

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0456

## 三种盐类超细水雾抑制管道内 甲烷-空气预混气爆炸的差异性\*

贾海林<sup>1,2</sup>, 翟汝鹏<sup>1,2</sup>, 李第辉<sup>1,2</sup>, 项海军<sup>1,2</sup>, 杨永钦<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000;

2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 针对管道输送可燃气体时爆炸引发的连锁安全问题, 自行搭建了两节管道预混气爆炸传播及抑爆实验系统, 开展了不同种类、不同盐类质量分数和不同雾通量的盐类超细水雾抑制甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气预混气爆炸的系列实验。基于火灾学和爆炸学理论, 深入探讨了不同实验工况下爆炸超压振荡曲线、最大超压峰值、爆炸火焰阵面位置、火焰平均传播速度和火焰结构演化的差异性。研究表明: 随着盐类添加剂 (NaCl、NaHCO<sub>3</sub> 和 MgCl<sub>2</sub>) 质量分数和雾通量的增大, 最大爆炸超压峰值相对于纯水超细水雾作用时呈不同幅度下降, 爆炸超压振荡曲线上升趋势缓慢, 火焰平均传播速度下降趋势明显。爆炸火焰锋面在管道 B 内呈现不同次数的后退现象, 到达管道末端的时间较纯水雾和纯水超细水雾下延迟效应明显。通过比较分析, 发现含 NaCl 超细水雾在弱化爆炸超压、延缓火焰锋面推进、降低火焰平均传播速度以及火焰后退次数方面均优于含 MgCl<sub>2</sub> 和 NaHCO<sub>3</sub> 超细水雾。主要原因在于, 阴离子 Cl<sup>-</sup> 销毁链式爆炸反应中 OH·、H· 自由基的能力强于 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 阳离子 Na<sup>+</sup> 销毁爆炸反应中 OH·、H· 自由基的能力强于 Mg<sup>2+</sup>。

**关键词:** 盐类超细水雾; 管道预混气爆炸; 爆炸超压振荡曲线; 火焰后退次数; 自由基销毁能力

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Differences of premixed methane-air explosion in pipelines suppressed by three ultrafine water mists containing different salts

JIA Hailin<sup>1,2</sup>, ZHAI Rupeng<sup>1,2</sup>, LI Dihui<sup>1,2</sup>, XIANG Haijun<sup>1,2</sup>, YANG Yongqin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University,

Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University,

Jiaozuo 454000, Henan, China)

**Abstract:** In order to solve the safety problem caused by flammable gas explosion in pipeline transportation, an experimental system for premixed gas explosion and explosion suppression in multiple pipelines was self-built. And then a series of premixed methane-air explosion and explosion suppression experiments were carried out under the ultrafine water mists without or with three kinds of salts in the different working conditions including the different salt mass fractions and the different mist fluxes. In the experiments, the methane volume fraction in the premixed methane-air mixture was 9.5%, and three salts used as additives were NaCl, NaHCO<sub>3</sub> and MgCl<sub>2</sub>. According to the theories of fire science and explosion science, the different changes in the explosion characteristics were explored involving the oscillation curves and the maximum peak values of explosion overpressure, the front positions and the average propagation velocities of the explosion flame, the

\* 收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-05-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC0807900); 国家自然科学基金 (51304069);  
教育部创新团队发展支持计划 (IRT\_16R22)

第一作者: 贾海林 (1980—), 男, 博士, 副教授, [jiahailin@126.com](mailto:jiahailin@126.com)

通信作者: 杨永钦 (1964—), 男, 硕士, 高级工程师, [xfzdyyq@163.com](mailto:xfzdyyq@163.com)

evolution images of the flame structure in pipe B. The results show that with the increases of salt mass fractions and ultrafine water mist fluxes with salts (NaCl, NaHCO<sub>3</sub> and MgCl<sub>2</sub>), the maximum peaks of explosion overpressure decreased by different amplitudes compared with those under the action of pure water mist, the oscillation curves of explosion overpressure increased slowly, and the average propagation velocities of explosion flame decreased significantly. The explosion flame fronts receded different times in the pipe B. And the times when the explosion flames reached the terminal end of the pipe B delayed obviously compared with those with or without the pure ultrafine water mist. Comparisons display that the ultrafine water mist containing NaCl is superior to the ones containing MgCl<sub>2</sub> and NaHCO<sub>3</sub>, respectively, in weakening the explosion overpressure, delaying the advance of the flame front position, decreasing the average flame propagation velocity, and reducing the receding times of the explosion flame front. The primary reason is that the ability of the anion Cl<sup>-</sup> to destroy OH· and H· radicals in chain explosion reactions is stronger than that of the anion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and the ability of the cation Na<sup>+</sup> to destroy OH· and H· radicals in explosion reactions is stronger than that of the cation Mg<sup>2+</sup>.

**Keywords:** ultrafine water mist with salts; premixed gas explosion in pipeline; oscillation curve of explosion overpressure; rollback number of explosion flame; destruction ability of free radical

随着生态环保意识的提高,使用清洁能源代替煤炭资源受到了极大重视<sup>[1]</sup>。各地区也都积极地实施煤改气工程,然而天然气富集区向燃气需求区输送过程中敷设的长距离管网存在一定的安全风险,有引发管网爆炸事故的风险,如2014年高雄燃气管网爆炸,2018年波士顿的燃气管网爆炸。

针对预混气燃爆机理及传播特性的研究已经卓有成效<sup>[2-5]</sup>。陈鹏等<sup>[6]</sup>研究发现甲烷/空气预混气爆炸受遮挡物影响会出现火焰逆流并持续加速现象。周宁等<sup>[7]</sup>通过改变遮挡物的间距及阻塞比发现遮挡物间距为管长1倍时,丙烷/空气预混气爆炸火焰加速明显。为了抑制预混气爆炸危害,细水雾或含添加剂细水雾常被应用于燃爆场所<sup>[8-14]</sup>。裴蓓等<sup>[15]</sup>研究CO<sub>2</sub>和超细水雾协同抑制甲烷/空气预混气爆炸时,发现CO<sub>2</sub>能够有效弥补超细水雾的不足。纪虹等<sup>[16]</sup>研究了不同雾通量的超细水雾降解与抑制甲烷爆炸的特性,认为随着雾通量的增大,甲烷的降解速率会加快;管道内爆炸超压、平均压升速率呈现下降的趋势。Rui等<sup>[17]</sup>研究了不同体积分数的超细水雾对不同浓度甲烷爆炸的抑制作用。Modak等<sup>[18]</sup>认为粒径小的细水雾较粒径大的细水雾的抑制效率高。杨克等<sup>[19]</sup>对比分析了含不同浓度草酸钾的超细水雾对甲烷的抑爆特性,发现浓度为2%草酸钾抑爆效果最佳。Joseph等<sup>[20]</sup>认为含NaCl、KCl和KHCO<sub>3</sub>的细水雾可有效提高灭火效率,而含(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>细水雾的灭火效果不佳。余明高等<sup>[21-22]</sup>开展了含MgCl<sub>2</sub>、FeCl<sub>2</sub>细水雾和含NaCl的荷电超细水雾抑制单管瓦斯爆炸的实验,发现含添加剂细水雾和带荷电的超细水雾均能抑制和降低爆炸传播速度和火焰温度。Gan等<sup>[23]</sup>进行了含NaCl和NaHCO<sub>3</sub>细水雾对PMMA粉尘爆炸抑制实验,指出含添加剂细水雾能够降低火焰传播速度、最高温度和升温速率。陈晓坤等<sup>[24]</sup>通过比较单管道内含NaHCO<sub>3</sub>、KCl细水雾与纯水细水雾的抑爆性能,认为含添加剂超细水雾抑爆效率显著。Cao等<sup>[25-27]</sup>开展了含NaCl超细水雾抑制密闭管道内不同浓度甲烷/空气的爆炸实验,结果表明添加NaCl可以明显改善超细水雾的冷却作用和吸热效果。

综合前人研究发现,关于细水雾抑制预混气爆炸的实验主要集中在单段管道,且细水雾粒径多为Ⅱ级,对于预混气爆炸跨越至后续管网的传播特性、抑爆规律以及盐类超细水雾的综合作用的研究相对较少。针对现实中燃气采用管道输运这一现状,搭建两节管道预混气爆炸传播及抑爆实验系统,开展不同种类、不同盐类质量分数及不同雾通量盐类超细水雾抑制甲烷体积分数为9.5%的甲烷-空气预混气的爆炸实验,分析不同工况下爆炸超压、火焰锋面及火焰平均传播速度的变化,以期研究结果可为燃气安全输运及燃爆事故预防提供指导。

## 1 管道预混气爆炸传播及抑爆系统

### 1.1 实验系统组成及功能

为研究和对比分析管道预混气爆炸特征和盐类超细水雾的抑爆效果,自主搭建了两节管道预混气

爆炸传播及抑爆实验系统(见图 1), 该系统由预混气配置单元、管道预混气爆炸单元、爆炸超压及火焰信息采集单元和超细水雾雾化单元组成。预混气配置单元包括空压机、高纯高压甲烷气体存储钢瓶、阀门、耐高压树脂软管、快速接头、质量流量计等组成。管道预混气爆炸单元由两段长度为 50 cm、截面为 10 cm×10 cm、耐压 2 MPa 的有机玻璃管道(A、B)和点火系统组成。管道 A、B 采用法兰连接并在连接处用 PVC 膜将其分隔, 然后将密封胶垫置于 PVC 膜外侧, 确保管道连接的密闭性。管道 A 的右端采用不锈钢板密闭, 钢板上分别设置有点火器、高频压力传感器和进气阀门预留孔。管道 B 左端采用 PVC 膜密封, 作为预混气爆炸时的泄压口。点火系统采用陶瓷钨棒材料制成的点火电极和 HE119 系列的高能点火器, 点火器间距为 5 mm, 放电电压为 6 kV, 工作频率为 50 Hz。爆炸超压及火焰信息采集单元由高频压力传感器、USB-1608FS 型数据采集卡、M310 型高速摄像机和计算机组成。高频压力传感器工作范围为 -0.1~0.2 MPa, 响应时间为 0.2 ms, 精度为 0.25%。高速摄像机最短曝光时间不长于 1 μs, 最高分辨率为 1 024×1 024。实验过程中信号采集频率均为 15 kHz, 选取的拍摄频率为 3 200 s<sup>-1</sup>。为准确测定起爆时间, 将 RL-1 型光电传感器置于管道 A 的外侧, 探头倾斜放置并指向点火电极。超细水雾雾化系统由超声雾化装置、密闭树脂储水箱及水雾导流管组成, 其中压电陶瓷雾化片的雾化速率约为 4.2 mL/min, 工作频率为 1 700 kHz。实验系统可实现以下功能: (1) 研究不同类型、不同体积分数预混气在不同管段的爆炸超压、火焰锋面传播特性; (2) 分析不同雾通量纯水超细水雾抑制预混气爆炸的弱化效果; (3) 开展不同类型、不同盐类质量分数、不同雾通量盐类超细水雾抑制预混气爆炸的抑制实验。

## 1.2 超细水雾粒径分布测定

水雾粒径采用相位多普勒激光测速仪进行测量。该仪器主要应用于雾化测量以及气固两相测量, 主要由激光器、发射(接收)光路系统、信号处理系统、全自动位移系统和数据处理系统构成。粒径测量范围为 0.3~7 000 μm, 测量精度为 ±0.5 μm。实验中盐类超细水雾的水雾粒径分布见图 2。由图 2 可知, 粒径总体分布在 0~20 μm, 且水雾粒径大部分在 0~10 μm。根据 NFPA750 标准中细水雾的分级分类<sup>[28]</sup>可知, 90% 以上的细水雾粒径小于 200 μm 被定义为第 I 级。秦俊等<sup>[29]</sup>认为水雾平均粒径的索太尔平均直径小于 50 μm 的可以称为超细水雾。因此, 本实验雾化系统所产生的水雾可称为超细水雾。

## 1.3 实验工况及过程

实验前预先分别配置盐类质量分数为 2%、4%、6% 和 8% 的 NaCl、MgCl<sub>2</sub> 和 NaHCO<sub>3</sub> 溶液。为使爆炸单元管道 A、B 内预混气(CH<sub>4</sub> 与空气的混合气体)的化学当量比为 9.5%, 实验配气基于分压法计算管道 A、B 内需要的通气量。实验过程: (1) 检查仪器并调试, 确保测试系统处于待机状态; (2) 将 PVC 薄膜紧贴于管道 A 和 B 之间、管道 B 末端, 之后同时打开管道 A、B 的进气阀和出气阀, 通入 4 倍于管道容

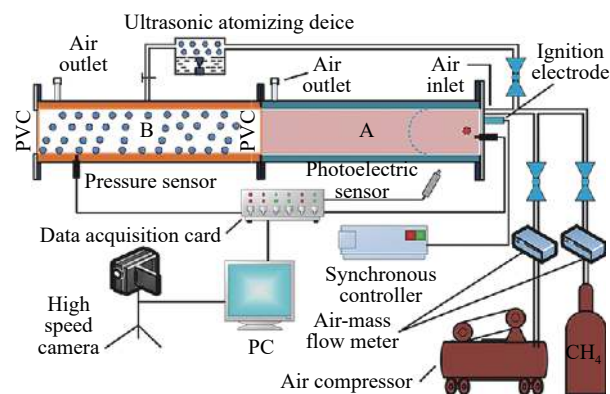


图 1 两节管道预混气爆炸及抑爆实验系统

Fig. 1 Experimental system for the premixed gas explosion and explosion suppression in a two-section pipeline

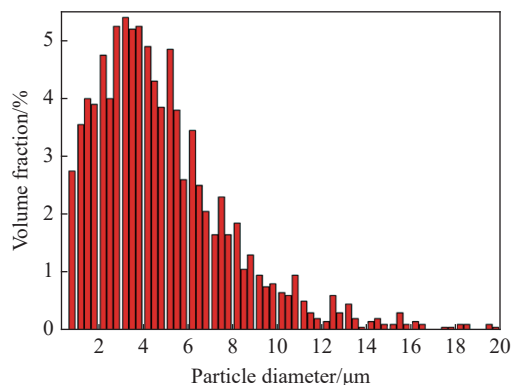


图 2 超声雾化产生的细水雾粒径分布

Fig. 2 Particle diameter distribution of water mist generated by ultrasonic atomization

积的预混气体于管道 A、B 中, 充气时间设定为 8 min, 保证管道内部气体置换完全; (3) 保持管道 B 与超声雾化装置间的进气阀处于开启状态, 并启动超声雾化装置; (4) 按照不同的工况通入相应的水雾量(0、2.1、4.2、6.3 和 8.4 mL), 充气和管道 B 内通细水雾全部结束后, 关闭进气阀和出气阀, 启动点火器, 同时采集压力数据并存储拍摄到的火焰图像; (5) 重复上述步骤, 进行下一次实验, 每次实验前需将拆卸下的管道 B 用吹风机吹干, 每组工况重复 3~5 次。

## 2 预混气爆炸及抑爆实验分析

### 2.1 不同盐类超细水雾对爆炸超压振荡曲线及最大超压峰值的影响

不同水雾通入量和不同盐类质量分数的盐类超细水雾抑制甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气预混气的爆炸超压  $p$  曲线及最大超压  $p_{\max}$  变化情况如图 3~6 所示。提取图 3(a)、4(a) 和 5(a) 不同工况下的爆炸超压最大值, 计算同一雾通量  $V$ 、不同盐类质量分数  $w$  下的最大爆炸超压变化值  $\Delta p_{\max}$  以及增幅  $\eta$ , 汇总在表 1~3 中。

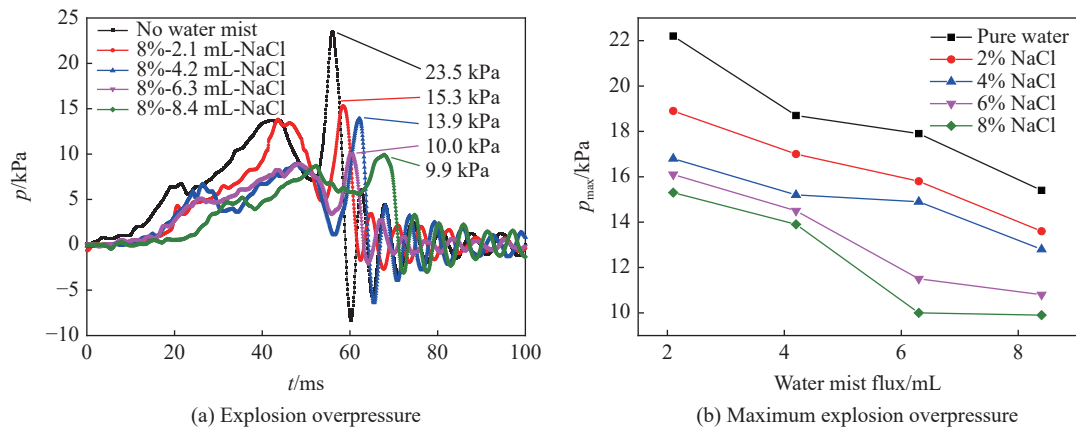


图 3 NaCl 超细水雾对甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气预混气的爆炸超压振荡曲线及最大超压峰值的影响  
Fig. 3 Explosion overpressure-time curves and the maximum explosion overpressures affected by water mists containing NaCl for premixed methane-air mixture with the methane volume fraction of 9.5%

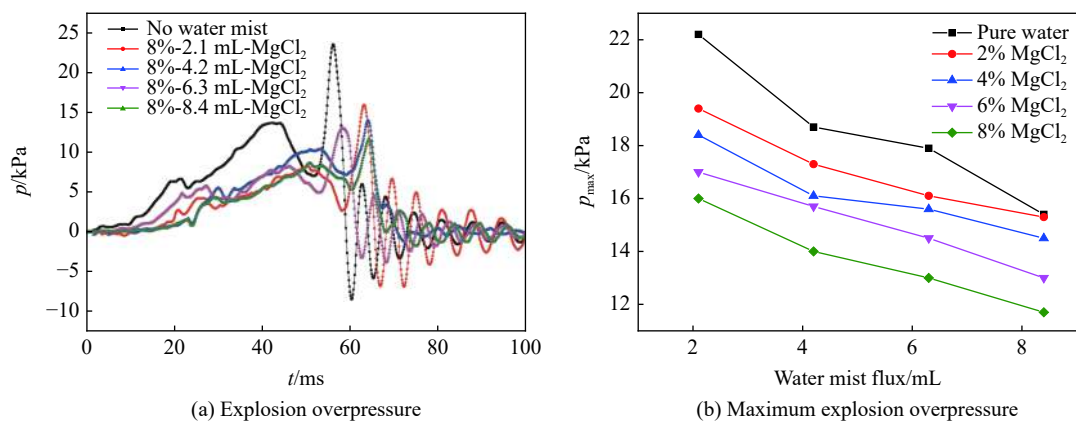


图 4 MgCl<sub>2</sub> 超细水雾对甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气预混气的爆炸超压振荡曲线及最大超压峰值的影响  
Fig. 4 Explosion overpressure-time curves and the maximum explosion overpressures affected by water mists containing MgCl<sub>2</sub> for premixed methane-air mixture with the methane volume fraction of 9.5%

观察图 3(a)、4(a) 和 5(a) 知, 随着时间的推移, 爆炸超压曲线呈现出多个峰值。爆炸超压曲线在达到最大值前出现 2 个波峰: 第 1 个波峰是由于爆炸形成的前驱压力波冲破管道 A、B 间的薄膜后泄压引起

的,使超压呈现先上升后下降的趋势;第 2 个波峰是由于前驱压力波冲破管道 B 左端的薄膜泄压造成的。末端管道破膜后未燃预混气因管道压力骤变而卷吸进入爆炸反应区,导致爆炸火焰继续向末端管道传播,前驱压力波使得末端管道的薄膜再次进一步破裂。当爆炸反应所产生的能量与周围环境吸收而消耗的能量相等时,爆炸超压处于最大峰值,对应于图 3(a)、4(a) 和 5(a) 的最大峰值,也即第 3 个波峰。之后,随着器壁的冷却效应、周围环境等因素消耗的能量大于反应所放出的能量时,压力呈现下降趋势。

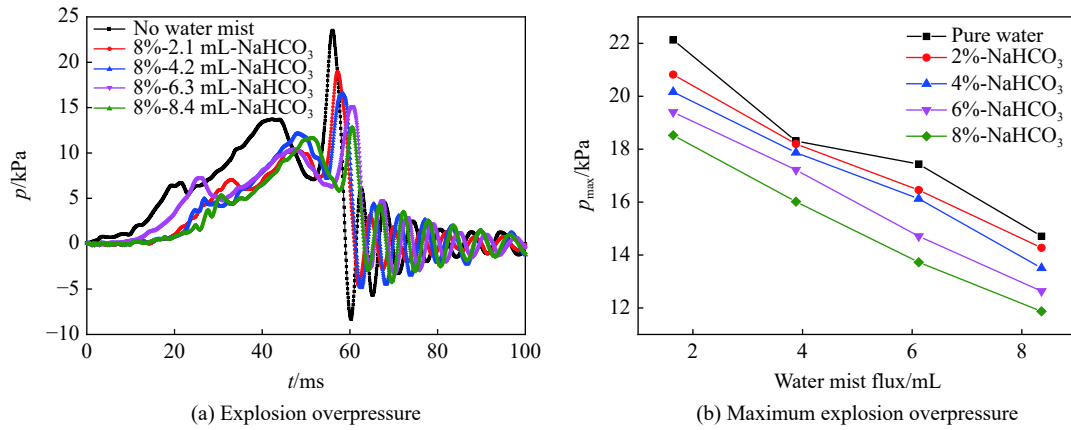


图 5 NaHCO<sub>3</sub> 超细水雾对甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气预混气的爆炸超压振荡曲线及最大超压峰值的影响  
 Fig. 5 Explosion overpressure-time curves and the maximum explosion overpressures affected by water mists containing NaHCO<sub>3</sub> for premixed methane-air mixture with the methane volume fraction of 9.5%

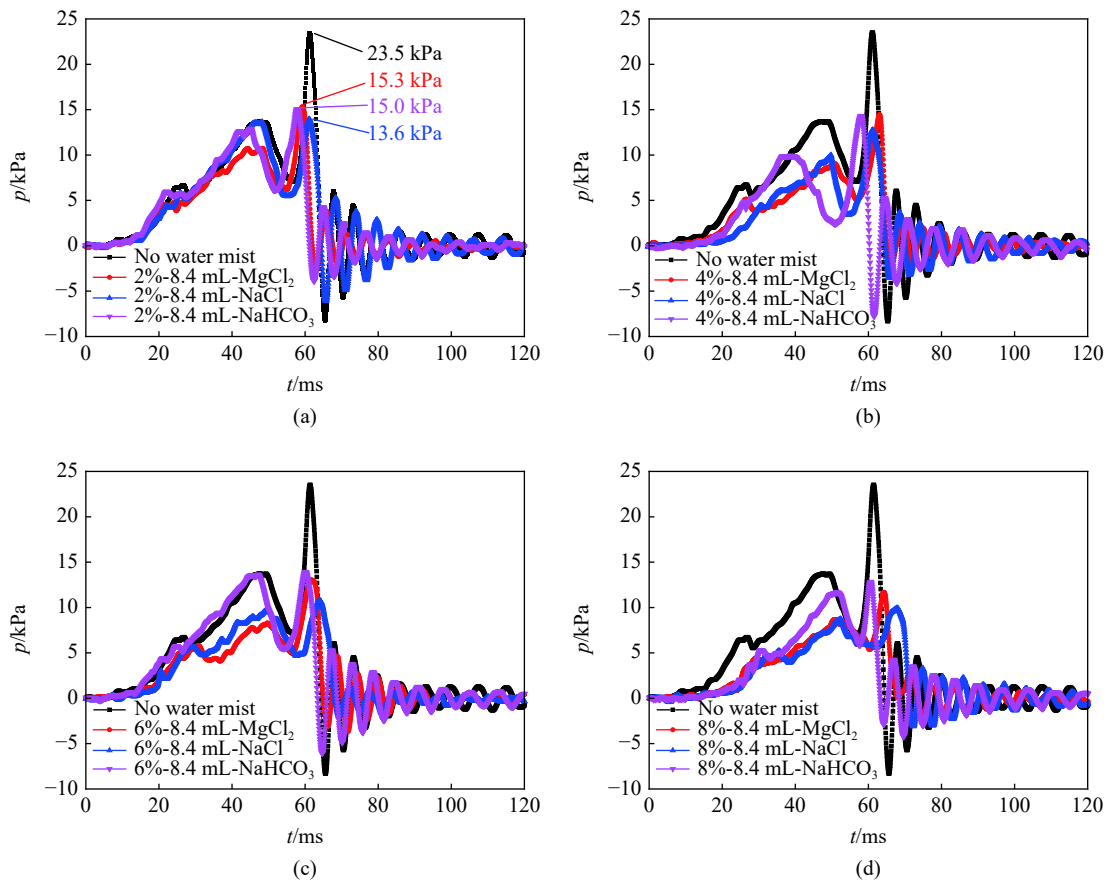


图 6 雾通量均为 8.4 mL、盐类质量分数不同的不同盐类超细水雾作用下爆炸超压变化的差异性  
 Fig. 6 Differences of the explosion overpressures affected by ultrafine water mists with three different salts and different salt mass fractions under the same mist flux

表1 NaCl超细水雾作用下最大爆炸超压的变化

| w/% | V/mL | $p_{\max}$ /kPa | $\Delta p_{\max}$ /kPa | $\eta$ /% | w/% | V/mL | $p_{\max}$ /kPa | $\Delta p_{\max}$ /kPa | $\eta$ /% |
|-----|------|-----------------|------------------------|-----------|-----|------|-----------------|------------------------|-----------|
| 0   |      | 18.7            |                        |           | 0   |      | 15.4            |                        |           |
| 2   |      | 17.0            | 1.7                    | 9.1       | 2   |      | 13.6            | 1.8                    | 11.7      |
| 4   | 4.2  | 15.2            | 3.5                    | 18.7      | 4   | 8.4  | 12.8            | 2.6                    | 16.9      |
| 6   |      | 14.5            | 4.2                    | 22.5      | 6   |      | 10.8            | 4.6                    | 29.9      |
| 8   |      | 13.9            | 4.8                    | 25.7      | 8   |      | 9.9             | 5.5                    | 35.7      |

表2 含NaHCO<sub>3</sub>超细水雾作用下最大爆炸超压的变化Table 2 Changes of the maximum explosion overpressure under the suppression of ultrafine water mists containing NaHCO<sub>3</sub>

| w/% | V/mL | $p_{\max}$ /kPa | $\Delta p_{\max}$ /kPa | $\eta$ /% | w/% | V/mL | $p_{\max}$ /kPa | $\Delta p_{\max}$ /kPa | $\eta$ /% |
|-----|------|-----------------|------------------------|-----------|-----|------|-----------------|------------------------|-----------|
| 0   |      | 18.7            |                        |           | 0   |      | 15.4            |                        |           |
| 2   |      | 18.6            | 0.1                    | 0.5       | 2   |      | 15.0            | 0.4                    | 2.5       |
| 4   | 4.2  | 18.3            | 0.4                    | 2.1       | 4   | 8.4  | 14.3            | 1.1                    | 7.1       |
| 6   |      | 17.7            | 1.0                    | 5.3       | 6   |      | 13.5            | 1.9                    | 12.3      |
| 8   |      | 16.6            | 2.1                    | 11.2      | 8   |      | 12.8            | 2.6                    | 16.9      |

表3 MgCl<sub>2</sub>超细水雾作用下最大爆炸超压的变化Table 3 Changes of the maximum explosion overpressures under the suppression of ultrafine water mists containing MgCl<sub>2</sub>

| w/% | V/mL | $p_{\max}$ /kPa | $\Delta p_{\max}$ /kPa | $\eta$ /% | w/% | V/mL | $p_{\max}$ /kPa | $\Delta p_{\max}$ /kPa | $\eta$ /% |
|-----|------|-----------------|------------------------|-----------|-----|------|-----------------|------------------------|-----------|
| 0   |      | 18.7            |                        |           | 0   |      | 15.4            |                        |           |
| 2   |      | 17.3            | 1.4                    | 7.5       | 2   |      | 15.3            | 0.1                    | 0.6       |
| 4   | 4.2  | 16.1            | 2.4                    | 13.9      | 4   | 8.4  | 14.5            | 0.9                    | 5.8       |
| 6   |      | 15.7            | 3.0                    | 16.0      | 6   |      | 13.0            | 2.4                    | 15.6      |
| 8   |      | 14.0            | 4.7                    | 25.1      | 8   |      | 11.7            | 3.7                    | 24.0      |

分析表1~3可知,对于相同雾通量和盐类质量分数的超细水雾,NaCl超细水雾的抑爆效果最好,MgCl<sub>2</sub>超细水雾次之,NaHCO<sub>3</sub>超细水雾抑爆效果最差。例如:在盐类质量分数均为8%,分别含NaCl、MgCl<sub>2</sub>和NaHCO<sub>3</sub>的3种超细水雾作用下,雾通量为4.2 mL时,最大爆炸超压分别为13.9、14.0和16.6 kPa;雾通量为8.4 ml时,最大爆炸超压分别为9.9、11.7和12.8 kPa。与无超细水雾下的最大爆炸超压(记为 $p_{\max,1}$ ,由图3知 $p_{\max,1}$ 为23.5 kPa)相比,降幅分别达到40.9%、40.5%、29.4%和57.9%、50.2%、45.6%;与纯超细水雾下的最大爆炸超压(记为 $p_{\max,2}$ ,相应数值见表1~3)相比,降幅分别达到25.7%、25.1%、11.2%和35.7%、24%、16.9%。NaCl超细水雾作用下的 $p_{\max,8.4}$ 和 $p_{\max,1}$ 的差值约为 $p_{\max,8.4}$ 和 $p_{\max,2}$ 差值的2.5倍,而盐类质量分数为2%和4%的NaHCO<sub>3</sub>超细水雾作用下的 $p_{\max,4.2}$ 相对于 $p_{\max,2}$ 要弱得多,最大爆炸超压下降比例仅从0.5%增加到2.1%。盐类超细水雾均会使最大爆炸超压峰值有所降低的原因有3方面:(1)管道A内爆炸反应引发的前驱压力波致使管道A与管道B之间的PVC薄膜发生破裂,从而诱导未反应区内可燃气体进入爆炸反应区,促进管道B内的爆炸反应进行,此时管道B内的超细水雾通过汽化吸收火焰的热量,降低火焰温度和燃烧速率,且汽化产生的水蒸气能够稀释预混气体,削弱反应区的热辐射强度;(2)汽化后析出的NaCl、MgCl<sub>2</sub>和NaHCO<sub>3</sub>晶体同样可以吸收火焰阵面热量,并随着盐类质量分数和水雾量的增加,削弱热辐射强度和阻隔热传递能力不断增强;(3)分散于反应区的NaCl、MgCl<sub>2</sub>和NaHCO<sub>3</sub>离子气相组分会同甲烷-空气预混气爆炸反应产生的高能自由基发生碰撞和自由基消亡反应,极大降低了高能自由基参与链式反应的几率,高能自由基的消耗使得爆炸链式反应增长速度降低,进而爆炸被抑制。

分析图 3(b)、4(b) 和 5(b) 可知, 同一雾通量、同一盐类、不同质量分数的超细水雾作用下, 当质量分数从 0% 增加至 8%, 爆炸超压峰值随着质量分数的增大显著降低, 这表明超细水雾中盐类质量分数的增大能有利于增强抑爆效果。同一盐类、同一质量分数、不同雾通量的超细水雾作用下, 当雾通量从 2.1 ml 增加至 8.4 ml, 爆炸超压峰值随着雾通量的增大而减小, 近似呈线性负相关趋势下降, 且爆炸超压曲线上升缓慢, 这表明盐类超细水雾雾通量的增大能显著提高抑爆效果。

分析图 6 可知, 同一雾通量(8.4 mL)、同一质量分数(例如 6%)、3 种不同盐类超细水雾作用下, 含 NaCl 超细水雾作用下的  $p_{max}$  值最小, 且  $p_{max}$  出现时刻后移降幅最大, 这一规律同样适用于质量分数分别为 2%、4% 和 8% 的情况。含  $\text{NaHCO}_3$  的超细水雾相比于含 NaCl、 $\text{MgCl}_2$  的超细水雾, 抑制效率分别降低 18.8% 和 7.1%, 含  $\text{MgCl}_2$  的超细水雾相比于含 NaCl 的超细水雾, 抑制效率降低 11.7%。这表明阴离子  $\text{Cl}^-$  的抑爆效果强于  $\text{HCO}_3^-$ , 而阳离子  $\text{Na}^+$  在弱化爆炸超压方面优于  $\text{Mg}^{2+}$ , 从而可获得这样的规律: 含 NaCl 超细水雾的抑制效果最优, 含  $\text{MgCl}_2$  超细水雾的抑制效果次之, 含  $\text{NaHCO}_3$  超细水雾的抑制效果最差。

### 2.2 不同盐类超细水雾对火焰锋面位置和火焰平均传播速度的影响

由前述分析可知, 随着水雾通入量和盐类质量分数的增大, 综合抑爆效果会逐渐增强。为了分析 3 种盐类超细水雾对管道 B 内火焰锋面位置和火焰传播速度的影响, 提取了雾通量均为 8.4 mL、盐类质量分数不同的不同盐类超细水雾作用下火焰锋面到达管道 B 末端的时间  $t_{ter}$ , 计算了相对于无细水雾作用下火焰锋面到达管道 B 末端的延迟时间  $\Delta t$  以及相应的延迟幅度  $\xi$ , 汇总于表 4。选取雾通量均为 8.4 mL、盐类质量分数均为 8% 的不同盐类超细水雾作用下管道 B 内的火焰锋面位置和火焰平均传播速度进行分析, 详见图 7~8。

表 4 不同工况下 3 种盐类超细水雾作用下火焰锋面到达管道末端的时间

Table 4 Times for the flame front to arrive at the terminal end of pipe B affected by three ultrafine water mists with different salts under different working conditions

| 工况      | $t_{ter}/\text{ms}$ | $\Delta t/\text{ms}$ | $\xi/\%$ | 工况                  | $t_{ter}/\text{ms}$ | $\Delta t/\text{ms}$ | $\xi/\%$ | 工况                   | $t_{ter}/\text{ms}$ | $\Delta t/\text{ms}$ | $\xi/\%$ |
|---------|---------------------|----------------------|----------|---------------------|---------------------|----------------------|----------|----------------------|---------------------|----------------------|----------|
| 无水雾     | 5.27                |                      |          | 无水雾                 | 5.27                |                      |          | 无水雾                  | 5.27                |                      |          |
| 0%-NaCl | 8.06                | 2.79                 |          | 0%- $\text{MgCl}_2$ | 8.06                | 2.79                 |          | 0%- $\text{NaHCO}_3$ | 8.06                | 2.79                 |          |
| 2%-NaCl | 11.16               | 5.89                 | 38.5     | 2%- $\text{MgCl}_2$ | 8.68                | 3.41                 | 7.7      | 2%- $\text{NaHCO}_3$ | 8.68                | 3.41                 | 7.7      |
| 4%-NaCl | 12.09               | 6.82                 | 50.0     | 4%- $\text{MgCl}_2$ | 12.40               | 7.13                 | 53.8     | 4%- $\text{NaHCO}_3$ | 9.30                | 4.03                 | 15.4     |
| 6%-NaCl | 14.88               | 9.61                 | 84.6     | 6%- $\text{MgCl}_2$ | 13.64               | 8.37                 | 69.2     | 6%- $\text{NaHCO}_3$ | 10.23               | 4.96                 | 26.9     |
| 8%-NaCl | 17.98               | 12.71                | 123.0    | 8%- $\text{MgCl}_2$ | 15.19               | 9.92                 | 88.5     | 8%- $\text{NaHCO}_3$ | 12.40               | 7.13                 | 53.8     |

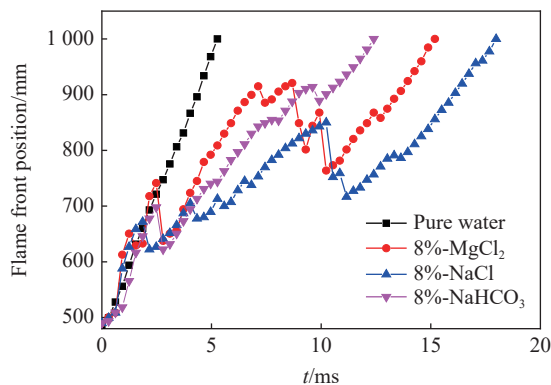


图 7 不同盐类超细水雾作用下管道 B 内爆炸火焰锋面位置的变化

Fig. 7 Changes of explosive flame front positions in pipe B affected by different ultrafine water mists

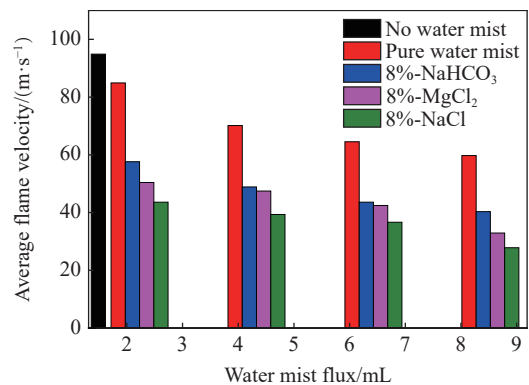


图 8 不同盐类超细水雾作用下管道 B 内爆炸火焰平均传播速度的变化

Fig. 8 Changes of average propagation velocities of explosion flames in pipe B affected by different ultrafine water mists

分析图7和表4可知,无细水雾作用下,火焰锋面位置呈斜率较大的线性趋势快速上升,火焰锋面穿越B区到达管道末端仅需5.27 ms,纯水超细水雾作用下需8.06 ms。3种盐类超细水雾作用下火焰锋面位置呈震荡曲线的形状缓慢上升,火焰到达管道B末端的时间延长,分别延迟至12.40 ms( $\text{NaHCO}_3$ )、15.19 ms( $\text{MgCl}_2$ )和17.98 ms( $\text{NaCl}$ ),延迟幅度较纯水超细水雾作用下达到了53.8%( $\text{NaHCO}_3$ )、88.5%( $\text{MgCl}_2$ )和123.0%( $\text{NaCl}$ )。总体来说,这3种盐类超细水雾对爆炸超压和火焰锋面均有一定抑制效果,但 $\text{NaCl}$ 超细水雾的抑制效率最高, $\text{MgCl}_2$ 超细水雾的抑制效率次之, $\text{NaHCO}_3$ 超细水雾的抑制效率最低。

观察图7发现,火焰在管道B内传播时,火焰锋面位置出现下降-上升-再下降的传播现象。 $\text{NaCl}$ 超细水雾作用下火焰锋面在0.62 ms时出现第1次后退,火焰锋面在4.34 ms时后退较显著,火焰锋面在10.23 ms时发生急剧后退。 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 超细水雾作用下,火焰锋面出现第1次后退的时间分别为1.24和2.48 ms,火焰锋面出现显著后退的时间分别为9.92和9.61 ms。相比来说, $\text{NaCl}$ 超细水雾作用下火焰锋面显著后退发生较早, $\text{NaCl}$ 超细水雾作用下火焰锋面后退现象共出现了5次,而 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 超细水雾作用下火焰锋面分别出现了4次和2次后退。这也证明了盐类超细水雾可以有效延缓火焰阵面的推进速度,延长了火焰阵面传播至管道B末端的时间。

观察图8可知,无细水雾作用下管道B内火焰平均传播速度为94.88 m/s。当雾通量为8.4 mL时,3种盐类超细水雾作用下,管道B内火焰平均传播速度分别下降至27.81 m/s( $\text{NaCl}$ )、32.92 m/s( $\text{MgCl}_2$ )和40.32 m/s( $\text{NaHCO}_3$ ),下降率分别达到70.7%、65.3%和57.5%。这表明在雾通量和盐类质量分数相同的情况下, $\text{NaCl}$ 超细水雾作用下管道B内火焰平均传播速度最小, $\text{MgCl}_2$ 超细水雾作用下次之, $\text{NaHCO}_3$ 超细水雾作用下最大。在盐类质量分数相同、雾通量不同的情况下,管道B内火焰平均传播速度同样遵循前述规律。盐类超细水雾作用下火焰锋面出现延迟后退的原因在于:管道A、B之间的薄膜类似于传播过程的障碍物,爆炸后的破膜作用造成火焰面发生褶皱变形,火焰阵面的燃烧面积被拉伸;当火焰演化传播时,褶皱变形的火焰阵面被进一步分离成小火焰团;之后,在管道B传播时盐类超细水雾会包络这些爆炸火焰及分离的小火焰团,在高温作用下盐类超细水雾形成的水蒸气和析出的盐类微小晶体吸收了火焰团前锋的大量热量,削弱了主体火焰对前锋火焰团的辐射热,使得前锋火焰团会反复窒息熄灭,导致火焰前锋由火焰团转为主体火焰作为主锋面,继而使得火焰锋面出现不同次数后退。

### 3 不同盐类超细水雾抑爆机理

#### 3.1 盐类超细水雾的抑爆作用

盐类超细水雾是通过物理和化学的双重作用达到抑爆效果的,选取雾通量均为8.4 mL、盐类质量分数均为8%、不同盐类超细水雾作用下管道B内的火焰图像见图9。分析图9可知,爆炸前驱波穿越管道A并破膜后进入管道B,此时盐类超细水雾在高压气流驱使下快速进入爆炸反应区,盐类超细水雾的回流能撕裂火焰团阵面,由于具有较大的比表面积,增大了对火焰团的包裹性,弱化了反应区和未燃区之间的热传递。根据阿伦尼乌斯公式<sup>[30]</sup>可知,这会降低火焰前沿温度和预混气的爆炸反应速率,且导致

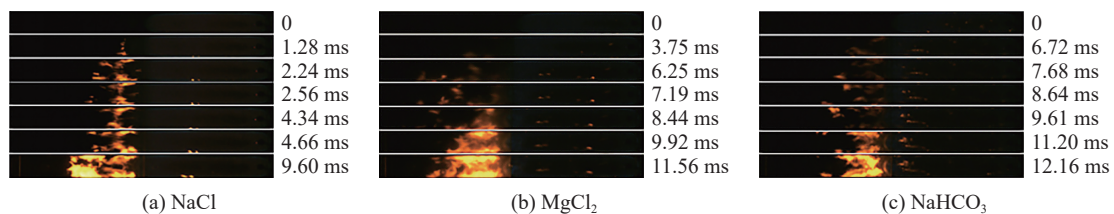


图9 雾通量均为8.4 mL、盐类质量分数均为8%的不同超细水雾作用下管道B内的火焰结构  
Fig. 9 Evolution of flame structures in pipe B affected by ultrafine water mists containing different salts with the same mist flux of 8.4 ml and the same salt mass fraction of 8%



火焰团前锋被分割成体积不均的小火焰团, 使得管道 B 内的火焰形貌呈内凹外凸的演化结构。盐离子随着超细水雾的蒸发会以微小的晶体析出, 析出量随着盐类质量分数的增大而增多。卷吸作用下微小的盐离子晶体分散于管道 B 内的爆炸反应区, 一方面吸收火焰热量, 增强吸热能力; 另一方面高温下气相分解出的盐离子能销毁爆炸反应区的活性自由基(OH·和 H·等), 中断链式反应, 而且会因为盐离子的焰色反应, 造成火焰亮度有所增强。此外, 盐离子会与活性自由基发生碰撞, 使得高活性的自由基在能量交换过程中失去活性。

### 3.2 不同盐类超细水雾抑爆差异性

添加剂种类的不同, 爆炸反应区内盐离子与高能自由基相互作用也有所差异, 作用路径见图 10。分析图 10 可知, 钠离子、镁离子和氯离子在第三体作用下能消耗大量的活性自由基, Na<sup>+</sup>与 OH<sup>-</sup>结合产生氢氧化钠, 成为主要消耗活性基团(H·和 OH·)的中间产物, Mg<sup>2+</sup>与 OH<sup>-</sup>结合生成氢氧化镁, 氢氧化镁在高温下分解的氧化镁具有较大的表面能, 能够吸附高活性基团(H·), 终止相关的链式反应<sup>[31]</sup>。H·和 OH·在 Cl<sup>-</sup>的催化作用下生成大量的水分子。NaHCO<sub>3</sub> 受热分解的氧化钠和水蒸气反应生成氢氧化钠, 氢氧化钠通过捕获活性基团(H·和 OH·), 使得链式反应中的高能自由基减少, 降低爆炸强度。同时水分子作为第三体基元 M 催化 H·和 OH·反应(2H + H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O, H + OH + M → H<sub>2</sub>O + M), 促进水分子进一步增多, 正反馈效应降低支链反应。

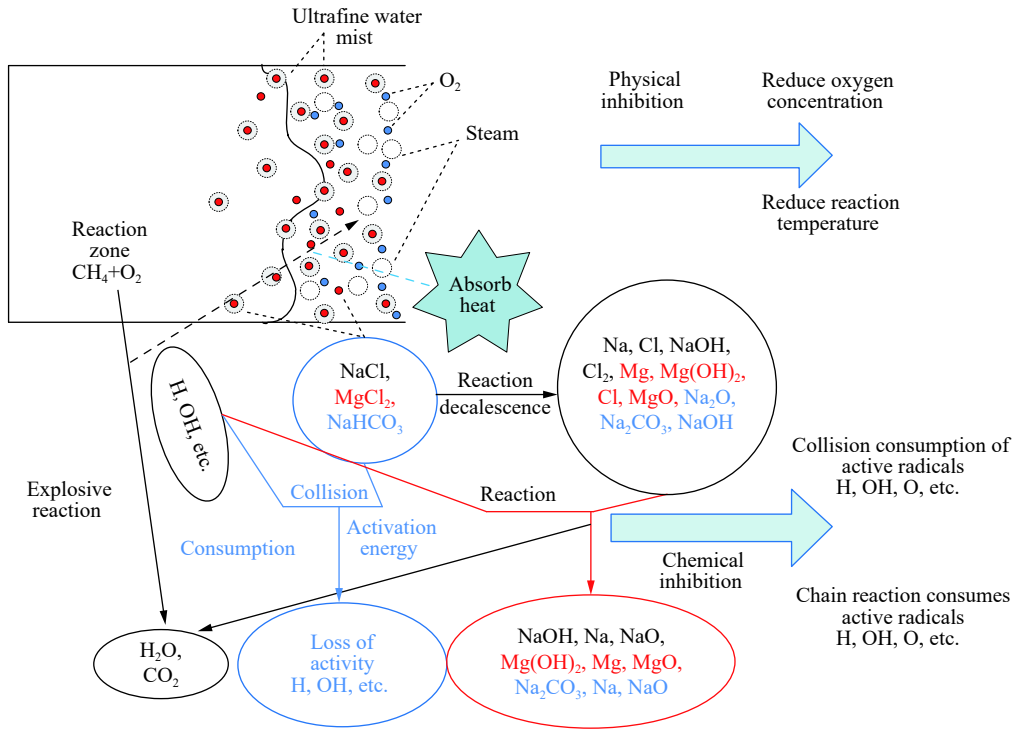
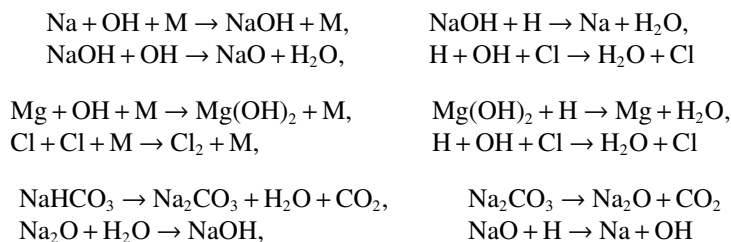


图 10 三种盐类超细水雾抑爆机理

Fig. 10 Explosion suppression mechanism by three ultrafine water mists with different salts

其主要基元反应过程如下:



盐类超细水雾中以含 NaCl 的超细水雾抑爆效果最佳,主要原因在于:(1)阴离子方面,NaHCO<sub>3</sub> 中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在水中能够水解和电离出活性自由基(OH·和 H·),会促进链式反应,从而有助于甲烷爆炸。而 NaCl 和 MgCl<sub>2</sub> 中的 Cl<sup>-</sup> 在链式反应过程中主要表现为催化和消耗活性自由基 H· 并生成氯化氢,可延缓爆炸反应速度,因此 Cl<sup>-</sup> 的抑爆作用优于 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。(2)阳离子方面,Na<sup>+</sup> 与氢氧基结合产生的氢氧化钠,既能消耗活性自由基 H·,又能消耗 OH·,而 Mg<sup>2+</sup> 与氢氧基结合产生的氢氧化镁只能消耗 H·,从消耗活性自由基的几率上,可知 Na<sup>+</sup> 抑爆能力优于 Mg<sup>2+</sup>。(3)Na<sup>+</sup> 在第三体基元作用下能更好地捕获爆炸链式反应中的活性基团 OH·,终止链式反应的进行,从而降低爆炸反应的能量释放。虽然 MgCl<sub>2</sub> 中的阳离子对自由基的消耗能力弱于 NaHCO<sub>3</sub> 中阳离子,但是 NaHCO<sub>3</sub> 中的阴离子作用效果却远不如 MgCl<sub>2</sub> 中的阴离子,且两者中阴离子的差距是阳离子所不能弥补的,使得含 MgCl<sub>2</sub> 超细水雾的作用效果优于含 NaHCO<sub>3</sub> 超细水雾。因此,基于抑爆机理分析也可知,NaCl 超细水雾的抑爆效果优于其他 2 种盐类超细水雾。

## 4 结 论

利用自行搭建的两节管道瓦斯爆炸传播及抑爆实验系统,模拟分析了管道瓦斯爆炸跨越至后续管网的爆炸传播特性以及不同种类、不同盐类质量分数及不同雾通量盐类超细水雾抑爆效果。通过实验分析和理论研究,主要获得了以下结论:

(1)甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气预混气爆炸在盐类(NaHCO<sub>3</sub>、MgCl<sub>2</sub> 和 NaCl)超细水雾作用下爆炸超压振荡曲线缓慢上升,抑爆效果优于纯水超细水雾。随着盐类超细水雾的盐类质量分数和雾通量的增大,含 NaCl 超细水雾抑制效能相对最优。在雾通量均为 8.4 mL,盐类质量分数均为 8% 的 3 种盐类超细水雾作用下的最大爆炸超压峰值较无超细水雾工况下降幅度分别达到 45.6%(NaHCO<sub>3</sub>)、50.2%(MgCl<sub>2</sub>)和 57.9%(NaCl)。

(2)盐类超细水雾作用下,火焰锋面穿越 B 区到达管道 B 末端的时间较无细水雾和纯水超细水雾作用下出现延迟且火焰锋面在管道中传播时呈现不同次数的后退现象。在盐类超细水雾的盐类质量分数均为 8% 和雾通量均为 8.4 mL 的情况下,NaCl 超细水雾作用下火焰锋面出现了 5 次后退现象,MgCl<sub>2</sub> 和 NaHCO<sub>3</sub> 超细水雾作用下火焰锋面仅分别出现了 4 次和 2 次后退现象。

(3)盐类超细水雾对火焰平均传播速度和爆炸超压的影响规律趋于一致,盐类质量分数为 8% 的情况下,随着盐类超细水雾雾通量的增大,火焰到达管道 B 末端的时间延迟,管道 B 段内的火焰平均传播速度呈阶梯下降趋势。与无超细水雾作用下的火焰平均传播速度(94.88 m/s)相比,分别下降了 57.5%(NaHCO<sub>3</sub>)、65.3%(MgCl<sub>2</sub>)和 70.7%(NaCl),火焰到达管道末端时间分别延迟至 17.98 ms(NaCl)、15.19 ms(MgCl<sub>2</sub>)和 12.4 ms(NaHCO<sub>3</sub>)。

(4)综合比较 NaCl、MgCl<sub>2</sub> 和 NaHCO<sub>3</sub> 超细水雾在弱化爆炸超压、延缓火焰锋面及降低火焰平均传播速度等特征参数,发现其抑爆强弱顺序为含 NaCl 超细水雾最强,含 MgCl<sub>2</sub> 超细水雾次之,含 NaHCO<sub>3</sub> 超细水雾最弱,根本原因在于阴离子 Cl<sup>-</sup> 销毁链式反应中 OH·、H· 自由基的能力强于 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>;阳离子 Na<sup>+</sup> 销毁爆炸反应中 OH·、H· 自由基的能力强于 Mg<sup>2+</sup>。

## 参考文献:

- [1] 毛宗强. 氢能: 我国未来的清洁能源 [J]. 化工学报, 2004, 55(S1): 296-302.  
MAO Z Q. Hydrogen: a future clean energy carrier in China [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004, 55(S1): 296-302.
- [2] RAZUS D, MOVILEANU C, BRINZEA V, et al. Explosion pressures of hydrocarbon-air mixtures in closed vessels [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 135(1-3): 58-65. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.10.061.
- [3] KURDYUMOV V N, MATALON M. Flame acceleration in long narrow open channels [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 865-872. DOI: 10.1016/j.proci.2012.07.045.
- [4] WANG C, HUANG F L, ADDAI E K, et al. Effect of concentration and obstacles on flame velocity and overpressure of

- methane-air mixture [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 302–310. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.05.021.
- [5] 罗振敏, 王涛, 程方明, 等. 小尺寸管道内二氧化碳抑制甲烷爆炸效果的实验及数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 393–400. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0393-08.
- LUO Z M, WANG T, CHENG F M, et al. Experimental and numerical studies on the suppression of methane explosion using CO<sub>2</sub> in a mini vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 393–400. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0393-08.
- [6] 陈鹏, 李艳超, 黄福军, 等. 方孔障碍物对瓦斯火焰传播影响的实验与大涡模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(1): 21–26. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0021-06.
- CHEN P, LI Y C, HUANG F J, et al. LES approach to premixed methane/air flame propagating in the closed duct with a square-hole obstacle [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 21–26. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0021-06.
- [7] 周宁, 王文秀, 张国文, 等. 障碍物对丙烷-空气爆炸火焰加速的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1106–1114. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0109.
- ZHOU N, WANG W X, ZHANG G W, et al. Effect of obstacles on flame acceleration of propane-air explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1106–1114. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0109.
- [8] ZHANG P P, ZHOU Y H, CAO X Y, et al. Mitigation of methane/air explosion in a closed vessel by ultrafine water fog [J]. *Safety Science*, 2014, 62: 1–7. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.07.027.
- [9] ADIGA K C, HATCHER JR R F, SHEINSON R S, et al. A computational and experimental study of ultra fine water mist as a total flooding agent [J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 42(2): 150–160. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.010.
- [10] PEI B, YU M G, CHEN L W, 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. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.005.
- [11] XU H L, LI Y, ZHU P, et al. Experimental study on the mitigation via an ultra-fine water mist of methane/coal dust mixture explosions in the presence of obstacles [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(4): 815–820. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.02.014.
- [12] ZHU C J, LIN B Q, JIANG B Y, et al. Numerical simulation of blast wave oscillation effects on a premixed methane/air explosion in closed-end ducts [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(4): 851–861. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.02.013.
- [13] ZHOU Y H, BI M S, QI F. Experimental research into effects of obstacle on methane-coal dust hybrid explosion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(1): 127–130. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.07.003.
- [14] BATTERSBY P N, AVERILL A F, INGRAM J M, et al. Suppression of hydrogen-oxygen-nitrogen explosions by fine water mist: Part 2: mitigation of vented deflagrations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(24): 19258–19267. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.10.029.
- [15] 裴蓓, 韦双明, 陈立伟, 等. CO<sub>2</sub>-超细水雾对 CH<sub>4</sub>/air 初期爆炸特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(2): 025402. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0147.
- PEI B, WEI S M, CHEN L W, et al. Effect of CO<sub>2</sub>-ultrafine water mist on initial explosion characteristics of CH<sub>4</sub>/air [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 025402. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0147.
- [16] 纪虹, 杨克, 黄维秋, 等. 超细水雾协同甲烷氧化菌降解与抑制甲烷爆炸的实验研究 [J]. *化工学报*, 2017, 68(11): 4461–4468. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170568.
- JI H, YANG K, HUANG W Q, et al. Methane degradation and explosion inhibition by using ultrafine water mist containing methane oxidative bacteria-inorganic salt [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(11): 4461–4468. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170568.
- [17] GU R, WANG X S, XU H L. Experimental study on suppression of methane explosion with ultra-fine water mist [J]. *Fire Safety Science*, 2010, 19(2): 51–59. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5309.2010.02.001.
- [18] 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): 103–111. DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.07.003.
- [19] 杨克, 纪虹, 邢志祥, 等. 含草酸钾的超细水雾抑制甲烷爆炸的特性 [J]. *化工学报*, 2018, 69(12): 5359–5369. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180671.

- YANG K, JI H, XING Z X, et al. Characteristics on methane explosion suppression by ultrafine water mist containing potassium oxalate [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(12): 5359–5369. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180671.
- [20] JOSEPH P, NICHOLS E, NOVOZHILOV V. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist [J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 58: 221–225. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.03.003.
- [21] 余明高, 安安, 赵万里, 等. 含添加剂细水雾抑制瓦斯爆炸有效性试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2011, 11(4): 149–153. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2011.04.034.
- YU M G, AN A, ZHAO W L, et al. On the inhibiting effectiveness of the water mist with additives to the gas explosion [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(4): 149–153. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2011.04.034.
- [22] 余明高, 杨勇, 裴蓓, 等.  $N_2$  双流体细水雾抑制管道瓦斯爆炸实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.
- YU M G, YANG Y, PEI B, et al. Experimental study of methane explosion suppression by nitrogen twin-fluid water mist [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.
- [23] GAN B, LI B, JIANG H P, et al. Suppression of polymethyl methacrylate dust explosion by ultrafine water mist/additives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 351: 346–355. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.03.017.
- [24] 陈晓坤, 林滢, 罗振敏, 等. 水系抑制剂控制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2006, 31(5): 603–606. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2006.05.012.
- CHEN X K, LIN Y, LUO Z M, et al. Experiment study on controlling gas explosion by water-depressant [J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(5): 603–606. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2006.05.012.
- [25] CAO X Y, REN J J, BI M S, et al. Experimental research on the characteristics of methane/air explosion affected by ultrafine water mist [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 324: 489–497. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.017.
- [26] CAO X Y, REN J J, ZHOU Y H, et al. Suppression of methane/air explosion by ultrafine water mist containing sodium chloride additive [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 285: 311–318. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.11.016.
- [27] CAO X Y, REN J J, BI M S, et al. Experimental research on methane/air explosion inhibition using ultrafine water mist containing additive [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 352–360. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.06.012.
- [28] NFPA. NFPA 750 Standard for the installation of water mist fire protection systems [S]. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2000.
- [29] 秦俊, 廖光焯, 王喜世, 等. 细水雾抑制火旋风的实验研究 [J]. *自然灾害学报*, 2002, 11: 60–65. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2002.04.010.
- QIN J, LIAO G X, WANG X S, et al. Experimental study on extinguishment of fire whirlwind by water mist [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11: 60–65. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2002.04.010.
- [30] AKIRA Y, TOICHIRO O, WATARU E, et al. Experimental and numerical investigation of flame speed retardation by water mist [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162: 1772–1777. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.11.038.
- [31] 邓军, 田志辉, 罗振敏, 等.  $Mg(OH)_2/CO_2$  抑爆瓦斯实验研究 [J]. *煤矿安全*, 2013, 44: 4–6. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2013.10.014.
- DENG J, TIAN Z H, LUO Z M, et al. Experimental research on suppressing gas explosion by  $Mg(OH)_2/CO_2$  [J]. *Safety in Coal Mines*, 2013, 44: 4–6. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2013.10.014.

(责任编辑 张凌云)