

二氧化碳对电缆火灾抑制机理研究

熊刚 陈俊 李昆晟 米红甫 吴琛
国网重庆市电力公司超高压分公司, 重庆 400039

[摘要] 为了研究二氧化碳对电缆隧道火灾爆炸的抑制作用及其化学动力学机理, 利用实验和 Chemkin 数值模拟研究了不同体积浓度的二氧化碳对当量比条件下 9.5% 甲烷-空气混合物爆炸的影响。实验和模拟结果表明: 随着二氧化碳体积浓度的增加, 对甲烷-空气爆炸火焰和压力的抑制作用越明显; 二氧化碳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, 二氧化碳是 $(OH+CO \rightleftharpoons H+CO_2)$ 的产物, 增加二氧化碳可以促进反应逆向进行并增加 $\cdot H$ 自由基的消耗从而降低反应速率。以上研究结果可为电缆隧道火灾爆炸防治技术的发展提供理论依据。

[关键词] 电缆隧道; 二氧化碳; 甲烷爆炸; 抑制作用

DOI: 10.33142/hst.v6i10.10549

中图分类号: TG172.3

文献标识码: A

Research on the Mechanism of Carbon Dioxide in Suppressing Cable Fire

XIONG Gang, CHEN Jun, LI Kunsheng, MI Hongfu, WU Chen
Ultra High Voltage Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing, 400039, China

Abstract: In order to study the inhibitory effect of carbon dioxide on cable tunnel fire and explosion and its chemical kinetics mechanism, the effect of different volume concentrations of carbon dioxide on the explosion of 9.5% methane air mixture under equivalent ratio conditions was studied using experiments and Chemkin numerical simulations. The experimental and simulation results showed that as the volume concentration of carbon dioxide increased, the inhibitory effect on methane air explosion flame and pressure became more significant; Carbon dioxide mainly plays a stable third body role in the reaction system, thereby slowing down the development of explosive chain reactions; In addition, carbon dioxide is a product of $(OH+CO \rightleftharpoons H+CO_2)$, and increasing carbon dioxide can promote the reverse reaction and increase the consumption of $\cdot H$ free radicals, thereby reducing the reaction rate. The above research results can provide theoretical basis for the development of fire and explosion prevention technology in cable tunnels.

Keywords: cable tunnel; carbon dioxide; methane explosion; inhibitory action

引言

随着城市经济的发展, 电力需求也在持续增长, 城市电力输送逐渐由地上架空线路向地下隧道深入发展。电缆隧道可抵御外界恶劣气候的影响, 极大地提高了城市输电线路维护保养的便利性, 也有效缓解了地面空间紧缺的压力^[1]。

然而, 电缆隧道具有空间封闭性、潜在可燃物较多、火灾扑救难度大等特点^[2-3]。常见的电缆电线护套及绝缘层主要为聚烯烃组成, 发生燃烧时会先变为熔融态或失去水份, 进而炭化并释放出大量可燃气体^[4], 如甲烷、乙烷等, 从而会进一步扩大电缆隧道火灾事故后果。因此, 找到针对电缆隧道的清洁高效的灭火抑爆技术, 对降低地下电缆隧道火灾事故风险, 保护人民的生命财产安全具有重要的意义。

考虑到地下电缆隧道内部管线设备布置复杂、长期无人等情况, 一些研究人员考虑将二氧化碳作为抑制剂运用于电缆隧道火灾的研究中, 二氧化碳具有清洁环保、扩散性好、性价比高以及生产技术成熟等特点, 对此国内外学者进行了大量研究。魏树旺^[5]等通过液态二氧化碳为抑制剂对洞库管路系统的油气爆炸实验, 研究得到二氧化碳对爆炸火焰强度与持续时间抑制效果显著。Maria^[6]等通过两种不同的球形

容器, 改变甲烷与惰性气体的浓度含量的实验, 对最大爆炸压力, 升压速率和爆炸时间的变化, 得到四种气体的惰化性能能力, 依次是二氧化碳>氮气>氩气>氦气。周宁^[7]等采用理论与实验相结合的方式, 对二氧化碳和氮气分别与液化石油气爆炸特性参数抑制分析, 结果表明, 两种气体对液化石油气的抑爆规律基本相似, 但二氧化碳抑爆效果优于氮气。并且当两种气体充入体积分数高于 10% 时, 对最大爆炸压力到达时间有明显延迟作用。王中翊^[8]等通过 Fluent 对液化石油气储罐泄漏扩散模拟得到其分布规律, 并通过改变二氧化碳与氮气浓度比对到达稳定泄漏状态的液化石油气做爆炸模拟, 得到二氧化碳抑制效果最好, 其混合比例次之, 氮气抑制效果最弱。Zeng 等人^[9]通过实验和数值模拟得出二氧化碳或氮气稀释系数的增加会导致滞燃期的增加, 并且同样得出二氧化碳对甲烷-空气混合物爆炸的抑效果优于氮气。李光英^[10]通过实验和数值模拟相结合的方法对二氧化碳抑制甲烷-空气爆炸的化学反应动力学过程进行了详细研究, 结果表明二氧化碳的抑爆主要是稀释了可燃反应物和氧气的浓度以及参与三元碰撞减少活化分子的量。

以上研究表明, 二氧化碳在煤炭化工行业有着广泛的应

用,作为抑制剂有着显著的效果,但是目前针对电缆隧道的场景,该技术的研究还是有所欠缺。因此本文通过自主搭建的可视化甲烷-空气抑爆实验平台,开展二氧化碳作用于甲烷-空气预混气体爆炸的试验和模拟研究。重点分析抑制作用下甲烷-空气预混气体爆炸的压力、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,探讨二氧化碳对甲烷-空气预混气体爆炸的抑制机理,以期针对复杂地形条件下的电缆隧道提出实用性强、效果好的一种的总体灭火抑爆方案。

1 研究方法

本文通过二氧化碳抑制甲烷-空气预混气体爆炸实验平台对不同体积分数的二氧化碳抑制 9.5%CH₄-Air 爆炸进行了实验研究,并测量了爆炸压力和火焰。然后,利用 CHEMKIN-PRO 软件对 9.5%CH₄-Air 混合物,20%CO₂-CH₄-Air 混合物以及 50%CO₂-CH₄-Air 混合物的爆炸链式反应进行数值模拟,得出敏感系数和自由基消耗率等化学动力学参数。文章结合实验研究中获得的爆炸特性和数值模拟研究中计算得出的化学动力学参数,深入分析了二氧化碳对甲烷-空气预混气体爆炸反应的影响机理。

1.1 实验装置

本文采用的二氧化碳-细水雾抑制氢气-甲烷爆炸的封闭可视化实验平台如图 1 所示,主要由实验腔体、配气系统、高频脉冲点火系统、高速摄像系统、高频压力采集系统和输送系统等 5 部分组成。①实验腔体为 1000mm×100mm×100mm 的横向聚甲基丙烯酸甲酯管,有效容积为 10L,右端泄压口位于距点火装置右侧 90.5cm 处,由 0.05mmPTFE 薄膜密封以在爆炸时破裂起到泄压作用。②气体分配系统由甲烷气瓶、二氧化碳气瓶、空气压缩机和三个气体质量流量计组成,甲烷、二氧化碳的纯度为 99.99%。③高频脉冲点火系统采用强电点火方式,点火源位于管道的最左端,电源输入电压 12V,输出电压 400kV,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 Phantom 710L 和 PCC 软件控制的计算机组成,采集频率 4000 帧/s,以准确捕捉整个火焰传播过程。⑤压力采集系统由压力传感器和数据采集模块组成,压力传感器采用 PCB,精度为 0.1%FS,量程 0~2MPa,采样频率为 5000,安装位置距点火装置 87.5cm 处。数据采集模块为 Blast-PRO 型冲击测试仪,实验采取单次采集模式,采集频率为 50kHz,采集时间为 2s,负延时为 10ms。

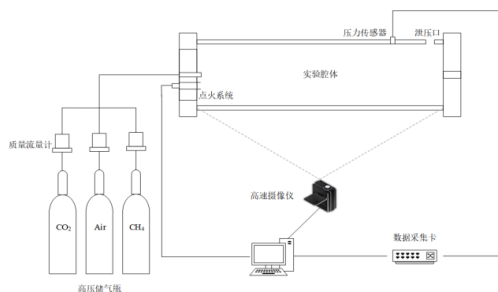


图 1 实验装置

1.2 实验方法

1.2.1 可视化火焰动力学实验测量方法

通过高速摄像机捕捉火焰传播过程中动态变化过程,以获取管道内甲烷-空气预混气体燃爆过程关键火焰行为的重要参数,得到火焰形状和火焰锋面时空演化规律。

1.2.2 冲击波压力传感器测量方法

通过冲击波压力传感器精准采集管道内甲烷-空气预混火焰燃爆过程中压力随时间变化的曲线,分析压力波与火焰之间耦合作用机制。

1.3 实验工况

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甲烷-空气和二氧化碳-甲烷-空气预混气体。待实验腔体内混合物静置 10s 后,使用电火花点火器点燃混合物。具体工况见表 1。

表 1 实验工况的设定

序号	参数	序号	参数
1	9.5%CH ₄	5	40%CO ₂
2	10%CO ₂	6	50%CO ₂
3	20%CO ₂	7	60%CO ₂
4	30%CO ₂		

1.4 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^[11]。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 1300K。Luo 等人^[12]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,研究得出两种反应机理计算氢气-甲烷混合物爆炸滞燃期结果相近,均适用于氢气-甲烷混合气体爆炸特性研究。由于 GRI Mech 3.0 在氢气、甲烷、氢气-甲烷混合气体燃烧性质方面研究得到了广泛验证^[13],本文采用 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 2 是不同体积分数二氧化碳对甲烷-空气预混气体爆炸压力的影响。由图可见,点火后爆炸压力开始上升直至达到最大爆炸压力。由于管内可燃气体被引燃引发剧烈的化学反应,产生的燃烧产物迅速膨胀加速前驱冲击波的形成。随着前驱冲击波向前传播并冲破 PVC 薄膜,释放燃烧产物,管道内的压力逐渐下降,形成第一个压力峰值。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个压力峰值。在反应物完全消耗之后,爆炸压力相应地降低。如图 2 所示,在不添加二氧化碳的情况下,甲烷-空气混合物的最大爆炸压力为 27.05kPa。当加入体积量分别为 10%, 20%, 30%的二氧化碳后,最大爆炸压力分别降低了 2.92%, 8.39%, 10.61%, 而当加入的

二氧化碳体积量上升到 40%，50%，60%后，其最大爆炸压力分别降低了 22.22%，35.16%，65.51%。并且如图所示随着二氧化碳浓度的增加超压到达最大所需时间与最大爆炸压力呈现相似的规律，可以看出二氧化碳对甲烷-空气混合物爆炸有显著抑制作用并且随着二氧化碳浓度的逐步上升抑制效果呈指数级增加。

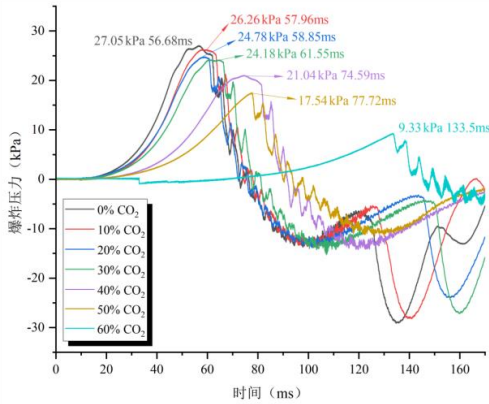


图 2 二氧化碳对甲烷-空气爆炸压力的影响

2.2 爆炸火焰

二氧化碳的阻燃效果还表现在对火焰结构的变化上，图 3 展示了不同工况下化学当量比 9.5%CH₄-Air 混合物爆炸的火焰传播过程。由图 3 (a) - (c) 可以看出，随着二氧化碳体积浓度的增加，“球形”“指形”“平面”和“郁金香”火焰的出现时刻明显延迟。在 20%体积浓度二氧化碳条件下，“平面”火焰和“郁金香”火焰出现的时间比未添加二氧化碳的火焰都增加了 10ms，但在火焰传播过程中仍呈现出“球形”“指形”“平面”“郁金香”四种典型火焰结构变化。从图 3 (d) - 图 (g) 可以看出，“平面”火焰出现的时间相比于图 3(a) 大大延迟，分别增加了 15ms, 20ms, 35ms 和 50ms。在火焰传播的后期，随着火焰进一步传播，火焰瑞利-泰勒不稳定性^[14]增强，形成自上向下倾斜的准平面火焰形态，管道中上沿火焰传播速度快，且始终没有形成“郁金香”火焰。与图 3 (a) 进行对比可以明显看出二氧化碳浓度越高，火焰颜色越暗淡，火焰传播速度越小，二氧化碳对甲烷-空气混合物爆炸有显著抑制作用并且随着二氧化碳浓度的逐步上升抑制效果呈指数级增加，这与上一章节得出的结论相同。

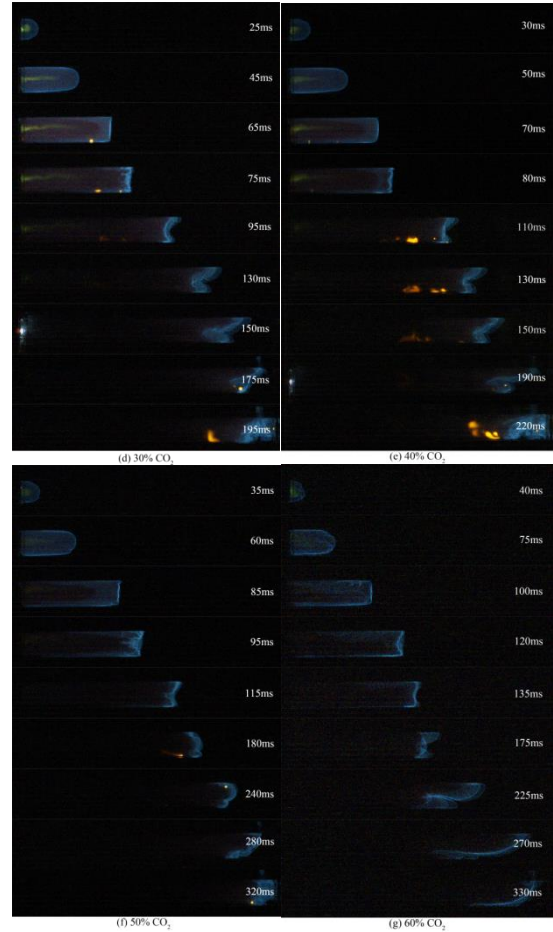
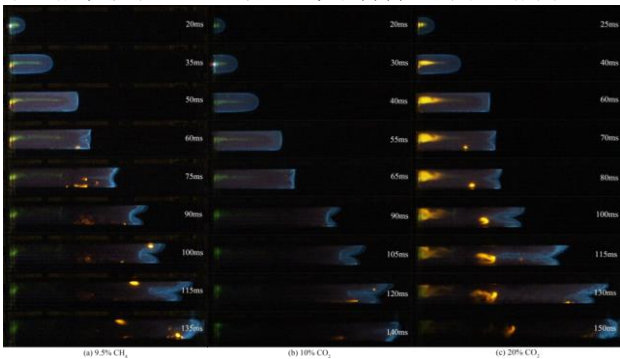


图 3 不同条件下甲烷-空气爆炸火焰的发展变化

3 数值模拟结果

3.1 关键自由基分析

对于甲烷燃爆反应机理已经有很多研究，甲烷爆炸链式反应过程中产生的关键自由基有·H、·O、·OH^[15-17]。图 4 分别展示了各工况下·H 自由基、·O 自由基和·OH 自由基的摩尔浓度。如图 4 所示，随着二氧化碳体积分数的增加，·H 自由基的摩尔浓度逐渐降低。并且不同体积分数二氧化碳对·O 自由基和·OH 自由基的摩尔浓度具有相同的影响规律。

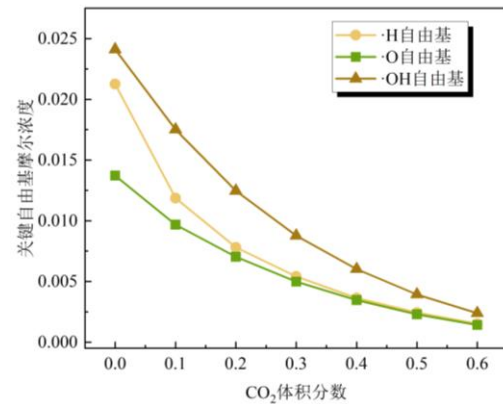


图 4 关键自由基的摩尔浓度随 CO₂ 体积的分数的变化

图5至图7分别为甲烷-空气混合物和二氧化碳-甲烷-空气混合物爆炸反应中·H自由基的主要来源和去向。由图5可以看出, $(OH+H_2 \rightleftharpoons H+H_2O)$ 、 $(OH+CO \rightleftharpoons H+CO_2)$ 和 $(O+H_2 \rightleftharpoons H+OH)$ 是·H自由基的主要来源, $(H+O_2 \rightleftharpoons O+OH)$ 是消耗·H自由基的主要基元反应。对比图6和图7, 加入二氧化碳后, $(OH+CO \rightleftharpoons H+CO_2)$ 从产生·H自由基从转变成消耗·H自由基, 并且随着二氧化碳体积浓度的增加其消耗程度也增加。因为二氧化碳是 $(OH+CO \rightleftharpoons H+CO_2)$ 的产物, 增加二氧化碳可以促进反应逆向进行并增加·H自由基的消耗。在20%体积浓度二氧化碳时,·H自由基的生成和消耗速率均降低至无二氧化碳的1/3。在二氧化碳的体积浓度到50%后, 反应体系中的氧气浓度降得更低,·H自由基主要消耗反应 $(H+O_2 \rightleftharpoons O+OH)$ 的反应能力减弱进而·H自由基的消耗速率也减弱至原先的1/12。另一方面, 氧气的还原反应会削弱·OH和·O自由基的形成, 从而使得 $(OH+H_2 \rightleftharpoons H+H_2O)$ 和 $(O+H_2 \rightleftharpoons H+OH)$ 的反应能力同样减弱。因此, 二氧化碳会使得·H自由基的总生成速率降低, 并且随着二氧化碳的体积分数的增加使其降低得更加明显。

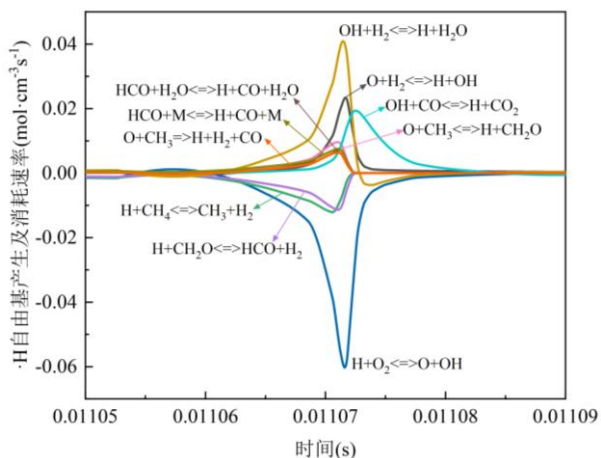


图5 产生和消耗·H自由基的基元反应(9.5%CH₄)

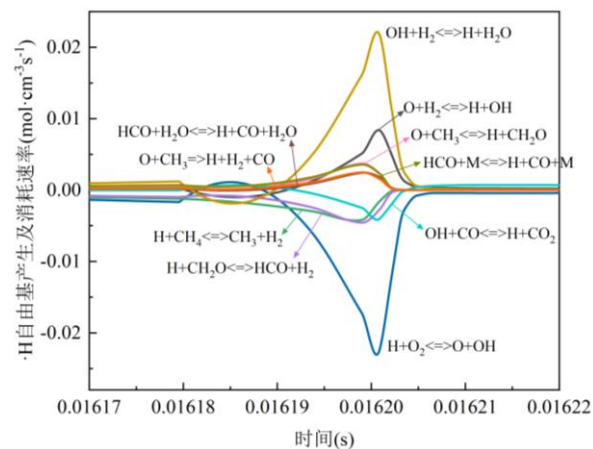


图6 产生和消耗·H自由基的基元反应(20%CO₂)

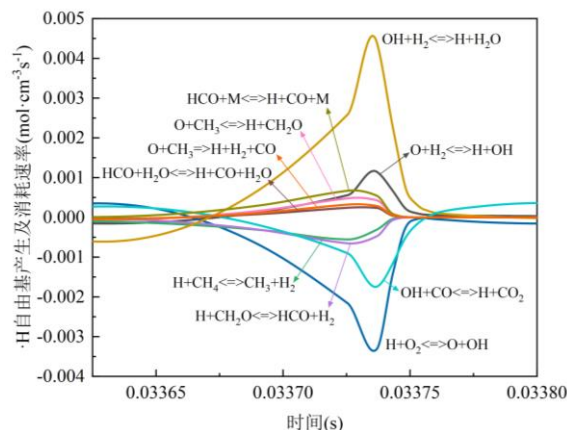


图7 产生和消耗·H自由基的基元反应(50%CO₂)

3.2 敏感性系数分析

在甲烷爆炸链式反应过程中会发生许多基元反应, 而其中 $(H+O_2 \rightleftharpoons O+OH)$ 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自由基、·O自由基和·OH自由基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^[18]。从图6可以看出, 加入二氧化碳之后氢气-甲烷混合物爆炸基元反应敏感系数都有得到降低。相比较于不加二氧化碳的工况, 二氧化碳的加入导致反应体系变得贫氧, 从而减弱了涉及氧气的反应, 如 $(H+O_2 \rightleftharpoons O+OH)$ 、 $(CH_3+O_2 \rightleftharpoons O+CH_2O)$ 、 $(CH_3+O_2 \rightleftharpoons OH+CH_2O)$ 、 $(CH_3O+O_2 \rightleftharpoons HO_2+CH_2O)$ 。此外, 向甲烷-空气反应体系中加入二氧化碳会促进反应 $CO+OH \rightleftharpoons CO_2+H$ 逆向进行, 值得注意的是, 在二氧化碳体积浓度为50%的情况下, 新增了一个抑制反应 $(OH+CH_4 \rightleftharpoons CH_3+H_2O)$, 减少了一个促进反应 $(CH_3+O_2 \rightleftharpoons HO_2+CH_2O)$ 。横向对比3个工况, 二氧化碳体积浓度的增加会使得其他反应均有明显减弱, 这是因为二氧化碳的加入消耗部分·H自由基, 从而抑制了涉及·H自由基的反应, 如 $(H+O_2 \rightleftharpoons O+OH)$, 从而导致·H自由基的总生成速率降低, 与上一小节得出的结论一致。

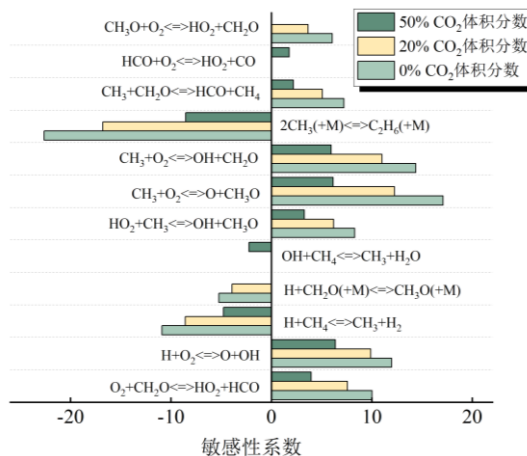


图8 不同体积浓度CO₂作用CH₄-Air爆炸基元反应的温度敏感性

3.3 二氧化碳影响机理分析

图9是二氧化碳对甲烷燃烧的微观机理图。从图中可以很清晰的看到，·H是整个甲烷氧化过程中的关键组分，它会促进反应的进行，而·OH是整个甲烷氧化过程中的中间自由基，它主要是在反应前期生成·H^[19]。二氧化碳的加入消耗了关键组分·H且生成·OH，间接地延长了甲烷反应的进程，促进了甲烷爆炸链引发反应关键自由基的消耗，从而阻碍了甲烷爆炸链反应的发展，达到了抑制甲烷燃爆的目的。在二氧化碳抑制甲烷-空气混合物燃烧爆炸的反应过程中，二氧化碳是(OH+CO<=>H+CO₂)的产物，增加二氧化碳可以促进反应逆向进行并增加·H自由基的消耗从而降低反应速率。另一方面由于二氧化碳是惰性气体，不直接参与爆炸反应，但二氧化碳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几率，在一定程度上降低了反应速率。同时二氧化碳具有较高的比热容、较大的密度和较强的吸收红外辐射的能力，这些性质使得二氧化碳能够有效地吸收燃烧放出的热量，降低火焰温度和热反馈效率，同时也能阻碍火焰的扩散和蔓延^[20]。

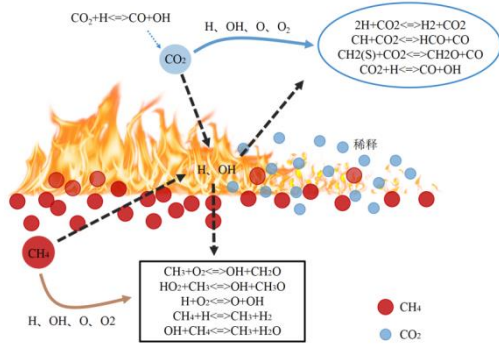


图9 CO₂对CH₄-Air预混气体爆炸反应的影响机理

4 结论

为探讨细水雾和二氧化碳对化学当量比条件9.5%CH₄-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甲烷-空气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自由基生成速率、温度敏感性等反应动力学参数，得到以下结论：

(1)在化学当量比条件9.5%CH₄-Air混合物中，在加入的二氧化碳体积浓度较低时，最大爆炸压力降低，“球形”、“指形”、“平面”、“郁金香”火焰出现的时间明显延迟；在加入的二氧化碳浓度大于30%后延迟更加明显，“郁金香”火焰逐渐消失。总体来说，二氧化碳对甲烷-空气的爆炸有明显的抑制作用。

(2)在反应物中加入二氧化碳后，(OH+CO<=>H+CO₂)从产生·H自由基从转变成消耗·H自由基，并且随着二氧化碳体积浓度的增加其消耗程度也增加。在20%体积浓度二氧化碳时，·H自由基的生成和消耗速率均降低至无

二氧化碳的1/3。在二氧化碳的体积浓度到50%后，·H自由基的消耗速率也减弱至原先的1/12。另一方面，氧气的还原反应会削弱·OH和·O自由基的形成，从而使得(OH+H₂<=>H+H₂O)和(O+H₂<=>H+OH)的反应能力同样减弱。

(3)二氧化碳在反应体系中主要作为稳定的第三体，降低了活化分子之间的碰撞概率，从而降低了反应速率，减缓了爆炸链式反应的链增长。在二氧化碳抑制甲烷-空气混合物燃烧爆炸的反应过程中，二氧化碳是(OH+CO<=>H+CO₂)的产物，增加二氧化碳可以促进反应逆向进行并增加·H自由基的消耗从而降低反应速率。并且二氧化碳能够有效地吸收燃烧放出的热量，降低火焰温度和热反馈效率，阻碍火焰的扩散和蔓延。

[参考文献]

[1]曾晓亮,李富祥,李明伟等.电缆隧道火灾事故特点与灭火系统研究综述[J].四川电力技术,2022,45(4):55-59.
[2]张佳庆,李文杰,范明豪.城市电力电缆隧道消防安全评估研究[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2020,42(2):7-8.
[3]郝振昆,刘安畅,周菲.电缆隧道消防安全管理问题及对策研究[J].中国电力企业管理,2020(32):76-78.
[4]张研,汪亮,孙得川,等.低密度聚乙烯的热解试验研究[J].固体火箭技术,2006(6):443-445.
[5]魏树旺,蒋新生,徐建楠,等.狭长受限空间油气爆炸抑制实验研究[J].振动与冲击,2017,36(10):51-56.
[6]Mitu M, Prodan M, Giurcan V, et al. Influence of inert gas addition on propagation indices of methane-air deflagrations[J]. Process Safety & Environmental Protection, 2016, 102(1): 513-522.
[7]周宁,李海涛,任常兴,等.多元混合气体爆炸特性及惰化防爆研究[J].安全与环境学报,2018,18(1):165-171.
[8]王中翊.LNG储罐泄漏扩散分析与抑爆研究[D].四川:西南石油大学,2018.
[9]ZENG W, MA H, LIANG Y. Experimental and modeling study on effects of N₂ and CO₂ on ignition characteristics of methane/air mixture[J]. Journal of Advanced Research, 2015, 6(2): 189-201.
[10]李光英.受限空间内CO₂对CH₄爆炸特性影响研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
[11]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.
[12]LUO Z M, ZHOU S Y, WANG T. The weakening effect of the inhibition of CO₂ on the explosion of HCNG with the increase of hydrogen: Experimental and chemical kinetic research[J]. International Journal of

Hydrogen Energy, 2023, 5(29): 1-12.

[13]SU B,LUO Z M,WANG T.Chemical kinetic behaviors at the chain initiation stage of CH₄/H₂/air mixture[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403(2): 123.

[14]朱稳初,张露,康鑫.半封闭狭窄通道内甲烷/空气预混火焰传播不稳定性实验研究[J].热能动力工程, 2023, 38(5): 57-64.

[15]罗振敏,康凯.CO₂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): 1-2.

[16]冯瑞.室内甲烷气体爆炸泄爆机理及载荷特征研究[D].北京:北京理工大学, 2018.

[17]罗振敏,解超,王九柱等.N₂和 CO₂对液化石油气(LPG)

惰化抑爆效能对比分析[J].化工进展, 2019, 38(6): 33-34.

[18]姜海洋,张国宾.CO与 H₂O抑制瓦斯爆炸的微观反应机理[J].煤炭转化, 2019, 42(6): 77-87.

[19]侯金丽,金平.基于敏感性分析的氧/甲烷燃烧反应简化机理[J].航天动力学报, 2012, 27(7): 1549-1554.

[20]Linteris G T,Rafferty I P. Flame size,heat release,and smoke points in materials flammability[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(6): 442-450.

作者简介:熊刚,重庆电力公司超高压公司电缆管理中心主任,在超高压设备检修维护,高压电缆运维管理方面有丰富经验和经历。