DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07

# $N_2$ 双流体细水雾抑制管道瓦斯爆炸实验研究*

余明高[1,2],杨 勇[1,2],裴 蓓[1,2],牛 攀[1,2],朱新娜[1,2]
(1.河南理工大学安全科学与工程学院,河南 焦作 454003;
2.河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室,河南 焦作 454003)

**摘要**:为了在较低压力下获得较小粒径的细水雾,降低喷雾抑爆系统的运行成本,提高系统的适用性和抑爆效率,自行搭建了尺寸为 120 mm×120 mm×840 mm 的透明有机玻璃瓦斯爆炸管道实验平台。采用双流体喷嘴将 $N_2$ 和细水雾送入试验管道,通过调节喷雾压力和喷雾时间开展了双流体细水雾抑制瓦斯爆炸实验研究,从火焰速度、瓦斯爆炸超压 2 个方面探讨双流体细水雾的抑爆有效性。实验结果表明:$N_2$ 双流体细水雾抑爆效果明显,可以减小瓦斯爆炸强度;随着喷雾时间的延长,爆炸火焰的速度峰值逐渐下降,爆炸超压峰值逐渐下降,平均升压速率逐渐降低;当 $N_2$ 压力为 0.4 MPa、喷雾时间为 3 s 时,速度峰值比不喷雾时下降 60.39%,爆炸超压峰值下降 37.76%。

**关键词**:双流体;氮气;细水雾;甲烷爆炸
**中图分类号**:O389 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

瓦斯抽放是矿井瓦斯治理的一种根本性措施,在煤矿井下存在大量的瓦斯抽放管道。由于受地质条件影响,钻孔抽放的瓦斯浓度并不达标,甚至在爆炸范围内,给抽放管道安全输送瓦斯带来潜在的危险。因此,研究抽放管道瓦斯安全输送对预防瓦斯爆炸事故的发生具有重要的理论和现实意义。

细水雾因其具有高效、清洁、适用范围广等特点,在灭火、抑爆等方面的研究与应用受到众多学者的关注。陆守香等[1]分析了水参与瓦斯爆炸的化学反应动力学机理,结果表明,细水雾对气体爆炸火焰传播的抑制效果与水雾浓度、水雾流量以及火焰到达水雾区时的传播速度有关。余明高等[2]通过压力喷头雾化方式使用细水雾抑制瓦斯爆炸,实验表明细水雾量充足时可有效降低火焰传播速度和火焰温度。毕明树等[3]研究发现,喷雾量较小时,最大瓦斯爆炸压力和最大压力上升速率都出现增大;随着喷雾量的增加,最大爆炸压力及最大压力上升速率会随着下降。谢波等[4]研究发现,采用主动水雾抑爆时,在水雾区及其后的一定距离内激波均出现不同程度的衰减,激波衰减随水雾空间密度增加而明显。唐建军[5]在20L近球形爆炸罐中使用虹吸喷头雾化方式抑爆瓦斯爆炸,并结合数值模拟分析表明初始瑞流会促进瓦斯爆炸,增加水雾量可以提高抑爆效果。但总体上,前人研究主要是基于单流体喷雾条件开展的。

K. Van Wingerden 等[6]的研究表明雾滴粒径在 20～200 μm 的细水雾的抑爆效果最好;张鹏鹏[7]使用粒径较小的超声波雾化细水雾抑制甲烷爆炸,当超细水雾量充足时抑爆效果较好。余明高等[8]研究发现超细水雾可以有效降低瓦斯燃烧的热释放速率,抑制瓦斯的燃烧火焰;S. P. Medvedev 等[9]研究发现细水雾抑爆效果与雾滴粒径有关,雾滴粒径越小,抑制作用越好;Heskestad 和 Dundas 研究表明雾滴粒径与压力呈反比关系[10]。对于单流体喷雾而言,要降低雾滴粒径而提高抑爆效果,其唯一途径是提升喷嘴喷雾压力,这就要求输水管路耐压较高,且还需要配置增压稳压等机电设备,增加了系统的不稳定性和运行成本。而双流体喷头可运用虹吸原理,充分利用气体作为雾化动力,在相同压力条件下可比单流体喷雾的雾化效果更好。

* **收稿日期**:2015-08-14; **修回日期**:2015-11-03
**基金项目**:国家自然科学基金项目(U1361205,50974055,51604095);河南省教育厅基础研究计划项目(14A620001);河南省科技厅基础与前沿基金项目(152300410100)
**第一作者**:余明高(1963— ),男,教授,博士生导师; **通信作者**:裴 蓓,pb128@hpu.edu.cn。

本文中以 $N_2$ 作为喷雾动力源，既能在较小的压力下产生较小粒径细水雾，其良好的空间分散性也可使细水雾分布更加均匀[11]，而且惰性气体的加入可对甲烷的爆炸上、下限产生影响[12]，提高抑爆效率。本文中将从火焰速度、瓦斯爆炸超压两个方面研究并探讨双流体细水雾对瓦斯爆炸抑制的有效性。

## 1　实验设计

### 1.1　实验装置

搭建的双流体细水雾抑制管道瓦斯爆炸实验平台由管道、配气系统、双流体喷头、数据采集卡、高速摄像机、点火器等组成，实验系统如图 1 所示。

爆炸管道是长为 840 mm、截面积为 120 mm×120 mm 的有机玻璃管道，管道上端用 PVC 薄膜密封；配气系统由甲烷、空气气瓶和质量流量计组成；双流体喷雾系统包括双流体喷头、水槽和 $N_2$ 气瓶，在爆炸前可向管道内喷入 $N_2$ 和细水雾，其中细水雾粒径为 10～20 μm；数据采集系统由 MD-HF 型压力传感器、RL-1 型光电传感器、USB-1608FS 数据采集卡组成；高速摄像图像采集系统由 High Speed Star 4G 型高速摄像机、图像控制器和高速计算机组成，摄像机拍摄速率可以达到 2000 $s^{-1}$；点火系统由 HEI19 系列高热能点火器、点火电极组成，点火电压为 6 kV。

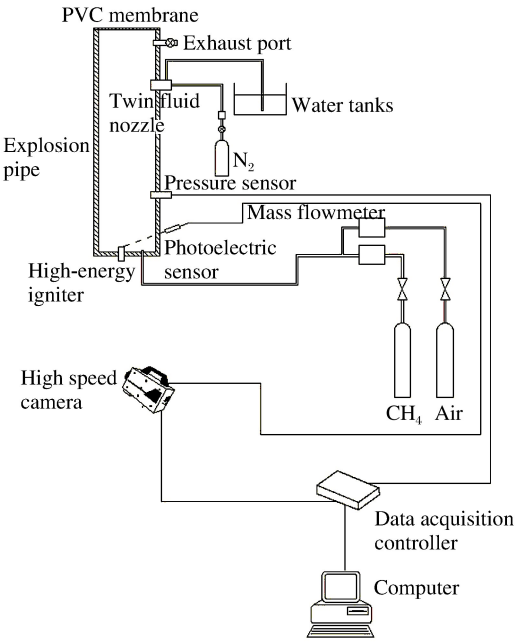



图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental stytem

### 1.2　实验方法

实验开始前按照图 1 组装实验仪器，调试相关设备，使用 PVC 薄膜封住管道泄爆口。为了排尽管道内原有的空气，采用通入 4 倍体积的预混气体的办法[13]，设定好各质量流量控制器的参数后开始向管道内充入预混气体，预混气体为 $CH_4$ 体积分数为 9.5%的 $CH_4$-空气混合气体(9.5%$CH_4$-空气)，充气时间为 6 min。充气完成后，同时关闭进气阀和排气阀，打开电磁阀控制开关双流体喷头开始喷雾，到设定的喷雾时间后电磁阀关闭喷雾结束。以上过程完成后按下高能点火器开关点燃预混气体。瞬间光电传感器捕捉点火电极发出的电火花并转换成电信号，随后就会触发高速摄像机拍摄图片和数据采集系统开关。实验过程中采用的喷雾压力分别为 0.2、0.3、0.4 MPa，在各压力下喷雾时间分别为 1、2、3 s。

## 2　实验结果及分析

### 2.1　$N_2$ 双流体细水雾对火焰传播的影响

图 2 是相同时刻下 $N_2$ 压力为 0.4 MPa，喷雾时间为 1、2、3 s 时与不喷雾时火焰传播距离的对比图。从图 2 可看出，点火后火焰以“半球形”向上传播[14]，随后火焰变为“指形”传播。施加 $N_2$ 双流体细水雾后，相同时刻火焰传播距离较不喷雾时减小。增加喷雾时间后相同时刻火焰传播距离也逐渐减小。不喷雾时火焰传播到出口端的时间为 73 ms；$N_2$ 压力为 0.4 MPa，喷雾时间为 1、2、3s 时，火焰传播到出口端的时间分别为 93、125、192.5 ms，较不喷雾时分别增加了 27.4%、71.23%、163.7%。管道长度相同，火焰传播速度与时间成反比，即 $N_2$ 双流体细水雾后火焰平均速度有不同程度的降低。

图 3 是不喷雾和 $N_2$ 喷雾压力分别为 0.2、0.3、0.4 MPa，喷雾时间分别为 1、2、3 s 时，点燃 9.5% $CH_4$-空气的火焰传播速度对比图，其中：$N_2$-0.2 MPa-1 s 表示氮气喷雾压力为 0.2 MPa、喷雾时间为 1 s。基于 Matlab 图像处理计算爆炸火焰传播速度，对图像进行灰度化及二值化处理，检测火焰边缘，

获取火焰区域的边界。对得到的实际火焰锋面位置进行分析，采用下式计算平均火焰传播速度 $v$[15]：

$$v = L/(t_2 - t_1) \tag{1}$$

式中：$L$ 为火焰锋面位置 1 处和 2 处间的距离；$t_1$ 为火焰锋面到达位置 1 处的时间；$t_2$ 为火焰锋面到达位置 2 处的时间。

从图 3 中可看出喷雾条件下火焰传播速度与不喷雾条件下变化趋势一样，火焰传播速度均出现了先增大后减小，这是由于点火电极点燃管内甲烷后放出热量，在极短时间内积聚大量热量，管内温度升高，火焰传播速度受温度较大，火焰出现加速。随着管内甲烷浓度降低，瓦斯燃烧释放的热量逐渐减少，火焰传播速度也随之逐渐降低。不喷雾时火焰传播峰值速度为 16.99 m/s。表 1 给出了不同喷雾条件下速度峰值的下降比例。如表 1 所示，与不喷雾条件下火焰传播速度相比，喷雾条件下的火焰传播速度峰值均有不同程度的降低，其中火焰传播速度最大下降比例达到 60.39%。如图 4 所示，在同一喷雾压力下随着喷雾时间的延长，爆炸火焰的速度峰值逐渐下降。从爆炸火焰的速度峰值下降可以看出双流体细水雾可以有效抑制火焰的传播速度。

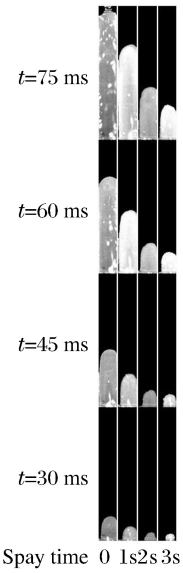



图 2 相同时刻火焰锋面位置对比图

Fig. 2 Comparison of flame front position at the same moment

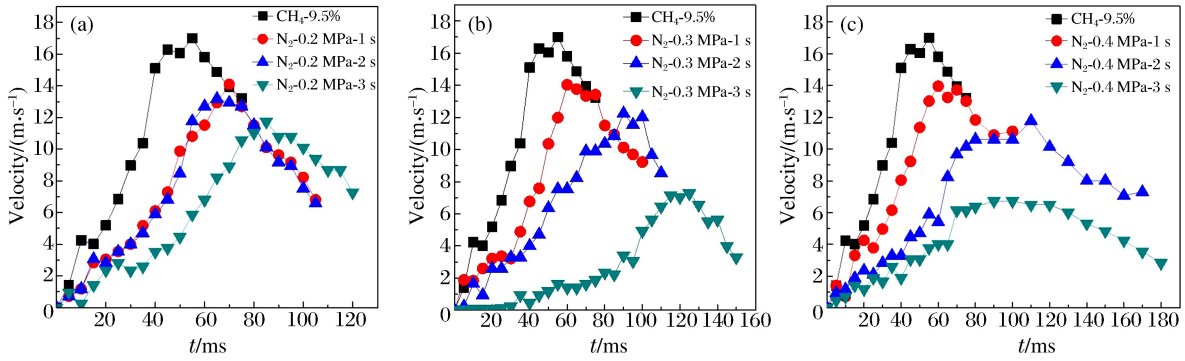



图 3 $N_2$ 双流体细水雾火焰传播速度

Fig. 3 Flame propagation velocity with $N_2$ twin-fluid

**表 1 不同压力不同喷雾时间下速度峰值的下降比例**

**Table 1 Decline proportion of the peak velocity under different pressure and at different times**

| 工况 | 速度峰值/(m·s$^{-1}$) | 下降比例/% | 工况 | 速度峰值/(m·s$^{-1}$) | 下降比例/% | 工况 | 速度峰值/(m·s$^{-1}$) | 下降比例/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $N_2$-0.2 MPa-1 s | 14.10 | 17.01 | $N_2$-0.3 MPa-1 s | 14.04 | 17.36 | $N_2$-0.4 MPa-1 s | 13.96 | 17.83 |
| $N_2$-0.2 MPa-2 s | 13.18 | 22.43 | $N_2$-0.3 MPa-2 s | 12.25 | 27.90 | $N_2$-0.4 MPa-2 s | 11.78 | 30.66 |
| $N_2$-0.2 MPa-3 s | 11.73 | 30.96 | $N_2$-0.3 MPa-3 s | 7.27 | 57.20 | $N_2$-0.4 MPa-3 s | 6.73 | 60.39 |

从火焰传播速度角度分析，随初始温度增加，燃烧爆炸反应速率随之增加[16]，火焰传播速度也与甲烷爆炸过程中的温度有关。试验管道内甲烷被引爆后会形成两波三区结构，即前驱冲击波阵面和火焰波阵面，前驱冲击波前无扰区、预热区和火焰后区[17]。火焰波阵面也就是化学反应区，此区域内能够产生大量热量和自由基。预热区是前驱冲击波已经经过但是火焰阵面还没到达，这一区域内的混合气体受到火焰波阵面热辐射作用温度升高，此时预热区内的混合气所具有的起爆条件要强于初始状态，相当于混合气体的“初始温度”变高，在遇到火焰波时就能够更快的被点燃。火焰波内反应速度加快，也就是在更短的时间内放出更多的热量，温度也就增加的越快，正反馈于燃烧速度，促进了火焰传播速度。

在爆炸体系内施加双流体细水雾后，水雾具有高热容(2 450 kJ/kg)，在预热区内吸收火焰波的辐射热，降低这一区域的温度。细水雾在遇到爆炸火焰时蒸发对火焰阵面有较强的气相吸热、冷却作用[18]。本实验中细水雾的粒径为 10～20 μm，在遇到火焰时可以快速蒸发吸收大量热量，同时也降低火焰向预热区的辐射强度。在爆炸体系内 $N_2$ 分子作为第三体，参与瓦斯爆炸链式反应中三元碰撞，在较大的爆炸压力下，大量的自由基能量转移到 $N_2$ 分子上[19]，减少了化学反应区内和向预热区传递的自由基。$N_2$ 具有置换氧气的作用[20]能够减少反应物与氧气碰撞的频率。两者的共同作用导致了化学反应速率的降低，降低了火焰传播速度。而同一喷雾压力下延长喷雾时间，增加了 $N_2$ 的浓度和细水雾量，由于 $N_2$ 具有良好的空间弥散性，也使细水雾更加均匀地分散在管道内，增强了两者的抑制作用。因此，随着喷雾时间的延长，火焰传播速度峰值逐渐减小，可以提高双流体细水雾的抑爆效果。

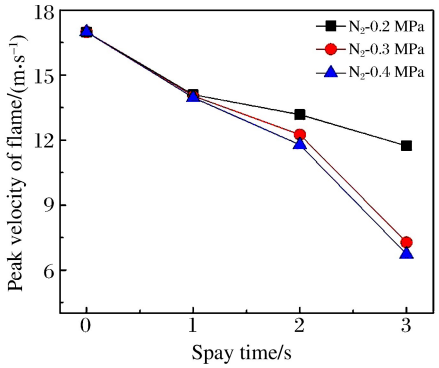



图 4　$N_2$ 双流体细水雾火焰速度峰值

Fig. 4　Peak velocity of flame with $N_2$ twin-fluid

## 2.2　$N_2$ 双流体细水雾对爆炸超压的影响

图 5 是不喷雾和 $N_2$ 喷雾压力分别为 0.2、0.3、0.4 MPa、喷雾时间分别为 1、2、3 s 时，点燃 9.5% $CH_4$-空气的爆炸超压对比图。由图 5 可看出爆炸超压先增大后减小，甲烷被点燃后，化学反应产生的自由基使反应速率快速提高，爆炸管道内短时间积聚了大量的热量，这些热量使管道内的气体快速膨胀，在受限空间内快速膨胀的气体导致管道内压力上升，产生的冲击波向前传播冲破出口端的 PVC 薄膜后压力骤然下降。在管道内施加双流体细水雾时，爆炸超压也是先增大后减小。不喷雾时超压峰值为 31.915 kPa，表 2 为不同喷雾条件下的朝下峰值下降比例。如表 2 所示，与不喷雾条件下爆炸超压相比，喷雾条件下的爆炸超压峰值均有不同程度的降低，其中爆炸超压最大下降比例达到 37.76%。如图 6 所示，在同一喷雾压力下随着喷雾时间的延长，爆炸超压的峰值逐渐下降。从爆炸超压的速度峰值下降可以看出双流体细水雾可以有效抑制爆炸超压。

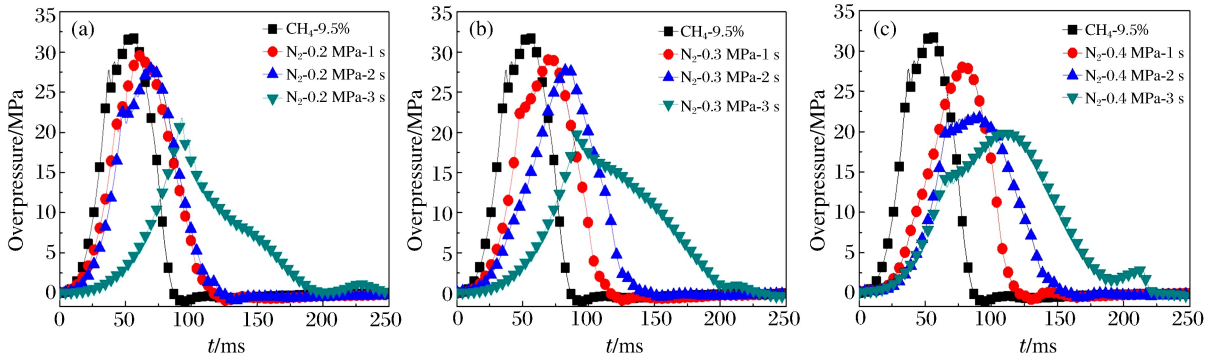



图 5　$N_2$ 双流体细水雾压力曲线

Fig. 5　Pressure curve with $N_2$ twin-fluid

**表 2　不同压力不同喷雾时间下超压峰值的下降比例**

**Table 2　Decline proportion of the peak overpressure under different pressure and at different times**

| 工况 | 超压峰值/($10^4$ Pa) | 下降比例/% | 工况 | 超压峰值/($10^4$ Pa) | 下降比例/% | 工况 | 超压峰值/($10^4$ Pa) | 下降比例/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $N_2$-0.2 MPa-1 s | 2.978 2 | 6.68 | $N_2$-0.3 MPa-1 s | 2.917 2 | 8.59 | $N_2$-0.4 MPa-1 s | 2.814 5 | 11.81 |
| $N_2$-0.2 MPa-2 s | 2.792 2 | 12.51 | $N_2$-0.3 MPa-2 s | 2.776 8 | 12.99 | $N_2$-0.4 MPa-2 s | 2.202 9 | 30.98 |
| $N_2$-0.2 MPa-3 s | 2.179 3 | 31.72 | $N_2$-0.3 MPa-3 s | 1.996 3 | 37.45 | $N_2$-0.4 MPa-3 s | 1.986 4 | 37.76 |

平均升压速率的定义为[21]

$$\bar{p}=\frac{p_{\max}-p_0}{\Delta t} \tag{2}$$

式中：$p_{\max}$为压力峰值，$p_0$ 为初始压力。

不喷雾时 9.5%$CH_4$-空气爆炸的平均升压速率为 575 kPa/s。表 3 给出不同喷雾条件下的平均升压速率。由表 3 可以得出 $N_2$ 喷雾压力为 0.2 MPa 下喷雾时间分别为 1、2、3 s 的平均升压速率相比不喷雾时分别降低了 13.91%、30.43%、59.13%；$N_2$ 喷雾压力为 0.3 MPa 下喷雾时间分别为 1、2、3 s 的平均升压速率相比不喷雾时分别降低了 30.1%、43.13%、62.09%；$N_2$ 喷雾压力为 0.4 MPa 下喷雾时间分别为 1、2、3 s 的平均升压速率相比不喷雾时平分别降低了 41.74%、56.87%、68.52%。

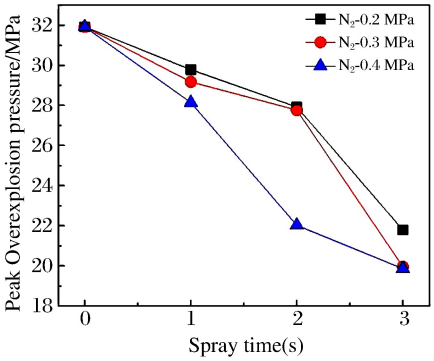



图 6 $N_2$ 双流体细水雾爆炸超压峰值

Fig. 6 Peak explosion pressure with $N_2$ twin-fluid

**表 3 不同压力不同喷雾时间下平均升压速率**

**Table 3 Average pressure rise rate under different pressure and at different times**

| 工况 | 平均升压速率/(kPa·s$^{-1}$) | 工况 | 平均升压速率/(kPa·s$^{-1}$) | 工况 | 平均升压速率/(kPa·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| $N_2$-0.2 MPa-1 s | 495 | $N_2$-0.3 MPa-1 s | 402 | $N_2$-0.4 MPa-1 s | 335 |
| $N_2$-0.2 MPa-2s | 400 | $N_2$-0.3 MPa-2 s | 327 | $N_2$-0.4 MPa-2 s | 248 |
| $N_2$-0.2 MPa-3s | 235 | $N_2$-0.3 MPa-3 s | 218 | $N_2$-0.4 MPa-3 s | 181 |

在同一喷雾压力下随着喷雾时间的延长，平均升压速率相比不喷雾时有不同程度的降低。这是由于细水雾蒸发吸热，降低了管道内的温度[22]。甲烷爆炸化学反应的速率受温度的影响很大，根据阿仑尼乌斯公式[19]：$K=ce^{-E/RT}$，氧化反应速率常数 $K$ 随着温度 $T$ 的降低而减小，从而导致热释放速率的减小。而加入的 $N_2$ 会参与爆炸链式反应中的三元碰撞反应，吸收自由基能量，从而使自由基浓度进一步降低。细水雾与 $N_2$ 的作用形成正反馈，大大降低了甲烷氧化反应速率。爆炸化学反应速率和热释放速率的降低导致管内气体吸热膨胀速度的降低，减小了爆炸升压速率。

管道内压力的上升与燃烧产物体积的增加和未燃气体的移动的差异有关：

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=4\pi r_{\mathrm{f}}^2 s_{\mathrm{f}}(\alpha-1) \tag{3}$$

式中：$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 为净体积生成率，$r_{\mathrm{f}}$ 为火焰前端的半径，$s_{\mathrm{f}}$ 为火焰速度，$\alpha$ 为体积膨胀系数。

预混气体在有水存在的情况下将会改变平衡影响膨胀系数 $\alpha$[23]。而甲烷爆炸的最终化学反应式可表示为 $CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O+833.28$ J/mol[24]，瓦斯爆炸过程中生成的水是以水蒸气状态存在的。本实验中细水雾粒径为 10～20 μm 极易蒸发，爆炸过程中雾滴遇火焰蒸发形成水蒸气，根据勒夏特列原理(平衡移动原理)水蒸气的增多相当于增加了生成物的量，会促使甲烷爆炸化学反应向逆方向进行，从而减少了参与反应的甲烷的量，减小了爆炸体系的温度和释放的能量，减小了管内气体的膨胀程度，从而降低了爆炸超压峰值。实验中 $N_2$ 双流体细水雾作用时爆炸超压峰值最大降低了 37.76%，由此可以得出：延长喷雾时间，可以有效地降低爆炸超压峰值和升压速率，减小爆炸强度。

## 3 结 论

自行设计搭建了双流体抑制瓦斯爆炸实验平台，对不同喷雾压力和喷雾时间下 $N_2$ 双流体细水雾对 9.5%$CH_4$-空气爆炸抑制效果的影响进行了研究，得出了以下结论。(1) 在同一喷雾压力下，随着喷雾时间的延长，爆炸火焰的速度峰值逐渐下降。当 $N_2$ 压力为 0.4 MPa 喷雾时间 3 s 时，火焰传播速度峰值最降低了 60.42%。(2) 在同一喷雾压力下，随着喷雾时间的延长，爆炸火焰的速度峰值逐渐下降。

当 $N_2$ 压力为 0.4 M{a 喷雾时间 3 s 时，爆炸超压峰值降低了 37.76%，平均升压速率降低比例达到 68.52%。(3) 从爆炸火焰的速度峰值、爆炸超压峰值和平均升压速率 3 个方面的变化趋势可以看出，在同一喷雾压力下，延长喷雾时间能够很好地抑制管道瓦斯爆炸，减少爆炸的强度。(4) 喷雾系统采用双流体方式，$N_2$ 在提高雾化效果的同时参与抑制瓦斯爆炸，可以提高喷雾系统的抑爆效率。

## 参考文献：


[1] 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)：417-421.
Lu Shouxiang，He Jie，Yu Chunhong，et al. Study on mechanism of gas explosion suppression by water[J]. Journal of Coal Science，1998，23(4)：417-421.

[2] 余明高，安安，游浩. 细水雾抑制管道瓦斯爆炸的实验研究[J]. 煤炭学报，2011，36(3)：417-422.
Yu Minggao，An An，You Hao. Experimental study on inhibiting the gas explosion by water spray in tube[J]. Journal of Coal Science，2011，36(3)：417-422.

[3] 毕明树，李铮，张鹏鹏. 细水雾抑制瓦斯爆炸的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报，2012，29(3)：440-443.
Bi Mingshu，Li Zheng，Zhang Pengpeng. Experimental investigation on suppression of gas explosion with water mist[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2012，29(3)：440-443.

[4] 谢波，范宝春，夏自柱，等. 大型通道中主动式水雾抑爆现象的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(2)：151-156.
Xie Bo，Fan Baochun，Xia Zizhu，et al. Experimental study on explosion suppression of active water mist in large channel[J]. Explosion and Shock Waves，23(2)：151-156.

[5] 唐建军. 细水雾抑制瓦斯爆炸实验与数值模拟研究[D]. 西安：西安科技大学，2009.

[6] Wingerden K V. Mitigation of gas explosions using water deluge[J]. Process Safety Progress，2000，19(3)：173-178.

[7] 张鹏鹏. 超细水雾增强与抑制瓦斯爆炸的实验研究[D]. 大连：大连理工大学，2013.

[8] Medvedev S P，Gel'fand B E，Polenov A N，et al. Flammability limits for hydrogen-air mixtures in the presence of ultrafine droplets of water (fog)[J]. Combustion，Explosion，and Shock Waves，2002，38(4)：381-386.

[9] 余明高，赵万里，安安. 超细水雾作用下瓦斯火焰抑制特性研究[J]. 采矿与安全工程学报，2011，28(3)：493-498.
Yu Minggao，Zhao Wanli，An An. Study on the inhibiting effectiveness on gas flame under the effort of ultra-fine water mist[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2011，28(3)：493-498.

[10] 牛慧昌. 含添加剂细水雾灭火性能实验研究[D]. 沈阳：沈阳航天航空大学，2011.

[11] 陆强，黄鑫，何宁. 双流体细水雾抑制熄灭油池火的实验研究[J]. 消防科学与技术，2009，28(1)：1-4.
Lu Qiang，Huang Xin，He Ning. Experimental study on the suppression of pool fire with twin fluid water mist [J]. Fire Science and Technology，2009，28(1)：1-4.

[12] 钱海林，王志荣，蒋军成. $N_2/CO_2$ 混合气体对甲烷爆炸的影响[J]. 爆炸与冲击，2012，32(4)：445-448.
Qian Hailin，Wang Zhirong，Jiang Juncheng. Effect of $N_2/CO_2$ mixed gas on methane explosion[J]. Explosion and Shock Waves，2012，32(4)：445-448.

[13] Pei B，Yu M，Chen L，et al. Experimental study on the synergistic inhibition effect of nitrogen and ultrafine water mist on gas explosion in a vented duct[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2016，40：546-553.

[14] 陈东梁，孙金华，刘义，等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征[J]. 爆炸与冲击，2008，28(5)：387-390.
Chen Dongliang，Sun Jinhua，Liu Yi，et al. Propagation characteristics of methane/air premixed gas flame[J]. Explosion and shock waves，2008，28(5)：387-390.

[15] 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. Study on flame propagation velocity of gas explosion based on Matlab image processing[J]. Journal of Safety and Environment，2014，14(1)：6-9.

[16] 黄子超，司荣军，张延松，等. 初始温度对瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J]. 煤矿安全，2012，43(5)：5-11.
Huang Zichao，Si Rongjun，Zhang Yansong，et al. Numerical simulation of the influence of initial temperature on gas explosion characteristics[J]. Coal Mine Safety，2012，43(5)：5-11.

[17] 李润之. 不同总量沉积煤尘在瓦斯爆炸诱导下的传播规律模拟研究[J]. 矿业安全与环保，2013，40(1)：17-20.
Li Runzhi. Simulation study on propagation law of different-amount deposited coal dust explosion induced by gas

explosion[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2013,40(1):17-20.

[18] 薛少谦,司荣军,张延松.细水雾抑制瓦斯爆炸试验研究[J].矿业安全与环保,2013,40(1):4-7.
Xue Shaoqian, Si Rongjun, ZhangYansong. Experimental study of gas explosion suppression by water mist[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2013,40(1):4-7.

[19] 邱雁,高广伟.充注惰气抑制矿井火区瓦斯爆炸机理[J].煤矿安全,2003,34(2):8-11.
Qiu Yan, Gao Guangwei. Filling inert gas coal mine gas explosion suppression mechanism[J]. Coal Mine Safety, 2003,34(2):8-11.

[20] Ingram J M, Averill A F, Battersby P N, et al. Extinction of premixed methane-air flames by water mis:Part1. Burning velocityt [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37:19250-19257.

[21] 秦文茜,王喜世,谷睿,等.超细水雾下瓦斯的爆炸压力和升压速率[J].燃烧科学与技术,2012,18(1):90-95.
Qin Wenqian, Hei Wong, Gu Rui, et al. Methane explosion overpressure and overpressure rise rate with suppression by ultra-fine water Mist[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012,18(1):90-95.

[22] 裴蓓,余明高,陈立伟,等.$CO_2$-双流体细水雾抑制管道甲烷爆炸实验[J].化工学报,2016,67(7):3101-3108.
Pei Bei, Yu Minggao, Chen Liwei, et al. Suppression effect of $CO_2$-twin fluid water mist on methane/air explosion in vented duct[J]. Journal of Chemical Engineering, 2016,67(7):3101-3108.

[23] Battersby P N, Averill A F, Ingram J M, et al. Suppression of hydrogen-oxygen-nitrogen explosion by fine water mist: Part 2. Mitigation of vented deflagrations[J]. International Iournal of Hydrogen Energy, 2012,37:19258-19267.

[24] 贾宝山,温海燕,梁运涛,等.煤矿巷道内 $N_2$ 及 $CO_2$ 抑制瓦斯爆炸的机理特性[J].煤炭学报,2013,38(3):361-366.
Jia Baoshan, Wen Haiyan, Liang Yuntao, et al. Mechanism characteristics of $CO_2$ and $N_2$ inhibiting methane explosions in coal mine roadways[J]. Journal of Coal Science, 2013,38(3):361-366.

# Experimental study of methane explosion suppression by nitrogen twin-fluid water mist

Yu Minggao[1,2], Yang Yong[1,2], Pei Bei[1,2], Niu Pan[1,2], Zhu Xinna[1,2]

(1. *School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454003, *Henan*, *China*;
2. *State Key Laboratory of Cultivation Bases Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo* 454003, *Henan*, *China*)

**Abstract**: In this work, to obtain a water mist with a finer particle size under lower pressures, reduce the running costs of the explosion-suppressing spray system, and improve its efficiency and applicability, we designed a transparent organic glass pipeline (120 mm×120 mm×840 mm) as the experimental platform for gas explosion. Then $N_2$ and fine water mist was pressed into the pipeline using a twin-fluid nozzle and experimental study of methane explosion suppression by nitrogen twin-fluid water mist was carried out adjusting the spray pressure and spray time and the explosion-suppression effectiveness of the twin-fluid water mist was investigated via analysis of the flame speed and the gas explosion overpressure. The results show that this twin-fluid water mist has a high explosion-suppressing efficiency, capable of reducing the damage degree of gas explosion. With the extension of the spray time, the peak value of the explosion flame speed, the peak overpressure and the average pressure rise rate decreased gradually. When the pressure of $N_2$ was 0.4 MPa and the spray time was 3 s, the peak value of the velocity decreased by 60.39%, and the peak overpressure decreased by 37.76%.

**Keywords**: twin-fluid; nitrogen; fine water mist; gas explosion

(责任编辑 王小飞)