

聂百胜 杨龙龙 孟筠青 等. 基于图像处理的管道瓦斯爆炸火焰传播速度特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 884-891. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1106

Nie Baisheng, Yang Longlong, Meng Junqing et al. Characteristics of flame propagation velocity of gas explosion in duct based on image processing[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 884-891. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1106

## 基于图像处理的管道瓦斯爆炸火焰传播速度特征

聂百胜<sup>1,2</sup> 杨龙龙<sup>1,2</sup> 孟筠青<sup>1,2</sup> 何学秋<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为研究瓦斯/空气预混气体爆炸火焰传播速度特征, 利用瓦斯爆炸实验系统开展了9.5%体积分数下的瓦斯爆炸实验, 通过高速摄影系统拍摄了爆炸火焰传播图像; 分析提出了利用图像相关系数法计算瓦斯爆炸火焰传播速度的基本原理和方法, 计算分析了9.5%体积分数瓦斯爆炸全过程中的火焰传播速度动态变化规律。结果表明: 爆炸火焰处于加速、减速、反向传播, 再加速、减速直至熄灭的过程, 火焰不断震荡。进一步地对爆炸火焰进行了细化分析, 通过对预处理图像进行横向和纵向的等分, 计算视窗中不同部分的火焰传播速度, 并与按整体计算的速度进行对比验证。利用该方法可以计算瓦斯爆炸火焰充满整个管道时的传播速度, 为研究瓦斯或者其他气体爆炸火焰传播规律提供了一种新途径。

**关键词:** 瓦斯爆炸; 图像处理; 相关系数; 火焰传播速度

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)04-0884-08

### Characteristics of flame propagation velocity of gas explosion in duct based on image processing

NIE Bai-sheng<sup>1,2</sup>, YANG Long-long<sup>1,2</sup>, MENG Jun-qing<sup>1,2</sup>, HE Xue-qiu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Lab of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Resource & Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** A gas explosion at 9.5% concentration was performed in an experimental system and the images of propagating flame were shot by a high-speed photography system in order to investigate the flame velocity of premixed gas/air mixture explosion. A new computational method of methane explosion flame propagation velocity was proposed based on the correlation coefficient between two adjacent flame images. Variation of gas explosion flame velocity of the whole process was obtained and the characteristics of dynamic changes were analyzed. The results indicate that the explosion flame undergoes a process of acceleration, deceleration, reverse acceleration, and reverse deceleration until it is quenched. Further research was performed by analyzing the details of explosion flame images and the flame propagation velocity of different regions in observation window. Comparison of two kinds of results proves that this method is accurate and reliable. The process of calculating the propagation velocity of gas explosion can be applied to the condition that flame is full of pipe.

**Key words:** gas explosion; image processing; correlation coefficient; flame velocity

瓦斯爆炸事故是煤矿最严重的灾害之一, 研究有效地防治瓦斯爆炸事故的方法对煤矿安全生产意义

重大<sup>[1]</sup>。对于小型管道中的瓦斯爆炸传播特性, 不同瓦斯体积分数、管道粗糙度、开口阻塞比、点火能

量、变直径管径等对爆炸传播特征的影响方面都进行了广泛研究<sup>[2-7]</sup>。

目前研究瓦斯爆炸火焰的动态变化常采用火焰速度测量系统和粒子图像测速法(PIV法)测量火焰传播速度和用高速摄影技术拍摄瓦斯火焰的传播特征。火焰速度测量系统采用的方法有光电转换方法、离子电流法,它所测量的是相临两个探头之间的火焰前锋传播的平均速度<sup>[3-8]</sup>。此外还可以通过瓦斯爆炸其他参量建立与火焰传播速度的定量耦合关系<sup>[9]</sup>。以上火焰速度测量系统都无法直接测出视窗处火焰传播速度,因此研究一种非接触式测量方法计算视窗处实时火焰传播速度对研究瓦斯爆炸火焰传播规律有重要意义。PIV方法粒子图像测速(PIV)为一种基于流场图像互相关分析的二维流场非接触式测试技术,由于其能够完整描述二维流场速度矢量分布,且具有较高的测量精度,因而在流体速度测量中应用比较广泛。然而,还有许多已经拍摄的瓦斯爆炸火焰传播高速摄影图像没有应用PIV法测量,只能定性的观察到火焰传播过程中速度的大小,尚未有定量方法对此类研究成果进行火焰传播全过程进行速度计算。

利用高速摄影技术可以直观观测火焰的传播规律,但是很难对火焰的传播规律进行量化。目前一些研究人员开始采用图像处理的方法分析瓦斯爆炸火焰传播规律<sup>[10-11]</sup>。汪泉、余明高、Park等用图像处理技术计算了火焰前锋的传播速度<sup>[12-14]</sup>。由以上研究可知目前测量和计算的主要是火焰前锋的传播速度,对于前锋经过视窗后火焰传播速度的计算和测量还鲜有报道。本文将采用图像相关系数法计算和分析瓦斯爆炸过程中火焰速度的动态变化特征。

### 1 瓦斯爆炸火焰高速摄影实验结果

#### 1.1 实验系统

瓦斯爆炸实验系统由爆炸管道、配气系统、点火系统、数据采集与分析系统、爆炸压力测量系统、高速摄影系统等6个部分组成<sup>[15]</sup>。实验管道内断面80 mm×80 mm,总长为20 m,管壁厚10 mm,耐压15 MPa,实验系统如图1所示。管道内设置观测视窗,视窗尺寸为190 mm×70 mm,通过视窗高速摄像机可以连续拍摄火焰传播的整个过程。实验采用日本NAC公司生产的MEMRECAMci-3高速动态分析系统拍摄瓦斯爆炸火焰传播图像,视窗位置距离点火端2 m,采集速率2 000 帧/s,分辨率为252×186。实验采用的高能点火装置单次储能70 J,火花频率6~12次/s,点火装置在管道端面中间位置。实验所用甲烷

–空气混合气体由配气系统预先配置,静置24 h后充入实验管道,点火装置启动同时触发数据采集系统和高速摄像机进行数据和图像采集。

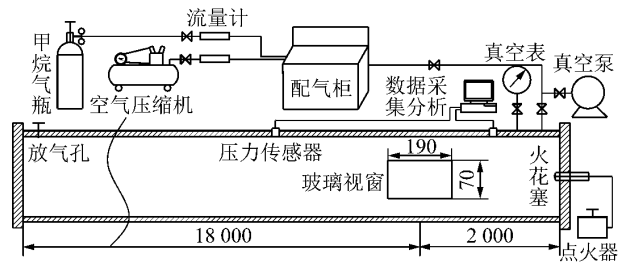


图1 瓦斯爆炸实验系统

Fig. 1 Experimental system of gas explosion

#### 1.2 瓦斯爆炸火焰传播的高速摄影结果

每次实验前进行抽真空操作,实验初始压力为100 kPa,初始温度为298 K。图2为全管充满9.5%的甲烷–空气预混气体爆炸时的高速摄影拍摄照片,拍摄速度为2 000 帧/s,照片分辨率为252×186。图2仅列出20帧典型图像。

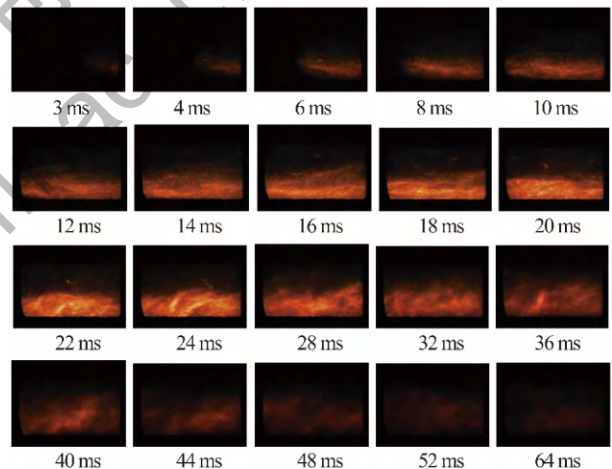


图2 全管充瓦斯爆炸火焰传播图像(9.5% CH<sub>4</sub>)

Fig. 2 Explosion flame propagation images of full methane-air in the pipe (9.5% CH<sub>4</sub>)

根据所拍摄的高速摄影图像,可以看出在爆炸过程中存在着火焰传播速度的不稳定和火焰结构的不稳定性两种特征。由于管道后部有阀门封闭,火焰受到冲击波的加速、减速和反射等作用,其传播也经历着加速、减速,反向后再加速、减速不断地交替变化的不稳定传播过程,在火焰传播过程中方向出现多次改变。同时火焰结构也出现了不稳定性特征,火焰最初在视窗时呈圆锥形,前锋开始比较圆滑,这是由于管壁摩擦作用和气体的黏性共同作用使得火焰两侧传播速度明显小于中部的。可以注意到火焰前锋中下部较亮,上部较暗,这是因为爆炸反应区内的中间产物沿管道横断面分布不均匀,底部发光体的密度比

中、上部基本不发光中间产物的密度大<sup>[16]</sup>。明亮区是等离子体<sup>[17]</sup>，底部的明亮区是离子与具有永久电偶极矩或诱导产生的电偶极矩分子相互作用而形成内聚力较大的凝聚体。通过 Zhang P 等进行的汽油蒸汽空气混合气体实验，也能观察到亮度较高的凝聚体<sup>[18]</sup>。因此如何定量求取火焰传播速度，并且消除火焰强度较弱的影响，从而发现火焰的细观动态变化是目前需要解决的难题。下面将利用图像处理技术研究火焰在整个传播过程速度的动态变化，以定量揭示火焰传播规律。

## 2 图像相关系数法计算瓦斯爆炸火焰传播速度的基本原理

### 2.1 瓦斯爆炸火焰传播图像预处理

由于视窗玻璃边缘有橡胶垫片，为了减小误差，需要对图像的四周受到影响的边缘部分进行裁减，以便进行后续的处理。将拍摄的影像一帧帧的截取，相邻两帧的时间间隔是 0.5 ms，图 3 就是对原始图像进行处理的结果。

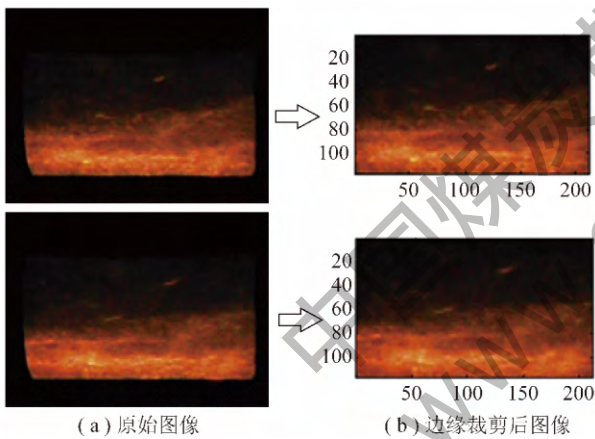


图 3 相邻两张瓦斯爆炸火焰图像预处理前后对比  
Fig. 3 Original and disturbance-filtered images of two adjacent explosion flame images

### 2.2 图像相关系数法计算瓦斯爆炸火焰传播速度的数学模型

#### 2.2.1 图像采样定理

采样定理是指当采样频率大于等于信号中最高频率的 2 倍时，采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息，又称为奈奎斯特定理<sup>[19]</sup>，可用式 (1) 表示：

$$f_{Nyquist} \geq 2f_{max} \quad (1)$$

式中  $f_{Nyquist}$  为采样频率； $f_{max}$  为信号频率。

则有：

$$\Delta T_{Nyquist} \leq \frac{1}{2f_{max}} \quad (2)$$

式中  $\Delta T_{Nyquist}$  为采样时间间隔。

假设火焰传播速度为 80 m/s，火焰完全穿过视窗的时间约为 2.5 ms，而高速摄影机采样周期为 0.5 ms，满足采样定理，得到的数据才更加可靠。

#### 2.2.2 模型假设

由于采样频率很高，相邻两张图像中的像素点亮度和火焰形状变化很小，可以假设瓦斯爆炸火焰传播过程中相同火焰位置在相邻两张图像中的亮度和形状保持不变，即火焰维持固定亮度和形状在视窗处传播，则通过从左右相反方向裁剪相邻两张火焰传播图像并计算其相关系数，相关系数最大时的图像裁剪长度即为火焰在图像中的传播距离。

此外，在图像拍摄速度足够快的前提下，第 1 幅图像还没有完全运动超过视窗就拍摄到了第 2 幅图，则可以通过图像处理技术裁剪相邻两张火焰图像，找出相关系数最大的部分图像，一次计算出火焰在相邻两张图像间的传播距离。

#### 2.2.3 火焰传播速度计算原理

数字图像其实质是一个整数阵列，数字图像中每一个像素就是矩阵中的相应元素：

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \dots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f(N-1, 0) & f(N-1, 1) & \dots & f(N-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设作为对象的图像大小 ( $N_x \times N_y$ ) 和灰度值域是有限的，那么图像  $f(x, y)$  和  $g(x, y)$  的相关系数 (correlation coefficient) 定义为

$$r = \frac{\sigma_{fg}}{\sigma_f \sigma_g} \quad (4)$$

式中  $r$  为两幅图像的相关系数； $\sigma_{fg}$  两个矩阵的协方差； $\sigma_f$ 、 $\sigma_g$  分别为矩阵的均方差。

$$\begin{cases} \sigma_{fg} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} f(x, y) g(x, y) - \mu_f \mu_g \\ \sigma_f = \left[ \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} \{f(x, y)\}^2 - \mu_f^2 \right]^{1/2} \\ \sigma_g = \left[ \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} \{g(x, y)\}^2 - \mu_g^2 \right]^{1/2} \\ \mu_f = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} f(x, y) \\ \mu_g = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} g(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

图 4 为火焰反向传播时截取的相邻两帧火焰传播图像，将第 1 幅图像右侧和第 2 幅图像左侧沿着单



位长度(在图像中取单位像素,下同)进行裁减,记裁剪的单位像素列数为  $1, 2, \dots, N_i, \dots, [N_x/2]$ , 同时将沿着单位像素进行裁减,每裁减单位像素就求取两幅图的相似系数  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_{N_x/2}$ 。若裁剪的单位像素列数为  $N_\alpha$  时得到的两幅图像相关系数最大, 即

$$\sigma_{N_\alpha} = \max[\sigma_i] \quad i = 0, 1, \dots, [N_x/2] \quad (6)$$

其中  $N_\alpha$  为火焰在图像中运动的像素距离。由于图像中火焰有可能向左也有可能向右传播, 因此  $N_\alpha$  其可能为正也可能为负,  $N_\alpha$  对应的实际距离就是  $\Delta L$ 。由于在管道右端点火, 规定火焰向左传播距离为正, 向右传播为负。

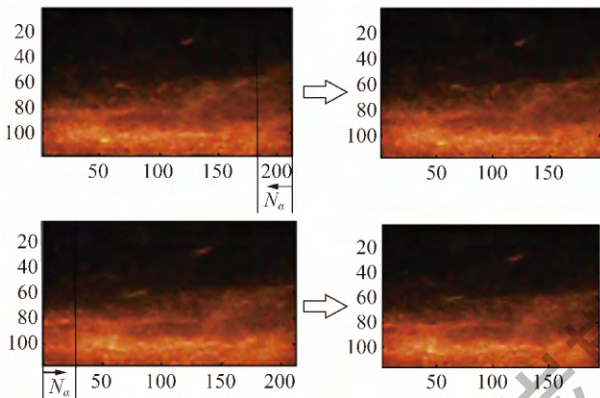


图 4 相邻两帧火焰传播图像的裁剪

Fig. 4 Schematic of two adjacent flame propagation images

由于事先无法确定火焰传播方向, 因此正反方向上图像裁剪过程中的相关系数都需要计算(图 5)。

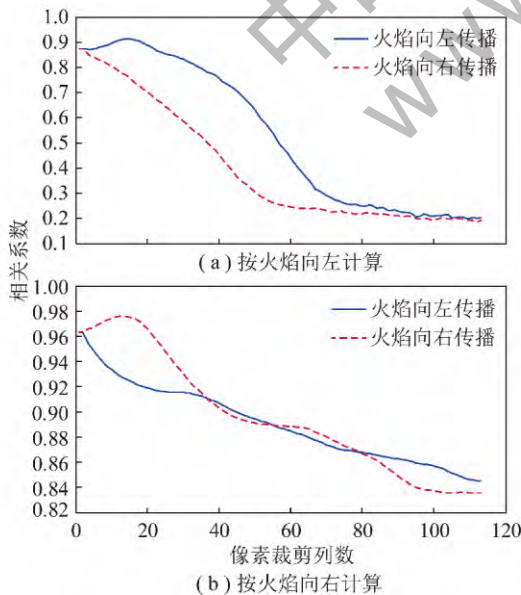


图 5 相邻两张图像裁剪过程中相关系数计算结果

Fig. 5 Correlation coefficient computing results of the two adjacent images in the process of clipping

由图 5 (a) 所示, 火焰自右向左传播, 按照火焰向

右传播进行裁剪计算出的相关系数一直在降低, 而按照火焰向左传播进行裁剪计算出的相关系数先升高后降低, 在  $N_i = 17$  处相关系数取得最大值  $\sigma_{N_\alpha} = 0.9225$ , 所以此时火焰在相邻两张图像中传播的距离  $N = 17$ 。图 5 (b) 与图 5 (a) 相类似, 但此时火焰自左向右传播, 因此按照火焰向右进行裁剪计算得到  $N = 14$ ,  $\sigma_{N_\alpha} = 0.9781$ 。

### 2.2.4 像素尺寸与实际尺寸的关系

通过计算得到相邻两张图像中传播的距离  $N_\alpha$  后, 由图像分辨率与视窗尺寸之间的比例系数  $k$  可以计算出火焰在相邻两张图像时间间隔内传播的实际距离  $\Delta L = N_\alpha k$ , 再除以时间间隔  $\Delta t$  ( $\Delta t = 0.5 \text{ ms}$ ) 即可得出火焰传播速度  $v$ :

$$v = \Delta L / \Delta t = N_\alpha k / \Delta t \quad (7)$$

## 3 实验结果及分析

### 3.1 瓦斯爆炸火焰传播速度变化情况及分析

由图 6 可以看出, 瓦斯爆炸火焰在传播过程中, 首先是迅速加速到最大值 (30.89 m/s), 然后逐渐振荡减速, 经 11 ms 左右速度减至最低, 约为 0, 从后部挡板反射回来的爆炸火焰到达视窗所在位置, 反向传播的火焰不断在振荡, 由于正向传播和反向传播的火焰相互作用, 使得火焰在后续过程一直处于反向, 但是火焰速度是加速、减速, 又加速、减速, 反向加、减速振荡十余次后, 火焰速度逐渐衰减至 0 而熄灭。反向最大速度是 47.89 m/s, 比正向传播的最大速度还要大, 这说明爆炸火焰遇到障碍物反向造成的能量也很大。该方法计算得到的爆炸火焰传播特征与江丙友等<sup>[20]</sup>模拟的 9.5% 甲烷与空气预混气体在密闭管道的传播规律以及李庆钊等<sup>[21]</sup>研究的反射压力波对爆炸火焰传播的影响等研究成果一致。王从银等利用相同尺寸的管道研究过火焰前锋的传播速度<sup>[22]</sup>, 表 1 将计算的火焰前锋传播速度与已有的数据进行了比较<sup>[15]</sup>, 结果证实该计算方法具有很高的准确性。

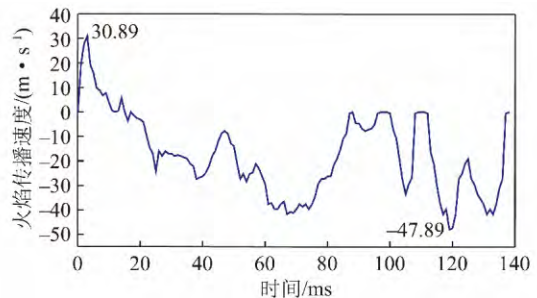


图 6 9.5% 体积分数下瓦斯爆炸火焰传播速度变化

Fig. 6 Propagation velocity variation of explosion flame at 9.5% methane concentration

表 1 火焰前锋传播速度计算与实测结果比较  
Table 1 Comparison of computational and measurement results of flame front velocity

实验编号	瓦斯体积分数/%	测量结果/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	计算结果/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差/ %
1	8	29.23	29.13	0.34
2	9.5	17.05	16.57	2.80
3	11	49.31	48.14	2.37

### 3.2 瓦斯爆炸火焰传播细化分析

为了细观的研究瓦斯爆炸火焰传播的规律,对火焰图像进行纵向和横向的剪裁等分计算。

#### 3.2.1 剪裁计算步骤及说明

对预处理得到的有效图像等分,然后再进行上述火焰传播速度的计算。图 7 为 9.5% 体积分下火焰传播图像 2 等分和 4 等分的示意。之后分别计算每一小等分图像与相邻图像同一位置的小等分图像求最大相关系数,进而求得两个小等分图像的火焰传播速度,并绘制成曲线。

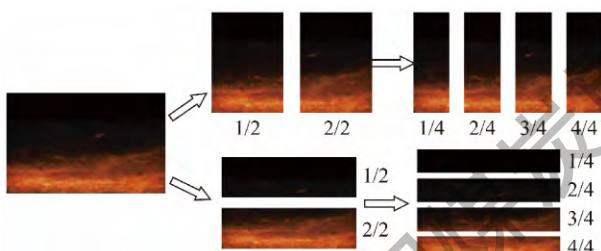


图 7 图像 2 等分和 4 等分示意(9.5% 甲烷)

Fig. 7 Image that divided into halves and quarters

#### 3.2.2 纵向剪裁各等分速度变化

图 8 为 9.5% 体积分下 2 等分的速度变化曲线

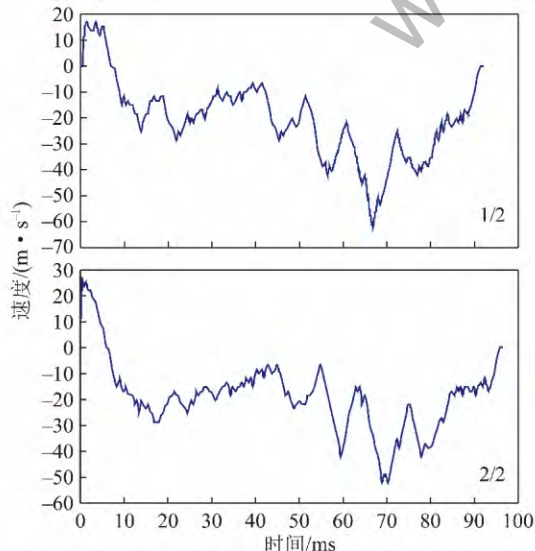


图 8 图像纵向剪裁的 2 等分速度变化(9.5%  $\text{CH}_4$ )

Fig. 8 Flame velocity variation by vertical cutting into halves(9.5%  $\text{CH}_4$ )

线,可以看出,火焰前锋迅速从右向左传播,所以开始时 2/2 图像中速度较快,持续时间较短;而当反向传播时,最大速度在 1/2 图像中取得,这是后方火焰化学反应推动前方火焰传播的结果。

由图 9 可以明显的看出,每部分的速度不完全一致,在 0.02 s 左右 1/4 的图像反向迅速增大到 30 m/s,而 2/4 中是反向减小到 10 m/s 左右,此时 3/4 和 4/4 的火焰速度变化比较稳定在 -25 m/s 左右,在火焰的最大传播速度方面,与 2 等分时的现象一样,也是在正向传播时处于右侧的图像达到最大值,反向传播时处于左侧的图像取到最大值。

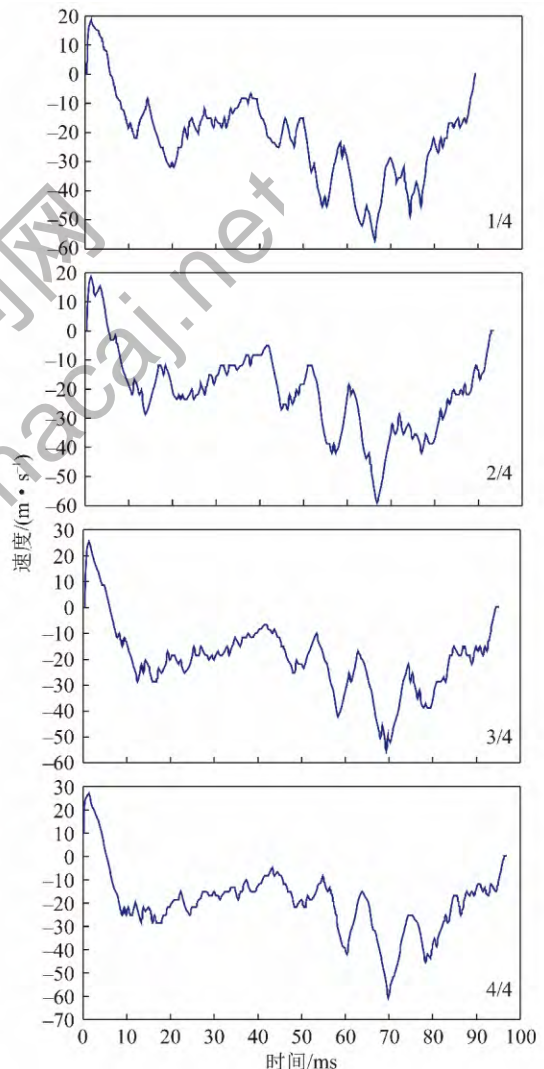


图 9 图像纵向剪裁的 4 等分速度变化(9.5%  $\text{CH}_4$ )

Fig. 9 Flame velocity variation by vertical cutting into quarters(9.5%  $\text{CH}_4$ )

#### 3.2.3 横向剪裁各等分速度变化

由图 7 可以看出,图像的上等分块较暗,计算其速度发现这一部分的速度几乎为 0,火焰主要集中在中下部,由图 10 可以看出,火焰传播开始时 1/2 图像中并没有火焰,速度为 0,此时火焰都集中在管道下



部 即都处于 2/2 图像中,当 0.01 s 过后,1/2 图像中出现火焰,此时下方的火焰已经开始反向传播,上部火焰也从 0 开始反向传播,之后以时快时慢的不稳定速度传播,而这段时间内 2/2 中的火焰传播较为平稳,直到 0.05 s 左右,两幅图像中的火焰都呈现较大幅度的震荡,在 0.07 s 时两部分火焰同时达到最大速度,之后逐渐减小为 0。

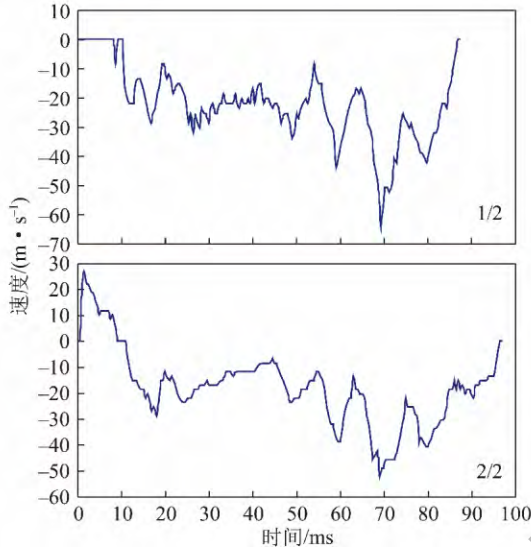


图 10 图像横向剪裁的 2 等分速度变化(9.5% CH<sub>4</sub>)  
Fig. 10 Flame velocity variation by lateral cutting into halves(9.5% CH<sub>4</sub>)

图 11 为 4 等分时的速度变化曲线,在 1/4 图像中,整个过程亮度都比较低,所以计算的速度为 0; 2/4 的变化曲线与 1/2 基本一致,因为它们反映的是同一部分的火焰速度变化; 3/4 和 4/4 的图像是对 2/2 的分解,3/4 更接近于 2/2 的变化曲线,而 4/4 中后期传播的震荡性比较明显,因为 4/4 较其他部分的火焰反应更剧烈。

3.3 图像分割计算与整体计算的比较

通过分析以上图像等分后计算的速度变化曲线可知,它们的变化趋势与整体计算时的速度曲线较为符合,验证了按整体图像计算的火焰传播速度变化趋势是符合理论和实际情况的。通过横向和纵向等分计算的结果表明,前方火焰传播速度有滞后性,各部分速度不一致,受压力、化学动力影响较大。该图像细化处理方法为研究瓦斯爆炸火焰传播速度提供一个新的思路。

4 讨 论

4.1 火焰成像分析

实际管道中瓦斯爆炸火焰传播是在三维空间内的传播,而高速摄影系统拍摄的是固定视窗的 2D 火

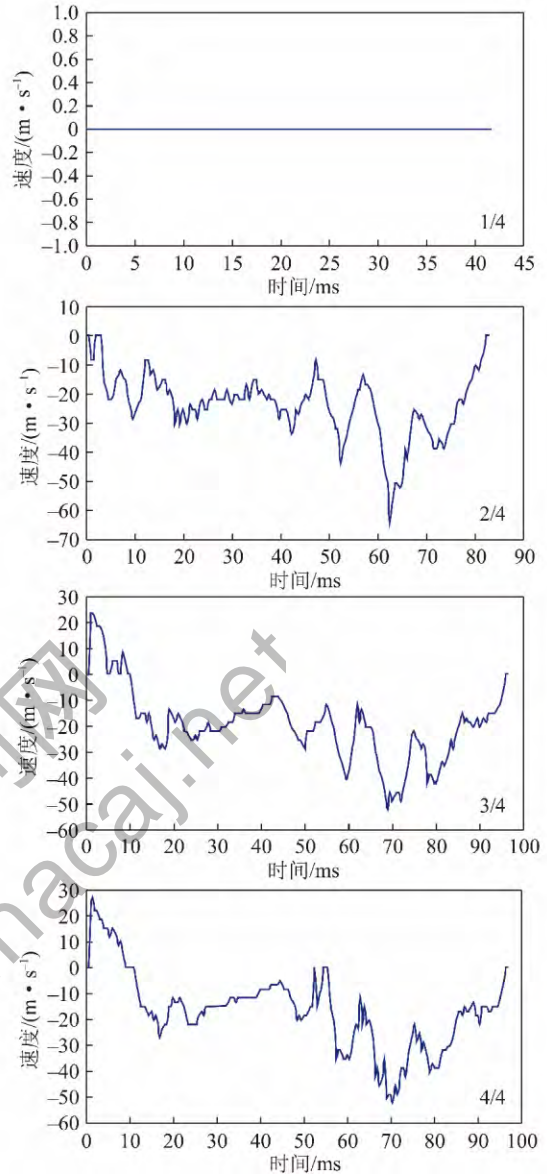


图 11 图像横向剪裁的 4 等分速度变化(9.5% CH<sub>4</sub>)  
Fig. 11 Flame velocity variation by lateral cutting into quarters(9.5% CH<sub>4</sub>)

焰传播图像,其本质是垂直于视窗不同位置火焰叠加之后的图像,如图 12 所示。因此本计算方法求取的是垂直视窗不同断面火焰的平均速度。当求取的速度为 0 时,并不意味着火焰静止,是不同断面的火焰运动状态反映到 2D 平面上相互抵消的结果,实际火焰仍然在动态变化。

4.2 计算结果有效性分析

根据奈奎斯特定理,当采样频率大于等于信号中最高频率的 2 倍时,计算火焰传播速度才有意义。因此在应用此方法前,需要预估爆炸火焰的最大速度,据此选择相应的高速摄影系统参数。

目前仅对图像进行了 2 等分和 4 等分的研究,在之后的工作中可以对图像进行 5 等分、6 等分等做更

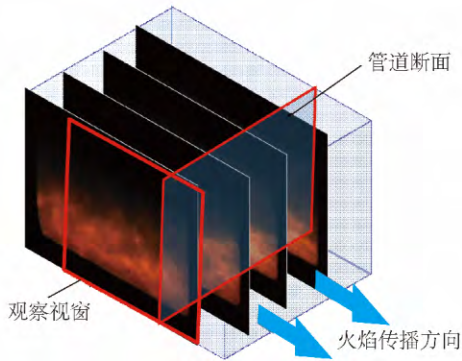


图 12 瓦斯爆炸火焰投影示意

Fig. 12 Schematic diagram of methane explosion flame projection on the window

为细致的分割 研究图像不同位置的速度变化。需要说明的是图像等分要有限制,即必须要考虑到火焰整体的传播速度,否则得出的火焰传播速度是无效的。此外还可以用高速阴影、高速纹影系统拍摄瓦斯爆炸火焰传播图像,分析光线传播因素对成像质量的影响,然后用文中所提出的方法进行计算,进一步验证采用图像相关系数方法计算火焰速度的准确性。

## 5 结 论

(1) 实验研究了 9.5% 瓦斯体积分数下的爆炸火焰传播过程,用高速摄影仪拍摄了爆炸火焰的动态传播过程。宏观分析表明,在爆炸过程中存在着火焰传播速度的不稳定和火焰结构的不稳定性两种特征。火焰受到冲击波的加速、减速和反射等作用,其传播也经历着加速、减速,反向后再加速、减速不断地交替变化的不稳定传播过程。

(2) 图像预处理后对相邻两幅爆炸火焰图像裁减后的相关系数,通过求相关系数最大时所裁减的像素数得到运动的像素距离,建立了基于图像处理方法求火焰经过视窗全过程传播速度的数学模型。

(3) 利用该模型,对爆炸体积分数为 9.5% 的瓦斯爆炸实验结果进行了处理,定量计算了爆炸火焰的动态传播过程,进一步地对图像进行了横向和纵向的 2 等分、4 等分的计算,得出了视窗内不同部分的火焰速度,验证了该处理方法的准确性,定量揭示了管道瓦斯爆炸火焰传播的细化特征规律。

## 参考文献:

[1] 林柏泉,管从光,周世宁. 湍流的诱导及对瓦斯爆炸火焰传播的作用[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 3(2): 107-108.  
Lin Baiquan, Jian Congguang, Zhou Shining. Inducement of turbulence and its effect on fire transmission in gas explosion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 3(2): 107-108.

[2] 余明高,郑凯,郑立刚,等. 管道开口阻塞比对瓦斯爆炸火焰传播特征的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 183-188.  
Yu Minggao, Zheng Kai, Zheng Ligang, et al. Effect of pipe opening blockage ratio on flame propagation characteristics of gas explosions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 183-188.

[3] 刘兵,李春艳,孙天旗,等. 离子电流法测量  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  混合气燃烧火焰传播速度的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(1): 40-45.  
Liu Bing, Li Chunyan, Sun Tianqi, et al. Measurement for flame speed of  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  blends with ionic current method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 40-45.

[4] 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, 2010, 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, 2010, 35(2): 246-249.

[5] 毕明树,李江波. 密闭管内甲烷-煤粉复合爆炸火焰传播规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1298-1302.  
Bi Mingshu, Li Jiangbo. Flame propagation of methane-coal dust explosion in closed vessel[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1298-1302.

[6] 仇锐来. 点火能量对瓦斯爆炸火焰传播速度的影响[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 52-55.  
Qiu Ruilai. Ignition energy influenced to travel speed of gas explosion flame[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3): 52-55.

[7] 李媛,谭迎新,丁小勇,等. 变直径管参数对瓦斯爆炸火焰传播速度的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(10): 67-69.  
Li Yuan, Tan Yingxin, Ding Xiaoyong, et al. Parameters of diameter varied pipe affected to flame propagation velocity of gas explosion[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(10): 67-69.

[8] 翟成,林柏泉,管从光,等. 壁面粗糙度对瓦斯爆炸火焰波传播的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 39-43.  
Zhai Cheng, Lin Baiquan, Jian Congguang, et al. Influence of wall roughness on flame transmission of gas explosion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(1): 39-43.

[9] 林柏泉,洪溢都,朱传杰,等. 瓦斯爆炸压力与波前瞬态流速演化特征及其定量关系[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 108-115.  
Lin Baiquan, Hong Yidu, Zhu Chuanjie, et al. Quantitative relationship between flow speed and overpressure of gas explosion in the open-end square tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(1): 108-115.

[10] 何学秋,杨艺,王恩元,等. 障碍物对瓦斯爆炸火焰结构及火焰传播影响的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 186-189.  
He Xueqiu, Yang Yi, Wang Enyuan, et al. Effects of obstacle on premixed flame microstructure and flame propagation in methane/air explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 186-189.

[11] 罗振敏,邓军,文虎,等. 小型管道中瓦斯爆炸火焰传播特性的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(5): 106-109.  
Luo Zhenmin, Deng Jun, Wen Hu, et al. Experimental study on flame propagation characteristics of gas explosion in small-scale

- duct[J]. *China Safety Science Journal* 2007, 17(5): 106–109.
- [12] 汪泉. 管道中甲烷-空气预混气爆炸火焰传播的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2006: 23–35.  
Wang Quan. Investigation on propagation of premixed methane-air explosion flame in tube[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2006: 23–35.
- [13] 余明高, 郑立刚, 等. 基于 Matlab 图像处理的瓦斯爆炸火焰传播速度研究[J]. *安全与环境学报* 2014, 14(1): 6–9.  
Yu Minggao, Zheng Kai, Zheng Ligang, et al. Flame propagation speed research of the gas explosion through image processing analysis based on Matlab[J]. *Journal of Safety and Environment* 2014, 14(1): 6–9.
- [14] Park D J, Green A R, Lee Y S, et al. Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 150(1): 27–39.
- [15] Nie B, He X, Wang C, et al. Computational method of the propagation velocity of methane explosion flame based on correlation coefficient of images [J]. *Combustion Science and Technology* 2015, 187(8): 1157–1166.
- [16] 王从银, 何学秋. 瓦斯爆炸传播火焰高内聚力特性的试验研究[J]. *中国矿业大学学报* 2001, 30(3): 3–6.  
Wang Congyin, He Xueqiu. Experimental study on cohesive force property of flame from gas explosion [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2001, 30(3): 3–6.
- [17] Cook M A. *The science of high explosives* [M]. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1958: 420–422.
- [18] Zhang P, Du Y, Wu S, et al. Flame regime estimations of gasoline explosion in a tube [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2015, 33: 304–310.
- [19] 高木干雄, 下田阳久. 图像处理技术手册 [M]. 孙卫东, 译. 北京: 科学出版社, 2007.  
Mikio Takagi, Haruhisa Shimoda. *Handbook of image analysis* [M]. Sun Weidong, Translated. Beijing: Science Press, 2007.
- [20] 江丙友, 林柏泉, 陈健, 等. 瓦斯爆燃防爆安全距离及传播特征的数值模拟 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(1): 139–145.  
Jiang Bingyou, Lin Baiquan, Chen Jian, et al. Numerical simulation of explosion-proof safety distance and propagation characteristics of gas deflagration [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering* 2014, 31(1): 139–145.
- [21] Li Q, Lin B, Jian C. Investigation on the interactions of gas explosion flame and reflected pressure waves in closed pipes [J]. *Combustion Science and Technology* 2012, 184(12): 2154–2162.
- [22] 王从银, 何学秋. 瓦斯爆炸火焰厚度的实验研究 [J]. *爆破器材* 2001, 30(4): 28–32.  
Wang Congyin, He Xueqiu. An experimental study of flame thickness in gas explosion [J]. *Explosive Materials* 2001, 30(4): 28–32.