

文章编号: 0253-9993(2012)10-1693-05

内铺煤粉方管内瓦斯预混火焰传播特性

汪 泉^{1,2,3} 沈兆武¹ 郭子如² 马宏昊^{1,3}

(1. 中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 安徽理工大学 化学工程学院, 安徽 淮南 232001; 3. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 为了研究煤粉对管内瓦斯预混火焰传播过程的影响, 选用典型煤粉试样将其均匀铺于截面 100 mm×100 mm、长 1.5 m 的有机玻璃方管底部, 采用高速摄像机/光电传感器、微细热电偶、压力传感器等测试得到了管内瓦斯火焰传播过程中火焰传播速度、火焰瞬态温度、燃烧压力等参数, 并初步分析了煤粉影响瓦斯火焰传播的机制。结果表明: 有煤粉时火焰传播速度有所增加, 但燃烧反应持续时间明显增长; 内铺煤粉时管内火焰温度的半峰宽度增加, 测点处瞬态温度曲线呈现出较为明显的“双峰”结构, 说明活性的煤粉与瓦斯火焰形成瓦斯-煤粉复合火焰; 有无煤粉时燃烧压力峰值差别不大, 但有煤粉时压力波脉冲宽度增加。

关键词: 煤粉; 瓦斯; 预混火焰; 传播特性; 方管 “双峰”结构

中图分类号: TD712.7 **文献标志码:** A

Flame propagation characteristics for premixed methane-air with coal-dust in square tube

WANG Quan^{1,2,3}, SHEN Zhao-wu¹, GUO Zi-ru², MA Hong-hao^{1,3}

(1. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to study the influence of coal dust on premixed methane-air flame propagation in tube, the typical coal dust was well-distributed at the bottom of square plexiglass tube with its section 100 mm×100 mm and 1.5 meters long. The high speed video camera/photoelectric sensors, subtle thermocouples and pressure sensors were adopted to obtain the premixed methane-air flame parameters including flame propagating velocity, flame transient temperature and deflagration pressure along the tube, respectively. And the mechanisms of the coal dust influencing flame propagation were preliminarily analyzed. The experimental results show that coal dust can accelerate the methane-air flame propagation in tube and the flame propagating velocity is increased, but the combustion duration is also increased; the half-peak width of the temperature is broadened under the condition of coal dust in tube, and the transient temperature values of methane-air premixed flame at testing points obviously presents the wave of “twin peaks structure”, which suggests that the reactive coal dust and the methane forms the methane/coal-dust composite flame; there is no obvious difference for the combustion peak-pressure with or without coal dust, but the pressure pulse width is broadened in coal dust condition.

Key words: coal dust; methane; premixed flame; propagation characteristic; square tube; twin peaks structure

矿井瓦斯煤尘爆炸灾害频繁发生, 据不完全统计, 自建国以来, 我国煤矿发生一次性死亡 100 人以

收稿日期: 2012-03-26 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51134012); 火灾科学国家重点实验室开放基金资助项目(HZ2011-KF09); 安徽省优秀青年人才基金资助项目(2010SQRL057ZD)

作者简介: 汪 泉(1980—) 男, 安徽池州人, 博士研究生。E-mail: quanwang@mail.ustc.edu.cn

上的特大事故有 22 起,其中 19 起属于瓦斯煤尘爆炸事故^[1]。对瓦斯燃爆现象的研究,常采用数字化电测技术和光测技术在专门的实验管道或模拟巷道中进行^[2-9]。采用大尺寸模拟巷道比较接近真实情况,但由于耗资巨大、测点布设以及现场参数采集困难等因素,很多研究者更愿意在实验室小尺寸管道中研究瓦斯火焰传播规律和加速机制。虽然这种小尺寸管道与真实矿井巷道环境差别较大,但火焰加速机制、波的传播特性是一致的,它们之间存在着一定的“尺寸效应”^[10]。实际矿井发生瓦斯爆炸时,巷道中不可避免有沉积的煤尘,众多学者开展了此方面研究工作^[11-15]。但国内外学者在研究瓦斯煤尘爆炸时往往以单一的瓦斯或煤粉作为研究对象,有煤粉参与的瓦斯爆炸过程比单一成分爆炸过程复杂得多。基于此考虑,本文研究内铺煤粉管道内瓦斯预混火焰传播特性,通过对比有无煤粉情形下瓦斯火焰传播过程中的火焰传播速度、火焰瞬态温度、燃烧压力等参数不同,初步分析了煤粉影响管内瓦斯预混火焰传播的特性与机制。文中的实验结果与分析,可为防治矿井瓦斯煤尘爆炸灾害的发生和发展提供重要的理论和技术支撑。

1 实验设计

实验管道为自行设计的长 1.5 m 方形截面(100 mm×100 mm)有机玻璃材质火焰加速管。管道的点火端封闭,另一端用塑料薄膜弱封闭。实验中的煤粉试样来源于某真实煤矿井下,工业分析其主要成分为固定碳 65.2%、挥发分 12.3%、灰分 13.8%、水分 8.7%,将其过 200 目筛(粒径<75 μm)。将煤粉试样均匀内铺于管道底部,铺放面密度为 80~100 mg/cm²,铺放厚度约 1 mm。

整个实验系统由光信号测试(高速摄像机及光电传感器 1~7)、温度信号测试(微细热电偶 A、B)、压力信号测试(压电式压力传感器 M、N)以及配气装置、点火装置、数据采集记录等组成。实验装置如图 1 所示。

配气时,根据 Dalton 分压定律在专门配气装置中预配出所需浓度的预混气,再用 CJG 型光干涉式甲烷测定器测出其体积浓度值为 10.58%。点火装置采用简易电容储能式电火花点火装置,名义点火能量约为 14 J。光电传感器采用红外感光的光电二极管制成,将其分别布置在距点火端 0,51,319,589,862,1 130 和 1 405 mm 处,其中光电传感器 1 作为触发信号源以记录点火时刻。微细热电偶选用 25 μm 直径的铂铑 13-铂热电偶,测温范围为 0~1 600 °C,

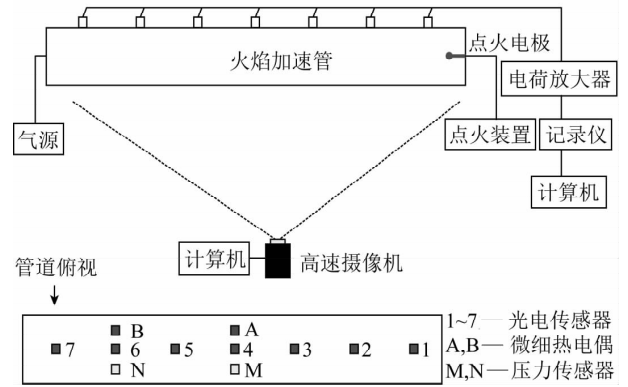


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

能够满足瞬态火焰温度测量^[5]。压力传感器选用 CY-YD 型压电式压力传感器,使用前需在激波管中进行动态标定。微细热电偶和压力传感器布置在距点火端 589,1 130 mm 处(与光电传感器 4,6 处于同一水平位置)。由光电传感器或微细热电偶采集到的信号直接通过 HIOKI8841 记录仪存储,而压力传感器需接电荷放大器 YE5853A 后再由 HIOKI8841 记录仪存储。

2 实验结果与讨论

2.1 有无煤粉管内瓦斯火焰传播的高速摄像与光电测速分析

图 2(a) 为无煤粉时瓦斯预混火焰传播全过程的高速摄像照片,它是由点火后若干典型时刻照片等比例剪切后拼接而成。 $t=2$ ms 时燃料着火,此时火焰光团较小;随后火焰面曲率逐渐变小,火焰外轮廓也由最初的“蝌蚪”状逐渐变成“长柄”状,在 $t=62$ ms 时,火焰面近似呈平面;在 $t=64$ ms 时,火焰面凹向已燃区,呈 V 形火焰; $t=68$ ms 时,火焰冲出开口端,此时燃烧发光区最亮,此后在不到 100 ms 时间内,整个管道仅见微弱发光区,燃烧反应基本结束。

图 2(b) 为有煤粉时瓦斯火焰传播全过程的高速摄像照片,可见火焰发光区亮度明显增加, $t=2$ ms 时,着火后火焰呈椭圆形,随后火焰面曲率逐渐变小,呈“finger”火焰^[16],在 $t=60$ ms 时火焰占满整个管道并冲出开口端,而后由于煤粉参与化学反应使得火焰发光区持续很长时间,超过 230 ms 以后,燃烧反应才基本结束。

通过高速摄像分幅照片或光电传感器起跳时间均可得到有无煤粉管内瓦斯火焰传播速度的平均值,如图 3(a) 和 (b) 所示,其中纵坐标的平均火焰传播速度是由各测点距点火端距离除以火焰面到达相应测点所需时间而得到的。

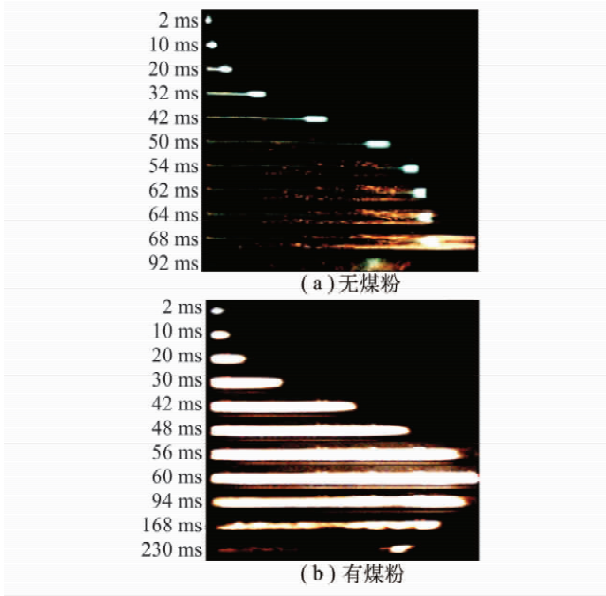


图 2 有无煤粉时瓦斯火焰传播的高速摄像分幅照片

Fig. 2 High-speed video camera images for methane-air flame propagation with or without coal dust in tube

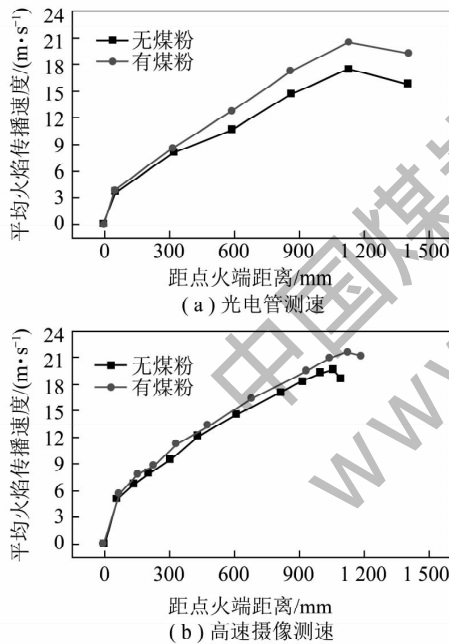


图 3 有无煤粉管内瓦斯火焰传播速度

Fig. 3 Methane-air flame propagating velocity with or without coal dust in tube

由图 3 可见两种方法得到的平均火焰传播速度相对误差较小。有煤粉时平均火焰传播速度要大于无煤粉情形,说明有煤粉参与化学反应放出更多热量,气体膨胀推动火焰面加速运动,对火焰传播速度有一定程度的增加,但有煤粉时燃烧反应在管内持续时间较长(火焰冲出管道以后仍滞留很长时间)。两种情形下,在测点 6 处火焰传播速度均达到峰值,数值均不超过 22 m/s,随后在测点 7 处火焰传播速度

略有下降。

2.2 有无煤粉管内瓦斯瞬态温度分析

采用微细热电偶进行有无煤粉时管内瓦斯火焰瞬态温度测试,所测得的测点 A、B 处典型温度变化如图 4 所示。为了很好说明煤粉对瓦斯火焰温度信号的影响,定义温度的半峰宽度为测点处火焰温度峰值一半时的时间跨度,该数值能够反映化学反应区释放能量多少以及火焰在管内滞留时间长短。

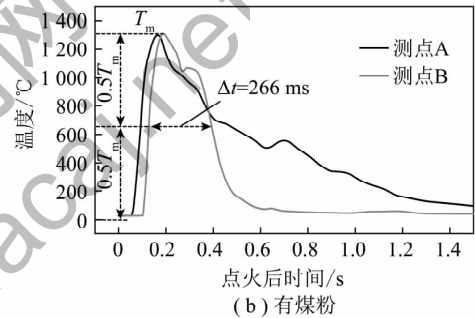
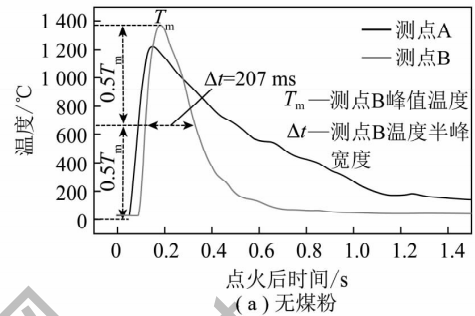


图 4 有无煤粉管内瓦斯火焰瞬态温度

Fig. 4 Methane-air flame temperature variation with and without coal dust in tube

图 4 中标出了测点 B 处半峰宽度数值,可以看出,有无煤粉时测点 A 处温度信号波形外观相似,且火焰温度的半峰宽度分别为 468、389 ms。相对而言,有无煤粉情况下测点 B 处温度信号波形外观有明显差异,且火焰温度的半峰宽度分别为 266、207 ms。进一步分析发现,无粉末情况下,在测点 A 处,点火后经历 141 ms 达到峰值温度 1 214 °C,在测点 B 处,点火后经历 180 ms 达到峰值温度 1 362 °C。而对于有煤粉情况下,在测点 A 处,点火后经历 158 ms 达到峰值温度 1 296 °C,在测点 B 处,点火后经历 189 ms 达到峰值温度 1 306 °C,随后表现出明显的“双峰”结构,这说明活性的煤粉与瓦斯火焰形成瓦斯-煤粉复合火焰^[17]。有煤粉时火焰温度信号宽度增宽(半峰宽度为 266 ms),说明活性煤粉参与化学反应放出更多热量,燃烧反应在管内滞留时间长,火焰温度维持在较高水平。

2.3 有无煤粉管内瓦斯燃烧压力分析

采用压电式压力传感器进行有无煤粉时管内瓦

斯燃烧压力的测试,测得的测点 M、N 处典型燃烧压力如图 5 所示。

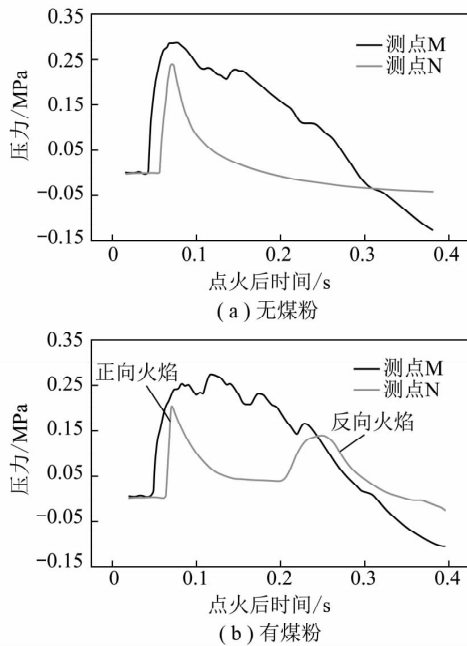


图 5 有无煤粉管内瓦斯燃烧压力

Fig. 5 Methane-air flame pressure with and without coal dust in tube

图 5 曲线表明,有无煤粉时燃烧压力峰值差别不大,但压力波时间跨度(脉冲宽度)差别较为明显。分析发现,无煤粉时,测点 M 处压力持续时间约为 250 ms,测点 N 处持续时间仅约为 125 ms,这一点说明靠近管子封闭端的测点 M 处燃烧驻留时间长,压力持续时间长,而测点 N 离开口端较近,在燃料不断耗尽及开口泄放的双重作用下,压力迅速下降,表现为测点 N 处压力持续时间较短;而当有煤粉时,测点 M 处压力持续时间约为 267 ms,测点 N 处压力波形呈现出独特的“双峰”结构,且压力持续时间甚至增加到约 276 ms。

结合高速摄像照片分析(有煤粉时燃烧发光区持续时间超过 230 ms),笔者认为原因可能是活性的煤粉在临近开口端的测点 N 处形成了反向传播的煤粉火焰,此时正向瓦斯煤粉火焰冲出管外,在稀疏波作用下,外界空气回流至管内参与煤粉化学反应,激起“二次升压”过程。陆守香^[17]认为反向火焰的形成与沉积于粉尘床的粉尘进入气流参与燃烧需要一定的上扬与点火延滞期有关。应该说,此“二次升压”形成过程与煤粉性质和铺放情况、瓦斯浓度和燃烧状况、管道材质和开口端状况等因素有关,尽管它不具有普遍性,但有煤粉时压力波在临近管口处脉动特征以及压力波脉冲宽度增加的特性普遍存在。

3 结 论

(1) 内铺煤粉情形相对于无煤粉时火焰传播速度有所增加,但燃烧反应持续时间明显增长。

(2) 活性的煤粉与瓦斯火焰形成瓦斯-煤粉复合火焰,使得火焰温度的半峰宽度增加,测点处瞬时温度曲线呈现出较为明显的“双峰”结构。

(3) 有无煤粉时燃烧压力峰值差别不大,但有煤粉时火焰压力波脉冲宽度明显增加。

参考文献:

- [1] 刘 义,孙金华,陈东梁,等. 甲烷-煤尘复合体系中煤尘爆炸下限的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(4): 129-131.
Liu Yi, Sun Jinhua, Chen Dongliang, et al. On lower limit of explosive coal dust in coal dust mixture with methane[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(4): 129-131.
- [2] Yuriy Shoshin, Grzegorz Gorecki, Jozef Jarosinski, et al. Experimental study of limit lean methane/air flame in a standard flammability tube using particle image velocimetry method[J]. Combustion and Flame, 2010, 115(5): 884-892.
- [3] Selle L, Poinot T, Ferret B. Experimental and numerical study of the accuracy of flame speed measurements for methane/air combustion in a slot burner[J]. Combustion and Flame, 2011, 118(1): 146-154.
- [4] Zhu Chuanjie, Lin Baiquan, Jiang Bingyou. Flame acceleration of premixed methane/air explosion in parallel pipes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(2): 383-390.
- [5] 陈先锋, 陈 明, 张庆明, 等. 瓦斯爆炸火焰精细结构及动力学特性的实验[J]. 煤炭学报, 2011, 35(2): 246-249.
Chen Xianfeng, Chen Ming, Zhang Qingming, et al. Experimental investigation of gas explosion microstructure and dynamic characteristics in a semi-vented pipe[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 35(2): 246-249.
- [6] 贾智伟, 刘彦伟, 景国勋. 瓦斯爆炸冲击波在管道拐弯情况下的传播特性[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 98-100.
Jia Zhiwei, Liu Yanwei, Jing Guoxun. Propagation characteristics about shock wave of gas explosion at laneway corner[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 98-100.
- [7] 丁以斌, 郭子如, 汪 泉, 等. 立体结构障碍物对甲烷预混火焰传播影响的研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(12): 52-56.
Ding Yibin, Guo Ziru, Wang Quan, et al. Study on the influence of solid obstacles on premixed methane flame propagation[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(12): 52-56.
- [8] 陈东梁, 孙金华, 刘 义, 等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 385-390.
Chen Dongliang, Sun Jinhua, Liu Yi, et al. Propagation characteristics of premixed methane-air flames[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 385-390.
- [9] 汪 泉, 郭子如, 李志敏, 等. 甲烷与空气预混管内爆炸火焰传播特性的试验[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(11): 95-97.
Wang Quan, Guo Ziru, Li Zhimin, et al. Test on flame spreading

- characteristics of premixed methane-air in tube [J]. *Coal Science and Technology* 2007 ,35(11) :95-97.
- [10] 徐景德 ,周心权 ,吴 兵. 矿井瓦斯爆炸传播的尺寸效应的研究 [J]. *中国安全科学学报* 2001 ,11(6) :36-40.
Xu Jingde ,Zhou Xinquan ,Wu Bing. Study on the size effect in the propagation of gas explosion in mine pit [J]. *China Safety Science Journal* 2001 ,11(6) :36-40.
- [11] Kuai Niansheng ,Li Jianming ,Chen Zhi ,et al. Experiment-based investigations of magnesium dust explosion characteristics [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* ,2011 ,24(4) :302-313.
- [12] Amyotte Paul R ,Mintz K J ,Peeg M J. Solid inerrant and their use in dust explosion prevention and mitigation [J]. *Trans IChemE , PartB* ,1995 ,73: 89-100.
- [13] 宫广东 ,刘庆明 ,胡永利 ,等. 管道中煤尘爆炸特性实验 [J]. *煤炭学报* 2010 ,35(4) :609-612.
Gong Guangdong ,Liu Qingming ,Hu Yongli ,et al. Experimental research on methane and coal dust explosion characteristics in tube [J]. *Journal of China Coal Society* 2010 ,35(4) :609-612.
- [14] 刘 丹 ,李润之 ,司荣军 ,等. 瓦斯爆炸诱导沉积煤尘参与爆炸作用模式 [J]. *煤炭学报* 2011 ,36(11) :1879-1883.
Liu Dan ,Li Runzhi ,Si Rongjun ,et al. Pattern of gas explosion induced coal dust explosion [J]. *Journal of China Coal Society* 2011 ,36(11) :1879-1883.
- [15] 谭迎新 ,王志杰 ,高 云 ,等. 固体惰性介质对煤粉爆炸压力的影响研究 [J]. *中国安全科学学报* 2007 ,17(12) :76-79.
Tan Yingxin ,Wang Zhijie ,Gao Yun ,et al. Study on the effect of solid intermediums on the pressure of coal dust explosion [J]. *China Safety Science Journal* 2007 ,17(12) :76-79.
- [16] Akkerman V' yacheslav ,Law Chung K ,Bychkov Vitaly ,et al. Analysis of flame acceleration induced by wall friction in open tubes [J]. *Phys. Fluids* 22 ,2010 ,053606: 1-14.
- [17] Lu Shouxiang ,Guo Ziru ,Li Yuanlong ,et al. Experimental and theoretical analysis of acceleration of a gas flame propagating over a dust deposit [J]. *Proceedings of Combustion Institute* ,2002 ,29(2) :2839-2846.