

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.024

细水雾对甲烷爆炸火焰传播特性及 驻停行为的影响研究*

夏静怡^{1,2}, 邓雨萱¹, 李佳霜¹, 路长², 陈硕²

(1. 四川轻化工大学 消防与安全工程学院, 自贡 643002; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 焦作 454003)

摘要: 为了研究细水雾在负压效应下对管道内甲烷爆炸传播的影响, 本研究通过自主搭建的实验平台, 探讨了9.5% CH₄/Air预混气体爆炸过程中的细水雾作用。实验采用有机玻璃管道系统, 模拟煤矿井下巷道结构, 分析了细水雾对爆炸超压、火焰传播速度及火焰特性的影响。结果表明: 细水雾能有效降低爆炸超压和强度, 同时引发火焰驻停和逆流现象。细水雾使燃烧区温度下降, 管内压力低于外部大气压, 形成负压区域, 导致气流回流速度大于火焰传播速度, 从而抑制火焰传播。细水雾在低速传播火焰时抑制效果显著, 而在高速传播时效果微弱。此外, 长管道内多喷头协同工作时, 喷头间距和配置显著影响火焰逆流的频率和持续时间。细水雾通过物理和化学作用可有效抑制甲烷爆炸传播, 尤其在火焰低速传播阶段效果显著, 可作为煤矿井下安全防护的有效技术手段。

关键词: 细水雾; 甲烷爆炸; 爆炸超压; 火焰传播速度; 减速逆流

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0225-10

Effects of Fine Water Mist on Flame Propagation Characteristics and Quenching Behavior in Methane Explosions

XIA Jing-yi^{1,2}, DENG Yu-xuan¹, LI Jia-shuang¹, LU Chang², CHEN Shuo²

(1. School of Chemistry & Environmental Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643002, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: To investigate the influence of fine water mist on gas explosion propagation in pipelines under adverse pressure conditions, an experimental platform was designed and built to explore the effect of fine water mist on the explosion characteristics of 9.5% CH₄/Air premixed gas. The experimental study employed a transparent acrylic pipeline system to simulate underground coal mine tunnel structures. It systematically investigated the influence of fine water mist on explosion overpressure, flame propagation velocity, and combustion characteristics. The experimental results demonstrate that fine water mist can significantly attenuate explosion overpressure and intensity while inducing

收稿日期 (Date of reception): 2025-07-22

网络首发日期 (Published online): 2025-10-23

作者简介: 夏静怡 (1998-), 女, 河南省荥阳市, 助教、硕士, 气体与粉尘爆炸防治, (E-mail) xiayingyi@suse.edu.cn。

通信作者: 陈硕 (1996-), 男, 河北省唐山市, 专职教师、硕士, 气体与粉尘爆炸防治, (E-mail) 454613551@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51974107) 基于减速条件下巷道瓦斯爆炸的阻隔爆新方法研究; 河南省科技攻关计划项目 (222102320142) 含添加剂双流体细水雾抑制外浮顶罐密封圈火灾关键技术及装备

About the author: XIA Jing-yi (1998-), female, born in Xingyang city, Henan province, teaching assistant, master's degree, majoring in gas and dust explosion prevention and control, (E-mail) xiayingyi@suse.edu.cn.

Corresponding author: CHEN Shuo (1996-), male, born in Tangshan city, Hebei province, full-time teacher, master's degree, majoring in gas and dust explosion prevention and control, (E-mail) 454613551@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (Project No. 51974107) Research on New Methods for Blocking and Suppressing Gas Explosions in Roadways Under Deceleration Conditions, Henan Provincial Science and Technology Research Project (Project No. 222102320142) Key Technologies and Equipment for Suppressing Fires in Sealing Rings of External Floating Roof Tanks with Additive-containing Twin-fluid Water Mist

flame quenching and backflow phenomena. Through thermal absorption in the combustion zone, the water mist reduces internal tube pressure below atmospheric levels, creating a negative-pressure zone where airflow reversal exceeds the flame-propagation velocity, effectively suppressing flame advancement. Experimental results reveal that fine water mist exhibits strong suppression of low-velocity flame propagation but is less effective against high-velocity flames. Furthermore, in extended pipeline systems with multiple nozzles, the spatial arrangement and configuration of the nozzles critically influence both the frequency and duration of flame backflow. Fine water mist demonstrates significant suppression of gas explosion propagation through combined physical and chemical mechanisms, particularly during low-velocity flame propagation phases, making it a viable safety technology for coal mine explosion mitigation.

Key words: water mist; methane explosion; explosion overpressure; flame propagation speed; deceleration countercurrent

随着我国经济的发展,人均能源消费量也在不断增长。科技创新推动了新能源的开发与应用,但其尚不足以完全替代传统能源以满足日常生产和生活的需求。目前,我国对煤炭能源的需求依然持续增长,70%以上的工业生产仍依赖煤炭为主要能源。然而,在生产过程中频繁发生的甲烷爆炸事故,给人民生命安全和国民经济发展带来了重大损失。甲烷爆炸具有破坏性强、突发性强和复杂性高等特点^[1-3]。因此,有效预防甲烷爆炸及减少其带来的危害具有重要的现实意义。

细水雾因其优异的灭火性能,且成本低廉,已成为甲烷爆炸研究领域的关键研究对象,并在全世界范围内得到广泛应用。细水雾是通过水流经过喷嘴形成的,与普通水相比,等体积的细水雾具有更大的表面积和更强的热交换能力,因此能够有效地阻断热辐射。在细水雾抑制甲烷爆炸的研究方面,国内外学者已开展了大量研究并取得了众多成果。Yoshida 等得出水雾可通过消耗燃烧反应中产生的自由基来降低火焰传播速度^[4]。Thomas 等发现细水雾的冷却作用和稀释作用在抑爆中起主要作用^[5]。牛国庆等认为^[6],随着超细水雾的通量的增加,可使气体爆炸超压有效降低。Zhao 等指出^[7],细水雾对于气体爆炸的抑制包含物理冷却和化学抑制双重机制。Galini 等得出细水雾的抑制效果受管道截面积、管道长度及点火位置的影响^[8]。Diao 等利用 Open FOAM-Cantera 耦合方法定量分析水雾通量对火焰动力学、温度演化等参数的影响^[9],结果表明:增加水雾容量显著降低火焰温度和传播速度,验证了水雾吸热蒸发机制在爆炸抑制中的关键作用。余明高等^[10]、裴蓓等^[11-13]、段玉龙等^[14]、李卓然等通过将细水雾与盐类添加剂、滑移装置、多孔介质等结合的方式^[15],探讨了细水雾对 CH₄/Air 爆炸的综合抑制效果。结果表明,细水雾与其他方式的联合使用在甲烷爆炸中比单独使用细水雾的抑爆效果更好。徐永亮等发现^[16,17],荷电细水雾能够更好地降

低火焰传播速度。Holbom 等指出超细水雾能够有效降低爆炸温度并延迟爆炸发生时间^[18]。CAO 等发现较小粒径的超细水雾主要通过吸热和冷却作用降低爆炸火焰的燃烧速度^[19,20],并在火焰发展初期形成暗色不规则结构,而不引起湍流火焰的产生。温小萍等通过研究多孔介质与超细水雾可有效协同抑制甲烷爆炸^[21]。

可以看出,细水雾能够有效抑制甲烷爆炸。然而,目前大多数研究集中于细水雾在爆炸发生前的抑制作用,即通过在爆炸体系内充满水雾来提前抑制未燃区的爆炸反应。这种方法对于持续向后传播的火焰,难以实现完全阻断。尽管结合泄压措施可以在火焰传播阶段通过有效降低爆炸压力来减缓火焰传播速度,但在煤矿井下巷道中,实施泄压较为困难。因此,可通过细水雾的主动喷出来抑制甲烷爆炸发生后已燃区的爆炸超压,从而减轻冲击波带来的危害,并通过减少已燃区和未燃区之间的压差,为后续阻隔爆炸装置的发挥创造更有利的条件。本文旨在通过自主搭建的 9.5%CH₄/Air 爆炸试验平台,开展细水雾主动抑爆的相关实验,重点分析爆炸发生后,细水雾作用下爆炸超压、火焰传播速度以及火焰特性等爆炸特征参数的变化。通过本研究,可为煤矿井下的安全防护提供有意义的探索和改进方向。

1 实验设计

1.1 实验设备

为达到预期目标,本文自行设计并搭建了实验平台。该平台由五部分组成,即管道系统、配气系统、测量系统、点火系统、细水雾抑爆系统,如图 1 所示。

管道系统是按一定比例缩小模拟煤矿井下巷道结构而搭建的,该系统是由两根尺寸为 15 cm × 15 cm × 100 cm 的透明有机玻璃管道拼接而成,管道壁厚 20 mm,承压 2.0 MPa,可以满足实验压力要

求同时便于记录图像数据,管道之间通过加有方形硅胶垫圈的法兰连接。该系统采用半封闭式,即管道一侧用有机玻璃板封闭,另一侧用PVC薄膜封闭。配气系统由甲烷气瓶(内置纯度为99.99%的高压甲烷)、空气压缩机,甲烷质量流量计、空气质量流量计等组成,其中甲烷质量流量计量程为0~5 L/min,空气质量流量计量程为0~50 L/min。测量系统分为两个部分,即压力采集系统和图像采集系统,压力采集系统主要由压力传感器、数据采集卡和相关数据采集软件等组成,图像采集系统由频率为 1.00×10^3 FPS的高频摄像机和三脚架等组成,该相机能够拍摄出清晰照片,因此可以记录爆炸时火焰传播过程。这些影像数据后期经软件程序处理可以得到火

焰传播过程的静态图像,通过对比预混气体爆炸火焰阵面的变化过程,进而可以求算火焰前锋传播速度。点火系统由高频脉冲点火器、铂丝点火头、开关、电源等组成,点火能量为 0.15 ± 0.01 J,点火延迟时间为0.2 s。细水雾抑爆系统由火焰传感器、数据采集卡、电磁阀控制系统和细水雾发生装置等组成,其中火焰传感器可以探测波长 $7.60 \times 10^2 \sim 1.10 \times 10^3$ nm范围内光线,将光学信号转化为电信号后通过采集卡传输,经由电脑判断后输出电信号到电磁阀控制系统,该系统由电磁阀、直流电源、场效应管等组成。细水雾发生装置由气瓶(内置高压氮气,喷雾压力为0.6 MPa)、细水雾喷头(孔径1.5 mm,水雾流量为 1.08×10^2 L/min)、储水罐等组成。

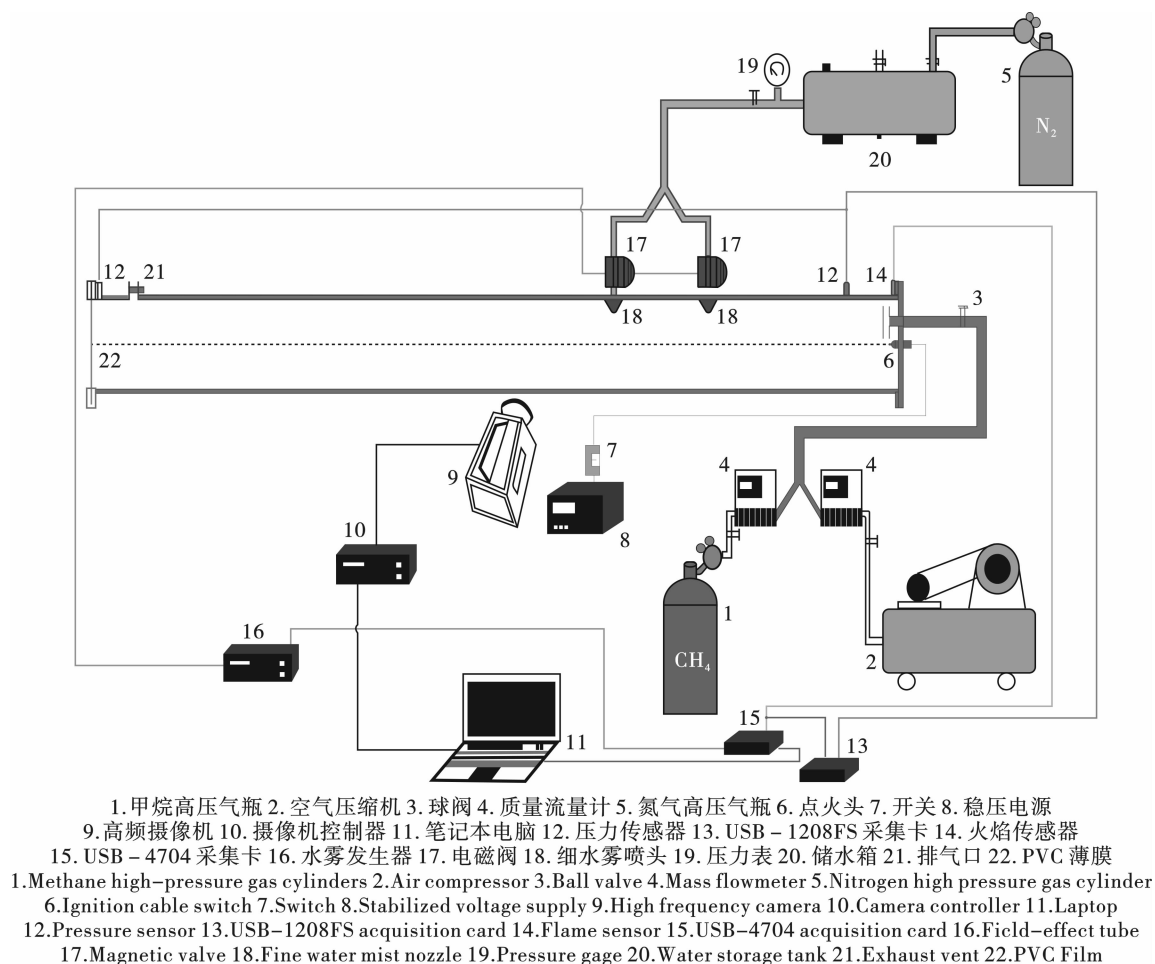


图1 实验装置系统图

Fig. 1 Experimental device system diagram

1.2 实验方法及工况

本实验主要研究细水雾对9.5%CH₄/Air预混气体爆炸初期传播特性的影响。首先检查装置气密性。充气完成后,关闭进气和排气球阀,静置约30 s,确保甲烷与空气充分混合,形成均匀的预混气体,并启动电脑数据采集软件和高频摄像机。随后,

通过开关启动点火装置。点火后,火焰传感器会迅速检测到爆炸火焰,光电信号转化后电压变化超过0.2 V,经过程序判断后,电信号传输至场效应管,控制电磁阀开启。此时,储水罐中的水通过高压氮气驱动,经喷嘴形成细水雾,作用于甲烷爆炸传播过程。最后,整理并保存实验数据,包括爆炸超压变化

和火焰传播图像等。每个工况至少进行三次实验,控制实验数据的相对标准偏差在 $\pm 5\%$ 以内,以确保数据的准确性和真实性。并建立坐标轴,将点火端

处记为 0 m 位置,由点火端指向出口端的方向记为坐标轴的正方向。实验工况设计和细水雾喷头位置摆放情况分别见表 1 和图 2。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

2 m 长管道充 2 m 9.5% CH ₄ /Air 系列工况 2 m-long pipeline filled with 2 m of 9.5% CH ₄ /Air series working conditions		3 m 长管道充前 2 m 9.5% CH ₄ /Air 系列工况 3 m-long pipeline filled with 2 m of 9.5% CH ₄ /Air in the front section series working conditions	
1	无细水雾作用下的纯甲烷爆炸(空白对照) Pure methane explosion without the action of fine water mist. (blank control)	7	无细水雾作用下的纯甲烷爆炸(空白对照) Pure methane explosion without the action of fine water mist. (blank control)
2	0.5 m 上方位置处单喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of a single-nozzle fine water mist at a position 0.5 m above the ignition electrode.	8	0.5 m 上方、0.8 m 上方位置处双喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of double-nozzle fine water mist at the positions 0.5 m above and 0.8 m above the ignition electrode.
3	0.5 m 下方位置处单喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of a single-nozzle fine water mist at a position 0.5 m below the ignition electrode.	9	0.5 m 上方、1.5 m 上方位置处双喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of double-nozzle fine water mist at the positions 0.5 m above and 1.5 m above the ignition electrode.
4	0.5 m 上方位置处单喷头 10% NaOH 细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of a single-nozzle fine water mist with 10% NaOH at a position 0.5 m above the ignition electrode.	10	0.5 m 上方、2.5 m 上方位置处双喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of double-nozzle fine water mist at the positions 0.5 m above and 2.5 m above the ignition electrode.
5	0.5 m 上方、0.8 m 上方位置处双喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of single-nozzle fine water mist with 10% NaOH at the position 0.5 m above ignition electrode.	11	2.5 m 上方位置处单喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of single-nozzle fine water mist at the position 2.5 m above the ignition electrode.
6	0.5 m 下方、0.8 m 上方位置处双喷头细水雾作用下的甲烷爆炸 Methane explosion under the action of double-nozzle fine water mist at the positions 0.5 m below and 0.8 m above ignition electrode.		

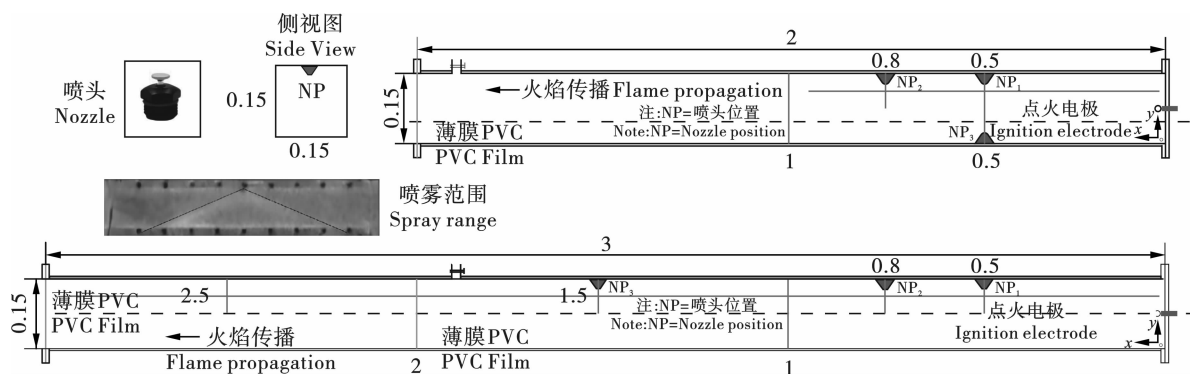


图 2 细水雾喷头布置示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of water mist nozzle layout(unit:m)

2 实验结果及分析

2.1 细水雾作用时的火焰特性及速度分析

图3、图4(a)~(e)分别展示了工况7、工况11、工况8、工况9和工况10的火焰传播图像。可以看出,3 m管道工况中,细水雾的作用使得火焰断层比2 m管道工况更为明显,且各工况在不同程度上均出现了火焰驻停和逆流现象,逆流的持续时间更长,发生的次数也更多。在图4(a)中,火焰峰面在120~130 ms之间保持不变,既不前进也不后退,这是因为此时爆炸压力处于负压阶段,气流回流速度与火焰传播速度相平衡。图4(b)中,火焰前锋在123~130 ms之间也出现了驻停现象,压力曲线显示该阶段同样处于负压区,且两图中的负压值相差

不大,均为约-2.65 kPa。图4(c)、图4(d)和图4(e)显示了明显的火焰逆流现象,其中0.5 m和1.5 m位置的双喷头协同工作时,逆流现象最为频繁,且持续时间最长。根据火焰的亮度和到达出口的时间,可以看出该工况下细水雾对爆炸火焰的抑制效果最好。特别是图4(c)和图4(d)中的逆流次数多于图4(e),这主要是由于细水雾喷头的位置影响。当火焰以低速传播至某位置时,如果该位置恰好设置了喷头,细水雾能够有效抑制该区域的爆炸反应,降低区域内的压力,从而削弱火焰的驱动力。通过比较图4(b)和图4(e)中的火焰传播时间,可以看出细水雾对火焰的抑制效果在近出口区域不明显,表明细水雾在火焰高速传播状态下对爆炸反应区的抑制效果有限。

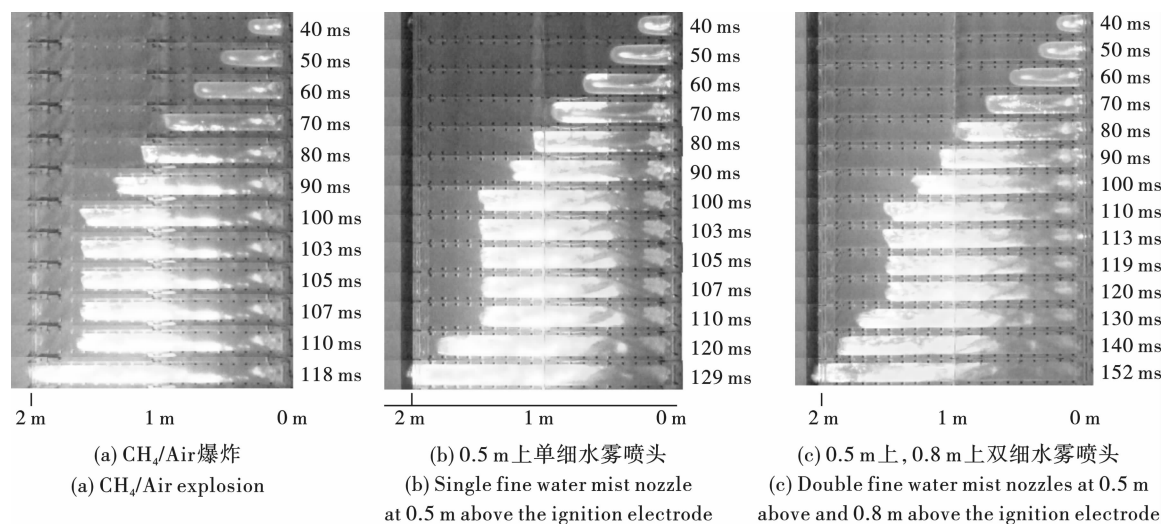


图3 2 m管道系列不同工况下的火焰传播图像

Fig. 3 Flame propagation images of a 2 m pipeline series under different working conditions

结合图5可知,细水雾可以有效降低爆炸火焰在管道中的传播速度。2 m管道系列中0.5 m上,0.8 m上双喷头组合抑制效果最佳,3 m管道系列中0.5 m上和1.5 m上的双喷头组合抑制效果最佳,其次是0.5 m和0.8 m管道上方位置处,最后是0.5 m和2.5 m管道上方。由此可见,水雾施加量和喷头空间位置均为影响细水雾抑制效果的关键因素。

2.2 细水雾作用时的压力变化特征

2.2.1 对爆炸超压的影响分析

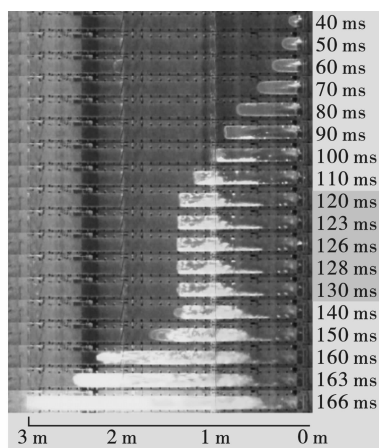
从图6可以看出,在点火端附近区域加入细水雾能够有效降低 P_{max1} 。结合表2的结果,单喷头置于管道0.5 m上方时,喷洒纯净细水雾和含10% NaOH的细水雾均能有效降低 P_{max1} ,降幅分别为23.34%和21.42%。相比之下,将单喷头置于管道

0.5 m下方喷洒纯净细水雾时,其对 P_{max1} 的抑制效果约为上方喷洒纯净细水雾效果的三分之一。这是因为水雾在向上喷洒过程中,雾滴受到重力影响,导致与火焰接触的面积减小,许多水雾颗粒在接触火焰前就因沉降作用而落到管道壁面并凝结成大水滴。与未错位布置的双喷头(0.5 m上、0.8 m上)相比,错位布置(0.5 m下、0.8 m上)的双喷头对 P_{max1} 的抑制效果更差。这是因为水雾喷射方向不同且喷头间距较近,水雾颗粒间的碰撞概率增大,导致许多水雾颗粒在接触火焰前被消耗,从而影响了抑制效果。在 P_{max1} 之后,各工况均出现短暂的负压阶段,其中0.5 m上单喷纯净细水雾工况的负压峰值绝对值最大,而0.5 m上和0.8 m上双喷纯净细水雾工况的负压阶段持续时间最长。这是因为细水雾通过阻滞爆炸反应区的前移,水雾颗粒的物理和化

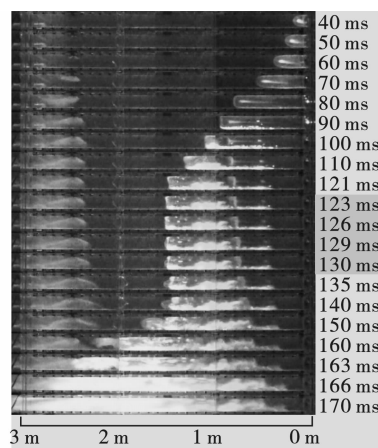
学抑制作用使链式反应中的活性基团浓度降低,有效碰撞次数减少,从而降低了反应区的燃烧强度,形成负压区域。如图 6 所示,多喷头协同工作时,抑制作用的范围扩大,负压持续时间更长。负压阶段过后,含水雾的工况相比纯爆炸工况的爆炸超压普遍较低。综上所述(见图 7),细水雾的喷洒能够有效

降低爆炸超压,尤其在 0.5 m 上单喷纯净细水雾工况中形成的负压峰值绝对值最大,随着水雾喷头数量的增加,负压阶段的持续时间也随之延长。变化幅度的计算方法如式(1)所示。

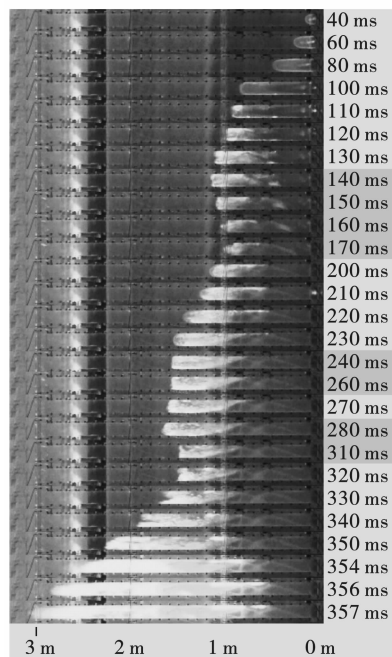
$$\text{变化幅度}(\%) = (\text{实验工况值} - \text{空白对照值}) / \text{空白对照值} \times 100\% \quad (1)$$



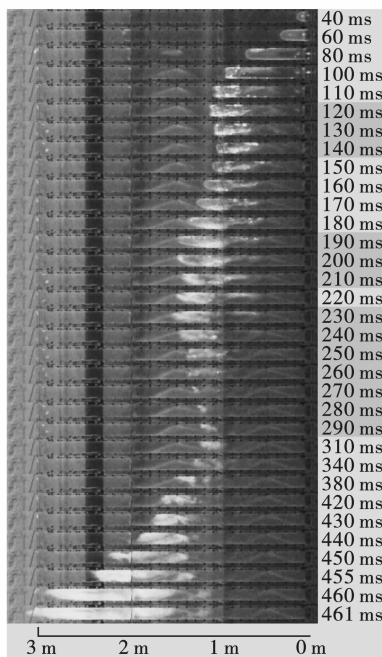
(a) CH₄/Air 爆炸
(a) CH₄/Air explosion



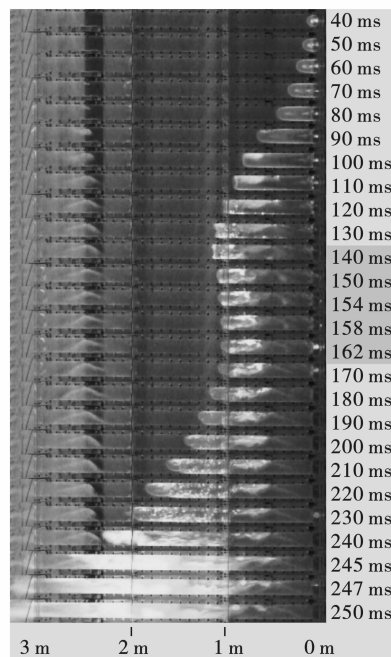
(b) 2.5 m 上单细水雾喷头
(b) Single fine water mist nozzle
at 2.5 m above the ignition electrode



(c) 0.5 m 上, 0.8 m 上双细水雾喷头
(c) Double fine water mist nozzles at 0.5 m
above and 0.8 m above the ignition electrode



(d) 0.5 m 上, 1.5 m 上双细水雾喷头
(d) Double fine water mist nozzles at 0.5 m
above and 1.5 m above the ignition electrode



(e) 0.5 m 上, 2.5 m 上双细水雾喷头
(e) Double fine water mist nozzles at 0.5 m
and 2.5 m above the ignition electrode

图 4 3 m 管道系列不同工况下的火焰传播图像

Fig. 4 Flame propagation images of 3m pipeline series under different working conditions

从图 8(a)可以看出,3 m 管道工况中,双喷头协同工作对预混气爆炸超压具有明显的抑制效果。其中,0.5 m 和 2.5 m 双喷头组合的超压曲线在 203 ms 时出现小幅高峰。结合火焰图像分析,火焰

前锋此时已到达 1.5 m 位置,但该位置未设置细水雾喷头,因此缺乏对爆炸超压的抑制作用。此外,初始端附近的水雾量较少,未能有效抑制后方区域的压力,因此出现了压力突增现象。从图 8(b)可以看

出,在 0.5 m 和 2.5 m 双喷头组合中,0.5 m 处喷头对超压的抑制作用较为显著,而 2.5 m 处喷头的抑制效果较弱。

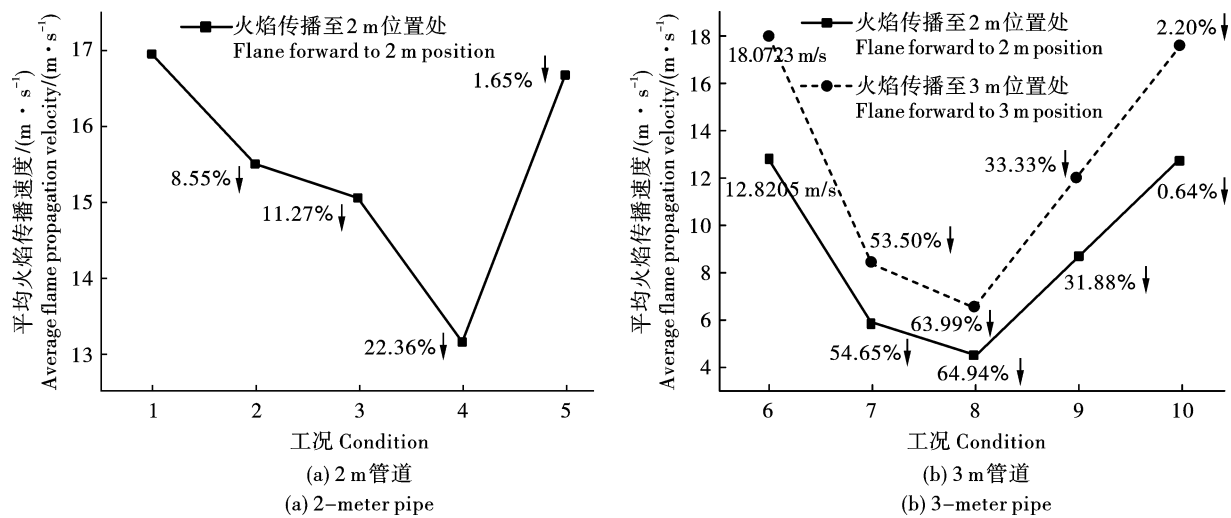


图 5 不同工况条件下的平均火焰传播速度
Fig. 5 Average flame propagation velocity under different working conditions

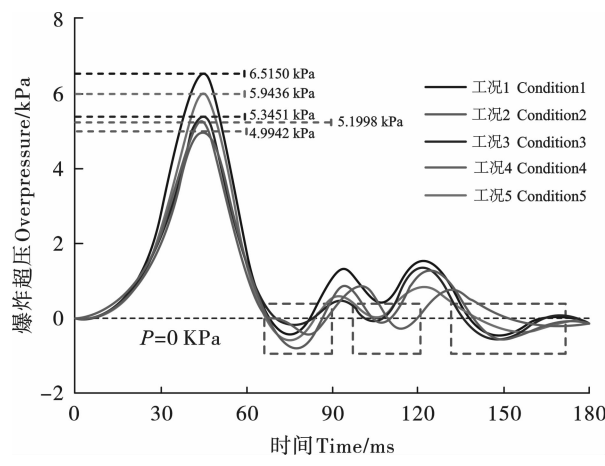


图 6 2 m 管道内细水雾作用时爆炸超压随时间的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of explosion overpressure with time under the action of water mist in 2 m pipe

结合前述实验现象分析,当火焰处于低速传播状态时,细水雾能够有效发挥抑制作用;而当爆炸火焰处于高速传播状态时,细水雾的抑制效果则不明显。两图中均出现明显的负压阶段,约在 83 ms 时,负压达到高峰,且两图的峰值相差不大;在 105 ms 时,双喷头工况的负压回升为正压的幅度较小,且超压峰值明显低于纯爆炸工况。其原因在于,细水雾颗粒进入反应体系后,通过物理和化学作用降低了爆炸链式反应中活性基团的浓度,有效减少了碰撞次数,从而减缓了反应区的燃烧强度并形成负压区域。这一现象与 2 m 管道工况的结论一致,但在 3 m 管道工况中,受管道长度的影响,该现象更加显著。

表 2 2 m 管系列工况初始端最大爆炸超压的变化情况

Table 2 Maximum explosion overpressure at the initial end of 2 m pipe series under working conditions					
工况 Condition	最大爆炸超压 Maximum explosion overpressure/kPa	变化幅度 Variation range/%	工况 Condition	最大爆炸超压 Maximum explosion overpressure/kPa	变化幅度 Variation range/%
1	6.5150	-	4	5.1195	-21.42
2	4.9942	-23.34	5	5.1998	-20.19
3	5.9436	-8.77	6	5.3451	-17.96

注:1 为空白对照实验,2~6 下降幅度都是相对 1 而言。
Note: Condition 1 is the blank control experiment, and the decline ranges of Conditions 2~6 are relative to Condition 1.

2.2.2 对爆炸强度的影响分析

爆炸强度通常由爆炸指数表示,主要受爆炸压升

速率和容器体积的影响。其中,压升速率反映超压变化快慢,计算详见式(2),爆炸指数计算详见式(3)

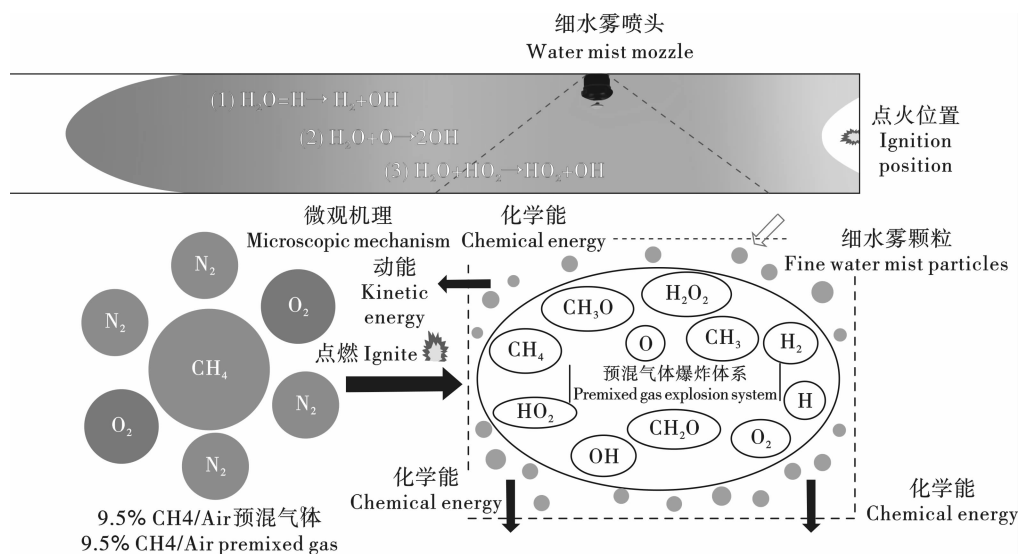
图 7 细水雾抑制 9.5% CH_4 /Air 预混气爆炸机理示意图

Fig. 7 Mechanism diagram of fine water mist inhibiting 9.5% methane/air premixed gas explosion

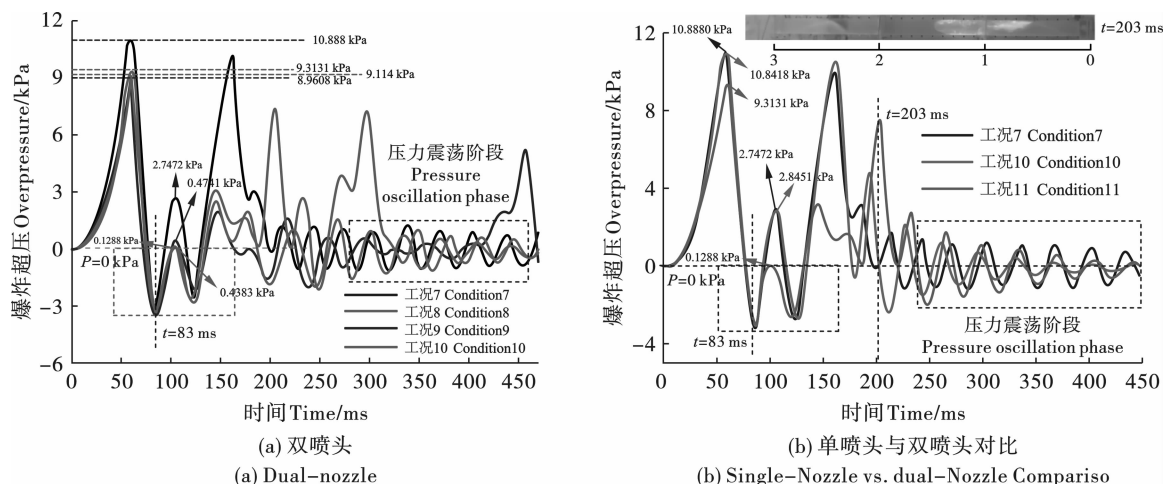


图 8 3 m 管道内细水雾作用时爆炸超压随时间的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of explosion overpressure with time under the action of water mist in 3 m pipe

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_2 - p_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: $\frac{dp}{dt}$ 为压升速率, $kPa \cdot ms^{-1}$; p_1 、 p_2 为两测点超压, kPa ; t_1 、 t_2 为对应时刻, ms 。

$$K = (1.00 \times 10^2) \times (dp/dt)_{\max} \times V^{1/3} \quad (3)$$

式中: K 为爆炸指数, $(kPa \cdot m) \cdot s^{-1}$; $\frac{dp}{dt}_{\max}$ 为最大压升速率, $kPa \cdot ms^{-1}$; V 为体积, L 。见表 3。

可以看出,工况 10 的爆炸指数增加了 45.11%。这是因为喷头间距过大,中间区域缺乏细水雾覆盖,形成了抑制盲区;且 2.5 m 位置接近管道出口,此时火焰已加速至较高速度,细水雾颗粒与高速火焰相互作用产生强烈湍流,反而促进了燃烧反应。从图 8(a)可以看出,3 m 管道中,双喷头协同工作对预混

气爆炸超压具有明显的抑制效果。其中,0.5 m 和 2.5 m 双喷头组合的超压曲线在 $2.03 \times 10^2 ms$ 时出现小幅高峰。结合火焰图像分析,火焰前锋此时已到达 1.5 m 位置,但该位置未设置细水雾喷头,因此缺乏对爆炸超压的抑制作用。此外,初始端附近的水雾量较少,未能有效抑制后方区域的压力,因此出现了压力突增现象。从图 8(b)可以看出,在 0.5 m 和 2.5 m 双喷头组合中,0.5 m 处喷头对超压的抑制作用较为显著,而 2.5 m 处喷头的抑制效果较弱。结合前述实验现象分析,当火焰处于低速传播状态时,细水雾能够有效发挥抑制作用;而当爆炸火焰处于高速传播状态时,细水雾的抑制效果则不明显。两图中均出现明显的负压阶段,约在 83 ms 时,负压达到高峰,且两图的峰值相差不大;在 105 ms 时,双喷头工况的负压回升为正压的幅度较小,且超压峰

值明显低于纯爆炸工况。其原因在于,细水雾颗粒进入反应体系后,通过物理和化学作用降低了爆炸链式反应中活性基团的浓度,有效减少了碰撞次数,从而减缓了反应区的燃烧强度并形成负压区域。这一现象与 2 m 管道工况的结论一致,但在 3 m 管道工况中,受管道长度的影响,该现象更加显著。

表 3 不同工况条件下爆炸强度的变化情况
Table 3 Variation of explosion intensity under different working conditions

工况 Condition	爆炸指数 Explosion Index/ (kPa·m)/s	变化幅度 Variation Range/%	工况 Condition	爆炸指数 Explosion Index/ (kPa·m)/s	变化幅度 Variation Range/%
1	120	--	7	209	--
2	93.48	-21.87	8	199	-5.34
3	113	-5.88	9	153	-26.78
4	97.10	-18.85	10	303	+45.11
5	95.48	-20.20	11	234	+12.01
6	99.66	-16.71	--	--	--

注:1 和 7 为空白对照实验,2~6 变化幅度都是相对 1 而言,8~11 变化幅度都是相对 1 而言。
Note: Conditions 1 and 7 are blank control experiments. The variation ranges of Conditions 2~6 are relative to Condition 1, and the variation ranges of Conditions 8~11 are relative to Condition 1.

3 结论

通过研究管道内细水雾对爆炸特性的影响,可为构建煤矿井下瓦斯爆炸综合防控体系提供理论依据,得出主要结论如下:

(1)在爆炸火焰传播过程中,化学反应区不断向前移动。爆炸冲击波导致管道内气体外流,气体质量下降。喷入细水雾后,燃烧区温度急剧下降,管内压力低于外部大气压,形成负压区域。当火焰前锋接近泄爆口时,由于外界大气压相对较低,此时反应区前后的压差最大。

(2)细水雾的抑制效果在火焰低速传播状态下尤为明显,而在火焰高速传播时,抑制效果则微弱。细水雾的作用呈现双重性,即在低速传播时发挥抑制作用,在高速传播时则表现为促进作用。在低速传播时,细水雾的抑制作用占主导,对火焰的前进传播产生阻尼效应,表现为火焰逆流现象。与 2 m 管道相比,3 m 管道中该现象更为明显。当火焰处于高速传播状态时,细水雾的促进作用更加显著。

(3)在爆炸传播过程中,细水雾的作用使得火焰前锋出现驻停或逆流现象。当气流回流速度等于火焰传播速度时,火焰前锋位置保持不变;而当气流回流速度大于火焰传播速度时,火焰前锋会向反方向移动。在长管道中,双喷头协同工作时,这一现象更加明显,且喷头间距直接影响火焰逆流的持续时间和发生次数。在 0.5 m 和 1.5 m 位置的双喷头协同工作时,火焰逆流现象出现的时间最长,且次数最多,抑制效果最好。

参考文献 (References)

[1] 段征,张颖,马智会,等. 回型管道甲烷爆炸传播规律实验研究[J]. 热科学与技术,2025,24(2):128-138.

[1] DUAN Zheng, ZHANG Ying, MA Zhi-hui, et al. Experimental study on gas explosion propagation law in looped pipeline[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2025, 24(2):128-138. (in Chinese)

[2] 程建华,暴雯雯,杨小林,等. 不同长径比对甲烷/空气预混爆炸升压特性影响研究[J]. 爆破, 2025, 42(2): 13-21.

[2] CHENG Jian-hua, BAO Wen-wen, YANG Xiao-lin, et al. Experimental study on pressure rise characteristics of methane-air premixed explosion under different length-diameter ratios[J]. Blasting, 2025, 42(2): 13-21. (in Chinese)

[3] 程建华,张紫君,王辉,等. 长径比对甲烷/空气预混爆炸超压冲量特性影响研究[J/OL]. 爆破: 1-17. [2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.tj.20250410.1314.009>.

[3] CHENG Jian-hua, ZHENG Zi-jun, WANG Hui, et al. Study on the influence of length-diameter ratio on over-pressure impulse characteristics of methane/air premixed explosion[J/OL]. Blasting: 2025: 1-17. [2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.tj.20250410.1314.009>. (in Chinese)

[4] YOSHIDA A, OKAWA T, EBINA W, et al. Experimental and numerical investigation of flame speed retardation by water mist[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(5): 1772-1777.

- [5] THOMAS G O, JONES A, EDWARDS D H. Influence of water sprays on explosion development in fuel-air mixtures [J]. *Combustion Science and Technology*, 1991(80): 47-61.
- [6] 牛国庆, 马亚男, 贾海林. 超细水雾抑制预混可燃气体爆炸超压的衰减模型 [J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(2): 447-456.
- [6] NIU Guo-qing, MA Ya-nan, JIA Hai-lin. Attenuation model of ultra-fine water mist suppressing premixed combustible gas explosion overpressure [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(2): 447-456. (in Chinese)
- [7] ZHAO Jiang-yue. Study on the suppression of methane/hydrogen/air explosions by water mist containing a Bmi-mBF4 additive [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 145: 332-344.
- [8] HOUSTIS E N, CATLIN A C, TSOMPANPOULOU P, et al. Gas Turbn Lab: a multidisciplinary problem solving environment for gas turbine engine design on a network of nonhomogeneous machines [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2002, 149(1): 83-100.
- [9] DIAO Shou-tong, LI Hai-tao, WEI Cheng-cai, et al. Numerical simulation on the inhibition effect of water mist capacity on hydrogen/air explosions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 198: 107-121.
- [10] 余明高, 杨 勇, 裴 蓓, 等. N_2 双流体细水雾抑制管道甲烷爆炸实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 194-200.
- [10] YU Ming-gao, YANG Yong, PEI Bei, et al. Experimental study on suppression of pipeline gas explosion by N_2 two-fluid water mist [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 194-200. (in Chinese)
- [11] 裴 蓓, 胡紫维, 韩谕良, 等. 含改性氯化物对 N_2 /细水雾抑制 LPG 爆炸影响研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(11): 171-182.
- [11] PEI Bei, HU Zi-wei, HAN Yu-liang, et al. Study on the inhibition effect of N_2 -water mist containing modified chlorine compounds on LPG explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(11): 171-182. (in Chinese)
- [12] PEI Bei, XU Tian-xiang, ZHOU Lei, et al. The inhibition of CO_2 twin-fluid water mist with modified inorganic salt on LPG explosion: Experimental tests and simulations [J]. *Energy*, 2025, 335: 138235.
- [13] 裴 蓓, 郝治斌, 徐天祥, 等. 表面活性剂对含盐双流体细水雾灭火效能的影响 [J]. *化工学报*, 2024, 75(9): 3369-3378.
- [13] PEI Bei, HAO ZHI-bin, XU Tian-xiang, et al. Effect of surfactants on fire-extinguishing efficiency of saline two-fluid water mist [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(9): 3369-3378. (in Chinese)
- [14] 段玉龙, 李元兵, 杨燕铃, 等. 细水雾协同滑动装置对甲烷/空气预混气体爆炸特性的影响 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(5): 182-188.
- [14] DUAN Yu-long, LI Yuan-bing, YANG Yan-ling, et al. Influence of water mist combined with sliding device on explosion characteristics of methane/air premixed gas [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(5): 182-188. (in Chinese)
- [15] 李卓然, 夏远辰, 张 彬, 等. 细水雾对置障管内预混气体抑爆机理研究 [J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(6): 884-887.
- [15] LI Zhuo-ran, XIA Yuan-chen, ZHANG Bin, et al. Study on explosion suppression mechanism of water mist on premixed gas in pipeline with obstacles [J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(6): 884-887. (in Chinese)
- [16] 徐永亮, 王兰云, 余明高, 等. 感应式荷电细水雾对甲烷爆炸传播速度的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(8): 2884-2890.
- [16] XU Yong-liang, WANG Lan-yun, YU Ming-gao, et al. Influence of inductively charged water mist on gas explosion propagation velocity [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2016, 47(8): 2884-2890. (in Chinese)
- [17] 徐永亮, 万少杰, 余明高, 等. 感应式荷电细水雾荷质比影响规律研究 [J]. *煤炭技术*, 2015, 34(5): 185-187.
- [17] XU Yong-liang, WAN Shao-jie, YU Ming-gao, et al. Study on influence law of charge-to-mass ratio of inductively charged water mist [J]. *Coal Technology*, 2015, 34(5): 185-187. (in Chinese)
- [18] HOLBORN P G, BATTERSBY P, INGRAM J M, et al. Modelling the mitigation of hydrogen deflagrations in a vented cylindrical rig with water fog and nitrogen dilution [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(8): 3471-3487.
- [19] CAO Xing-yan, WANG Chao-dong, WANG Yue, et al. Research on the inhibition characteristics of ultrafine water mist on gas/dust two-phase mixture explosions [J]. *Fuel*, 2024, 357(PartC): 10.
- [20] CAO Xing-yan, ZHOU Xiang, WANG Zhi, et al. Study on the synergy inhibition of ultrafine water mist and metal wire mesh on the syngas explosion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 57: 1089-1100.
- [21] 温小萍, 郭志东, 王发辉, 等. 一维多孔介质和超细水雾协同抑制甲烷爆炸试验 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(2): 539-547.
- [21] WEN Xiao-ping, GUO Zhi-dong, WANG Fa-hui, et al. Experiment on synergistic inhibition of gas explosion by one-dimensional porous media and ultra-fine water mist [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(2): 539-547. (in Chinese)