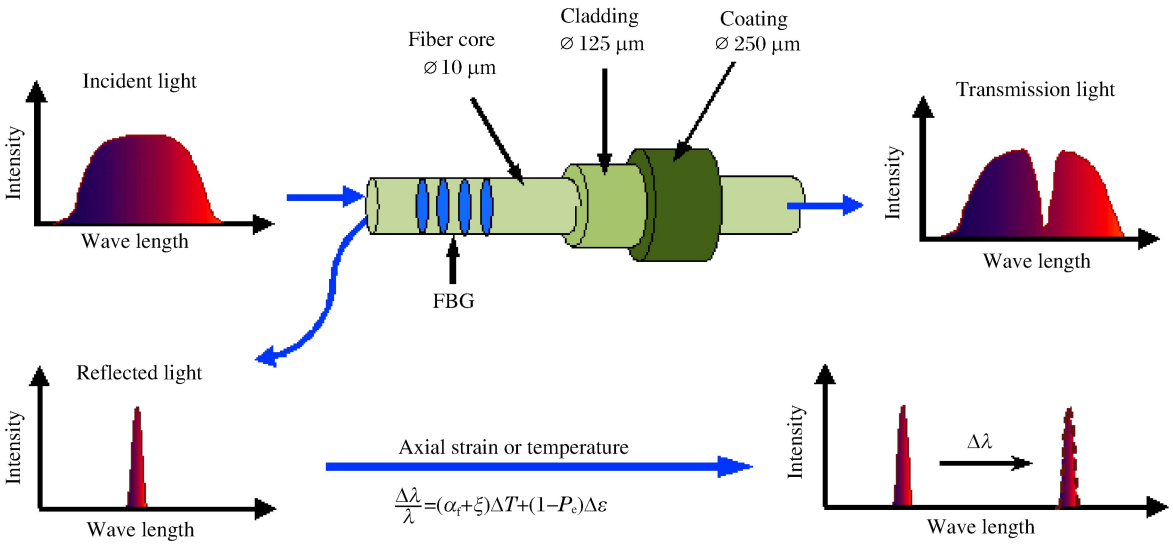


图 1　光纤光栅传感原理示意图

Fig. 1　Illustration of the mechanism of fiber Bragg grating

1.2　粉尘质量浓度测量原理与装置

整个测量装置由两个对准的光纤准直器、光纤光栅、粉尘盒、光学解调探测仪、计算机组成，如图 2 所示。光学解调探测仪发出宽带光，经单模光纤进入左侧第一光纤准直器，宽带光的光束放大后以平行光的形式进入粉尘盒，光强经过粉尘颗粒的反射、散射而削弱后，进入到右侧第二光纤准直器，然后通过光纤进入光纤光栅，和光栅中心波长一致的光被反射，反射光依次通过第二光纤准直器、粉尘盒（光强再次削弱）和第一光纤准直器后，进入光学解调探测仪，经过仪器的解调、光电探测后，通过计算机实时显示光纤光栅反射谱的高度和具体的光功率值，在粉尘作用下，光谱高度降低。

根据 Beer-Lambert 光透射定律[17]，一束强度为 I_0 的平行光入射到粉尘颗粒上时，由于粉尘的散射和吸收效应，出射光强度会出现减弱，出射光强 I 和入射光强 I_0 之间的关系为：

$$I=I_0\mathrm{e}^{-\frac{N\pi LD^2K(\lambda,m,D)}{4}} \tag{2}$$

式中：N 是粉尘的粒子数浓度，粒子数浓度表示每立方米空气中所含粉尘的颗粒数，D 是粉尘粒径，K 是消光系数，L 是待测粉尘区的厚度，消光系数 K 是与光源波长 λ、折射率 m、颗粒粒径 D 有关的参数，被测粉尘类型等参数确定时，其即为常数，若被测粉尘粒径 D 已定，待测区厚度 L 确定后，则粉尘粒子数浓度 N 只与出射光的衰减情况有关，通过标定入射、出射光的光强差值和粉尘质量浓度之间的关系，即可通过光强的变化表征粉尘质量浓度。对于图 2 中测量装置，通过检测光纤光栅在有无粉尘前后的反射谱光强的变化，即可反推得到粉尘质量浓度的大小。

由于测量装置是通过检测光栅的光谱强度来反映粉尘质量浓度，就需即使光栅光谱的中心波长产生左右漂移（如环境温度变化、光栅受力等），光谱强度也不发生变化，这就需要宽带光源在一定的带宽范围内足够平坦。为此，光学解调探测仪内的光源为特殊定制，经过测试，其在 1 550～1 570 nm的范围内具备优越的光谱平坦性。因此本测量装置可具有温度测量的功能——利用光纤光栅波长漂移来测量环境温度。利用光谱强度来测量粉尘质量浓度时，二者互不干扰，实现双参数同时测量。

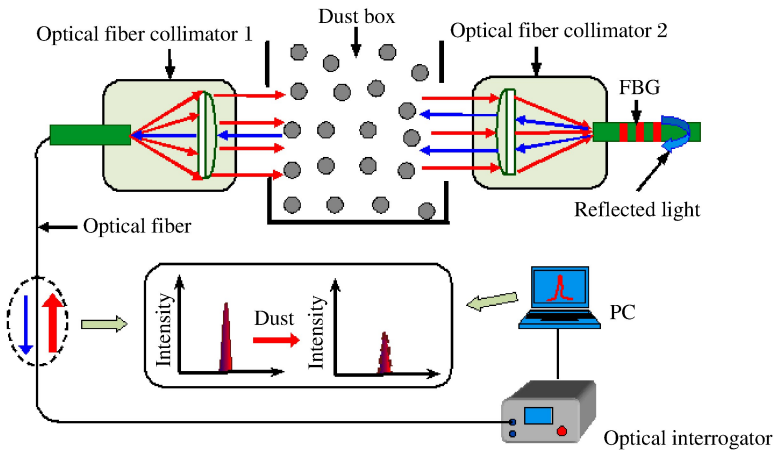


图 2　粉尘质量浓度测量原理示意图

Fig. 2　Illustration of the measuring principle for dust concentration

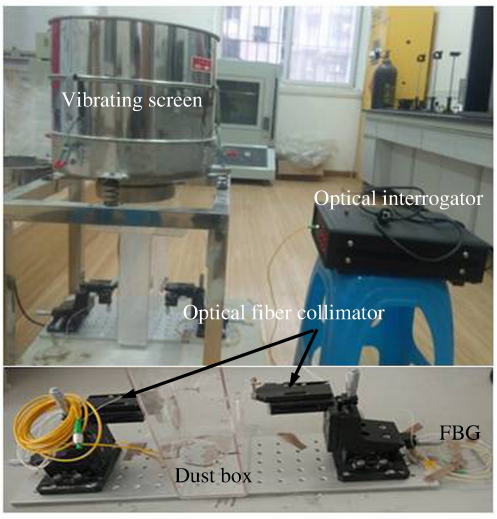


图 3　光纤光栅粉尘质量浓度测量装置

Fig. 3　Fiber Bragg grating measuring equipment for dust concentration

图 3 所示为根据测量原理搭建起的实验装置，其中 2 个光纤准直器安装在五维调整架上便于对准调整，粉尘盒子采用透明亚力克板制造而成，两侧面留有和准直器对准的通孔，粉尘盒置于振动筛下方，通过振动筛产生向下流动的粉尘颗粒环境，通过选用不同型号的振动筛网，可以调整落入粉尘盒中的粉尘颗粒的直径大小。实际应用时，探测装置可置于测量现场，通过长距离的光纤与光学解调探测仪连接，即可实现粉尘现场的无电、远程测量，实现检测技术的本质安全。

2　实验结果

采用手持式粉尘检测仪作为本装置的参考仪器，量程为 0～100 g/m^3，利用其测得的粉尘盒内粉尘质量浓度值作为参考。光学解调探测仪的光源总带宽为 80 nm(1 525～1 605 nm)，在 1 550～1 570 nm 内光谱平坦，因此选取了一支中心波长为 1 560.1 nm 的光纤光栅作为传感元件，探测仪光强功率准确度为 1 mW，采集频率为1 Hz。光纤准直器的光斑直径为 500 μm，工作距离为 10～15 cm。

2.1　粉尘质量浓度与光功率关系测试

粉尘的粒径一般用“目数”来体现，它是指每平方英寸的粉尘筛网上开孔的数目，数目越大，孔径越小。通过选择筛网，选取了 3 种不同粒径的小麦粉尘作为测试对象，分别是 200 目(对应粒径约为 48～75 μm)、300 目(对应粒径约为 38～48 μm)和 400 目(对应粒径约为 25～38 μm)。通过调整振动筛的振动频率，获得每种粒径规格下不同质量浓度的粉尘环境，分别读取、记录下手持式粉尘检测仪的质量浓度数据和光学解调探测仪的光功率数据。

图 4～6 分别为 200、300 和 400 目粒径的粉尘实验结果，可以看出：首先，随着粉尘质量浓度的增大，光纤光栅的光功率均逐渐降低，经过拟合可得，粉尘质量浓度和光功率呈基本的线性关系，线性系数均超过了 0.96；其次，200 目粉尘的递减灵敏度明显大于其他两种，分析认为，这是由于 200 目的粒径大于其他两种，导致粉尘颗粒更容易阻挡准直器的光路传输，光功率降低更快，与粒径更小的粉尘相比，阻挡光路的偶然性更大，导致测量不准确，此时就需采用更大光斑直径的准直器。图 7 所示为 3 种目数的粉尘实验数据的对比情况，可以看出 300 目和 400 目粉尘测试结果的一致性更好。

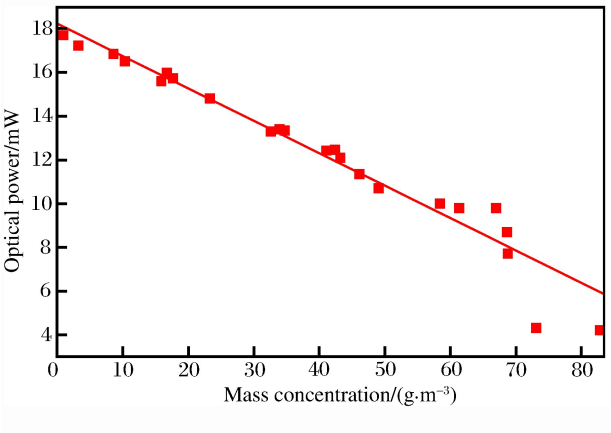


图 4　光纤光栅光功率和 200 目粉尘质量浓度对应关系

Fig. 4　Correlation between FBG optical power and dust mass concentration of 200 meshes

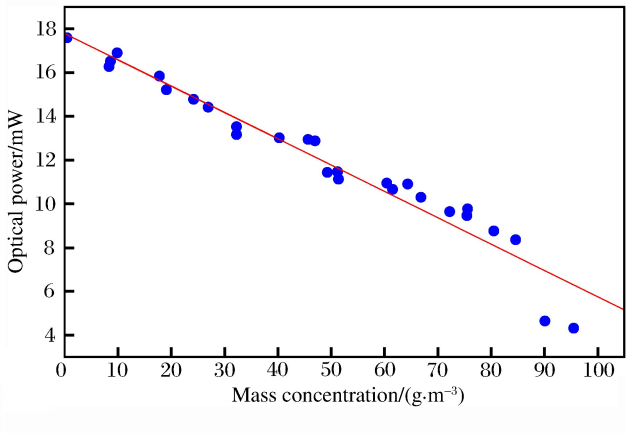


图 5　光纤光栅光功率和 300 目粉尘质量浓度对应关系

Fig. 5　Correlation between FBG optical power and dust mass concentration of 300 meshes

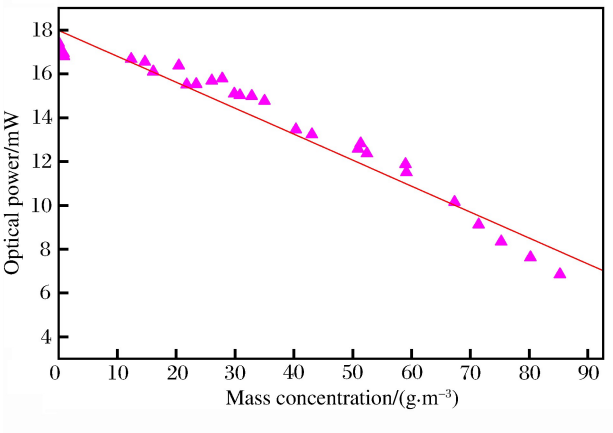


图 6　光纤光栅光功率和 400 目粉尘质量浓度对应关系

Fig. 6　Correlation between FBG optical power and dust mass concentration of 400 meshes

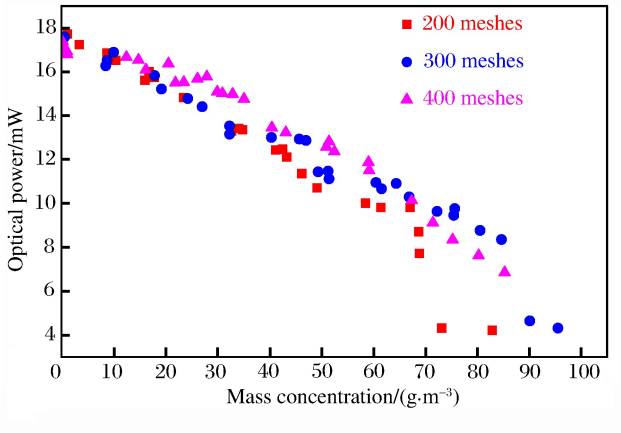


图 7　不同目数的粉尘实验结果对比

Fig. 7　Test results as compared for dusts with different meshes

2.2　测量结果误差分析

为了验证测量结果的准确性，以 200 目小麦粉尘为样品，采用称重法对测量结果进行对比试验。根据测量得到的光功率值，采用上文测试结果的拟合数据反推出粉尘盒内的质量浓度，然后根据称重法基本原理，收集悬浮在粉尘盒子空间内的粉尘，并采用高精度称重仪获得其质量 M，已知粉尘盒的体积 V 为 3.2×10^{-4} m^3，则粉尘的质量浓度 C 可通过 $C=M/V$ 得到。随机采样了 18 个测点，两种测量结果在每个测点处的具体数值对比情况、以及以称重法为基准的相对误差情况如图 8 所示，左侧 Y 轴为粉尘质量浓度值，右侧 Y 轴为该测点处两个数值的相对误

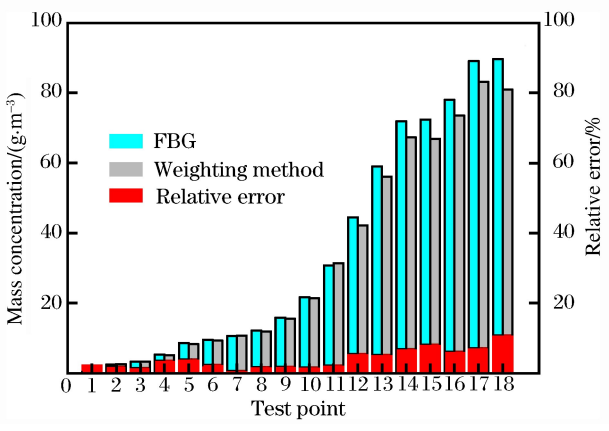


图 8　光纤光栅测量结果和称重法测量结果对比

Fig. 8　Test results as compared between FBG method and weight method

差。易得，在粉尘质量浓度较低时，二者的测量结果相差较小：在粉尘质量浓度低于 30 g/m^3 的情况下，两种测量结果的相对误差绝大部分在 1.5%～2.1%之间，最大值为 3.97%；而随着质量浓度变大，二者绝对误差值和相对误差值逐渐变大：粉尘质量浓度从44.52 g/m^3 增到到89.69 g/m^3 过程中，相对误差由 5.42%逐步增大至10.81%，而且基本均为光纤光栅的测量值偏大，分析认为这主要是由于随着质量浓度增加，有部分粉尘附着在了光纤准直器表面，产生了恒定的光路阻挡，导致测量值偏大，这也解释了上文图 4～6 中，在高质量浓度时光纤光栅测量结果急剧变小的现象。但二者的整体测量结果吻合，说明了所提出的光纤光栅测量技术的可行性和准确性。

3　结　论

提出了一种基于光纤光栅和光纤准直器组成的新型粉尘质量浓度测量技术，与现有技术相比，具备无电检测、本质安全的优势；开展粉尘质量浓度测量实验，实验结果表明：测量装置的光功率信息输出与粉尘质量浓度呈基本的线性递减关系；称重法和光纤光栅技术的测量结果基本一致，证明了该装置测量的可行性与有效性。

参考文献：

[1]　雷志伟. 激光消光法粉尘浓度在线测量系统的研发[D]. 南京：东南大学，2015.
LEI Zhiwei. Study of measurement system for dust concentration based on leaser extinction[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[2]　赵恩彪，李德文，王自亮，等. 电荷法测量粉尘密度的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报，2010，27(2)：269-272.
ZHAO Enbiao, LI Dewen, WANG Ziliang, et al. Experimental study of charge method for measuring dust concentration[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010，27(2)：269-272.

[3]　陈建阁，吴付祥，王杰. 电荷感应法粉尘浓度检测技术[J]. 煤炭学报，2015，40(3)：713-718.
CHEN Jiange, WU Fuxiang, WANG Jie. Dust concentration detection technology of charge induction method[J]. Journal of China Coal Society, 2015，40(3)：713-718.

[4]　赵恩彪，隋金君，王自亮，等. 基于外环状电荷感应原理的粉尘浓度测量[J]. 仪表技术与传感器，2010(6)：15-16.
ZHAO Enbiao, SUI Jinjun, WANG Ziliang, et al. Dust concentration measured by outer induced charge method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(6)：15-16.

[5]　李静，司瑾，王泽民. 电容法测量工业粉尘浓度技术研究[J]. 电子科技，2016，29(2)：148-151.
LI Jing, SI Jin, WANG Zemin. Industrial dust concentration measurement by capacitance method[J]. Electronic Science and Technology, 2016，29(2)：148-151.

[6]　张珊珊，雷志勇. 基于光散射与透射原理的粉尘浓度测量方法研究[J]. 计算机与数字工程，2016(2)：362-366.
ZHANG Shanshan, LEI Zhiyong. Atmosphere dust detection based on light scattering and transmission[J]. Computer and Digital Engineering, 2016(2)：362-366.

[7]　高昊. 基于光散射原理的矿用激光粉尘浓度传感器[J]. 煤矿安全，2016，47(03)：98-100.
GAO Hao. Mine-used laser dust concentration sensor based on light scattering[J]. Safety in Coal Mines, 2016，47(3)：98-100.

[8]　郑凯，汪金刚，刘静，等. 基于电荷感应的粉尘浓度检测技术与试验研究[J]. 传感器与微系统，2014，33(2)：29-31.
ZHENG Kai, WANG Jingang, LIU Jing, et al. Research on dust concentration measurement technique and experiment based on charge induction[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014，33(2)：29-31.

[9]　郑宸，于永进，孙金红，等. 一种基于红外差分法的粉尘浓度测量装置[J]. 工矿自动化，2015，41(7)：58-61.
ZHENG Chen, YU Yongjin, SUN Jinhong, et al. A dust concentration measuring device based on infrared difference method[J]. Industry and Mine Automation, 2015，41(7)：58-61.

[10]　张所容，陈建阁. 金属粉尘浓度检测技术研究[J]. 工矿自动化，2017，43(3)：57-60.
ZHANG Suorong, CHEN Jiange. Research of detection technology of metal dust concentration[J]. Industry and Mine Automation, 2017，43(3)：57-60.

[11]　LI Xiong, ZHANG Dongsheng, LI Litong, et al. EFPI-FBG hybrid sensor for simultaneous measurement of high

temperature and large strain[J]. Chinese Optics Letters, 2014,12(12):120605.

[12] 王巧妮,杨远洪,何俊,等.光纤布拉格光栅再生过程及模型研究[J].光学学报,2016,36(3):46-53.
WANG Qiaoni, YANG Yuanhong, HE Jun, et al. Study of fiber Bragg grating regeneration process and regeneration model[J]. Acta Optica Sinica, 2016,36(3):46-53.

[13] 谢涛,王行,李川,等.水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器[J].光学学报,2017,37(3):170-176.
XIE Tao, WANG Xing, LI Chuan, et al. Fiber Bragg grating differential tilt sensor based on mercury column piston structure[J]. Acta Optica Sinica, 2017,37(3):170-176.

[14] 孙诗惠,余有龙,李慧,等.基于光纤光栅的应力波检测技术研究[J].中国激光,2016,43(5):122-127.
SUN Shihui, YU Youlong, LI Hui, et al. Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating[J]. Chinese Optics Letters, 2016,43(5):122-127.

[15] GUO Yongxing, KONG Jianyi, LIU Honghai, et al. A three-axis force fingertip sensor based on fiber Bragg grating[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016(249):141-148.

[16] GUO Yongxing, ZHANG Dongsheng, ZHOU Zude, et al. Welding-packaged accelerometer based on metal-coated FBG[J]. Chinese Optics Letters, 2013,11(7):070604.

[17] ZARDECKI A, TAM W G. Multiple scattering corrections to the Beer-Lambert law. 2: Detector with a variable field of view[J]. Applied Optics, 1982,21(13):2413-2420.

Measuring technique for dust mass concentration using fiber Bragg grating sensor

DING Yunfeng[1], GUO Yongxing[2,3], CHEN Xianfeng[1], YANG Bingtao[1], XIONG Li[2,3]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *Hubei, China*;
2. *Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*;
3. *Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*)

Abstract: Accidents resulting from combustible dust explosion occur frequently and pose a serious hazard to the safety of industrial production. Dust concentration is a critical factor involved in the explosion leading to such accidents, and therefore its precise and fast measurement can provide an intrinsically safe and real-time monitoring technology for preventing such accidents. In this paper, we proposed a new measuring technique based on the fiber Bragg grating and the optical fiber collimator. We first explained the measurement theory and constructed the measuring and experimental device, and then performed experiments on wheat dusts with three grain sizes of 200 meshes, 300 meshes and 400 meshes and carried out the related investigation. The results show that the optical power output of the device and the dust concentration are linearly correlated. We also carried out contrastive experiments with the dust concentration obtained using the standard weighing method, and verified the effectiveness of the FBG measuring technique proposed. This study provides a new way to conduct dust concentration monitoring, and holds broad prospects for further research and application.

Keywords: fiber Bragg grating; optical fiber collimator; dust concentration measuring; safety monitoring

(责任编辑　王易难)