DOI: 10.11883/bzycj-2018-0147

CO_2-超细水雾对 CH_4/Air 初期爆炸特性的影响*

裴 蓓[1],韦双明[1],陈立伟[1],潘荣锟[1],王 燕[1],余明高[2],李 杰[1]
(1.河南理工大学煤炭安全生产河南省协同创新中心,河南 焦作 454003;
2.重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044)

摘要: 为了研究 CO_2 和超细水雾对 9.5%甲烷/空气初期爆炸特性的影响,采用高速纹影系统和定容燃烧弹对 9.5%甲烷/空气初期爆炸特性进行了研究。分别改变 CO_2 稀释体积分数和超细水雾质量浓度,分析在二者单独和共同作用下球形火焰传播过程、火焰传播速度和爆炸超压的变化规律。结果表明:58.3 g/m^3 超细水雾增强了火焰不稳定性,促进了火焰加速和爆炸超压增加,表明超细水雾不足能产生促爆作用,只有当超细水雾充足时才会抑制甲烷爆炸;CO_2 和超细水雾共同作用时能避免因超细水雾带来的促爆现象,可以明显减弱火焰不稳定性,减小火焰传播速度,降低爆炸超压和平均压升速率,以及明显推迟超压峰值来临时间。

关键词: 二氧化碳;超细水雾;甲烷/空气;初期爆炸特性
中图分类号: O382;TD75.2 **国标学科代码:** 1303520 **文献标志码:** A

天然气具有清洁、热值高、价格低等优点,已在生活和汽车燃料方面得到了广泛的应用[1]。然而,天然气的储存和运输仍是一大安全问题,一旦泄漏遇火爆炸,会造成严重人员伤亡和财产损失。因此,研究抑爆剂对甲烷爆炸的抑制作用,对天然气的安全储存和运输具有重要意义。

超细水雾是一种常见的抑爆剂,由于其高效、环保、来源范围广等优点而被关注。在超细水雾的抑爆机理方面,人们采用实验和数值模拟的方法对此进行了详细探讨[2-4]。Lentati 等[5]、Yoshida 等[6]指出,细水雾主要通过热冷却效应削弱爆炸火焰,化学抑制作用小于 10%。然而,除了物理效应,水分子作为第三体,会中断爆炸的链式反应,导致更多的爆炸反应自由基失活和主要活性物种的减少[7]。另外,超细水雾粒径、浓度会影响其抑爆效果。Gu 等[8]、Holborn 等[9]利用小型实验平台,检测了不同水雾粒径大小,发现超细水雾能有效降低爆炸温度。Modak 等[10]发现,有效抑制爆炸能量的最小细水雾粒径是 10 μm,再减小细水雾粒径并不会显著增强抑爆效果。Boeck 等[11]、Battersby 等[12]、Ingram 等[13]、Vollmer 等[14]发现,当细水雾处于一定浓度状态时,液滴尺寸分布会影响预混可燃气体爆炸火焰。然而,有些学者发现超细水雾还能增强可燃气体爆炸强度。Gieras[15]指出,喷雾与火焰/壁面相互作用过程中产生的湍流,会增加爆炸效果,加速火焰传播。余明高等[16]指出,充足的细水雾能够有效降低爆炸强度,但是当细水雾不足时会增强爆炸强度。曹兴岩等[17]对超细水雾增强甲烷/空气爆炸的机理进行了分析,指出超细水雾吸热和汽化膨胀两种效应的共同作用导致增强和抑制爆炸两种相反效果。

另外,许多学者为了提高超细水雾的抑爆效果,做了很多改良。Cao 等[18]往超细水雾中添加 NaCl,用以研究对不同甲烷浓度的抑爆效果,结果表明,NaCl 的加入可以提高超细水雾对甲烷爆炸的抑制效果。Pei 等[19]研究了氮气和超细水雾抑制管道瓦斯爆炸压力衰减特性,发现超细水雾与氮气共同抑制瓦斯爆炸气体时,存在明显协同作用,且能降低超细水雾和惰性气体的用量。Chelliah 等[20]研究了含 KOH、NaOH 和 NaCl 细水雾对甲烷/空气预混燃烧和非预混燃烧的影响,实验结果表明,当超细水雾粒径小于 13 μm 时,NaOH 并不能明显抑制预混火焰,NaCl 比 NaOH 更有效地抑制甲烷爆炸。

* **收稿日期:** 2018-04-27; **修回日期:** 2018-05-22
基金项目: 国家自然科学基金(51604095,51774059,51774115);中国博士后科学基金(2018M630818);
河南省科技攻关研究(172102310570);河南理工大学创新型科研团队(T2018-2)
第一作者: 裴 蓓(1982—),女,博士,讲师,smart128@126.com;
通信作者: 余明高(1963—),男,博士,教授,mg_yu@126.com。

综上可见，现有超细水雾抑爆研究主要侧重对传播阶段火焰波和压力波的宏观抑制效果，忽略了抑爆剂对初期爆炸特性的影响，而爆炸初期抑爆剂对整个爆炸过程又具有重要影响。

因此，本文中，进行密闭容器内部超细水雾和 CO_2 对 9.5%甲烷/空气初期爆炸特性的实验研究，得出超细水雾和 CO_2 对 9.5%甲烷/空气初期爆炸特性的变化规律，以期为不同行业场合喷雾抑爆系统的设计提供理论依据。

1　实　验

1.1　装置

实验系统如图 1 所示，主要由定容燃烧弹、配气系统、超细水雾生成系统、数据采集与控制系统、点火系统、光学纹影系统和高速摄像系统等组成。

燃烧弹为密闭不锈钢焊接而成的圆柱体，壁厚 30 mm，耐压可达 2 MPa，半径 145 mm，高 365 mm，体积 24.1 L。为了实现爆炸过程的可视化，在定容燃烧弹两侧和一侧筒壁中间位置，共装有 3 面直径 110 mm、厚度 50 mm 的精加工光学石英玻璃视窗，为观察火焰提供光学通道。

筒壁上装有光电传感器和压力传感器。RL-1 光电传感器对准点火电极用以确定点火时间；MD-HF 压力传感器测量范围为−0.1～1 MPa，误差为 0.25%，动态响应时间为 1 ms；光电传感器和压力传感器通过 USB-1608FS Plus 数据采集卡与电脑相连，数据采集卡记录数据工作频率为15 kHz。

两根点火电极正对燃烧弹的中心，电极间距为 3 mm，点火系统由 HEI19 系列高热能点火器、点火电极组成，点火电压为 6 kV。

配气系统包括空气压缩机、气阀、气管、气瓶、Alicat 质量流量控制器(MFC)、真空泵和精密数字式压力表等。

超细水雾发生与输送系统，主要由超声波雾化装置、密闭方形储水盒、出入管道等组成。其中超声雾化装置采用的是三头全铜雾化器，雾化片工作频率为1 700 kHz。

纹影仪型号为 CQW300，高速摄像机型号为 High Speed Star 4G，像素设置为 1 280×800，拍摄频度为2 000 s^{-1}。实验的环境压力为 100 kPa，环境温度为 10 ℃。

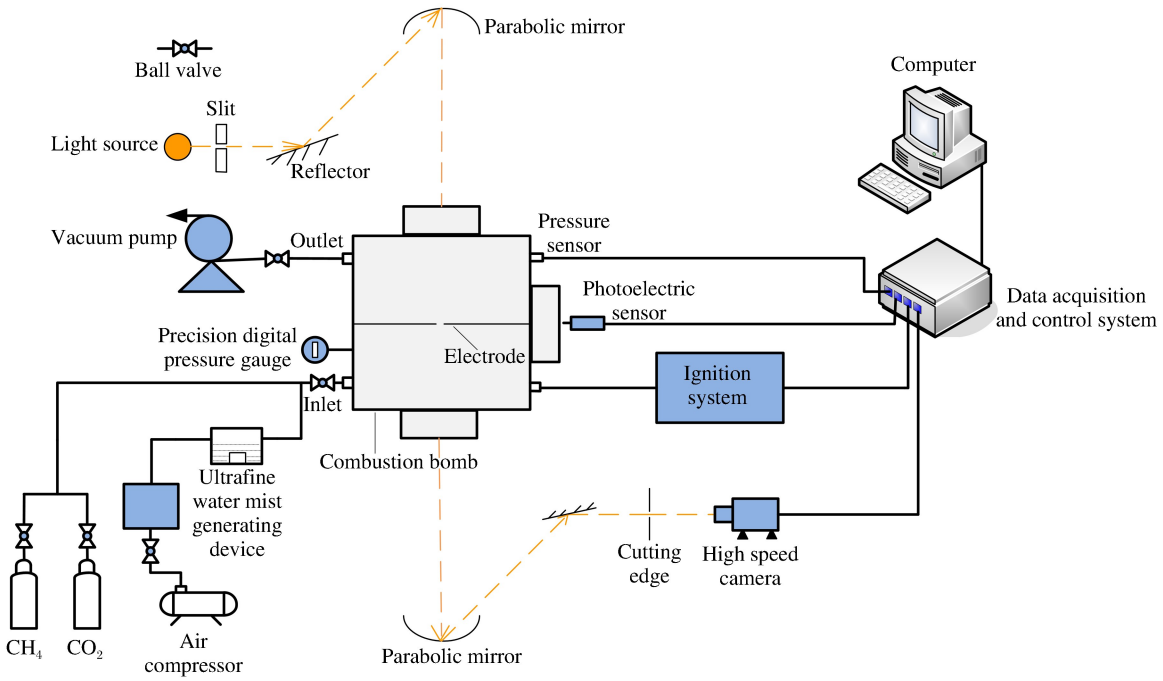


图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic of experimental system

1.2　方法

为了保证定容燃烧弹气密性良好，在每次实验前都要检查气密性。在气密性符合要求的情况下，首先，对定容燃烧弹抽真空至－0.08 MPa；然后，根据道尔顿分压定律依次通入 CO_2、CH_4 和空气所占的分压，超细水雾随空气进入定容燃烧弹，并由质量流量控制计控制进气速率。为使超细水雾与各组分气体混合均匀，通气完毕后需要静置 30 s 后再点火，同时触发高速摄像机记录爆炸火焰图像，数据采集系统记录爆炸过程中的压力数据，实验结束后保存实验数据。为保证数据的准确性，每组实验重复 5 次。

2　结果与分析

2.1　对火焰传播过程的影响

图 2 为 9.5%甲烷/空气爆炸球形火焰传播过程的部分纹影图片。为简化起见，本文中选取了几个特殊时刻来说明球形火焰发展过程。9.5%甲烷/空气引爆后的一段时间内球形火焰是以层流状态向外传播，此时火焰锋面光滑，24 ms 时火焰到达视窗边缘，但由于甲烷为低活性可燃气，燃烧速度较低，因此在火焰锋面到达视窗边缘前没有胞状化。此外，在火焰形成初期火焰面上有两道裂纹，这可能是因为点火电极对火焰锋面所造成的。随着球形火焰继续传播，65 ms 时火焰表面产生不规则的裂纹，随后这些裂纹继续发展，83 ms 时火焰形成均匀的完全胞状化状态。

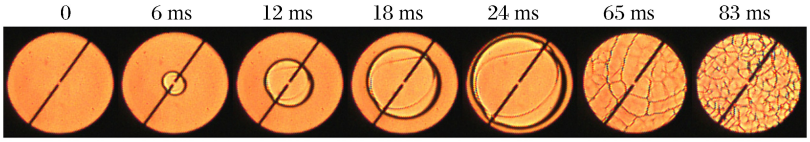


图 2　9.5%甲烷/空气球形火焰的传播过程

Fig. 2　9.5% methane/air spherical flame propagation process

图 3 为 CO_2 对 9.5%甲烷/空气球形火焰传播过程的影响。首先，随着 CO_2 体积分数的增加，点火后相同时刻的火焰半径逐渐减小，这表明 CO_2 浓度越高，火焰传播速度越小。其次，CO_2 浓度越高，球形火焰越光滑，胞状面出现的时刻越晚，这表明 CO_2 能够减弱球形火焰不稳定性。最后，当 CO_2 体积分数达到 14%时球形火焰出现上浮现象，这是由于已燃气的密度小于未燃气的密度，而 CO_2 降低了火焰传播速度，延长了球形火焰所受浮力的作用时间，使得火焰产生上浮现象[21]，当 CO_2 体积分数为 18%时这种现象更为明显，形成椭球形的火焰锋面。

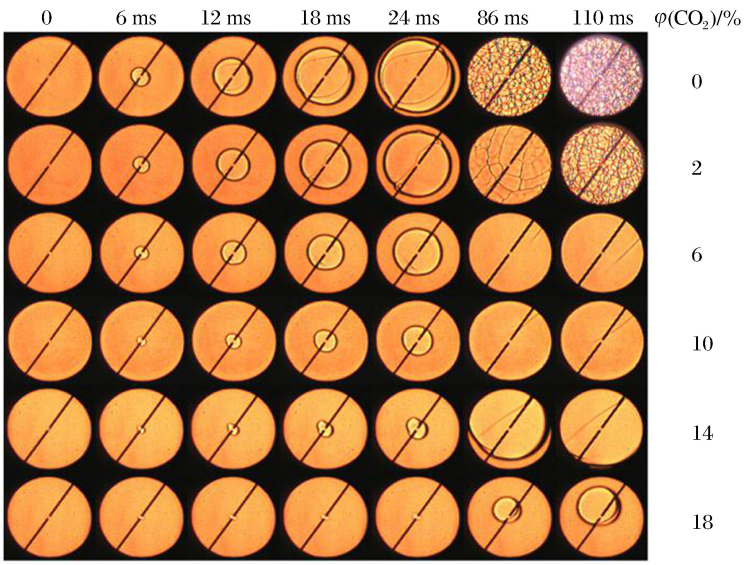


图 3　CO_2 对 9.5%甲烷/空气球形火焰传播过程的影响

Fig. 3　Effect of CO_2 on propagation of 9.5% methane/air spherical flame

图 4 为超细水雾对 9.5%甲烷/空气球形火焰传播过程的影响。随着超细水雾质量浓度的增加，点火后相同时刻的火焰半径先增加后减小，通入 58.3 g/m^{3}超细水雾时的火焰半径大于不通超细水雾时的火焰半径，此后随着超细水雾质量浓度的增加火焰半径逐渐减小。同时，加入 58.3 g/m^{3}超细水雾后火焰亮度增加，这是由于超细水雾参与了爆炸反应，导致火焰亮度增加[22]。对比 86 ms 时的纹影图片还可以发现，58.3 g/m^{3}超细水雾的胞状面发展最充分，其次是不加超细水雾、174.9 g/m^{3}超细水雾、262.5 g/m^{3}超细水雾和 350 g/m^{3}超细水雾。这表明，通入少量超细水雾不能抑制甲烷爆炸，反而会参与爆炸反应，导致火焰传播速度增加，只有当超细水雾质量浓度充足时才会抑制甲烷爆炸。

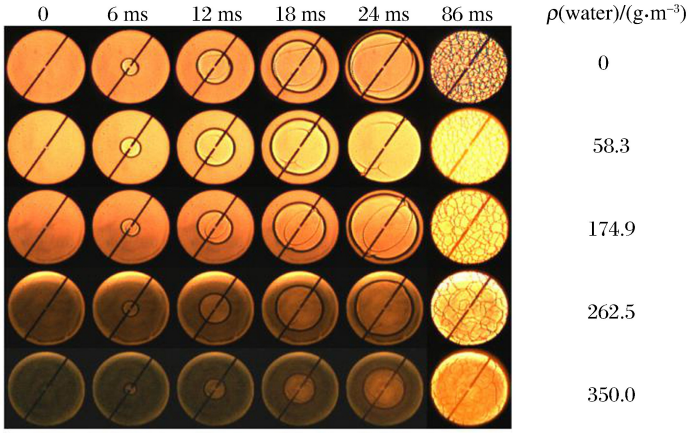


图 4　超细水雾对 9.5%甲烷/空气球形火焰传播过程的影响

Fig. 4　Effect of ultrafine water mist on propagation of 9.5% methane/air spherical flame

图 5 为 CO_2和质量浓度为 174.9 g/m^{3}超细水雾共同作用对 9.5%甲烷/空气球形火焰传播过程的影响。与 174.9 g/m^{3}超细水雾相比，加入 CO_2后火焰表面变得更光滑，火焰不稳定性减弱，如 110 ms 时，随着 CO_2体积分数的增加，火焰胞状面逐渐变大，数量逐渐减小，在加入 10%CO_2后胞状面消失。此外，在点火后 110 ms 时，通入 174.9 g/m^{3}超细水雾的火焰最明亮，而在通入 CO_2后火焰亮度变暗，这表明加入的 CO_2有助于抑制超细水雾参与爆炸反应。

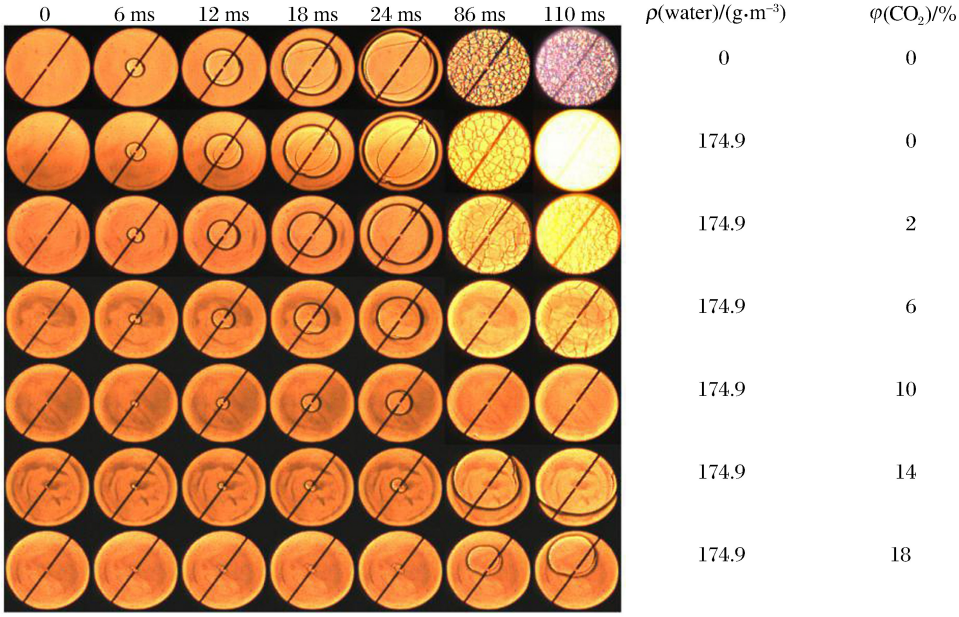


图 5　CO_2-超细水雾对 9.5%甲烷/空气球形火焰传播过程的影响

Fig. 5　Effect of CO_2 and ultrafine water mist on propagation of 9.5% methane/air spherical flame

2.2　对火焰传播速度的影响

火焰传播速度是反应火焰前沿传播快慢的一个指标，计算公式为：

$$v=\frac{R_2-R_1}{t_2-t_1} \tag{1}$$

式中：R_1 和 R_2 分别为 t_1 时刻和 t_2 时刻的火焰半径。

图 6 为 CO_2-超细水雾对火焰传播速度的影响图像。

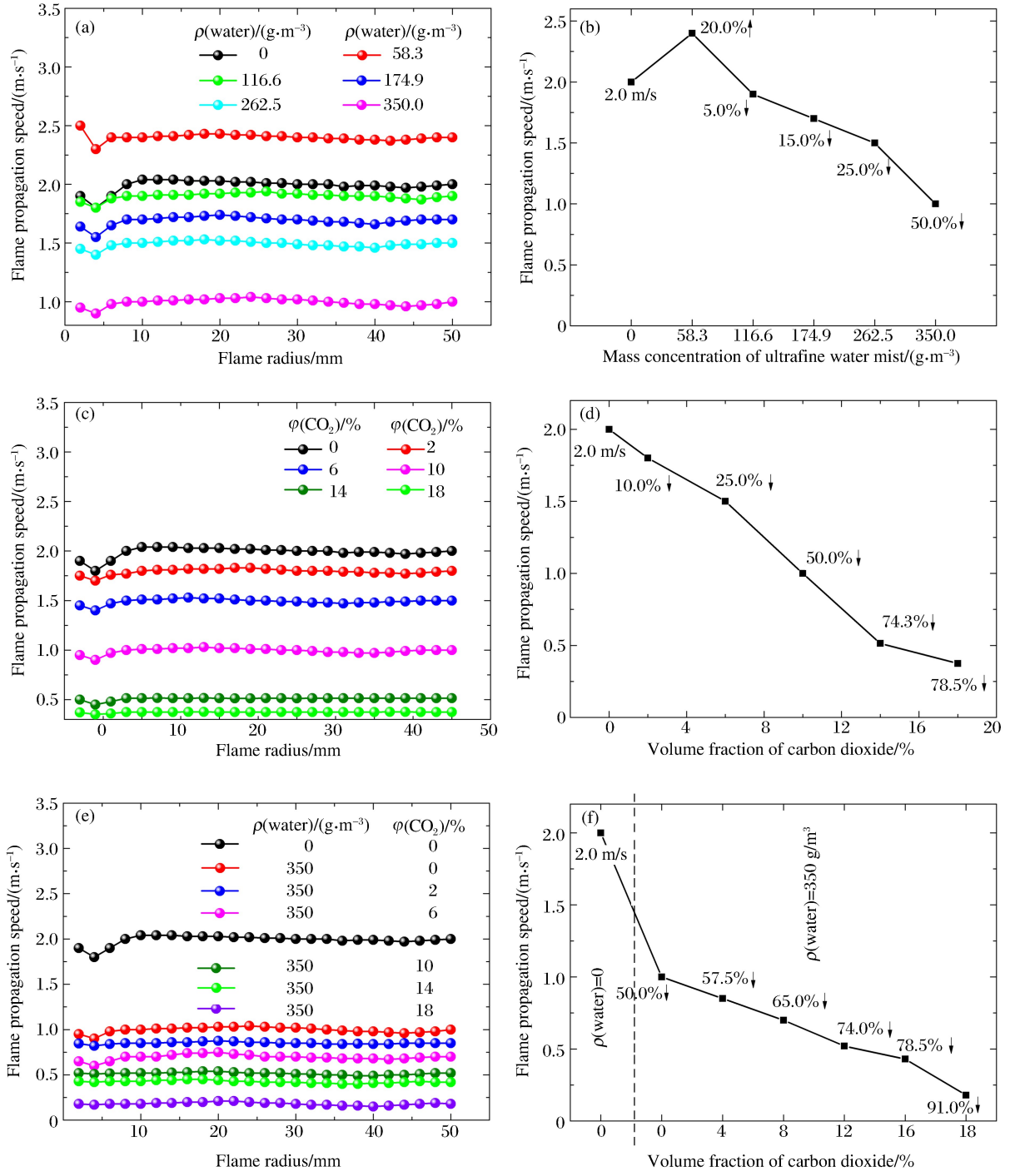


图 6　CO_2-超细水雾对 9.5%甲烷/空气火焰传播速度的影响

Fig. 6　Effect of CO_2-ultrafine water mist on flame propagation speed of 9.5% methane/air

图 6(a)为不同超细水雾质量浓度下火焰传播速度随火焰半径的变化关系。

点火后火焰传播速度的变化可以分为 2 个时期:(1)火核形成期;(2)火焰发展期。火核形成期的火焰传播速度随火焰半径增大而减小,在半径约 4 mm 时火焰传播速度最小,然后开始上升,在半径约 7 mm时火焰传播速度趋于稳定,因而在半径 7 mm 后测得火焰传播速度较为准确,这主要是因为火核形成期火焰发展受到点火能量的影响较大[23]。火核形成后以膨胀球形火焰向外传播,火焰表面逐渐远离点火位置,火焰表面受点火作用的影响逐渐减小,火焰传播速度几乎不发生变化,这个时期是火焰发展期。

图 6(b)为超细水雾质量浓度对火焰传播速度变化曲线的影响。

随着超细水雾质量浓度的增加,9.5%甲烷/空气球形火焰传播速度先增加后减小,通入 58.3 g/m^3 超细水雾时的火焰传播速度增加了 20%,这是由于超细水雾对爆炸火焰流场产生明显影响,使爆炸火焰流场结构发生改变,这会使球形层流火焰表面产生褶皱,增大了燃烧面积,从而使火焰传播速度增加。当超细水雾质量浓度增至 116.6 g/m^3 时,球形火焰的传播速度降低并不明显,只下降了 5.0%;当超细水雾质量浓度达到 350 g/m^3 时有了明显降低,下降了 50%。

这表明,超细水雾量不足时其火焰传播速度降低并不明显,甚至有可能会造成火焰加速,只有当超细水雾量充足时才会有明显的抑爆作用。

图 6(c)为在不同体积分数 CO_2 作用下火焰传播速度随火焰半径的变化关系。

随着 CO_2 体积分数的增加,火焰传播速度逐渐减小。此外,CO_2 对火核形成期的影响也比较大,随着 CO_2 体积分数的增加,点火对火焰传播速度的影响越来越小,这可能是因为此时火焰传播速度较小造成的。

图 6(d)为 CO_2 对火焰传播速度变化的影响曲线。

CO_2 能够明显降低火焰传播速度,并且 CO_2 浓度越高抑制作用越明显,当加入体积分数为 18% 的 CO_2 时,火焰传播速度下降了 81.3%。

图 6(e)~(f)为 350 g/m^3 超细水雾和不同体积分数 CO_2 共同作用对火焰传播速度的影响。

火焰传播速度的变化趋势没有发生明显变化,但是当超细水雾和 CO_2 共同作用时,火焰传播速度的下降更加明显。加入 350 g/m^3 超细水雾时的火焰传播速度下降了 50%,只加入 18%CO_2 时的火焰传播速度下降了 81.3%,而 350 g/m^3 超细水雾和 18%CO_2 共同作用时火焰传播速度下降了 91%,抑爆效果有小幅增高,这是因为加入的水雾量较少。

2.3　对爆炸超压的影响

图 7 为 CO_2 体积分数和超细水雾质量浓度对爆炸超压的影响。

图 7(a)是不同体积分数 CO_2 对 9.5%甲烷/空气爆炸超压影响的对比曲线。

首先,不同体积分数 CO_2 影响下的爆炸超压曲线具有相似的变化趋势,可以把点火后定容弹内的压力变化分为 3 个时期:(1)压力滞后期;(2)压力增长期;(3)压力衰减期。

在甲烷被点燃后,球形火焰是以层流状态向外传播,此时的火焰传播速度较小,定容弹内的压力变化不大,这个时期称为压力滞后期;当火焰继续向外发展时,火焰不稳定造成火焰加速,形成爆炸冲击波导致定容弹内压力增大,这个时期称为压力增长期;火焰继续发展,定容弹内的甲烷即将燃尽,燃烧速度减慢直至火焰熄灭,造成定容弹内的压力衰减,这个时期是压力衰减期。

其次,随着 CO_2 体积分数的增加,压力滞后期和压力增长期所用时间均有所增加,爆炸超压曲线上升时刻明显延迟,例如 9.5%甲烷/空气爆炸时的压力滞后期为 41.6 ms,在加入 18%CO_2 后滞后期延长到 185.0 ms,增加了 344.7%。

再次,CO_2 对超压峰值和超压峰值到达时间也有很大影响,CO_2 浓度越高,超压峰值越低,超压峰值到达时间越长,例如 9.5%甲烷/空气爆炸超压峰值为 0.660 2 MPa,而在 18%CO_2 作用下,超压峰值下降到了 0.408 5 MPa,下降了 38.1%;9.5%甲烷/空气爆炸超压峰值到达时间为 189.1 ms,而在 18%CO_2 作用下爆炸超压峰值到达时间增加到了 1 040.1 ms,增加了 450.0%。

最后，在爆炸压力增长期，随着 CO_2 体积分数的增加爆炸超压曲线斜率明显降低，这表明压升速率减小。因为 CO_2 对 9.5%甲烷/空气爆炸具有明显的抑制作用，并且 CO_2 浓度越高抑制作用越明显，这是由于甲烷爆炸本质上是一个链式反应过程，而 CO_2 稀释了甲烷气体，抑制了活化自由基的解离，降低了活化自由基的浓度，使爆炸强度减小，爆炸反应速率减慢。

图 7(b)是不同超细水雾质量浓度对 9.5%甲烷/空气爆炸超压的影响曲线。变化曲线与图 7(a)有相似的变化趋势，即定容弹内的爆炸压力也经历了 3 个阶段。

但是，在超细水雾质量浓度为 58.3 g/m^{3}时，爆炸超压峰值增加到了 0.697 7 MPa，增加了 5.7%。这是因为：

(1)超细水雾的加入会使爆炸流场湍流化，湍流化会使火焰表面失稳造成火焰表面与预混未燃气的接触面积增加，这会造成火焰燃烧增强，火焰传播速度增加，爆炸超压增加，从而产生促爆作用；

(2)在密闭容器内部，少量超细水雾在高温火焰作用下会发生气化，气化的超细水雾体积会有所增加，造成定容燃烧弹内的压力升高，这就是超细水雾的气化升压作用；在超细水雾质量浓度 58.3 g/m^{3}时，超细水雾的气化升压作用大于冷却降温作用，从而造成了定容燃烧弹内的压力升高[22]。

此后，随着超细水雾质量浓度的增加，爆炸超压峰值逐渐降低。这表明，少量的超细水雾并不能抑制甲烷爆炸，只有当超细水雾达到一定质量浓度时才能抑制甲烷爆炸。

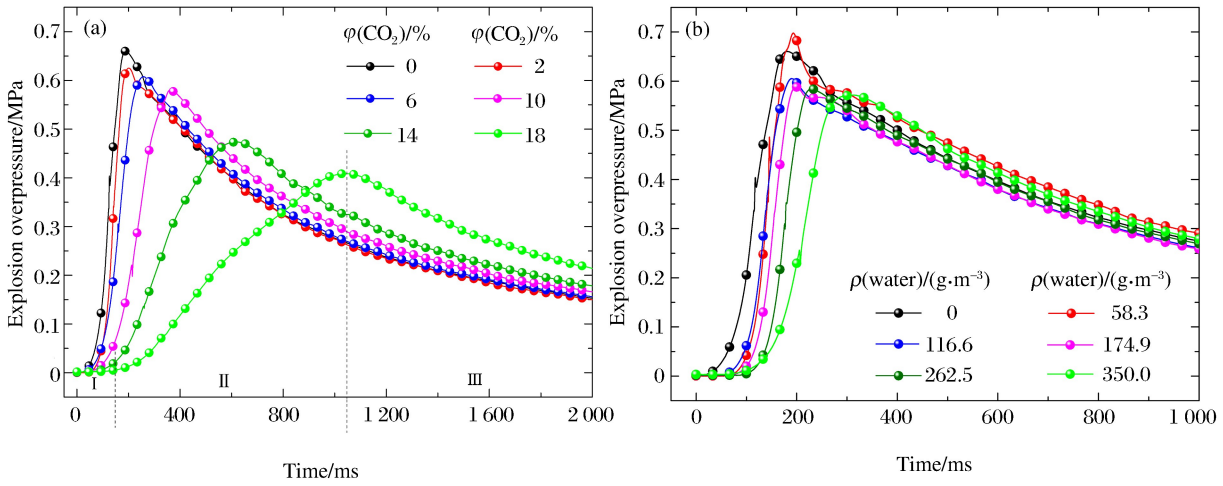


图 7 CO_2 和超细水雾对 9.5%甲烷/空气爆炸超压的影响

Fig. 7 Influences of CO_2 and ultrafine water mist on explosion overpressure of 9.5% methane/air

为了说明超细水雾和 CO_2 共同作用对 9.5%甲烷/空气爆炸超压的影响，选取质量浓度为 350 g/m^{3}的超细水雾和 CO_2 共同作用的情况来进行分析。

图 8 是质量浓度为 350 g/m^{3}的超细水雾和不同体积分数 CO_2 共同作用对 9.5%甲烷/空气爆炸超压的抑制效果图像。

由图 8(a)和图 7 对比，可以看出超细水雾和 CO_2 共同作用时的抑爆效果更加明显，当往超细水雾中加入 CO_2 后爆炸超压峰值明显降低，爆炸超压峰值来临时间显著增加，并且随着 CO_2 体积分数的增加，超细水雾和 CO_2 的综合抑爆能力越强。

根据图 8(b)，9.5%甲烷/空气爆炸的平均压升速率为 3.0 MPa/s，而 350 g/m^{3}超细水雾和 18% CO_2 共同作用下，平均压升速率下降到了 0.25 MPa/s，下降了 91.7%；超压峰值来临时间增加到了 1 395.7 ms，增加了 638.1%，这比超细水雾或 CO_2 单独作用时具有更好的抑爆效果，并且 350 g/m^{3}超细水雾和 18%CO_2 综合作用时的抑爆效果最明显。

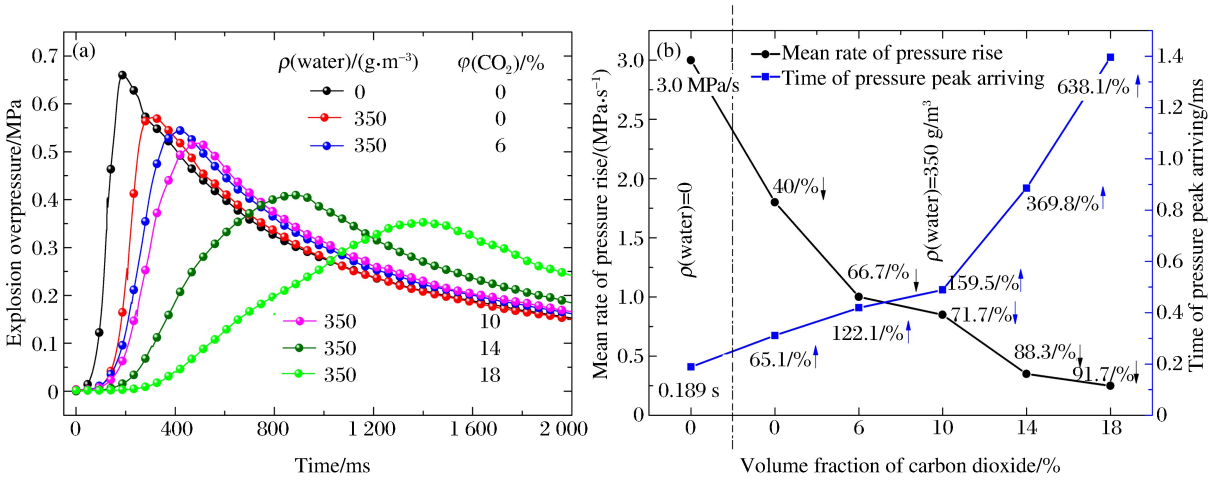


图 8 CO_2-超细水雾对 9.5%甲烷/空气的抑爆效果

Fig. 8 Effect of CO_2-ultrafine water mist on explosion suppression of 9.5% methane/air

3 结　论

通过自行搭建的实验平台研究了 CO_2-超细水雾对 9.5%甲烷/空气初期爆炸特性的影响，主要得到以下结论。

(1) CO_2和超细水雾的浓度是影响其单独抑爆效果的主要原因，且要达到理想的抑爆水平，抑爆剂的使用浓度要求很高，且超细水雾质量浓度不足时有促爆作用，只有当超细水雾质量浓度充足时才会有效抑制甲烷爆炸。

(2) CO_2和超细水雾共同作用时对爆炸初期火焰传播有显著影响，火焰胞状面逐渐变大，数量逐渐减小，在加入 10%CO_2后胞状面消失，同时火焰亮度变暗，体现出二者共同作用时能够降低火焰不稳定性，抑制少量超细水雾诱发的抑爆不稳定现象。

(3) CO_2和超细水雾共同作用时，明显降低了球形火焰传播速度、甲烷爆炸超压峰值和平均压升速率，推迟超压峰值来临时间，有助于抑制爆炸初期的火焰加速。

参考文献：

[1] 郑立刚，苏洋，李刚，等. 点火位置对氢气/甲烷/空气预混气体爆燃特性的影响[J]. 化工学报，2017，68(12)：4874-4881. DOI：10.11949/j.issn.0438-1157.20170369.
ZHENG Ligang, SU Yang, LI Gang, et al. Effect of ignition position on deflagration characteristics of premixed hydrogen/methane/air[J]. CIESC Journal, 2017, 68(12): 4874-4881. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170369.

[2] SCHWER D A, KAILASANATH K. Numerical simulations of the mitigation of unconfined explosions using water-mist[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2361-2369. DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.145.

[3] ANANTH R, WILLAUER H D, FARLEY J P, et al. Effects of fine water mist on a confined blast[J]. Fire Technology, 2012, 48(3): 641-675. DOI: 10.1007/s10694-010-0156-y.

[4] HOLBORN P G, BATTERSBY P, INGRAM J M, et al. Modelling the mitigation of lean hydrogen deflagrations in a vented cylindrical rig with water fog[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(20): 15406-15422. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.131.

[5] LENTATI A M, CHELLIAH H K. Physical, thermal, and chemical effects of fine-water droplets in extinguishing counterflow diffusion flames[J]. Symposium on Combustion, 1998, 27(2): 2839-2846. DOI: 10.1016/S0082-0784(98)80142-2.

[6] 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. DOI:10.1016/j.combustflame.2014.11.038.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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):3741-3487. DOI:10.1016/j.ijhydene.2012.12.134.

[10] 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):103-111. DOI:10.1016/j.combustflame.2005.07.003.

[11] BOECK L R, KINK A, OEZDIN D, et al. Influence of water mist on flame acceleration, DDT and detonation in H_2-air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,40(21):6995-7004. DOI:10.1016/j.ijhydene.2015.03.129.

[12] 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.

[13] INGRAM J M, AVERILL A F, BATTERSBY P N, et al. Suppression of hydrogen-oxygen-nitrogen explosions by fine water mist: Part 1. Burning velocity[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(24):19250-19257. DOI:10.1016/j.ijhydene.2012.09.092.

[14] VOLLMER K G, ETTNER F, SATTELMAYER T. Deflagration-to-detonation transition in hydrogen/air mixtures with a concentration gradient[J]. Combustion Science and Technology, 2012,184(10/11):1903-1915. DOI:10.1080/00102202.2012.690652.

[15] GIERAS M. Flame acceleration due to water droplets action[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008,21(4):472-477. DOI:10.1016/j.jlp.2008.03.004.

[16] 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:10.13225/j.cnki.jccs.2011.03.025.
YU Minggao, AN An, YOU Hao. Experimental study on inhibiting the gas explosion by water spray in tube[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(3):417-422. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2011.03.025.

[17] 曹兴岩，任婧杰，周一卉，等. 超细水雾增强与抑制甲烷/空气爆炸的机理分析[J]. 煤炭学报，2016,41(7):1711-1719. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1726.
CAO Xingyan, REN Jingjie, ZHOU Yihui, et al. Analysis on the enhancement and suppression of methane/air explosions by ultrafine water mist[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(7):1711-1719. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1726.

[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] 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.

[20] CHELLIAH H K, LAZZARINI A K, WANIGARATHNE P C, et al. Inhibition of premixed and non-premixed flames with fine droplets of water and solutions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002,29(1):369-376. DOI:10.1016/S1540-7489(02)80049-9.

[21] 暴秀超，刘福水，孙作宇. 预混火焰胞状不稳定性研究[J]. 西华大学学报：自然科学版，2014,33(1):79-83. DOI:10.3969/j.issn.1673-159X.2014.01.019.

BAO Xiuchao, LIU Fushui, SUN Zuoyu. Study on instability of outwardly propagating spherical premixed flame [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2014,33(1):79-83. DOI:10.3969/j.issn.1673-159X.2014.01.019.

[22] 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,2013:35-37.

[23] 暴秀超,刘福水,张正芳.不同初始压力下氢气燃烧的胞状不稳定性及自加速性[J].燃烧科学与技术,2014,20(1):38-43. DOI:10.11715/rskxjs.R201307020.
BAO Xiuchao, LIU Fushui, ZHANG Zhengfang. Cellular instability and self-acceleration of hydrogen combustionat various initial pressure[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014,20(1):38-43. DOI:10.11715/rskxjs.R201307020.

Effect of CO_2-ultrafine water mist on initial explosion characteristics of CH_4/Air

PEI Bei[1], WEI Shuangming[1], CHEN Liwei[1], PAN Rongkun[1], WANG Yan[1], YU Minggao[2], LI Jie[1]

(1. *The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454003, *Henan, China*;
2. *State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics Control, Chongqing University, Chongqing* 400044, *China*)

Abstract: In order to study the effect of CO_2 and ultrafine water mist on the initial 9.5% methane/air explosion characteristics, a high speed schlieren system and a constant volume combustion bomb were used to study the 9.5% methane/air explosion characteristics. By changing the dilution volume fraction of CO_2 and mass concentration of ultrafine water mist respectively, the change rules of flame propagation speed and explosion overpressure were analyzed under two separate and combined actions. The results show that the ultrafine water mist with a mass concentration of 58.3 g/m^3 enhanced the instability of the flame and accelerated flame acceleration and explosion overpressure. This indicates that the insufficiency of the ultrafine water mist can produce detonation promotion, and the methane explosion will be suppressed only when the ultrafine water mist is sufficient. When CO_2 and ultrafine water mist act together, it can avoid the explosion phenomenon caused by ultrafine water mist, weaken the instability of spherical flame significantly, reduce the propagation velocity of the spherical flame, decrease the explosion overpressure and the mean rate of pressure rise, and delay the arrival time of the overpressure peak. This study can provide a guidance for the prevention of methane explosion.

Keywords: carbon dioxide; ultrafine water mist; methane/air; initial explosion characteristics

(责任编辑　丁　峰)