

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0268

含 NaCl 超细水雾对不同阻塞率管道内爆炸的抑制*

贾海林^{1,2}, 项海军^{1,2}, 李第辉^{1,2}, 翟汝鹏^{1,2}

(1. 河南理工大学河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南 焦作 454003;

2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 针对长距离输气管道频发的爆炸问题, 在自行搭建的水平透明管道平台中开展了含 NaCl 超细水雾对不同阻塞率管道爆炸特性的影响研究。通过对瓦斯爆炸压力、火焰传播速度等特征参数进行分析, 探究含 NaCl 超细水雾与不同阻塞率泄压口对爆炸特性的影响规律。结果表明: 仅在不同阻塞率(0、0.2、0.4 和 0.6)的泄压口作用下的管道瓦斯爆炸, 爆炸超压随着管道阻塞率的增大而增强, 阻塞率与火焰锋面传播至管道末端时间呈非线性关系, 在阻塞率为 0.2 时火焰平均速度最快; 两者共同作用下, 雾通量为 8.4 mL、质量分数为 8% 的 NaCl 超细水雾阻火抑爆效果最佳, 最大爆炸压力下降幅度可达 59.2%; 含 NaCl 超细水雾直接作用于爆炸火焰从而抑制爆炸传播。

关键词: 含氯化钠超细水雾; 瓦斯爆炸; 阻塞率; 爆炸压力; 火焰传播

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Suppression of explosion in pipelines with different blocking ratios by ultrafine water mist containing sodium chloride

JIA Hailin^{1,2}, XIANG Haijun^{1,2}, LI Dihui^{1,2}, ZHAI Rupeng^{1,2}

(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: This work aims at the explosion problem in long-distance gas pipelines. An experimental study on the influence of ultrafine water mist with NaCl on the gas explosion characteristics of pipes with different blocking ratios was carried out in a self-built horizontally transparent duct. Such effects are quantified via the analysis of pressure and flame speed. The results show that the explosion overpressure increases with the increase of the pipeline blocking ratio in such gas explosion of the pipeline that is only under the pressure relief ports with different blocking ratios (0, 0.2, 0.4 and 0.6). Under the action of ultrafine water mist, the blocking ratio varies nonlinear with the time of flame front movement propagation to the end of the pipe. When the blocking rate is 0.2, the average flame velocity is the highest. When the fog flux is 8.4 mL and mass fraction of NaCl in it is 8%, the ultrafine water mist containing NaCl has the best fire and explosion suppression effect as the maximum explosion pressure drops by 59.2%. The ultra-fine mist containing NaCl acts directly on the explosion flame to suppress the explosion.

Keywords: ultrafine water mist containing sodium chloride; gas explosion; blocking ratio; explosion pressure; flame propagation

* 收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-11-05

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@hpu.edu.cn

随着我国煤矿开采深度的加深,瓦斯爆炸事故发生频率和强度呈上升趋势^[1]。高效安全地抽采瓦斯,敷设的长距离抽采管网存在爆炸隐患,成为亟须解决的问题^[2]。鉴于此,国内外专家学者开始对管道瓦斯爆炸特性进行研究,以期对此类爆炸事故进行有效控制。

针对瓦斯爆炸的抑爆介质的研究,其主要集中于惰性气体、超细水雾、气溶胶、多孔介质和固体粉末等方面,不同类别抑爆介质的抑爆机理亦不相同^[3-12]。超细水雾具有来源广泛、环境友好,灭火、抑爆效果明显等优点,广泛应用于诸多工程领域^[13]。纯水超细水雾主要以物理方式进行灭火与抑爆,受环境所限效果往往不太理想^[14]。陈晓坤等^[15]在玻璃管内研究了超细清水雾以及含 NaCl、NaHCO₃ 和 KCl 的水雾分别对甲烷/空气预混气体的爆炸影响,发现含有无机盐类超细水雾要优于超细清水雾的抑爆效果。Joseph 等^[16]研究了添加无机盐类(NaCl、KCl 和 KHCO₃)水雾的抑爆特性,表明水雾中无机盐可大幅提高抑爆效率。Cao 等^[17-19]研究了在含有不同浓度的甲烷/空气预混气体的密闭管道内的超细水雾抑爆,结果表明 NaCl 作为添加剂可明显改善纯水超细水雾的物理和化学效应,显著提高其抑爆效果。

被动抑爆方式有时与主动方式一起作用于瓦斯爆炸^[20]。泄压作为被动式抑爆手段,可以及时缓解超压。改变管道开口端的泄放面积,即开口管道阻塞率,压力波在端部反射,这引起反向流动,影响内部压力变化,这种反射波引起的逆流对火焰的传播具有不可忽略的影响^[21-23]。

尽管众多学者已经对管道瓦斯抑爆进行大量研究,但仍存在不足之处。通过事故调查可知,抽采管道在瓦斯爆炸传播中起到重要作用。管道内释放超细水雾与管道泄压口泄压作为有效的主动与被动式抑爆方式,故对抽采管道的主动与被动抑爆方式有必要进行探究。结合含 NaCl 超细水雾具有环境友好、成本较低且抑爆效果较好的特点,本文中通过改变施加含 NaCl 超细水雾雾通量的大小和水平管道抑制区(B)泄压口的阻塞率,以期探究含 NaCl 超细水雾作用不同阻塞率管道瓦斯爆炸的影响,利用爆炸压力、火焰锋面位置及爆炸火焰传播速度等爆炸指标分析对瓦斯爆炸特性进行更深入的掌握,以期对瓦斯爆炸灾害的防治提供一定理论依据。

1 不同阻塞率下分区管道抑爆实验系统

1.1 实验装置

图1为实验平台系统图。结合实验需求,自行设计并搭建水平透明管道平台,该平台主要包括预混气体配置单元、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。预混气体配置单元由高压高纯度甲烷气瓶(纯度为99.9%)、空气压缩机、气体质量流量计、阀门、耐高压树脂软管等组成。甲烷在空气中的浓度为9.5%时,这时的化学反应速率最快,爆炸最猛烈^[25]。基于分压法,配气时使A、B管内预混气(CH₄与空气)的化学计量比达到9.5%。管道预混气爆炸单元主体是两节500 mm×100 mm×100 mm的透明有机玻璃管道,能承受2 MPa的爆炸压力,编号为A、B,便于相机拍摄采集图像,用于后期火焰锋面以及火焰结构分析;采用PVC薄膜分隔两段管道,管道间采用法兰连接;管道A右侧端口采用不锈钢板密闭,钢板上分别设置点火器预留孔和进气孔;点火部分是由陶瓷钨棒材料制成的点火电极和高热能点火器组成的,高热能点火器是由西安顺泰热工加工制作的HE119系列的高能点火器,点火电极之间放电间隔5 mm,输出功率为60 W,输出电压为6 kV,输出电流为30 mA,放电稳定;泄压口作为泄压通道,实验设计了3种阻塞率 $\phi=(S_{\text{管道截面积}}-S_{\text{泄压口面积}})/S_{\text{管道截面积}}$ 法兰盘,安装于B管道开口端,对应的阻塞率分别为0.2、0.4、0.6,阻塞率为0时采用PVC薄膜密封。爆炸超压及火焰信息采集单元由高频压力传感器、数据采集卡、光电传感器、高速摄像机和高性能计算机组成。压力传感器为上海铭动公司生产的工作量程范围为-0.1~0.2 MPa、响应时间为0.2 ms、精度为0.25%的高频压力传感器;数据采集卡采用MCC公司生产的USB-1608FS型数据采集卡,信号采集频率为15 kHz;RL-1型光电传感器采集频率为15 kHz,倾斜放置管道A的外侧,其探头指向点火电极,通过采集点火时的光信号,以此确定爆炸起爆时间点;火焰图像利用美国约克公司M310型高速摄像机采集,采样频率为3 200 s⁻¹,最大分辨率为1 024×1 024。

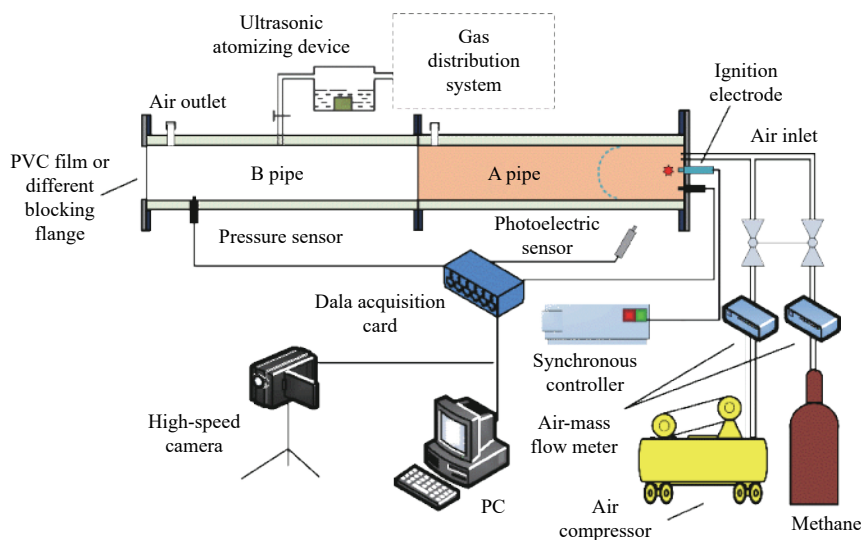


图 1 实验系统

Fig. 1 The experimental system

超细水雾雾化单元由超声雾化装置、密闭树脂储水箱及水雾导管组成。超声雾化具有较好的悬浮特性, 仅需少许的水就可以在密闭管道空间中形成较为浓厚的超细水雾氛围, 超声雾化过程如图 2 所示。该超声雾化装置雾化片的工作频率为 1 700 kHz, 雾化速率约为 4.2 mL/min。文献 [24] 将超细水雾依据粒径尺寸分成 3 个等级: 第 I 级定义为超细水雾中 90% 以上水雾粒径小于或等于 200 μm ; 第 II 级定义为超细水雾中 90% 以上水雾粒径小于或等于 400 μm ; 第 III 级定义为超细水雾中 90% 以上雾滴粒径大于或等于 400 μm 。根据相位多普勒激光测速仪 (PDA) 测得的实验水雾粒径, 其总体分布范围为 0~20 μm , 其中大部分水雾粒径分布在 0~10 μm , 按照粒径等级分属于第 I 级超细水雾, 因此本文中称其为“超细水雾”。

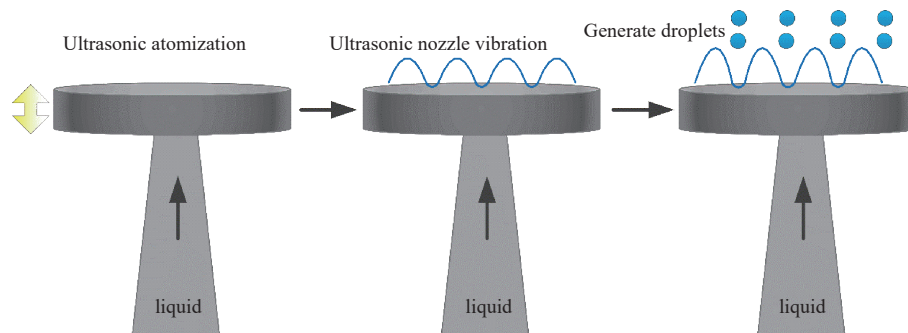


图 2 超声雾化过程

Fig. 2 Ultrasonic atomization process

1.2 实验方法

实验前预先配置好质量分数为 8% 的 NaCl 溶液, 对比分析在纯水条件下, 不同水雾通入量和不同管道阻塞率的超细水雾对甲烷爆炸的抑制效果。水雾通入量分别为 2.1、4.2、6.3、8.4 mL, 管道泄压口阻塞率分别为 0、0.2、0.4、0.6。检查相关仪器设备并进行调试, 将 PVC 薄膜紧贴于 A、B 管之间, 之后同时开启 A、B 管的进气阀和出气阀, 通入 4 倍管道体积配制的预混气体于 A、B 管道中, 充气时间为 8 min; 开启 B 管道与超声雾化装置间的进气阀, 并启动超声雾化装置, 按照不同的实验工况通入相应的水雾量, 调整 B 管末端法兰的阻塞率; 待充气 and B 管道内通入细水雾全部结束后, 关闭进气阀和出气阀, 立刻启动点火器, 同时采集压力数据并存储拍摄到的火焰图像; 确认无误后重复上述步骤, 准备下一组的实验工况, 每次实验前需将拆卸下的 B 管道干燥, 每组工况重复 3~5 次。

2 实验结果及分析

2.1 管道不同泄压口阻塞率对甲烷爆炸的影响

2.1.1 管道不同泄压口阻塞率对爆炸超压的影响

图3为未施加超细水雾,不同阻塞率条件下

预混气体爆炸压力随时间的变化关系。从图中可知随着阻塞率的升高,对应的管内瓦斯爆炸超压分别为23.51、25.68、39.08和71.91 kPa。阻塞率为0和0.2时,爆炸压力到达最高峰值前上升缓慢;当阻塞率为0.4时,爆炸超压明显提高;阻塞率为0.6时,管道内9.5%的甲烷-空气的预混气体燃烧反应产生的爆炸压力最大;在不同

阻塞率下,爆炸压力均出现两个峰值。此现象主要由于在闭口管道(A管道)内点火引燃预混气体的初期,A管内因燃烧反应进行温度升高,管内气体体积膨胀进而诱导形成前驱压力波,导致第一个破膜压力峰值的出现,管道之间的PVC薄膜对燃烧火焰传播过程有一定的阻滞、泄压作用,爆炸压力曲线出现下降的趋势;破膜泄压后,爆炸火焰因管道内的压力变化被拉伸变形,火焰内部燃烧空间增大,阵面面积突增,大量未燃预混气体被卷吸到反应区,热释放速率加速,因此爆炸压力急剧上升,以致形成最大波峰现象。由此表明管道的泄压口阻塞率对爆炸压力有重要影响。

2.1.2 管道不同泄压口阻塞率对火焰锋面和传播速度的影响

图4为未施加超细水雾,不同阻塞率条件下预混气体爆炸的火焰锋面位置随时间的变化关系。从图中可知随着阻塞率的升高,火焰锋面传播至管道末端所需时间分别为5.27、4.65、5.89和7.13 ms,呈非线性上升关系。在阻塞率 ϕ 为0.2时产生一个明确的拐点,即阻塞率为0.2时,火焰锋面到达管道末端所需时间最短。此现象主要由于相较其他阻塞率(0、0.4和0.6),在阻塞率为0.2时,法兰盘壁面反射作用较弱,末端迅速泄压,管内爆炸大尺度的湍流加快反应进行,致使阻塞率为0.2时火焰平均速度最快。

图5为在火焰锋面位置随时间的变化关系的基础上,导出火焰传播速度随时间的变化的关系。在火焰冲破PVC膜进入管道B后,火焰速度突然增大。在阻塞率为0.6的情况下,火焰速度在0.93 ms时的上升尤为明显,随着火焰不断向前推进,火焰速度逐渐衰减。图中直线分别表示在不同泄压口阻塞率情况下火焰传播的平均速度,在阻塞率为0的情况下,火焰平均速度随时间缓缓加快。在阻塞率为0.4和0.6的情况下,火焰平均速度随时间呈衰减趋势,管道泄压口不同阻塞率对爆炸火焰传播的速度有重要影响。

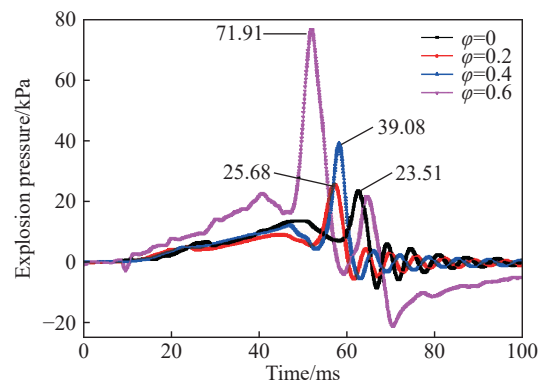


图3 不同阻塞率对爆炸压力的影响

Fig. 3 Influence of different blocking ratios on explosion pressure

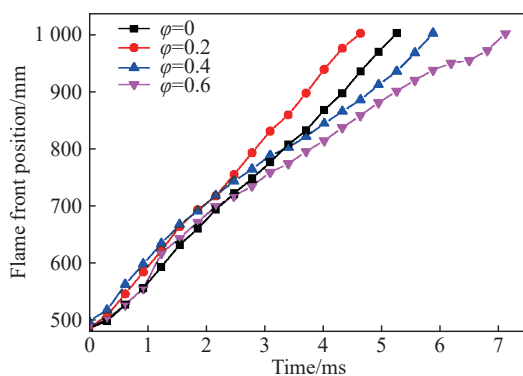


图4 不同阻塞率下火焰锋面位置的变化

Fig. 4 Flame front position varying with time at different blocking ratios

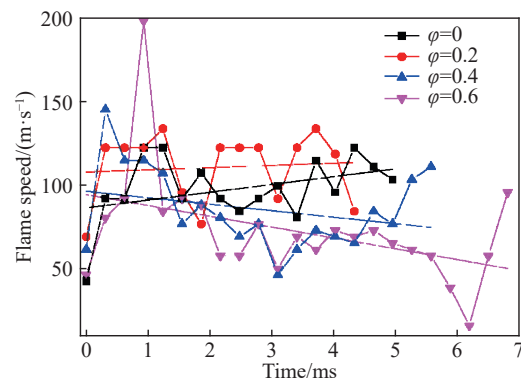


图5 不同阻塞率下管道B内火焰速度的变化

Fig. 5 Flame speed in pipe B varying with time at different blocking ratios

2.1.3 管道不同泄压口阻塞率对火焰平均速度和最大爆炸压力的影响

图 6 所示为未施加超细水雾工况下, 管道内的火焰平均速度和最大爆炸压力与阻塞率三者的变化关系。在阻塞率为 0.2 时, 火焰的传播速度明显高于其他 3 个阻塞率下的传播速度; 当阻塞率大于 0.2 时, 火焰的传播速度均减小且都小于阻塞率为 0 情况下的火焰速度。此现象主要由于爆炸压力波在 B 管道内传播过程中, 因管段泄压口大阻塞率的法兰盘反射作用, 在压力波的反射作用下气流逆向流动, 使得火焰速度下降; 与此同时逆向气流引起小尺度湍流的出现, 当管内湍流强度达到一定程度时, 火焰传播速度会出现较小的峰值。最大爆炸压力因管道泄压面积变小, 预混气体受前驱火焰压力波的影响, 燃烧反应产生的高压不能及时从管段末端泄压口排出, 因此造成爆炸压力峰值升高。

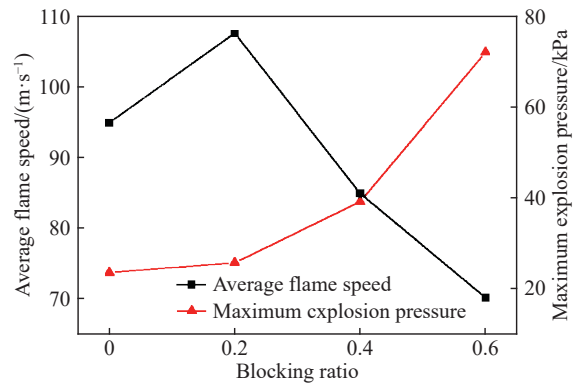


图 6 火焰平均速度和最大爆炸压力与阻塞率的变化关系
Fig. 6 Average flame speed and maximum explosion pressure varying with blocking ratio

2.2 含 NaCl 超细水雾对不同阻塞率下瓦斯爆炸的影响

2.2.1 含 NaCl 超细水雾对管道爆炸压力的影响

图 7 展示了分别表示施加不同雾通量(2.1、4.2、6.3、8.4 mL)的质量分数为 8% 的 NaCl 超细水雾作用于不同阻塞率泄压口管道的爆炸压力随时间的变化关系。相较于无超细水雾下的工况, 随着管道内超细水雾雾通量的增加, 不同阻塞率的泄压口管道内爆炸压力均不断减小。雾通量为 8.4 mL 时, 不同阻

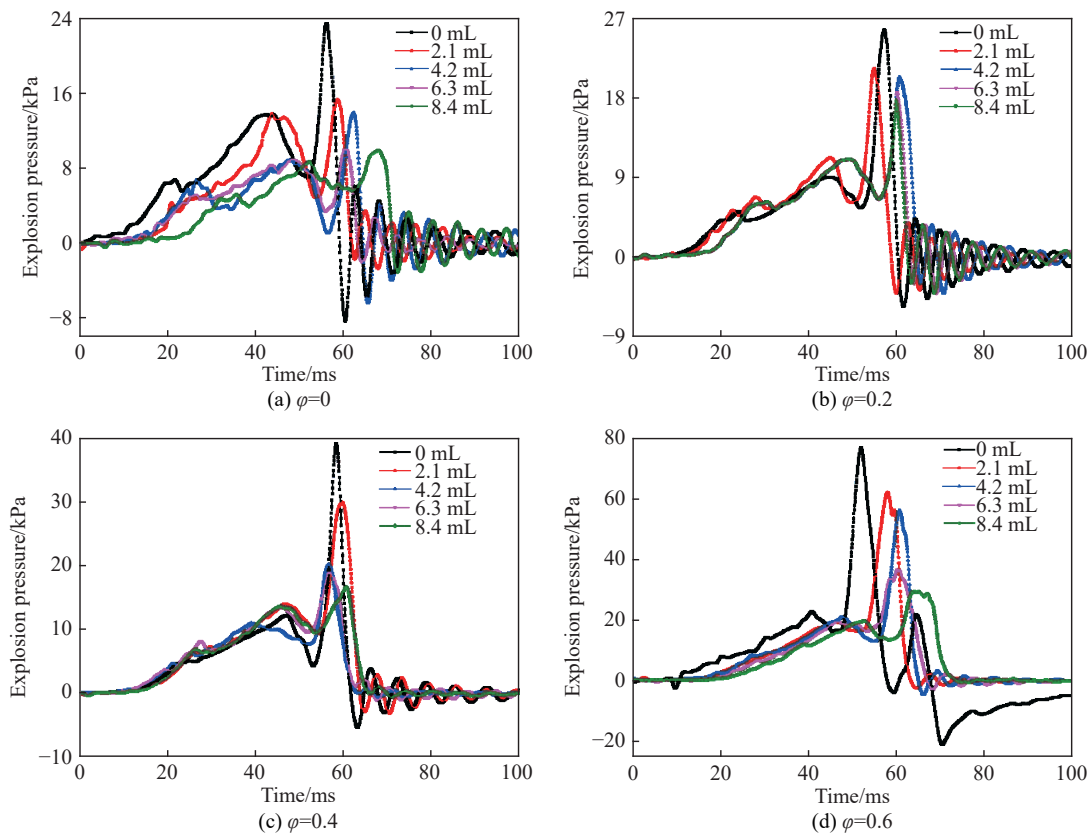


图 7 含 NaCl 超细水雾对不同阻塞率下爆炸压力的影响
Fig. 7 Effect of ultrafine water mist containing NaCl on explosion overpressure for different blocking ratios

塞率的泄压口管道内爆炸压力下降最显著。管段内甲烷-空气的预混气体在阻塞率为0和0.2的情况下,爆炸压力出现明显振荡衰减;阻塞率为0.4,管内雾通量的增加至6.3 mL和8.4 mL时,管道内的压力振荡幅度变得特别小;阻塞率为0.6,压力振荡几乎消失。超细水雾在爆炸高温下与爆炸火焰接触快速蒸发吸热,促进爆炸区内H·和OH·结合成水分子,从而降低爆炸反应区的温度,降低爆炸强度。当管段阻塞率变大后,在反射冲击波作用下会造成未燃区内大量的可燃气体和超细水雾滞留增加,因此高压气流驱使大量的含NaCl超细水雾快速进入到爆炸反应区,使得爆炸压力出现振荡衰减。超细水雾会部分地直接干预瓦斯爆炸反应区的化学反应^[26],通过雾滴的蒸发析出NaCl晶体中的Na⁺和Cl⁻参与到爆炸的链式反应中,继续消耗H·和OH·自由基,中断链式反应进行,降低爆炸强度,使得管内爆炸压力振荡几乎消失。

2.2.2 含NaCl超细水雾对管道火焰锋面的影响

图8中(a)~(d)分别表示施加不同雾通量的NaCl超细水雾作用于不同阻塞率泄压口管道的火焰锋面位置随时间变化的关系图。当火焰穿越薄膜进入B管道时,火焰锋面位置移动较快。但随着含NaCl超细水雾通入量的增加,锋面位置上升变得缓慢,爆炸火焰传播至管道末端的时间也随之增加。在阻塞率为0和0.4的情况下,雾通量为8.4 mL、质量分数为8%的NaCl超细水雾对火焰锋面曲线影响较大,锋面曲线下降的次数分别为5和4次。火焰在抑制区域内(B管道)传播过程中,火焰锋面曲线具有波动性,雾通量大小与火焰锋面曲线的波动相关。可见,含NaCl超细水雾能够使管道内火焰阵面推进速度放缓,使得火焰传播至管道末端的时间延长。雾通量增大时,雾滴因汽化从周围吸热,使得预混气体的燃烧温度降低,并降低了已燃区向未燃区辐射能力。同时蒸发的水蒸气稀释了管内甲烷和氧气的浓度,使得自由基产生的速率减慢,导致链式反应变慢,从而使得放热反应速率变慢,直接降低最大火焰传播速度^[27-28]。

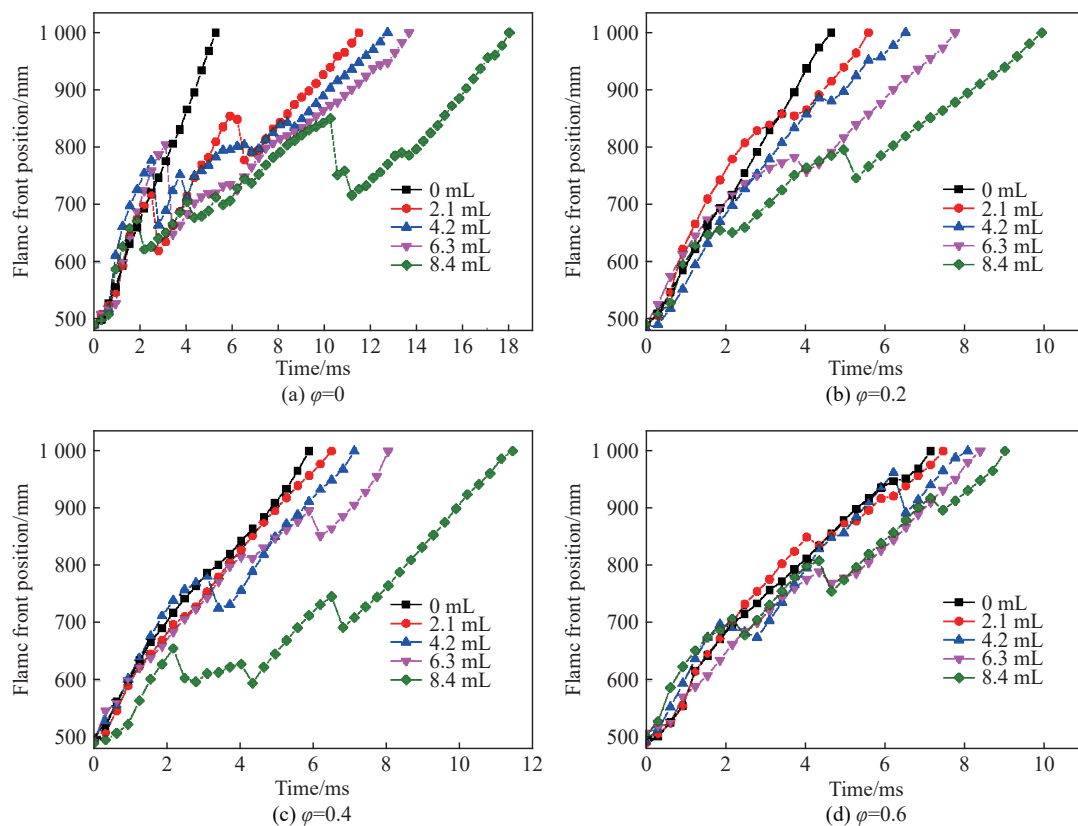


图8 含NaCl质量分数为8%的超细水雾作用下不同阻塞率火焰锋面位置变化

Fig. 8 Change in flame front positions for different blocking ratios under the action of ultrafine water mist containing NaCl with the mass fraction of 8%

当管道 B 内通入超细水雾时, 爆炸火焰在进入 B 管道初期会出现火焰锋面移动加快的现象。爆炸火焰在冲破管道 A、B 之间的 PVC 薄膜进入管道 B 时, 火焰阵面褶皱变形, 火焰的燃烧面积增大, 管道 B 未燃区内的甲烷-空气的预混气体和少量的超细水雾被快速卷吸至燃烧反应区内。少量的超细水雾能够促进爆炸反应进行^[5], 因此火焰传播速度增大, 锋面位置变化较快。移动过程中, 火焰阵面褶皱变形分离成部分小火团。随着管段内部爆炸火焰及火焰团的传播, 抑制区内火焰团被大量的超细水雾包裹, 超细水雾在高温下汽化产生的水蒸气, 不仅吸收火焰团的热量, 而且削弱主体火焰对火焰团的辐射热。火焰团在传播过程中窒息熄灭, 使得主体火焰作为火焰前锋主锋面向前传播。

2.2.3 含 NaCl 超细水雾对管道爆炸超压和火焰平均速度的影响

图 9 所示为施加不同雾通量的 NaCl 超细水雾作用于不同阻塞率泄压口管道的最大爆炸压力 p_{\max} 随阻塞率的变化关系。无超细水雾作用于不同阻塞率的泄压口管道甲烷-空气预混气爆炸, 最大爆炸压力随着管道阻塞率的增大而增强, p_{\max} 分别为 23.51、25.68、39.08 和 71.91 kPa。但随着含 NaCl 超细水雾雾通量的增加, 预混气体在管道内的最大爆炸压力相较于未通入超细水雾时出现明显下降。雾通量为 2.1 mL, 管段泄压口的不同阻塞率下的 p_{\max} 分别为 15.28、20.89、29.94 和 62.13 kPa; 雾通量为 8.4 mL, 管段泄压口不同阻塞率下的 p_{\max} 分别为 9.91、17.64、16.68 和 29.32 kPa。雾通量为 8.4 mL 的含 NaCl 超细水雾, 与无超细水雾相比, 不同阻塞率管道的 p_{\max} 下降幅度分别为 57.8%、31.3%、57.3% 和 59.2%。B 管道抑制区内, 在含 NaCl 超细水雾作用下, 水雾与爆炸火焰充分接触, 进行热量交换, 并且消耗爆炸反应中的自由基, 从而降低爆炸反应速率, 达到衰减爆炸压力的作用。

图 10 为施加不同雾通量的 NaCl 超细水雾作用于不同阻塞率泄压口管道火焰平均速度随阻塞率的变化关系。从图中曲线变化可以看出, 随着阻塞率的增加, 火焰平均速度呈现出先上升后下降的趋势, 其中无细水雾情况下, 泄压口阻塞率为 0.2 时, 火焰平均速度均高于阻塞率为 0、0.4 和 0.6 情况下的速度, 其次是阻塞率为 0 时的火焰平均速度; 但随着管道内 NaCl 超细水雾通入量增加时, 火焰平均速度在不断的减小且在阻塞率为 0 时, 火焰传播的平均速度从 94.88 m/s 分别下降到 43.59、39.33、36.66 和 27.81 m/s, 下降幅度由 54% 升至 71%。

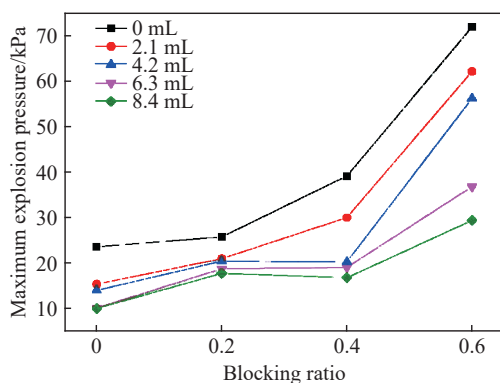


图 9 不同阻塞率下超细水雾对最大爆炸压力的影响

Fig. 9 Effect of ultrafine water mist on the maximum explosion pressure at different blocking ratios

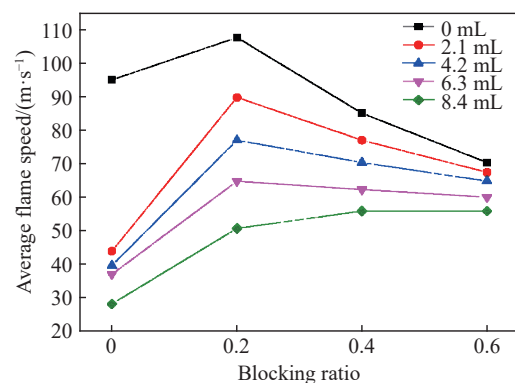


图 10 不同阻塞率下超细水雾对火焰平均速度影响

Fig. 10 Effect of ultrafine water mist on the average flame speed at different blocking ratios

含 NaCl 超细水雾作用下, 不同阻塞率下抑制区内火焰的平均传播速度均呈现出下降的趋势。这可能因为火焰在进入管道 B 初期, 由于管道间薄膜和水雾的双重因素, 使得火焰阵面发生扭曲变形, 形成小尺度湍流和火焰突然加速; 随着火焰在管道内继续传播, 在管道壁面约束作用下, 火焰沿壁面被拉长, 燃烧反应加快, 造成压力波强度增加。在阻塞率 ϕ 加大至 0.2, 管道泄压口处有较大的泄压面积, 泄压口法兰盘的阻挡作用较弱, 管道内部瓦斯受到一系列反射波的影响, 使内部气流紊流度会明显增加, 末端

迅速泄压,管内爆炸大尺度的湍流加快燃烧反应进行,在爆炸前期就可以发生较彻底的反应,使得阻塞率为0.2时火焰平均速度最快。阻塞率 ϕ 大于0.2后,泄爆口的有效泄压面积较小,泄爆口法兰盘对压力波的反射作用越强。当爆炸压力波传播至泄压口时,压力波会在泄压口壁面上形成反射,从而导致大量的水雾和气流发生逆向运动,使得含NaCl超细水雾更好的进入到燃烧区对爆炸反应链式反应进行阻断,最终导致爆炸强度减小,火焰传播速度降低,导致火焰传播速度低于阻塞率 ϕ 为0.2的平均速度。

2.2.4 含NaCl超细水雾对火焰结构的影响

施加含NaCl超细水雾后,火焰在管道内传播的图像,如图11所示。甲烷-空气预混气体A管内被点燃后以球形火焰向前推进,火焰直径在不断的扩大,在火焰边缘接触到管壁后开始加速向管道B传播。火焰前沿以热辐射及热传导的方式不断地将爆炸产生的热量传递给未反应区,火焰阵面在推进过程中曲率减小,转变为椭圆形。当火焰传播至A、B两段管道之间的PVC薄膜时,薄膜对火焰阵面的扰动,使火焰结构发生了明显的变化,火焰阵面扭曲变形,呈现出内凹外凸的结构,增大了火焰的燃烧空间,大量未燃区内的预混气和超细水雾被卷吸进入内部的燃烧空间。水雾在高温下快速蒸发,大量的添加剂晶体析出,并参与到燃烧反应过程中,随着火焰继续推进,下部凸出的火焰突然分裂出小火焰团,然后火焰团在超细水雾包裹下逐渐熄灭,钠离子的加入,在高压气流驱使下进入到爆炸反应区内,发生了焰色反应,使得火焰亮度的得到了增强并呈现出特别亮的桔黄色。

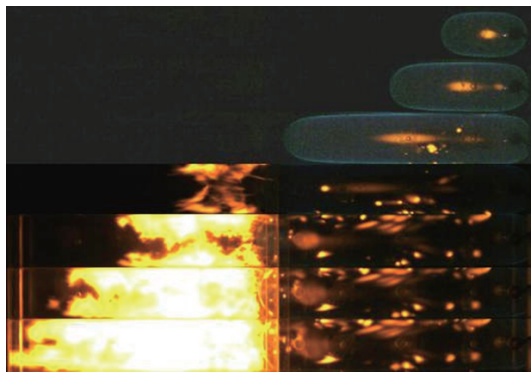


图11 含NaCl超细水雾作用下火焰图像

Fig. 11 Flame image with the action of ultrafine water mist containing NaCl

3 结论

(1)管道泄压口阻塞率对瓦斯爆炸压力和火焰传播速度有重要影响。仅在不同阻塞率(0、0.2、0.4和0.6)的泄压口作用下的管道瓦斯爆炸,爆炸超压随着管道阻塞率的增大而增强;阻塞率为0.6时,管道内爆炸产生的压力远高于其他阻塞率下的压力;阻塞率与火焰锋面传播至管道末端时间呈非线性关系,阻塞率为0.2时火焰平均速度最高。

(2)不同雾通量下的NaCl超细水雾对不同阻塞率泄压口管道的抑爆有重要影响。实验过程中施加不同雾通量(2.1、4.2、6.3、8.4 mL)的质量分数8%的NaCl超细水雾,雾通量为8.4 mL的NaCl超细水雾抑爆效果最佳;在雾通量为8.4 mL下,与无超细水雾相比,不同阻塞率管道的爆炸超压显著下降,幅度分别为57.8%、31.3%、57.3%和59.2%;在阻塞率为0的工况下,随着管道内通入的NaCl超细水雾雾通量的增加,火焰传播平均速度骤降。

(3)含NaCl超细水雾直接作用于爆炸火焰从而抑制爆炸传播。在管内爆炸高温环境下,含NaCl超细水雾快速蒸发吸热,导致火焰锋面在抑制区内移动速度减慢并褶皱变形,蒸发析出NaCl晶体以 Na^+ 和 Cl^- 参与到爆炸链式反应中,火焰呈现出明显的桔黄色,主体火焰对火焰团的辐射热被削弱,在水蒸气包裹下火焰团逐渐熄灭,爆炸强度降低。

参考文献:

- [1] YIN W T, FU G, YANG C, et al. Fatal gas explosion accidents on Chinese coal mines and the characteristics of unsafe behaviors: 2000-2014 [J]. *Safety Science*, 2017, 92: 173–179. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.09.018.
- [2] ZHOU F B, XIA T Q, WANG X X, et al. Recent developments in coal mine methane extraction and utilization in China: A review [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 31: 437–458. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.03.027.
- [3] BUNDY M, HAMINS A, LEE K Y. Suppression limits of low strain ratio non-premixed methane flames [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(3): 299–310. DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00012-9.
- [4] 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 CO₂ in a mini vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 393–400. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0393-08.
- [5] 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. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0393-08.
- YU M G, AN A, YOU H. Experimental study on inhibiting the gas explosion by water spray in tube [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 417–422. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0393-08.
- [6] 李永怀, 蔡周全. $\Phi 700$ mm 管道超细水雾抑制瓦斯爆炸实验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(3): 49–54. DOI: 10.13199/j.cst.2010.03.55.liyh.028.
- LI Y H, CAI Z Q. Experimental research on fine water spray in 700 mm diameter pipeline to restrain gas explosion [J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(3): 49–54. DOI: 10.13199/j.cst.2010.03.55.liyh.028.
- [7] JIANG B Y, LIU Z G, TANG M Y, et al. Active suppression of premixed methane/air explosion propagation by nonpremixed suppressant with nitrogen and abc powder in a semi-confined duct [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 29: 141–149. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.01.004.
- [8] KOROSTELEV V G. Aerosol-generating pyrotechnic compositions with components interacting in the combustion wave [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, 41(3): 315–318. DOI: 10.1007/s10573-005-0037-8.
- [9] CICCARELLI G, FOWLER C J, BARDON M. Effect of obstacle size and spacing on the initial stage of flame acceleration in a rough tube [J]. *Shock Waves*, 2005, 14(3): 161–166. DOI: 10.1007/s00193-005-0259-4.
- [10] 马凯, 马志鹏, 张巨峰, 等. 泡沫陶瓷结构内瓦斯爆炸反应的断链 [J]. *矿业工程研究*, 2013, 28(2): 33–36. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5876.2013.02.008.
- MA K, MA Z P, ZHANG J F, et al. Chain scission of gas explosion reaction in foam ceramics [J]. *Mineral Engineering Research*, 2013, 28(2): 33–36. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5876.2013.02.008.
- [11] 余明高, 孔杰, 王燕, 等. 改性赤泥粉体抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1289–1295. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0847.
- YU M G, KONG J, WANG Y, et al. Experimental research on gas explosion suppression by modified red mud [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1289–1295. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0847.
- [12] 程方明, 邓军, 文虎, 等. SiO₂ 纳米粉体抑制瓦斯爆炸的试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(8): 73–76. DOI: 10.13199/j.cst.2010.08.79.chengfm.026.
- CHEN F M, DENG J, WEN H, et al. Experiment study on SiO₂ nanometer powder to restrain gas explosion [J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(8): 73–76. DOI: 10.13199/j.cst.2010.08.79.chengfm.026.
- [13] SONG Y F, ZHANG Q. Quantitative research on gas explosion inhibition by water mist [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 363: 16–25. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.059.
- [14] 林滢. 瓦斯爆炸水系抑制剂的实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2006: 46.
- [15] 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: 10.13225/j.cnki.jccs.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: 10.13225/j.cnki.jccs.2006.05.012.
- [16] 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(2): 221–225. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.03.003.
- [17] 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*, 2016, 324(B): 489–497. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.017.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] AJRASH M J, ZANGANEH J, MOGHADDERI B. Flame deflagration in side-on vented detonation tubes: a large scale study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 345: 38–47. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.11.014.
- [21] XIAO H, WANG Q, SHEN X, et al. An experimental study of premixed hydrogen/air flame propagation in a partially open duct [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(11): 6233–6241. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.003.
- [22] 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. DOI: 10.1080/00102202.2012.705190.
- [23] ZHANG Q, PANG L, LIANG H M. Effect of scale on the explosion of methane in air and its shockwave [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(1): 43–48. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.08.011.
- [24] NFPA 750. Standard for the installation of water mist fire protection systems [S]. 1996 Edition. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2000. [https://catalog.nfpa.org/NFPA 750 Standard on Water Mist Fire Protection Systems P1366.aspx](https://catalog.nfpa.org/NFPA%20750%20Standard%20on%20Water%20Mist%20Fire%20Protection%20Systems%20P1366.aspx).
- [25] 徐景德, 周心权, 吴兵. 瓦斯浓度和火源对瓦斯爆炸传播影响的实验分析 [J]. *煤炭科学技术*, 2001(11): 15–17. DOI: 10.13199/j.cst.2001.11.18.xujd.007.
- XU J D, ZHOU X Q, WU B. Experimental analysis on gas density and fire resource affected to expansion of gas explosion [J]. *Coal Science and Technology*, 2001(11): 15–17. DOI: 10.13199/j.cst.2001.11.18.xujd.007.
- [26] 秦文茜, 王喜世, 谷睿, 等. 超细水雾作用下瓦斯的爆炸压力及升压速率 [J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(1): 90–95.
- QIN W Q, WANG X S, GU R, 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.
- [27] 李铮. 瓦斯爆炸及其细水雾抑制的实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 52–57.
- [28] 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: 41–48.

(责任编辑 王易难)