DOI: 10.11883/bzycj-2016-0278
文章编号: 1001-1455(2018)01-0133-07

基于 RGB 颜色模型的玉米淀粉爆燃火焰传播速度*

张洪铭,陈先锋,张 英,牛 奕,代华明,黄楚原
(武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070)

摘要: 采用小尺度粉尘爆炸实验装置对不同质量浓度的玉米淀粉爆燃火焰传播过程进行了实验研究,建立了基于 RGB 颜色模型的火焰重构及形态学重建的粉尘火焰传播速度计算方法,计算了不同质量浓度下的玉米淀粉爆燃火焰传播速度。结果表明:采用基于 RGB 颜色模型的速度计算方法能够快速准确地计算出玉米淀粉爆燃火焰传播速度,火焰像素范围的确定是火焰速度计算的关键;管道内火焰传播速度受粉尘云质量浓度的影响,最大火焰传播速度随粉尘云质量浓度的增大先增大后减小,到达速度峰值的时间先缩短后增长,当质量浓度为 0.63 kg/m^{3}时,出现该实验条件下火焰传播速度最大值 7.03 m/s。

关键词: 粉尘爆炸;火焰传播速度;火焰图像;RGB 颜色模型
中图分类号: O389 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

粉尘爆炸事故的预防和控制是当前中国工业安全生产过程中亟待解决的重要课题。近年来,随着工业生产需求的增大,中国粉尘涉爆企业数量和生产规模都不断增加,重特大粉尘爆炸事故频繁发生,严重威胁着人们的生命财产安全和工业生产安全。因此,针对粉尘爆炸发生机理和灾害预防控制措施的研究已成为越来越多科研工作者的科研目标[1-3]。粉尘爆炸的灾害表现形式为火焰在受限空间内以极高速度传播的过程,因此,火焰传播速度是研究粉尘爆炸发生机理的重要参数。丁以斌等[4]采用高速纹影技术研究了锆粉尘云在管道内的火焰传播过程,得到了火焰传播速度与粉尘云质量浓度间的关系。王健等[5]对管道相连容器中粉尘爆炸过程进行了实验研究并对其进行了数值分析,建立了粉尘燃烧模型,揭示了泄爆装置内火焰加速传播行为与粉尘爆炸的关系。Gao 等[6-7]实验研究了有机醇类粉尘的爆炸机理,总结了粉尘粒子特性与火焰传播速度之间的关系。火焰传播速度的测量方法同样得到了广泛的研究[8-10]。余明高等[11]采用 Matlab 软件对不同瓦斯体积分数的爆炸火焰图像进行识别处理,得到火焰锋面位置并计算了火焰传播速度。Nie 等[12]利用图像相关系数法,对瓦斯爆炸火焰传播速度进行了计算,分析了瓦斯爆炸过程的速度变化规律。Han 等[13]利用粒子图像测速技术对甲烷空气预混爆炸过程进行测量,建立了火焰传播的速度场。目前针对火焰传播速度的测量和计算的研究主要为甲烷等可燃性气体的火焰传播过程,对于粉尘爆燃火焰传播的计算和测量研究还鲜有报道。本文中,将利用高速摄像系统对玉米淀粉云爆燃火焰传播过程进行图像采集,建立基于 RGB 颜色模型的玉米淀粉爆燃火焰识别数学模型,并利用该数学模型对玉米淀粉爆燃火焰传播速度变化规律进行研究,以期为分析粉尘爆炸致灾机理提供实验参考。

1 实 验

1.1 实验系统

粉尘云爆燃火焰传播实验平台由开口垂直实验管道、供气与喷粉装置、高压点火装置、高速摄像系统和同步控制器等 5 部分组成。燃烧管道是一个上端开口、下端封闭的垂直方形管道,内部尺寸为 500 mm×80 mm×80 mm。为了保证管道的承压强度,管道结构由不锈钢体焊接而成,同时,在管道的两侧安装两块光学玻璃,以便于观察火焰的传播过程。在管道底部中央安装有一个锥形分散帽和一个

* **收稿日期:** 2016-09-12; **修回日期:** 2016-12-15
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802801);国家自然科学基金项目(51374164,51774221)
第一作者: 张洪铭(1989—),男,博士研究生; **通信作者:** 陈先锋,cxf618@whut.edu.cn。

称样皿。实验时将称量好的粉尘放置于称样皿中，压缩空气流从分散帽中反射入称样皿，气流卷扬起粉尘在管道中形成粉尘云。为了确保粉尘云在管道内分散状态的一致性，减少初始流动速度对火焰传播过程引起的误差，每组实验的喷粉压力和点火延时等参数保持一致。管道下部安装有一对直径约 0.4 mm 的点火电极，高压点火装置对点火电极放电，产生电火花，从而点燃粉尘云。实验中通过高速摄像机和尼康 90 mm 微距镜头组成的光学系统拍摄并记录粉尘火焰传播过程。同步控制器将供气喷粉系统、点火系统、高速摄像机连接在一起，进行时序控制和开关控制。各实验装置的参数具体设置如下：喷粉气流压力，0.2 MPa；喷粉气流时间，0.2 s；点火延时，0.1 s；点火电压，15 kV；拍摄速度，1 000 frames/s。实验系统组成如图 1 所示。

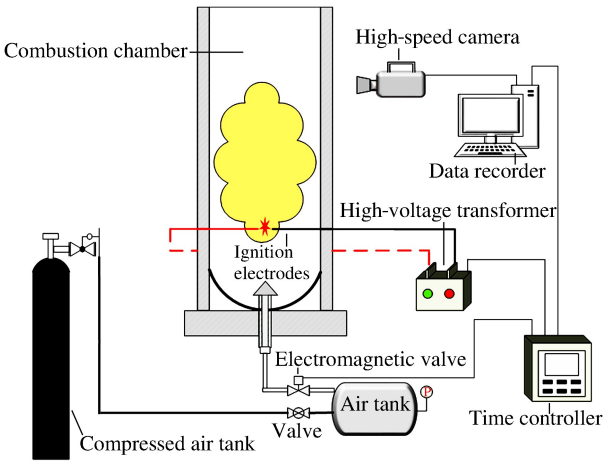


图 1 实验系统组成图

Fig. 1 Composition of the experimental system

1.2 实验材料与实验过程

选用纯净的玉米淀粉作为粉尘实验样品。由于粉尘的粒径分布会对火焰的传播特性和结构产生影响，因此，实验前先将粉尘样品通过 200 目的分析筛进行筛分，得到平均粒径为 65 μm 的粉尘。为了避免空气中水分对玉米淀粉的影响，实验前先将样品粉尘均放于真空干燥箱中，50 ℃恒温干燥 12 h 以上。对玉米淀粉样品进行工业分析和元素分析，其结果为面粉中固定碳、挥发分、灰分的质量分数分别为 13.6%、85.6%、0.8%；C、H、O、N、S 的质量分数分别为 39.27%、6.56%、53.03%、0.04%、0.00%。为了确定燃烧实验管道中粉尘云的浓度，实验之前采用插板法对管道内粉尘云浓度进行测量[4]，得到的喷粉质量与管道内粉尘云质量浓度的关系，如图 2 所示。

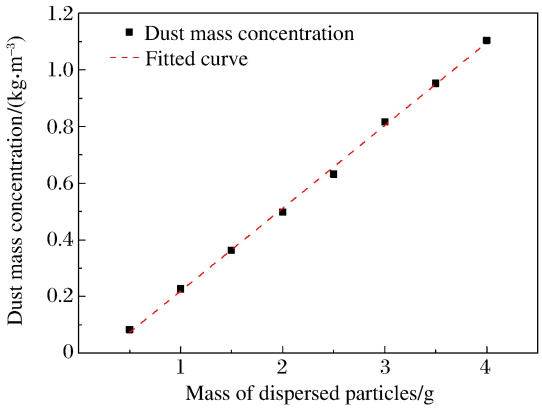


图 2 喷粉质量与管道内粉尘云质量浓度的关系

Fig. 2 Dust mass concentration in experimental apparatus varied with mass of dispersed particles

2 火焰传播速度计算原理

2.1 基于 RGB 颜色模型的火焰重构

RGB 颜色模型是利用图像中红(R)、绿(G)、蓝(B)3 种颜色在计算机中不同的量化方式对颜色进行表征的一种数学模型。图 3 所示的是管道内玉米淀粉爆燃火焰区域 R、G、B 单通道分量图像，图 3(a)为原始彩色图像，图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)分别为 R、G、B 单通道颜色分量图。从图中可以看出，玉米淀粉爆燃火焰像素具有如下特点：R 通道强度值大于 G 通道，G 通道强度值大于 B 通道。同时由计算可知，样本图像火焰区域像素点的 R、G、B 平均值同样遵循这一规律，且火焰区域红色分量的值大于图片其他区域的平均值，因此对于一个粉尘火焰像素，需符合以下条件[14]：

$$R(x,y)>G(x,y)>B(x,y),\qquad R(x,y)>R_{\mathrm{mean}},\qquad R_{\mathrm{mean}}=\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}R(x_i,y_i)\tag{1}$$

式中：$R(x,y)$、$G(x,y)$、$B(x,y)$分别为像素点(x,y)的 R、G、B 通道的值，K 为图像中像素总和，R_{mean}为图片中所有像素红色分量的平均值。

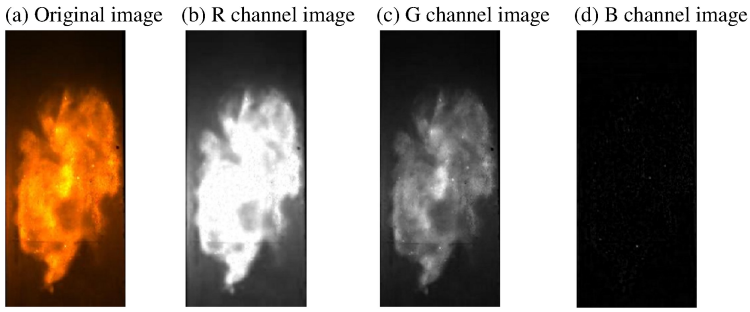


图 3　粉尘爆燃火焰 R、G、B 单通道分量图

Fig. 3　Flame regions separated by R, G, B color components

环境照明、相机设备、拍摄条件等环境因素的变化会产生一定程度的判读误差，影响上述 RGB 颜色模型对火焰识别的准确性。因此，为了消除环境因素带来的影响，对公式(1)进行归一化转换建立标准 rgb 模型，从而减少判读误差提高火焰识别的准确性，其变换公式[14]为：

$$r=R/(R+G+B),\qquad g=G/(R+G+B),\qquad b=B/(R+G+B) \tag{2}$$

为了更精确地判断火焰像素点的 r、g、b 取值范围，需要对大量玉米淀粉爆燃火焰图片的像素点进行读取和判断，因此对不同工况条件下的玉米淀粉爆燃火焰图片进行大量的训练，得到玉米淀粉爆燃火焰像素点的取值范围，如图 4 所示。通过计算 r-g、r-b 和 g-b 等 3 个平面火焰像素范围，即可得到 RGB 颜色模型火焰重构的边界条件分别为：

$$\begin{aligned}
&r\geqslant 0.974g+0.007, && r\leqslant -1.764b+0.792, && g\geqslant 1.050b+0.117\\
&r\leqslant -0.983g+0.976, && r\leqslant 0.164b+0.526, && g\leqslant -0.620b+0.503\\
&r\geqslant -1.934g+1.111, && r\geqslant -0.640b+0.532, && g\leqslant 19.333b+0.004
\end{aligned} \tag{3}$$

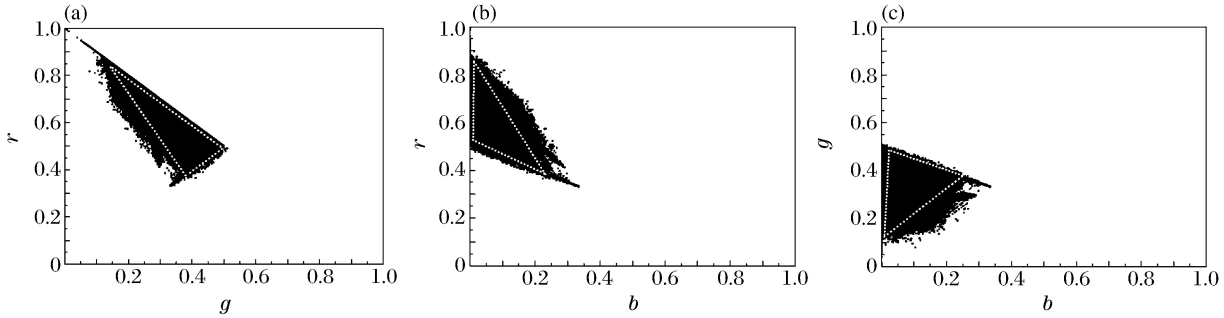


图 4　玉米淀粉爆燃火焰像素分布

Fig. 4　Flame pixel distribution based on the rgb color space model

2.2　图像处理

图 5 显示的是高速摄像机拍摄的平均粒径为 65 μm、粉尘云质量浓度为 0.63 kg/m^3 的玉米淀粉云火焰传播图像。由图中可以看出，玉米淀粉云被点燃后，火焰在管道内由底部向管道顶部加速传播。由于喷粉气流的影响，火焰呈湍流燃烧状态，火焰锋面出现不规则的褶皱和变形。

为了准确获取火焰锋面位置，需要对重构火焰进行图像处理，处理过程如图 6 所示。图 6(a)为火焰原始图像，首先利用 RGB 颜色模型对火焰原始图片进行重构，并对识别出的火焰区域进行二值化处理，使之能够清晰地表征粉尘爆燃火焰图像的几何轮廓特征，提高火焰传播速度计算的精确度，如图 6(b)所示。图像二值化处理方法为：

$$f_T(x,y)=\begin{cases}1 & f(x,y)\geqslant T\\ 0 & f(x,y)<T\end{cases} \tag{4}$$

式中：f 为多级灰度图像，(x,y)为像素点空间位置，T 为满足式(1)～(3)的像素点阈值。

然而由图 6(b)可知，经过颜色特征提取及二值化运算后的火焰区域并不是精确火焰区域，火焰锋

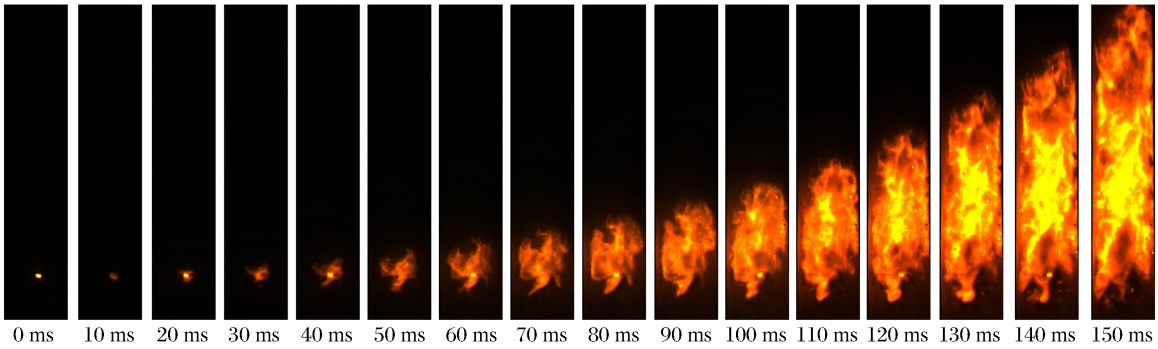


图 5 玉米淀粉云火焰传播过程

Fig. 5 Flame propagation process of cornstarch dust cloud

面边缘及火焰内部还存在未检测出的火焰像素点，需对图像进行火焰形态学重建，获得准确的粉尘火焰重构图像。火焰形态学重建的方式为对火焰图像进行先膨胀运算后腐蚀运算，即闭运算处理，其运算公式如下[14]。

(1)膨胀运算，$F_T \oplus S=\{f_T \mid S+f_T \cup f_T \neq 0\}$；

(2)腐蚀运算，$F_T \Theta S=\{f_T \mid S+f_T \subseteq F_T\}$；

(3)闭运算，$F_T \cdot S=(F_T \oplus S) \Theta S$。

式中：F_T为目标图像，S 为计算结构元素。

通过此方法可以得到火焰的精确图像，如图 6(c)所示。对实验得到的火焰传播序列图像进行逐帧处理即可得到玉米淀粉爆燃火焰在管道内传播的形状变化过程以及火焰前锋边缘位置。

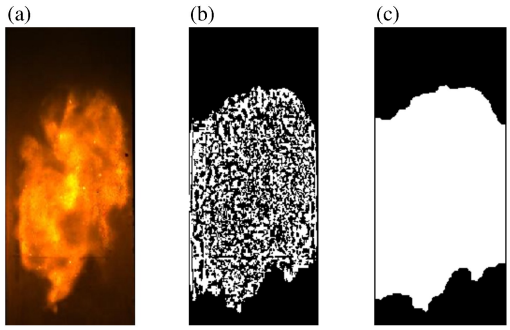


图 6 火焰区域识别过程图

Fig. 6 Recognition process of the flame region

2.3 火焰传播速度计算

图 7 为图像处理后的 t_1、t_2时刻管道内火焰传播图像，横坐标为管道的宽度像素值 W，纵坐标为火焰锋面位置(即火焰传播方向)像素值 N。利用 MATLAB 软件对火焰图像进行逐帧处理，可以得到每个时刻火焰锋面位置的像素值。像素值与火焰锋面真实值之间存在一个转换系数 k，其值的确定取决于管道真实长度与图像的分辨率之间的关系，即：

$$k=a/b \tag{5}$$

式中：a 为管道长度，b 为管道图片像素。

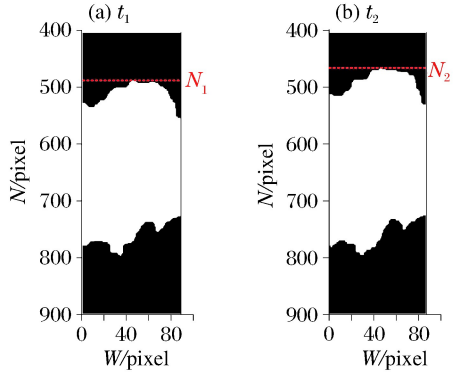


图 7 不同时刻的火焰锋面位置

Fig. 7 Flame front positions at different times

因此，火焰传播速度的计算公式为：

$$v=|N_2-N_1|k/(t_2-t_1) \tag{6}$$

式中：N_1为 t_1时刻火焰锋面位置的像素值，N_2为 t_2时刻火焰锋面位置的像素值。

3 计算结果与分析

利用上述火焰速度计算方法分别对粉尘云质量浓度为 0.36、0.50、0.63 和 0.82 kg/m^{3}的玉米淀粉爆燃火焰在管道内的传播速度进行测量，测量结果如图 8 所示。图 8 中显示的是利用 RGB 颜色模型检测得到的火焰锋面位置以及经过计算后的火焰传播速度曲线。

由图中可知，火焰锋面位置曲线为一个平滑的二次曲线，火焰锋面随时间加速向管道顶部传播，火焰传播速度随时间增加而持续增大，火焰速度峰值出现在火焰离开管道的时刻。

由图 8(a)可知，管道内粉尘云质量浓度为 0.36 kg/m³时，在火焰传播的初始阶段，即 0～100 ms 时，火焰传播速度表现为一个匀速传播的过程，这一阶段的火焰传播平均速度为 0.94 m/s；当火焰传播到 100 ms 后，管道内火焰开始持续加速传播，直至火焰冲出管道。由图 8(b)和(c)可知，当管道内粉尘云质量浓度为 0.50 和 0.63 kg/m³时，管道内粉尘爆燃火焰表现为持续加速传播过程，该质量浓度范围内未出现火焰匀速传播过程。由图 8(d)可知，当管道内粉尘云质量浓度为 0.82 kg/m³时，火焰传播初始阶段火焰加速度显著降低，当火焰传播到 130 ms 时，火焰加速度开始增大，火焰在管道内加速传播。

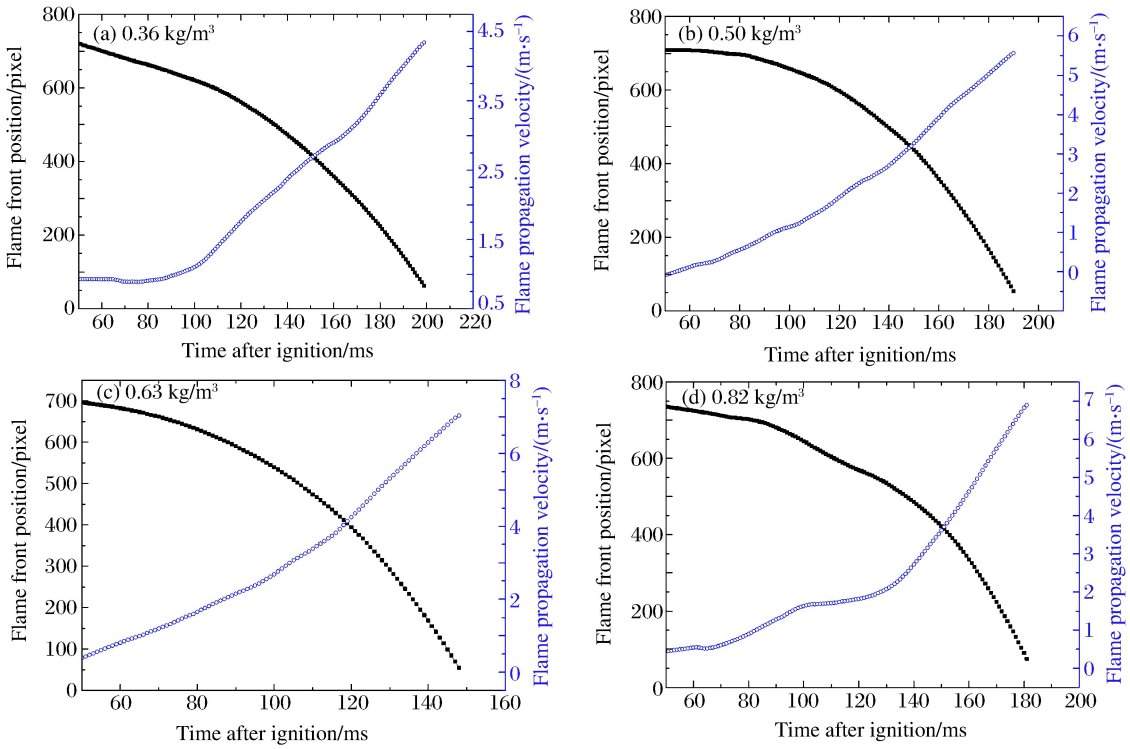


图 8　不同粉尘质量浓度下的火焰锋面位置及火焰传播速度曲线

Fig. 8　Flame front positions and flame propagation velocity curves at different dust mass concentrations

管道内粉尘爆燃火焰出现匀速传播现象的原因为，在低粉尘云浓度下，已燃的玉米淀粉粒子在点火传播初始阶段受到周围粒子挥发分析出吸热作用以及管道内壁限制作用和冷却作用的影响，燃烧释放的热量累积较少，粉尘粒子着火时间较长，引起火焰锋面由已燃区向未燃区传播过程缓慢，出现一段时间的匀速传播过程。火焰加速传播过程的出现是由于管道内粉尘云燃烧放热与燃烧速度之间的正反馈作用，引起粉尘爆燃火焰的加速传播，此过程为粉尘燃烧向爆炸过程转变的重要初始阶段。

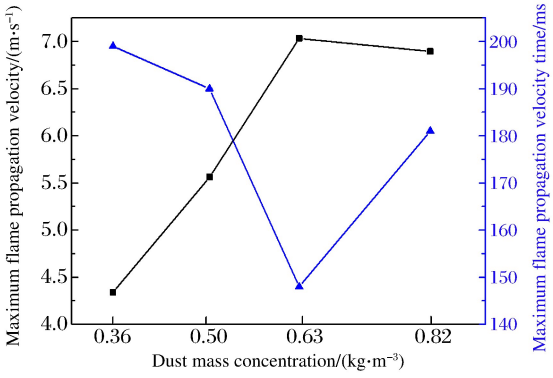


图 9　不同粉尘质量浓度下最大火焰传播速度和达到峰值速度的时间

Fig. 9　Maximum flame propagation velocity and its arrival times at four dust mass concentrations

图 9 显示的是 4 种粉尘云质量浓度 ρ 对应的最大火焰传播速度以及到达峰值速度的时间。通过对比不同粉尘云质量浓度下的最大火焰传播速度可以看出，最大火焰传播速度受到粉尘云质量浓度的影响较大，粉尘云质量浓度为 0.63 kg/m³时其最大火焰传播速度最大为 7.03 m/s。通过分析速度峰值出现所需的时间可以看出：粉尘云质量浓度的增大可使峰值速度出现所需的时间缩短，粉尘云质量浓度为 0.63 kg/m³时峰值速度出现所需的时间最短；随后，随着粉尘云质量浓度的增大，峰值速度出现所需的时间增长。表明当粉尘云质量浓度为0.63kg/m³

时,管道内玉米淀粉云爆燃火焰加速传播特性优于其他 3 种质量浓度的粉尘云,对火焰不稳定传播过程影响最小,这一现象与图 8 中的计算结果相符合。

为了确定速度测量方法的准确性,运用陶可通等[1]的粉尘火焰速度测量方法对玉米淀粉云管道内火焰传播进行火焰传播平均速度 v 测量,并与采用本文方法得到的火焰传播平均速度进行对比,结果如表 1 所示。两种方法的最大相对误差仅为4.52%且最小相对误差为0.48%,两者吻合较好,这证明本文计算方法可靠性较高。

表 1 不同粉尘云质量浓度下两种方法得到的火焰传播平均速度的对比

Table 1 Comparison of mean flame propagtion velocities at different dust mass concentrations by two measurement methods

序号	$\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	$v/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$		$\varepsilon_v/\%$
		RGB 模型	方法[1]	
1	0.36	2.08	1.99	4.52
2	0.50	2.10	2.09	0.48
3	0.63	2.63	2.52	3.57
4	0.82	2.40	2.34	2.56

4 结 论

用高速摄影系统拍摄玉米淀粉爆燃火焰在竖直管道中的火焰传播过程,建立基于 RGB 颜色模型的火焰锋面识别方法,对管道内粉尘云爆燃火焰传播速度进行测量分析,得到粉尘云质量浓度与火焰传播速度之间的关系,主要结论有:(1)运用 RGB 颜色模型对玉米淀粉爆燃火焰进行识别重构及形态学重建,可以确定火焰在管道内传播的锋面位置,得到玉米淀粉爆燃火焰的传播速度。(2)玉米淀粉爆燃火焰像素范围的确定是火焰传播速度计算的关键,通过判断图片像素是否在火焰像素范围内,实现火焰锋面位置与实际火焰区域边界相吻合。(3)火焰在管道内传播的速度特征表现为加速传播过程,然而当粉尘云质量浓度较低时,火焰传播初期会出现短暂的匀速传播现象。(4)玉米淀粉云质量浓度在 0.36~0.82 $\mathrm{kg/m^3}$ 范围内时,随质量浓度的增大,最大火焰传播速度先升高后降低,到达速度峰值所需的时间先缩短后增长。在 0.63 $\mathrm{kg/m^3}$ 质量浓度时,玉米淀粉云最大火焰传播速度可达 7.03 m/s。

参考文献:

[1] 陶可通,陈先锋,张洪铭,等. 玉米淀粉粉尘云浓度对其火焰传播特性的影响[J]. 中国安全科学学报,2015,25(5):37-41.
TAO Ketong, CHEN Xianfeng, ZHANG Hongming, et al. Effects of corn starch dust concentration on its flame propagation characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2015,25(5):37-41.

[2] 郭晶,王庆. 密闭空间煤粉爆炸特性的实验研究[J]. 爆破,2017,34(3):31-36.
GUO Jing, WANG Qing. Experimental studies on explosion characteristics of coal dust in confined space[J]. Blasting, 2017,34(3):31-36.

[3] 徐维铮,吴卫国. 封闭空间爆炸载荷特性研究[J]. 爆破,2017,34(4):40-45.
XU Weizheng, WU Weiguo. Investigation on characteristics of blasting loading in closed space[J]. Blasting, 2017, 34(4):40-45.

[4] 丁以斌,孙金华,何学超,等. 锆粉尘云的火焰传播特性[J]. 燃烧科学与技术,2010,16(4):353-357.
DING Yibin, SUN Jinhua, HE Xuechao, et al. Flame propagation characteristic of zirconium particle cloud[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010,16(4):353-357.

[5] 王健,李新光,钟圣俊,等. 相连容器中粉尘爆炸的火焰传播[J]. 东北大学学报(自然科学版),2010,31(2):157-160.
WANG Jian, LI Xinguang, ZHONG Shengjun, et al. On the flame propagation along pipeline during dust explosion between interconnected vessels[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010,31(2):157-160.

[6] GAO W, MOGI T, SUN J, et al. Effects of particle size distributions on flame propagation mechanism during octadecanol dust explosions[J]. Powder Technology, 2013,249:168-174.

[7] GAO W, DOBASHI R, MOGI T, et al. Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012,25(6):993-999.

[8] 刘兵，李春艳，孙天旗，等. 离子电流法测量 CH_4/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 Chuanyan，SUN Tianqi，et al. Measurement for flame speed of CH_4/H_2 blends with ionic current method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2015，49(1)：40-45.

[9] OTSUKA T，WOLANSKI P. Particle image velocimetry (PIV) analysis of flame structure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2001，14(6)：503-507.

[10] DONG Y，VAGELOPOULOS C M，SPEDDING G R，et al. Measurement of laminar flame speeds through digital particle image velocimetry：Mixtures of methane and ethane with hydrogen，oxygen，nitrogen，and helium[J]. Proceedings of the Combustion Institute，2002，29(2)：1419-1426.

[11] 余明高，郑凯，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.

[12] NIE Baisheng，HE Xueqiu，WANG Cheng，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.

[13] HAN S K，ARGHODE V K，LINCK M B，et al. Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2009，34(2)：1054-1062.

[14] 耿庆田，于繁华，赵宏伟，等. 基于颜色特征的火焰检测新算法[J]. 吉林大学学报(工学版)，2014，11(6)：1787-1972.
GENG Qingtian，YU Fanhua，ZHAO Hongwei，et al. New algorithm of flame detection based on color features [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2014，11(6)：1787-1972.

Flame propagation velocities of cornstarch dust explosion based on RGB color model

ZHANG Hongming，CHEN Xianfeng，ZHANG Ying，NIU Yi，
DAI Huaming，HUANG Chuyuan
(*School of Resources and Environmental Engineering，Wuhan University of Technology，Wuhan* 430070，*Hubei*，*China*)

Abstract：In order to study the flame propagation process of cornstarch dust explosion，a series of experiments with different dust concentrations were conducted in a small-scale experimental platform. A computational method of the propagation velocity of cornstarch dust explosion flame was established based on the RGB color model. The flame front could be detected by flame recognition and reconstruction and the propagation velocities of dust explosion flame with different mass concentrations were calculated. The results shows that this method can be used to calculate the propagation velocity of the cornstarch dust explosion flame quickly and accurately. The determination of the flame pixel range is the key factor of the flame speed calculation. The flame propagation process in the duct is influenced by the dust concentration. The maximum flame propagation velocities increase firstly and then decrease with the increasing concentration of cornstarch dust cloud. However，the times of the maximum flame propagation velocities have the opposite rules. The maximum flame propagation velocity is up to 7.03 m/s，when the mass concentration of cornstarch dust cloud is 0.63 kg/m^3.

Keywords：dust explosion；flame propagation velocity；flame images；RGB color model

(责任编辑　张凌云)