

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170585

含 NaCl 荷电细水雾对甲烷爆炸火焰传播的抑制特性

余明高^{1,2}, 吴丽洁¹, 万少杰¹, 郑凯¹

(1 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为进一步提高细水雾抑制甲烷爆炸的效率, 搭建了小尺寸细水雾抑制甲烷爆炸实验平台, 在普通细水雾中添加 NaCl 添加剂, 并对其荷电, 进行含 NaCl 添加剂荷电细水雾抑制甲烷爆炸火焰传播特性的实验研究。结果表明, 含 NaCl 添加剂荷电细水雾对甲烷爆炸火焰传播的抑制效果, 优于普通细水雾单独添加 NaCl 添加剂和荷电作用的抑制效果之和。随着 NaCl 浓度和荷电电压的增大, 甲烷爆炸火焰传播速度明显减小; 其中荷电 8 kV、NaCl 浓度 12.5% 的工况抑制效果最佳, 甲烷爆炸火焰传播速度二次峰值较普通细水雾作用时下降了 $10.747 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 下降比例高达 60.26%; 分析认为, 在细水雾抑制甲烷爆炸火焰传播的过程中, NaCl 添加剂和荷电作用之间存在相互促进抑制效果的耦合作用。

关键词: 感应荷电; NaCl 添加剂; 细水雾; 甲烷; 火焰速度; 耦合作用

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 11—4445—08

Inhibition characteristics on methane explosion flame propagation affected by charged water mist containing sodium chloride additive

YU Minggao^{1,2}, WU Lijie¹, WAN Shaojie¹, ZHENG Kai¹

(1 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2 School of Safety Science Engineering Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: In order to further improve the suppression efficiency of water mist on methane explosion, a small-scale experiment platform was set up to inhibit methane explosion using water mist. The NaCl additive was introduced to the ordinary water mist, and then charge the water mist containing NaCl additive to carry out experimental study on suppressing flame propagation of methane explosion using charged water mist containing NaCl additive. The experimental results show that the inhibition effect of charged water mist containing NaCl additive on methane explosion flame propagation is better than that the sum of inhibition effect when NaCl additive and charging effects act individually in normal water mist. With the increase of NaCl concentration and charge voltage, the flame propagation velocity of methane explosion is obviously reduced. The secondary peak of the flame propagation velocity of methane explosion is decreased by $10.747 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ compared with that of ordinary water mist, and the drop ratio up to 60.26% when the charge is 8 kV and the concentration of NaCl is 12.5%; The secondary peaks of the load of 8 kV and NaCl concentration of 12.5% decrease by 5.177 and $5.247 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively, and the sum of the two decreases is $10.424 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The analysis considered that there exists a coupling effect between the NaCl additive and the charging effect in the process of suppressing the flame propagation of the

2017-05-09 收到初稿, 2017-08-07 收到修改稿。

联系人: 吴丽洁。第一作者: 余明高 (1963—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51574111); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研究课题重点项目 (2011DA105287-ZD201401)。

Received date: 2017-05-09.

Corresponding author: WU Lijie, 945865233@qq.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51574111) and the Self-study Key Projects of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control Chongqing University (2011DA105287-ZD201401).

methane explosion by the water mist.

Key words: inductive charge; sodium chloride additive; water mist; methane; flame velocity; coupling effect

引 言

甲烷爆炸事故一旦发生,往往造成惨重的财产损失,严重威胁到人身安全,因此成为备受关注的安全问题。如煤矿开采和天然气输运过程中发生的甲烷爆炸事故。为减轻甲烷爆炸带来的灾害,国内外学者对众多用于抑制瓦斯爆炸的材料进行了研究。在这些抑爆材料中,细水雾特别是超细水雾(雾滴粒径小于 $50\ \mu\text{m}$)因其相对低成本、环保以及可用性广泛等优点,成为众多学者研究的热点。

前人对细水雾抑制甲烷爆炸的效果和机理进行了全面的研究,结果表明细水雾能发挥抑制甲烷爆炸的效果^[1-4],主要作用机理为冷却降温、稀释可燃气体以及中断爆炸链式反应^[5-8]。为进一步增强细水雾的物理、化学抑制效果,学者们开展了细水雾添加剂方面的研究。Zheng 等^[9]进行了含 NaCl 添加剂细水雾与纯细水雾抑制甲烷对冲火焰的对比实验,发现含添加剂水雾比纯水雾具有更好的熄灭火焰效果,这是因为含添加剂水雾增强了火焰外部辐射热量的散失,并降低了整体化学反应的温度。Lazzarini 等^[10-11]从化学阻链抑制角度展开实验研究,发现添加含碱金属盐细水雾能发挥更好的抑制作用,原因是添加剂粒子与自由基发生作用,达到降低活性自由基的浓度,以及中断链式反应的效果。孙智灏等^[12]对不同质量分数 NaCl 和复合添加剂细水雾抑爆情况进行研究,分析认为

NaCl 主要通过捕获自由基,起到抑制燃烧链式反应的作用,且 NaCl 具有相对略优的灭火稳定性。通过对细水雾荷电也能有效地增强细水雾抑制甲烷爆炸的效果。余明高等^[13-16]根据静电感应原理开展了荷电细水雾抑制甲烷爆炸的系列实验研究,发现荷电细水雾对甲烷爆炸超压以及火焰传播速度都有明显的抑制作用,且荷负电的荷电细水雾具有更优的效果。

国内外众多学者在细水雾抑制甲烷爆炸以及如何增强抑制效果方面进行了大量的研究,结果表明细水雾能有效降低甲烷爆炸的强度^[17-20],具有良好的抑制甲烷爆炸超压和火焰速度的效果。特别是在细水雾中添加添加剂和对其荷电都能有效增强细水雾抑制甲烷爆炸的效果。所以本文考虑在细水雾中添加 NaCl 后对其荷电开展实验,研究 NaCl 添加剂和荷电复合作用下,细水雾对甲烷爆炸火焰传播的抑制效果,并对复合抑制机理进行深层次的分析。该实验方法对实际的甲烷爆炸发生后的抑制具有理论指导意义。

1 含 NaCl 荷电细水雾抑制甲烷爆炸实验系统

1.1 实验装置及系统

含 NaCl 荷电细水雾抑制甲烷爆炸火焰传播速度的实验系统如图 1 所示,该实验系统主要由荷电细水雾发生装置、管道、配气装置、点火装置、高

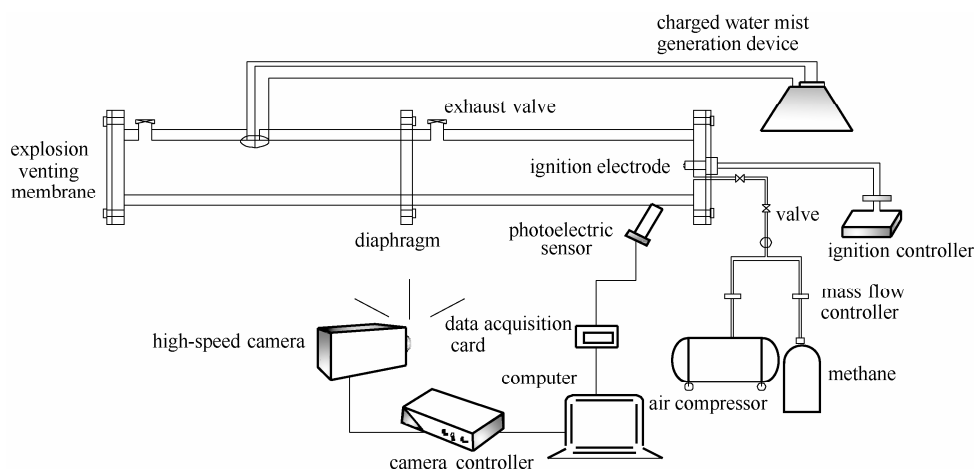


图 1 实验系统装置

Fig. 1 Experimental system device

速摄像装置和信号采集及处理装置等部分构成。经精密电子天平测量,荷电细水雾发生装置的产雾速率为 $1.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,由相位多普勒粒子分析仪测得雾滴的平均粒径约为 $15 \mu\text{m}$ 。实验管道由两个尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的有机透明玻璃横管组成,其中在两管道中间安装 PVC 薄膜,用来隔离甲烷/空气预混气体与细水雾。实验所用体积分数为 10.5% 的甲烷/空气预混气体,根据道尔顿分压定律,由甲烷气瓶和空气压缩机通过质量流量计控制通气流量混合得到。实验时,通过安装在管道右侧面板上的点火电极引燃预混气体,点火电极由点火控制器在远程操控,点火能量由直流电压为 6 V 的电源提供。高速摄像仪采用 Davis.7.2 高速摄像系统,以 2000 帧/秒的频率拍摄甲烷爆炸火焰传播过程的图像。光电传感器的型号为 RL-1,安置其探头正对点火电极以采集爆炸瞬间的光电信号,然后通过型号为 USB-1208 的数据采集卡,将信号传输至计算机进行处理和保存。

1.2 实验工况与方法

实验所有工况分为 4 类:① 对照工况,无水雾情况下的甲烷爆炸和纯水雾作用下的甲烷爆炸;② 含 NaCl 细水雾单独作用工况,NaCl 浓度为 5%、7.5%、10% 和 12.5% 细水雾作用下甲烷爆炸;③ 荷电细水雾单独作用工况,荷电电压为 2、4、6 和 8 kV 细水雾作用下甲烷爆炸;④ 含 NaCl 和荷电细水雾复合作用工况,包含 4 种不同浓度 NaCl 和 4 种不同荷电电压细水雾正交组合的 16 种复合作用工况。每个工况均重复 3~4 次,去除异常情况,排除实验造成的偶然误差,确保实验数据的可靠性。

实验各工况所用的甲烷气体均为体积分数为 10.5% 的甲烷/空气预混气体,通入细水雾的雾通量均为 2 L。每组实验前打开阀门,通入新鲜空气以排出管道内的残余气体。然后通过配气装置,在预混气体爆炸传播区通入甲烷/空气预混气体,在抑制区通入实验所需要类型的细水雾。考虑到水雾在空气中的聚合或沉降现象,为避免这些现象对实验造成较大的影响,在抑制区通入细水雾后,静置 10 s,在细水雾未大量聚合或沉降前,通过点火装置引爆甲烷/空气预混气体进行实验。高速摄像装置拍摄并记录甲烷爆炸火焰在管道内的传播图像。通过光电传感器采集的光电信号确定爆炸的起始点,结合高速摄像仪拍摄的火焰传播图像,分析含 NaCl 添加剂荷电细水雾对甲烷爆炸火

焰传播的抑制特性。

2 实验结果与分析

2.1 含 NaCl 荷电细水雾对甲烷爆炸火焰特征的影响

图 2 为不同浓度 NaCl 细水雾在无荷电和荷 4 kV 电压时甲烷爆炸火焰传播的对比图像。图像显示的是各工况甲烷爆炸火焰进入雾场区 3 ms 时的火焰特征。当荷电电压一定时,对比不同浓度 NaCl 细水雾抑制甲烷爆炸火焰的图像特征,结果显示,随着 NaCl 浓度的增加,火焰面积和传播的距离变小,火焰阵面的形状愈加不规则。火焰面积、传播距离以及火焰阵面形状的变小或改变,反映了随着 NaCl 浓度增大,火焰强度由高到低的变化^[21]。当 NaCl 浓度为 12.5% 时,甲烷爆炸火焰特性最弱。这些说明含 NaCl 细水雾对甲烷爆炸火焰的抑制有明显的效果^[22]。随着细水雾中 NaCl 浓度的增大,其对甲烷爆炸火焰的抑制效果增强^[23-24]。对比各 NaCl 浓度下无荷电与荷 4 kV 电压的工况,火焰面积和传播距离变小以及火焰阵面变形的现象更加明显。这说明对含 NaCl 细水雾其荷上一定电荷后,其抑制效率得到了提高。

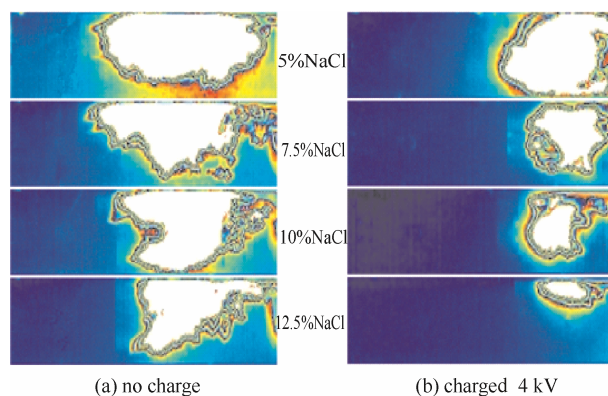


图 2 不同浓度 NaCl 工况火焰传播图像

Fig.2 Images of flame propagation under different concentration of NaCl

图 3 为不同荷电电压细水雾无添加剂与添加 7.5%NaCl 各工况甲烷爆炸火焰传播至雾场区 3 ms 后的图像对比。当添加剂浓度一定,对比不同荷电电压细水雾抑制甲烷爆炸火焰的图像特征,可以发现随着荷电电压的增加,火焰面积和传播的距离变小,火焰阵面的形状愈加不规则。这些反映了甲烷爆炸火焰在进入荷电细水雾雾场区时,火焰强度减弱,火焰锋面发生变化^[25]。荷上电荷的雾滴受到火

焰中带异性电荷的粒子和中间产物相互吸引的电场力作用,加剧了火焰锋面的破碎,增加了荷电雾滴与火焰的接触面积,从而进一步发挥水雾蒸发吸热的作用。这些说明荷电细水雾对甲烷爆炸火焰有良好的抑制效果,并且随着荷电电压的增大,荷电细水雾对甲烷爆炸火焰的抑制效果更明显^[26]。当荷电电压一定,对比无添加剂和添加 7.5%NaCl 的工况,火焰面积和传播距离变小以及火焰阵面变形的现象更加明显。说明荷电细水雾中添加一定浓度 NaCl 后抑制效率得到了提高。

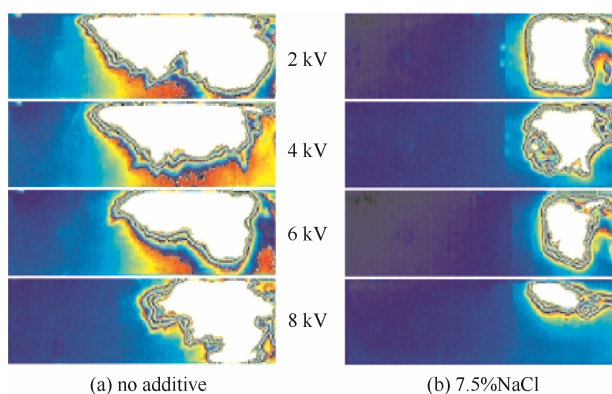


图 3 不同荷电电压工况火焰传播图像

Fig.3 Images of flame propagation under different charging voltages

火焰传播距离可以反映出细水雾对甲烷爆炸火焰的抑制效果^[27]。把火焰传播距离的缩减值作为反映细水雾对甲烷爆炸火焰抑制效果的参数值。图 2 和图 3 各工况的火焰传播距离与无水雾情况进行对比,可以得出各工况细水雾抑制甲烷爆炸火焰传播距离的缩减值,如表 1、表 2 所示。荷电 4 kV 和添加 12.5%NaCl 细水雾单独作用时甲烷爆炸火焰传

播距离的缩减值分别为 47.6 和 128.9 mm,效果总和为 176.5 mm;荷电 4 kV 和添加 12.5%NaCl 细水雾共同作用时,距离缩减值为 254.9 mm,远远大于两者单独作用之和。分析其他复合作用工况亦有同样的结果,说明荷电和添加 NaCl 细水雾共同作用对甲烷爆炸火焰的抑制效果要优于两者单独作用的效果之和。

2.2 含 NaCl 荷电细水雾抑制甲烷爆炸火焰传播速度

2.2.1 NaCl 和荷电细水雾单独作用 由高速摄像机拍摄到的甲烷爆炸火焰传播图像可知,火焰传播至管道不同位置时距点火电极的距离。高速摄像仪的摄像频率为 2000 帧/秒,可以得出每两幅相邻图像间的传播时间为 0.5 ms。根据管道某位置前后甲烷爆炸火焰图像间的传播距离和时间,可以计算出甲烷爆炸火焰在该位置的传播速度。图 4 为不同浓度 NaCl 和不同荷电电压细水雾作用下,甲烷爆炸火焰在管道内不同位置的传播速度。图 4 中距点火电极距离为 0~500 mm 时,由于火焰未进入抑制区,火焰传播速度尚未明显地受到细水雾的抑制作用,火焰传播速度差别很小。观察图形都出现了双峰现象。这是因为,甲烷爆炸火焰在管道中传播进入雾场区后,由于火焰受到细水雾明显的抑制作用,火焰传播速度开始下降。所以在火焰进入雾场区前,距点火电极距离约为 500 mm 处,出现第 1 个波峰,速度大小为 $(8.07 \pm 0.1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着爆炸反应的持续进行,火焰传播速度再次上升,出现波谷,各工况的波谷速度如图 5 所示。当爆炸接近结束时火焰传播速度达最大值后开始下降,出现第 2 个波峰。图 5 (a)、(b) 表明随着 NaCl 浓度和荷电电压增大,

表 1 不同浓度 NaCl 工况火焰传播距离缩减值

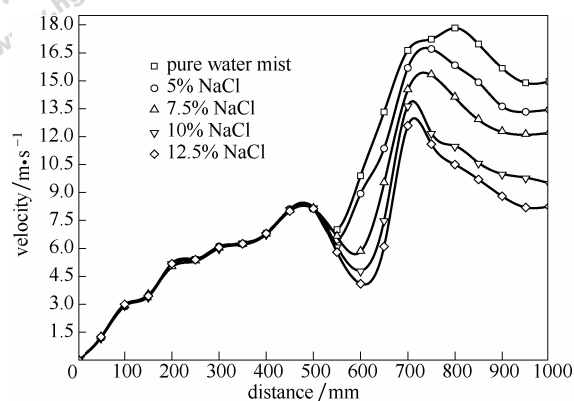
Table 1 Reduction of flame propagation distance under different concentrations of NaCl

Single action	Distance reduction value/mm	Single action	Distance reduction value/mm	Recombination action	Distance reduction value/mm
4 kV	47.6	5%NaCl	54.6	4 kV+5%NaCl	176.5
4 kV	47.6	7.5%NaCl	44.8	4 kV+7.5%NaCl	232.5
4 kV	47.6	10%NaCl	93.8	4 kV+10%NaCl	229.7
4 kV	47.6	12.5%NaCl	128.9	4 kV+12.5%NaCl	254.9

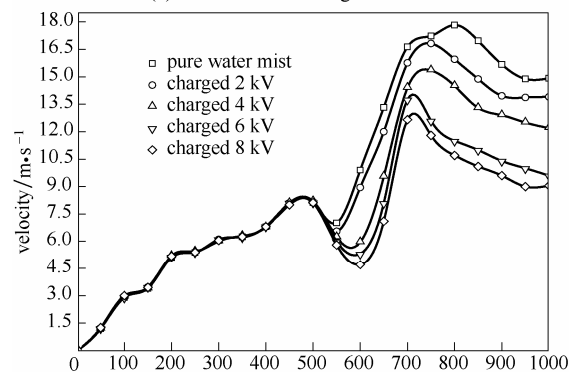
表 2 不同荷电电压工况火焰传播距离缩减值

Table 2 Reduction of flame propagation distance under different charging voltages

Single action	Distance reduction value/mm	Single action	Distance reduction value/mm	Recombination action	Distance reduction value/mm
7.5%NaCl	44.8	2 kV	32.2	7.5%NaCl +2 kV	233.9
7.5%NaCl	44.8	4 kV	47.6	7.5%NaCl +4 kV	232.5
7.5%NaCl	44.8	6 kV	93.8	7.5%NaCl +6 kV	263.2
7.5%NaCl	44.8	8 kV	145.7	7.5%NaCl +8 kV	236.7



(a) water mist containing NaCl alone action



(b) charged water mist alone action

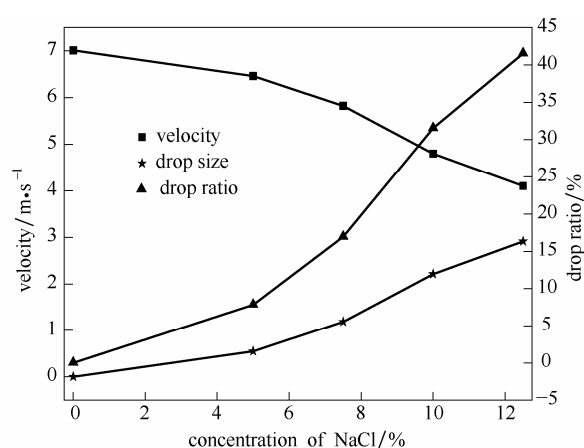
图 4 NaCl 和荷电细水雾单独作用火焰传播速度

Fig.4 Flame propagation velocity under action of NaCl or charged water mist

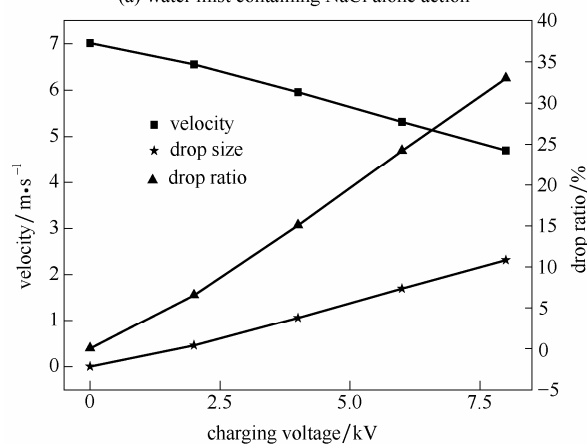
与纯水雾工况比较,波谷以及第 2 波峰的速度值都下降,并且到达波谷的时间出现延迟,到达第 2 次波峰的时间提前。可以得出 NaCl 和荷电细水雾单独作用时均对甲烷爆炸火焰传播速度有较好的抑制作用,且随着 NaCl 浓度和荷电电压的增大,抑制作用更明显。

与纯水雾相比,可以得出 NaCl 和荷电细水雾单独作用时各工况波谷速度的下降值以及下降比例,如图 5 所示,它们反映了 NaCl 和荷电细水雾单独作用时对甲烷爆炸火焰传播速度的抑制效果。

由图 5 (a) 可以看出含 NaCl 细水雾单独作用时,随着 NaCl 浓度的增大,波谷速度与纯水雾工况相比分别下降了 0.55、1.188、2.212、2.912 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,浓度为 12.5% 时下降比例最大为 41.53%;图 5 (b) 反映了荷电细水雾单独作用时,随着荷电电压的增大,波谷速度与纯水雾工况相比分别下降了 0.458、1.056、1.696、2.312 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,荷电电压为 8 kV 时下降比例最大为 32.97%。这说明细水雾中添加 NaCl 或者对其荷电都能一定程度上抑制体积分数为 10.5%



(a) water mist containing NaCl alone action



(b) charged water mist alone action

图 5 NaCl 和荷电细水雾单独作用波谷速度下降大小及比例

Fig.5 Drop size and ratio of trough velocity under action of NaCl or charged water mist

的甲烷爆炸火焰传播速度。

2.2.2 NaCl、荷电细水雾复合作用 图 6 为 NaCl 和荷电细水雾共同作用下,各工况甲烷爆炸火焰传播速度的二次峰值。当荷电电压相同时,随着添加剂浓度增大,甲烷爆炸火焰速度二次峰值呈近乎线性下降的趋势变化。当添加剂浓度不变,荷电电压增大时,各工况的速度二次峰值具有类似的下降趋势。说明当 NaCl 和荷电细水雾共同作用时,随着添加剂浓度和荷电电压的增大,细水雾对甲烷爆炸火焰传播速度的抑制效果显著增强。运用 Minitab16 将火焰速度二次峰值与荷电电压和添加剂两个因素进行双因素回归分析,得到如下回归方程

$$Y=18.458-0.444X_1-0.581X_2 \quad (1)$$

式中, Y 为火焰速度二次峰值, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; X_1 为添加剂浓度, %; X_2 为荷电电压, kV。该回归方程的数据样本包括: NaCl 浓度为 0、5%、7.5%、10%、12.5% 和荷电电压为 0、2、4、6、8 kV 正交组合的 25 种工况的数据,因此回归方程用的数据样本容量

的大小为 25。方程样本容量 n 满足基本要求的样本容量的条件: $n \geq k+1$, k 为解释变量的数目, 其中 k 取值为 2。由回归方程可以推算出, 含 NaCl 添加剂荷电细水雾抑制甲烷爆炸时, 细水雾的荷电电压和 NaCl 浓度在不同条件下, 甲烷爆炸火焰传播的二次峰值速度。

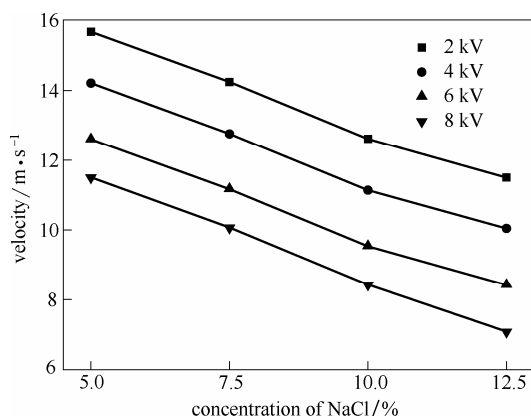


图 6 NaCl、荷电细水雾复合作用火焰传播速度二次峰值
Fig.6 The second peak values of flame propagation velocity under recombination action of NaCl and charged water mist

与纯水雾相比, 各工况峰值速度的下降值, 反映了 NaCl 和荷电细水雾共同作用时对甲烷爆炸火焰传播速度的抑制效果。表 3 为部分复合作用和单独作用工况, 与纯水雾相比, 甲烷爆炸火焰传播二次峰值速度的下降值以及下降比例。结合图 6 与表 3 可知, NaCl 和荷电细水雾单独作用时, 荷电电压为 8 kV 工况的速度二次速度峰值下降了 $5.177 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, NaCl 浓度为 12.5% 工况的速度二次峰值下降了 $5.247 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 两者下降之和为 $10.424 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; NaCl 和荷电细水雾共同作用时, 含 12.5%NaCl、荷 8 kV 电压工况的速度二次峰值速度下降了 $10.747 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。说明含 NaCl、荷电细水雾共同作用, 对甲烷爆炸火焰传播速度的抑制效果, 优于两者单独作用的效果之和。其他复合作用工况也得出了相同的实验结论。这表明含 NaCl、荷电细水雾共同作用大大提高了对甲烷爆炸火焰传播速度的抑制效率, 并且两者之间

存在耦合作用。

2.3 NaCl 与荷电细水雾耦合作用机理分析

对于细水雾抑制管道内甲烷爆炸火焰传播, NaCl 添加剂和荷电作用间的耦合作用主要体现在: NaCl 添加剂和荷电作用对甲烷爆炸火焰传播抑制效果的相互促进。

一方面, 对含 NaCl 添加剂细水雾荷电。含 NaCl 雾滴由于静电感应带上负电荷, 在雾滴表面带负电静电荷作用下, 自由移动的钠离子和氯离子发生定向移动, 带正电的钠离子移向雾滴表面。带有同性电荷的 NaCl 雾滴间产生相互排斥的电场力。电场力的作用大大提高了含 NaCl 雾滴分布的均匀性和稳定性, 增大了含 NaCl 雾滴与火焰锋面的接触面积, 增强了 NaCl 雾滴蒸发吸热降低火焰前锋以及整体化学反应温度的能力。根据 Arrhenius 公式, 降低火焰前锋温度会降低爆炸反应速率、火焰传播速度和爆炸强度^[28]; 表面带有负电荷的 NaCl 雾滴与火焰中的正离子^[29]和带电粒子之间会产生相互吸引的电场力, 从而加剧了火焰锋面的拉伸和撕裂。在火焰反应区内电场力和火焰锋面的卷吸作用, 使 NaCl 雾滴更容易进入火焰反应活化区, 加速了钠离子和氯离子对燃烧进程起重要作用的正离子和自由基的捕捉, 从而中断燃烧链式反应降低甲烷爆炸火焰的传播速度。所以, 荷电促进了 NaCl 细水雾对甲烷火焰传播的抑制作用。

另一方面, 在荷电细水雾中添加了 NaCl 添加剂, 改变了荷电细水雾的理化性质。NaCl 是强电解质, 以游离态存在的钠离子和氯离子增大了荷电雾滴的导电率, 在相同荷电电压下含 NaCl 荷电雾滴能荷上更多的电荷。荷电量的增加, 使荷电水雾的荷电特性更加明显^[30]。带同性电荷雾滴间相互排斥的电场力作用增强, 使雾滴的分布更均匀且稳定。同时带电雾滴与火焰中的正离子和带电粒子之间相互吸引的电场力作用也增强, 加强了荷电雾滴对自由基的吸附和销毁。所以, NaCl 添加剂促进了荷电细水雾对甲烷爆炸火焰传播速度的抑制作用。

表 3 不同作用方式下峰值速度对比

Table 3 Comparison of peak velocity under different modes of action

Single action	Drop value / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Decline proportion /%	Single action	Drop value / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Decline proportion /%	Recombination action	Drop value / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Decline proportion /%
2 kV	1.012	5.675	5%NaCl	1.123	6.3	2 kV + 5%NaCl	2.166	12.15
4 kV	2.481	13.91	7.5%NaCl	2.534	14.2	4 kV + 7.5%NaCl	5.068	28.42
6 kV	4.082	22.89	10%NaCl	4.165	23.35	6 kV + 10%NaCl	8.299	46.54
8 kV	5.177	29.03	12.5%NaCl	5.247	5.247	8 kV + 12.5%NaCl	10.747	60.26

3 结 论

本文在自行搭建的实验平台基础上,通过改变NaCl添加剂浓度和荷电电压的大小,研究了含NaCl添加剂荷电细水雾对甲烷爆炸火焰传播的抑制特性。得出如下结论。

(1) 增大细水雾中NaCl浓度和荷电电压,管道内甲烷爆炸火焰在某时刻的传播距离和面积变小,火焰阵面变形的现象也更明显。并且对含NaCl细水雾荷电以及在荷电细水雾中添加NaCl添加剂,都能使原本细水雾抑制甲烷爆炸火焰的效率大大提高。

(2) 含NaCl添加剂和荷电细水雾单独作用时,甲烷爆炸火焰波谷及二次波峰速度与纯水雾工况相比均发生明显下降;并且,随着添加剂浓度和荷电电压的增大,到达波谷和二次波峰的位置发生了前移和后延。在细水雾中添加NaCl或者对其荷电都能一定程度上抑制甲烷爆炸火焰传播速度。

(3) NaCl添加剂和荷电作用间在抑制甲烷爆炸火焰传播速度方面存在耦合作用。耦合作用主要体现在:对含NaCl细水雾荷电,电场力作用的存在,增大了氯化钠与火焰的接触率和进入反应中心与自由基反应的概率,从而使含NaCl雾滴更好地发挥蒸发吸热降低火焰前锋和整体化学反应温度的能力以及化学抑链作用;在荷电细水雾中添加NaCl后,增大了雾滴的导电率,使其在相同荷电电压下荷上更多的电荷,增强了荷电水雾的电场力作用。

References

- [1] 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 S Q, SI R J, ZHANG Y S. Experimental study of gas explosion suppression by water mist[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(1): 4-7.
- [2] QIN Y H, SHEN Z W, LU S X, *et al.* Experimental study of the effect of water sprays on gas flame propagation[J]. Journal of Safety and Environment, 2001, 1(1): 27-29.
- [3] 秦文茜. 超细水雾抑制含障碍物甲烷爆炸的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
QIN W X. Experimental study on explosion mitigation of methane containing obstacles with ultra-fine water mist[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [4] XU H L, WANG X S, GU R. Experimental study on methane-coal dust mixture explosion mitigation by ultra-fine water mist[J]. Progress in Safety Science and Technology, 2010, 8(A): 1552-1557.
- [5] FUSS S P, CHEN E F, YANG W H, *et al.* Inhibition of premixed methane/air flames by water mist[J]. Proceedings of Combustion Institute, 2002, 29(1): 361-368.
- [6] THOMAS G O. On the condition required for explosion mitigation by water sprays[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2000, 78(5): 339-354.
- [7] 梁清水, 梁清泉, 徐文毅. 细水雾特性及其灭火机理分析[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(4): 447-451.
LIANG Q S, LIANG Q Q, XU W Y. Water mist characteristics and its fire suppression mechanism[J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(4): 447-451.
- [8] YU M G, YANG K, JIA H L, *et al.* Coal combustion restrained by ultra-fine water mist in confined space[J]. Mining Science Technology, 2009, 19(5): 74-79.
- [9] ZHENG R, BRAY K N C, ROGG B. Effect of sprays of water and NaCl-water solution on the extinction of laminar premixed methane-air counterflow flames[J]. Combustion Science and Technology, 1997, 126(1-6): 389-401.
- [10] LAZZARINI A K, KRAUSS R H, CHELLIAH H K, *et al.* Extinction conditions of non-premixed flames with fine droplets of water and water/NaOH solutions[J]. Proceedings of Combustion Institute, 2000, 28(2): 2939-2945.
- [11] INGRAM J M, AVERILL A F, BATTERSBY P N, *et al.* Suppression of hydrogen-oxygen-nitrogen explosions by fine water mist (I): Burning velocity[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(24): 19250-19257.
- [12] 孙智灏, 蒋军成, 展望, 等. 添加剂对细水雾灭火增强作用及机理分析[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 794-799.
SUN Z H, JIANG J C, ZHAN W, *et al.* Influence of additives on the fire suppression performance of water mist[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 794-799.
- [13] 余明高, 万少杰, 徐永亮, 等. 荷电细水雾对管道瓦斯爆炸超压的影响规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 227-232.
YU M G, WAN S J, XU Y L, *et al.* Study on the overpressure of gas explosion in the pipeline affected by charged water mist[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 227-232.
- [14] 余明高, 刘小婷, 徐永亮, 等. 正负电性的荷电细水雾灭火实验与机理探讨[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 249-254.
YU M G, LIU X T, XU Y L, *et al.* Experiment and mechanism study on extinguishing fire by water mist charged with positive or negative electric[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2013, 32(3): 249-254.
- [15] 徐永亮, 王兰玉, 余明高, 等. 感应式荷电细水雾对瓦斯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.
XU Y L, WANG L Y, YU M G, *et al.* Influence of inductively charged water mist on flame velocity of gas explosion[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(8): 2884-2890.
- [16] 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.
XU Y L, WAN S J, YU M G, *et al.* Influence rules of charge-mass ratio with inductive charged water mist[J]. Coal Technology, 2015, 34(5): 185-187.
- [17] 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 X, 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.

- [18] 余明高, 朱新娜, 裴蓓, 等. 二氧化碳-超细水雾抑制甲烷爆炸试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, **34**(12): 2843-2848.
YU M G, ZHU X N, PEI B, *et al.* Experimental study on methane explosion suppression using carbon dioxide and ultra-fine water mist[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **34**(12): 2843-2848.
- [19] WANG F H, YU M G, WEN X P, *et al.* Suppression of methane/air explosion in pipeline by water mist[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, **5**(2): 1-6.
- [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.
- [21] 贾真真, 林柏泉. 管道瓦斯爆炸传播影响因素及火焰加速机理分析[J]. 矿业工程研究, 2009, **24**(1): 58-62.
JIA Z Z, LIN B Q. Analysis on flame acceleration mechanism and affecting factors of methane explosion propagation in duct[J]. Mineral Engineering Research, 2009, **24**(1): 58-62.
- [22] 陈桢. 含NaCl添加剂细水雾灭火的实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2007.
CHEN Z. Experimental study on fire extinguishment of water mist containing NaCl additives[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2007.
- [23] 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.
- [24] 余明高, 段玉龙, 徐俊, 等. 细水雾灭火剂的选择与试验研究[J]. 消防科学与技术, 2007, **26**(2): 189-192.
YU M G, DUAN Y L, XU J, *et al.* Research and discuss on additives of spray mist[J]. Fire Science and Technology, 2007, **26**(2): 189-192.
- [25] 郑丹, 李孝斌, 郭子如, 等. 甲烷爆炸火焰传播机理实验及数值分析[J]. 燃烧科学与技术, 2014, **33**(7): 725-728.
ZHENG D, LI X B, GUO Z R, *et al.* Experiment and numerical simulation study of flame propagation mechanism of methane explosion[J]. Fire Science and Technology, 2014, **33**(7): 725-728.
- [26] 余明高, 梁栋林, 徐永亮, 等. 荷电细水雾抑制瓦斯爆炸实验研究[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(11): 2232-2238.
YU M G, LIANG D L, XU Y L, *et al.* Experimental study on inhibiting the gas explosion by charged water mist[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(11): 2232-2238.
- [27] 陈先锋, 陈明, 张庆明, 等. 瓦斯爆炸火焰精细结构及动力学特性的实验[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(2): 246-249.
CHEN X F, CHEN M, ZHANG Q M, *et al.* Experimental investigation of gas explosion microstructure and dynamic characteristics in a semi-vented pipe[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(2): 246-249.
- [28] 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.
- [29] 许世海, 刘治中. 烃火焰中的离子及其对燃烧进程的影响[J]. 燃烧科学与技术, 1995, **1**(4): 347-353.
XU S H, LIU Z Z. Ions in hydrocarbon flame and its effect on combustion process[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1995, **1**(4): 347-353.
- [30] YU M G, WAN S J, XU Y L, *et al.* Suppressing methane explosion overpressure using a charged water mist containing a NaCl additive[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, **29**: 21-29.