

DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0759-07

惰化剂粒径对铝粉火焰传播特性影响的实验研究^{*}

陈 曦¹, 陈先锋¹, 张洪铭¹, 刘暉亚², 张 英¹, 牛 奕¹, 胡东涛¹

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 建筑消防工程技术公安部重点实验室, 天津 300381)

摘要: 为探索惰化剂粒径对可燃工业粉尘火焰传播特性的影响, 通过建立竖直粉尘燃烧管道实验平台, 在碳酸氢钠质量分数为 30% 的惰化条件下, 就碳酸氢钠粒径对铝粉燃烧火焰传播特性的影响进行了实验研究。结果表明: 平均粒径为 30 μm 的碳酸氢钠粉体对平均粒径为 15 μm 的铝粉的火焰传播速度具有较好的抑制作用, 惰性粉体与可燃工业粉尘应存在粒度匹配效应; 碳酸氢钠粉体对铝粉火焰温度的惰化抑制效果与其粒径呈反比关系; 碳酸氢钠粉体会减小铝粉火焰预热区厚度, 预热区厚度随碳酸氢钠粒径的增加先减小后增大。此外, 分析了碳酸氢钠粒径对铝粉火焰传播特性影响的作用机理。

关键词: 惰化剂; 粒径; 铝粉; 燃烧; 火焰传播

中图分类号: O381

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

近年来, 由可燃性工业粉尘引发的火灾、爆炸事故时有发生并呈增长趋势^[1-2]。据统计, 由金属粉尘引发的粉尘爆炸事故是当前发生次数最多、频率最高、死亡人数最多、影响最恶劣的粉尘爆炸灾害^[2], 如 2014 年 8 月 2 日江苏昆山开发区中荣金属制品有限公司汽车轮毂抛光车间发生的铝粉爆炸事故造成 146 人死亡、114 人受伤。鉴于此, 国内外针对工业粉尘爆炸的惰化抑制进行了大量的理论和实验研究。P. R. Amyotte 等^[3]阐述了在预防和控制粉尘爆炸事故中采用的惰化技术与抑制技术之间的区别。J. Amrogowicz 等^[4]对 NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的惰化抑制功效进行了对比, 发现 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末在惰化方面的效果优于 NaHCO_3 , 而在抑制爆炸方面则 NaHCO_3 更有效。谢波等^[5]对目前国内外工业粉尘爆炸抑爆技术和隔爆技术的研究现状进行了阐述, 同时提出应加强对容器管道连接系统及巷道网络系统中粉尘爆炸传播机理的研究。伍毅等^[6]研究了密闭空间中碳酸盐的质量分数和粒径对粉尘爆炸压力的影响, 结果表明, 惰化剂的粒径越小, 浓度越高, 对粉尘爆炸的惰化作用越强。蔡周全等^[7]研究了密闭空间中干粉灭火剂粒度对抑爆性能的影响, 结果表明, ABC 干粉灭火剂对煤尘爆炸有抑爆作用, 其粒度对抑爆性能没有影响。韦伟等^[8]通过数值模拟研究了爆轰波形成及传播的机理和特性, 结果表明铝粉粉尘的初始半径对爆轰形成和传播具有一定的影响, 且气体的黏性作用对近爆轰管壁面处的火焰速度也有影响。曹卫国等^[9]利用高速摄影装置和半封闭竖直燃烧管对两种煤粉粉尘在爆炸过程中的火焰传播特征进行了实验研究, 并对实验拍摄到的火焰前锋阵面和火焰传播速度的影响因素进行了分析。以上研究主要集中在密闭空间中的抑爆性能, 对管道系统中的粉尘燃烧及抑爆研究较少, 对粉尘爆炸过程中粉尘燃烧及爆燃火焰传播过程的研究则更少, 而实际的粉尘爆炸事故多发生在易产生粉尘堆积的管道系统中。为此本文中基于新建立的小尺寸粉尘燃烧管道实验平台, 开展不同粒径的碳酸氢钠粉体对工业粉尘燃烧火焰传播特性影响的实验研究。

^{*} 收稿日期: 2015-11-24; 修回日期: 2016-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174153, 51374164);

建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题(KFKT2014ZD03);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015-zy-080)

第一作者: 陈 曦(1990—), 男, 硕士研究生; 通信作者: 陈先锋, cxf618@whut.edu.cn。

1 实 验

1.1 实验系统

实验系统由粉尘燃烧管道、高压点火系统、温度监测采集系统、配气系统、数据采集系统、高速摄影与光学滤波系统、同步控制系统等组成,如图 1 所示。粉尘燃烧管道为正方形截面的长方体垂直管道,其尺寸为 $50\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$,左、右侧壁采用 15 mm 厚高机械强度的不锈钢板,前、后侧壁安装可拆卸的具有高机械强度、良好透光性和耐高温的石英玻璃,在管道上端设置泄压口。

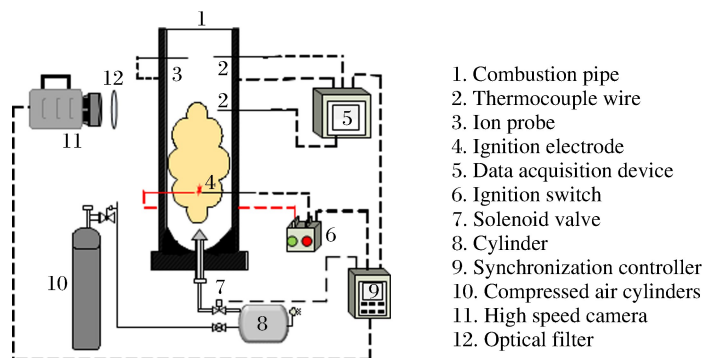


图 1 实验系统结构

Fig. 1 Scheme of experimental system

由于铝粉在燃烧过程中反应剧烈,火焰亮度较大,为了清晰地捕捉铝粉火焰的传播过程,选取铝粉颗粒燃烧时出现的中间产物—— AlO (AlO 的特征辐射波长约为 484 nm) 作为观察对象^[10],采用特制的 484 nm 带通(窄带)滤光片。

1.2 实验过程

实验中采用分析纯铝粉和碳酸氢钠粉体,具体参数如表 1 所示。将铝粉和碳酸氢钠粉体置于真空干燥箱中,分别在 50 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干 8 h 以上。选取 4 种标准分析筛,筛分出粒径为 $50\sim 75\text{ }\mu\text{m}$ 、 $38\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $30\sim 38\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 的粉尘样品,对应的平均粒径 d 分别为 60 、 45 、 30 、 $15\text{ }\mu\text{m}$,将样品存放在常温真空干燥箱内备用。

表 1 实验样品参数

Table 1 Specific parameters of the sample

样品名称	分子式	相对分子质量	纯度/%	级别	实验用量/g
铝粉	Al	26.98	99.0	分析纯	0.9
碳酸氢钠	NaHCO_3	84.01	99.5	分析纯	0.4

首先按照图 1 所示安装实验系统中的各种仪器设备并进行调试,然后按要求称取一定质量的样品,充分混合后均匀地放入管道凹槽内,接着对喷粉系统配气,最后启动实验,电火花点燃预先吹扬起的粉尘云,火焰传播的变化过程由高速摄影仪和热电偶等记录和测量。高速摄影仪和数据采集仪的启动时间以及高压点火器的点火时间均由可编程同步控制装置实现。实验中,喷出压缩空气的压力为 0.1 MPa ,喷气持续时间为 100 ms ,点火电压为 14 kV ,点火延迟时间(喷粉结束后距点火电极放电的时间)为 100 ms ,高速摄影仪的记录速度为 2000 帧每秒。采用插板法测量粉尘云的质量浓度,多次测量取平均值,即视为该粉尘质量下的粉尘云质量浓度,实验管道中铝粉的质量浓度约为 0.346 kg/m^3 。

2 实验结果与分析讨论

2.1 铝粉火焰结构分析

选取平均粒径为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的铝粉粉尘进行铝粉燃烧实验。高速摄影仪拍摄的铝粉火焰传播过程图

像截图如图 2 所示,时间间隔为 5 ms。从图 2 中可以看到由剧烈燃烧发出的亮光所引起的白色斑驳,火焰传播过程中火焰前端比较整齐、平稳,未出现波动,说明粉尘的分布比较均匀,铝粉燃烧反应循序渐进,火焰上端出现规律的浅蓝色区域。针对此浅蓝色区域,以热电偶和离子探针监测点为参照点,选取 t_1 时刻(即浅蓝色区域上端接近监测点)和 t_2 时刻(即浅蓝色区域上升越过监测点)的火焰传播图像截图(见图 3),通过数据分析得到该区域的实际宽度为 14.66 mm。此外,对图像进行灰度处理,所得的实际宽度与处理前结果基本吻合,如图 3 所示。

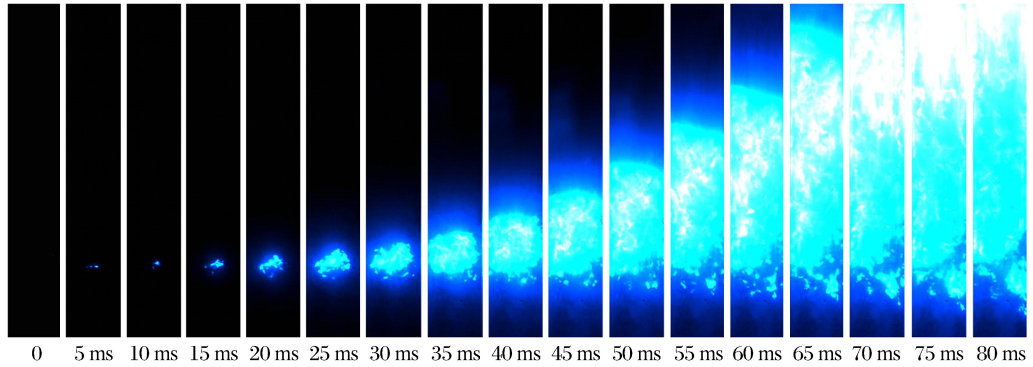


图 2 铝粉火焰传播过程

Fig. 2 The flame propagation process of aluminum powder

根据前人获得的铝粉火焰离子探针实验结果^[11-13],结合本实验数据进行分析:在火焰温度大幅上升之前,离子电流已出现波动,说明在此之前已经出现铝粉熔化、汽化,铝粉与周围空气发生反应,反应进行得比较缓慢,反应程度较低;离子电流峰和温度峰都很光滑并且很强,说明这一区域内铝粉汽化、燃烧反应比较剧烈;火焰温度下降之后,离子电流也出现了同样波动,说明火焰经过后仍有一些残留的粉尘进行反应,与火焰传播后期火焰熄灭过程中存在的零星燃烧反应区域吻合。由此,考虑将预热区厚度定义为燃烧区前锋到浅蓝色区域边界之间的距离^[13],进而可将铝粉火焰结构划分为未燃区、预热区和燃烧区,见图 4。

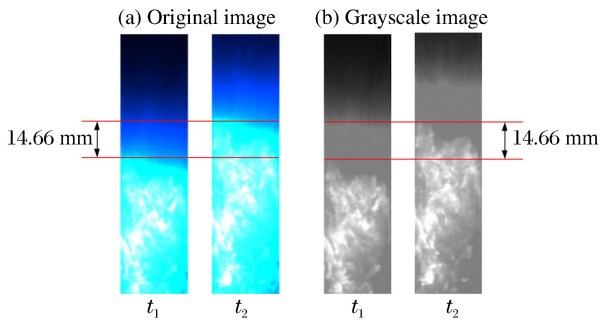


图 3 铝粉火焰传播图像截图

Fig. 3 Partial image of the aluminum powder flame propagation

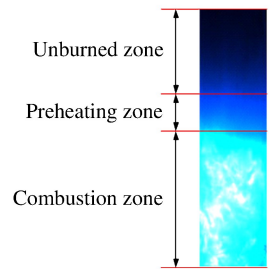


图 4 铝粉火焰结构示意图

Fig. 4 Structure of the aluminum powder flame

2.2 碳酸氢钠粒径对铝粉火焰传播速度的影响

采用前人的火焰传播过程图像分析方法^[14-15],对相同实验条件下高速摄影仪拍摄的火焰传播过程图像进行分析,得到添加质量分数为 30% 的不同粒径碳酸氢钠粉体后不同时刻的火焰传播速度曲线,如图 5 所示。从图 5 可以看出:火焰传播速度 v 随时间 t 增加而逐渐增大,碳酸氢钠粒径(d_{NaHCO_3})为 30 μm 时的火焰传播速度最低,且火焰速度的增加幅度最小;随着火焰速度的增大,碳酸氢钠对铝粉火焰传播的惰化作用愈加明显。实验结果说明,平均粒径为 30 μm 的碳酸氢钠粉体对铝粉火焰传播速度的惰化抑制效果最好。

2.3 碳酸氢钠粒径对铝粉火焰温度的影响

为了提高实验数据的精度,本实验采用自制的 Pt/Rh13-Pt 热电偶作为温度探测元件,并对热电偶进行误差分析,用温度补偿公式进行修正^[14],测量结果如图 6 所示。

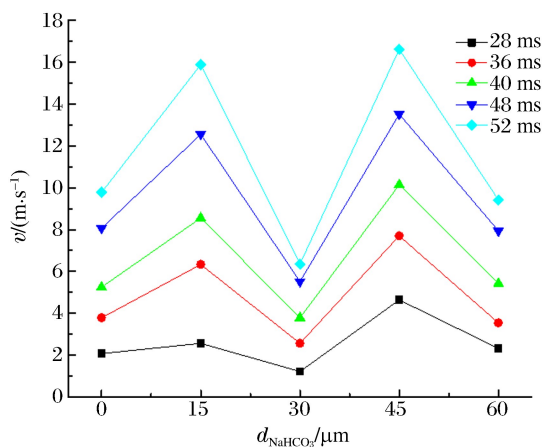


图 5 不同工况下铝粉火焰传播速度

Fig. 5 Flame propagation speeds under different conditions

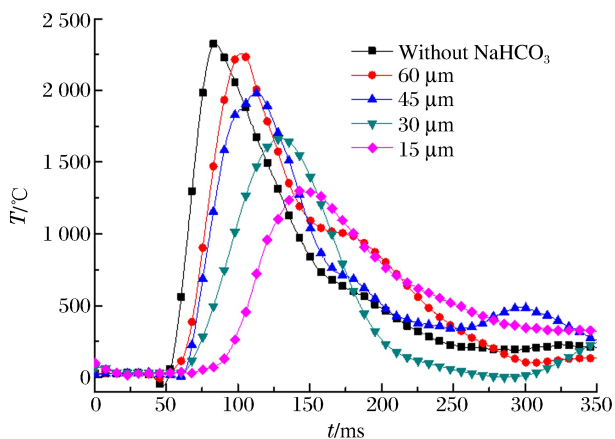


图 6 不同工况下铝粉火焰温度变化

Fig. 6 Flame temperature variations under different conditions

从图 6 可以看出,火焰温度 T 的总体变化趋势是先陡然上升随后缓慢下降。对比不同工况下火焰的最高温度可以看出:添加不同粒径的碳酸氢钠粉体后,铝粉火焰温度均有所下降,只是降低幅度不同,最高温度随着碳酸氢钠粉体粒径的减小而逐渐降低。另外,对比不同工况下火焰温度达到最高时所用的时间,可以看出,所用时间随着添加碳酸氢钠粉体粒径的减小而逐渐增加。实验结果说明:碳酸氢钠粉体能够降低铝粉火焰温度,并且随着碳酸氢钠粉体粒径的减小,作用越明显,降低幅度越大。

2.4 碳酸氢钠粒径对铝粉火焰结构的影响

在碳酸氢钠粉尘(质量分数为 30%)粒径分别为 60、45、30 和 15 μm 的条件下,由高速摄影仪拍摄的铝粉火焰形态如图 7 所示。从图 7 中可以看出:铝粉火焰图像中的白色斑驳随着碳酸氢钠粒径的减小逐渐消失,火焰燃烧区出现不同程度的紊乱,预热区明显变窄,也出现紊乱,其中添加粒径为 30 μm 的碳酸氢钠粉体时铝粉火焰图像的紊乱程度最大,且火焰最暗。由此可知,不同粒径的碳酸氢钠能够降低铝粉燃烧反应速率,使铝粉燃烧产生紊乱,对铝粉火焰传播具有一定的抑制作用,并且 30 μm 的碳酸氢钠粉体的惰化作用最好。

图 8 给出了预热区厚度 h 与碳酸氢钠粒径 d_{NaHCO_3} 之间的关系。可以看出,加入碳酸氢钠粉体后,铝粉火焰预热区厚度变小,当碳酸氢钠粒径为 36.36 μm 时,预热区厚度降到最低,为 10.61 mm,其后

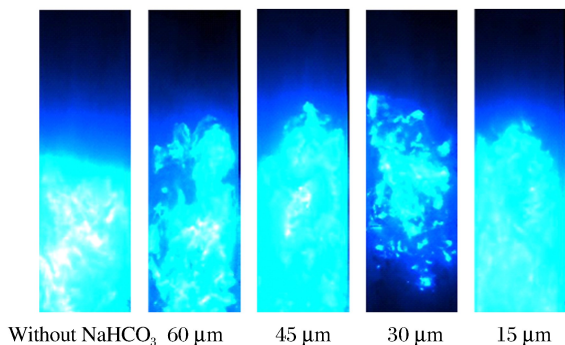


图 7 碳酸氢钠粒径对铝粉火焰形态的影响

Fig. 7 Influence of sodium bicarbonate particle size on flame formation

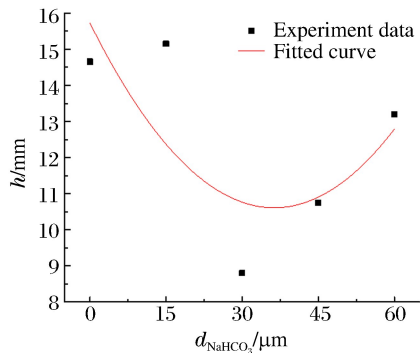


图 8 不同工况下铝粉火焰预热区厚度

Fig. 8 Flame thickness of the preheating zone under different conditions

有随着碳酸氢钠粒径增大而增大的趋势。结合图5可知,预热区厚度和火焰传播速度随碳酸氢钠粒径的变化趋势相同,说明预热区厚度与火焰传播速度有一定联系。在本实验条件下,火焰传播速度越低,燃烧反应速率越低,火焰前锋在向上传播的过程中,未燃区受到火焰加热的热量越少,预热区厚度越小。碳酸氢钠粉体的加入改变了预热区厚度,从而对火焰传播速度产生影响。

2.5 碳酸氢钠粒径对铝粉火焰传播特性影响的机理分析

根据国内外学者对惰性粉体的抑爆研究^[16-23],结合本实验结果的分析,可以得到以下结论。

(1) 在火焰传播过程中,碳酸氢钠粉体的加入会稀释铝粉尘云的质量浓度,减弱反应的剧烈程度,并增大粉尘火焰阵面的湍流程度,由图7可知30 μm 的碳酸氢钠粉体对铝粉的影响较60和45 μm 的碳酸氢钠粉体明显。对于15 μm 的碳酸氢钠粉体,考虑到铝粉的燃烧温度较高,碳酸氢钠粉体在440 $^{\circ}\text{C}$ 时已完全分解,所产生的游离二氧化碳和水蒸气能够夺取粉尘爆炸火焰中产生的自由基,终止粉尘燃烧反应链;然而另一方面由于15 μm 碳酸氢钠粉体分解产物中的水蒸气会促进铝粉的燃烧反应,增强粉尘火焰的前驱冲击波速度,结合图5和图8分析可知,15 μm 的碳酸氢钠粉体对铝粉火焰的抑制效果不明显。

(2) 从图7可以看到:在30 μm 碳酸氢钠粉体的作用下铝粉的火焰阵面复杂,湍流度较大,属于汽化控制的火焰;而60 μm 碳酸氢钠粉体作用下的铝粉火焰介于燃烧控制与汽化控制之间;45 μm 碳酸氢钠粉体作用下的铝粉火焰则属于燃烧控制^[17]。结合图5和图6中的规律,可以得到:对于汽化控制的火焰传播,小粒径的碳酸氢钠粉体在火焰到达之前会吸收火焰辐射出的大部分热量,并用于自身的分解,从而对铝粉粒子的熔化、汽化产生阻碍作用,导致铝粉火焰的传播速度降低,同时大幅度降低火焰温度,发挥惰化抑制作用。

3 结 论

在碳酸氢钠质量分数为30%的惰化条件下,实验研究了4种惰化剂粒径对单一粒径铝粉火焰传播特性的影响,得到的结论如下:

(1) 在本实验条件下,平均粒径为30 μm 的碳酸氢钠粉体对平均粒径为15 μm 的铝粉的火焰传播速度具有较好的抑制作用,惰性粉体与可燃工业粉尘应存在粒度匹配效应;

(2) 碳酸氢钠粉体能够降低铝粉火焰温度,其抑制效果与碳酸氢钠粉体粒径呈反比关系,即粒径越小,作用越明显,降低幅度越大;

(3) 碳酸氢钠粉体能够影响铝粉火焰的预热区厚度,预热区厚度随碳酸氢钠粒径的增加先减小后增大,同时碳酸氢钠粉体还使铝粉火焰的燃烧区出现紊乱,降低铝粉燃烧反应速率,阻碍其燃烧传播。

参考文献:

- [1] 多英全,刘焱楠,胡馨升. 2009~2013年我国粉尘爆炸事故统计分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2): 186-190.
Duo Yingquan, Liu Yaonan, Hu Xinsheng. Statistical analysis on dust explosion accidents occurring in China during 2009-2013[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(2): 186-190.
- [2] 张超光,蒋军成,郑志琴. 粉尘爆炸事故模式及其预防研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(6): 73-76.
Zhang Chaoguang, Jiang Juncheng, Zheng Zhiqin. Study on the mode and prevention of dust explosion accident[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(6): 73-76.
- [3] Amyotte P R, Mintz K J, Peeg M J. Solid inerrant and their use in dust explosion prevention and mitigation[J]. Trans IChemE Part B, 1995, 73: 89-100.
- [4] Amrogowicz J, Kordylewski W. Effectiveness of dust explosion suppression by carbonates and phosphates[J]. Combustion & Flame, 1991, 85(3): 520-522.
- [5] 谢波,王克全. 工业粉尘爆炸抑制技术研究现状及存在的问题[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(1): 13-15.
Xie Bo, Wang Kequan. Present study status of industrial dust explosion suppression techniques and existent prob-

- lems[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000,27(1):13-15.
- [6] 伍毅,袁旌杰,蒯念生,等. 碳酸盐对密闭空间粉尘爆炸压力影响的试验研究[J]. 中国安全科学学报,2010,20(10):92-96.
- Wu Yi, Yuan Jingjie, Kuai Niansheng, et al. Effects of carbonates on dust explosion pressure in closed vessel[J]. China Safety Science Journal, 2010,20(10):92-96.
- [7] 蔡周全,张引合. 干粉灭火剂粒度对抑爆性能的影响[J]. 矿业安全与环保,2001,28(4):14-16.
- [8] 韦伟,翁春生. 铝粉/空气二维黏性两相爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2015,35(1):29-35.
- Wei Wei, Weng Chunsheng. Numerical simulation for aluminum/air two-dimensional viscous two-phase detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(1):29-35.
- [9] 曹卫国,徐森,梁济元,等. 煤粉尘爆炸过程中火焰的传播特性[J]. 爆炸与冲击,2014,34(5):586-593.
- Cao Weiguo, Xu Sen, Liang Jiyuan, et al. Characteristics of flame propagation during coal dust cloud explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(5):586-593.
- [10] 李招宁,王永国,胡栋,等. 铝粉快速反应光谱中 $\text{AlO } B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$ 发射光谱的研究[J]. 原子与分子物理学报,1996,13(3):69-75.
- Li Zhaooning, Wang Yongguo, Hu Dong, et al. A study of the $\text{AlO } (B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+)$ band system from fast reaction of aluminium dust[J]. Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics, 1996,13(3):69-75.
- [11] 孙金华. PMMA 微粒子云中传播火焰的基本结构[J]. 热科学与技术,2004,3(1):76-80.
- Sun Jinhua. Structure of flame propagating through PMMA particle cloud[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004,3(1):76-80.
- [12] 孙金华,卢平,刘义. 空气中悬浮金属微粒子的燃烧特性[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2005,29(5):582-585.
- Sun Jinhua, Lu Ping, Liu Yi. Combustion behavior of metal particles suspended in air[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005,29(5):582-585.
- [13] 丁以斌,孙金华,何学超,等. 锆粉尘云的火焰传播特性[J]. 燃烧科学与技术,2010,16(4):353-357.
- Ding Yibin, Sun Jinhua, He Xuechao, et al. Flame propagation characteristic of zirconium particle cloud[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010,16(4):353-357.
- [14] 陈先锋. 丙烷-空气预混火焰微观结构及加速传播过程中的动力学研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
- [15] 高伟,阿部俊太郎,荣建忠,等. 气流特征对水平长管内石松子粉尘爆炸火焰结构的影响[J]. 爆炸与冲击,2015,35(3):372-379.
- Gao Wei, Abe Shuntaro, Rong Jianzhong, et al. Effect of airflow characteristics on flame structure for following lycopodium dust-air mixtures in a long horizontal tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(3):372-379.
- [16] Hertzberg M. Inhibition and extinction of coal dust and methane explosions[M]. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1982.
- [17] Gao W, Mogi T, Sun J, et al. Effects of particle size distributions on flame propagation mechanism during octadecanol dust explosions[J]. Powder Technology, 2013,249:168-174.
- [18] Moussa R B, Guessasma M, Proust C, et al. Thermal radiation contribution to metal dust explosions[J]. Procedia Engineering, 2015,102:714-721.
- [19] Chen X, Zhang H, Chen X, et al. Effect of dust explosion suppression by sodium bicarbonate with different granulometric distribution[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017.
- [20] 范宝春,谢波,张小和,等. 惰性粉尘抑爆过程的实验研究[J]. 流体力学实验与测量,2001(4):20-25.
- Fan Baochun, Xie Bo, Zhang Xiaohe, et al. Experimental research on explosion suppression by inert particles[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2001(4):20-25.
- [21] 陈振豪,倪文娟,邱根跃,等. 碳酸氢钠干粉灭火机理的研究[J]. 消防科技,1985(3):20-23.
- [22] 左前明,程卫民,汤家轩. 粉体抑爆剂在煤矿应用研究的现状与展望[J]. 煤炭技术,2010,29(11):78-80.
- Zuo Qianming, Cheng Weimin, Tang Jiaxuan. Current status and prospects of application and research of powder coal mine explosion suppression agent[J]. Coal Technology, 2010,29(11):78-80.
- [23] 任一丹,刘龙,袁旌杰,等. 粉尘爆炸中惰性介质抑制机理及协同作用[J]. 消防科学与技术,2015,34(2):158-162.

Ren Yidan, Liu Long, Yuan Jingjie, et al. Inhibition mechanisms and synergy effects of solid inertants in dust explosion[J]. Fire Science and Technology, 2015,34(2):158-162.

Effects of inerting agent with different particle sizes on the flame propagation of aluminum dust

Chen Xi¹, Chen Xianfeng¹, Zhang Hongming¹, Liu Xuanya²

Zhang Ying¹, Niu Yi¹, Hu Dongtao¹

(1. School of Resources & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. Key Laboratory of Building Fire Protection Engineering and Technology of MPS, Tianjin 300381, China)

Abstract: To explore the influence of the inerting agent with different particle sizes on the flame propagation of the combustible industrial dust, by establishing a vertical dust combustion pipe experiment platform, we investigated the effects of the particle size of sodium bicarbonate on the characteristics of the burning flame propagation of aluminum powder. The results show that, under the condition of 30% mass fraction of sodium bicarbonate, the sodium bicarbonate powder with an average particle size of 30 μm has a good inhibitory effect on the flame propagation speed of aluminum powder with an average particle size of 15 μm , and there exists a correlation between the particle size of the inerting powder and the combustible industrial dust. The inerting inhibiting effect of sodium bicarbonate powder on the flame temperature of aluminum is inversely proportionate to its particle size. It was found that sodium bicarbonate powder can decrease the thickness of the preheating zone of aluminum powder flame, which decreases at first and then increases with the increase of the particle size of the sodium bicarbonate. Finally, we also examined the mechanism underlying the influence of sodium bicarbonate particle size on the flame propagation of aluminum powder.

Keywords: inerting agent; particle size; aluminum powder; burning; flame propagation

(责任编辑 王 影)