

文章编号:0253-9993(2011)03-0417-06

# 细水雾抑制管道瓦斯爆炸的实验研究

余明高<sup>1</sup>, 安安<sup>1</sup>, 游浩<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 山西焦煤集团有限责任公司, 山西 太原 030002)

**摘要:**在搭建细水雾抑制管道瓦斯爆炸的小尺寸实验平台和阐明瓦斯爆炸传播机理的基础上, 研究细水雾抑制管道瓦斯爆炸的有效性, 并对其定性、定量分析。研究发现: 在水雾足量的情况下, 细水雾能有效抑制管道瓦斯爆炸的传播速度、降低火焰温度, 并能改变火焰图像特性; 瓦斯浓度较高或雾通量不足时, 细水雾将通过助燃促进瓦斯爆炸的产生。

**关键词:**细水雾; 抑制爆炸; 管道瓦斯; 瓦斯爆炸

**中图分类号:**TD712.71 **文献标志码:**A

## Experimental study on inhibiting the gas explosion by water spray in tube

YU Ming-gao<sup>1</sup>, AN An<sup>1</sup>, YOU Hao<sup>1,2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** The inhibiting efficiency of water spray was studied and analyzed qualitatively and quantitatively by constructing small size experimental platform and explaining mechanism of gas explosion. The results show that when there is adequate water spray, it can efficiently prevent propagation velocity, reduce flame temperature, and change flame characteristics of gas explosion; when gas concentration is higher, or spray flux is inadequate, the water spray will promote the occurrence of gas explosion through the combustion assistance.

**Key words:** water spray; inhibiting explosion tube gas; gas explosion

近年来, 国内外研究机构对利用细水雾抑制瓦斯爆炸都有所涉及<sup>[1-8]</sup>。Jones 等曾在 1 个矩形钢管中对水雾抑制爆炸火焰的效果进行了实验研究<sup>[4]</sup>; Thomas 等则对爆炸火焰的水雾抑制进行了一系列的研究<sup>[5]</sup>; 廖光焯等对细水雾抑制扩散火焰的研究作了大量的研究工作<sup>[6]</sup>; 陆守香等对水抑制瓦斯爆炸机理进行了研究<sup>[7]</sup>, 取得了一定的研究成果。然而针对抑制某些剧烈的燃烧爆炸一直还停留在理论研究上<sup>[2-3]</sup>。本文利用自行设计的实验系统, 通过开展实验研究抑制管道低浓度瓦斯爆炸传播的规律。

## 1 实验条件和实验方法

### 1.1 实验条件

实验系统由管道、细水雾发生系统、配气装置、高速数据采集装置和点火装置等组成。实验系统主要用来测量几种低浓度瓦斯在管道内发生爆炸后的传

播情况, 包括传播过程中速度、温度和火焰图像特性的变化等。

实验采用全长 1 800 mm、壁厚 10 mm、截面积 168 mm×168 mm 的圆形有机钢化玻璃作为实验管道。管道一端固定封闭, 另一端活动封闭。

细水雾发生系统固定于管道活动封闭端附近, 喷头作用范围为 500 mm, 细水雾由压力喷头产生, 施加压力为 1.4 MPa。由 LS-2000 分体式激光粒度仪测得的雾滴平均粒径为 100 μm, 喷头流量为 3.5 L/min。在雾区下方有 3 根镍铬-镍硅-铂铑 K 型热电偶, 间隔 185 mm, 反应时间为 100 ms, 热电偶固定在雾场下方的管壁上, 用来测量细水雾释加前后的温度变化情况。由德国尼康公司生产的 Lavision' camera systems-High Speed Camera 作为瓦斯爆炸火焰的图像拍摄装置。实验系统还有: 配气装置、火花塞点火装置、瓦斯检测仪、排水孔和两层 0.35 mm 厚的塑料

泄压薄膜等共同组成,图1为实验系统装置原理。

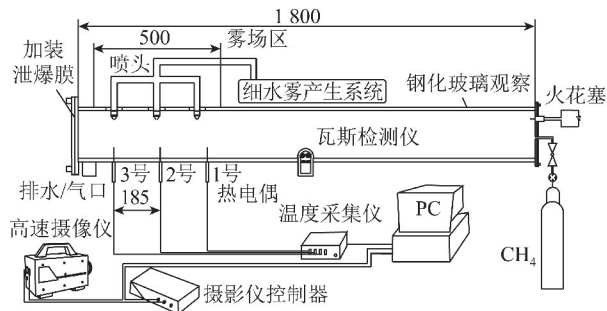


图1 实验系统装置

Fig. 1 Schematic of the experimental system

## 1.2 实验方法

首先通  $\text{CH}_4$  气体,预先混合气体,达到所要求的实验浓度后停止通气,在点火能不低于 375 mJ 下点火<sup>[2]</sup>,通过高灵敏度的 High Speed Camera 和温度检测系统采集爆炸初始阶段火焰传播速度和火焰温度,最后对实验数据进行定性和定量分析,得出实验结果。

实验选择爆炸范围为 5.5%、6.5%、7.5% 和 9.0% 四种低浓度瓦斯进行实验,利用细水雾灭火系统对爆炸火焰进行抑制。在采用高速摄像仪、温度采集系统等技术手段得到实验数据的基础上,为观察细水雾对爆炸火焰的抑制效果,该实验在瓦斯爆炸最为剧烈的一段进行。根据瓦斯爆炸火焰的传播特性,可将细水雾发生系统安装于图1所示范围,即爆炸最剧烈段,所测实验参数均是这一区域的。同时,热电偶在距离火源点 1 300 mm 开始间隔布置,统计瓦斯爆炸火焰温度。实验采用设定为 1 000 fps 的 High Speed Camera 对瓦斯爆炸火焰进行拍摄,取雾区段的瓦斯火焰阵面为实验主要研究对象。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 瓦斯爆炸传播机理

通常情况下瓦斯爆炸传播机理为:火焰产生的前

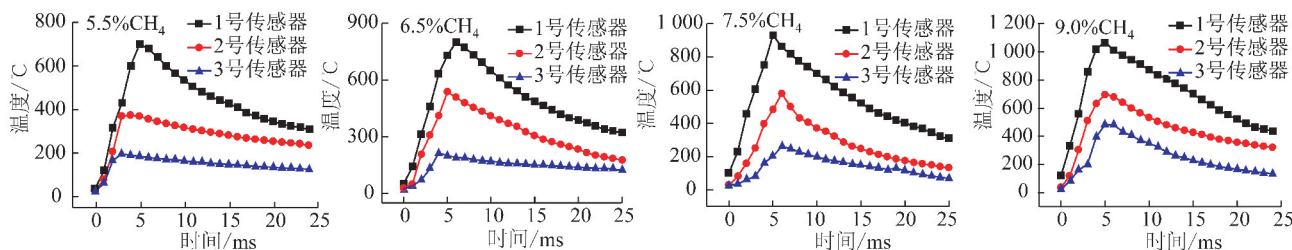


图3 不同浓度瓦斯爆炸火焰温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Temperature change curves of the different gas concentration explosion with time

从图2可以看出:4种浓度的瓦斯预混气体的速度初始阶段火焰都有一定的拉伸现象出现,而且都是在一瞬间增加到最大值的,增加时间为毫秒级,虽然

驱冲击波对未燃混合物的加热和压缩的正反馈机理<sup>[9]</sup>。煤矿大部分瓦斯爆炸事故属于可燃气体爆炸问题,即火焰以亚音速传播,冲击波以超音速传播。亚音速传播的火焰面前有前驱冲击波扰动,火焰在已被冲击波扰动的介质中传播,形成了前驱冲击波和火焰波的两波三区结构。

根据燃烧学湍流预混火焰相关理论可知<sup>[10]</sup>:湍流预混火焰速度可以用流经火焰的可燃预混的体积流量  $q_V$  与湍流火焰的表观面积表示。

$$S_T \equiv \frac{q_V}{A_f} \quad (1)$$

式中,  $S_T$  为湍流火焰速度;  $q_V$  为体积流量;  $A_f$  为湍流火焰表观面积。

瓦斯爆炸的主反应为:  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ , 根据 Peters 提出的链式反应理论可知瓦斯的氧化过程实际上是由 18 个基元反应和 14 种物质组成的链式反应,它们共同促成了瓦斯爆炸的形成<sup>[7]</sup>。

### 2.2 无水雾作用瓦斯爆炸的实验研究及理论分析

#### 2.2.1 各浓度瓦斯火焰传播速度和温度变化趋势

图2和图3分别是瓦斯浓度为 5.5%、6.5%、7.5% 和 9% 的火焰传播速度和温度随时间变化的曲线。

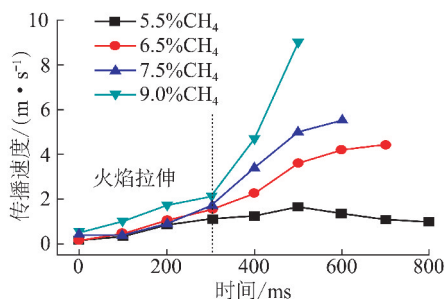


图2 不同浓度瓦斯爆炸的火焰传播速度随时间的变化曲线

Fig. 2 Velocity change curves of the different gas concentration explosion with time

4种浓度的瓦斯爆炸在 0 ~ 300 ms 这段时间的速度增长比较缓慢,基本上处于层流火焰的传播阶段,但随着火焰产生的前驱冲击波对未燃混合物的加热和

压缩,使爆炸火焰的速度不断增加,火焰逐渐由层流转变为湍流。而且浓度越高火焰的加速度就越大,浓度9.0%的瓦斯预混气体和浓度为5.5%、6.5%和7.5%的瓦斯爆炸火焰速度增长的持续性和加速度相差很大。浓度为5.5%的瓦斯预混气体由于管壁散热作用和气体的燃尽速度渐趋于0;浓度为5.5%和6.5%的瓦斯气体加速也很有限,速度基本处于层流与湍流的临界值4 m/s左右;只有浓度为7.5%和9.0%的瓦斯气体爆炸火焰的速度达到了湍流速度,说明此时火焰扰动较强、火焰加速度较高,对火焰由层流转变为湍流起到了决定性作用。

依照不同时间 High Speed Camera 拍摄的瓦斯爆炸火焰阵面图,可以绘制速度曲线。火焰传播速度可用式(2)进行计算,该公式可计算出不同时间段的平均速度,图4即是根据式(2)计算的平均速度得到的。

$$v = \frac{L}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

式中, $L$ 为相邻两个火焰前锋距离,m; $t_i$ 为传播火焰的第*i*个前锋时刻,ms; $t_{i-1}$ 为传播火焰的第*i*-1个前锋时刻,ms。

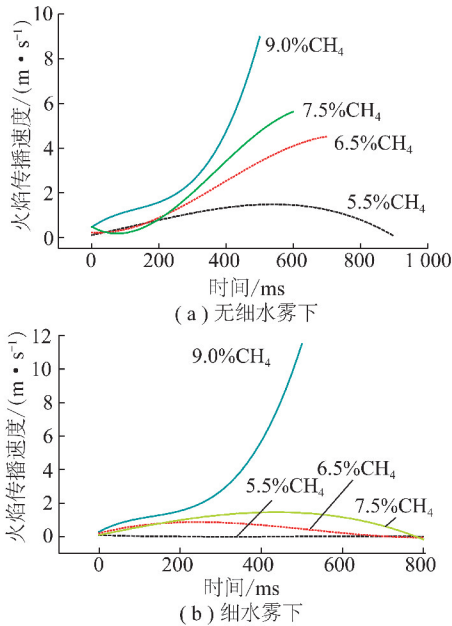


图4 瓦斯爆炸火焰传播速度拟合曲线  
Fig. 4 Polynomial fit of flame propagation speed

另外,可根据灵敏度较高的温度检测仪测量各时间段的温度变化情况,绘制温度曲线。从图3可以看出:温度几乎同时达到了最高点,反应时间都达到了毫秒级,瓦斯浓度越高温度就越高,增温幅度就越快。而且浓度为7.5%和9.0%的瓦斯显然要比其他2种较低浓度的瓦斯增温幅度要高,而且4种浓度的瓦斯气体火焰温度由于向周围介质的热传递以及燃料的燃尽温度基本上呈线性下降趋势。

对水雾/热电偶区间瓦斯浓度为5.5%、6.5%、7.5%、9.0%的瓦斯爆炸速度与传播时间的关系可利用 Matlab 图像处理程序对图像3次拟合得到速度函数

$$Y = A + B_1X + B_2X^2 + B_3X^3 \quad (3)$$

并得到拟合曲线如图4(a)所示。

式(3)中, $X$ 为传播时间; $Y$ 为传播速度;参数 $A$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 的值见表1。

表1 无水雾作用下不同浓度对应的参数

Table 1 Parameters of the different gas concentration explosion without water spray

浓度/%	$A$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
5.5	-0.160 10	0.002 27	$4.946\ 62 \times 10^{-6}$	$-6.998\ 64 \times 10^{-9}$
6.5	0.595 71	-0.006 72	$3.223\ 27 \times 10^{-5}$	$-2.212\ 12 \times 10^{-9}$
7.5	1.985 71	-0.022 25	$7.772\ 62 \times 10^{-5}$	$-5.500\ 00 \times 10^{-8}$
9.0	-1.203 33	0.024 10	$-8.693\ 65 \times 10^{-5}$	$1.250\ 93 \times 10^{-7}$

2.2.2 爆炸火焰图像特性

图像的灰度级共256级,0代表黑色,255代表白色,图像灰度越趋近于0,说明火焰越暗,温度越低,对外辐射就越弱;反之,火焰亮度和温度越高,对外辐射越强。为了更直观地观察瓦斯爆炸火焰图像特性,实验利用 Matlab 将 High Speed Camera 拍摄的雾区 jpg 图片转化为灰度图,如图5所示,高速摄像仪设定为1 000 fps。从图5中的4幅图片可以看出,瓦斯浓度决定爆炸火焰的图形特性<sup>[10]</sup>,且4幅图片有明显的区分。

另外,图5还说明了以下3个问题:①火焰面积。相对于瓦斯浓度为5.5%的气体,其他3种浓度

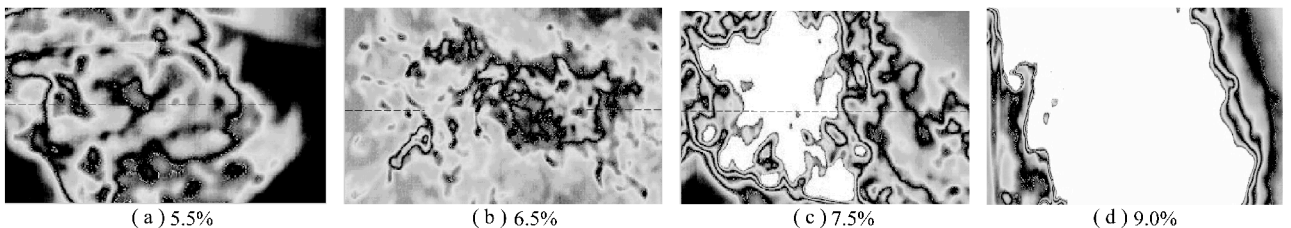


图5 瓦斯气体火焰雾区高速摄影图

Fig. 5 High speed photos of gas combustion of spray area

的瓦斯爆炸火焰面积较大;② 火焰边缘。瓦斯浓度为 7.5% 和 9.0% 的爆炸火焰的边缘褶皱明显比另外两种浓度的瓦斯爆炸火焰要剧烈,说明火焰扰动较强,火焰湍流强度高;③ 火焰辐射强度。爆炸以球形火焰向前传播,瓦斯浓度为 7.5% 和 9.0% 的爆炸火焰,在这一时刻有白色区域出现,且瓦斯浓度为 9.0% 的白色区域面积要比瓦斯浓度为 7.5% 的大,而瓦斯浓度为 6.5% 的爆炸火焰较亮,瓦斯浓度为 5.5% 的爆炸火焰相对最暗,说明浓度越高的瓦斯气体其爆炸火焰的温度越高,高温区面积越大,火焰对外界的辐射越强。

## 2.3 水雾作用下瓦斯爆炸的实验研究

### 2.3.1 细水雾作用下瓦斯爆炸火焰速度和温度的变化趋势

从图 6 和图 7 可以看出:4 种浓度的瓦斯爆炸火焰进入雾区后,细水雾对瓦斯浓度分别为 5.5%、6.5% 和 7.5% 的瓦斯爆炸传播速度和火焰温度起到了明显或较明显的抑制效果,浓度为 5.5% 和 6.5% 的瓦斯爆炸传播速度和温度的增长被完全抑制;浓

度 7.5% 的瓦斯爆炸火焰在 0 ~ 300 ms 速度增长缓慢,爆炸不充分,细水雾相对来说比较充足,对瓦斯爆炸起到了抑制作用,在 200 ~ 300 ms 和 400 ~ 600 ms 时间段,火焰速度和温度升高的加速度有所增长,但随后速度又迅速下降最终趋于 0;浓度为 9.0% 的瓦斯爆炸火焰进入雾区后,火焰加速度明显增大,在 300 ~ 400 ms 和 400 ~ 500 ms 加速度分别由 25.9 m/s<sup>2</sup> 增加到 30.6 m/s<sup>2</sup>,43 m/s<sup>2</sup> 增加到 58 m/s<sup>2</sup>。

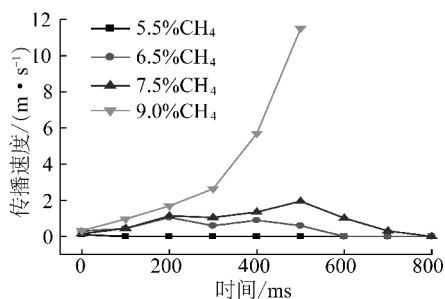


图 6 细水雾区各浓度瓦斯爆炸火焰传播速度随时间的变化曲线

Fig. 6 Velocity change curves of the different gas concentration explosion with time under water spray area

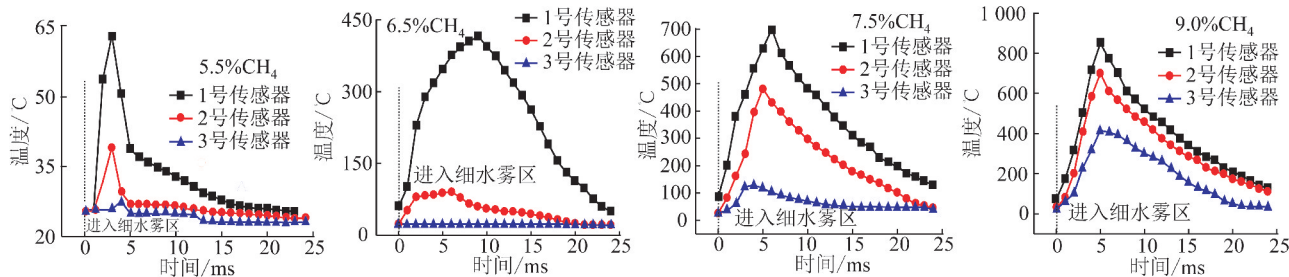


图 7 水雾作用下各浓度瓦斯爆炸火焰温度随时间的变化曲线

Fig. 7 Temperature change curves of the different gas concentration explosion with time under water spray

在水雾区间瓦斯浓度为 5.5%、6.5%、7.5% 和 9.0% 的瓦斯爆炸速度与传播时间的关系同样利用 Matlab 图像处理程序对图像 3 次拟合得到速度函数(式(3)),参数  $A$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  的值见表 2,拟合曲线如图 4(b) 所示。

表 2 水雾作用下不同浓度对应的参数

Table 2 Parameters of the different gas concentration explosion under the effect of water spray

浓度/%	$A$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
5.5	-0.579 68	0.009 72	-1.964 32 $\times 10^{-5}$	1.054 71 $\times 10^{-8}$
6.5	-0.421 59	0.005 15	3.903 32 $\times 10^{-7}$	-6.447 81 $\times 10^{-8}$
7.5	-1.880 00	0.032 15	-1.219 29 $\times 10^{-4}$	1.758 33 $\times 10^{-7}$
9.0	0.177 78	-0.001 11	2.070 71 $\times 10^{-6}$	-1.178 45 $\times 10^{-9}$

### 2.3.2 细水雾作用下爆炸火焰图像特性

在细水雾作用下,实验同样利用 Matlab 将 High

Speed Camera 拍摄得到的 jpg 图片转化为灰度图,如图 8 所示,此时高速摄像机设定为 500 fps。

与图 5 相比发现,图 8 同样说明 3 个问题:① 瓦斯浓度为 5.5%、6.5% 和 7.5% 的爆炸火焰的面积减小,但浓度为 9.0% 的火焰面积仍然较大;② 瓦斯浓度 5.5%、6.5% 和 7.5% 的火焰边缘褶皱减少,扰动明显减弱,特别是瓦斯浓度为 7.5% 的爆炸火焰的外围扰动与无水雾施加时扰动明显减弱,褶皱明显减少,与之相反,瓦斯浓度为 9.0% 的爆炸火焰图片外围扰动有增强的趋势,褶皱面积比无水雾时略有增加;③ 瓦斯浓度为 5.5% 和 6.5% 的爆炸火焰的外焰、内焰、焰心亮度明显降低;但瓦斯浓度为 7.5% 和 9.0% 的爆炸火焰仍有较高温区存在,且瓦斯浓度为 9.0% 的高温区面积大于瓦斯浓度为 7.5% 的高温区面积,对未燃区的热传导和热辐射仍然较强。

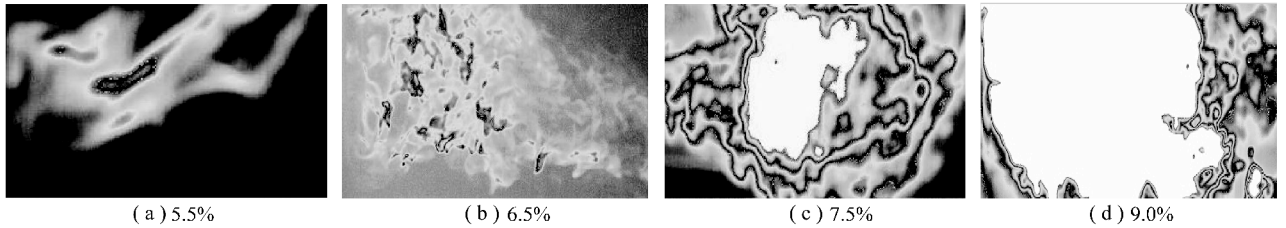


图8 细水雾作用下雾区火焰阵面高速摄影图

Fig. 8 High speed photos of gas combustion under water spray spray area

### 2.3.3 实验对比分析

(1)通过对比表1和表2,结合式(3)可知:3次拟合函数的常数项A值变化较大,说明细水雾起到了关键的作用,因为时间X为毫秒级,明显改变了实验参数Y(速度)的变化趋势。瓦斯浓度为5.5%的爆炸传播速度在施加细水雾的那一刻速度就出现了下降,且直接降为0。瓦斯浓度为6.5%的爆炸传播速度在200ms的时候出现了急剧下降,中间出现速度的小幅增长,是因为水雾的蒸发消耗所致,但随着水雾的继续施加火焰很快被抑制,速度迅速地降为0。瓦斯浓度为7.5%的爆炸传播速度在前0~400ms速度增加缓慢,400~500ms的时候火焰传播加速度增大,但在随后的500~800ms时间段火焰速度持续下降,①说明细水雾的持续降温冷却作用使火焰失去了自维持传播的条件即高温环境,因为只有高温环境的出现才能促进燃料分解为自由基参与反应,从而影响了爆炸反应的进一步完成;②说明在前面冷却作用的基础上反应加速度出现了负加速,与爆炸机理中加速度的持续增加相反,爆炸反应被终止,细水雾起到了抑制作用。瓦斯浓度为9.0%的爆炸传播速度在进入雾区后加速度明显增加,且持续性很好,加速度在300~400ms和400~500ms时段分别增加了4.7和15m/s<sup>2</sup>,爆炸强度增强,说明此时细水雾不但没有起到抑制瓦斯爆炸的作用,反而助燃了火焰。

以上可以根据链式反应理论<sup>[11-14]</sup>进行解释,细水雾抑制瓦斯爆炸主要是基于:细水雾对火焰的冷却作用,阻止了火焰阵面对未燃气体的热传递和热辐射,其次降低了反应区O<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的浓度,并且阻止了燃料自由基的进一步的反应,使气体燃烧反应速度减弱,因为在水雾作用下水分子与自由基发生了以下反应:

$$\text{H} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{OH}, \text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{OH} + \text{OH}, \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH};$$

但如果雾通量不足,H<sub>2</sub>O分子会发生如下分解反应:H<sub>2</sub>O+M=H+OH+M,增加了自由基的数量,加上水雾的蒸发增强了气流的扰动,加速度不降反升,对气体燃烧起到了助燃的作用<sup>[15-16]</sup>。

(2)比较图3和图7可知,在施加细水雾后,4种浓度的瓦斯爆炸火焰温度明显降低,温度升高过程延迟,其中瓦斯浓度为5.5%火焰在到达雾区后温度随即就降到了室温;瓦斯浓度为6.5%的火焰温度最大值至少被延迟了250ms,火焰增长角被“钝化”,火焰出现了驻留现象,随后传播被抑制;同样由于水雾的蒸发冷却作用使瓦斯浓度为7.5%和9.0%的爆炸火焰阵面温度均出现了不同程度的降温。说明继续加大雾通量,或者改变雾通特性是可以抑制瓦斯浓度为9.0%或更高浓度的爆炸火焰。当然,不足量的细水雾助燃瓦斯的燃烧,只有雾通量充足时,火焰才会出现驻留现象,火焰才能被抑制。

(3)比较图5和图8可知,瓦斯浓度为5.5%的爆炸火焰在细水雾作用下,火焰基本消失,该浓度的瓦斯爆炸火焰被熄灭,阻断了火焰向未燃预混气体的热传导和热辐射。瓦斯浓度为6.5%和7.5%的爆炸火焰,虽然两幅图前段火焰部分无论是火焰亮度还是火焰结构都无明显变化,但火焰前锋位置相差很多,图8的火焰前锋落后于无细水雾施加时的火焰前锋。说明细水雾抑制了瓦斯浓度为6.5%和7.5%的爆炸火焰的传播,火焰出现了驻留,火焰阵面的褶皱和扰动减少,细水雾起到了抑制效果,与前面分析一致。瓦斯浓度为9.0%的爆炸火焰在这2幅图中的差别不大,细水雾对瓦斯浓度为9.0%的爆炸火焰的抑制已显不足,火焰在火焰前驱和激波的作用下继续传播,外围扰动和褶皱较无水雾情况下明显。

## 3 结 论

通过上述工况的实验发现,在不加细水雾的情况下,瓦斯气体浓度越高其相应的火源功率越大,爆炸火焰的传播速度和温度就越高。在细水雾作用下,能有效地降低反应物的浓度,减少自由基发生反应的数量,降低反应温度,减少辐射对未燃气体的热传导。实验揭示其影响规律如下:

(1)瓦斯浓度的大小决定了爆炸火焰的基本特点,火焰的热释率、传播速度和火焰温度等;

(2)利用Matlab图像处理程序对速度曲线进行

了拟合,并求出了相关的拟合函数,可定量分析在不同工况下瓦斯爆炸火焰传播速度的变化情况;

(3)细水雾能有效阻止瓦斯爆炸火焰高温区的形成,使4种浓度的瓦斯爆炸火焰温度最大值降低、增速放缓或增长角度钝化,使最高温度分别下降了250~600℃不等;

(4)针对雾区爆炸图像,利用Matlab图像处理程序进行灰度处理,对火焰图像的火焰面积、火焰边缘和火焰强度等火焰特性进行对比分析,发现细水雾对瓦斯浓度为5.5%和6.5%的爆炸火焰抑制效果较好;细水雾对瓦斯浓度7.5%的爆炸火焰虽然起到的抑制效果一般,但仍能抑制,对瓦斯浓度为9.0%的爆炸火焰没有作用,需改变雾场特性提高细水雾的灭火效能。

#### 参考文献:

- [1] Yu Minggao, Zheng Ligang, Liu Zhichao, et al. Performance assessment of water mist applied in gas burning suppression in underground coal mine [J]. *Journal of Coal Science & Engineering (China)*, 2006, 12(2): 48-52.
- [2] 薛少谦,蔡周全,李新建.低浓度瓦斯输送管道的瓦斯爆炸传播试验研究[J].*矿业安全与环保*, 2008, 35(2): 22-24.  
Xue Shaoqian, Cai Zhouquan, Li Xinjian. Pilot study on gas explosion propagation in low concentration in gas pipeline [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2008, 35(2): 22-24.
- [3] 李润之,张延松,李新建.低浓度瓦斯安全输送成套技术开发与装备研制的发展趋势[J].*矿业安全与环保*, 2008, 35(12): 97-101.  
Li Runzhi, Zhang Yansong, Li Xinjian. Tendencies of safe transport techniques about low concentration gas [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2008, 35(12): 97-101.
- [4] Jones A, Nolan P F. Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1995, 8(1): 17-22.
- [5] Thomas G O, Jones A, Edwards D H. Influence of water sprays on explosion development in fuel-air mixtures [J]. *Combust. Sci. Technology*, 1991, 80: 47-61.
- [6] 姚斌,廖光焯,秦俊,等.细水雾抑制扩散火焰的研究[J].*中国科学技术大学学报*, 1999, 28(5): 610-617.  
Yao Bin, Liao Guangxuan, Qin Jun, et al. Study on the suppression of diffusion flames with water mists [J]. *Journal of China University of Science & Technology*, 1999, 28(5): 610-617.
- [7] 陆守香,何杰,于春红,等.水抑制瓦斯爆炸的机理研究[J].*煤炭学报*, 1998, 23(4): 83-87.  
Lu Shouxiang, He Jie, Yu Chunhong, et al. Mechanism of explosion suppression by water [J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 23(4): 83-87.
- [8] 徐峰,朱丽华.细水雾技术在抑制瓦斯爆炸中的应用[J].*工业安全与环保*, 2009, 35(8): 39-62.  
Xu Feng, Zhu Lihua. Application of water mist technology in suppression gas explosion [J]. *Industrial Safety and Environment Protection*, 2009, 35(8): 39-62.
- [9] 贾真真,林伯泉.管道瓦斯爆炸传播影响因素及火焰加速机理分析[J].*矿业工程研究*, 2009, 24(1): 57-62.  
Jia Zhenzhen, Lin Baiquan. Analysis on flame acceleration mechanism and affecting factors of methane explosion propagation in duct [J]. *Mineral Engineering Research*, 2009, 24(1): 57-62.
- [10] 严传俊,范玮.燃烧学[M].西安:西北工业大学出版社, 2005: 31, 93, 145.
- [11] Modak A U, Abbud-Madrid A, Delplanque J P, et al. The effect of mono-dispersed water mist on the suppression of laminar premixed hydrogen-, methane-, and propane-air flames [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144(1/2): 103.
- [12] Homer J B, Hurler I R. The dissociation of water vapour behind shock waves [A]. *Proceedings of the Royal Society of London [C]*. London, 1970: 585-598.
- [13] 刘晖亚,陆守香,朱迎春.水雾作用下甲烷/空气预混火焰的光谱特性[J].*燃烧科学与技术*, 2008, 14(1): 44-49.  
Liu Xuanya, Lu Shouxiang, Zhu Yingchun. Study of methane/air premixed flame emission spectrum under the influence of water mist [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2008, 14(1): 44-49.
- [14] 刘晖亚,陆守香,秦俊,等.水雾抑制气体爆炸火焰传播的实验研究[J].*中国安全科学学报*, 2003, 13(8): 74-80, 84.  
Liu Xuanya, Lu Shouxiang, Qin Jun, et al. Experimental study on inhibiting the gas explosion flame by water spray [J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(8): 74-80, 84.
- [15] Qin Youhua, Shen Zhaowu. Experimental study on the effect of water sprays on gas flame propagation [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2001(1): 27-29.
- [16] 王磊,司荣军,张延松,等.瓦斯浓度对爆炸传播影响的实验研究[J].*中国矿业*, 2009, 18(5): 107-109.  
Wang Lei, Si Rongjun, Zhong Yansong, et al. Experiment research of gas density impacting on explosion propagation influence [J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(5): 107-109.