DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0372-08

气流特征对水平长管内石松子粉尘爆炸火焰结构的影响*

高 伟[1,2],阿部俊太郎[2],荣建忠[3],土桥律[2]

(1. 大连理工大学化工机械学院,辽宁 大连 116024;
2. 东京大学工学院化学系统工程专攻,东京 113-8656;
3. 公安部四川消防研究所,四川 成都 610036)

摘要:为探索气流特征对水平长管内粉尘爆炸火焰结构的影响,对采用加压送气传输方式形成的石松子粉尘云经静电引燃后其火焰在水平长管内的传播特性进行实验。利用热线风速仪测量不同气流条件下沿管径方向的速度分布和湍流强度分布,采用高速摄像系统记录了火焰在水平管道内的传播过程。实验观察到,即使管内石松子粉尘质量分数相同,仍然会出现 2 种不同类型的火焰结构:一种类型火焰轮廓规则、清晰,火焰中心为连续的黄色发光区并由红色边缘火焰包裹;另一种类型火焰空间离散,火焰发光区局部存在,散乱地呈现不规则状态。详细分析不同气流条件对火焰结构的影响。

关键词:爆炸力学;粉尘爆炸;气动传输;气流特征;火焰结构;火焰传播速度

中图分类号:O383;X932 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

由于在垂直管道内形成悬浮的粉尘云比在水平管道内要容易得多,因此不少粉尘火焰的研究工作是在垂直管道内进行的[1-6]。在实验室条件下,要实现粉尘火焰在水平长管中的传播与加速,困难主要在于,因地引力作用很难维持粉尘云在燃烧过程中仍能均匀地悬浮在 $L/D \gg 10$ 的水平管内。T. Matsuda[7-8]在内径 4.2 cm、长 13 m 的水平长管内对采用弱点火能点火的软木和 ABC 树脂粉尘的火焰传播特性及气流速度对其最小点火能的影响开展了实验研究。J. H. Pickles[9]提出了包含湍流混合效应的理论模型,对水平长管内粉尘火焰传播的机理进行了讨论与分析。刘晓利等[10-11]设计了内径 158 mm、长 23 m 的水平粉尘爆轰管,但在其实验研究中只运行了其中的 10 m,其长径比 L/D 仅为 63。陈志华等[12-13]在内径 140 mm,长为 12 m 的水平粉尘火焰加速管内,对铝粉悬浮云中火焰加速诱导激波现象进行了实验研究。白春华等[14]在内径 300 mm,长 71 m 的水平管道内,对玉米淀粉、小麦粉等有机粮食粉尘“二次爆炸”过程进行了实验研究,得到了“二次爆炸”发展过程及爆轰波特性。钟圣俊等[15]采用算子分裂法和 FCT 格式,数值模拟了水平长管道中的煤粉爆炸。薄涛[16]在水平长管内对粉尘的爆炸进行了分析,确定了影响粉尘爆炸的因素,这些因素包括粉尘粒度、粉尘质量分数、粉尘湿度、挥发物含量、惰性粉尘含量以及延迟点火时间等。对于水平管道内粉尘爆炸火焰传播机理的实验数据较少,且较为分散,缺乏系统研究。本文中利用热线风速仪对水平管道内的气流速度及分布进行测量,采用高速摄影系统记录火焰在水平长管内的传播过程,详细分析了不同气流条件对火焰传播速度、涡旋结构、出现条件和相对燃烧速度的影响,可为相关研究提供参考。

1 实验装置及条件

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由水平燃烧长管、送风机、时间控制器、粉尘供给装置、多孔板、点火装置

* **收稿日期**:2013-07-08;**修回日期**:2014-06-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51406023);中国博士后科学基金项目(2014M560213)
第一作者:高 伟(1984—),男,博士,讲师,gaowei07@mail.ustc.edu.cn。

及高速摄影系统组成。水平燃烧长管为末端开口直径 60 mm、长 4 000 mm 的透明亚克力圆柱形管道，实验中主要选取点火电极上游 1 m 至下游 2 m 段作为主要的观测范围。在水平长管内形成粉尘气流的方法通常有 2 种，即加压送气法和加压抽吸法。在本文中采用加压送气法在长管内形成均匀的粉尘云，为防止火焰的逆流在送风机出口处设置金属网。实验中使用 200 V 三相电源的送风机，通过调节输出频率控制电机的转速进而控制长管内的空气流速；在点火电极上游不同位置安置多孔板进行整流并营造出不同的湍流环境。粉尘供给系统位于点火电极上游 1 m 处，由粉尘罐、振动筛和空气压缩机组成，电磁阀的开启持续时间由罐内的空气压力值和粉尘量共同决定，同时采用直角弯管释放储罐内的粉尘粒子，从而使粒子完全释放并在管道中均匀分散。实验中采用欧姆龙石英计时器 H5CN 控制各个单元的启动和关闭时间，由 PLC 语言编译实现。实验中的粉尘的粒径分布由马尔文公司的粒径分析仪进行检测；并采用 Phantom 公司高速摄影记录不同时刻管道中的火焰结构特征。

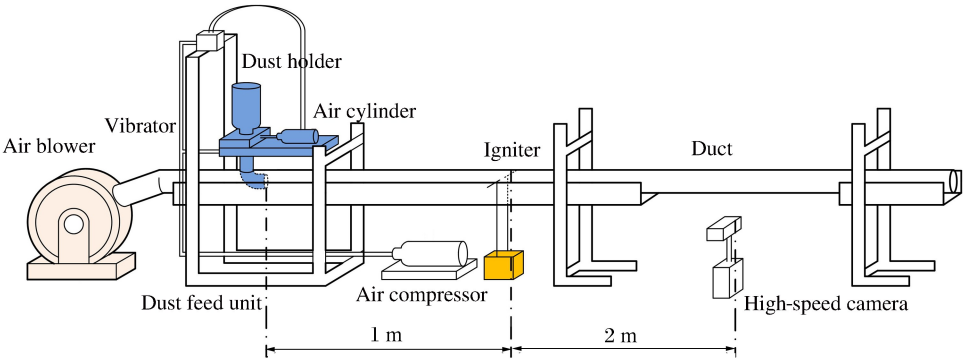

图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Experimental apparatus

1.2　实验材料

1.2.1　材料特性

实验中采用日本粉体工业技术协会规定的粉尘爆炸标准粒子——石松子为材料进行测试。石松子为石松科植物石松的孢子，淡黄色、质轻、无吸湿性。石松子 $C_{5.7}H_{9.6}O_{1.3}N_{0.09}$ 含脂肪油约 50%，含纤维素 10%～15%、含木聚糖 10%及精蛋白，密度为 0.367～0.477 g/m^3，最小点火能 10～40 mJ，粉尘云最低点火温度 310 ℃，粉尘云爆炸的质量分数下限为 105～125 g/m^3[17]。SEM 扫描图像显示，燃烧前的石松子粒子形状规则，球状表面有网状的凹凸结构[3]。实验中石松子粒子的质量分数约为 400 g/m^3。石松子粒子扫描电镜图像如图 2 所示。

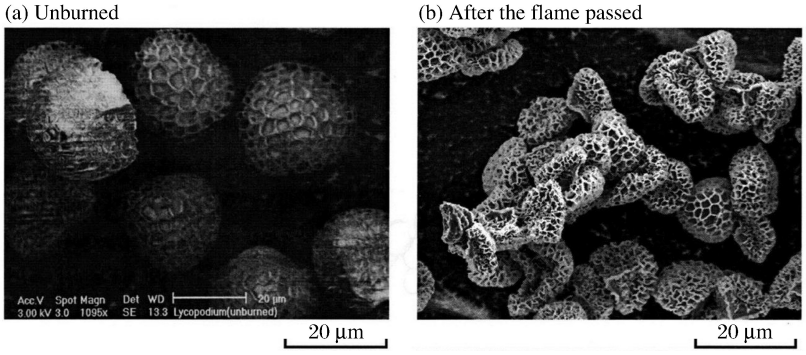

图 2　石松子粒子扫描电镜图像

Fig. 2　SEM photographs of unburned and burned lycopodium particles

1.2.2　粒径分布

实验前利用马尔文公司的粒径分析仪对石松子粒子的粒径分布进行测量，图 3 所示为测量的粒径

分布曲线，D 为粒子粒径，φ 为相应粒径的体积分布分数，F 为相应粒径的累计分布分数。当量比表面直径和体积平均粒径分别为 13.99 和 30.64 μm。

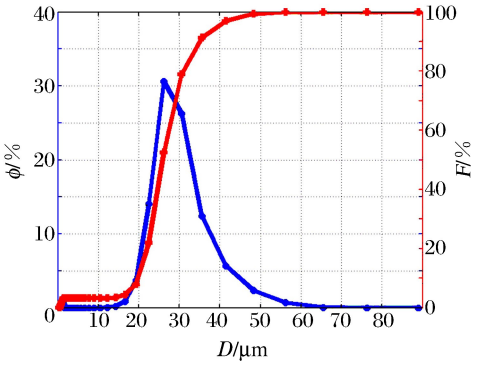

图 3 石松子粒子粒径分布曲线

Fig. 3 Diameter distribution of the lycopodium particles

1.3 水平长管内的气流速度及湍流强度

根据湍流的定义[18]，某一瞬态流动在流场给定位置第 i 次所测得的 t_0 时刻的瞬时速度为 $u(t_0)$，可以分解为 2 个部分：

$$u(t_0)=\bar{u}(t_0)+u_t(t_0) \tag{1}$$

式中：$u(t_0)$ 为瞬时速度，$\bar{u}(t_0)$ 为平均速度，$u_t(t_0)$ 为脉动速度。

根据系综平均法定义[19]，在 t_0 时刻由 N 次相同测量而获得的该时刻的系综平均速度与均方根速度为：

$$\bar{u}(t_0)=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}u_t(t_0) \tag{2}$$

$$u'(t_0)=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}[u(t_0)-\bar{u}(t_0)]^2} \tag{3}$$

式中：$u'(t_0)$ 表示湍流速度的大小即湍流强度。

在内径为 60 mm 的水平长管中，雷诺数都超过 10 000，所以在本文中取 $Re=10^4\sim10^5$，长管内的流场为湍流状态。实验中通过调节变频控制器来调节电机的转速进而控制长管内空气的流速，并利用日本加野会社的热线风速仪测量长管内不同位置的瞬时速度，测量结果如图 4 所示，定义 v_0 为空气进入管内的初始速度，v_a 为气流速度，u' 为湍流强度，H 为距离管中心线的垂直距离。

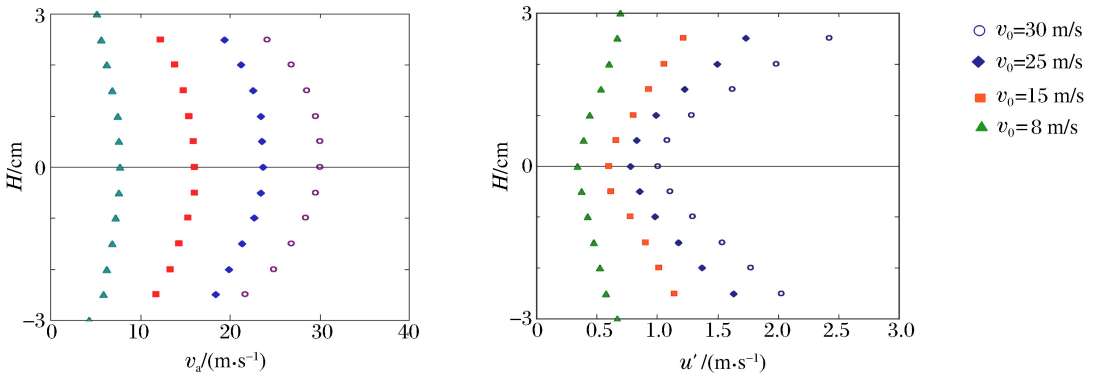

图 4 不同初始气流速度下沿管径方向的气流速度分布和湍流强度分布

Fig. 4 Distributions of airflow velocities and turbulent intensities along the diameter under different initial velocities

从图 4 可以看出，在不同初始速度的条件下，实验中水平长管中的气流特征如下：气流速度在水平长管内以长管中心为中心沿管径方向呈凸抛物线型分布；随着管内气流速度的增大，长管中心处的气流速度与管壁处的气流速度差逐渐变大；随着长管内气流速度的变大，湍流强度也逐渐变大；湍流强度在水平长管内以长管中心为中心沿管径方向呈凹抛物线型分布；随着气流速度的增大，长管中心与管壁的湍流强度差也逐渐变大；气流速度非常大的情况下，管壁处的湍流强度非常强，最高可达到 2 m/s。通常在粉尘爆炸过程中，湍流对爆炸过程的影响主要包括 3 个方面[20]：增加热解、气化气体组分的燃烧速度；增加氧气的传输速度；增加粒子间的热量传递速率。

2 实验结果及讨论

2.1 不同气流条件下的火焰位置及火焰传播速度

利用高速摄像系统拍摄气流速度分别为 10、15、20、25 和 30 m/s 条件下管内的火焰传播过程，图 5

所示为不同气流速度条件下火焰前端、后端的瞬时位置。

在 10 m/s 气流速度条件下，石松子粒子流至下游 0.3 m 后开始着火。气流对火焰传播过程的影响并不明显，火焰沿管轴向上游和下游以同样方式加速传播，且向上游与向下游的传播速度几乎相同；向上游传播时，火焰传播方向与气流方向相反。在火焰传播的过程中，火焰持续伸长，变成顶端细且极长的火焰。气流速度为 15 m/s 时，火焰同样出现在点火电极的下游。点燃后的石松子粒子向上游和下游传播的状态与 10 m/s 时的情况相同，但因被气流抑制，火焰向上游的传播速度偏小，且火焰末端没有变细。气流速度为 20、25 和 30 m/s 时，除一次火焰外，水平长管内均出现二次火焰，且形成的二次火焰比一次火焰更长；同时一次火焰出现时火焰不会发生倒流现象，但二次火焰出现时火焰会发生倒流现象。从图 5(e)中可以看出，当气流速度为 30 m/s 时，在一次火焰上游的位置出现二次火焰。通常粉尘爆炸时火焰从点火源开始传播，因点火源附近只有燃烧生成物所以很难再次着火；但在本文中，火焰在水平长管内传播的同时，上游未燃的石松子粒子和氧气会随气流再次流下，因此很容易产生二次火焰。45 ms 后管内出现的二次火焰由于燃烧产物的热膨胀效应加速一次火焰在管内的双向传播。在 70 ms 后，火焰的传播速度与气流流速相近，火焰分裂成几个部分并从下游火焰的顶端位置开始逐渐消失。

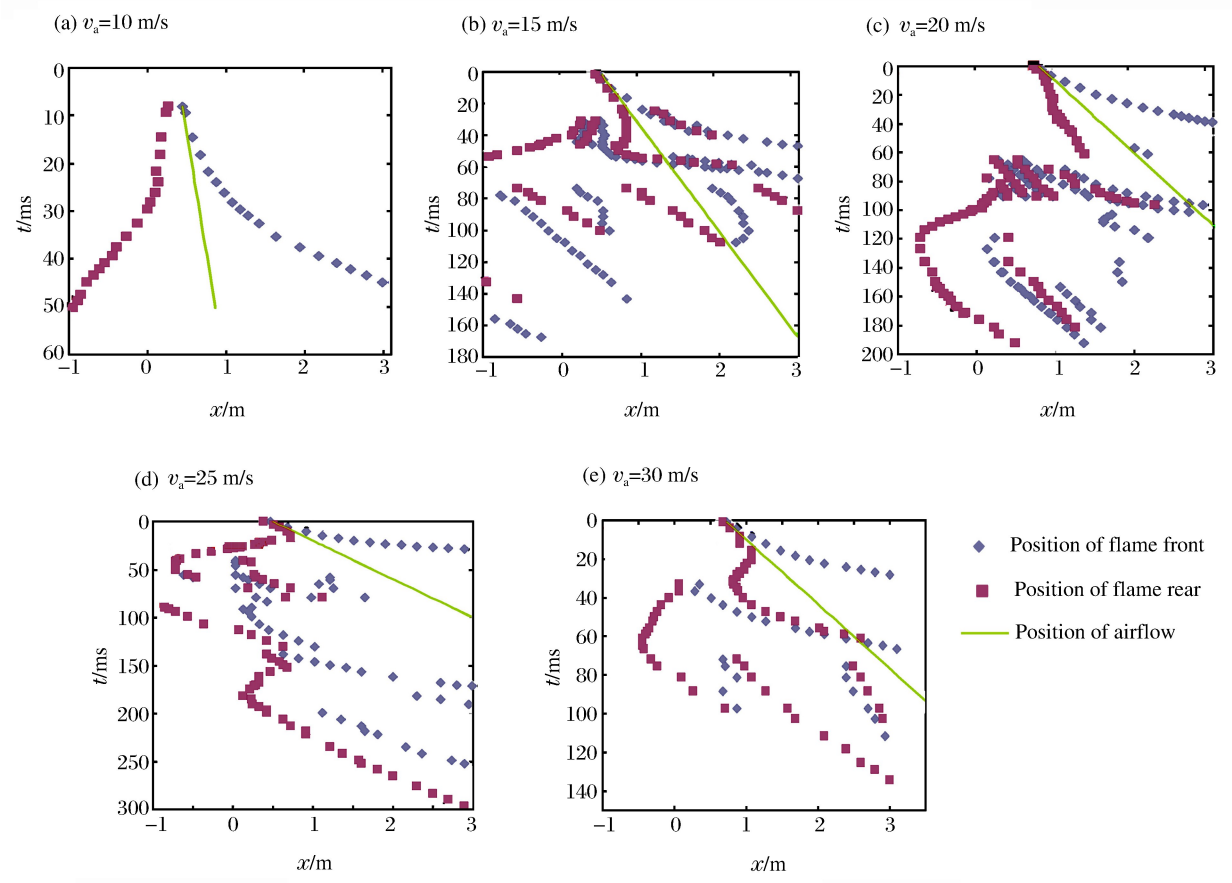

图 5　不同气流速度下不同时刻的火焰前端、后端位置

Fig. 5　Flame front, rear positions with time under different airflow velocities

图 6 所示为气流速度分别为 10、15、20、25 和 30 m/s 条件下测定的火焰前端、中端和后端的平均传播速度值，v_f 为火焰传播速度，L_x=1.0，2.0，3.0 时，分别表示火焰的前端、中端和后端。图中不同色块仅区别多次实验中得到的结果，不代表物理状态的变化。在工业安全设计中通常取最大火焰传播速度作为参考数值，可以看到在高气流速度条件下，火焰的最高传播速度甚至可以为气流速度的 6 倍以上，以超过 100 m/s 的超高速传播；即使气流速度为 10 m/s 的情况下，最高火焰传播速度也接近 10 m/s。在气流速度为 15、20 和 30 m/s 时，火焰前端的传播速度最快；而在 10 和 25 m/s 气流条件下，火焰中端的传播速度稍快。

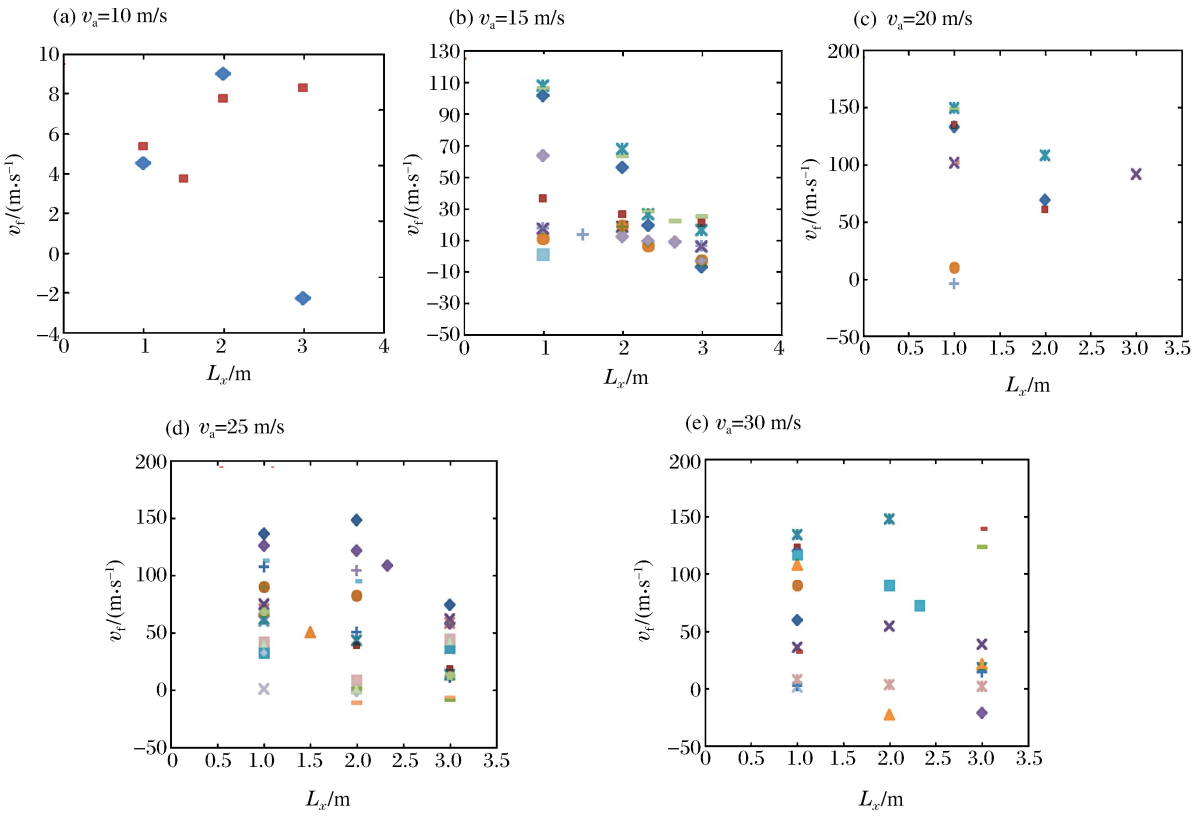

图 6 不同气流速度下火焰的不同位置传播速度

Fig. 6 Flame propagation velocities of different positions under different airflow velocities

2.2 火焰的传播形态

水平长管内的石松子粉尘质量分数相同时，实验过程中仍然观察到 2 种不同的火焰结构，如图 7 所示。A 类型火焰轮廓规则、清晰，且顶端大多呈圆弧状；火焰中心为黄色发光区，发光区在空间连续并由红色火焰包裹；在火焰传播的过程中火焰的发光部分会逐渐变弱至消失。B 类型火焰空间离散，表现为顶端细中部逐渐断裂，火焰发光区局部存在，散乱地呈现不规则状态。

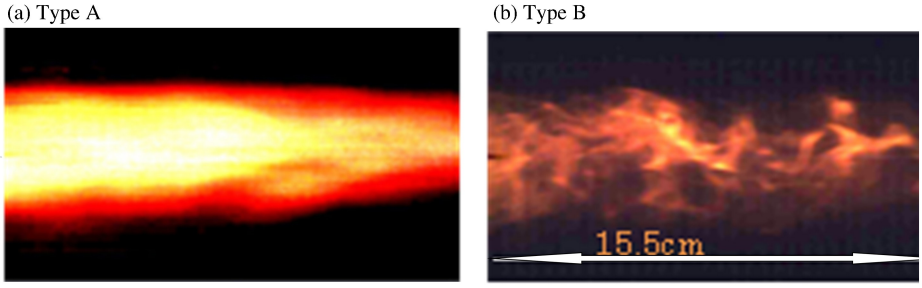

图 7 2 种类型火焰的形态特征

Fig. 7 Characteristics of the two types flames

B 类型火焰在着火点附近的火焰形状变化剧烈，可以确定此类火焰呈螺旋状旋转传播。A 类型火焰亮度强，结构很难直接观察，在实验中采用带通滤波片拍摄并利用 Image-J 软件对火焰的轮廓进行临摹，如图 8 所示。从图中可以看出，火焰如漩涡卷动一般，仅仅从图像来看是上下动作，但是从立体上可以确定仍是呈螺旋状旋转传播。

通过多次实验调查了 A 类型火焰与 B 类型火焰形成的条件，结果发现管内的气流速度对 2 种不同类型火焰的形成有重要影响。在较低流速的气流条件下，B 类型的火焰占据主导地位；当气流速度超过 20 m/s 时 B 类型火焰的主导地位发生逆转；也就是说，当气流速度超过 20 m/s 时容易出现 A 类型的

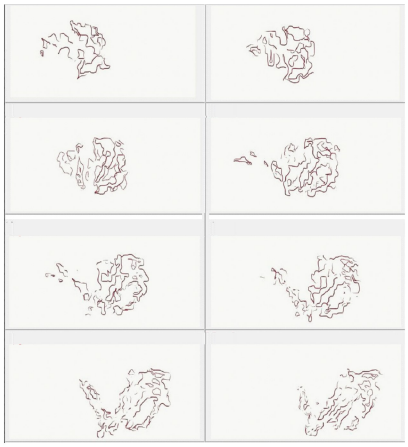

图 8　A 类型火焰的涡旋结构

Fig. 8　Flame vortex structure of type A

火焰，当气流速度低于 20 m/s 时容易出现 B 类型的火焰。

2.3　2 种类型火焰的相对燃烧速度

为了消除气流速度的影响，将 2 种类型火焰的传播速度减去气流速度从而算出相对燃烧速度，计算结果如图 9 所示。

这里的燃烧速度限定为一次火焰的相对燃烧速度。由图中可以看出，限定为一次火焰时，A 类型火焰的相对燃烧速度平均值超过 100 m/s；而 B 类型火焰的相对燃烧速度平均值均低于 80 m/s。实验结果表明，石松子粉尘火焰在水平长管内传播时，火焰的相对燃烧速度与气流速度的变化趋势相一致，即气流速度较快时火焰的传播速度也变快。

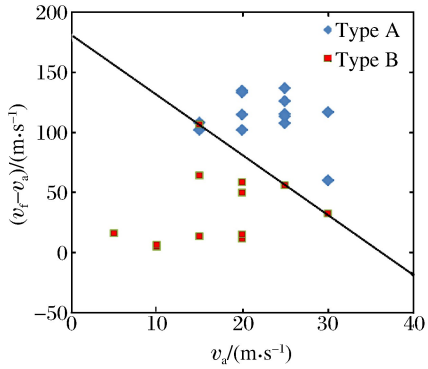

图 9　2 种类型火焰的相对燃烧速度

Fig. 9　Relative propagation velocities of the two types flames

3　结　论

利用高速摄影系统记录了不同气流条件下石松子粉尘火焰在水平长管内的传播过程，并详细分析了管内气流特征对火焰结构的影响，得到如下结论：

(1)气流速度为 10m/s 时石松子火焰在水平长管内稳定传播；而当气流速度为 20、25 和 30 m/s 时，除一次火焰外，水平长管内出现二次火焰，且形成的二次火焰比一次火焰长；同时一次火焰出现时火焰不会发生倒流现象，但是二次火焰时火焰会发生倒流现象。

(2)在高气流速度条件下，火焰的最高传播速度可以达到气流速度的 6 倍以上，以超过 100 m/s 的超高速传播；即使气流速度为 10 m/s 的情况下，火焰的最高传播速度也接近 10 m/s。

(3)在相同质量分数粉尘的火焰传播过程中出现两种截然不同的火焰结构，A 类型火焰轮廓规则、清晰，火焰中心为连续的黄色发光区并由红色火焰包裹；B 类型火焰发光区空间离散并局部存在，散乱地呈现不规则状态；两种火焰均呈螺旋状旋转传播。当气流速度超过 20 m/s 时容易出现 A 类型的火焰，当气流速度低于 20 m/s 时容易出现 B 类型的火焰。

(4)石松子粉尘火焰在水平长管内传播时，火焰的相对燃烧速度与气流速度相一致，即气流速度较快时火焰的传播速度也变快。

参考文献：

[1]　Eckhoff R K. Dust explosions in the process industries[M]. 3rd ed. Boston: Gulf Professional Publishing/Elsevi-

er, 2003:1-156.

[2] Gao W, Dobashi R, Mogi T, et al. Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012,25(6):993-999.

[3] Han O S, Yashima M, Matsuda T, et al. Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000,13(6):449-457.

[4] Proust C. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006,19(2/3):104-120.

[5] Wang S F, Pu Y K, Jia F. An experimental study on flame propagation in cornstarch dust clouds[J]. Combustion Science and Technology, 2006,178(10/11):1957-1975.

[6] Dobashi R, Senda K. Detailed analysis of flame propagation during dust explosions by UV band observations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006,19(2/3):149-153.

[7] Matsuda T. The effect of air velocity on minimum ignition energy for flowing dust-air mixtures in a tube[R]. Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-86, 1986.

[8] Matsuda T. Flame propagation characteristics of flowing dust-air mixtures in a tube[R]. Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-87, 1987.

[9] Pickles J H. A model for coal dust duct explosions[J]. Combustion and Flame, 1982,44(1/2/3):153-168.

[10] 刘晓利,李鸿志,叶经方,等.铝粉-空气混和物的爆轰管研究[J].弹道学报,1993(2):76-82.
Liu Xiao-li, Li Hong-zhi, Ye Jing-fang, et al. Detonation tube studies of aluminum powder-air mixture[J]. Journal of Ballistics, 1993(2):76-82.

[11] 刘晓利,李鸿志,郭建国,等.铝粉-空气混和物燃烧转爆轰(DDT)过程的实验研究[J].爆炸与冲击,1995,15(3):217-228.
Liu Xiao-li, Li Hong-zhi, Guo Jian-guo, et al. An experimental investigation of deflagration to detonation transition (DDT) in aluminum dust-air mixture[J]. Explosion and Shock Waves, 1995,15(3):217-228.

[12] 陈志华,范宝春,刘庆明,等.大型管中两相爆炸现象的实验研究[J].流体力学实验与测量,1998,12(1):44-49.
Chen Zhi-hua, Fan Bao-chun, Liu Qing-ming, et al. Experimental study on the phenomenon of two-phase explosion in a large scale tube[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 1998,12(1):44-49.

[13] 陈志华,范宝春,李鸿志.燃烧管内悬浮铝粉燃烧爆炸过程的研究[J].高压物理学报,2006,20(2):157-162.
Chen Zhi-hua, Fan Bao-chun, Li Hong-zhi, et al. Investigations on combustion and explosion process of suspended aluminum particles in a large combustion tube[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006,20(2):157-162.

[14] 白春华,Li Y C,Kauffman C W.工业粉尘"二次爆炸"过程研究[J].中国安全科学学报,1995,5(1):6-11.
Bai Chun-hua, Li Y C, Kauffman C W. The explosion behaviour of layered industrial dusts[J]. China Safety Science Journal, 1995,5(1):6-11.

[15] 钟圣俊,邓煦帆.有机粉尘爆炸的数值模拟[J].中国粉体技术,2000(6):239-243.
Zhong Sheng-jun, Deng Xu-fan. Simulation of organic dust explosions[J]. China Powder Science and Technology, 2000(6):239-243.

[16] 薄涛.水平管道爆炸装置中粉尘爆炸特性研究[J].山西化工,2008,28(5):14-16.
Bo Tao. The experimental study of dust explosion in horizontal pipeline type exploder[J]. Shanxi Chemical Industry, 2008,28(5):14-16.

[17] 日本粉尘工业技术协会粉尘爆炸委员会编.粉尘爆炸火灾对策[M]. Ohmsha 出版局,2006:21-55.

[18] Zhen G, Leuckel W. Determination of dust-dispersion-induced turbulence and its influence on dust explosions[J]. Combustion Science and Technology, 1996,113(1):629-639.

[19] Hinze J O. Turbulence[M]. 2nd ed. Mcgraw-Hill College, 1975:27-63.

[20] Gao W, Mogi T, Dobashi R. Effects of particle thermal characteristics on flame structures during dust explosions of three long-chain monobasic alcohols in an open-space chamber[J]. Fuel, 2013,113:86-96.

Effect of airflow characteristics on flame structure for following lycopodium dust-air mixtures in a long horizontal tube

Gao Wei[1,2], Abe Shuntaro[2], Rong Jian-zhong[3], Dobashi Ritsu[2]

(1. *School of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning, China*;
2. *Department of Chemical System Engineering School of Engineering, University of Tokyo, Tokyo* 113-8656, *Japan*;
3. *Sichuan Fire Research Institute of Ministry of Public Security, Chengdu* 610036, *Sichuan, China*)

Abstract: Experiments were conducted to investigate the effect of conveying airflow characteristics on flame structure for the electric spark ignition in air flow of lycopodium dust. Hot wire anemometers were used to measure the distributions of velocity and turbulent intensity along the diameter in a 6 cm diameter and 4 m length horizontal acrylic tube of a blow-type pneumatic conveying system. The measured dust-air mixtures flowing velocities ranged between 10 and 30 m/s. A high-speed video camera was utilized to record the flame propagation process and to obtain the direct light emission photographs. Two apparently different types of flames appeared in the flame propagation process under different airflow conditions. Type A flame was characterized by a regular and continuous structure with the yellow light-emitting zone in the center surrounding by the red luminous zone. Type B flame was discrete in the space and the structure of the luminous zone was irregular. Furthermore, the flame propagation velocities, vortex structures, formation conditions and relative burning velocities of the two types flames under different airflow velocities were discussed in detail.

Key words: mechanics of explosion; dust explosion; pneumatic transportation; air flow characteristics; flame structure; flame propagation velocity

（责任编辑　王易难）