

# 半封闭空间甲烷爆炸初期火焰传播时空分布研究

李孝斌

(中国人民武装警察部队学院 消防工程系, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**通过小尺度实验,研究了半封闭空间甲烷爆炸火焰前沿位置、传播速度随时间和空间的变化规律,以及甲烷浓度对其的影响。研究得出:在时间分布上,甲烷爆炸初期火焰前沿位置和传播速度随时间近似呈指数型增长,传播速度存在波动性;甲烷浓度越大,火焰初始传播速度越大。在空间分布上,在火焰前沿达到管道长径比4~6之前,传播速度在20 m/s以下,达到4~6处,速度开始明显增大;在管径相同的管道中,甲烷在化学当量比附近由燃烧达到爆炸的距离最短;当甲烷浓度向大小两个方向变化时,由燃烧达到爆炸的距离逐渐增大。

**关键词:**半封闭空间;甲烷爆炸;火焰传播

中图分类号:TD712.7

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)06-0020-05

## Study on Time and Spatial Distribution for Flame Propagation in Initial Stage of Methane Explosion within Semi-closed Space

LI Xiaobin

(Department of Fire Engineering, College of the Chinese People's Armed Police Forces, Langfang, Hebei 065000, China)

**Abstract:** The variation law of the front position and propagation speed of methane explosion flame within semi-closed space with the change of time and space was studied by small-scale experimentation. The study concluded that in time distribution, the front position and propagation speed of flame increased exponentially with the time at the initial stage of methane explosion, and the propagation speed presented the fluctuation property. The higher the concentration of methane, the greater the initial propagation speed of the flame is; in spatial distribution, the speed is less than 20 m/s before the flame front got to the point where length-diameter ratio of laneway was 4-6, starting the obvious increase of speed; in the laneway with same diameter, the distance of methane getting to explosion from combustion was shortest with the stoichiometric concentration of methane, and it got longer with the increase or decrease of methane concentration.

**Key words:** semi-closed space; methane explosion; flame propagation

防止矿井瓦斯爆炸事故是保证煤矿安全生产的首要工作,也是煤层气开发与利用的一项重要任务。与此同时,保证天然气的生产、储运安全,防止爆炸事故对保障我国能源安全和人民生命财产安全的意义重大。矿井瓦斯、煤层气、天然气都是以甲烷为主要成份的可燃气体(以下简称可燃气体),甲烷含量均占其总组分的90%以上。可燃气体爆炸事故是多种因素共同作用的结果,其机理涉及很多复杂理论<sup>[1-6]</sup>,爆炸发生过程的复杂性导致目前防治此类事故的技术手段具有很大局限性。对甲烷爆炸初期机理的研究是发展可燃气体早期抑爆控爆技术的基础。本研究通过小尺度实验,研究了半封闭空间甲烷爆炸火焰的前沿位置、传播速度随时间和空间变化的分布规律,以及甲烷浓度对其的影响。

收稿日期:2011-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51104164); 灭火救援技术公安部重点实验室青年基金项目(QF201105).

作者简介:李孝斌(1980—),男,河北衡水人,讲师,博士,主要从事气体燃烧与爆炸、消防工程等方面的研究。

E-mail:lixiaob119@yahoo.com.cn.

## 1 实验系统

爆炸实验系统示意图如图 1 所示,图中虚线指示范围为高速摄影机的拍摄范围。主要实验参数:爆炸管道为石英玻璃管道,内径 0.084 m,长 1.6 m;点火器型号 ZDJ-2,工作电压 AC220(1±10%) V,功耗 40 W,输出点火能量≥3 J,火花放电频率 30 Hz,输出点火电压 DC≥8 kV。高速摄影机型号为 FASTCAM Super 10K Series。

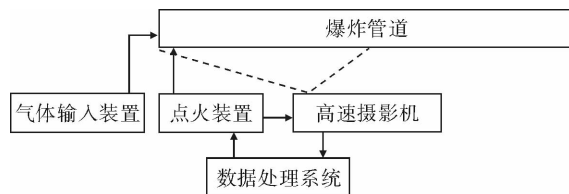


图 1 甲烷爆炸实验系统示意框图

Fig. 1 Sketch of methane explosion experiment system

## 2 基于 MATLAB 图像处理技术的实验数据分析方法

MATLAB 中 RGB 真彩图像被存储为数据矩阵:

$$F = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,n-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(m-1,0) & f(m-1,1) & \cdots & f(m-1,n-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $f(i,j)$ 为位置 $(i,j)$ 处的光亮度值。数组中的元素定义了图像中每一个像素的 R(红)、G(绿)、B(蓝)光亮度值。像素的颜色由保存在像素位置上的 R、G、B 的光亮度值的组合来确定。

$$C = r[R] + g[G] + b[B] \quad (2)$$

其中, $[R]$ 、 $[G]$ 、 $[B]$ 为红、绿、蓝光亮度值, $r, g, b$ 为各基色权值。数据变化范围为 R 色 $[0, 256]$ ,G 色 $[0, 256]$ ,B 色 $[0, 256]$ <sup>[7]</sup>。

实验中采用高速摄影法拍摄甲烷爆炸过程。高速摄影机拍摄的照片均转化为 RGB 真彩图像,成为 MATLAB 中的一个三维数组。这样可以精确捕捉照片中的光学信息并处理。通过求照片每列中最大值,得到某时刻管道中火焰光亮度横向空间分布情况;火焰光亮度横向空间分布中光亮度突变点即为火焰前沿,记录下每帧照片的火焰前沿,即可得到甲烷爆炸火焰前沿位置,进而求得火焰前沿的传播速度。

拍摄照片与实物大小之间有一个比例系数,据此可以得出甲烷爆炸实际火焰前沿传播位置和速度:

$$L_{of} = \frac{d_s n_i}{N}; \quad (3)$$

$$s_L = v_s \cdot (L_{ofi} - L_{ofi-1}). \quad (4)$$

其中: $L_{of}$ 为火焰前沿位置,m; $d_s$ 为拍摄有效管长,m; $N$ 为照片沿管长像素数, $N=512$ ; $n_i$ 为前沿位置像素值; $s_L$ 为前沿速度,m/s; $v_s$ 为拍摄速度,帧/s; $L_{ofi}, L_{ofi-1}$ 为第  $i$  和  $i-1$  计时时刻前沿位置,m。

## 3 甲烷爆炸初期火焰前沿传播的时间分布规律

实验选取 6 种不同甲烷浓度 9.0%、9.4%、9.7%、10.3%、12.1% 和 12.6%,各取 1 组典型数据按上述方法进行分析。实验拍摄有效管长 0.71 m,摄速 500 帧/s。甲烷爆炸初期火焰前沿位置和速度随时间变化分别如图 2 和图 3 所示。时间从照片中开始观察到火焰开始计时。由于开始火焰光亮度微弱,与背景光光亮度相近,分析中难以区分,因此爆炸火焰位置并不是从开始燃烧出现火焰时开始统计,而是从出现明显火焰后开始统计,通过拟合曲线,推测之前的火焰传播情况。

由图 2 可知,不同浓度甲烷爆炸初期火焰前沿位置变化趋势相同,曲线开始比较平缓,随着时间的增加逐渐变陡,达到某一时刻出现陡增,整体变化趋势近似呈指数型增长。对其进行型如  $y = Ae^{x/t}$  的指数拟合,其中,A 的物理意义为甲烷开始燃烧出现火焰的位置,拟合所得 A 值如表 1 所示。6 组实验甲烷开始燃烧出现火焰的位置范围在距爆炸管道端部 0.022~0.039 m,大致在点火器电极附近。6 组实验点火位置均不相同,说明虽然采用同一电极放电点火,但甲烷开始反应的激发位置并不相同。

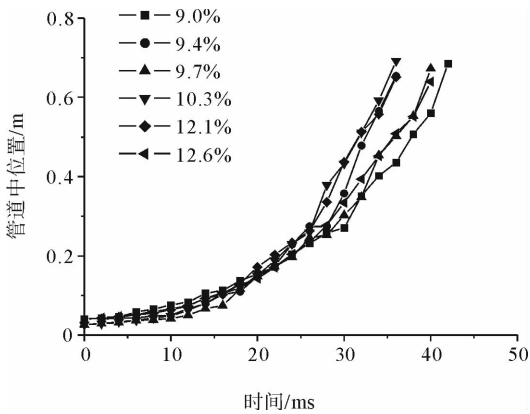


图 2 火焰前沿位置随时间变化关系图

Fig. 2 Relation of the variation of flame front position with time

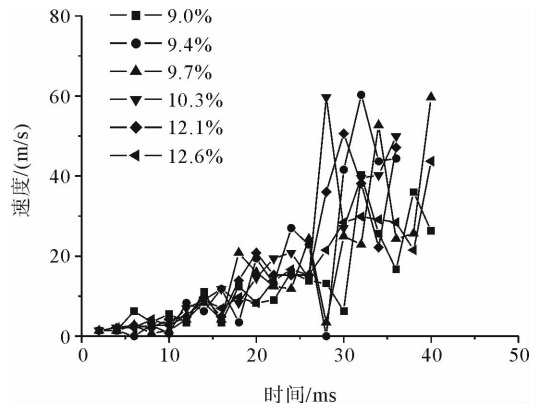


图 3 火焰前沿速度随时间变化关系图

Fig. 3 Relation of the variation of flame front speed with time

表 1 火焰前沿位置和速度随时间变化指数拟合参数表

Tab. 1 The exponential fitting parameters as variation of position and speed of flame front with time

CH <sub>4</sub> 体积浓度 / %	A / m	A 误差 / m	B / (m/s)	B 误差 / (m/s)
9.0	0.039	$1.51 \times 10^{-3}$	1.69	0.90
9.4	0.022	$1.77 \times 10^{-3}$	2.21	1.39
9.7	0.027	$2.01 \times 10^{-3}$	2.27	1.26
10.3	0.024	$1.90 \times 10^{-3}$	3.18	1.42
12.1	0.029	$2.24 \times 10^{-3}$	3.36	1.53
12.6	0.036	$1.95 \times 10^{-3}$	3.33	0.86

由图 3 可知,甲烷爆炸初期火焰前沿传播速度曲线呈上下波动式增长,说明火焰前沿传播速度存在波动性。但速度曲线整体趋势同位置曲线相似,近似呈指数型增长形式。对速度曲线进行型如  $v = Be^{x/t}$  的指数拟合,其中  $B$  的物理意义为甲烷开始燃烧出现火焰的初始速度,拟合所得  $B$  值如表 1 所示。由  $B$  值可知甲烷浓度不同,甲烷开始燃烧时火焰传播初始速度不同;甲烷浓度越大,火焰初始速度越大。但初始速度范围在 1.69~3.33 m/s,速度相对很低,如图 4 所示。

#### 4 甲烷爆炸初期火焰前沿传播的空间分布

半封闭空间甲烷爆炸初期火焰前沿传播在空间分布上也有一定规律。火焰在传播过程中,火焰前沿在管道中的位置不同其速度也不同。管径是影响火焰传播速度的重要参数。长径比是指巷道长度与内直径的比值,本文中的长径比指火焰前沿在管道中位置与管径的比值。前人研究<sup>[8]</sup>表明甲烷爆炸火焰传播速度与管道长径比具有一定关系。以上 6 组实验中甲烷爆炸火焰前沿传播速度随爆炸管道长径比变化关系如图 5 所示。在火焰前沿达到管道长径比 4~6 之前,大部分情况下传播速度在 20 m/s 以下,达到 4~6 处,速度开始有明显增大。该规律与前人研究结论基本一致<sup>[8]</sup>。

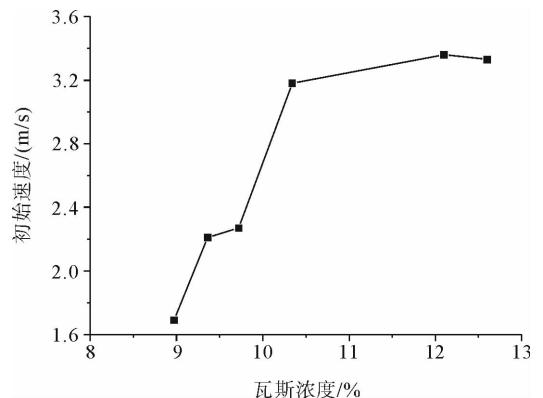


图 4 甲烷开始燃烧时火焰初始速度图

Fig. 4 Initial speed of flame with methane starting combustion

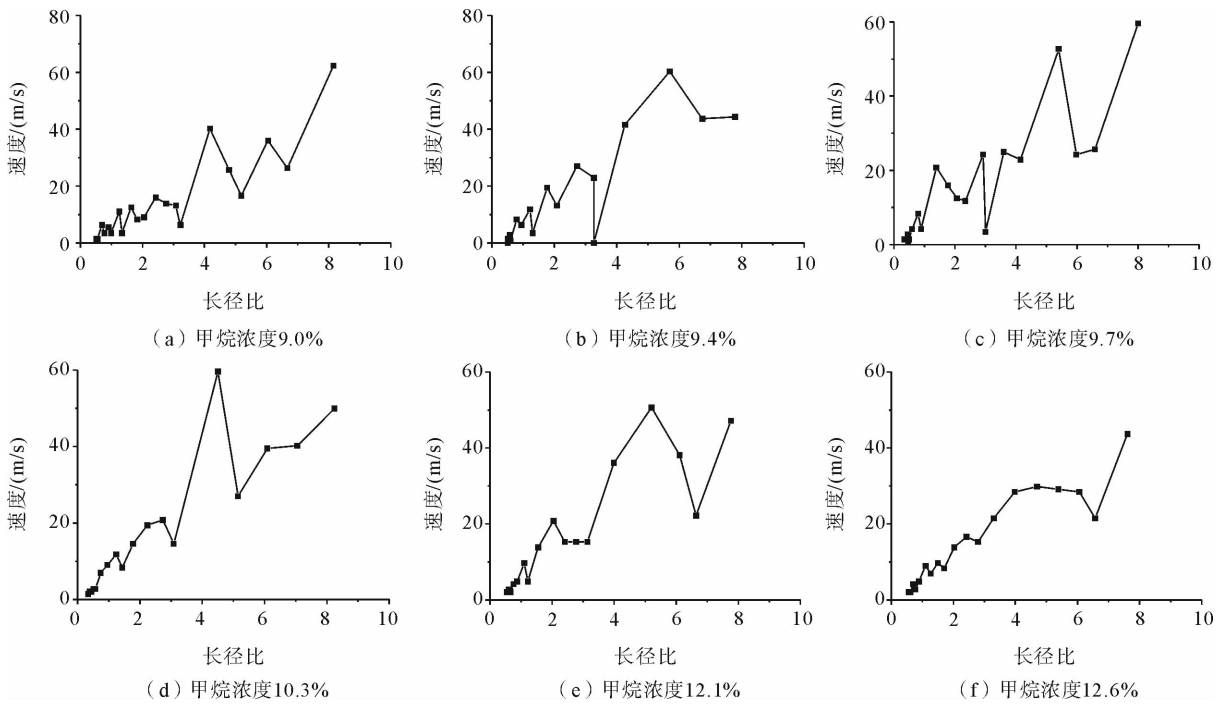


图 5 火焰前沿传播速度随爆炸管道长径比变化图

Fig. 5 Variation of speed of flame front with length-diameter ratio of laneway

不同浓度甲烷由燃烧转为爆炸时的长径比如图 6 所示。由图 4 可知,甲烷爆炸火焰初始速度随浓度的增加而单调增加,但是由图 6 得到,在甲烷化学当量比附近甲烷由燃烧转为爆炸时的长径比最小,即在管径相同的管道中传播位置距甲烷开始燃烧出现火焰的位置更近,也就是在该位置上甲烷更易发生爆炸;当甲烷浓度向大小两个方向变化时,由燃烧转为爆炸时的长径比向两个方向增大,也就是在管径相同的管道中甲烷由燃烧达到爆炸的距离逐渐增大。

## 5 结论

1) 甲烷爆炸初期火焰前沿位置随时间变化曲线开始比较平缓,随着时间的增加,曲线逐渐变陡,达到某一时刻出现陡增,整体变化趋势近似呈指数型增长;同一电极放电点火,甲烷开始反应的激发位置并不相同。

2) 甲烷爆炸初期火焰前沿传播速度整体趋势随时间近似呈指数型增长,并存在波动性;甲烷浓度越大,火焰初始速度越大。

3) 在火焰前沿达到管道长径比 4~6 之前,大部分情况传播速度在 20 m/s 以下,达到 4~6 处,速度开始有明显增大。

4) 在管径相同的管道中,甲烷在化学当量比附近由燃烧达到爆炸的距离最短;当甲烷浓度向大小两个方向变化时,由燃烧达到爆炸的距离逐渐增大。

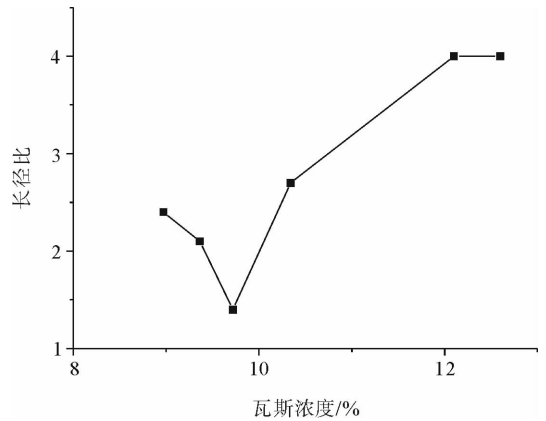


图 6 甲烷由燃烧转为爆炸时长径比图

Fig. 6 Length-diameter ratio with methane getting to explosion from combustion

参考文献:

- [1] 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): 97-100.  
JIA Zhiwei, LIU Yanwei, JING Guoxun. Propagation characteristic about shock wave of gas explosion at laneway corner [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 97-100.
- [2] WANG C, NING J G, MA T B. Numerical simulation for explosion wave propagation of combustible mixture gas[J]. Journal of Central South University of Technology: English Edition, 2008, 15(3): 361-367.
- [3] 郑有山, 王成. 变截面管道对瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(11): 947-949.  
ZHENG Youshan, WANG Cheng. Numerical simulation for the influence of variable cross-section tube on explosion characteristics of methane[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(11): 947-949.
- [4] 段玉龙, 周心权, 龚武, 等. 矿井瓦斯爆炸后巷道空气温度分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 318-323.  
DUAN Yulong, ZHOU Xinquan, GONG Wu, et al. Temperature distribution in lane-way air after mine methane explosions [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(3): 318-323.
- [5] 李润之, 司荣军, 张延松, 等. 输送管道内低浓度瓦斯爆炸传播实验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 35-39.  
LI Runzhi, SI Rongjun, ZHANG Yansong, et al. Experimental study of low concentration gas explosion dissemination in pipeline[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 28(1): 35-39.
- [6] 毕明树, 尹旺华, 丁信伟, 等. 管道内可燃气体爆燃的一维数值模拟[J]. 天然气工业, 2003, 24(4): 89-92.  
BI Mingshu, YIN Wanghua, DING Xinwei, et al. 1-D numerical simulation of combustible gas deflagration in pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2003, 24(4): 89-92.
- [7] 王晓丹, 吴崇明. 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [8] 林柏泉. 瓦斯爆炸动力学特征参数的测定及其分析[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 164-167.  
LIN Baiquan. The measurement and analysis of dynamics feature parameter in gas explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 164-167.