



文章编号:1671-251X(2019)10-0086-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019010059

可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统

孟祥豹^{1,2}, 王俊峰¹, 张延松^{1,2}, 刘博¹

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,
山东 青岛 266590)



扫码移动阅读

摘要:针对干粉灭火剂会造成污染、清洗困难、可能造成设备损坏等问题,设计了一种可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统。火焰传感器检测到可燃性粉尘燃烧火焰信号后,高压蓄能系统第一时间产生高压水并迅速形成高压细水雾,然后供水系统快速增压到工作压力,接替高压蓄能系统继续提供高压水并持续生成高压细水雾。测试结果表明,可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统响应速度快,火焰传感器和控制器的平均响应时间分别为4 ms和12 ms;高压细水雾生成速度快,平均生成时间为96 ms,最长生成时间为100 ms;灭火及时有效,在高压细水雾作用于燃烧火焰1 s后,燃烧火焰基本被扑灭,燃烧火焰传播至距中心点火位置0.2 m左右停止了传播扩散,验证了该系统能够有效避免可燃性粉尘燃烧火焰的蔓延,防止可燃性粉尘火灾事故。

关键词:自动灭火;高压细水雾;可燃性粉尘;高压蓄能

中图分类号:TD753.2 文献标志码:A

High-pressure water mist automatic fire extinguishing system for flammable dust environment

MENG Xiangbao^{1,2}, WANG Junfeng¹, ZHANG Yansong^{1,2}, LIU Bo¹

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In view of problems that dry powder fire extinguishing agent will cause pollution, difficult cleaning and equipment damage, a high-pressure water mist automatic fire extinguishing system for flammable dust environment was designed. High-pressure energy storage system generates high-pressure water immediately and rapidly forms high-pressure water mist after flame sensor detects flame signal of flammable dust combustion, and then water supply system is quickly pressurized to working pressure, replaces high-pressure energy storage system to provide high-pressure water and continue to generate high-pressure water mist. The test results show that the high-pressure water mist automatic fire extinguishing system for flammable dust environment has fast response speed, average response time of flame sensor and controller is 4 ms and 12 ms respectively; high-pressure water mist generation is fast and average generation time is 96 ms, the longest generation time is 100 ms; the fire extinguishing is effective and

收稿日期:2019-01-15;修回日期:2019-09-12;责任编辑:胡娟。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0801700,2017YFC0805200)。

作者简介:孟祥豹(1980—),男,山东邹城人,讲师,博士研究生,研究方向为气体粉尘爆炸,E-mail:mxbo538@126.com。

引用格式:孟祥豹,王俊峰,张延松,等.可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统[J].工矿自动化,2019,45(10):86-90.

MENG Xiangbao, WANG Junfeng, ZHANG Yansong, et al. High-pressure water mist automatic fire extinguishing system for flammable dust environment[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 86-90.

timely, after the high-pressure water mist acts on combustion flame for 1 s, the combustion flame is basically extinguished, and the propagation and diffusion of combustion flame stops when propagates to about 0.2 m from the center ignition position. It is verified that the system can effectively avoid spread of flammable dust combustion flame and prevent flammable dust fire accidents.

Key words: automatic fire extinguishing; high pressure water mist; flammable dust; high pressure energy storage

0 引言

可燃性粉尘普遍存在于冶金、化工、煤炭等行业的工作场所。在生产过程中,可燃性粉尘容易沉积,形成粉尘层。粉尘层遇到点火源(包括自然着火、高温热表面、静电火花、机械冲击和摩擦火花等)时容易着火,从而引起火灾事故,严重威胁相关行业生产安全^[1-2]。因此,研发有效的可燃性粉尘自动灭火系统对减少可燃性粉尘火灾事故、保障安全生产具有重要意义。

目前,工业可燃性粉尘灭火主要采用自动喷粉灭火技术,其原理是当火焰传感器检测到燃烧火焰后,将信号传输给控制系统,控制系统控制干粉灭火剂喷向燃烧火焰,达到自动灭火目的。但是干粉灭火剂会造成对管道、设备及环境的污染,且可能造成设备损坏^[3-5]。针对该问题,本文设计了可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统,采用高压细水雾进行自动灭火,通过测试验证了该系统响应速度快、高压细水雾生成速度快、灭火及时,可自动快速控制初期火灾,防止火灾事故扩大。

1 系统组成和结构设计

可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统由火焰传感器、控制器、单向阀、高压蓄能系统(包括高压空气瓶、减压阀、压力表、高压蓄能器)、供水系统(包括水箱、高压柱塞泵、溢流阀)、高压细水雾生成系统(包括快速电磁阀、高压细水雾喷头)、控制系统、直流电源等组成,如图1所示。

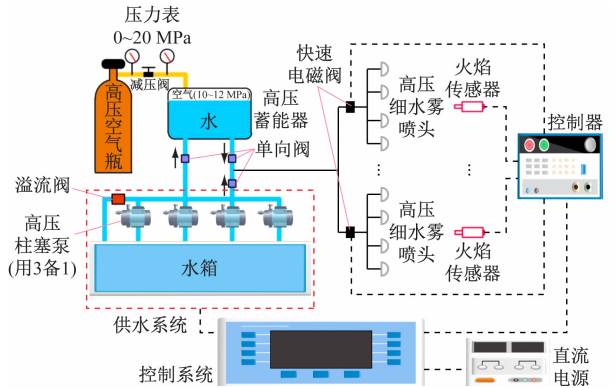


图1 可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统结构
Fig.1 Structure of high-pressure water mist automatic fire extinguishing system for flammable dust environment

火焰传感器的最大监测面积为 52 m²,按照高压细水雾喷头最大安装间距和最大安装高度要求,在每个火焰传感器监测范围内安装 8 个高压细水雾喷头。高压细水雾生成系统由 6 个快速电磁阀和 24 个高压细水雾喷头构成,每个电磁阀控制 4 个高压细水雾喷头。喷头额定流量为 10 L/min。使用设计流量为同时开启所有喷头的总流量:6×4×10=240 L/min。

高压蓄能系统由 1 个 15 MPa 高压空气瓶、2 个量程为 0~20 MPa 的压力表、1 个减压阀和 1 个高压蓄能器构成。高压蓄能器下端通过管路与供水系统相连,使得高压蓄能器中的水量为 60~80 L。高压蓄能器上端通过管路与高压空气瓶相连,使高压蓄能器中高压气体压力为 10~12 MPa。

供水系统由 1 个容积为 16 m³ 的水箱、4 个高压柱塞泵(3 个使用、1 个备用)和 1 个溢流阀构成。考虑到管路系统压力损失等因素,选用额定压力为 12.5 MPa、额定流量为 109 L/min 的高压柱塞泵,则泵组输出总流量为 109×3=327 L/min,满足使用要求。4 个高压柱塞泵通过管路与水箱相连,一路连到高压蓄能器,给高压蓄能器供水,连接管路上装有 1 个单向阀,可有效防止高压蓄能器中的水因水压过高而流入供水系统;另一路和高压蓄能系统一起连接高压细水雾生成系统,连接管路上装有 2 个单向阀,保证高压蓄能系统和供水系统可给高压细水雾生成系统提供高压水。

表 1 给出了各部分器件的具体数量及其规格参数。

2 系统工作原理

高压细水雾主要通过以下 4 个方面的作用来扑灭沉积可燃性粉尘燃烧火焰。

(1) 高效冷却作用:高压细水雾的雾滴直径很小,比表面积小,遇火后会迅速汽化,汽化时从可燃性粉尘燃烧火焰中吸收大量热量,使燃烧火焰温度迅速降低^[6-9]。

(2) 窒息作用:高压细水雾遇到可燃性粉尘燃烧火焰后迅速汽化成水蒸气,体积可迅速膨胀 1 700~5 800 倍,极大地降低了周围空气中的氧气含量,达到窒息灭火目的^[10-11]。

表 1 高压细水雾自动灭火系统部分器件的参数

Table 1 Specifications of some devices of high-pressure water mist automatic fire extinguishing system

名称	参数	型号	数量
火焰传感器	响应时间 $\leq 5\text{ ms}$;感光灵敏度:5 m 远处 1 烛火焰; 监视范围:120°圆锥夹角;本安防爆	GHZ5	3
控制器	响应时间 $\leq 15\text{ ms}$;本安防爆	ZYBG-K	1
直流电源	在供电系统异常情况下,保证 2 h 正常供电;本安防爆	KDY127/10B	1
高压细水雾喷头	流量:10 L/min;工作压力:10 MPa;最大安装间距:3 m; 最大安装高度:3 m;喷洒滞后时间 $\leq 1\text{ ms}$;成雾时间 $\leq 1\text{ ms}$	XSWT1.0/10	24
高压蓄能器	公称压力:20 MPa;有效容积:100 L	NXQ-100	1
快速电磁阀	响应时间 $\leq 1\text{ ms}$;本安防爆	ZCF51-20B-16	6
高压柱塞泵(含 30 kW 电动机)	额定压力:12.5 MPa;额定流量:109 L/min	3ZHP60	4
水箱	容积:16 m ³		1

(3) 阻隔辐射热作用:可燃性粉尘燃烧火焰周围汽化形成的大量水蒸气极大阻隔了燃烧火焰的辐射热,能够有效防止火焰蔓延^[12-14]。

(4) 浸湿沉积可燃性粉尘作用:高压细水雾能够将沉积的可燃性粉尘浸湿,有效防止火焰的蔓延^[15]。

可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统工作原理如图 2 所示。正常情况下,传感器、控制器、高压蓄能系统处于工作状态,供水系统处于不工作状态,快速电磁阀处于关闭状态。当系统作用范围内出现燃烧火焰时,火焰传感器接收到燃烧火焰信号后将其输入控制器,控制器对信号进行判别,确认火焰信号后控制快速电磁阀打开;高压蓄能系统在第一时间为细水雾系统提供高压水,快速形成高压细水雾;同时,供水系统接收到控制器开启信号后,也会快速增压到工作压力,接替高压蓄能系统继续提供高压水,生成的高压细水雾迅速将燃烧火焰扑灭,达到自动灭火目的。

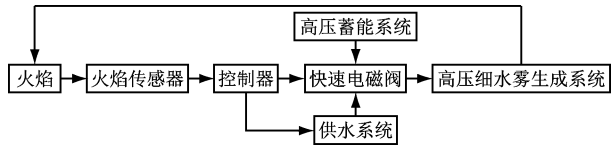


图 2 可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统工作原理

Fig. 2 Working principle of high-pressure water mist automatic fire extinguishing system for flammable dust environment

3 测试分析

可燃性沉积粉尘着火时燃烧火焰蔓延速度快,要有效防止火焰传播,要求系统能在火焰传感器检测到燃烧火焰信号后迅速生成高压细水雾,快速扑灭燃烧火焰。因此,分别对火焰传感器及控制器响

应时间、高压细水雾生成时间、可燃性粉尘高压细水雾灭火效果进行测试。

3.1 火焰传感器及控制器响应时间测试

火焰传感器和控制器的响应时间对高压细水雾的生成速度有重要影响。火焰传感器及控制器性能测试原理如图 3 所示。测试时,要保证除测试火焰触发源外,火焰传感器四周无其他火焰。在距离火焰传感器探头 5 m 远处放置火焰触发源,火焰传感器分别连接数字示波器和控制器,控制器连接数字示波器,数字示波器可检测到火焰传感器和控制器的信号。

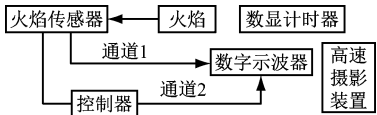


图 3 火焰传感器及控制器性能测试原理

Fig. 3 Performance test principle of flame sensor and controller

首先,调节火焰触发源产生的火焰大小,观察数字示波器,使火焰刚好能触发火焰传感器。然后,进行火焰传感器和控制器的测试,用高速摄影装置记录火焰点亮过程及数显计时器和数字示波器的变化。火焰传感器的响应时间为从火焰点亮到数字示波器检测到火焰传感器输出信号所花的时间。控制器的响应时间为从数字示波器检测到火焰传感器输出信号到数字示波器检测到控制器输出信号所花的时间。上述时间均通过数显计时器显示的时间来计算。

分别对火焰传感器与控制器响应时间进行 10 次测试,结果如图 4 所示。从图 4 可看出,火焰传感器的平均响应时间为 4 ms,每次测试结果都在 5 ms 以内;控制器的平均响应时间为 12 ms,并且每次测试结果均未超过 15 ms,符合系统要求。

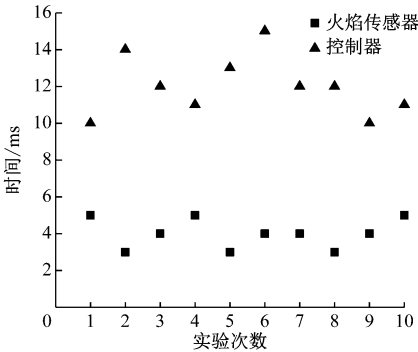


图 4 火焰传感器及控制器响应时间

Fig. 4 Response time of flame sensor and controller

3.2 高压细水雾生成时间测试

高压细水雾的生成时间决定了可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统的灭火性能。高压细水雾生成时间测试原理如图 5 所示。测试条件和过程与火焰传感器及控制器响应时间测试相同。细水雾生成时间为从火焰点亮到生成的细水雾范围稳定所花的时间。

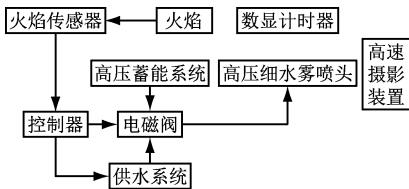


图 5 高压细水雾生成时间测试原理

Fig. 5 Test principle of generation time of high-pressure water mist

对高压细水雾生成时间进行 10 次测试,结果如图 6 所示。从图 6 可知,高压细水雾生成时间较稳定,平均生成时间为 96 ms,最长生成时间为 100 ms。因此,该系统能够在 100 ms 内生成高压细水雾,在沉积可燃性粉尘着火瞬间快速产生高压细水雾,使得火焰在燃烧初期即被扑灭。

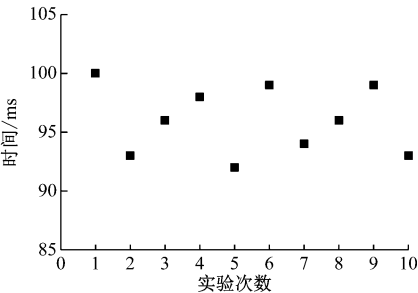


图 6 高压细水雾生成时间

Fig. 6 Generation time of high-pressure water mist

3.3 可燃性粉尘高压细水雾灭火效果测试

采用粒径为 30 μm 的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 粉尘测试高压细水雾灭火效果。在半径为 1.5 m 的铁盘中均匀铺满一层约 5 mm 厚的经干燥处理的 PMMA 粉尘(图 7),在粉尘层底部中心位置用高温加热装置进行加热,使粉尘着火,在

PMMA 粉尘层上方 3 m 处安装可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统。

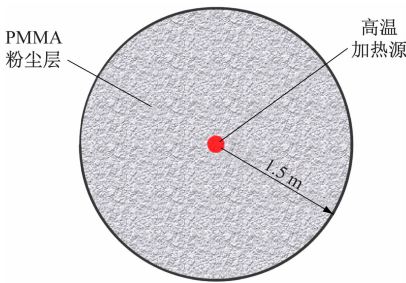


图 7 高压细水雾灭火效果测试

Fig. 7 Test of fire extinguishing effect of high-pressure water mist

首先,关闭可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统,打开高温加热装置加热粉尘层使其着火,在安全距离处观察,可见粉尘层中心位置发生着火,火焰迅速向四周蔓延。然后,清理燃烧产物,再次铺满一层同样的 PMMA 粉尘,使可燃性粉尘环境用高压细水雾自动灭火系统处于工作状态,打开高温加热装置加热粉尘层使其着火,在安全距离处观察系统的灭火效果。可见,在粉尘层着火瞬间,可燃性高压细水雾自动灭火系统迅速生成高压细水雾,成功将火焰扑灭,粉尘层只有距离中心位置 0.2 m 左右的区域发生了燃烧。

粉尘层燃烧实验和高压细水雾灭火实验中,从开始燃烧到火焰熄灭时的火焰传播距离(火焰前沿与中心点火位置的距离)如图 8 所示。由图 8 可看出,在未使用高压细水雾自动灭火系统的情况下,粉尘层被点燃后燃烧火焰传播速度快速上升,并迅速向前传播,火焰燃烧初期传播速度相对较慢。当采用高压细水雾自动灭火系统时,系统在着火后 100 ms 左右迅速生成高压细水雾作用于初期燃烧火焰,初期燃烧火焰传播速度被有效抑制。在高压细水雾作用于燃烧火焰 1 s 后,燃烧火焰基本被扑灭,燃烧火焰传播至距中心点火位置 0.2 m 左右停止了传播扩散,达到了防止燃烧火焰蔓延的目的。

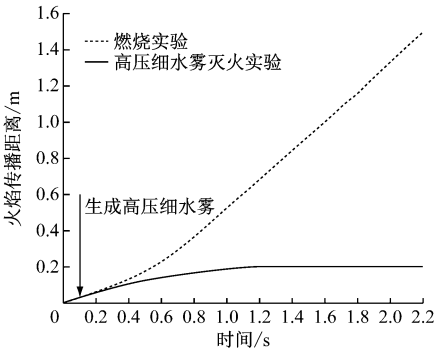


图 8 火焰传播距离

Fig. 8 Flame propagation distance

4 结论

- (1) 火焰传感器的平均响应时间为 4 ms,控制器的平均响应时间为 12 ms。
- (2) 高压细水雾生成时间较稳定,平均生成时间为 96 ms,最长生成时间为 100 ms。
- (3) 在高压细水雾作用于燃烧火焰 1 s 后,燃烧火焰基本被扑灭,燃烧火焰传播至距中心点火位置 0.2 m 左右停止了传播扩散,验证了该系统能够有效避免沉积可燃性粉尘燃烧火焰的蔓延,有效防止可燃性粉尘火灾事故。

参考文献 (References):

[1] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.

[2] 杜志明. 高温热表面上沉积的可燃性粉尘自热着火研究[J]. 兵工安全技术, 2000(1):25-28.

DU Zhiming. Experimental study on thermal ignition of combustible dust dleposited on a hot surface[J]. Binggong Anquan Jishu, 2000(1):25-28.

[3] 崔来超. 基于可燃粉尘火灾的防火措施探索[J]. 化学工程与装备, 2015(2):199-201.

[4] 郝伟. 可燃粉尘火灾爆炸事故的预防及消防措施[J]. 安全、健康和环境, 2009, 9(5):8-10.

HAO Wei. Prevention of flammable dust fire and explosion accidents and their fire fighting measures [J]. Safety Health & Environment, 2009, 9(5):8-10.

[5] 李露. 高压细水雾灭火系统在档案馆中的应用[J]. 给水排水, 2016, 42(4):95-98.

[6] 林彬. 细水雾灭火系统在汽车涂装车间喷漆室的应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015.

[7] 杨琦, 潘京生. 高压细水雾灭火系统技术[J]. 给水排水, 2003, 29(9):49-52.

YANG Qi, PAN Jingsheng. High pressure fine atomizer fire control system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(9):49-52.

[8] 汪军. 受限空间内高压细水雾灭火机理研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2016.

[9] ZHOU Y, BU R, GONG J, et al. Assessment of a clean and efficient fire-extinguishing technique: continuous and cycling discharge water mist system [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182: 682-693.

[10] 王超. 高压细水雾灭火技术在灭火中的应用[J]. 科学技术创新, 2018(30):40-41.

[11] YAO B, CHOW W K. A review of water mist fire suppression systems [J]. Journal of Applied Fire Science, 2000, 10(3):277-294.

[12] 刘江虹, 廖光煊, 范维澄, 等. 细水雾灭火技术及其应用[J]. 火灾科学, 2001, 10(1):34-38.

LIU Jianghong, LIAO Guangxuan, FAN Weicheng, et al. Introduction of water mist fire suppression technique[J]. Fire Safety Science, 2001, 10 (1): 34-38.

[13] JENFT A, COLLIN A, BOULET P, et al. Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist [J]. Fire Safety Journal, 2014, 67:1-12.

[14] PANCAWARDANI F, ARINI D, YUNINDAR R P, et al. Analysis of water mist fire suppression system applied on cellulose fire[J]. Procedia Engineering, 2017, 170:344-351.

[15] 成纯赞, 刘治国. 水喷雾灭火系统若干问题的探讨 [J]. 给水排水, 2002, 28(6):64-66.

CHENG Chunzan, LIU Zhiguo. On problems in the water spraying fire system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(6):64-66.