

文章编号: 1671-251X(2025)08-0134-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025060021

惰性气体喷射参数对 H_2-CH_4 混合气体爆炸抑制效果的影响

李胜利¹, 王长禄^{2,3,4,5}, 郑义^{2,3,4,5}, 李斌⁶

(1. 国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司 保德煤矿, 山西 忻州 036600;

2. 煤科通安(北京)智控科技有限公司, 北京 100013; 3. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;

4. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013; 5. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室,

北京 100013; 6. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 为探究惰性气体喷射参数对 H_2-CH_4 混合气体爆炸特性的影响, 在水平管道上开展了 N_2 和 CO_2 抑制 H_2-CH_4 混合气体爆炸的实验, 研究了 N_2 和 CO_2 喷射位置及喷射角度对 H_2-CH_4 混合气体爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度的影响。结果表明: N_2 和 CO_2 对爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度有明显的减弱作用, 且 CO_2 对 H_2-CH_4 混合气体爆炸的抑制作用强于 N_2 ; 惰性气体在近火端喷射位置的抑爆能力优于远火端喷射位置; 随着惰性气体喷射角度增大, 最大爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度均呈逐渐降低趋势, 惰性气体对 H_2-CH_4 混合气体爆炸的抑制效果逐渐增强。通过 Chemkin-Pro 模拟可知: 加入 CO_2 时 H 自由基和 OH 自由基的摩尔分数峰值相较于无抑爆时分别下降了 14.2% 和 9.9%; 而加入 N_2 时 H 自由基和 OH 自由基的摩尔分数相较于无抑爆时几乎无差别。“近火端+大角度”的组合喷射方式能够最大化发挥 CO_2 在自由基消耗、物理吸热与可燃气体稀释方面的协同抑制效应; “远火端+小角度”的组合喷射方式则因扩散延迟与气体混合不均的双重制约, 削弱了惰性气体的抑爆效能。

关键词: 混合气体爆炸; 惰性气体抑爆; 气体喷射位置; 气体喷射角度; 爆炸压力; 火焰传播速度; 火焰波温度; 自由基

中图分类号: TD712.71

文献标志码: A

Effect of inert gas injection parameters on explosion suppression of H_2-CH_4 mixtures

LI Shengli¹, WANG Changlu^{2,3,4,5}, ZHENG Yi^{2,3,4,5}, LI Bin⁶

(1. Baode Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Xinzhou 036600, China; 2. CCRI Tong'an(Beijing) Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China; 5. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 6. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: To investigate the effect of inert gas injection parameters on the explosion characteristics of H_2-CH_4 mixtures, experiments were carried out in a horizontal pipeline to study the suppression of H_2-CH_4 mixture explosions by N_2 and CO_2 . The effects of N_2 and CO_2 injection positions and injection angles on explosion pressure, flame propagation speed, and flame front temperature of H_2-CH_4 mixtures were examined. The results showed that N_2 and CO_2 significantly reduced explosion pressure, flame propagation speed, and flame front

收稿日期: 2025-06-05; 修回日期: 2025-08-24; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212410144007)。

作者简介: 李胜利(1980—), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 现主要从事矿井“一通三防”方面的工作, E-mail: lv520ls1555@163.com。

引用格式: 李胜利, 王长禄, 郑义, 等. 惰性气体喷射参数对 H_2-CH_4 混合气体爆炸抑制效果的影响[J]. 工矿自动化, 2025, 51(8): 134-140, 147.

LI Shengli, WANG Changlu, ZHENG Yi, et al. Effect of inert gas injection parameters on explosion suppression of H_2-CH_4 mixtures[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(8): 134-140, 147.



扫码移动阅读

temperature, and that the suppression effect of CO_2 on $\text{H}_2\text{-CH}_4$ mixture explosions was stronger than that of N_2 . The suppression ability of inert gas was better when injected at the near-flame end than at the far-flame end. As the injection angle of inert gas increased, the maximum explosion pressure, flame propagation speed, and flame front temperature gradually decreased, and the suppression effect on $\text{H}_2\text{-CH}_4$ mixtures gradually increased. Chemkin-Pro simulations indicated that, with the addition of CO_2 , the peak molar fractions of H radicals and OH radicals decreased by 14.2% and 9.9%, respectively, compared with the condition without suppression; whereas with the addition of N_2 , the molar fractions of H radicals and OH radicals were almost unchanged compared with the condition without suppression. The combined injection mode of "near-flame end + large angle" could maximize the synergistic suppression effect of CO_2 in terms of radical consumption, physical heat absorption, and combustible gas dilution, while the combined injection mode of "far-flame end + small angle" weakened the suppression efficiency of inert gas due to the dual limitations of diffusion delay and gas mixing non-uniformity.

Key words: gas mixture explosion; inert gas suppression; gas injection position; gas injection angle; explosion pressure; flame propagation speed; flame front temperature; radicals

0 引言

矿井中可燃气体成分多样,除常见的 CH_4 外,在煤油共生矿井的煤层气中还含有 H_2 ,尤其在煤层局部氧化和煤岩破碎区化学反应活跃的开采场景下,易大量释放 H_2 导致局部混合气体中 H_2 比例显著升高^[1-3]。 H_2 在煤矿瓦斯环境中具有较高的爆炸危险性,而 H_2 与 CH_4 形成的混合气体其爆炸破坏性更强^[4-6],因此,开展 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸抑制研究具有重要意义。

惰性气体因具备经济成本低和惰化作用效率高等特点,被广泛应用于抑制可燃气体爆炸。 CO_2 与 N_2 作为常见的惰性抑爆剂,主要通过惰化可燃气体所处的环境,破坏爆炸发生的必要条件来实现抑爆效果^[7-8]。Su Yang 等^[9]采用 20 L 球形装置研究了 N_2 对 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 预混气体爆炸极限的影响,结果表明 N_2 的加入使得预混气体爆炸上限下降、下限上升,且 N_2 对掺氢比不超过 0.3 的混合气体抑爆效果更突出。邹颖等^[10]探究了 N_2 和 CO_2 对 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸的影响,发现分别添加 10% 的 N_2 和 CO_2 使混合气体爆炸指数分别下降了 12.7% 和 23.96%, CO_2 相比于 N_2 在抑制爆炸方面表现出更好的效果。罗振敏等^[11]研究了 CO_2 对掺氢天然气爆炸压力和火焰传播特性的影响,发现加入 CO_2 对混合气体爆炸压力和火焰传播速度有抑制作用,但对高掺氢比混合气体爆炸压力的抑制效果较差。陈晓坤等^[12]在半封闭管道中研究 CO_2 对掺氢 CH_4 燃爆特性的影响,结果表明,添加 CO_2 可有效抑制掺氢 CH_4 燃爆火焰向封闭空间的传播,随着 CO_2 浓度增加,火焰传播速度减小,爆炸压力峰值降低。苏洋等^[13]在 20 L 球形爆炸装置中测试了 CO_2 -海泡石粉体对 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气

体爆炸特性的影响,结果表明, CO_2 对 H_2 添加比例较低的 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体具有较好的爆炸抑制效果,但对 H_2 添加比例大于 50% 的 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体的爆炸抑制效果较差。

上述研究表明 N_2 和 CO_2 对 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸具有较好的抑制作用,但目前关于 N_2 和 CO_2 喷射位置及喷射角度对抑制 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸影响的研究仍相对不足。本文在水平管道上开展 N_2 和 CO_2 抑制 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸的实验,探究 N_2 和 CO_2 喷射位置和喷射角度对 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸压力、火焰传播速度及火焰波温度的影响,同时利用 Chemkin-Pro 模拟软件分析 N_2 和 CO_2 对混合气体燃烧反应中 H 自由基和 OH 自由基生成与消耗的影响规律,为煤油共生矿井特殊开采条件下形成的高氢比例 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸的精准防控提供理论基础和技术支持。

1 实验装置及步骤

1.1 实验装置

实验装置由水平管道、配气系统、点火系统、数据采集系统和抑爆系统等组成,如图 1 所示。水平管道由透明有机玻璃板制成,尺寸为 2 000 mm×150 mm×150 mm(长×宽×高)。管道末端采用 PVC 薄膜进行密封,管道左端采用可拆卸的密封端盖,端盖材质与管道相同,通过橡胶密封圈保证密封效果。管道左端设置进气口和点火电极,且管道上设有传感器插孔。配气系统包括质量流量计、 CH_4 气瓶、空气气瓶和 H_2 气瓶等。点火系统主要包括高能点火器、高能火花塞、耐高压耐高温电缆、电源电缆、外触发装置等,高能点火器通过耐高压、耐高温电缆与点火电极连接,点火能量为 0.2 J。数据采集

系统包括 ZC2002-2 型压力传感器(量程为 0~10 MPa, 精度达 $\pm 0.1\%$ FS, 采样频率为 10 kHz)、TP-CF1400AD 型温度传感器、数据采集卡、计算机和高速摄影机(采集速率为 1 000 帧/s)。抑爆系统包括电磁阀、N₂ 气瓶、CO₂ 气瓶、质量流量计和喷嘴, 以水平管道左端点火电极所在位置为原点, 沿管道轴线向右为正方向, 在距离原点 100, 1 800 mm 处分别设置近火端喷嘴和远火端喷嘴, 同时近火端、远火端喷嘴附近对应设置传感器。

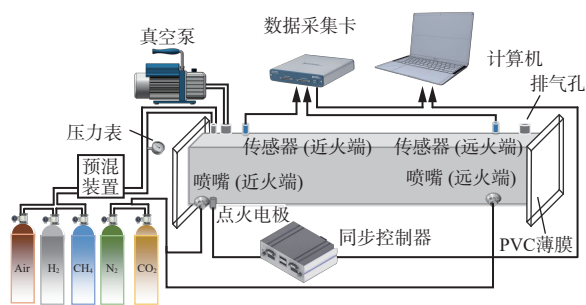


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental devices

1.2 实验步骤

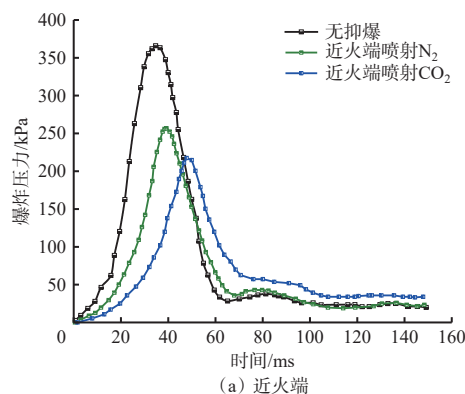
实验所用气体纯度均大于 99.9%。实验前检查管道的密闭性和各系统运行状态, 符合要求后启动配气工作。实验配气过程: 先打开进气孔和排气孔, 通过配气系统向可视化玻璃管道内充入 H₂-CH₄-空气预混气体(控制充气量为管道有效容积的 4 倍), 其中 CH₄ 体积分数为 9.5%, H₂ 体积分数为 10%^[14-15]; 再分别通入流量为 5 L/min 的 N₂ 和 CO₂, 通气时长为 108 s, 使加入的 N₂ 和 CO₂ 体积分数为 20%(当惰性气体体积分数为 15%~30% 时能够对可燃气体爆炸起显著抑制作用^[16])。配气完成后需静置 30 s, 以保证气体充分混合。点火爆炸后, 抑爆系统同步控制电磁阀通电开启, 使 CO₂ 和 N₂ 通过喷嘴喷出。设置喷气压力为 0.1 MPa^[17-18], 喷嘴喷射角度(喷嘴与管道轴线的夹角)为 30, 60, 90°。每组实验均重复 3 次以上, 以保证实验结果的可靠性。

2 实验结果

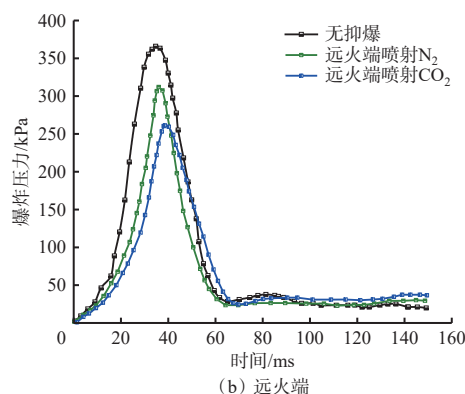
2.1 惰性气体喷射参数对爆炸压力的影响

固定喷射角度为 90°, 近火端和远火端喷射惰性气体时的 H₂-CH₄ 混合气体爆炸压力时程曲线如图 2 所示。可看出: ① 在近火端喷射 N₂ 和 CO₂ 时的最大爆炸压力相较于无抑爆时分别降低了 109.2, 148.5 kPa, 在近火端喷射 CO₂ 时的最大爆炸压力比喷射 N₂ 时降低了 39.3 kPa; 在远火端喷射 N₂ 和 CO₂ 时的最大爆炸压力相比无抑爆时分别降低了 54.0, 104.7 kPa, 在远火端喷射 CO₂ 时的最大爆炸压力比喷射 N₂ 时

降低了 50.7 kPa。这表明 N₂ 和 CO₂ 对爆炸压力有明显的减弱作用, 且 CO₂ 对 H₂-CH₄ 混合气体爆炸的抑制作用强于 N₂。② 在近火端喷射 N₂ 时的最大爆炸压力比在远火端喷射时降低了 55.2 kPa, 在近火端喷射 CO₂ 时的最大爆炸压力比在远火端喷射时降低了 43.9 kPa, 表明近火端喷射的抑爆效果优于远火端。这是由于在近火端喷射惰性气体时, 能够更迅速地与刚被点燃的可燃混合气体接触, 在爆炸反应初期就有效稀释可燃气体浓度, 阻断爆炸反应链的起始形成与传递, 从而更有效地抑制爆炸压力上升; 而在远火端喷射时, 惰性气体需要经过一定时间和空间的扩散才能到达反应区域, 在此过程中, 爆炸反应已在一定程度上完成初期演化, 形成初步的反应链传递与能量释放, 所以爆炸抑制效果较差。



(a) 近火端



(b) 远火端

图 2 不同 N₂ 和 CO₂ 喷射位置下 H₂-CH₄ 混合气体爆炸压力Fig. 2 Explosion pressure of H₂-CH₄ mixture at different N₂ and CO₂ injection positions

惰性气体不同喷射角度对 H₂-CH₄ 混合气体爆炸压力的影响如图 3 所示。可看出: 在近火端 N₂ 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大爆炸压力相较于无抑爆时分别降低了 86.3, 94.1, 109.2 kPa; 在远火端 N₂ 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大爆炸压力相较于无抑爆时分别降低了 30.6, 38.4, 54.0 kPa; 在近火端 CO₂ 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大爆炸压力相较于无抑爆时分别降低了 103.5, 112.1, 148.5 kPa; 在远火端 CO₂ 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大爆炸压力相较于无抑爆时分别降低了 72.7, 92.5,

104.7 kPa。由此可见,随着喷射角度增大,惰性气体对 H_2-CH_4 混合气体爆炸压力的抑制效果逐渐增强。这是由于更大的喷射角度能使惰性气体更均匀地与 H_2-CH_4 混合,有效降低可燃混合气体浓度。

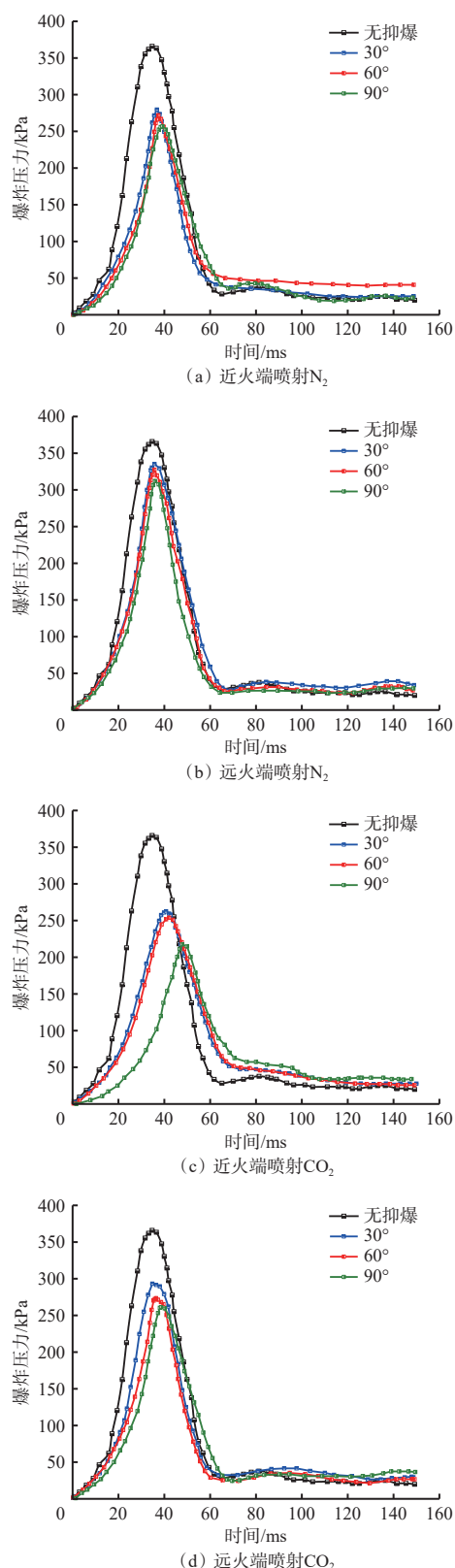


图 3 不同 N_2 和 CO_2 喷射角度下 H_2-CH_4 混合气体爆炸压力
Fig. 3 Explosion pressure of H_2-CH_4 mixture at different N_2 and CO_2 injection angles

2.2 惰性气体喷射参数对火焰传播速度的影响

N_2 和 CO_2 喷射位置对火焰传播速度的影响如图 4 所示。可看出: ① 在近火端喷射 CO_2 和 N_2 时的最大火焰传播速度相较于无抑爆时分别降低了 10.6, 7.3 cm/s, 在近火端喷射 CO_2 时的最大火焰传播速度比喷射 N_2 时降低了 3.3 cm/s; 在远火端喷射 CO_2 和 N_2 时的最大火焰传播速度相较于无抑爆时分别降低了 6.9, 3.9 cm/s, 在远火端喷射 CO_2 时的最大火焰传播速度比喷射 N_2 时降低了 3.0 cm/s。这表明 N_2 和 CO_2 对火焰传播速度均展现出明显的抑制作用, 且 CO_2 的抑制效果强于 N_2 。② 在近火端喷射 N_2 时的最大火焰传播速度比在远火端喷射 N_2 时降低了 3.4 cm/s, 在近火端喷射 CO_2 时的最大火焰传播速度比在远火端喷射 CO_2 时降低了 3.7 cm/s, 表明在近火端喷射惰性气体对火焰传播速度的抑制效果要明显优于远火端。这是由于近火端喷射惰性气体能够在火焰刚产生时就对其进行干扰, 阻断火焰的能量传递路径, 使火焰难以持续传播; 而远火端喷射的惰性气体需要时间扩散到火焰区域, 此时火焰已经有了一定的传播距离和能量积累, 火焰传播速度抑制效果相对较弱。

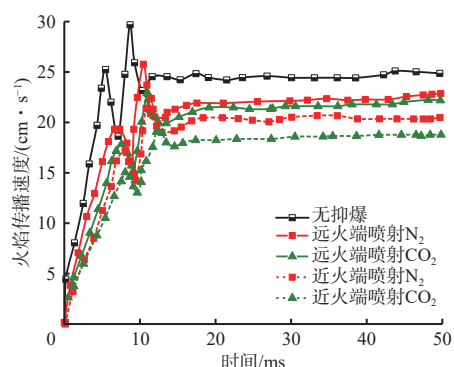


图 4 不同 N_2 和 CO_2 喷射位置下火焰传播速度
Fig. 4 Flame propagation speed at different N_2 and CO_2 injection positions

不同 N_2 和 CO_2 喷射角度对最大火焰传播速度的影响如图 5 所示。可看出: 在近火端 N_2 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大火焰传播速度相较于无抑爆时分别降低了 3.8, 6.2, 7.3 cm/s; 在远火端 N_2 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大火焰传播速度相较于无抑爆时分别降低了 2.1, 3.0, 3.9 cm/s; 在近火端 CO_2 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大火焰传播速度相较于无抑爆时分别降低了 4.9, 8.9, 10.6 cm/s; 在远火端 CO_2 喷射角度分别为 30, 60, 90° 时, 最大火焰传播速度相较于无抑爆时分别降低了 2.9, 5.1, 6.9 cm/s。这表明随着喷射角度增大, 惰性气体对最大火焰传播速度的抑制效果逐渐增强。其原因在

于,更大的喷射角度能使惰性气体更广泛、更均匀地与 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体接触,有效阻隔火焰的传播路径。

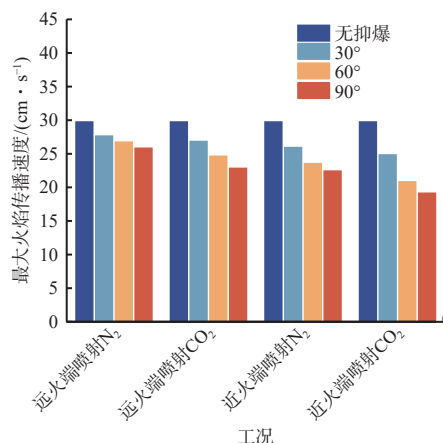
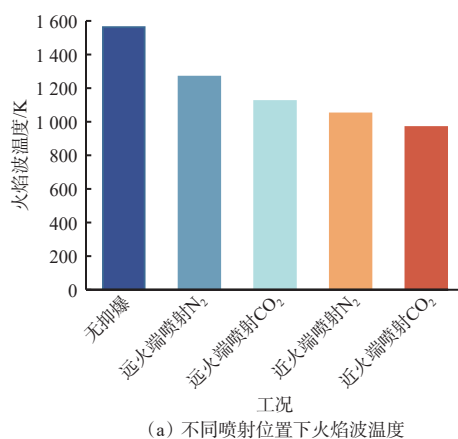


图 5 不同 N_2 和 CO_2 喷射角度下最大火焰传播速度

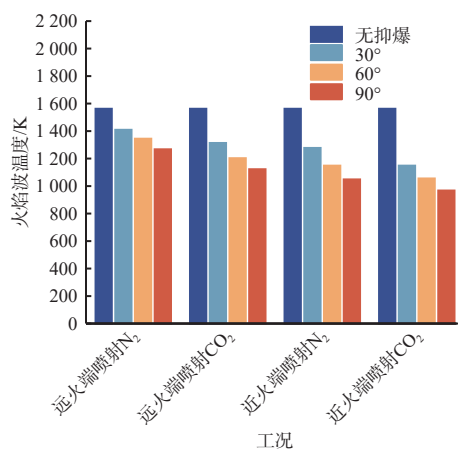
Fig. 5 Maximum flame propagation speed at different N_2 and CO_2 injection angles

2.3 惰性气体喷射参数对火焰波温度的影响

CO_2 与 N_2 喷射位置和喷射角度对火焰波温度的影响如图 6 所示。



(a) 不同喷射位置下火焰波温度



(b) 不同喷射角度下火焰波温度

图 6 不同 CO_2 与 N_2 喷射位置和喷射角度下火焰波温度

Fig. 6 Flame front temperature at different CO_2 and N_2 injection positions and angles

从图 6(a)可看出: ① 在近火端喷射 CO_2 和 N_2

时的火焰波温度相较于无抑爆时分别降低了 595, 514 K, 且在近火端喷射 CO_2 时的火焰波温度比喷射 N_2 时降低了 81 K; 在远火端喷射 CO_2 和 N_2 时的火焰波温度相较于无抑爆时分别降低了 440, 295 K, 且在远火端喷射 CO_2 时的火焰波温度比喷射 N_2 时降低了 145 K。这表明 N_2 和 CO_2 对火焰波温度均展现出明显的抑制作用, 且 CO_2 的抑制效果强于 N_2 。② 在近火端喷射 N_2 时的火焰波温度比远火端时降低了 219 K, 在近火端喷射 CO_2 时的火焰波温度比远火端时降低了 155 K, 表明在近火端喷射惰性气体对火焰波温度的抑制效果要明显优于远火端。这是由于 CO_2 具有较高的比热容, 在吸收相同热量时自身温度升高幅度较小, 能够更有效地带走爆炸反应产生的热量, 并且在高温环境下, CO_2 会分解为 CO 和 O_2 , 这一分解过程是强吸热反应, 直接削减了火焰波的能量根基; 此外, 在近火端喷射惰性气体时, 能够在火焰波初始产生的瞬间就与之接触并发挥作用, 此时爆炸反应热量释放较少, 惰性气体能够迅速稀释可燃混合气体, 从而极大程度地降低火焰波温度。

从图 6(b)可看出: 在近火端 N_2 喷射角度分别为 30, 60, 90°时, 火焰波温度相较于无抑爆时分别降低了 285, 414, 514 K; 在远火端 N_2 喷射角度分别为 30, 60, 90°时, 火焰波温度相较于无抑爆时分别降低了 153, 218, 295 K; 在近火端 CO_2 喷射角度分别为 30, 60, 90°时, 火焰波温度相较于无抑爆时分别降低了 414, 507, 595 K; 在远火端 CO_2 喷射角度分别为 30, 60, 90°时, 火焰波温度相较于无抑爆时分别降低了 249, 360, 440 K。这表明随着喷射角度增大, 火焰波温度逐渐降低。这是由于更大的喷射角度使得惰性气体能够更均匀地与可燃气体充分混合, 增强了对火焰波的能量阻隔和稀释效果。

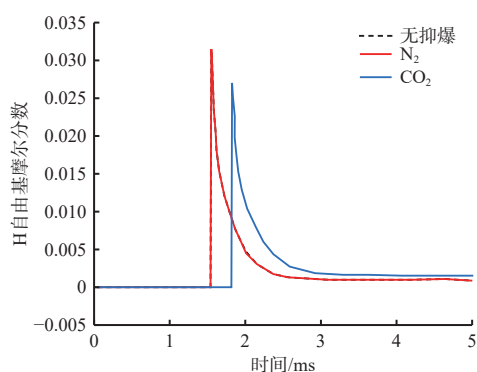
3 机理分析

众多研究表明, H 自由基和 OH 自由基的浓度对燃烧反应进程有直接影响^[19-21]。本文基于 Chemkin-Pro 模拟软件, 使用层流燃烧计算模块对 N_2 和 CO_2 作用下 $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体爆炸进行模拟研究。选择封闭的均质零维反应器, 初始环境条件设定为温度 298.0 K、压力 101 325 Pa, CH_4 体积分数为 9.5%。

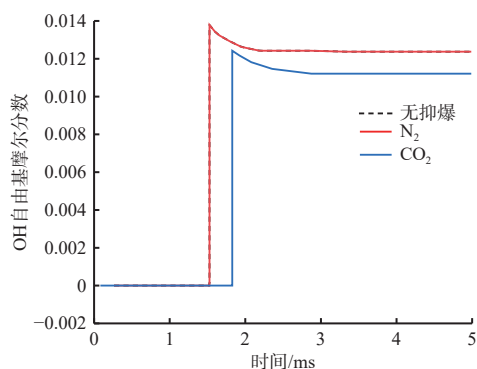
3.1 N_2 和 CO_2 抑制爆炸机理分析

CO_2 和 N_2 对 H 自由基和 OH 自由基摩尔分数的影响如图 7 所示。可看出, 在加入 CO_2 工况下, H 自由基和 OH 自由基摩尔分数峰值分别为 0.027 0 和 0.012 4, 相较于无抑爆时分别下降了 14.2% 和 9.9%; 在加入 N_2 工况下, H 自由基和 OH 自由基摩尔分数

相较于无抑爆时几乎无差别。这是由于 CO_2 与 N_2 抑制爆炸机理存在本质区别: ① CO_2 抑制爆炸机理兼具化学与物理作用。在化学层面, CO_2 可参与爆炸链式反应的关键步骤(如 $CO_2+H\rightarrow CO+OH$), 直接消耗爆炸产生的关键自由基, 从微观层面阻断反应链的传递; 在物理层面, CO_2 具有较高的比热容, 可通过吸收反应释放的热量来降低爆炸反应温度, 同时降低可燃气体浓度, 减少分子碰撞频率。② N_2 以物理作用为主, N_2 化学性质稳定, 在实验温度范围内几乎不参与自由基反应, 其抑制作用主要是降低可燃气体浓度和轻微吸热, 对爆炸产生的自由基浓度的影响较弱。



(a) H 自由基摩尔分数



(b) OH 自由基摩尔分数

图 7 CO_2 和 N_2 对 H 自由基和 OH 自由基摩尔分数的影响Fig. 7 Influence of CO_2 and N_2 on molar fractions of H and OH radicals

3.2 喷射参数对爆炸抑制效果影响的机理分析

1) 喷射位置对爆炸抑制效果的影响。① 当惰性气体在近火端喷射时, 能够在爆炸反应初期(即火焰核形成阶段)与可燃混合气体充分接触, 此时 CO_2 的化学作用可在反应启动阶段快速起效, 配合其物理吸热与稀释作用, 显著抑制爆炸能量的积累。 N_2 虽仅依赖物理稀释, 但近火端喷射能更早降低可燃混合气体浓度, 减少初始反应的自由基生成量。② 当惰性气体在远火端喷射时, 因扩散延迟, 其与可燃混合气体的接触不够及时充分。 CO_2 的化学作用被弱化, 无法在自由基峰值期有效介入, 主要依

赖物理稀释和后期吸热, 爆炸抑制效果下降。 N_2 的稀释作用因扩散范围有限, 对早期反应的干预不足, 爆炸抑制效果更弱。

2) 喷射角度对爆炸抑制效果的影响。① 小角度喷射时, 惰性气体扩散范围有限, 与可燃混合气体混合不均。 CO_2 的化学作用仅在局部区域起效, 无法形成连续的自由基阻断层, 导致宏观爆炸抑制效果受限。 N_2 的稀释作用集中在小范围, 难以有效降低整体可燃气体的浓度。② 大角度喷射时, 惰性气体呈扇形扩散, 与可燃混合气体混合更均匀。 CO_2 可在更大范围内参与自由基反应, 配合均匀的物理吸热与稀释, 显著增强爆炸抑制效果。 N_2 的稀释作用覆盖范围扩大, 能更有效地降低整体可燃气体浓度。

综上, 喷射位置决定“作用时效”(近火端实现爆炸反应初期介入, 远火端实现爆炸反应延迟介入), 喷射角度决定“覆盖均匀性”(大角度喷射实现全域均匀覆盖, 小角度喷射仅实现局部覆盖)。因此, “近火端+大角度”的组合喷射方式能够最大化发挥 CO_2 在自由基消耗、物理吸热与稀释可燃气体方面的协同抑制效应; “远火端+小角度”的组合喷射方式则因扩散延迟与气体混合不均的双重制约, 削弱了惰性气体的抑爆效能。

4 结论

1) CO_2 对于抑制爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度的效果优于 N_2 。在近火端喷射 CO_2 时的最大爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度比喷射 N_2 时分别降低了 39.4 kPa, 3.3 cm/s 和 81 K; 在远火端喷射 CO_2 时的最大爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度比喷射 N_2 时分别降低了 50.7 kPa, 3.0 cm/s 和 145 K。

2) 在近火端喷射惰性气体的抑爆能力优于远火端。近火端喷射 CO_2 时的最大爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度比远火端喷射 CO_2 时分别降低了 43.9 kPa, 3.7 cm/s 和 155 K; 近火端喷射 N_2 时的最大爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度比远火端喷射 N_2 时分别降低了 55.2 kPa, 3.4 cm/s 和 219 K。

3) 随着喷射角度增大, 最大爆炸压力、火焰传播速度和火焰波温度均呈逐渐降低趋势, 惰性气体抑爆能力逐渐增强。

4) “近火端+大角度”的组合喷射方式能够最大化发挥 CO_2 在自由基消耗、物理吸热与稀释可燃气体方面的协同抑制效应; “远火端+小角度”的组合喷射方式则因扩散延迟与气体混合不均的双重制约, 削弱了惰性气体的抑爆效能。

参考文献(References):

- [1] 杨鹏飞, 田水承. 煤矿瓦斯爆炸高概率险兆事件致因因素重要度研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(8): 2794-2801.
YANG Pengfei, TIAN Shuicheng. Research on the importance degree of causal factors of high-probability near-miss of coal mine gas explosion[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(8): 2794-2801.
- [2] 张莉聪, 李斯曼, 周振兴. 煤矿瓦斯多相协同抑爆的研究进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增刊 1): 97-104.
ZHANG Licong, LI Siman, ZHOU Zhenxing. Research progress and prospect of multi-phase synergistic explosion suppression of coal mine gas[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 97-104.
- [3] 陈晓坤, 王君, 程方明. 氢气抑爆材料及其抑爆机理研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(11): 16-40.
CHEN Xiaokun, WANG Jun, CHENG Fangming. Research progress on hydrogen gas explosion suppression materials and their suppression mechanisms[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(11): 16-40.
- [4] 王昊哲, 郭进, 吴佳晗, 等. 掺氢比对氢气-甲烷-空气燃爆特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(2): 669-678.
WANG Haozhe, GUO Jin, WU Jiahuan, et al. Effect of hydrogen ratio on explosion characteristics of hydrogen-methane-air mixtures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(2): 669-678.
- [5] 蔡冲冲, 苏洋, 王燕. 富氢甲烷的爆燃特性与爆炸抑制研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(7): 14-37.
CAI Chongchong, SU Yang, WANG Yan. Research progress on the deflagration characteristics and explosion suppression of hydrogen-rich methane[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(7): 14-37.
- [6] 万小刚, 刘伟, 方坦, 等. 甲烷添加对氢气燃爆特性的影响[J]. 力学与实践, 2022, 44(4): 786-793.
WAN Xiaogang, LIU Wei, FANG Tan, et al. Effect of methane addition on hydrogen combustion and explosion characteristics[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(4): 786-793.
- [7] 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.
- [8] ZHANG Siyu, WEN Xiaoping, GUO Zhidong, et al. Experimental study on the multi-level suppression of N₂ and CO₂ on hydrogen-air explosion[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 169: 970-981.
- [9] SU Yang, LUO Zhenmin, WANG Tao, et al. Effect of nitrogen on deflagration characteristics of hydrogen/methane mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(15): 9156-9168.
- [10] 邹颖, 董冰岩, 查裕学, 等. 密闭受限空间内 N₂、CO₂ 对 H₂/Air 混合气体的抑爆效果研究[J]. 科技与创新, 2022(17): 87-92.
ZOU Ying, DONG Bingyan, ZHA Yuxue, et al. Study on explosion suppression effect of N₂ and CO₂ on H₂/Air mixed gas in closed confined space[J]. Science and Technology & Innovation, 2022(17): 87-92.
- [11] 罗振敏, 南凡, 孙亚丽, 等. 掺氢比和 CO₂ 对掺氢天然气爆炸特性的影响[J/OL]. 爆炸与冲击: 1-14[2025-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1148.O3.20250108.1344.008>.
LUO Zhenmin, NAN Fan, SUN Yali, et al. Effects of hydrogen ratio and CO₂ on the explosion characteristics of hydrogen-doped natural gas[J/OL]. Explosion and Shock Waves: 1-14[2025-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1148.O3.20250108.1344.008>.
- [12] 陈晓坤, 马赛燕, 程方明, 等. 半封闭管道内 CO₂ 对掺氢甲烷燃爆特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12): 4279-4286.
CHEN Xiaokun, MA Saiyan, CHENG Fangming, et al. Influence of CO₂ on the combustion and explosion characteristics of hydrogen-doped methane in a semi-closed pipe[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(12): 4279-4286.
- [13] 苏洋, 罗振敏, 王涛. CO₂/海泡石抑爆剂对氢气/甲烷爆炸特性参数的影响[J]. 化工进展, 2022, 41(11): 5731-5736.
SU Yang, LUO Zhenmin, WANG Tao. Effect of CO₂/sepiolite explosion suppressant on hydrogen/methane deflagration characteristic parameters[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(11): 5731-5736.
- [14] 张蓓蓓, 程扬帆, 夏煜, 等. 弱约束条件下氢气含量对甲烷/空气燃爆特性的影响研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(6): 255-261.
ZHANG Beibei, CHENG Yangfan, XIA Yu, et al. Effects of hydrogen content on methane/air deflagration characteristics under a weak constraint condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(6): 255-261.
- [15] 王明晓, 邓凯, 管清强, 等. 不同当量比下氢气体积分数对甲烷-氢混合气预混火焰燃烧不稳定性影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2851-2858.
WANG Mingxiao, DENG Kai, GUAN Qingqiang, et al. Effect of hydrogen volume fraction on combustion instability of hydrogen/methane premixed flame under different equivalence rates[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2851-2858.

(下转第 147 页)