

水雾抑制甲烷爆炸的数值模拟

王慧男¹, 刘逸夫², 张添淇², 杨子诺³, 袁治雷⁴, 梁凯丽⁴, 刘洋³, 胡立双³

(1. 山西北方兴安化学工业有限公司, 山西太原 030008; 2. 中车大连机车研究所有限公司, 辽宁大连 116000;
3. 中北大学环境与安全工程学院, 山西太原 030051; 4. 山西江阳兴安民爆器材有限公司, 山西太原 030041)

摘要: 甲烷(CH₄)是天然气的主要成分之一, 具有易燃、易爆的特性, CH₄燃爆会引发严重后果, 故需要使用有效的抑爆技术降低其燃爆危害性。本文采用流体动力学软件, 选择CH₄体积分数为10%的CH₄-空气混合气体为研究对象, 探讨不同水雾粒径、初始入射速度以及喷射时间等因素对CH₄-空气混合气体燃爆抑制效果的影响。结果表明, 在10~150 μm的水雾粒径范围内, 70 μm粒径的水雾对CH₄-空气混合气体的燃爆抑制效果最佳, 可将CH₄-空气混合气体燃爆压力降至0.220 MPa, 压力上升速率降至0.86 MPa/s, 191 ms就能将混合气体燃爆温度降至500 K以下。此外, 随着水雾入射初速度增大、喷射时间提前, 水雾对CH₄-空气混合气体燃爆抑制效果增强。

关键词: 甲烷; 气体爆炸; 抑爆; 燃爆; 水雾

中图分类号: X932

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.03.0008

引用格式: 王慧男, 刘逸夫, 张添淇, 等. 水雾抑制甲烷爆炸的数值模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 784-792.

WANG Huinan, LIU Yifu, ZHANG Tianqi, et al. Numerical simulation on water mist suppression of methane explosion[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(6): 784-792.

Numerical Simulation on Water Mist Suppression of Methane Explosion

WANG Huinan¹, LIU Yifu², ZHANG Tianqi², YANG Zinuo³, YUAN Zhilei⁴,
LIANG Kaili⁴, LIU Yang³, HU Lishuang³

(1. Shanxi North Xing'an Chemical Industry Co., Ltd., Taiyuan 030008, China;

2. CRRC Dalian Institute Co., Ltd., Dalian 116000, China;

3. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. Shanxi Jiangyang Xing'an Industrial Explosive Materials Co., Ltd., Taiyuan 030041, China)

Abstract: Methane (CH₄) is one of the primary components of natural gas, with flammable and explosive properties. CH₄ explosions will lead to severe consequences, therefore, effective explosion suppression techniques are essential to mitigate its associated hazards. The CH₄-air mixture with CH₄ volume fraction of 10% was selected to investigate, the effects of different water mist particle size, initial injection velocity, and injection time on the suppression of CH₄-air mixture explosion were investigated using a fluid dynamics software. The results indicate that when the particle size range is 10~150 μm, the water mist

收稿日期: 2025-03-17

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2019L0517); 山西省基础研究计划资助项目(202203021212160)

作者简介: 王慧男(1998—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事防火防爆技术的研究。

通信作者: 胡立双(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事军工燃烧爆炸品安全技术的研究。E-mail: hlsly1314@163.com。

with a particle size of 70 μm has the best suppression effect on CH_4 -air mixture explosion. The explosion pressure of CH_4 -air mixture can be reduced to 0.220 MPa, and the pressure rise rate can be reduced to 0.86 MPa/s. The explosion temperature of CH_4 -air mixture can be reduced to below 500 K within 191 ms. In addition, as the initial velocity of water mist increases and the injection time advances, the suppression effect of water mist on CH_4 -air mixture explosion is enhanced.

Key words: methane; gas explosion; explosion suppression; deflagration; water mist

0 引言

甲烷(CH_4)是一种重要的能源,在工业生产和生活中应用广泛,但是如果控制不好则可能会发生爆炸事故,造成严重的经济损失和人员伤亡^[1-2]。对于 CH_4 爆炸特性的研究和 CH_4 爆炸抑制的研究已有大量报道^[3-4]。郑露露等^[5]基于有机玻璃管试验装置,研究了多孔介质协同 CO_2 抑制掺氢 CH_4 爆炸的特性规律。Nan等^[6]基于20 L球形爆炸装置,对比研究了 CF_3I 以及 CO_2 对 CH_4 气体爆炸抑制的影响,得出 CF_3I 对甲烷层流燃烧速度的抑制作用明显优于 CO_2 。Guo等^[7]基于化学反应动力学原理,利用数值模拟方法研究了惰性气体对 CH_4 爆炸抑制的影响。Mitu等^[8]选择了几种典型的惰性气体,研究了其对 CH_4 爆炸压力及最大压力上升速率的影响。

水雾作为一种绿色抑制剂被广泛应用于消防灭火中^[9-12],也被广泛应用于气体燃爆抑制中,目前已有大量实验研究^[13-17]。在实际的水雾抑制气体燃爆实验中,液滴粒径、初始速度等关键参数受喷雾设备、环境扰动等因素的影响,难以实现均匀一致的分布。例如,喷嘴结构差异会导致液滴粒径呈多分散性,初始速度受压力波动影响难以稳定。数值模拟可通过设定边界条件精确控制粒径、速度及喷射时间,系统分析单一变量对抑爆效果的影响,从而得到规律性的结论。因此,本文利用流体动力学软件,开展了不同水雾参数对 CH_4 燃爆过程及参数影响规律的研究。

1 数值模拟

1.1 模型的建立

参考实验室中使用的可视化方形管装置^[18],将计算区域划分为两部分,第一部分为流体区域,即燃爆发生的内部空间,该空间的大小为7.1 L,第二部分为壁面,该部分主要由不锈钢构成。在建立模型时忽略壁面的结构,最终建立

长、宽、高分别为100, 100, 710 mm的长方体几何模型,如图1所示。在 CH_4 气体燃爆与水雾相互作用的过程中,采用离散相模型模拟水雾颗粒与反应产物间的能量、质量、动量交换过程。

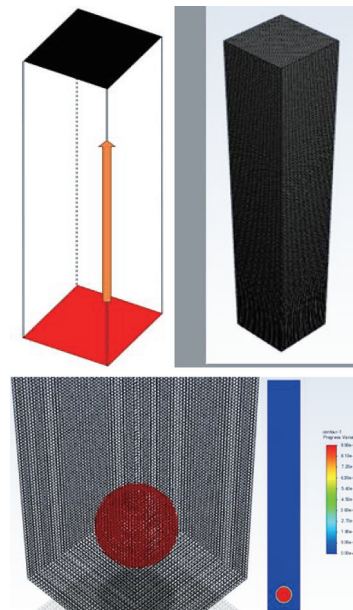


图1 计算模型与点火区域

Fig. 1 Computation model and ignition region

将101.325 kPa、298 K、 CH_4 体积分数为10%的 CH_4 -空气混合气体充满7.1 L的封闭容器,在距离容器底部60 mm的位置,建立一个球形点火区域,并将该区域内的反应过度变量设置为0.9(表示该球形区域内90%的气体发生反应变成生成物,即该区域正在进行燃烧)。该设置模拟了一个初始的点火源,可以通过这个球形区域引燃容器中其余位置的可燃气体混合物,从而推动反应的持续进行。点火后100 ms开始,水雾从容器顶端向下喷射,直到200 ms结束。水雾通过 22.5° 雾化锥角的喷嘴喷射,以确保雾滴能均匀分布在燃爆区域。

1.2 数学模型

1.2.1 湍流模型

采用大涡模型(LES)^[19]进行 CH_4 燃爆的模拟,

CH₄燃爆是一个动态过程,涉及快速变化的流动和化学反应,LES模型能够有效捕捉这些时间依赖性的特征,提供更真实的燃爆动态模拟。LES模型的气体连续性方程、动量方程、能量方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

式中: ρ 为滤波后的流体密度; u_i 、 u_j 为滤波后不同方向的流体速度; p 为滤波后的压力; σ_{ij} 为由分子黏度决定的应力张量。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \bar{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{h}_s}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) = \\ - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho (\overline{u_i h_s} - \bar{u}_i \bar{h}_s)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中: h_s 、 λ 分别为显焓与热导率; $\rho(\overline{u_i h_s} - \bar{u}_i \bar{h}_s)$ 为亚网格焓通量。

1.2.2 气体燃烧模型

考虑到CH₄-空气混合气体爆炸过程中从层流到湍流的火焰转变,故采用LES模型结合部分预混燃烧模型来模拟燃爆过程。采用C方程描述燃烧过程中的薄火焰面动态。C方程模型核心是假设层流火焰厚度较湍流火焰薄,侧重于未燃和燃烧状态之间的转换。该模型引入了一个反应进度变量(c),用于表示燃烧反应从未燃($c=0$)到燃烧($c=1$)状态的进展。火焰锋面的传播通过解决密度加权的平均反应进度变量的输运方程进行模拟,如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{c}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{c}) = \\ \nabla \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \bar{c} \right) + \rho S_{c_0} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Sc_t 为湍流施密特数,该值取0.7; S_c 为反应过程中的源项; k 为混合物的层流热导率; C_p 为混合物的比热容。

1.3 水雾离散相模型

采用欧拉-拉格朗日方法,将CH₄-空气混合气体作为连续相,通过求解纳维-斯托克斯方程来处理。将水雾颗粒作为离散相,通过追踪其在流场中的轨迹来模拟。颗粒与气体之间的交互作用在流体动力学框架内进行,计算时假设:1) 封闭空间内水雾颗粒粒径相同;2) 水雾颗粒间不发生碰撞等相互作用;3) 水雾颗粒是球形的。

2 水雾抑制甲烷爆炸的模拟及分析

本文选择CH₄体积分数为10%的CH₄-空气混合气体进行水雾抑爆模拟。

2.1 水雾粒径对混合气体燃爆的影响

在101.325 kPa、298 K初始条件下,CH₄-空气混合气体燃爆反应100 ms时,从容器顶端喷射10~150 μm粒径的水雾,水雾初速度为30 m/s,流量为0.1 kg/s,喷射结束时间为200 ms,水雾颗粒初始温度与室温一致,为298 K,反应结束温度设置为容器内最高温度,低于500 K。观察不同水雾粒径下CH₄燃爆压力峰值、压力上升速率及燃爆温度的变化。

2.1.1 水雾对CH₄燃爆压力及压力上升速率的影响

图2展示了不同粒径水雾对体积分数为10%的CH₄-空气混合气体燃爆压力的影响。从100 ms开始喷射水雾,到整个容器内的最高温度低于500 K时认为反应结束。可以看出,随着水雾粒径的增大,峰值压力出现时刻分别为115, 115, 125, 125, 214, 139和138 ms;峰值压力分别为0.221, 0.216, 0.220, 0.220, 0.214, 0.268和0.305 MPa。

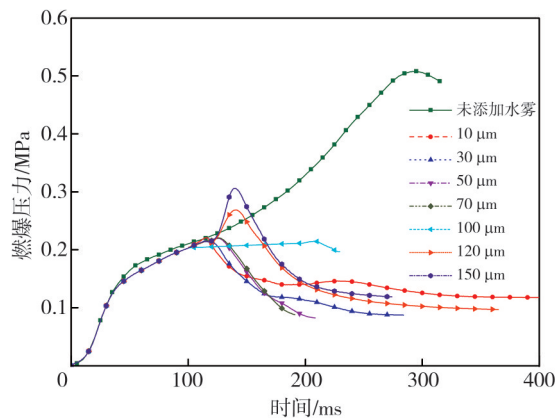


图2 不同粒径水雾抑制10% CH₄爆炸时的燃爆压力

Fig. 2 Explosion pressure of 10% CH₄ inhibited by water mist under different particle sizes

分析图2发现,与未添加水雾的CH₄-空气混合气体的压力峰值相比,水雾的添加能有效降低CH₄燃爆的压力峰值,但具体效果随粒径大小而异。粒径较小(10 μm、30 μm)的水雾峰值出现在110 ms时刻附近,水雾接触到火焰后更快地抑制了压力的上升,这是因为小粒径的水雾比表面积大,蒸发速率更快,热交换效率更高。但是,粒径越小,蒸发速率越快会产生更多的水蒸气,这会使容器压力下降缓慢。较大粒径的水雾(120 μm、

150 μm)与火焰接触后,压力峰值在 120~140 ms 内仍然持续上升,与更小的粒径水雾相比,产生了更大的压力峰值。当水雾粒径增大时,其比表面积显著减小,导致单位质量水雾的蒸发吸热速率降低,这使得大粒径水雾在相同时间内无法充分吸收燃烧释放的热量,抑制燃爆的热力学作用减弱。因此,尽管大粒径水雾仍能部分稀释可燃气体浓度,但其对温度和压力的调控能力不足,最终导致燃爆压力峰值反超小粒径水雾。相比之下,70 μm 的水雾粒径在降低燃爆压力与减少燃烧时间方面最为有效。

图 3 展示了不同粒径水雾对 CH₄-空气混合气体燃爆过程中压力上升速率的影响。

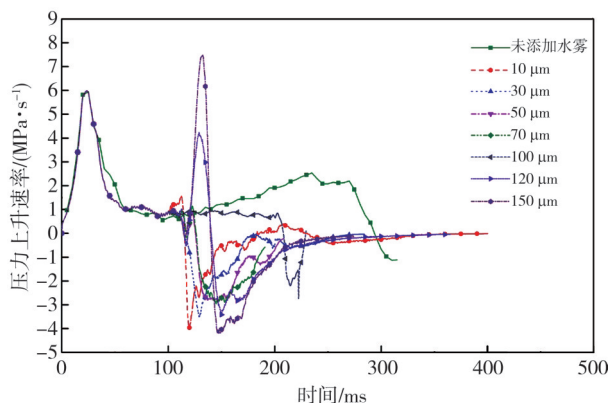


图 3 不同粒径水雾抑制 10% CH₄ 时的爆炸压力上升速率
Fig. 3 Explosion pressure rise rate of 10% CH₄ inhibited by water mist under different particle sizes

在不添加水雾时,体积分数 10% CH₄-空气混合气体在 235 ms 到达了第二个峰值 2.53 MPa/s。在喷射水雾后,随着水雾粒径的增加,压力上升速率在 100 ms 之后的峰值出现时刻分别为 112, 112, 113, 108, 120, 129 和 132 ms; 最大压力上升速率分别为 1.54, 1.00, 0.97, 0.86, 0.94, 4.18 和 7.46 MPa/s, 其中,70 μm 水雾对混合气体的抑制效果最好。对于粒径较小的水雾(10~70 μm),第二个压力上升速率峰值出现的时刻范围在 108~113 ms 之间,峰值之后的压力上升速率显著降低,下降至 0.86~1.54 MPa/s, 这表明小粒径的水雾能有效抑制压力上升速率。当水雾粒径增加到 120 μm 和 150 μm 时,压力上升速率峰值出现时刻有所延后,而且 100 ms 出现的压力上升速率的峰值反而增加,达到了 4.18 MPa/s 和 7.46 MPa/s, 这说明水雾粒径过大反而可能会增大燃爆强度。

2.1.2 水雾对 CH₄ 燃爆温度的影响

图 4 展示了通入 70 μm 粒径的水雾时,100~200 ms 的温度变化。在水雾通入阶段,高温区域主要集中在容器底部,随着时间的推移,在水雾两侧涡团的作用下,火焰逐渐上升并扩散,水雾的冷却效果开始显现,最高温度开始下降。通入水雾后的一段时间内,容器内部的温度分布变得更为均匀,高温区域的减少表明燃烧反应受到抑制。到 190 ms 时,整体温度已经降至 500 K 以下,这表明 70 μm 粒径的水雾可有效抑制 CH₄ 燃爆。

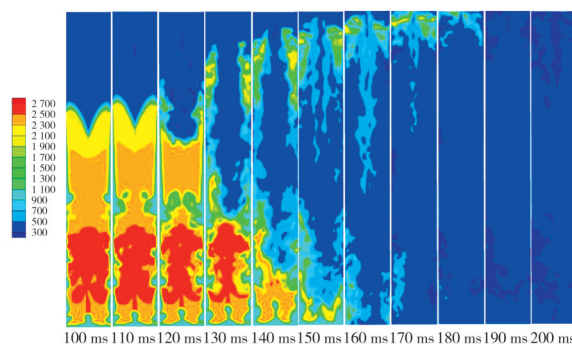


图 4 70 μm 粒径的水雾抑制 10% CH₄ 时的爆炸温度云图
Fig. 4 Explosion temperature nephogram of 10% CH₄ inhibited by water mist of 70 μm particle size

由图 5 可以看出,不同粒径的水雾对 CH₄-空气混合气体燃爆温度的影响有着显著差异。

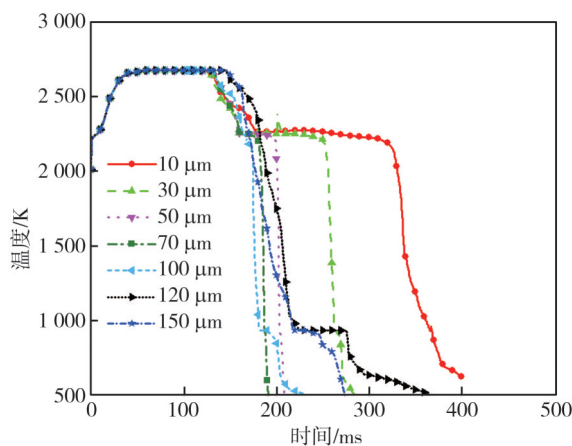


图 5 不同粒径水雾抑制 10% CH₄ 时的爆炸温度
Fig. 5 Explosion temperature of 10% CH₄ inhibited by water mist under different particle sizes

从 30 μm 开始,随着水雾粒径的增加,容器内的温度降低至 500 K 所需的时间分别为 284, 209, 191, 229, 274 和 365 ms。在 50, 70 和 100 μm 粒径水雾的作用下,容器温度在喷雾结束后较短时间内可降至 500 K 以下,说明中等粒径水雾在降温方面显示出良好的效果。较大粒径水雾虽然能使燃爆温度迅速降至 1 000 K 以下,但在温度从

1 000 K降至500 K的过程中耗费的时间较长,分别为49, 145和58 ms,这是因为大粒径水雾的蒸发速度相对较慢,导致了冷却效果的延时。对于较小粒径的水雾,其冷却效果在喷雾结束后并不明显,温度仍在2 000 K以上维持了较长时间,分别为130 ms和56 ms,这是由于小粒径水雾虽然蒸发迅速,但其所携带的热量较少,故在热量吸收方面不如中等粒径的水雾。70 μm 粒径的水

雾在抑制体积分数10%的 CH_4 燃爆过程中表现出最佳效果。

2.1.3 水雾对 CH_4 燃爆过程的影响

图6是体积分数10%的 CH_4 燃爆过程中,在100 ms时通入70 μm 粒径水雾后不同时刻的流场分布图。图6揭示了在水雾抑制作用下,100~200 ms之间体积分数10%的 CH_4 燃爆过程中流场的动态变化。

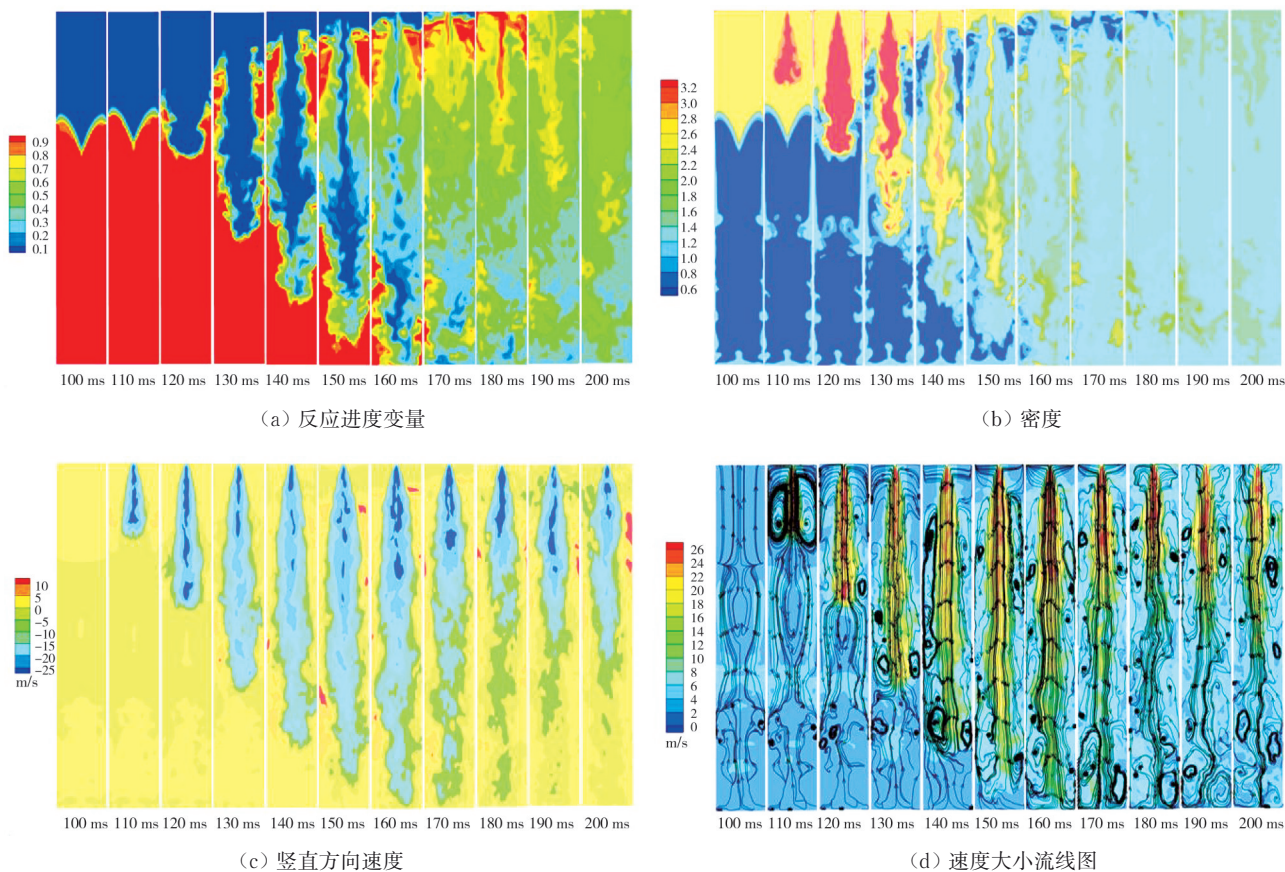


图6 10% CH_4 燃爆100 ms时喷射70 μm 粒径水雾后不同时刻的流场分布图

Fig. 6 Flow field distribution diagram of 70 μm water mist at different time intervals after 100 ms explosion of 10% CH_4

100 ms时,郁金香火焰形成,此时容器内已经有约2/3的区域反应完成,火焰沿着壁面向上稳定传播。此时已燃区与未燃区的密度有着明显区分,已燃区域密度相较于未燃区域更低,火焰锋面以上的区域速度向上,大小在5 m/s左右。

100~120 ms喷射水雾与火焰接触的过程中,郁金香火焰发生了明显的变形。通入70 μm 粒径的水雾后,水雾存在的区域密度迅速增大,水雾区域速度方向向下,有效抑制了火焰向上传播,观察其流线图发现在该时间段水雾区域两侧形成了较大的涡团。

130~160 ms是水雾从接触火焰至沉降到容

器底端的过程,水雾持续向下与已燃区域相互作用。已燃区域与未燃区域中的气体在湍流作用下开始混合,已燃区域的进度变量逐渐降低,密度逐渐趋于均匀。在水雾两侧涡团的作用下,部分区域火焰沿着壁面向上传播。

170~200 ms是火焰逐渐熄灭到喷射水雾停止的过程。在该过程中反应进度变量逐渐趋于均匀,反应几乎完全受到抑制。火焰在反应完后逐渐熄灭,密度也趋于均匀。

2.2 水雾初速对混合气体燃爆的影响

水雾的初速直接影响其在空间中的分布,进

而影响其与反应产物的接触效率和接触时间。因此,选择水雾初速度范围为5~50 m/s,水雾粒径为70 μm,其他条件同2.1节,研究不同的水雾初速对混合气体燃爆压力和压力上升速率及温度的影响。

2.2.1 水雾对CH₄燃爆压力及压力上升速率的影响

图7展示了不同初速的水雾对体积分数10%的CH₄-空气混合气体燃爆压力的影响。100 ms时开始喷射水雾,容器内的最高温度低于500 K时认为反应结束。由图7可以看出,随着水雾初速度的增大,压力峰值出现的时间逐渐提前,最大燃爆压力也相应降低。当水雾初速为5 m/s时,压力峰值在170 ms时达到0.284 MPa,水雾速度增至10, 20, 30和50 m/s时,爆炸压力的峰值分别在149, 133, 125和111 ms时出现,其对应的压力值分别下降至0.256, 0.230, 0.220和0.217 MPa。这表明高速度的水雾在降低压力峰值方面更有效,与速度低的水雾相比,水雾颗粒在高速喷射时携带了较大的动能,能够克服燃烧过程中产生的上升热流,快速穿透高温区域,并在整个燃烧区域中更广泛地分布。

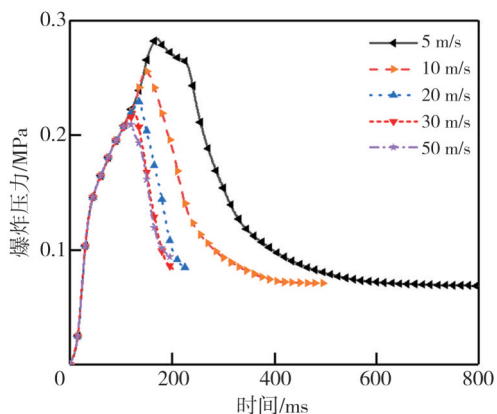


图7 不同初速水雾抑制10% CH₄时的爆炸压力
Fig. 7 Explosion pressure at 10% CH₄ inhibited by water mist under different initial velocities

图8展示了不同初速水雾对体积分数10%的CH₄-空气混合气体压力上升速率变化趋势的影响。当水雾初速改变后,压力上升速率的峰值及其出现的时刻发生改变。对于5, 10和20 m/s的水雾,第二次出现的压力上升速率峰值分别降至2.10, 1.77和1.04 MPa/s,且这些峰值分别出现在144, 134和129 ms。这一现象表明水雾在进入反应区域后,能够有效地降低燃爆压力上升的速度,随着水雾初速的增加,第二压力上升速率峰

值出现的时间越早,这是由于水雾以更高的速度到达燃烧区域,更迅速地吸收热量并降低温度。对于30 m/s和50 m/s的水雾,图中并没有出现第二个压力上升速率峰值,反而是持续下降,这意味着更高速度的水雾提供了更强的冷却效果,阻止了压力进一步上升。

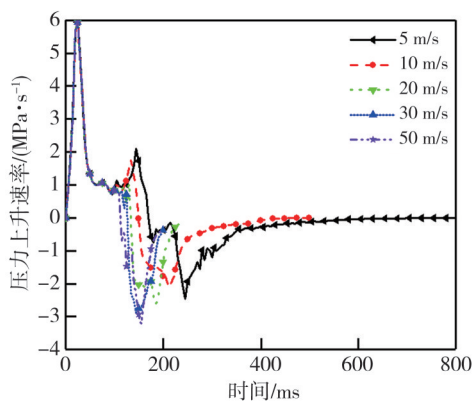


图8 不同初速水雾抑制10% CH₄时的爆炸压力上升速率
Fig. 8 Explosion pressure rise rate at 10% CH₄ inhibited by water mist under different initial velocities

2.2.2 水雾对CH₄燃爆温度的影响

随着水雾初速的增加,燃爆温度的下降趋势有明显变化,如图9所示。

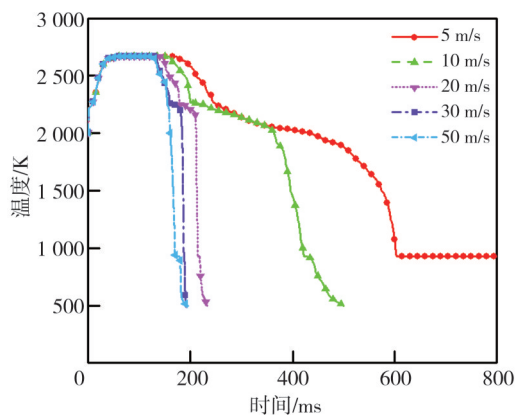


图9 不同初速水雾抑制10% CH₄时的爆炸温度
Fig. 9 Explosion temperature at 10% CH₄ inhibited by water mist under different initial velocities

通过对不同初速水雾的分析发现,高速度的水雾在快速降低温度方面展现出较好的效果。具体而言,5 m/s的水雾在抑制CH₄爆炸时效果最差,其降温速度较慢,直至800 ms时温度仍未降至500 K。随着水雾速度的增加,容器内温度到达500 K的时间逐渐缩短,当水雾速度增加至30 m/s与50 m/s时,其降温效果相差无几,这说明达到一定速度以后,水雾的冷却效果趋于饱和,即进一步增加水雾速度并不会在同样时间内

达到更高的热量吸收或更快的温度下降效果。这可能是由于在高速冲击下,水雾颗粒与燃烧生成的热气体之间的接触时间有限,限制了热交换过程。尽管如此,30 m/s和50 m/s的水雾仍然能够在较短的时间内将温度降至安全水平,显示了高速水雾降低燃爆温度的有效性。

2.3 水雾喷射时刻对混合气体燃爆的影响

水雾喷射时间点的不同直接决定了水雾与不同燃爆阶段 CH_4 作用的时间,从而影响水雾在燃爆过程中的作用效果。因此,选择水雾喷射时间范围为50~250 ms,水雾粒径为70 μm ,初速为30 m/s,其他条件同2.1节,研究不同时刻喷射水雾对混合气体燃爆压力和压力上升速率及温度的影响。

2.3.1 水雾对 CH_4 燃爆压力及压力上升速率的影响

图10展示了不同时刻喷射水雾对体积分数为10%的 CH_4 -空气混合气体燃爆压力变化的影响。

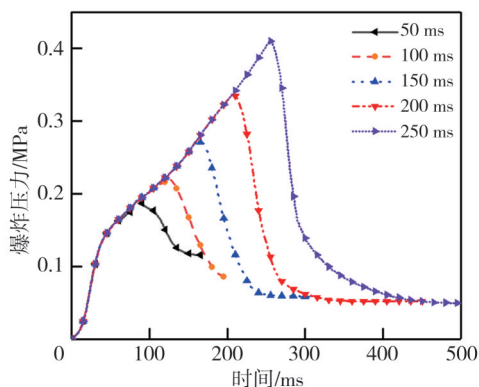


图10 不同时刻喷射水雾抑制10% CH_4 的爆炸压力
Fig. 10 Explosion pressure of 10% CH_4 inhibited by water mist at different injection moments

由图10可以观察到水雾的注入时机对压力峰值有显著的影响。模拟结果显示,早期的水雾喷射有效降低了最大爆炸压力,而随着喷射时间的延迟,抑制效果逐渐减弱。水雾在50 ms时喷射,压力峰值为0.19 MPa,比未添加水雾时下降了62.3%,且该压力峰值出现在86 ms,表明水雾在爆炸初期发挥了冷却和稀释作用,有效阻止了压力的增长。随着喷射时间推迟至100,150,200和250 ms,相应的压力峰值分别上升至2.20,2.72,3.37和4.10 MPa,且与未添加水雾时的压力峰值相比,降低幅度分别为56.3%,46.0%,

33.1%和18.6%。这种趋势反映了水雾如果未能在燃爆发展的关键阶段及时引入,其抑制燃爆过程的效果会受到限制。

图11展示了不同时刻喷射水雾对压力上升速率的影响。在50 ms时,水雾的介入使第二个压力上升速率峰值迅速出现和下降,这一现象表明在燃爆初期阶段引入水雾对于抑制压力的增长有着良好的效果。喷射时间延迟至100,150和200 ms,虽然水雾仍能在压力剧烈增长之前介入,但第二个压力上升速率峰值出现的时刻也随之延后,这反映了水雾在不同阶段对燃爆过程的冷却效果。在250 ms时喷射水雾,由于体积分数10%的 CH_4 的爆炸压力上升速率已在0.25 s之前达到第二个峰值,此时注入水雾未能在第二次爆炸压力剧增前提供有效的冷却作用。

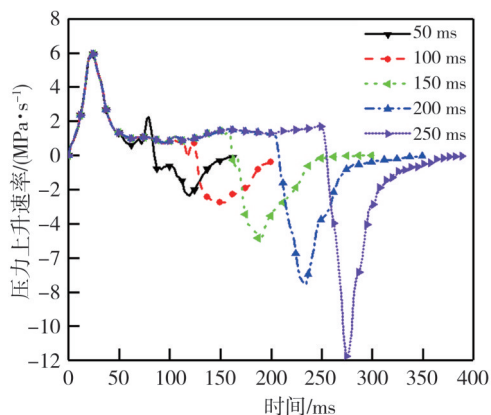


图11 不同时刻喷射水雾抑制10% CH_4 的燃爆压力上升速率
Fig. 11 Explosion pressure rise rate of 10% CH_4 inhibited by water mist at different injection moments

2.3.2 水雾对 CH_4 燃爆温度的影响

在 CH_4 燃爆抑制的研究中,水雾的注入时机对于燃爆温度具有显著影响。如图12所示,不同时刻喷射水雾对体积分数为10%的 CH_4 -空气混合气体燃爆温度的作用效果有着显著区别。在50 ms时喷射,燃爆温度迅速达到峰值2669 K,并在152 ms时迅速下降至489 K,这表明水雾的早期引入能够有效地在燃爆初期抑制温度升高。水雾的喷射时间延后至100 ms和150 ms时,观察到温度到达500 K所需的时间延长,具体而言,其温度在191 ms和255 ms时分别降至486 K和484 K,表明在这些时刻引入水雾虽然能够降低燃爆温度,但由于燃爆反应已经有了一定的发展,使得水雾的冷却效果减弱。进一步将水雾喷射时间延迟至200 ms和250 ms时,燃爆温度在更长时间内

维持在较高水平,降温过程缓慢,特别是水雾在 250 ms 时喷射,高于 930 K 的温度持续较长时间,这表明水雾如果在燃爆反应发展到较晚阶段才引入,其抑制效果较差。

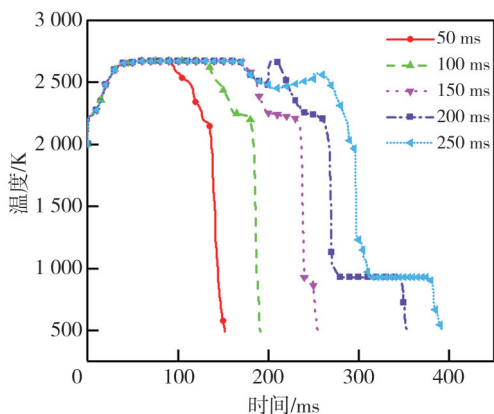


图 12 不同时刻喷射水雾抑制 10% CH₄ 时的爆炸温度
Fig. 12 Explosion temperature of 10% CH₄ inhibited by water mist under different injection moments

3 水雾抑制甲烷燃爆的机理

水雾抑制甲烷爆炸的机理主要有水雾破裂吸能、化学抑制以及水雾蒸发吸能等。水雾蒸发吸热降低了反应区温度并破坏了燃爆反应热平衡,流场温度的降低会减慢化学反应速率,此外,水蒸气的产生还稀释了燃烧区域内的可燃气体和氧气浓度,降低了反应物的浓度。对于直径小于 100 μm 的雾滴,其生存时间 t_{life} 可按式(5)^[20-21]计算;对于直径大于 100 μm 的雾滴,其生存时间可按照式(6)^[20-21]计算。

$$t_{\text{life}} = \frac{D_0^2 L \rho}{8 K_g \Delta T}, \quad (5)$$

$$t_{\text{life}} = \frac{D_0 L \rho}{2 K_g \Delta T C}, \quad (6)$$

式中: D_0 为水雾粒子的粒径; L 为水雾的蒸发潜热, 2 263. 073 kJ/kg; ρ 为水的密度; K_g 为雾滴表面气相导热系数, 取值为 0. 1; ΔT 为水雾粒子的升高的温度, K; C 为经验常数, 取值 $240 \sqrt{1000}$ 。

计算结果如图 13 所示,可以看出随着雾滴初始粒径的减小,雾滴的蒸发气化时间将缩短。雾滴蒸发的同时伴有传热、传质过程,通过对周围热气体的传导、对流传递到雾滴表面,水蒸气通过对流和扩散运动到周围空气中,从而降低燃爆火焰温度。

水雾对燃爆反应区的化学抑制作用也不能忽略。水雾中的水分子悬浮于燃爆反应区中,水分子中 H·

及 OH· 等自由基可以参与到燃爆链式反应中,降低了燃爆化学反应速率^[22]。同时,在链式反应过程中,部分自由基在燃爆产物气体卷吸作用下与雾滴发生碰撞而被销毁,从而降低了链式反应自由基的数量,进一步加快了燃爆火焰的熄灭。

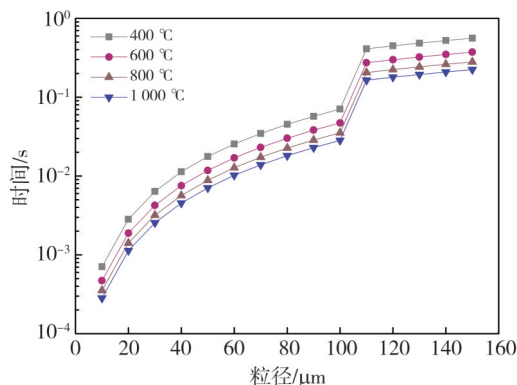


图 13 不同温度下水雾粒径与蒸发时间的关系
Fig. 13 Relationship between particle size of water and evaporation time at different temperature

4 结 论

本文研究发现,在水雾粒径为 10~150 μm 范围内,粒径为 70 μm 的水雾对 CH₄-空气混合气体燃爆的抑制效果最优。此外,水雾抑制效果随入射初速增大和喷射时间提前而显著增强。具体结论如下:

1) 随着水雾粒径的增大,水雾抑爆效果先增强后降低。直径 70 μm 的水雾对体积分数为 10% 的 CH₄-空气燃爆的抑制效果最好,此时混合气体燃爆最大压力为 0. 220 MPa,最大压力上升速率为 0. 86 MPa/s,在 191 ms 时可将混合气体燃爆温度降低至 500 K。

2) 随着水雾喷射速度的增大,水雾抑爆效果增强。当水雾初速为 50 m/s 时,混合气体爆炸压力降为 0. 217 MPa,温度也在最短时间内降至 500 K。

3) 随着水雾喷射时间的提前,水雾抑爆效果增强。在 50 ms 时喷射水雾,混合气体燃爆压力降至 0. 19 MPa,在 152 ms 时喷射水雾,混合气体燃爆温度迅速低至 500 K。

参考文献:

[1] MEJÍA-BOTERO C C, VEIGA-LÓPEZ F, MELGUIZO-GAVILANES J. Minimum tube diameters for detonation propagation in CH₄/H₂-air mixtures: Implications for natural gas cooktop burners[J].

- Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 80: 104919.
- [2] YANG W, YANG X, ZHANG K, et al. Experimental study on the explosion flame propagation behavior of premixed CH₄/H₂/air mixtures with inert gas injection [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 84: 106-117.
- [3] CHANG Z, CHENG F, WANG C, et al. Effects of buoyancy on the spherical flame and explosion pressure of a CH₄ mixture under dilution conditions [J]. Fuel, 2024, 375: 132604.
- [4] LIC, LEI B, PANG R, et al. Effects of ignition location on CH₄/air explosion characteristic in a spherical bomb [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 50: 102539.
- [5] 郑露露, 段玉龙, 李泽欢, 等. 多孔介质和CO₂抑制低氢比甲烷爆炸的效应研究 [J]. 消防科学与技术, 2023, 42(8): 1051-1056.
- ZHENG Lulu, DUAN Yulong, LI Zehuan, et al. Effect of porous media and CO₂ on inhibiting methane explosion with low hydrogen ratio [J]. Fire Science and Technology, 2023, 42 (8) : 1051-1056. (in Chinese)
- [6] NAN F, LUO Z, CHENG F, et al. Study on the instability and suppression mechanism of methane/air deflagration flame by inert gas-halogenated hydrocarbons [J]. Fuel, 2024, 374: 132351.
- [7] GUO Q, LIU J, LIANG W, et al. On the explosion characteristics of natural gas with hydrogen and inert gas additions [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 179: 700-713.
- [8] MITU M, PRODAN M, GIURCAN V, et al. Influence of inert gas addition on propagation indices of methane-air deflagrations [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 102: 513-522.
- [9] HAN Z, ZHANG Y, DU Z, et al. New-type gel dry-water extinguishants and its effectiveness [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 590-600.
- [10] ZHANG T W, DU Z M, HAN Z Y, et al. Performance evaluation of water mist with additives in suppressing cooking oil fires based on temperature analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 1069-1074.
- [11] ZHANG T W, HAN Z Y, DU Z M, et al. Cooling characteristics of cooking oil using water mist during fire extinguishment [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 863-869.
- [12] 张青松, 程相静, 白伟. 细水雾添加剂抑制锂电池火灾最佳浓度研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(5): 43-50.
- ZHANG Qingsong, CHENG Xiangjing, BAI Wei. Study on optimum concentration of additives in water mist for suppression of lithium battery fire [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(5): 43-50. (in Chinese)
- [13] 周西华, 王原, 李昂, 等. 隔爆水幕对瓦斯爆炸传播规律影响的试验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(11): 123-128.
- ZHOU Xihua, WANG Yuan, LI Ang, et al. Experimental study on influence of explosion-proof water curtain on propagation laws of gas explosion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13 (11) : 123-128. (in Chinese)
- [14] 杨克, 张平, 邢志祥, 等. 含NaCl超细水雾抑制甲烷爆炸实验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 86-91.
- YANG Ke, ZHANG Ping, XING Zhixiang, et al. Experimental study on methane explosion suppression by ultrafine water mist containing NaCl additive [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15 (3): 86-91. (in Chinese)
- [15] PALIS S, STRÄUBIG F, VOIGT S, et al. Experimental investigation of the impact of water mist on high-speed non-premixed horizontal methane jet fires [J]. Fire Safety Journal, 2020, 114: 103005.
- [16] NAKAHARA K, YOSHIDA A, NISHIOKA M. Experiments and numerical simulation on the suppression of explosion of propane/air mixture by water mist [J]. Combustion and Flame, 2021, 223: 192-201.
- [17] LIU Z, ZHONG X, LU Y, et al. Suppression characteristics of water mist containing alkali metal compounds in natural gas explosions [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 62: 105196.
- [18] 光春雨. 基于方形管的甲烷-空气预混气体抑爆研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [19] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] 刘逸夫. 氮气/水雾协同抑制甲烷爆炸研究 [D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [21] 刘江虹. 细水雾抑制熄灭固体火焰的模拟实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2001.
- [22] 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.