

文章编号: 1001-1455(2004)01-0030-07

瓦斯爆燃火焰内部流场分形特性研究^{*}

杨 艺^{1,2}, 何学秋¹, 刘建章², 王从银³

(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083;
2. 空军后勤学院, 江苏 徐州 221000;
3. 工程兵指挥学院, 江苏 徐州 221000)

摘要: 通过高速纹影图像从细观角度详细研究了瓦斯爆燃火焰内部流场的细微结构。实验表明: 火焰内部流场具有明显的分形特征, 且不同传播条件下分形维数不同。分形维数的大小对火焰内部结构与火焰传播有很大影响, 是衡量瓦斯火焰传播速度的有效参数。

关键词: 爆炸力学; 分形维数; 分形理论; 火焰; 气相爆燃; 纹影图像

中图分类号: O381 国标学科代码: 130°3510 文献标志码: A

1 引 言

随着火焰可视化方法和激光诊断技术的迅速发展, 预混湍流火焰结构的实验和理论研究有了很大的发展, 但由于预混湍流燃烧本身是一个非常复杂的物理化学过程, 涉及到化学反应动力学、传热传质学、流体力学、热力学、分子物理学等多种学科, 还有很多问题有待于进一步研究发展。以往对瓦斯爆燃火焰结构与传播的研究中, 多数是从化学反应动力学与湍流的角度进行研究和描述, 由于湍流本身就是由各种尺度不同的涡团所组成, 且处于不断耗散、衰减过程中, 在燃烧反应过程中, 湍流涡团的这种结构会相应地反映在火焰前锋面与火焰内部。对预混火焰不稳定性感兴趣的学者对火焰面扰动^[12]、DDT^[3]以及气体爆炸时火焰面形状^[46]做了一些研究, 发现火焰面扰动产生于弱压力波刺激起始时的光滑火焰面, 通过加速流场可容易地增强扰动, 通过减速流场可抑制扰动。T. Tsuruda^[7]使用高速纹影仪研究了层流火焰面蛛网状的扰动的变化情况, 在此结果上分析了受扰动火焰面四周的流场变化。

近年来, 随着分形理论的提出与发展, 人们逐渐将分形理论应用于无法用传统的欧几里德几何进行描述的复杂湍流火焰的研究。F. C. Gouldin 等^[8]首次将分形(Fractal)方法应用于湍流火焰的研究中; J. Mantzaras 等^[9]拍摄火花点火发动机内湍流火焰时分析表明火焰表面为分形表面, 并计算了分形维数; 目前, 这种方法已广泛应用于许多研究领域, 取得了一些令人满意的成果, 在国际上引起了广泛关注^[1012]。在以上对火焰的分形研究中, 研究对象一般为定容燃烧弹和燃烧室内的湍流火焰, 尤以射流火焰为主, 对于长直管道中预混湍流火焰的分形特性鲜见研究, 并且预混湍流火焰细微结构的分形特性目前国内外还未见报道。

本文中数字图像技术、燃烧理论及分形理论相结合, 从分形理论这一新的研究角度研究瓦斯爆燃火焰的细微结构, 并在此基础上揭示瓦斯爆燃火焰内部结构与火焰传播机理的内在联系。

2 实验系统

图 1 为瓦斯爆燃实验系统示意图。实验管道为 80mm×80mm 的方管, 总长 21m。整个管道用厚 12mm 的 16Mn 钢板焊制, 耐压 20MPa 以上。实验用瓦斯气体采自淮北矿务局芦岭煤矿。气体成分(体

* 收稿日期: 2003-04-14; 修回日期: 2003-08-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50134040); 国家自然科学基金项目(59874028); 国家杰出青年基金项目(59925411)

作者简介: 杨 艺(1973—), 女, 博士, 讲师。

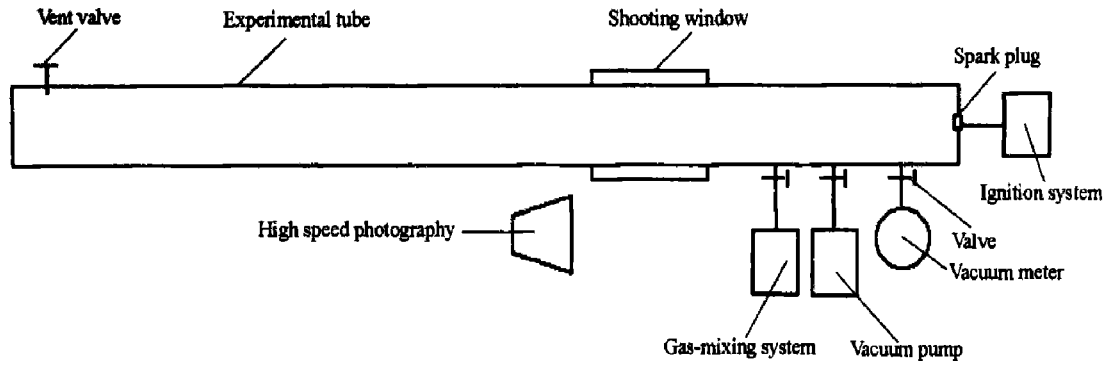


图 1 瓦斯爆燃实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system of gas explosion

积分数)为, CH_4 : 50.4%; N_2 : 49.2%; CO_2 : 0.3%; 其他: 0.1%。实验环境温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$; 环境相对湿度为 28%。

在拍摄前,如图 2 安装好光学视场并调试纹影系统,将成像焦距调整于刀口处,并将数字式高速摄影机架设于纹影系统第二个小反射镜反射后的光轴线上并调整焦距。所使用高速摄影系统的拍摄速度范围为 100、250、500、1000 及 2000 幅/s,摄像时间范围为 3.266.2s,为了详细记录瓦斯爆燃火焰传播情况,本实验中选择拍摄速度为 2000 幅/s,摄像记录时间为 3.2s。在拍摄时先布置暗室,在完全黑暗状态下进行拍摄。

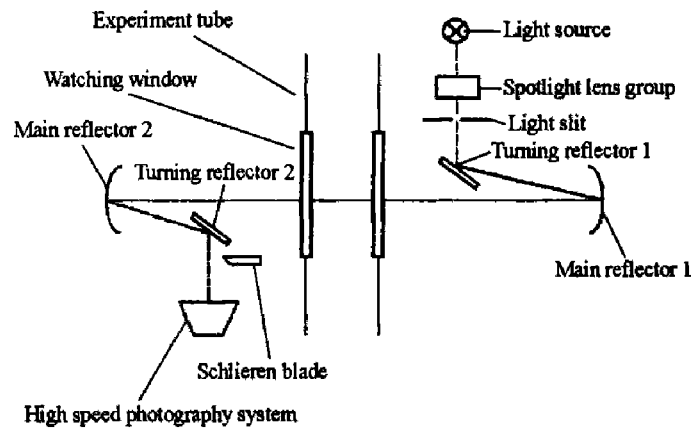


图 2 纹影系统光路布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of schlieren photography

3 实验结果与分析

由于温度、浓度、压力对火焰结构的影响直观上都反映为密度变化,而纹影又是利用流场对光折射的原理产生图像,因此纹影图像中的灰度与密度梯度场间有直接的映射关系,通过图像可清晰再现瓦斯爆燃火焰内部流场的结构与变化。

3.1 火焰内部流场纹影图像

图 3 为瓦斯爆燃火焰的纹影图像,火焰从左至右传播经过拍摄视窗,视窗尺寸为 $19\text{mm} \times 7\text{mm}$,拍摄点距点火端 2m。图中第 16 幅为火焰刚传播至视窗时火焰前锋纹影图像,火焰前锋面与火焰内部结构清晰,火焰前锋右侧为未燃气体。从火焰前锋面处开始,火焰内部流场密度梯度线逐渐密集,明亮度也逐渐增大,至第 10 幅时火焰内部流场的密度梯度线最密集,明亮对比度也最大。随后密度梯度线与明亮度逐渐减小,至第 35 幅时基本消失。

3.2 火焰内部流场分形维数的计算

根据湍流理论,对处于湍流状态的瓦斯爆燃火焰来说,不论火焰内部还是火焰外部都是由大小尺度不同的涡团组成的,涡团的弥散分布、扭曲、皱褶并非只发生在火焰的外侧锋面处,而且在火焰内部由于预混气体的卷入、扩散,火焰内部各燃烧中心的反应程度,以及化学反应物质的移动、传热与传质,火焰内部的流场也根据密度梯度的变化而不断地进行变化,呈现不规则的皱折、卷曲形状,已不能用传统的欧几里德几何加以描述。作者在实验中发现瓦斯爆燃火焰具有典型的分形特性,应用分形的方法能够很好地描述瓦斯爆燃火焰内部细微结构的变化,并揭示其与火焰传播的相互影响与关系。

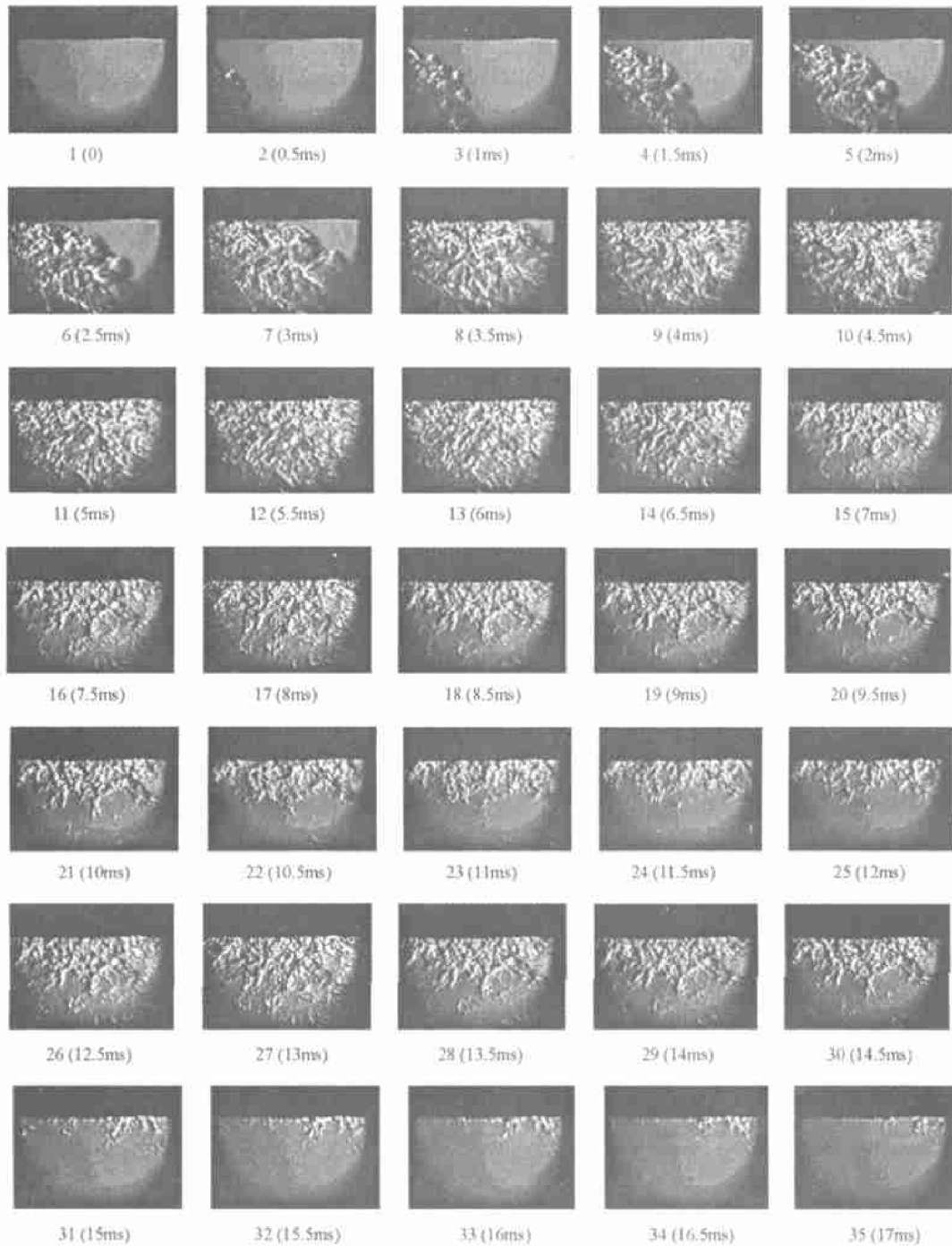


图3 9.5%浓度瓦斯气体爆燃火焰纹影图

Fig. 3 High speed schlieren photographs of 9.5% methane+air deflagration

1986年 Mandelbrot 利用分形的自相似特点对分形进行了定义:局部与整体以某种方式相似的集合称为分形。分形概念的实质是指被那些传统的物理学和几何学排除在外的不规则形体在标(尺)度变换下的自相似性。自相似性指分形对象的空间尺度 r (或时间尺度 t) 放大或缩小 λ 倍后,其结构特征不变,只是原来的放大或缩小,反应出标度不变性,即

$$N(\lambda r) = 1/(\lambda r)^D = \lambda^{-D} N(r)$$

式中: D 是分形维数。分形的一个重要的特征是通过一个特征数,也就是分形维数去测定其不平整程度、复杂度或卷积度,它是定量刻划分形特征参数。分形维数的微小变化可以引起形状的急剧改变。分形维数有多种,对于一个分形集合,计算其 Hausdroff 维数一般是相当困难的。而实际应用中由于盒维数易于进行程序化计算而得到了理论与应用工程领域的广泛应用。在本文中采用的是盒维数。

设 F 是度量空间 R^n 上任意非空的有界子集, $N_r(F)$ 是最大为 r 、可以覆盖 F 的集的最少个数,则 F 的下、上计盒维数分别定义为^[13]

$$\dim F = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r(F)}{-\lg r} \tag{1}$$

$$\overline{\dim F} = \overline{\lim}_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r(F)}{-\lg r} \tag{2}$$

如果这两个值相等,则此值为 F 的盒维数,记为

$$\dim_B F = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r(F)}{-\lg r} \tag{3}$$

从上述定义可知,对于一系列尺码 r ,只要确定出相应的盒数 $N_r(F)$,就可以通过(1)(3)式计算出集合 F 的盒维数。

对瓦斯爆燃火焰进行分形分析的关键就是确定其分形维数,以定量描述火焰细微结构的特点。本文中首先将彩色纹影图像转换为灰度图像,再将灰度图像转换为黑白二值图像(采用 50% 阈值),并在图像中选取相同位置、相同大小的方形区域进行分形分析,编制程序计算其盒维数。利用 MatLab 位图处理方法^[14] 计算盒维数,程序流程为:程序读取二色位图后,存储在一个矩阵中。由于计算机存储二色位图时是用一位(bit)表示颜色信息,因此,矩阵中的每一个元素也表示一个象素的信息。按照划分要求的象素大小,计算出图像能划分成多少个格(如果最底和最右边的格不为正方形,也算一格);再逐一从图像矩阵中取出与划分要求象素相同的方阵(最底和最右边的格可能不为方阵,根据其实际大小来取),如该方阵的模不为 0(意即该矩阵存在不为零的元素),表明轮廓线经过该方格,从而统计出轮廓线经过的方格数。计算中尺度 r 最小为 1 象素,逐渐增至最大 728 象素,程序统计出所有尺度下的 r 和 N 后,将不同尺度下的 $\ln r$ 与 $\ln N$ 值,绘制于双对数坐标图上,用最小二乘法进行拟合后求出直线段部分的斜率即为分形维数。

为便于对比,本文中计算了不同传播条件下火焰纹影图像中提取同一组图像中火焰基本充满视窗时的单帧图像(图 3 中第 6 幅)与火焰内部流场梯度线最清晰密集的单帧图像(如图 3 中第 10 幅)的分形维数,见表 1,表中“前”表示火焰前锋传播至拍摄视窗右边界时视窗处纹影图像,如图 3 中的第 6 幅;“中”表示火焰内部流场密度梯度线最密集,明亮对比度最大处纹影图像,如图 3 中的第 10 幅。11.5% 与 7.5% 浓度瓦斯气体爆燃火焰图像没有在本文中列出。高速摄影软件根据纹影图像计算出的火焰传播平均速度见表 2。同时,对管道末端封闭时体积分数为 9.5% 的瓦斯气体爆燃火焰内部流场在不同时刻(图 3 中第 434 幅)分形维数的变化进行了计算,其变化趋势见图 4。

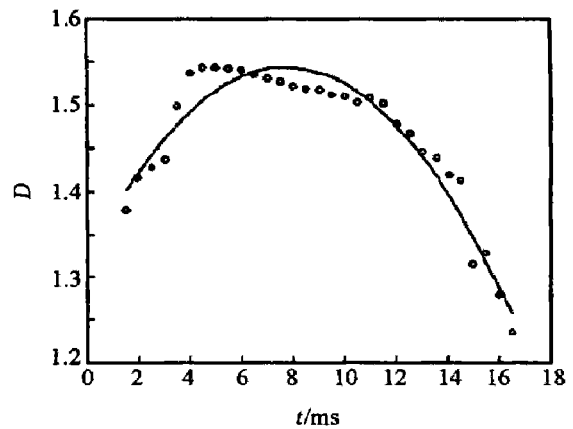


图 4 瓦斯爆燃过程中火焰内部流场分形维数变化趋势
Fig. 4 The trend of fractal dimensions of flame inner flow field in gas explosion

表 1 不同传播条件下瓦斯爆燃火焰内部流场分形维数

计算位置	管道末端封闭			管道末端开口		
	9.5%	11.5%	7.5%	9.5%	11.5%	7.5%
前	1.42	1.40	1.33	1.38	1.37	1.32
中	1.54	1.50	1.39	1.48	1.46	1.37

表2 高速摄影软件根据纹影图像计算出的火焰传播平均速度

Table 2 Flame velocities calculated by schlieren photographs						m/s
管道末端封闭			管道末端开口			
9.5%	11.5%	7.5%	9.5%	11.5%	7.5%	
26.67	24.44	6.00	22.94	19.11	4.00	

3.3 分形维数与火焰结构的关系

3.3.1 同一次爆燃过程中火焰内部流场分形维数变化趋势

从图4中可看出,火焰内部流场的分形维数随时间变化基本呈正态分布,即火焰内部紧邻火焰前锋处流场分形维数较小,流场密度梯度线较为稀疏,见图3中第17幅。随着火焰的继续传播发展,火焰内部流场密度梯度逐渐密集,其分形维数逐渐增大,这时火焰内部各反应物质湍流速度增加,化学反应趋于激烈,图3中第10幅的分形维数最大,为1.5437。随着燃烧化学反应的继续进行,纹影图像中火焰内部流场的密度梯度场逐渐稀疏乃至消失,分形维数也相应减小,火焰内部流场中各反应物质湍流速度减弱,生成物浓度的增加,燃烧化学反应也由强变弱。

在同次实验中,拍摄点处所测温度变化曲线见图5。在图5中瓦斯爆燃火焰温度由A点经过21ms自室温(15℃)基本直线上升至B点(828℃),再逐渐上升至最高温度C点(879℃),随后温度缓慢下降。与纹影图像对比可知,纹影图像中从火焰前锋出现开始至火焰内部流场中密度梯度线基本消失的时间为20ms左右,与温度从A点直线上升至B点的时间基本相当。因此,可以推断,瓦斯爆燃火焰中化学主反应区应为纹影图像中从火焰前锋开始至密度梯度线稀疏处,在这一区域内强烈的化学反应释放出大量的热,使这一区域明亮度整体增大,同时各反应物质热运动能较大,不同反应程度的反应基团之间的热运动与不同的热释放率使纹影图像中呈现密集的明亮相间的密度梯度线。火焰内部流场亮度大时,由于光强的增加会引起纹影图像亮度的增大,纹影图像中明亮处的亮度以及对比度的大小也直接反映了火焰内部温度的大小。

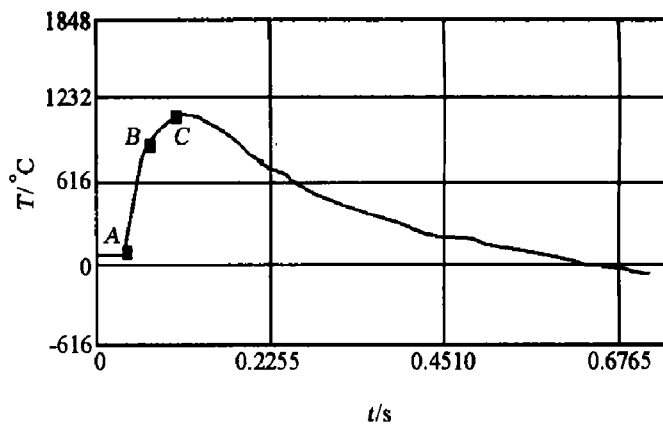


图5 瓦斯爆燃过程中温度变化趋势

Fig. 5 The trend of temperature in methane + air deflagration

3.3.2 不同传播条件下火焰内部流场分形维数变化趋势

(1) 管道封闭状态对火焰内部流场分形维数的影响

管道末端封闭时火焰内部流场分形维数比管道末端开口时大。对比表1中管道末端封闭与管道末端开口时瓦斯爆燃火焰内部流场分形维数值可看出,无论是在火焰前锋处还是内部流场密度梯度线最密集处,管道末端封闭时火焰内部流场的分形维数都大于相同浓度时管道末端开口时的值。这是由于管道末端封闭时稀疏波与膨胀波对火焰形成扰动,同时与管道末端开口相比,又增加了由于管道末端堵板反射回来的反射波对火焰的扰动,一方面火焰前锋褶皱与卷曲度的增大促进了与未燃气体的混合,使得燃烧化学反应增强,从而火焰内部流场明亮度增加,且密度梯度线更加密集;另一方面透射波也加大了火焰内部流场的湍流强度,再次促进了化学反应的进行。

(2) 瓦斯浓度对火焰内部流场分形维数的影响

瓦斯气体的浓度对火焰内部流场分形维数影响较大,9.5%浓度(最佳当量比)时分形维数最大,11.5%浓度(富燃)次之,7.5%浓度(贫燃)时分形维数最小。

9.5%浓度时火焰纹影图像中火焰前锋处较为紧密,轮廓非常明显,火焰内部结构也较其它浓度时更为紧密,内部流场的密集梯度线密集,火焰整体亮度高且明亮对比度大,说明此状态下火焰内部化学反应充分激烈,放热量大温度高;11.5%浓度时火焰内部流场的紧密度与明亮度稍弱,而7.5%时火焰

内部流场整体较暗,密度梯度线稀疏,火焰结构更为松散。由表1计算结果得,火焰前锋处内部流场分形维数大小趋势为 $D_{9.5\%bf} > D_{11.5\%bf} > D_{7.5\%bf}$, 化学反应最激烈处火焰内部流场的分形维数为 $D_{9.5\%bm} > D_{11.5\%bm} > D_{7.5\%bm}$ 。

3.4 分形维数与火焰传播速度的关系

由于火焰内部分形维数的大小直接反应了火焰内部反应物质湍流强度的大小与燃烧化学反应的激烈程度,它是火焰内部细微结构的直观反应,同时也间接地影响着火焰传播速度。从计算结果分析,管道末端封闭时火焰内部流场的分形维数比开口时大;从火焰图像分析,管道末端封闭时的火焰内部流场密度梯度线密集度与明亮度都比相同浓度时管道末端开口时大;再从火焰传播速度来分析,封闭时的速度一般大于开口时传播速度,见表2。另外,对于不同浓度瓦斯气体火焰传播速度大小趋势为 $v_{9.5\%} > v_{11.5\%} > v_{7.5\%}$ 。可见,分形维数的大小变化与火焰传播速度大小趋势相同。即当火焰内部流场分形维数最大时火焰传播速度也最大。简单直观地从纹影图像的明亮度与密度梯度线的密集程度上分析,也可粗略地判断瓦斯爆燃火焰传播速度的大小。

4 结 论

(1)经实验与理论分析证实,瓦斯爆燃火焰具有典型的分形特征。在本文实验条件下瓦斯爆燃火焰内部流场的最大分形维数为 $D = 1.54$;同一爆燃过程中,火焰内部流场分形维数基本随时间变化呈正态分布。

(2)不同浓度及不同管道开口状态下瓦斯气体爆燃火焰内部流场分形维数不同,火焰纹影图像差别较大。在封闭状态下,9.5%浓度时火焰内部流场分形维数最大,纹影图像中火焰内部结构也较其它浓度时更为紧密;11.5%与7.5%浓度时,分形维数小,火焰结构较为松散,内部流场梯度线较为稀疏,明亮度差。管道末端开口时,三种不同浓度瓦斯气体火焰内部流场分形维数较管道末端封闭时小,火焰结构更为松散。

(3)火焰内部流场分形维数的大小对应着火焰传播速度的大小。分形维数较大时,火焰内部化学反应激烈,反应物质湍动能的增加使得密度梯度线密集,同时热释放率高,表现为流场整体明亮度高,爆燃产生的温度较高,火焰传播速度快。

参考文献:

- [1] Bolk J W, Siccama N B, Westertep K R. Flammability limits in flowing ethene-air-nitrogen mixtures: An experimental study[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(10): 2231—2239.
- [2] Bolk J W, Westertep K R. Influence of hydrodynamics on the upper explosion limit of ethene-air-nitrogen mixtures[J]. AIChE Journal, 1999, 45(1): 124—144.
- [3] 袁生学, 黄志澄. 管内爆燃转爆轰的热力学原理[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(4): 403—409.
YUAN Sheng-xue, HUANG Zhi-cheng. The thermodynamics principle of DDT in tube[J]. Combustion Science and Technology, 1998, 4(4): 403—409.
- [4] ZHONG Long, Ueda, Takahiro, et al. Effect of chamber geometry on flame behavior in a DI diesel engine[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 1996, 62(600): 3213—3219.
- [5] Starke R, Roth P. An experimental investigation of flame behavior during explosions in cylindrical enclosures with obstacles[J]. Combustion and Flame, 1989, 66(3): 249—259.
- [6] Akiar Y, Yoshihiko A, Tadashi Y, et al. Fractal behavior of wrinkled laminar flame[J]. Combustion Science and Technology, 1994, 96(3): 121—134.
- [7] Tsuruda T. Local flame front disturbance development under acceleration[J]. Combustion and Flame, 1991, 84(1): 66—72.
- [8] Gouldin F C. An application of fractals to modeling premixed turbulent flames[J]. Combustion and Flame, 1989, 77(3): 241—259.
- [9] Mantzaras J, Felton P G, Bracco F V. Fractals and turbulent premixed engine flames[J]. Combustion and Flame, 1989, 77(3): 295—310.
- [10] North G L, Santavicca D A. The fractal nature of premixed turbulent flames[J]. Combustion Science and Technology,

1990, 72: 215—232.

- [11] Gulder O L, Smallwood G L, Wong R. Flame front surface characteristics in turbulent premixed propane/air combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 120(4): 407—416.
- [12] Denet B. Fractal dimension of turbulent premixed flames for different turbulence spectra[J]. *Combustion Science and Technology*, 2000, 159(4): 305—314.
- [13] 法尔科纳(英). 分形集几何学[M]. 张永平, 徐汉涛, 译. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [14] 孙兆林. MATLAB 6. x 图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

Fractal characteristics of flame inner flow field in methane/air explosion

YANG Yi^{1,2,*}, HE Xue-qiu¹, LIU Jian-zhang², WANG Cong-yin³

(1. *School of Mechanics and Civil Engineering,*

China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Air Force Logistic College, Xuzhou 221000, Jiangsu, China;

3. Command Institute of Engineering Corps, Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: In this paper the microstructure of flame in methane/air explosion has been studied in detail by using high speed schlieren photographs. The experiments shows that flame inner flow field has distinctly fractal characteristics, and the fractal dimensions are different under different experimental conditions. The fractal dimensions of flame inner flow fields have remarkable effects on flame inner microstructure and flame acceleration and also are effective parameters that can reflect flame velocity.

Key words: mechanics of explosion; fractal dimension; fractal theory; flame; gas deflagration; schlieren photograph

* Corresponding author; YANG Yi; E-mail address: jzliu7209@sina.com; Telephone: 0516-3894421