

# CO<sub>2</sub>和细水雾对地下变电站变压器火灾抑制作用研究

杨迎昕<sup>1</sup>, 焦一飞<sup>1</sup>, 曾文慧<sup>1</sup>, 陈中国<sup>1</sup>, 米红甫<sup>2</sup>, 罗楠<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;

2. 重庆科技大学安全工程学院, 重庆 401331)

**摘要:**为了研究CO<sub>2</sub>和细水雾对地下变电站变压器油火灾爆炸的抑制作用及其化学动力学机理,利用实验和Chemkin软件数值模拟研究了不同体积分数的细水雾和CO<sub>2</sub>对化学当量比条件下20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air混合物爆炸的影响。实验和模拟结果表明:细水雾对H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air混合物的火焰结构和爆炸压力的抑制作用随着细水雾体积分数的增加而愈发明显;细水雾蒸发产生的水蒸气分子和CO<sub>2</sub>在反应体系中主要起稳定的第三体作用,从而减缓了爆炸链式反应的发展。另外,CO<sub>2</sub>是CH<sub>4</sub>氧化反应的主要产物,加入CO<sub>2</sub>会削弱甲烷氧化的基元反应;反应体系中加入细水雾会通过降低基元反应温度敏感性来抑制反应体系升温,并且加入CO<sub>2</sub>会促进消耗·H自由基的基元反应发生。这也是CO<sub>2</sub>和细水雾共同作用抑制效果优于细水雾单独作用的原因。以上研究结果可为地下变电站变压器油火灾爆炸防治技术的发展提供理论依据。

**关键词:**地下变电站; CO<sub>2</sub>; 细水雾; H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合物; 抑制作用

中图分类号: X 932 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)03-0087-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240316

## Research on Suppression Effect of CO<sub>2</sub> and Water Mist on Transformer Fire in Underground Substation

YANG Yingxin<sup>1</sup>, JIAO Yifei<sup>1</sup>, ZENG Wenhui<sup>1</sup>, CHEN Zhongguo<sup>1</sup>, MI Hongfu<sup>2</sup>, LUO Nan<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. College of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** In order to study the suppression effect of CO<sub>2</sub> and water mist on fire and explosion of transformer oil in underground substation and its chemical kinetic mechanism, the influence of water mist and CO<sub>2</sub> with different volume fractions on the explosion of 20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air mixture at stoichiometric ratio is studied by using experiments and Chemkin numerical simulations. Experimental and simulation results show that: the suppression effect on flame structure and explosion pressure of H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air mixture is more obvious with the increase of volume fraction of water mist. Water vapor molecules produced by evaporation of water mist and CO<sub>2</sub> in the reaction system mainly play a stable role as a third body, thus slowing down the development of explosion chain reaction. In addition, since CO<sub>2</sub> is the main product of methane oxidation reactions, the addition of CO<sub>2</sub> will weaken the elementary reaction of methane oxidation. The addition of water mist to reaction system will inhibit the heating of reaction system through reducing the temperature sensitivity of elementary reaction, and the addition of CO<sub>2</sub> will promote the generation of elementary reaction to consume ·H radicals. This is the reason why the combined suppression effect of CO<sub>2</sub> and water mist is better than that of water mist alone. The above results can provide a theoretical basis for the development of prevention technologies for fire and explosion of transformer oil in underground substations.

**Key words:** underground substation; CO<sub>2</sub>; water mist; hydrogen-methane mixture explosion; suppression effect

## 0 引言

随着城市经济的发展,电力需求也在持续增长,地下变电站作为重要的基础设施已然成为城市电力供应的选择之一<sup>[1-2]</sup>。地下变电站不同于地面变电站,其面临的设备安全、环境保护等方面的安全风险问题成为许多电力公司的新难题。其中,布置于地下的变压器等含油电气设备引发的地下变电站火灾风险受到重点关注<sup>[3]</sup>。地下变电站内部环境的温度变化是引发变压器发生火灾爆炸的事故主要原因之一<sup>[4]</sup>,变压器油因温度变化燃烧或裂解气化产生可燃小分子气体,如  $H_2$ 、 $CH_4$  等<sup>[5-6]</sup>,造成变压器油箱内部压力急剧上升,从而引发爆炸,可燃小分子气体又将会进一步扩大地下变电站火灾事故后果。因此,研究抑制  $H_2$ - $CH_4$  混合物爆炸火焰清洁高效的抑爆技术,对减缓和防止地下变电站变压器爆炸,降低地下变电站火灾事故风险具有重要的意义。

在众多抑爆介质中,惰性气体抑爆受到了较多学者的关注。文献[7]通过实验研究了  $CO_2$  和  $N_2$  对  $H_2$ - $CO$  混合物爆炸下限的影响,结果表明  $CO_2$  的影响效果更加显著。文献[8]利用 20 L 标准爆炸容器研究了 ABC 干粉与  $CO_2$  对  $CH_4$ -air 爆炸特性的影响,研究结果表明 ABC 干粉与  $CO_2$  协同作用时抑制效果优于两者单独作用。文献[9]通过实验进行了  $CO_2$  和  $N_2$  抑制  $CH_4$ -air 爆炸研究,结果表明  $CO_2$  的抑制效果明显优于  $N_2$ 。文献[10]通过实验和数值模拟得出  $CO_2$  或  $N_2$  稀释系数的增加会导致滞燃期的增加,并且同样得出  $CO_2$  对  $CH_4$ -air 混合物爆炸的抑制效果优于  $N_2$ 。文献[11]通过实验和数值模拟相结合的方法对  $CO_2$  抑制  $CH_4$ -air 爆炸的化学反应动力学过程进行了详细研究,结果表明  $CO_2$  的抑爆主要是稀释了可燃反应物和  $O_2$  的浓度以及参与三元碰撞减少活化分子的量。

细水雾因其具有经济、环保、适用范围广等优点,同样作为抑爆介质受到国内外学者的广泛关注。文献[12]通过实验研究了水雾粒径对抑爆效果的影响,结果表明水雾粒径越小抑制效果越好。文献[13]研究得出细水雾能有效降低  $CH_4$ -air 爆炸火焰的传播速度和温度,其抑制效果主要通过细水雾蒸发吸热的方式实现。文献[14]通过 CFD 数值模拟方法得出超细水雾能够更好吸收压力波的能量,

使压力波由激波减弱为压缩波。文献[15]通过实验对超细水雾抑制  $CH_4$ -air 爆炸特性进行研究,结果表明随着超细水雾体积分数的增加, $CH_4$ -air 爆炸火焰的“郁金香”典型火焰构型出现时间明显推迟,超细水雾蒸发产生的水蒸气可以诱发火焰固有不稳定性。

国内外诸多学者在抑制可燃气体爆炸方面做了大量的研究工作,但主要集中在单独进行气体或细水雾方面,同时也缺少对  $H_2$ - $CH_4$  混合物爆炸的抑爆介质研究。下面通过自主搭建的可视化  $H_2$ - $CH_4$  抑爆实验平台,开展细水雾单独作用和  $CO_2$  与细水雾共同作用  $H_2$ - $CH_4$  混合物爆炸的实验以及模拟研究。重点分析抑制作用下  $H_2$ - $CH_4$  混合物爆炸的压力、火焰传播、温度敏感性和关键自由基生成速率等参数的变化规律,探讨  $CO_2$  和细水雾对  $H_2$ - $CH_4$  混合物爆炸的抑制机理,以期探索抑制  $H_2$ - $CH_4$  混合物爆炸的新方法。

## 1 实验与模拟设计

### 1.1 实验装置及工况

所采用的  $CO_2$ -细水雾抑制  $H_2$ - $CH_4$  爆炸的封闭可视化实验平台如图 1 所示,主要由实验腔体、气体分配系统、高频脉冲点火系统、高速摄像系统、高频压力采集系统、细水雾发生和输送系统等 6 部分组成。

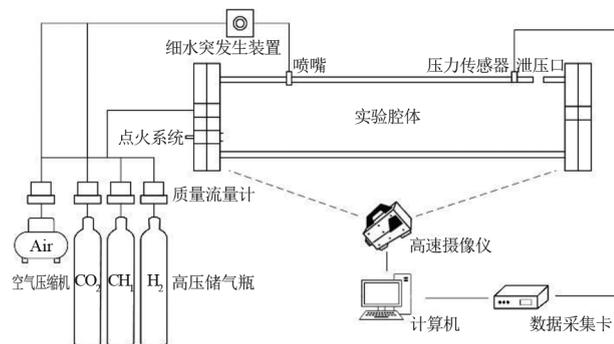


图 1 实验装置

1) 实验腔体为  $1000\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的横向聚甲基丙烯酸甲酯管,有效容积为 10 L,右端泄压口位于距点火装置右侧 90.5 cm 处,由 0.05 mm 聚四氟乙烯薄膜密封以起到在爆炸时破裂泄压作用。

2) 气体分配系统由  $CH_4$  气瓶、 $H_2$  气瓶、 $CO_2$  气瓶、空气压缩机和 4 个气体质量流量计组成, $CH_4$ 、

H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 的纯度为 99.99%。

3) 高频脉冲点火系统利用电火花触发预混气体爆炸。

4) 高速摄像机系统由高速摄像机和 Phantom camera control (PCC) 软件控制的计算机组成,采集频率为 4000 帧/s,以准确捕捉整个火焰传播过程。

5) 压力采集系统由数据采集模块和压力传感器组成,压力传感器精度为 0.002 MPa,量程为 0~2 MPa,采样频率为 5000 Hz,安装位置距点火装置 87.5 cm。

6) 细水雾发送和输送系统主要由超声波雾化头、细水雾储存管道等组成。喷嘴使用超声波空气雾化喷嘴,雾化形状为圆锥形,可生成粒径为 25~30 μm 的细水雾。喷头安装位置距点火装置 37.5 cm,使用空气或 CO<sub>2</sub> 驱动将细水雾送入实验腔体内。

实验主要研究细水雾单独作用和细水雾与 CO<sub>2</sub> 共同作用化学计量比条件下,20% H<sub>2</sub> 体积分数的 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air 混合物爆炸的抑制效果。H<sub>2</sub> 的体积分数 ( $X_{H_2}$ ) 由式(1)定义<sup>[16]</sup>。

$$X_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2} + V_{CH_4}} \quad (1)$$

式中, $V_{H_2}$  和  $V_{CH_4}$  分别为混合燃料中 H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的体积分数。

因此,实验工况主要分为 3 组:1) 化学计量比 20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物,即 8.8% CH<sub>4</sub>+2.2% H<sub>2</sub>;2) 不同体积分数的细水雾和 20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物;3) 不同体积分数的细水雾和 CO<sub>2</sub> 与 20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物。实验工况设定详见表 1,每个工况至少进行 3 次重复实验,以确保实验结果的准确性。

表 1 实验工况的设定

工况序号	参数	工况序号	参数
A	8.8% CH <sub>4</sub> +2.2% H <sub>2</sub>	C1	10% 细水雾+10% CO <sub>2</sub>
B1	10% 细水雾	C2	20% 细水雾+20% CO <sub>2</sub>
B2	20% 细水雾	C3	30% 细水雾+30% CO <sub>2</sub>
B3	30% 细水雾		

通过通入大于 4 倍管道体积的空气,清除管道内的残余气体。利用质量流量控制器通入 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air 和 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air 预混气体;同时,细水雾发生和输送装置将产生的细水雾输送到实验腔体中。待实验腔体内混合物静置 10 s 后,使用电火花点火器点燃混合物。各工况点火结果如图 2 所示。

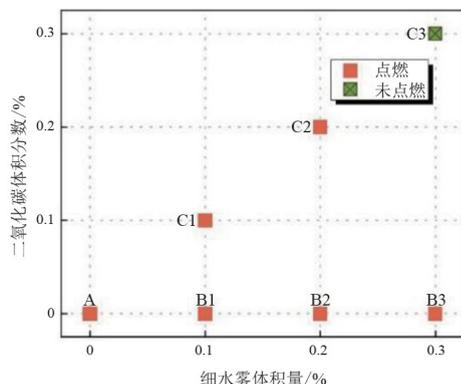


图 2 不同体积分数细水雾和 CO<sub>2</sub> 的 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air 混合物点火结果

## 1.2 数值模拟方法

爆炸是在瞬间完成的反应,目前的研究主要侧重于化学反应,忽略了流场对爆炸特性的影响<sup>[17]</sup>。因此,反应器模型选择零维封闭均相绝热反应器模型,反应温度设定为 1300 K。文献[18]通过对比 GRI Mech 3.0 和 FFCM-1 两种主流天然气燃烧化学反应机理,研究得出这两种反应机理计算 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物爆炸滞燃期的结果相近,均适用于 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合气体爆炸特性研究。由于 GRI Mech 3.0 在 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合气体燃烧性质方面研究得到了广泛验证<sup>[19]</sup>,所以采用 GRI Mech 3.0 机理进行后续研究。GRI Mech 3.0 机理包括 325 个基元反应和 53 种反应物质。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 爆炸压力

图 3 为 H<sub>2</sub> 体积分数 20% 的化学当量比条件下,不同体积分数细水雾单独作用和不同体积分数 CO<sub>2</sub> 与细水雾共同作用对 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合气体爆炸压力的影响。由图 3 可见,点火后爆炸压力开始上升直至达到最大爆炸压力。在爆炸压力上升过程中,由于火焰锋面在反应过程中完全接触爆炸管道壁面,反应能量通过壁面接触损失了一部分,从而致使爆炸压力在到达最大爆炸压力过程中出现轻微波动<sup>[20]</sup>。然后,在开尔文-亥姆霍兹 (Kelvin-Helmholtz) 不稳定性 and 泄压口牵引作用的共同作用下,爆炸压力急剧下降<sup>[21]</sup>。在冲击波通过泄压口后,管道内的反应仍在进行,不完全反应物剧烈燃烧甚至爆炸,能量积聚,使爆炸压力再次迅速上升达到第二压力峰值。在反应物完全消耗之后,爆炸压力相应地降低。如

图 3 所示,在不添加抑制剂的情况下, $H_2-CH_4$  混合物的最大爆炸压力为 29.92 kPa。当加入体积分数分别为 10%、20%、30% 的细水雾后,最大爆炸压力分别降低了 24.33%、38.00%、50.97%,细水雾对  $H_2-CH_4$  混合物爆炸有显著抑制作用并随着细水雾体积分数增加抑制作用更加明显。当  $CO_2$  同细水雾共同作用于  $H_2-CH_4$  混合物,体积分数分别为 10%、20% 的  $CO_2$  和细水雾使得最大爆炸压力分别下降 34.09%、53.54%,达到最大爆炸压力的时间也出现延迟。可以看出,细水雾单独作用和细水雾与  $CO_2$  共同作用都能很大程度上缓解化学当量比情况下 20%  $H_2-CH_4$  混合气体爆炸压力,并且共同作用效果优于细水雾单独作用。

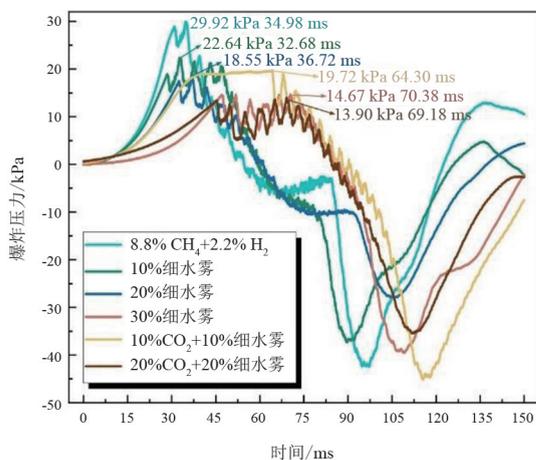


图 3  $CO_2$  和细水雾对  $H_2-CH_4$  爆炸压力的影响

## 2.2 爆炸火焰

细水雾和  $CO_2$  的阻燃效果还表现在对火焰结构的变化上,图 4 展示了不同工况下化学当量比 20%  $H_2-CH_4$  混合物爆炸的火焰传播过程。

由图 4(a)至(d)可以看出,随着细水雾体积分数的增加,“球形”“指形”“平面”和“郁金香”火焰的出现时刻明显延迟。在 20% 体积分数细水雾条件下,“平面”和“郁金香”火焰出现的时间比未添加细水雾的火焰分别增加了 32 ms 和 55 ms,但在火焰传播过程中仍呈现出“球形”“指形”“平面”“郁金香”4 种典型火焰结构变化。当加入 30% 体积分数细水雾后,“平面”和“郁金香”火焰消失,细水雾对火焰结构的影响更为显著。

从图 4(a)和(e)可以看出,加入 10% 体积分数  $CO_2$  和 10% 体积分数细水雾同样使得  $H_2-CH_4$  混合物出现“平面”和“郁金香”火焰的时间大大延迟,分别增加了 51 ms 和 105 ms。当加入 20% 体积分数

$CO_2$  和 20% 体积分数细水雾后,“郁金香”火焰消失;在火焰传播的后期,火焰只呈现出“平面”结构。

对比图 4(c)和(f)可知,20% 体积分数细水雾对  $H_2-CH_4$  火焰传播抑制效果明显,且加入 20% 体积分数  $CO_2$  后能获得优于单独加入 20% 体积分数细水雾的抑制效果。

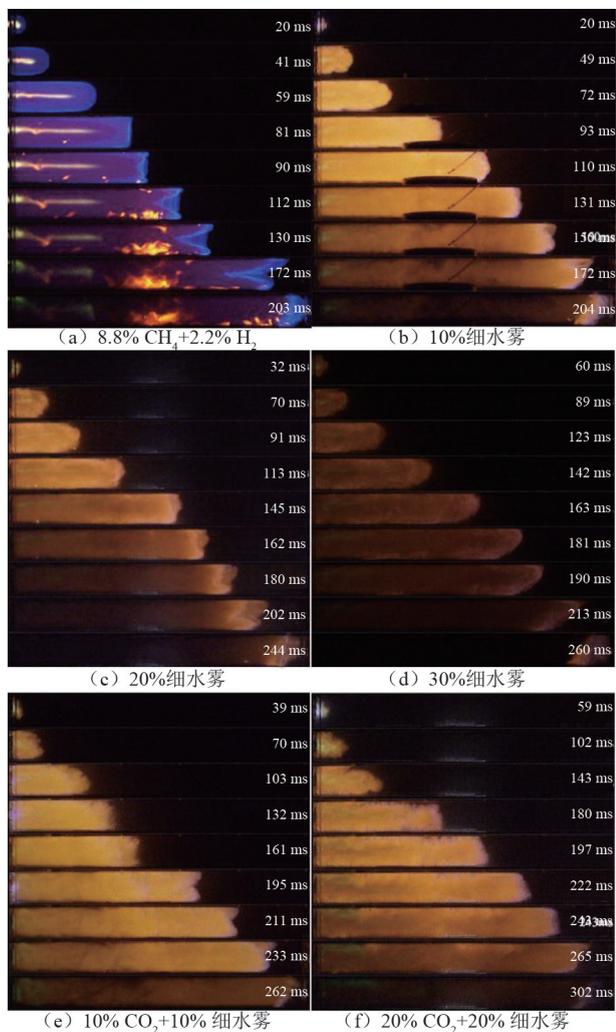


图 4 不同条件下  $H_2-CH_4$  爆炸火焰的发展变化

## 3 数值模拟结果

### 3.1 温度敏感性分析

能量的瞬时释放是爆炸过程中环境压力升高的本质原因,而反应体系温度的变化是能量释放的具体表现<sup>[22]</sup>。因此,对各工况条件下基元反应的温度敏感性进行了研究。细水雾单独作用  $H_2-CH_4$  混合物爆炸基元反应的温度敏感性如图 5 所示, $CO_2$  和细水雾共同作用  $H_2-CH_4$  混合物爆炸基元反应的温度敏感性如图 6 所示。正的温度敏感性系数表示该

反应促进反应体系温度上升,负的温度敏感性系数表示该反应抑制反应体系温度上升。表 2 列出了各工况下具有高温敏感性系数的基元反应。

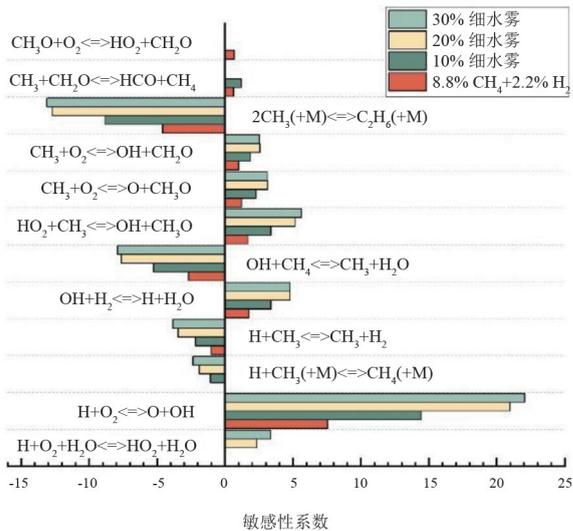


图 5 不同体积分数细水雾作用 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air 爆炸基元反应的温度敏感性

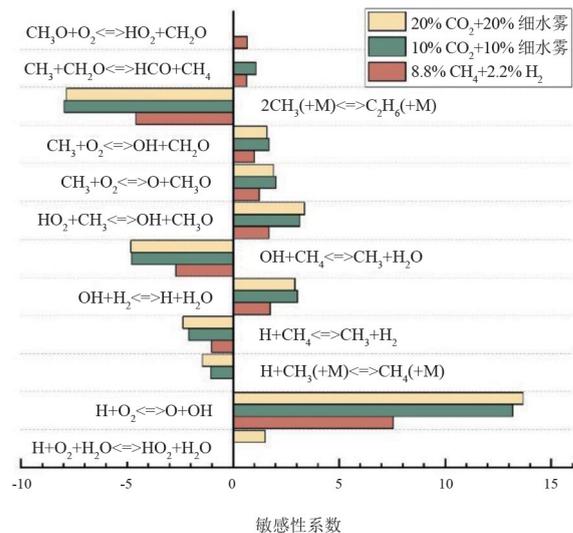


图 6 不同体积分数 CO<sub>2</sub> 和细水雾作用 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air 爆炸基元反应的温度敏感性

3.1.1 细水雾对 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物爆炸反应的影响

如图 5 所示,从化学抑制角度看,细水雾的加入对化学当量比 20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物爆炸基元反应的温度敏感性有显著影响。爆炸发生后,细水雾蒸发产生水蒸气,不仅作为第三体稀释反应物浓度,减少反应物与活性自由基之间的碰撞,还在高温下分解生成 ·H 和 ·OH,这增加了 ·H 同 O<sub>2</sub> 反应释放热量的能力。加入细水雾显著促进了 R2 和 R10 的发生,R10 对抑制反应体系升温贡献最大,而 R2 对促进反应体系升温贡献最大,且随着细水雾体积分数

表 2 高温敏感性系数的基元反应

反应序号	参数
R1	H+O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O<=>HO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O
R2	H+O <sub>2</sub> <=>O+OH
R3	H+CH <sub>3</sub> (+M)<=>CH <sub>4</sub> (+M)
R4	H+CH <sub>4</sub> <=>CH <sub>3</sub> +H <sub>2</sub>
R5	OH+H <sub>2</sub> <=>H+H <sub>2</sub> O
R6	OH+CH <sub>4</sub> <=>CH <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O
R7	HO <sub>2</sub> +CH <sub>3</sub> <=>OH+CH <sub>3</sub> O
R8	CH <sub>3</sub> +O <sub>2</sub> <=>O+CH <sub>3</sub> O
R9	CH <sub>3</sub> +O <sub>2</sub> <=>OH+CH <sub>2</sub> O
R10	2CH <sub>3</sub> (+M)<=>C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (+M)
R11	CH <sub>3</sub> +CH <sub>2</sub> O<=>HCO+CH <sub>4</sub>
R12	CH <sub>3</sub> O+O <sub>2</sub> <=>HO <sub>2</sub> +CH <sub>2</sub> O

的增加,这种促进作用更加明显。同时,由于 CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub> 含量不变而 ·H 同 O<sub>2</sub> 反应的能力增强,CH<sub>4</sub> 氧化基元反应 R8、R9 都被减弱。此外,细水雾的加入使得 R11、R12 等反应得到抑制,细水雾稀释了混合气体中 O<sub>2</sub> 和活性自由基的浓度。而水蒸气分解生成的 ·H 和 ·OH 使得 R1 成为新增促进反应体系升温的反应,也使得 R3 成为新增抑制反应体系升温的反应。总的来看,细水雾的化学抑制作用不及其物理吸热和物理稀释作用明显且有效。

3.1.2 CO<sub>2</sub> 和细水雾对 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物爆炸反应的影响

由于 CO<sub>2</sub> 是惰性气体,不直接参与爆炸反应,但 CO<sub>2</sub> 作为反应体系中稳定的第三体,降低了活性自由基之间的碰撞概率,在一定程度上降低了反应速率。对比图 5 和图 6 可以看出,加入 CO<sub>2</sub> 之后 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物爆炸基元反应温度敏感性都有降低。相比较于不加 CO<sub>2</sub> 的工况,CO<sub>2</sub> 的加入导致反应体系变得贫氧,从而减弱了涉及 O<sub>2</sub> 的反应,如 R2、R8、R9。此外,向 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 反应体系中加入 CO<sub>2</sub> 会促进反应 CO+OH<=>CO<sub>2</sub>+H 逆向进行<sup>[23]</sup>。CO<sub>2</sub> 的加入消耗部分 ·H,从而抑制了涉及 ·H 的反应,如 R2。因此,CO<sub>2</sub> 和细水雾共同作用 H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 混合物爆炸的抑制效果优于细水雾单独作用的抑制效果。

3.2 关键自由基分析

如第 3.1 节所述,R2 对反应体系的升温起决定性作用,并且参与此基元反应的 ·H、·O 和 ·OH 是决定烃类燃料爆炸链式反应增长速度的关键自由

基,并决定爆炸强度<sup>[24]</sup>。因此,分析这 3 种活性自由基的生成速率十分重要。图 7、图 8 和图 9 分别展示了各工况下  $\cdot\text{H}$ 、 $\cdot\text{O}$  和  $\cdot\text{OH}$  的生成速率。如图 7 所示,随着细水雾体积分数的增加,  $\cdot\text{H}$  的总生成速率显著降低,并且相同体积分数的细水雾工况在加入  $\text{CO}_2$  后,  $\cdot\text{H}$  的总生成速率降低得更加显著。细水雾蒸发形成的水蒸气和  $\text{CO}_2$  在反应体系中作为稳定的第三体,降低了自由基与自由基、自由基与可燃气体分子、可燃气体分子与氧分子的碰撞概率,进而降低了反应速率。因此,随着  $\text{CO}_2$  和细水雾添加量的增加,  $\cdot\text{H}$  的总生成速率降低。通过图 8 和图 9 可以看出,不同体积分数的细水雾和不同体积分数的  $\text{CO}_2$  对  $\cdot\text{O}$  和  $\cdot\text{OH}$  总生成速率具有相同的影响规律。此外,20%  $\text{CO}_2$  和 20% 细水雾共同作用对  $\cdot\text{O}$  和  $\cdot\text{OH}$  总生成速率的抑制效果优于 30% 细水雾单独作用的抑制效果。

图 10 和图 11 分别为细水雾- $\text{H}_2$ - $\text{CH}_4$  混合物和  $\text{CO}_2$ -细水雾- $\text{H}_2$ - $\text{CH}_4$  混合物爆炸反应中  $\cdot\text{H}$  的主要来源和去向。表 3 列出了 20% 体积分数的细水雾以及 20% 体积分数的细水雾和  $\text{CO}_2$  条件下,生成或消

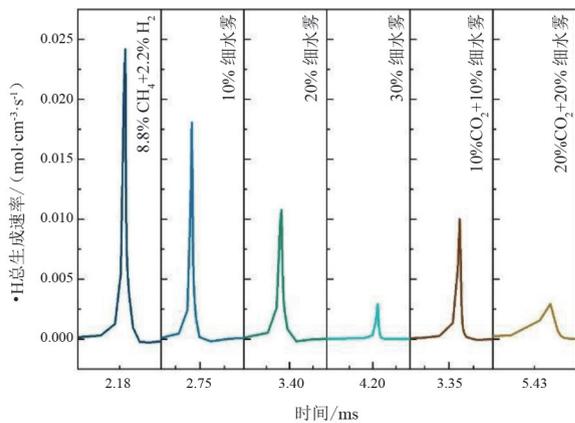


图 7  $\cdot\text{H}$  的总生成速率

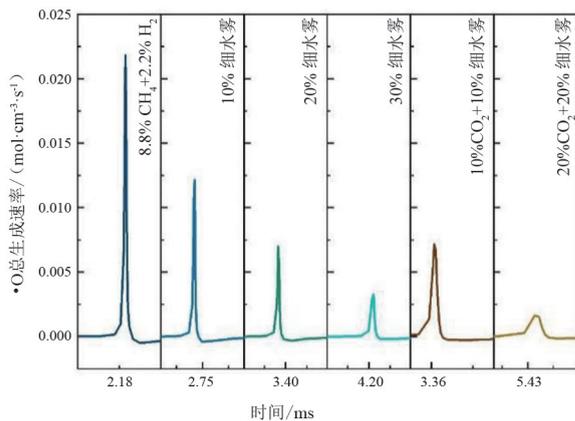


图 8  $\cdot\text{O}$  的总生成速率

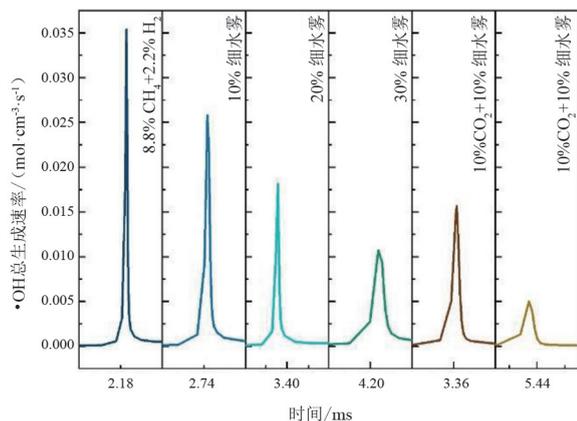


图 9  $\cdot\text{OH}$  的总生成速率

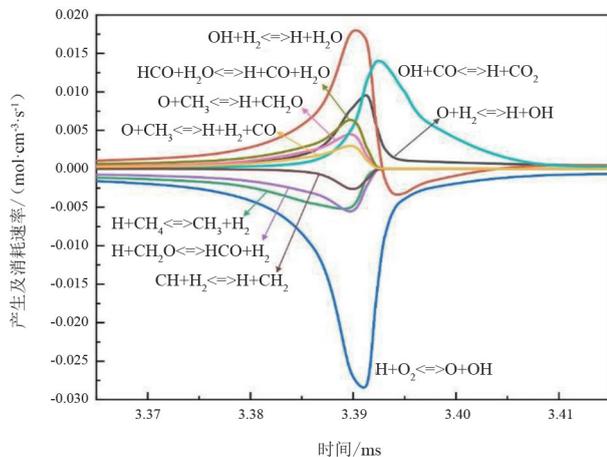


图 10 产生和消耗  $\cdot\text{H}$  的基元反应(20%体积分数的细水雾,20%体积分数的  $\text{H}_2$ )

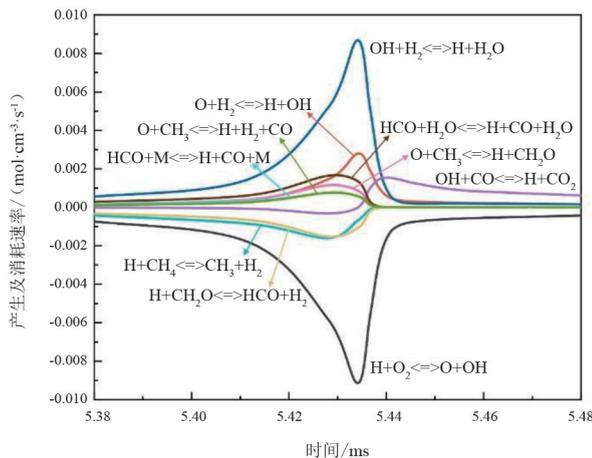


图 11 产生和消耗  $\cdot\text{H}$  的基元反应(20%体积分数的细水雾,20%体积分数的  $\text{CO}_2$ ,20%体积分数的  $\text{H}_2$ )

耗  $\cdot\text{H}$  速率高的基元反应。由图 10 得出, M1、M2 和 M3 是  $\cdot\text{H}$  的主要来源, M10 是消耗  $\cdot\text{H}$  的主要基元反应。对比图 10 和图 11, 加入  $\text{CO}_2$  后, M2 对  $\cdot\text{H}$  生成的贡献大幅降低。  $\text{CO}_2$  是 M2 的产物, 增加  $\text{CO}_2$  可以促进反应逆向进行并增加  $\cdot\text{H}$  的消耗。

此外,CO<sub>2</sub>和细水雾共同作用时,·H的生成和消耗速率均降低至细水雾单独作用时的1/2。在CO<sub>2</sub>加入后,反应体系中的O<sub>2</sub>浓度降得更低,·H主要消耗反应M10的反应能力减弱,进而·H的消耗速率也减弱。另一方面,O<sub>2</sub>的还原反应会削弱·OH和·O的形成,从而使得M1和M3的反应能力同样减弱。因此,CO<sub>2</sub>和细水雾共同作用与细水雾单独作用都能使得·H的总生成速率降低,加入CO<sub>2</sub>之后降低得更加明显。

表3 具有较大生成或消耗·H速率的基元反应

反应序号	参数
M1	$\text{OH} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}_2\text{O}$
M2	$\text{OH} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO}_2$
M3	$\text{O} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{OH}$
M4	$\text{HCO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
M5	$\text{O} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$
M6	$\text{O} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}_2 + \text{CO}$
M7	$\text{CH} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2$
M8	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{CH}_3\text{O}$
M9	$\text{H} + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{H}_2$
M10	$\text{H} + \text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}_2$
M11	$\text{H} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{OH}$
M12	$\text{HCO} + \text{M} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO} + \text{M}$

## 4 结论

为探寻抑制地下变电站变压器油引发的火灾爆炸火焰清洁高效的抑制剂,上面研究了细水雾和CO<sub>2</sub>对化学当量比条件20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air混合物爆炸反应的抑制作用及其反应动力学机理,通过实验对不同条件下H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合物的爆炸压力和火焰传播过程进行了研究,并利用Chemkin软件计算了混合物爆炸基元反应的温度敏感性、自由基生成速率等反应动力学参数。

实验数据说明:喷射细水雾和CO<sub>2</sub>体积分数越大,抑爆效果越好,当喷入30%细水雾和30%CO<sub>2</sub>时,火焰完全熄灭。总的来说,细水雾与CO<sub>2</sub>共同作用的抑制效果优于细水雾单独作用。

对数值模拟结果进行分析得出,水蒸气分子和

CO<sub>2</sub>在反应体系中主要作为稳定的第三体,降低了反应率,减缓了爆炸链式反应的链增长。由于CO<sub>2</sub>是CH<sub>4</sub>氧化反应的主要产物,因而加入CO<sub>2</sub>削弱了CH<sub>4</sub>氧化的基元反应。此外,细水雾具有很好的冷却火焰反应区作用,CO<sub>2</sub>具有很好的置换O<sub>2</sub>作用,两者机理互相弥补,可以更大程度降低CH<sub>4</sub>爆炸的强度。

实验和模拟结果表明,CO<sub>2</sub>和细水雾协同作用对化学当量比条件20% H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air混合物爆炸起到很好的抑制作用。因此,气-液两相抑爆剂CO<sub>2</sub>-细水雾有望作为一种地下变电站变压器油火灾爆炸抑爆剂在地下变电站安全运行中提供帮助。

另外,在实际应用中,可将CO<sub>2</sub>作为一种气体动力源驱动细水雾发生装置产生细水雾,既可以满足产生细水雾所需压力要求,还可以增强爆炸空间内CO<sub>2</sub>和细水雾的协同抑爆效果。

## 参考文献

- [1] 夏溢. 城市变电站建设发展现状及趋势探讨[J]. 上海节能, 2020(11):1274-1278.
- [2] 孙国庆, 雷鸣, 李男, 等. 国内地下变电站建设现状与发展趋势[J]. 电力勘测设计, 2020(1):68-73.
- [3] 肖平成, 谭志成, 张涌泉, 等. 我国地下变电站结构研究与应用现状分析[J]. 大众标准化, 2023(17):127-129.
- [4] 郑秋雨, 刘琳, 武保林, 等. 典型电力用油的油气/雾燃爆危险性研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6):849-851.
- [5] 刘小波, 吴花, 封智利. 变压器油闭口闪点测试综述[J]. 江西电力, 2011, 35(5):21-24.
- [6] 钱之银, 陆志浩, 楼其民, 等. 变压器油中溶解气体判断方法综述[J]. 高压电器, 2002, 38(6):34-37.
- [7] 尚融雪, 万嵩, 杨红霞, 等. CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>惰化条件下合成气可燃下限实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(8):1191-1196.
- [8] LUO Z M, WANG T, TIAN Z H, et al. Experimental study on the suppression of gas explosion using the gas-solid suppressant of CO<sub>2</sub>/ABC powder[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014,30:17-23.
- [9] LI M H, XU J C, WANG C J, et al. Thermal and kinetics mechanism of explosion mitigation of methane-air mixture by N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> in a closed compartment[J]. Fuel, 2019, 255:115747.

- [10] ZENG Wen, MA Hongan, LIANG Yuntao, et al. Experimental and modeling study on effects of  $N_2$  and  $CO_2$  on ignition characteristics of methane/air mixture[J]. Journal of Advanced Research, 2015,6(2):189-201.
- [11] 李光英. 受限空间内  $CO_2$  对  $CH_4$  爆炸特性影响研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- [12] 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, 2017,49:791-796.
- [13] SONG Y F, ZHANG Q. Quantitative research on gas explosion inhibition by water mist[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,363:16-25.
- [14] JING Q, WANG D, LIU Q M, et al. Inhibition effect and mechanism of ultra-fine water mist on  $CH_4$ /air detonation: Quantitative research based on CFD technology[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021,148:75-92.
- [15] 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.
- [16] WANG Z H, WENG W B, HE Y, et al. Effect of  $H_2$ /CO ratio and  $N_2$ / $CO_2$  dilution rate on laminar burning velocity of syngas investigated by direct measurement and simulation[J]. Fuel, 2015,141:285-292.
- [17] 肖华华. 管道中氢-空气预混火焰传播动力学实验与数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [18] LUO Z M, ZHOU S Y, WANG T, et al. The weakening effect of the inhibition of  $CO_2$  on the explosion of HCNG with the increase of hydrogen: Experimental and chemical kinetic research[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023,48(82):32179-32190.
- [19] SU B, LUO Z M, WANG T, et al. Chemical kinetic behaviors at the chain initiation stage of  $CH_4$ / $H_2$ /air mixture[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,403:123680.
- [20] 王新. 瓦斯浓度对爆炸传播及瓦斯爆炸诱导煤尘爆炸的影响研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [21] ZHOU N, NI P F, LI X, et al. Experimental study and numerical simulation of the influence of vent conditions on hydrogen explosion characteristics[J]. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2021:116.
- [22] 王星语. 环境友好氢氟烯炔类化合物的灭火性能和机理研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [23] 罗振敏, 康凯.  $CO_2$ 抑制甲烷-空气链式爆炸微观机理的仿真分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(5):42-48.
- [24] 姜海洋, 张国宾.  $CO$ 与 $H_2O$ 抑制瓦斯爆炸的微观反应机理[J]. 煤炭转化, 2019, 42(6):77-87.

#### 作者简介:

杨迎昕(1996),女,硕士,工程师,主要从事输变电工程变电土建、消防专项评审及相关研究工作;

焦一飞(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事输变电工程变电土建、消防专项评审及相关研究工作;

曾文慧(1975),女,高级工程师,主要从事输变电工程电气专业评审及变电站科技项目研究工作;

陈中国(1977),男,硕士,高级工程师,主要从事输变电工程土建专业技术监督、变电土建、消防专项评审及相关研究工作;

米红甫(1986),男,博士,副教授,主要从事地下空间火灾及油气爆炸安全防护研究;

罗楠(2000),女,硕士研究生,主要从事地下空间火灾及油气爆炸安全防护研究。

(收稿日期:2023-10-20)

(上接第 56 页)

- [13] 吴曼丽,陈力强. 一次东北冷涡天气过程雷电气象潜势条件诊断分析[J]. 气象科技进展, 2019,9(6):95-99.
- [14] 蔡益智,曾庆昌. 雷电灾害预警中多元气象资料的应用分析[J]. 科技与创新, 2022(7):149-151.
- [15] 赵生昊,覃彬全,杜乐. 基于机器学习和单站地面气象要素的雷电临近预警方法[J]. 气象科技, 2022,50(1):121-128.

- [16] 李晨阳,刘锋英,李军,等. 全国矿产地数据库[J]. 中国地质, 2019,46(S2):1-18.
- [17] 陈家宏,张勤,冯万兴,等. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J]. 高电压技术, 2008,34(3):425-431.

#### 作者简介:

孙文成(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事电网生产技术管理工作。

(收稿日期:2023-10-22)