

管道内甲烷煤尘复合火焰结构的实验

刘 义, 孙金华, 陈东梁

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:对管道中甲烷煤尘复合火焰结构进行了初步研究. 采用高速摄像系统拍摄了甲烷煤尘复合火焰在垂直管道内传播过程的自发光图片; 采用微细热电偶和离子探针技术分别测量了火焰传播过程中的温度分布和化学反应区的强度分布. 研究表明: 管道内甲烷煤尘复合火焰化学反应区的厚度约为 15.6 cm, 比单一甲烷空气预混火焰的化学反应区厚度要大两个量级.

关键词:火焰结构; 瓦斯; 煤尘; 燃烧

中图分类号:TK121; TD712+.71 **文献标识码:**A

Experiment on flame structure of hybrid coal dust and methane in tube

LIU Yi, SUN Jin-hua, CHEN Dong-liang

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract: To investigate the flame structure of the hybrid coal dust and methane in the tube, a high speed camera was used to record self-luminance pictures of the flame propagation process in the vertical tube. The fine thermocouple was introduced to measure the flame temperature. The ion probe was used to measure the intensity of the reaction zone. The results show that the reaction zone thickness of the hybrid coal dust and methane flame is 15.6 cm, which is two times magnitude that of single methane-air premixed flame.

Key words: flame structure; gas; coal dust; combustion

0 引言

为有效防止煤矿井下爆炸事故的发生, 国内外专家学者对瓦斯爆炸和煤尘爆炸都进行了广泛而深入的研究. 研究偏重于以单一的瓦斯或者单一的煤尘作为研究对象, 对瓦斯煤尘复合体系的研究相对较少. 实际上, 煤矿井下是一个瓦斯和煤尘共存的体系. 甲烷中煤尘的存在和煤尘中甲烷的存在都会降低混合物爆炸的下限和最小点火能^[1~4]. 另一方面, 甲烷和煤尘混合体系的最大爆炸压力和最大压力上

升速率也比单一的煤尘和单一的甲烷要高^[3~5]. 这说明甲烷煤尘混合物的点火较单一的煤尘或单一的甲烷要容易, 且混合物的爆炸威力也比单一的甲烷或单一的煤尘要高. 国内外对甲烷煤尘复合体系的研究主要集中在激波对煤尘的卷扬与点火、混合爆炸的特性参数(如爆炸下限, 最小点火能, 最大爆炸压力, 最大压力上升速率)、瓦斯的的存在对煤尘爆炸特性指标的影响规律以及煤尘的存在对瓦斯爆炸特性指标的影响规律等^[1~8]. 这些研究成果对煤矿安全生产设计和安全管理有着重要的指导意义. 但是,

收稿日期: 2005-11-03; 修回日期: 2005-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(5057609)和国家自然科学基金重点项目(50536030)资助.

作者简介: 刘义, 男, 1977年生, 博士, 研究方向: 火焰结构. E-mail: yiliu@ustc.edu

通讯作者: 孙金华, 博士/教授, 博士生导师. E-mail: sunjh@ustc.edu.cn; Tel: 0551-3606425

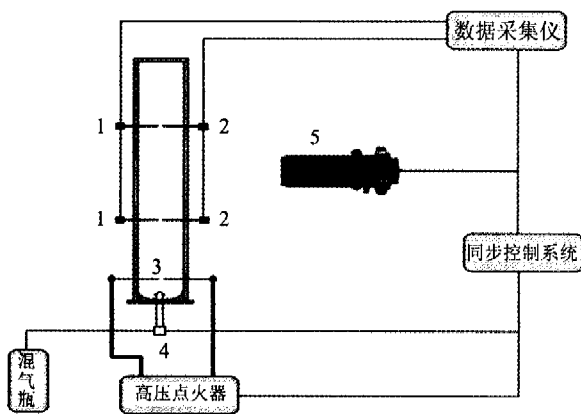
关于甲烷煤尘混合体系传播火焰的成长规律和微观结构等方面的研究还比较少,因此要从本质上构筑消除煤矿爆炸的对策还存在很大的困难。

我们以甲烷和煤尘混合体系的燃烧火焰为研究对象,利用高速摄像系统、微细热电偶和离子探针管道中传播的复合火焰进行了研究,以期了解甲烷煤尘复合火焰在管道内的传播规律及反应特性,从而为预防煤尘瓦斯爆炸提供理论支持。

1 实验系统及实验过程

1.1 实验系统

图 1 为我们开发的、用于研究火焰微观结构和火焰传播过程的实验系统。该系统由开放式长方形燃烧管、甲烷空气配气及供给系统、高压点火装置、数据采集仪、高速摄像系统、热电偶、离子探针装置和同步控制系统组成^[9-10]。开放式长方形燃烧管由本体、试样皿和蘑菇形反射器组成。该系统有别于常规的粉尘爆炸实验装置,如 20 L 和 1 m³球形密闭容器等。因为常规的粉尘爆炸实验装置更适用于测量粉尘爆炸的最大压力、最大压力上升速率以及粉尘爆炸的上下限等参数,而对研究火焰的成长规律和微观结构等却不适合。



1. 热电偶 2. 离子探针 3. 点火电极 4. 电磁阀 5. 高速摄像机

图 1 复合火焰实验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of hybrid flame experimental system

实验中采用 Photron 公司制造的 Fastcam Ultima APX 型高速摄像机,其最大分辨率为 1 024 px×1 024 px,最大拍摄速度为 120 000 fps/s。数据采集仪为 HIOKI 生产的 8826 型,其最高采样率可达 10⁶ Hz。

燃烧管本体为上下端封闭的方管,其长度为 0.5 m,断面为 80 mm×80 mm,燃烧管的左右两侧

为钢板,同时为了便于使用高速摄像机拍摄,前后两侧由钢化玻璃组成。点火电极是 $\varnothing 0.4$ mm 的钨丝,其间距为 5 mm。点火电极距离燃烧管底部 5 cm,其上部 15 cm 和 30 cm 处各安装一个热电偶和一个离子探针。

1.2 实验条件及过程

具体实验条件为电极点火电压 30 000 V;喷粉时间 0.5 s;分散煤粉压力 0.4 MPa;高速摄像机拍摄速率 2 000 fps/s;曝光时间 1/2 000 s。

实验过程:(I)在混气瓶中配比 0.4 MPa 的甲烷空气预混气体,甲烷:空气=1:9;(II)按图 1 所示将高速摄像系统及其他实验设备连接并调整好,把和电磁阀连接的混气瓶打开,再用电子天平称取一定质量的煤尘放在燃烧管底部的试样皿中;(III)打开高压点火器电源并充电到指定电压,打开数据采集仪及高速摄像机并使之处于等待状态,最后启动同步控制装置,使电磁阀、高压点火器、高速摄像仪及数据采集仪按照预定的时间序列触发。

在上述的实验条件下,我们对每次实验所喷出的甲烷空气预混气体的体积进行了实验测量,约为 1.5 L,而燃烧室的体积为 3.2 L。因此当一定浓度的甲烷空气预混气体被喷入到燃烧室中时,燃烧室中甲烷含量约为 4.7%。电磁阀的开启和关闭时间、高压点火器的点火开始和持续时间、高速摄像仪触发时间和数据采集仪的触发时间均由同步控制系统来控制。另外,为了降低喷粉过程中附加湍流对火焰传播的影响,点火在喷粉后的 0.5 s 开始。实验中所用煤尘的组分如表 1 所示,煤尘粒子的最大直径不超过 100 μm 。实验前将煤样置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中干燥 24 h 以上,以去除煤样中的水分。

表 1 煤样组分

Tab. 1 Composition of the coal dust

水分/%	灰分/%	干燥无灰基/%	碳/%
2.96	9.66	45.766	70.64
氢/%	氮/%	硫/%	热值/(MJ·kg ⁻¹)
3.38	1.12	2.84	25.88

2 结果和讨论

2.1 基于火焰自发光图片的结果分析

图 2 是用高速摄像机拍摄的甲烷煤尘复合火焰自发光的典型图片(煤尘名义浓度为 127 g/m³,箭头指向的位置为下部的热电偶和离子探针所在的位置)。甲烷煤尘混合物被高压电极放电点火后的 10

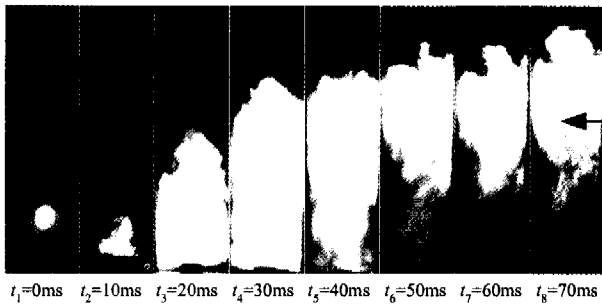


图2 甲烷煤尘复合火焰的自发光图片

Fig. 2 Self-luminescence pictures of the hybrid flame of methane and coal dust

ms内,火焰首先向管道的下部传播,当火焰传播到管道底部以后,然后反向传播。照片显示复合火焰面的前沿比较规则,但由于管道中热电偶和离子探针的陶瓷管的影响,当火焰经过热电偶和离子探针后,火焰面前沿变得不太规则。高速摄像图片表明,白色发光区的前侧为黄色发光区,紧挨着黄色发光区的是一个微亮区,然后是未燃区,未燃区为暗区。当火焰传播到第二个热电偶位置时,由于煤尘浓度的降低,同时甲烷空气预混气体浓度也不在燃烧范围内,因此没有化学反应发生。

2.2 基于离子探针和热电偶测定结果的火焰结构分析

由于火焰自发光图片不能全面揭示甲烷煤尘传播火焰的基本结构和燃烧反应特性,因此,可以利用有机物燃烧反应时产生 H^+ 、 OH^- 、 CH_3^- 等中间离子产物的特性,采用离子探针以及温度探测的方法,分析甲烷煤尘复合火焰的基本结构和燃烧反应特性。因为对碳氢类火焰而言,高离子密度的区域出现在反应区内且偏向燃烧产物的一侧,因此离子电流的脉动可以代表反应区的结构^[11]。

图3所示为离子探针的示意图,它的电极及辅助电极采用的是耐高温、抗氧化、导电性好的直径为0.1 mm的铂丝,两者间距近似为1 mm。安装时,铂

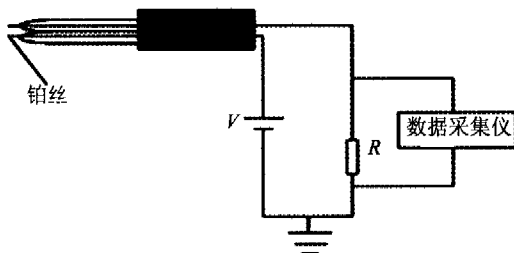


图3 离子探针的结构示意图

Fig. 3 Sketch map of the structure of the ion probe

丝要穿过内径为0.5 mm的陶瓷管并露出端部2 mm,且要保持电极与辅助电极在同一高度。信号处理部分由一个电阻、直流电压源和数据采集仪组成。

在测定燃烧反应区离子电流的同时,采用直径为25 μm 的铂金-铂铑合金热电偶测定了复合火焰传播过程中的温度分布。安装时离子探针和热电偶穿过燃烧管壁,并使热电偶的接点和离子探针的探测部位保持在同一平面上。

由图4的温度测量结果可知,下部热电偶测量的最大温度为1 280.87 $^{\circ}C$,上部热电偶测得的最大温度为735.60 $^{\circ}C$ 。图4也表明燃烧管道下部和上部有相同的温度趋势,即上升的较快,而下降则相对要缓慢得多。

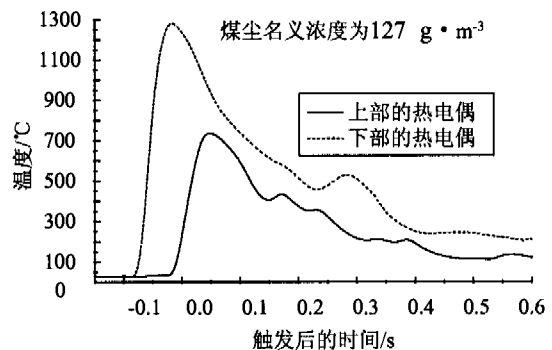


图4 测得的温度分布的典型结果

Fig. 4 Typical results of the temperature distribution

图5为在管道下部的同一位置测得的离子电流和温度曲线。图5表明管道下部探针测量的离子电流比较强,且电流呈明显的单峰,最大的离子电流为474 nA。在-49 ms时离子电流开始上升,从离子电流为零到峰值为474 nA的时间为16 ms,而从峰值到反应结束的时间约为51 ms。温度开始上升的时间是-51 ms,比离子电流开始上升的时间要早2

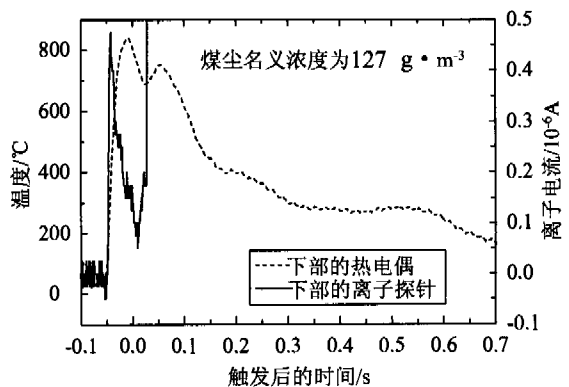


图5 在同一位置测得的离子电流和温度结果

Fig. 5 Ion current and temperature at the same position

ms. 但由于热电偶存在热惯性,实际上,温度开始上升的时间应该为 -62 ms ,即比离子电流开始上升的时间早 13 ms ^[12],这是因为此时复合火焰化学反应区的热量已经通过热传导等传热形式进入预热区内.另外,由于煤尘的存在,在燃烧反应的后期,燃烧反应产物中的导电炭灰将导致离子探针线路短路.因此,在 9 ms 之后,所测得的离子电流值将不是真实值.对不同粉尘浓度的煤粉测试结果表明,在管道顶端封闭的情况下,上部探针测量的离子电流值几乎为零,这和高速摄像拍摄得到的图片结果是一致的,因为当燃烧管道的上部封闭时,甲烷和煤尘混合物难以喷射到管道上部探针的位置,同时甲烷空气预混气体浓度也不在燃烧范围内.

在我们前期采用高速纹影装置对甲烷煤尘复合火焰进行分析时发现,复合火焰为层流.另外,分析高速摄像图片可知,在下部热电偶附近的火焰平均传播速度为 2.50 m/s .因此若以离子电流半峰宽度所对应的时间作为燃烧反应区化学反应所对应的时间^[13],同时根据火焰传播速度,可以得到复合火焰的反应区厚度为 15.6 cm ,而单一的甲烷气体预混火焰的化学反应区厚度在 1 mm 左右,可见甲烷煤尘复合火焰比单一甲烷空气预混火焰的化学反应区厚度要大两个量级^[14].

3 结论

(I) 甲烷煤尘复合火焰温度分布曲线的上升段非常陡峭,即升温速率很大,但峰值后的温度下降则相对要缓慢得多,其温度分布曲线的峰宽比单一甲烷空气预混火焰的温度分布曲线峰宽要大 110 ms .

(II) 在煤粉名义浓度为 189 g/m^3 时,甲烷煤尘复合火焰化学反应区的厚度为 15.6 cm ,比单一甲烷空气预混火焰的化学反应区厚度要大两个量级.

由于影响煤粉燃烧的因素非常复杂,如加热速率、煤粉浓度、粒径、挥发分和灰分等,因此我们仅对甲烷煤尘复合火焰的基本结构作了初步研究.要揭示不同实验样品、不同实验条件下复合火焰的精细结构还有待于做大量的实验研究和理论分析.

参考文献(References)

[1] Amyotte P R, Mintz K J, Pegg M J, et al. The ignitability of coal dust-air and methane-coal dust-air mixtures[J]. *Fuel*, 1993, 72(5): 671-659.
[2] Cashdollar K L. Coal dust explosibility[J]. *Journal of*

Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 65-76.

- [3] Luo H C. Explosion of powder dust and effect of scramble compound on its characteristics [J]. *Journal of Shanghai Scientific Research Institute of Shipping*, 2000, 23(1): 21-26.
[4] He C Y. Research on explosion hazard under co-presence of coal dust and gas [J]. *Colliery Safety*, 1996, (12): 5-7.
何朝远. 瓦斯煤尘共存条件下爆炸危险性的研究 [J]. *煤矿安全*, 1996, (12): 5-7.
[5] Amyotte P R, Mintz K J, Pegg M J, et al. Laboratory investigation of the dust explosibility characteristics of three Nova Scotia coals [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1991, 4(2): 102-109.
[6] Klemens R, Kosinski P, Wolanski P, et al. Numerical study of dust lifting in a channel with vertical obstacles [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(6): 469-473.
[7] Pilao R, Ramalho E, Pinho C. Influence of initial pressure on the explosibility of cork dust/air mixtures [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2004, 17(1): 87-96.
[8] Lu S X, Fan B C. Interaction of shock with combustible dust layer [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997, 12(1): 18-22.
[9] Sun J H, Dobashi R, Hirano T. Concentration profile of particles across a flame propagating through an iron particle cloud [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 134(4): 381-387.
[10] Sun J H, Liu Y, Wang Q S, et al. Experimental study on interference effect of rarefaction wave on laminar propagating flame [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(9): 919-922.
[11] Ju W J, Dobashi R, Hirano T. Reaction zone structure and propagation mechanisms of flames in stearic acid particle clouds [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1998, 11(6): 423-430.
[12] Sun J H, Dobashi R, Hirano T. Temperature profile across the combustion zone propagating through an iron particle cloud [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(6): 463-467.
[13] Furukawa J, Harada E, Hirano T. Local reaction zone thickness of a high intensity turbulent premixed flame [C] // *Twenty-third Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1990: 789-794.
[14] Mansour M S. Two-plane two-dimensional Rayleigh thermometry technique for turbulent combustion [J]. *Optics letters*, 1993, 18(7): 537-539.