

文章编号: 1671-251X(2025)07-0090-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025060002

# CO<sub>2</sub> 喷射参数与布局对瓦斯爆炸 火焰抑制效果的影响

张莉聪, 邹凤韬, 吴林阳, 李宜珂

(华北科技学院 安全工程学院, 河北 廊坊 065201)

**摘要:** 当前对于 CO<sub>2</sub> 的抑爆研究多集中在爆炸压力峰值、火焰传播速度等参数上, 而对 CO<sub>2</sub> 抑制甲烷爆炸中自由基的变化情况、湍流分布等研究相对较少。针对瓦斯抽采管路内甲烷预混气体的爆炸传播特性, 通过理论分析、实验研究和数值模拟相结合的方法, 系统研究 CO<sub>2</sub> 在不同喷射压力、喷头布局及控制时序下的抑爆机制。实验采用自主搭建的中尺度爆炸激波管系统, 结合火焰传感器与光谱技术, 捕捉火焰特征参数及典型自由基演变规律; 基于 CHEMKIN-PRO 软件构建甲烷爆炸化学反应动力学模型, 定性、定量分析了 CO<sub>2</sub> 对关键自由基的抑制效应。研究结果表明: 喷口流量为 6.38 m<sup>3</sup>/s 时, 火焰传播速度最大降幅 79.3%, 火焰信号强度显著降低, ·OH 自由基摩尔分数下降 14.7%; 高压喷射形成的局部湍流强度峰值(约 20%)可显著提高 CO<sub>2</sub> 扩散效率, 提升抑爆效果; 双喷头错时倾斜喷射策略效果最好, 通过时空耦合设计, 同时控制抑爆剂喷射量和喷射时间, 构建“物理稀释-化学抑制-动态拦截”三重屏障, 使 ·OH 自由基摩尔分数下降 47.64%, 显著优于传统单喷头方案及其他双喷头方案。

**关键词:** 瓦斯爆炸; 火焰传播抑制; CO<sub>2</sub> 抑爆; CO<sub>2</sub> 喷射压力; 湍流强度; 喷头布局; 自由基浓度; 时空耦合设计

中图分类号: TD712.7

文献标志码: A

Influence of CO<sub>2</sub> injection parameters and layout on flame suppression effect of gas explosions

ZHANG Licong, ZOU Fengtao, WU Linyang, LI Yike

(Mining Safety College, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

**Abstract:** Current research on CO<sub>2</sub> explosion suppression mainly focuses on parameters such as peak explosion pressure and flame propagation speed, while studies on changes in free radicals and turbulence distribution during CO<sub>2</sub> suppression of methane explosions are relatively limited. This study systematically investigates the explosion propagation characteristics of methane premixed gas within gas drainage pipelines and the suppression mechanism of CO<sub>2</sub> under different injection pressures, nozzle layouts, and control sequences, through a combination of theoretical analysis, experimental research, and numerical simulation. Experiments were conducted using a self-built medium-scale explosion shock tube system, combined with flame sensors and spectroscopy techniques to capture flame characteristic parameters and typical evolution patterns of free radicals. A chemical kinetic model of methane explosion was developed based on CHEMKIN-PRO software to qualitatively and quantitatively analyze the inhibitory effects of CO<sub>2</sub> on key free radicals. The results showed that when the nozzle flow rate was 6.38 m<sup>3</sup>/s, the maximum reduction in flame propagation speed reached 79.3%. The flame signal intensity showed a notable decrease, and the molar fraction of ·OH radicals decreased by 14.7%. The

收稿日期: 2025-06-01; 修回日期: 2025-07-10; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874134); 中央高校基本科研业务费资助项目(3142016004); 应急管理部工业安全事故分析与监测预警重点实验室开放基金资助项目(F2302); 河北省实验教学与实验室建设项目。

作者简介: 张莉聪(1977—), 女, 河北石家庄人, 副教授, 硕士, 主要从事可燃性气体泄漏与爆炸过程数值模拟、安全生产监管与应急救援、工业卫生及职业危害防治、工业爆炸灾害防治方面的研究工作, E-mail: zlc1429@ncist.edu.cn。

引用格式: 张莉聪, 邹凤韬, 吴林阳, 等. CO<sub>2</sub> 喷射参数与布局对瓦斯爆炸火焰抑制效果的影响[J]. 工矿自动化, 2025, 51(7): 90-96.  
ZHANG Licong, ZOU Fengtao, WU Linyang, et al. Influence of CO<sub>2</sub> injection parameters and layout on flame suppression effect of gas explosions[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(7): 90-96.



扫码移动阅读

local turbulence intensity peak (about 20%) formed by high-pressure injection significantly improved CO<sub>2</sub> diffusion efficiency and enhanced suppression effects. The dual-nozzle staggered inclined injection strategy achieved the best effect. By employing a spatiotemporal coupling design, it simultaneously controlled both the injection quantity and timing of the suppressant. This approach established a triple barrier of "physical dilution–chemical inhibition–dynamic interception," resulting in a 47.64% reduction in the molar fraction of ·OH radicals, significantly outperforming traditional single-nozzle and other dual-nozzle schemes.

**Key words:** gas explosion; flame propagation suppression; CO<sub>2</sub> explosion suppression; CO<sub>2</sub> injection pressure; turbulence intensity; nozzle layout; free radical concentration; spatiotemporal coupling design

## 0 引言

煤矿瓦斯(主要成分为甲烷)爆炸事故严重威胁矿山安全<sup>[1-5]</sup>。尤其在瓦斯抽采过程中,管道内甲烷体积分数常处于6%~15%的爆炸极限范围<sup>[6]</sup>。受采空区漏风、机械摩擦等因素影响,抽采系统内局部高温或静电火花极易诱发链式燃烧反应。瓦斯爆炸火焰锋面可通过热辐射与气体膨胀引发次生灾害,并在特定条件下向爆轰转变。如何有效抑制抽采管路爆炸火焰传播,已成为煤矿瓦斯资源化利用与灾害防控协同发展的核心课题<sup>[7]</sup>。

煤矿瓦斯爆炸灾害中,冲击波与火焰及其产物分离,冲击波超前于火焰在巷道内传播,其激波能量、火焰高温特性及有毒气体组分会导致严重的人员伤亡与经济损失<sup>[8]</sup>。作为煤矿灾害防控体系的关键环节,抽采管路抑爆技术亟须向主动式、靶向化方向升级发展。气体抑爆剂相比于其他防治措施更加高效、便捷<sup>[9]</sup>,CO<sub>2</sub>作为瓦斯抽采的伴生气体(体积分数为10%~30%),兼具物理窒息与化学抑制双重功效<sup>[10-13]</sup>,为构建“抑爆抽采”一体化技术体系提供了新路径。特别是在智慧矿山建设背景下,CO<sub>2</sub>抑爆技术可与分布式光纤测温、气体组分实时监测等

智能感知系统形成联动,实现“浓度预警—抑爆启动—效果评估”的全链条闭环防控<sup>[14]</sup>。当前对于CO<sub>2</sub>的抑爆研究多集中在爆炸压力峰值、火焰传播速度等参数上,而对CO<sub>2</sub>抑制甲烷爆炸中自由基的变化情况、湍流分布等研究相对较少;另外现有研究多将CO<sub>2</sub>视为单纯物理稀释剂(降低O<sub>2</sub>浓度、吸收热量),对CO<sub>2</sub>分子本身可能参与化学反应的研究较少。

通过监测甲烷爆炸过程中自由基的浓度可以探究抑爆机理,进而分析抑爆效果;另外,喷射策略不同也会对自由基数量造成影响,从而影响最终的抑爆效果。因此,本文以煤矿瓦斯抽采管路为应用场景,获取湍流强度分布、速度梯度分布等火焰表面结构、流场速度等动态演化数据,并从基元反应和典型自由基摩尔数量变化的角度,采用理论分析、实验研究和数值模拟的方法,探究CO<sub>2</sub>抑爆机理。

## 1 研究方法

### 1.1 实验设计

采用自主搭建的中尺度爆炸激波管道系统进行实验,如图1所示。系统的管道部分由6段激波管管体和1段实验段管体组成。实验管体长度为1 m,方形管道长2 500 mm,内截面尺寸为200 mm×200 mm。

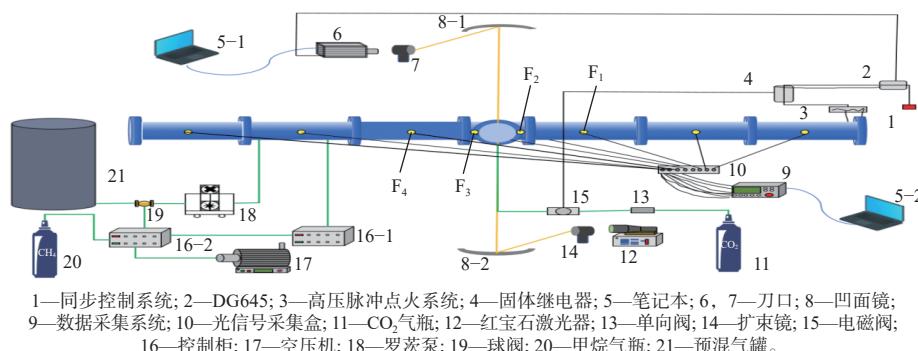


图1 中尺度爆炸激波管道系统

Fig. 1 Mesoscale explosion shock pipeline system

在管道上布置4个火焰传感器F<sub>1</sub>—F<sub>4</sub>,传感器与点火端距离分别为7.03, 8.53, 9.03, 10.53 m,用于观察火焰信号强度,研究不同喷射压力下CO<sub>2</sub>对甲烷

预混气体爆炸的抑爆效果。

将9.5%甲烷预混气罐中的气体排进管道。实验设置4种不同喷射压力,其对应的喷口流量分别

为 2.24, 4.08, 5.34, 6.38 m<sup>3</sup>/s, 喷射时间为 100 ms。CO<sub>2</sub>从实验管道中部(即火焰传感器 F<sub>2</sub>与 F<sub>3</sub>之间)观察窗的下方喷射进管道。设置 5 组工况, CO<sub>2</sub>喷射压力分别为 0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 MPa, 每组实验至少重复 3 次以上, 以获得具有代表性的实验数据。

## 1.2 数值模拟方法

### 1.2.1 网格无关性验证

数值模拟采用与实验相同的中尺度实验管道, 通过实验和数值模拟验证 9.5% 甲烷爆炸的最大超压和最大火焰传播速度, 从而确认网格无关性, 避免过度加密网格造成时间和计算资源的浪费。网格无关性验证结果见表 1, 可看出网格大小为 15 mm 时数值模拟结果与实验结果偏差较大, 网格大小为 5 mm 时与网格大小为 10 mm 时偏差不大, 所以网格大小选取 10 mm。

表 1 网格无关性验证结果

Table 1 Grid independence verification results

方法	网格大小/mm	最大超压/kPa	最大火焰传播速度/(m·s <sup>-1</sup> )
实验	—	261.65	44.98
	15	322.41	58.51
数值模拟	10	296.32	52.40
	5	291.69	50.61

### 1.2.2 控制方程

离散相控制模型采用 DPM(Deformable Part Model, 可变形部件模型)。模拟中考虑气相之间有动量、质量和能量交换。Fluent 通过数值方法求解流体流动的偏微分方程, 能够提供精确的流场信息, 包括速度、压力、温度等分布情况, 模拟一些复杂的流动。连续相和离散相控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial f_1(U)}{\partial x} + \frac{\partial f_2(U)}{\partial y} + \frac{\partial f_3(U)}{\partial z} = \\ \frac{\partial G_1(U)}{\partial x} + \frac{\partial G_2(U)}{\partial y} + \frac{\partial G_3(U)}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $U$  为守恒变量;  $t$  为时间;  $x, y, z$  为空间坐标;  $f_1-f_3$  分别为  $x, y, z$  方向的对流通量向量;  $G_1-G_3$  为黏性通量向量。

### 1.2.3 初始条件

点火位置在管道最右端中心位置, 采用电火花打火, 点火能量为 100 mJ, 抑爆剂喷射压力由实验设计的工况决定, 电火花点燃后喷入抑爆剂。

CO<sub>2</sub>的加入会显著改变混合气体的输运特性(如黏度、扩散系数)及火焰面处的湍流-化学反应耦合, 选择 realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, 模型对湍流黏度的动态修正可更准确地表征掺混区域的速度梯度与湍

流耗散率分布<sup>[15]</sup>。

燃烧模型选取涡耗散概念(Eddy Dissipation Concept, EDC)模型<sup>[16]</sup>, 在湍流涡旋尺度上解析化学反应, 能够同时考虑湍流混合速率与化学反应动力学的相互作用。对于 CO<sub>2</sub>抑制甲烷爆炸的复杂过程(涉及稀释效应、热效应及化学干扰), 需精确量化其对自由基反应路径的影响, 而 EDC 模型支持多步反应机理的耦合, 较传统涡耗散模型(Eddy Dissipation Model, EDM)更适用于此类动力学主导的场景。

边界条件: 管道壁面设置为刚性无滑移绝热壁面, 甲烷爆炸过程为绝热过程, 忽略热交换, 壁面粗糙程度为 0.5, 粗糙高度为 0。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果

设置 CO<sub>2</sub>喷射压力为 0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 MPa, 实验结果如图 2 所示。

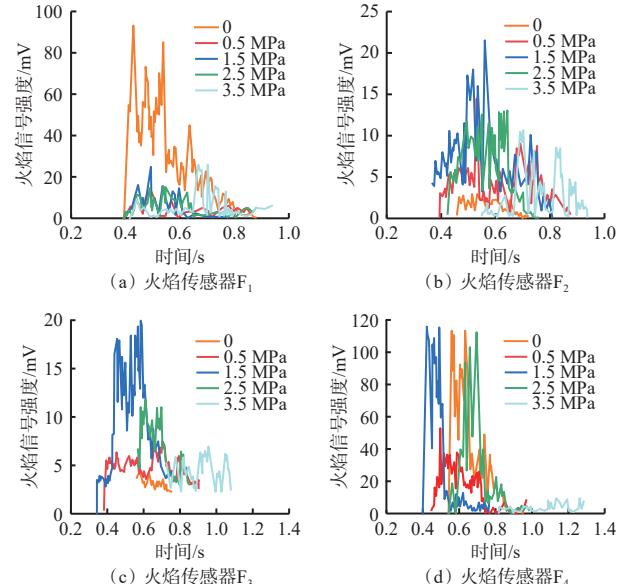


图 2 不同 CO<sub>2</sub> 喷射压力下的火焰信号强度

Fig. 2 Flame signal intensity under different CO<sub>2</sub> injection pressures

由图 2(a)可知, 在无抑爆剂时, 火焰到达 F<sub>1</sub> 处时信号强度约为 90 mV, 此时为初始燃烧阶段, 火焰结构完整, 热释放率较高。由图 2(b)、图 2(c)可知, 火焰到达 F<sub>2</sub> 与 F<sub>3</sub> 处时信号显著减弱(信号强度均低于 5 mV), 此时为火焰-压力波相互作用阶段, 由于爆炸产生的压力波以音速(远快于火焰速度)向前传播并在管道封闭端反射, 压力波对未燃混合气的压缩和湍流扰动可能导致火焰面褶皱与拉伸(火焰阵面呈郁金香形)、局部火焰熄灭, 且传感器视角受限, 只能捕捉正对方向的辐射, 有效信号降低。由图 2(d)可知, 火焰到达 F<sub>4</sub> 处时信号强度约为 110 mV, 此时

为末端压力积聚阶段( $F_4$ 附近),火焰向左的压力与压力反射波叠加,形成高压环境,对未燃气进行压缩,结合壁面强湍流,促进完全燃烧,温度升高,促进化学反应加剧。

在喷射压力为0.5,1.5 MPa时,火焰信号出现时间相较于喷射压力为0时有所提前,说明喷射压力较低时火焰速度加快,其原因可能是喷射压力低时,湍流促进混合,湍流会加速甲烷与O<sub>2</sub>的混合,使局部浓度更均匀<sup>[17]</sup>。

喷射压力为3.5 MPa时,火焰阵面抵达传感器时间均有所推迟,说明CO<sub>2</sub>的稀释效应已经成为主导;而火焰传感器F<sub>2</sub>与F<sub>3</sub>位于喷射口左右两端,由于受到的气体扰动很大,火焰信号强度变化没有近点火端规律。喷射压力为2.5 MPa时,虽然火焰信号出现时间也有所提前,但没有喷射压力为3.5 MPa时抑爆效果好。

## 2.2 数值模拟与实验结果对比

### 2.2.1 CO<sub>2</sub>喷射管道内湍流特征

采用3.5 MPa的CO<sub>2</sub>进行抑爆,模拟结果如图3所示。可看出CO<sub>2</sub>喷头附近湍流强度峰值达到20%,CO<sub>2</sub>喷射形成了局部高速射流,导致流体剧烈剪切并产生涡旋(图3中红色区域)。对比实验与模拟结果可知,喷头附近湍流强度为20%会显著提升抑爆效率。从增强气体混合、火焰结构破坏、抑爆时机优化3个方面进行抑爆效果分析。湍流像“无形搅拌器”一样,使CO<sub>2</sub>与甲烷快速混合。喷头处的高湍流能将CO<sub>2</sub>迅速扩散到整个管道截面,降低甲烷浓度;高速喷射的CO<sub>2</sub>在湍流作用下形成旋涡,直接冲击火焰传播路径。同时,CO<sub>2</sub>本身具有吸热特性,能吸收燃烧释放的热量,进一步抑制爆炸发展;湍流强度峰值出现在喷头处,说明此处CO<sub>2</sub>扩散最活跃。当火焰传播到管道中部时,喷头附近已形成稳定的CO<sub>2</sub>隔离区,这对抑制爆炸峰值压力至关重要。

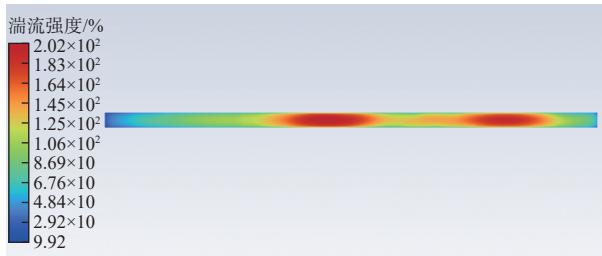


图3 CO<sub>2</sub>喷射管道内的湍流特征

Fig. 3 Turbulence characteristics in CO<sub>2</sub> injection pipeline

### 2.2.2 CO<sub>2</sub>喷射管道内火焰速度特征

不同工况下的火焰传播速度如图4所示。可看出数值模拟最大误差为18.2%,误差可以接受。从模拟结果可看出,CO<sub>2</sub>对管道内火焰传播速度的抑制

效果很好,在F<sub>3</sub>处,实验和数值模拟得出的火焰传播速度分别下降79.3%,81.1%。这与实验部分F<sub>3</sub>,F<sub>4</sub>火焰信号强度降低这一趋势吻合。误差原因可能是模拟的网格划分不够精细、实验点火能量波动、传感器精度低等。

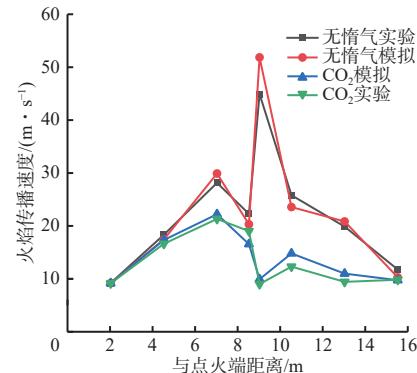


图4 不同工况下的火焰传播速度

Fig. 4 Flame propagation speed under different working conditions

## 3 甲烷爆炸过程中自由基的变化情况

### 3.1 无抑爆剂甲烷管道内燃烧自由基变化情况

由于捕捉瞬态过程中自由基寿命极短且实验成本较高,数值模拟可输出纳秒级时间步长的自由基浓度变化,采用CHEMKIN-PRO数值计算方法与光谱分析技术相结合的研究策略<sup>[18-19]</sup>,对甲烷爆炸过程中的·OH自由基演变规律进行对比分析。数值模拟结果(图5)与实验数据(图6)表明,2种方式获得的·OH自由基峰值、基本趋势和出现时间基本一致,验证了数值模拟在自由基动力学表征方面的可靠性,CHEMKIN-PRO构建的燃烧反应模型所获得的自由基浓度数据具有重要参考价值。·OH自由基摩尔分数最大值为0.0034。

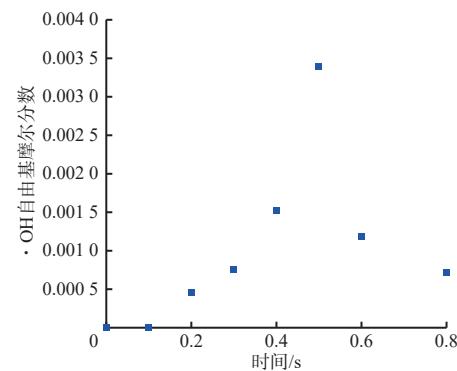


图5 甲烷爆炸模拟中·OH自由基摩尔分数变化

Fig. 5 Changes in mole fraction of ·OH radicals in methane explosion simulation

自由基摩尔分数在中部最高的原因分析:流场特性为主导因素,管道中部通常为湍流发展最充分区域,甲烷与空气的掺混速率较高;由于压力波反射

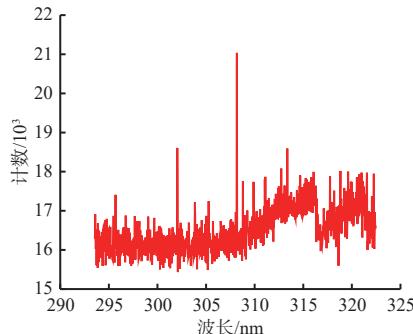
图 6 甲烷爆炸实验中·OH 光谱扫描特征( $t=0.5$  s)

Fig. 6 Spectral scanning characteristics of ·OH in methane explosion experiment( $t=0.5$  s)

效应, 封闭管道中压力波在两端反射叠加, 导致中部区域压力波动幅值最大, 压缩高温燃气并延长·OH 自由基的驻留时间。

### 3.2 CO<sub>2</sub> 喷射策略对抑爆效果的影响

由于单个喷头抑爆效果相对有限, 经数值模拟测得·OH 自由基摩尔分数最大值为 0.002 9, 自由基摩尔分数下降 14.7%。于是采用双喷头喷射 CO<sub>2</sub> 进行抑爆, 通过调节双喷头的单喷流量, 确保总喷射量与单喷头一致, 排除喷射量差异对结果的干扰, 仅对比喷头数量与布局的影响。双喷头每个喷头的喷射压力仍为 3.5 MPa, 但单喷头流量调整为 3.19 m<sup>3</sup>/s(总流量仍为 6.38 m<sup>3</sup>/s), 喷射时间保持 100 ms, 总喷射体积与单喷头方案一致(0.638 m<sup>3</sup>), 见表 2。

表 2 喷头设置方案  
Table 2 Scheme of nozzle layout

对比维度	单喷头方案		双喷头创新方案	
	喷头位置	中点8 m处	喷射角度	垂直喷射(90°)
喷射角度	前端4 m/后端12 m		前45°下压/后30°上抬	
触发时序	点火同步启动		前喷2 ms/后喷4 ms延迟	
覆盖范围	直径0.5 m柱状区域		交叉覆盖	

设置 4 种不同的 CO<sub>2</sub> 喷射策略(图 7), 得到不同喷射策略下·OH 自由基摩尔分数, 如图 8 所示。可看出双喷头喷射 CO<sub>2</sub> 形成了“燃烧-抑制-再抑制”三重屏障(物理+化学协同)。对流喷射、平行喷射、交错喷射 3 种方案中, 交错喷射的抑制效果最好, ·OH 自由基摩尔分数下降 28.79%。当燃烧反应区向左传播时, 在平行喷射和交错喷射下, 火焰中的活性自由基先经历 CO<sub>2</sub> 的稀释、隔热作用, 从而传播速度变慢, 链式反应速率降低。平行喷射和交错喷射的差异是 CO<sub>2</sub> 喷射策略的不同, 交错喷射相对于平行喷射更有利将火焰破碎, 延后了·OH 自由基摩尔分数峰值出现的时间, 抑爆效果比对流喷射和平行喷射效果更好<sup>[20]</sup>。

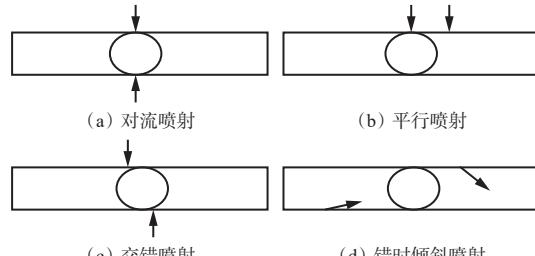
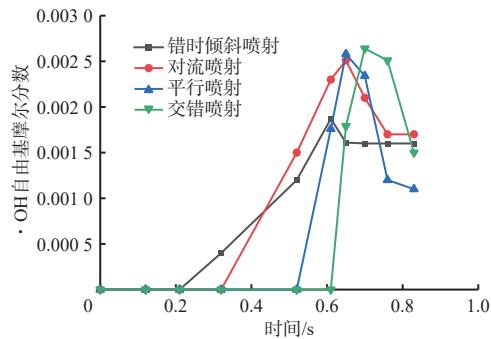
图 7 CO<sub>2</sub> 喷射策略Fig. 7 CO<sub>2</sub> injection strategies

图 8 不同喷射策略下·OH 自由基摩尔分数

Fig. 8 Mole fraction of ·OH radicals under different injection strategies

错时倾斜喷射扩大了抑爆剂覆盖范围, 前喷压力波逆向传播, 与爆炸波形成干涉, 后喷压力波与反射波同频反向, 构建了燃料隔离和自由基捕获的双重防线; 在时间维度上, 建立 2 ms/4 ms 双阶段控制时序, 实现爆炸初始期、后期及反射期的精准打击。错时倾斜喷射策略下自由基摩尔分数如图 9 所示, ·OH 自由基摩尔分数最大值为 0.001 7, H·自由基摩尔分数最大值为 0.001 59, ·OH 自由基摩尔分数下降 47.64%, 因此, 错时倾斜喷射优于其他 3 种喷射策略。

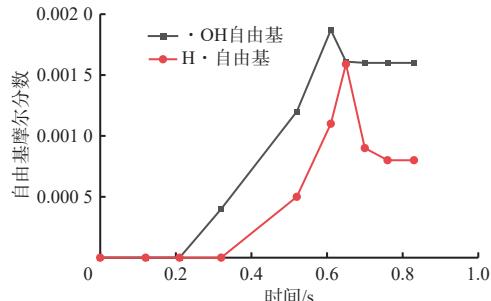


图 9 错时倾斜喷射策略下自由基摩尔分数

Fig. 9 Free radical mole fraction under staggered inclined injection strategy

### 4 CO<sub>2</sub> 对甲烷爆炸抑爆机理

CO<sub>2</sub> 喷射对甲烷的抑爆机理如图 10 所示。物理抑制作用: CO<sub>2</sub> 喷射可延缓甲烷气体达到自燃温度, 降低反应驱动力, 增加自由基与 CO<sub>2</sub> 分子的碰撞概率, 使自由基更容易形成稳定的复合体; 化学抑制作

用: 火焰锋面温度高, 高温下CO<sub>2</sub>参与自由基终止反应(自由基的消耗), 使链反应中断, 所以火焰锋面主要以化学抑制为主。

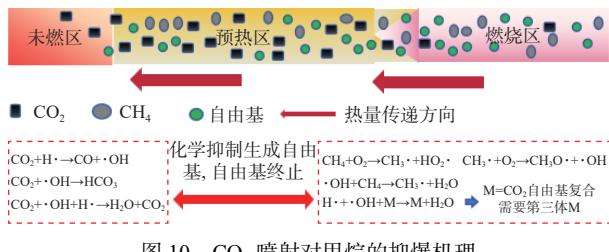


图 10 CO<sub>2</sub>喷射对甲烷的抑爆机理

Fig. 10 The explosion suppression mechanism of methane by CO<sub>2</sub> injection

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

1) 揭示了CO<sub>2</sub>抑制甲烷爆炸火焰传播的多尺度机制, 验证了其物理化学协同抑爆效能。实验结果表明, 高压喷射(3.5 MPa)的抑爆效果最好, 从宏观上看, 通过湍流增强(峰值20%)加速CO<sub>2</sub>扩散, 使火焰锋面破碎, 同时降低局部温度, 火焰传播速度降幅达79.3%。

2) 通过数值模拟与实验分析可知, 自由基摩尔分数的变化能够直观呈现抑爆过程。根据《重大火灾隐患判定方法》<sup>[21]</sup>, 消防行业现行火灾自动灭火系统运作过程中将·OH自由基摩尔分数作为监测参数, 因此, 通过监测·OH自由基摩尔分数的动态变化可表征灭火进程, 为自动灭火系统监测环节的设计提供理论依据。

3) 设计了双喷头错时倾斜喷射策略, 形成交叉覆盖屏障, 使·OH自由基摩尔分数降幅提升至47.64%, 较单喷头方案(14.7%)和双喷头方案(28.79%)显著优化。这表明喷头布局设计能够提高CO<sub>2</sub>扩散效率, 扩大抑爆剂覆盖范围, 而非单纯依赖喷射量增加。

### 5.2 展望

1) CO<sub>2</sub>抑爆技术适用于无人封闭管道, 需避免人员窒息风险, 并且CO<sub>2</sub>作为抑爆剂与水易形成碳酸, 可能腐蚀煤矿井下金属管路, 使用时应对金属管路采取刷耐腐蚀涂层等措施。未来可进一步研究气固两相抑爆、多喷头协同控制、动态气流-射流耦合模型及智能触发系统, 结合机器学习优化喷射时序与角度, 实现抑爆过程的精准调控。

2) 未来可结合智能感知系统(如分布式光纤测温、气体组分在线监测)构建“预测-抑制-评估”一体化防控平台, 推动矿井火灾防控从被动应急向主动精准干预升级, 契合《煤矿防灭火细则》对主动抑

爆技术的强制要求, 为矿山智能化防灾体系建设提供技术支撑。

### 参考文献(References):

- [1] 王国法, 杜毅博, 陈晓晶, 等. 从煤矿机械化到自动化和智能化的发展与创新实践——纪念《工矿自动化》创刊50周年[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 1-18.  
WANG Guofa, DU Yibo, CHEN Xiaojing, et al. Development and innovative practice from coal mine mechanization to automation and intelligence: commemorating the 50th anniversary of the founding of *Journal of Mine Automation*[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(6): 1-18.
- [2] 张亮, 赖芳芳, 徐景德. 点火能量与瓦斯体积分数对瓦斯爆炸压力和火焰传播速度的显著性影响研究[J]. 煤矿安全, 2025, 56(1): 12-18.  
ZHANG Liang, LAI Fangfang, XU Jingde. Study on the significant effects of ignition energy and gas volume fraction on gas explosion pressure and flame propagation velocity[J]. *Coal Mine Safety*, 2025, 56(1): 12-18.
- [3] 苗常盛, 李雪交, 杨俊辉, 等. 煤矿巷道中分岔管道瓦斯爆炸特性研究[J]. 火工品, 2025(3): 108-112.  
MIAO Changsheng, LI Xuejiao, YANG Junhui, et al. Study on gas explosion characteristics of bifurcated pipeline in coal mine tunnel[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2025(3): 108-112.
- [4] 张延松, 徐畅, 秦江, 等. 纳米复合抑爆粉体抑制甲烷煤尘混合爆炸动力学机理研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(11): 4296-4305.  
ZHANG Yansong, XU Chang, QIN Jiang, et al. Study on the dynamic mechanism of nanocomposite explosion suppression powder in mitigating the combined explosion of methane and coal dust[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(11): 4296-4305.
- [5] 贾进章, 田秀媛. 瓦斯爆炸抑制研究进展及发展趋势[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1): 95-107.  
JIA Jinzhang, TIAN Xiuyuan. Progress and development trends in gas explosion suppression research[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(1): 95-107.
- [6] 雷柏伟, 郭泽凯, 吴兵. 甲烷爆炸实验教学的数值模拟设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(10): 211-216.  
LEI Baiwei, GUO Zekai, WU Bing. Numerical simulation design and practice of methane explosion experimental teaching[J]. *Experimental Technology and Management*, 2023, 40(10): 211-216.
- [7] 王磊. 大型巷道与小型管道瓦斯爆燃传播规律实验和数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.  
WANG Lei. Experimental and numerical simulation research on gas deflagration propagation laws in large roadways and small pipelines[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [8] 魏普. 瓦斯抽采管道安全防护装置控制系统的设计

- [J]. 矿业装备, 2024(8): 175-177.
- WEI Pu. Design of control system for safety protection device of gas extraction pipeline[J]. Mining Equipment, 2024(8): 175-177.
- [9] 叶兰. 我国瓦斯事故规律及预防措施研究[J]. 中国煤层气, 2020, 17(4): 44-47.
- YE Lan. Research on rules and prevention measures of gas accidents in China[J]. China Coalbed Methane, 2020, 17(4): 44-47.
- [10] 秦汉圣. 密闭空间可燃气体爆燃传播特性和阻燃技术的实验研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2021.
- QIN Hansheng. Experimental study on deflagration propagation characteristics and flame retardant technology of combustible gas in a confined space[D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2021.
- [11] 白洁琪, 白纪成, 梁运涛, 等. CF<sub>3</sub>H 和 CO<sub>2</sub> 抑制 CH<sub>4</sub> 爆炸实验研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(5): 122-130.
- BAI Jieqi, BAI Jicheng, LIANG Yuntao, et al. Study on suppression of CH<sub>4</sub> explosion by CF<sub>3</sub>H and CO<sub>2</sub>[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(5): 122-130.
- [12] 李光英. 受限空间内 CO<sub>2</sub> 对 CH<sub>4</sub> 爆炸特性影响研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- LI Guangying. Influence of CO<sub>2</sub> for CH<sub>4</sub> explosion characteristics in confined space[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [13] 殷平平. 球形密闭容器内 CH<sub>4</sub> 爆炸特性及 CO<sub>2</sub> 抑爆研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- YIN Pingping. Research on CH<sub>4</sub> explosion characteristics and CO<sub>2</sub> explosion suppression in spherical closed device[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [14] 钟畏丹. 基于多模态数据混合融合的智慧矿山关键数据优化[J]. 工矿自动化, 2024, 50(增刊 2): 82-85.
- ZHONG Weidan. Key data optimization of smart mine based on multimodal data hybrid fusion[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(S2): 82-85.
- [15] 任芸, 刘厚林, 舒敏骅, 等. 考虑旋转和曲率影响的 SST  $k-\omega$  湍流模型改进 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 123-128.
- REN Yun, LIU Houlin, SHU Minhua, et al. Improvement of SST  $k-\omega$  turbulence model and numerical simulation in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 123-128.
- [16] 徐景德, 卢森涛, 卢鸿玉, 等. 碳酸钙抑制管道甲烷-煤尘爆炸机理的数值分析[J]. 华北科技学院学报, 2024, 21(6): 73-78.
- XU Jingde, LU Sentao, LU Hongyu, et al. Numerical analysis of the mechanism of calcium carbonate inhibition of methane-coal dust explosion in pipelines[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2024, 21(6): 73-78.
- [17] 苗常盛, 王依婷, 杨俊辉, 等. 低浓度甲烷燃烧特性的数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(2): 94-99.
- MIAO Changsheng, WANG Yiting, YANG Junhui, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of methane at low concentrations[J]. Coal Technology, 2025, 44(2): 94-99.
- [18] 赵子文. 超低浓度甲烷点火和高温裂解特性实验及模拟研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- ZHAO Ziwen. Experimental and simulation studies on ignition and high temperature pyrolysis characteristics of ultra-low concentration methane[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [19] 杨鹏, 潘勇, 蒋军成, 等. 基于 CHEMKIN 的可燃气体爆炸下限模拟研究 [J]. 消防科学与技术, 2016, 35(11): 1525-1529.
- YANG Peng, PAN Yong, JIANG Juncheng, et al. Simulation research of lower explosion limit for flammable gas based on CHEMKIN[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(11): 1525-1529.
- [20] 张莉聪, 李斯曼. 基于基元反应的气液两相协同抑爆阻燃效果分析 [J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 101-108.
- ZHANG Licong, LI Siman. Analysis of gas-liquid two-phase coordinated explosion and flame retardant effect based on fundamental reaction[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 101-108.
- [21] GB 35181—2017 重大火灾隐患判定方法[S]. GB 35181-2017 Methods for major fire potential judgment[S].