

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.024

光纤透射法监测煤粉爆炸临界浓度及预警系统探讨*

余凡^{1a}, 王玉杰^{1b}, 刘洋², 任少峰³, 董志桥^{1a}, 陈先锋^{1a}

(1. 武汉理工大学 a. 安全科学与应急管理学院; b. 资源与环境工程学院, 武汉 430070;

2. 武汉电力职业技术学院 电力工程系, 武汉 430079;

3. 西南能矿集团股份有限公司, 贵阳 550004)

摘要: 可燃性粉尘爆炸事故易发生、难控制, 事故后果严重。为了监测粉尘的爆炸临界浓度, 研发一款基于光纤传感技术的粉尘浓度传感器。介绍了基于光纤透射法的粉尘浓度监测技术基本原理, 营造均匀粉尘环境, 搭建实验平台对平均粒径为 21.583 μm 、40.264 μm 和 63.259 μm 的煤粉进行浓度实验。结果表明: 消光程度与粉尘浓度值呈现良好线性关系, 测量值与实际值的实验误差在 $\pm 10\%$ 之内。然后对煤粉爆炸临界浓度进行探讨, 开发粉尘爆炸临界浓度预警系统。可实现当浓度达到爆炸临界浓度设定值进行报警, 预先防止粉尘爆炸。

关键词: 光纤传感; 透射法; 粉尘监测; 爆炸临界浓度; 预警系统

中图分类号: X936 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)03-0141-07

Discussion on Monitoring Critical Concentration of Pulverized Coal Explosion and Early Warning System by Optical Fiber Transmission Method

YU Fan^{1a}, WANG Yu-jie^{1b}, LIU Yang², REN Shao-feng³, DONG Zhi-qiao^{1a}, CHEN Xian-feng^{1a}

(1. a. School of Safety Science and Emergency Management; b. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Electrical Engineering, Wuhan Electric Technology College, Wuhan 430079, China;

3. Southwest Energy and Mineral Resources Corporation Co., Ltd, Guiyang 550004, China)

Abstract: Combustible dust explosion accidents are easy to occur and the process is difficult to control, and the consequences of the accident is serious. In order to monitor the critical concentration of dust explosion, a dust concentration sensor based on fiber sensing technology was developed. The basic principle of dust concentration monitoring technology based on fiber transmission method was introduced. A uniform dust environment was created by building an experimental platform to conduct concentration experiments on coal powder with average particle size of 21.583 μm , 40.264 μm and 63.259 μm . The results showed that the extinction degree and the dust concentration value have a good linear relationship, and the experimental error between the measured value and the actual value is within $\pm 10\%$. The critical concentration of pulverized coal explosion was discussed and a critical concentration warning system for dust explosion was developed. Once the concentration reaches the set value of the explosion critical concentration, an alarm signal will be sent to prevent dust explosion in advance.

Key words: optical fiber sensing; transmission method; dust monitoring; critical concentration of explosion; early warning system

粉尘无处不在,可燃性粉尘爆炸事故一直是密切关注的焦点^[1]。粉尘爆炸需要同时具备五个条件:可燃粉尘、氧化剂、点火源、有限空间和分散^[2]。分散指的是粉尘悬浮在空气中形成粉尘云。对粉尘分散形成的粉尘云浓度进行控制,可防止粉尘爆炸。当粉尘悬浮时,通过传感器监测出粉尘浓度^[3],对粉尘浓度实时检测,在达到爆炸临界浓度之前采取必要措施来保证环境粉尘处于安全状态^[4]。

目前粉尘浓度测量方法主要可以分为两大类,一类是取样法测量^[5],先收集环境粉尘后测量的方法,就是从环境中收集一部分有代表性的粉尘样品后再由粉尘测量仪器检测出粉尘浓度。另一种是非取样法^[6],不用取样而是利用粉尘颗粒的光学电声学等物理特征直接进行浓度的检测。李德文等人根据金属粉尘的静电特性,研究了基于电荷感应法对金属粉尘浓度的连续检测^[7];赵政等人基于 MIE 散射法的粉尘浓度检测技术基本原理,设计了 MIE 散射法的光学检测气路和结构,实现了粉尘浓度的长时间检测^[8];孙泽睿利用平行板电容器中介质不同电容量不同原理,提出使用电容法来检测粉尘浓度^[9]。

光学方法是目前使用最多的测量方法^[10],提出一种利用光纤宽带光源对粉尘浓度进行实时检测^[11]。一方面,能实时监测粉尘浓度;另一方面,预警系统能判定环境浓度状态,确保环境粉尘浓度在爆炸临界浓度内。

光纤光栅测量是一种基于全散射法的测量方法^[12,13],光纤本身具有不带电、体积小、质量轻、易弯曲、抗电磁干扰、抗辐射等优点^[14],适合应用于易燃、易爆、空间受限及强电磁干扰等环境,并且具有高效率传输光能力,在浓度检测方面具有广泛的应用前景^[15]。

1 基于光透射法的实验原理

透射法是光散射颗粒测量技术中的一种,原理是当光束穿过颗粒物时,由于颗粒的散射和吸收,使穿过颗粒介质后的光强衰减,其衰减程度与颗粒的大小和浓度有一定关系,这就为颗粒测量提供一个尺度^[16]。

当一束平行单色光照射到被测颗粒时,由于颗

粒对光的散射和吸收透射光的光强将会衰减,这可以用 Lambert-Beer 定律进行解释^[17],出射光强 I 与入射光强 I_0 的关系为

$$I = I_0 \exp(-\tau L) \quad (1)$$

式中: τ 为浊度; L 为颗粒介质的厚度。在实际情况下,被测量的颗粒是具有一定尺寸分布范围的多分散颗粒系,此时该介质的浊度 τ 为

$$\tau = \frac{\pi}{4} \int_a^b D^2 N(D) K_{ext} d(D) \quad (2)$$

式中: D 为直径; K_{ext} 为消光系数。代入式(1)可得

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{\pi L}{4} \int_a^b D^2 N(D) K_{ext} d(D) \quad (3)$$

在全散射法中,按照颗粒的消光系数不变,则多分散系的平均消光系数 K_m 和平均直径 D_{32} 为

$$K_m = \frac{\int D^2 N(D) K_{ext} d(D)}{\int D^2 N(D) d(D)} \quad (4)$$

$$D_{32} = \frac{\int D^3 N(D) d(D)}{\int D^2 N(D) d(D)} \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3),可得

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{\pi L}{4} \cdot \frac{K_m}{D_{32}} \int_a^b D^3 N(D) d(D) \quad (6)$$

此时质量浓度可表示为

$$C_m = \rho \frac{\pi}{6} \int_a^b D^3 N(D) d(D) \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得

$$\frac{-\ln(I/I_0)}{C_m} = \frac{3LK_m}{2\rho D_{32}} \quad (8)$$

式中: C_m 为浓度; K_m 为平均消光系数; ρ 为颗粒密度; D_{32} 为颗粒平均直径。由式(8)可知,已知光程 L ,颗粒密度 ρ ,颗粒的索太尔直径 D_{32} 以及平均消光系数 K_m ,就可以得到消光程度 $[-\ln(I/I_0)]$ 与粉尘浓度 C_m 的线性关系。

在透射法中,最重要的就是计算消光系数,针对消光系数的计算方法,国内外有很多学者进行了研究和改进^[18,19],消光系数与无量纲尺寸因子 α 有一定的关系。

$$\alpha = \pi D / \lambda \quad (9)$$

式(9)为 α 的计算关系式,与颗粒物粒径 D 和入射光波长 λ 有关。图 1 所示,对于不同折射率 m 的颗粒物,消光系数 K_{ext} 先增大后减小最后趋于稳定。当 α 达到一定值后,消光系数 K_{ext} 可以直接取 2,这样就大大简化测量和数据处理^[20]。得到颗粒物的消光系数 K_{ext} 后,就可以计算出粉尘场所颗粒

收稿日期:2020-04-30

作者简介:余 凡(1995-),男,硕士研究生,从事安全监测技术研究,(E-mail)664961844@qq.com。

通讯作者:陈先锋(1975-),男,教授、博士,研究方向为工业安全与防火防爆技术,(E-mail)cx618@whut.edu.cn。

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0808500);国家自然科学基金项目(51774221)

物的平均消光系数 K_m 。

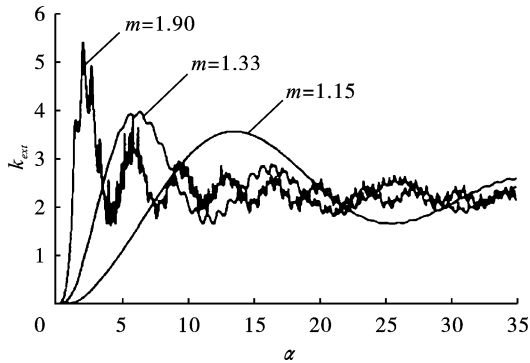


图1 不同折射率的消光系数与 α 的关系曲线

Fig. 1 Relationship between extinction coefficient of different refractive indices and α

2 实验平台搭建和实验

2.1 实验平台

根据实验要求,搭建如图2实验平台,平台由压

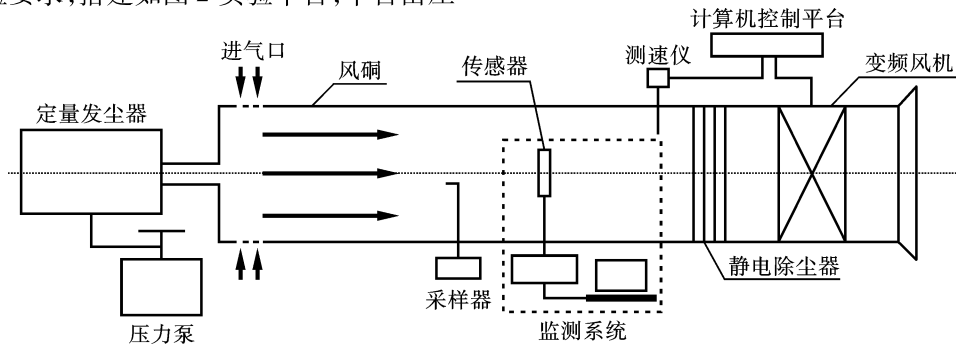


图2 实验平台

Fig. 2 Experiment platform

2.3 实验步骤

实验粉体为煤粉,煤粉经过24 h烘干。打开空压机待压力稳定,将煤粉放入发尘器,通过控制发尘器开口大小和出口压力来调节发出的粉尘浓度,待风洞中风速稳定至4 m/s,打开发尘器,发出的粉尘均匀通过风洞,打开粉尘采样仪进行采样,采样流量20 L/min,采样时间为1 min,同时光纤光栅解调仪接收粉尘场所变化前后的光信号,并将光信号传输到电脑。同一粉尘浓度环境下进行5组平行实验,求平均值的方法计算出实际浓度值和测量浓度值。

3 实验结果及爆炸预警探讨

3.1 光纤粉尘浓度传感器可行性实验

采样器的浓度为当前环境下的实际粉尘浓度,通过滤膜称重法求出,为了减小实验过程中产生的误差,每组实验进行5组平行实验,取平均值作为实际浓度。消光程度通过测量光强前后变化量计算得

出。对于此传感器,发射端同时是接受端,光从解调仪发出,先经过浓度场所后,反射回来又一次进入浓度场最后回到解调仪中,相当于光在浓度场所经过原来两倍的光程,因此在进行浓度计算时,出射光强与入射光强的对应关系是两倍光程下测量的结果。假设初始光强为 I_0 ,第一次经过测量区域后的出射光强为 I_1 ,反射回测量区域后的出射光强为 I_2 ,光程为 L ,那么消光程度和浓度的关系式变成

$$\frac{-\ln(I_2/I_0)}{C_m} = \frac{3(2L)K_m}{2\rho D_{32}} = \frac{3LK_m}{\rho D_{32}} \quad (10)$$

$$A = \frac{3LK_m}{\rho D_{32}} \quad (11)$$

此实验所用的粉尘为工业煤粉,已知煤粉的密度 $\rho = 0.86 \text{ g/cm}^3$,采用马尔文 Mastersizer 2000 激光粒度仪对煤粉的粒度进行取样测量,采样速率达1000次/分钟。经测量,平均粒径(索太尔直径)为21.583 μm 。实验测量光程 $L = 60 \text{ mm}$,解调仪发出

的光为宽带光源,波长为 $\lambda = 1560 \text{ nm}$ 。由上一节式(9)可以计算出 $D_{32} = 21.583 \text{ }\mu\text{m}$ 煤粉粒径对应的 α 值为 43.5。查表可知,可以取 $K_m = 2$ 。根据已知量可以求出 A 值为 0.01936。由式(4)可知,测量出消光程度值 $[-\ln(I/I_0)]$ 的大小,就可以得到传感器测量的粉尘浓度值 C_m 。图 4 ~ 图 7 为不同浓度条件下,光纤传感器的光强值随时间的变化曲线。可以看出,光强值的变化和浓度成正相关关系,浓度越大,光强值变化也越大,也就是消光程度越大。测量过程中,在第 5 s 时,打开发尘器,粉尘经过准直器,光强明显衰减,到达一定值后上下波动。

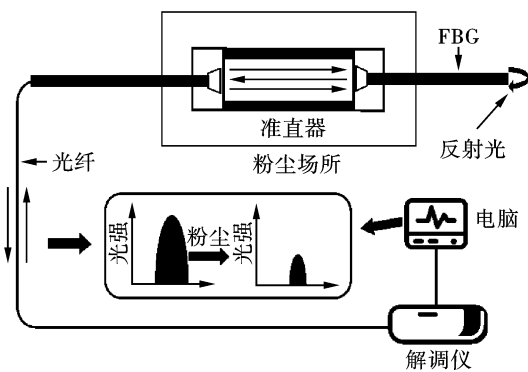


图 3 光纤光栅监测系统

Fig. 3 Fiber bragg grating monitoring system

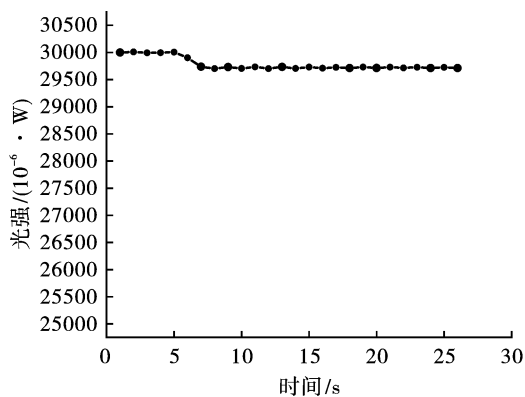


图 4 $C = 0.5251 \text{ g/m}^3$ 时的光强变化

Fig. 4 Light intensity curve at $C = 0.5251 \text{ g/m}^3$

同一浓度进行五组实验,五组实验求平均值。实验结果如表 1 所示。

表 1 中列出了 $21.583 \text{ }\mu\text{m}$ 的实验数据以及误差大小。其中实际浓度值是通过粉尘采样器测得的数据,消光程度是反映光强的衰减程度,消光程度随着浓度的增大而变大。测量浓度值是粉尘浓度传感器测量的结果。实验浓度范围在 $0 \sim 10 \text{ g/m}^3$ 。一共进行 15 组浓度实验,每组进行 5 次平行实验。在低浓度区间 ($< 1 \text{ g/m}^3$),进行五组实验,最小浓度接近 0.1 g/m^3 ,尽管浓度很小,实验误差在 $\pm 10\%$ 之

内,且具有良好的重复稳定性。实验结果显示,无论低浓度还是高浓度,此粉尘传感器都能进行监测,误差范围均在 $\pm 10\%$ 之内。

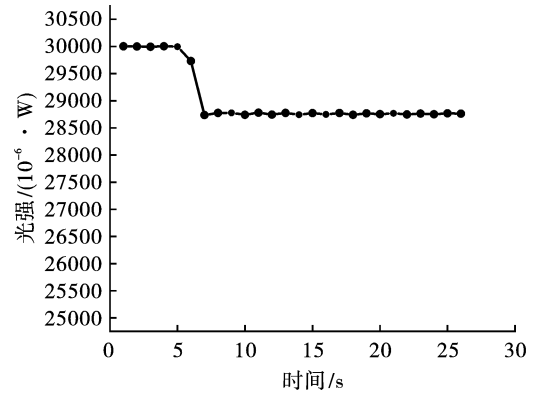


图 5 $C = 2.3521 \text{ g/m}^3$ 时的光强变化

Fig. 5 Light intensity curve at $C = 2.3521 \text{ g/m}^3$

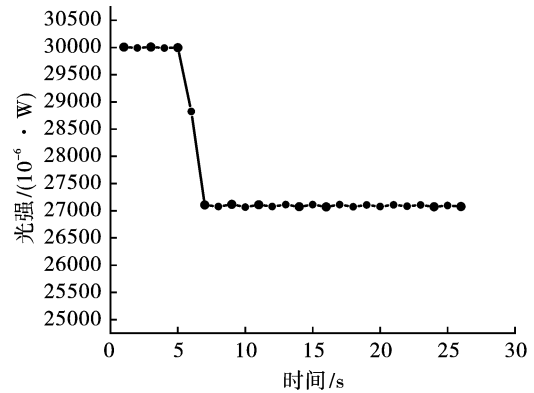


图 6 $C = 5.5794 \text{ g/m}^3$ 时的光强变化

Fig. 6 Light intensity curve at $C = 5.5794 \text{ g/m}^3$

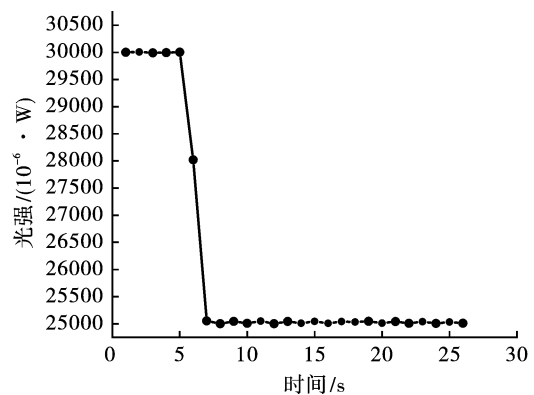


图 7 $C = 8.2371 \text{ g/m}^3$ 时的光强变化

Fig. 7 Light intensity curve at $C = 8.2371 \text{ g/m}^3$

图 8 是 $21.583 \text{ }\mu\text{m}$ 煤粉浓度与消光程度的关系曲线,图中显示测量值和理论值的对比关系,消光程度随着粉尘浓度的增加而增大。理论值是根据消光公式计算得出,如图 8 所示是一条直线。测量值曲线在理论值曲线上上下下波动,线性度是 0.9837,线性度很

高,验证了消光程度与粉尘浓度呈正比关系,进一步证明光纤浓度传感器来测量粉尘的浓度的可行性。

表 1 $D_{32} = 21.583 \mu\text{m}$ 煤粉实验数据统计
Table 1 Data statistics of $D_{32} = 21.583 \mu\text{m}$ pulverized coal experimental

实际浓度值 $C_m /$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	消光程度 [$-\ln(I/I_0)$]	测量浓度值 $C_0 /$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	实验 误差/%
0.1054	0.00221	0.1143	8.4
0.2708	0.00575	0.2968	9.6
0.5253	0.00931	0.4806	-8.5
0.7908	0.01661	0.8580	8.5
0.9583	0.01722	0.8893	-7.2
1.2031	0.02518	1.3006	8.1
2.3521	0.04167	2.1522	-8.5
3.5427	0.06228	3.2168	-9.2
4.3214	0.09094	4.6974	8.7
5.5794	0.09916	5.1219	-8.2
6.3382	0.13351	6.8960	8.8
7.8643	0.13946	7.2037	-8.4
8.2371	0.17271	8.9208	8.3
9.9847	0.17726	9.1560	-8.3
10.5432	0.22187	11.4605	8.7

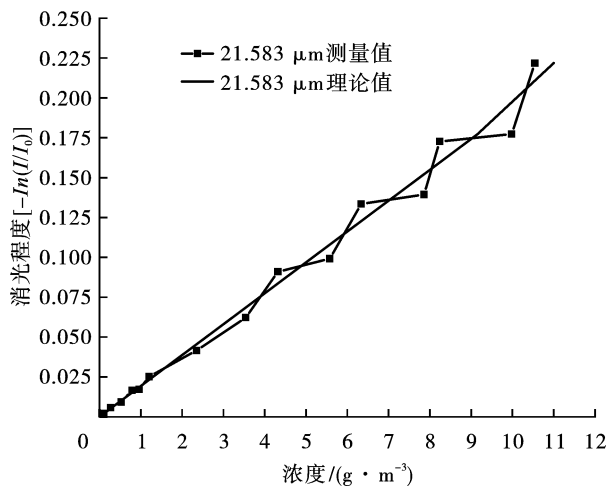


图 8 $D_{32} = 21.583 \mu\text{m}$ 煤粉消光程度与浓度的关系曲线
Fig. 8 Relationship between the extinction degree and concentration of $D_{32} = 21.583 \mu\text{m}$ pulverized coal

3.2 光纤粉尘浓度传感器验证实验

基于上述的实验平台和实验方法,又开展了对大粒径粉尘浓度实验的研究。将煤粉通过不同的目数筛进行筛选,取 300 目 ~ 400 目和 200 目 ~ 300 目的粉尘,粒径跨度范围分别对应 38 ~ 48 μm 和 48 ~ 74 μm 。通过粒度分析仪测量得到平均粒径分别对应 $D_{32} = 40.264 \mu\text{m}$ 和 $D_{32} = 63.259 \mu\text{m}$ 。计算出不同 D_{32} 直径对应的 A 值分别为 0.01038 和 0.00660。实验结果如图 9 所示。 A 值对应图中直线的斜率。两种不

同粒径煤粉消光程度随浓度的变化曲线,包括测量值关系曲线和理论值关系曲线。验证了消光程度与浓度成正比关系,其中 $D_{32} = 40.264 \mu\text{m}$ 煤粉的线性度为 0.9840, $D_{32} = 63.259 \mu\text{m}$ 煤粉的线性度为 0.9823,线性度都较高。测量值与理论值对比分析可知,测量值在理论值上下波动,且波动范围很小,误差范围也在 $\pm 10\%$ 之内。

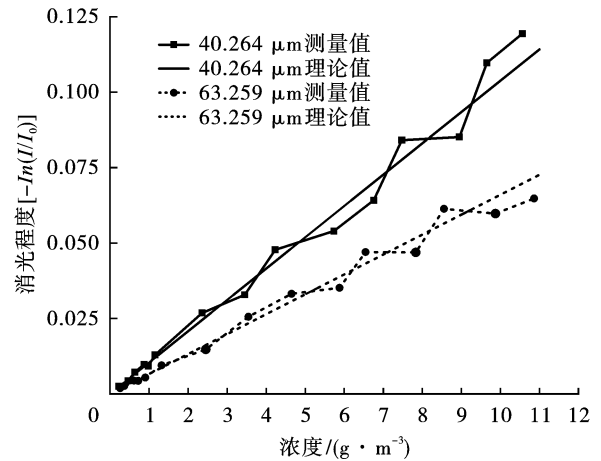


图 9 不同粒径煤粉消光程度和浓度的关系曲线
Fig. 9 Relationship between the extinction degree and concentration of pulverized coal with different particle sizes

3.3 粉尘爆炸预警探讨

粉尘爆炸预警系统满足的要求^[21]:

- 1) 监测系统即时获取浓度传感器数据,导入浓度、温度计算公式,将结果显示在软件界面中。不仅能显示即时值,也能显示一段时间内的变化曲线。
- 2) 通过调查研究,确定粉尘浓度和温度的危险临界值,能对粉尘浓度或者温度的危险状态进行判断,并将结果实时显示在界面上。状态显示为危险或者有危险的趋势时,及时发出预警信号。

关于粉尘浓度预警值考虑粉尘爆炸下限浓度。当粉尘浓度达到爆炸下限浓度 50%,发出危险警告信号(红色);达到爆炸下限浓度 30%时,发出提醒信号(黄色);低于 30%时浓度处于安全状态(绿色);关于环境温度预警值的选取,将环境温度与前一时间的温度比较,参考火灾差温探测器工作原理,将温度变化率设置为当温度变化大于 9 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 或者当温度达到粉尘浓度最低着火温度的 50%时发出预警信号。

参考温度如下:

$$\text{此刻温度值} - 30 \text{ s 前温度值} \geq \frac{30 \text{ s}}{60 \text{ s}} \times (9 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}) = 4.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 报警, 否则}$$

$$\text{此刻温度值} - 40 \text{ s 前温度值} \geq \frac{40 \text{ s}}{60 \text{ s}} \times (9 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min})$$

min) = 6.0 °C 报警, 否则

$$\text{此刻温度值} - 50 \text{ s 前温度值} \geq \frac{50 \text{ s}}{60 \text{ s}} \times (9 \text{ °C}/\text{min}) = 7.5 \text{ °C 报警, 否则}$$

min) = 7.5 °C 报警, 否则

$$\text{此刻温度值} - 60 \text{ s 前温度值} \geq \frac{60 \text{ s}}{60 \text{ s}} \times (9 \text{ °C}/\text{min}) = 9.0 \text{ °C 报警。}$$

图 10 为粉尘爆炸预警系统的主界面, 上方小窗口显示此时的时间和浓度值, 能更直观的观察此刻的浓度和温度状况。左侧显示浓度和温度的安全状

态, 绿色为安全, 黄色为警告, 红色为危险, 当显示为黄色时, 需要注意环境中的浓度以及温度情况, 采取相应措施使其处于安全状态。当显示为红色时, 代表此时环境危险, 需要立即停止工作, 对粉尘和温度进行检查。右侧为浓度变化和温度变化曲线关系, 分别是最近 10 s 和最近 30 min 的浓度统计值。左侧曲线能清晰看到此刻的浓度、温度变化关系, 右侧则能看出一段时间内的变化曲线。

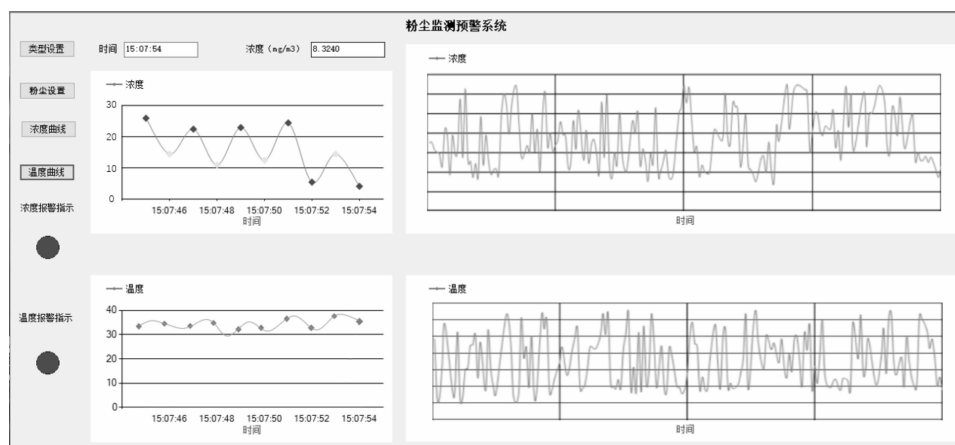


图 10 粉尘爆炸预警系统

Fig. 10 Dust explosion warning system

4 结论

(1) 完成了三种不同粒径的煤粉实验, 证明光纤粉尘浓度传感器能对三种粒径的煤粉进行监测, 误差在以内。但未完成对全粒径的煤粉或者其它粉尘的实验及探讨, 实验还需要进一步完善。

(2) 运用消光法原理进行数据分析, 理论值和测量值对比发现, 通过实验验证了消光程度与粉尘浓度的线性关系, 基于透射法的煤粉浓度监测方法是可行的, 光纤粉尘浓度传感器能应用于对煤粉的监测。

(3) 开发了对应于粉尘浓度传感器的粉尘爆炸预警系统, 实时监测环境中的粉尘浓度值和温度值, 将粉尘爆炸下限浓度作为参考设置临界预警值, 及时发出报警信号。

参考文献 (References)

[1] 刘振朋, 王玉杰, 韩高升, 等. 水下爆炸荷载对基底持力层黏土的性质影响研究[J]. 爆破, 2018, 35(2): 118-124.
[1] LIU Zhen-peng, WANG Yu-jie, HAN Gao-sheng, et al. In-

fluence of underwater explosion load on properties of clay in bearing layer[J]. Blasting, 2018, 35(2): 118-124. (in Chinese)

- [2] 陈瑞, 张博伦, 赵拓. 浅谈粉尘爆炸和二次爆炸[J]. 电气防爆, 2018(3): 4-6.
[2] CHEN Rui, ZHANG Bo-lun, ZHAO Tuo. Talking about dust explosion and secondary explosion[J]. Electrical Explosion Protection, 2018(3): 4-6. (in Chinese)
[3] 杨冰涛, 刘洋, 郭永兴, 等. 基于光纤光栅的可燃性粉尘浓度测量技术研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(1): 1-3.
[3] YANG Bing-tao, LIU Yang, GUO Yong-xing, et al. Research on flammable dust concentration measurement technology based on fiber grating[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(1): 1-3. (in Chinese)
[4] LUO Z, SU B, WANG T, et al. Effects of propane on the flammability limits and chemical kinetics of methane-air explosions[J]. Combustion Science and Technology, 2019, 13(3): 464-470.
[5] 贺振怀, 王杰. 基于β射线吸收法的粉尘浓度测量技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 80-83, 87.
[5] HE Zhen-huai, WANG Jie. Measurement technology of dust concentration based on β-ray absorption method[J].

- Coal Mine Safety,2019,50(7):80-83,87. (in Chinese)
- [6] 陈继民,陈鹤天. 激光在粉尘检测领域的进展与应用[J]. 应用激光,2018,38(3):496-501.
- [6] CHEN Ji-min, CHEN He-tian. Progress and application of laser in the field of dust detection [J]. Applied Laser, 2018,38(3):496-501. (in Chinese)
- [7] 李德文,陈建阁,安文斗,等. 电荷感应式粉尘浓度检测技术[J]. 能源与环保,2018,40(8):5-9.
- [7] LI De-wen, CHEN Jian-ge, AN Wen-dou, et al. Charge induction dust concentration detection technology [J]. Energy and Environment, 2018,40(8):5-9. (in Chinese)
- [8] 赵政. 基于mie散射法的金属粉尘浓度检测技术[J]. 仪表技术与传感器,2018(5):108-110,119.
- [8] ZHAO Zheng. Detection technology of metal dust concentration based on mie scattering method [J]. Instrument Technology and Sensor, 2018(5):108-110,119. (in Chinese)
- [9] 孙泽睿. 电容法粉尘浓度检测技术[J]. 科技风,2018(3):21.
- [9] SUN Ze-ru. Capacitance dust concentration detection technology [J]. Science and Technology Wind, 2018(3):21. (in Chinese)
- [10] 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,2016,44(2):362-366.
- [10] ZHANG Shan-shan, LEI Zhi-yong. Research on dust concentration measurement method based on light scattering and transmission principles [J]. Computer and Digital Engineering, 2016,44(2):362-366. (in Chinese)
- [11] 丁云峰,郭永兴,陈先锋,等. 粉尘质量浓度的光纤光栅传感测量技术[J]. 爆炸与冲击,2019,39(1):86-91.
- [11] DING Yun-feng, GUO Yong-xing, CHEN Xian-feng, et al. Fiber bragg grating sensor measurement technology for dust mass concentration [J]. Explosion and Shock, 2019,39(1):86-91. (in Chinese)
- [12] DU W C, TAO X M. Fiber bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999,11(1):105-107.
- [13] PEREIRA, DIONISIO A, FRAZAO, et al. Fiber bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature [J]. Optical Engineering, 2004,43(2):299-304.
- [14] XU R J P. Light scattering: A review of particle characterization applications [J]. Particuology, 2015,18(1):11-21.
- [15] 刘洋,高文傲,李登科,等. 基于光纤传感技术的易燃易爆气体泄漏监测研究[J]. 爆破,2017,34(4):22-26.
- [15] LIU Yang, GAO Wen-ao, LI Deng-ke, et al. Monitoring of flammable and explosive gas leakage based on optical fiber sensing technology [J]. Blasting, 2017,34(4):22-26. (in Chinese)
- [16] 蔡小舒. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [16] CAI Xiao-shu. Particle size measurement technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 徐义书,刘小伟,崔江,等. 激光全散射法测量燃煤颗粒物浓度的实验研究[J]. 工程热物理学报,2017,38(7):1496-1502.
- [17] XU Yi-shu, LIU Xiao-wei, CUI Jiang, et al. Experimental study on measurement of coal combustion particulate matter by laser total scattering method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017,38(7):1496-1502. (in Chinese)
- [18] MROCKA J, SZCZUCZYŃSKI D, JAKOBIŃSKI O. Simulation research on improved regularized solution of the inverse problem in spectral extinction measurements [J]. Applied Optics, 2012,51(11):1715.
- [19] 王小东,吴健,邱荣,等. MIE散射系数的改进算法[J]. 光电工程,2006,33(3):24-27.
- [19] WANG Xiao-dong, WU Jian, QIU Rong, et al. Improved MIE scattering coefficient algorithm [J]. Optoelectronic Engineering, 2006,33(3):24-27. (in Chinese)
- [20] 崔江,刘小伟,陈栋,等. 颗粒粒径分布对全散射法测量颗粒质量浓度的影响[J]. 中国电机工程学报,2016,36(16):4415-4421,4528.
- [20] CUI Jiang, LIU Xiao-wei, CHEN Dong, et al. Effect of particle size distribution on particle mass concentration measurement by total scattering method [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(16):4415-4421,4528. (in Chinese)
- [21] 路志远. 煤矿粉尘浓度监控系统方案研究[J]. 机械管理开发,2019,34(8):229-231.
- [21] LU Zhi-yuan. Research on coal mine dust concentration monitoring system scheme [J]. Machinery Management Development, 2019,34(8):229-231. (in Chinese)