

DOI: 10.11883/bzycj-2025-0048

非预混 CO₂ 喷射压力对掺氢天然气 预混爆炸特性的影响*

张玉春, 杨文, 张坤, 蒋保平, 阳旭峰

(西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 煤制氢是煤炭能源低碳转型的有效方案, 针对煤制氢通入天然气管网大规模输送过程中的安全问题, 研究非预混 CO₂ 喷射对掺氢天然气爆炸特性的影响。设计并搭建了爆炸实验平台, 探究非预混 CO₂ 的喷射压力(0~1.00 MPa)和喷射时间(0~180 ms, 喷射早于点火开启的时间)对爆炸火焰传播行为和压力特性的影响。结果表明: 非预混 CO₂ 喷射显著影响甲烷/氢气/空气预混气的爆炸行为。CO₂ 喷射会引起湍流效应导致火焰褶皱和结构改变, 从而使火焰的传播速度和爆炸压力增大。当喷射时间固定(如 0 或 120 ms)时, 增大喷射压力会引入更多的 CO₂, 增强局部湍流和扰动, 加剧火焰加速和爆炸后果。随着喷射时间延长, 不同喷射压力下最大爆炸压力均呈先升后降的趋势。CO₂ 喷射对爆炸湍流的促进作用和稀释作用相互竞争, 并存在临界喷射时间。过多的 CO₂ 喷射时会增强它的稀释作用, 削弱 CO₂ 喷射对爆炸的湍流扰动能力, 降低爆炸强度。此外, 较高的喷射压力有更短的临界喷射时间, 同时较高喷射压力下的最大爆炸压力对喷射时间的变化有更强的敏感性。

关键词: 煤制氢; 甲烷/氢气; 预混爆炸; CO₂ 喷射; 喷射压力

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Effects of non-premixed CO₂ injection pressure on the premixed explosion characteristics of hydrogen-doped natural gas

ZHANG Yuchun, YANG Wen, ZHANG Kun, JIANG Baoping, YANG Xufeng

(Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: Coal-to-hydrogen is an effective solution for the low-carbon transformation of coal energy. However, transporting hydrogen via the natural gas pipeline network poses significant explosion safety challenges. To address these concerns, the effect of non-premixed CO₂ injection on the explosion characteristics of hydrogen-doped natural gas was investigated. An experimental explosion platform was independently designed and constructed to actively release CO₂ into the hydrogen-doped methane explosion via a high-pressure gas injection device. The CO₂ injection was initiated prior to ignition, creating a non-premixed turbulent atmosphere. The volume of CO₂ injection was controlled by injection pressure (0, 0.5, 0.75, and 1.00 MPa) and injection time (0, 60, 120, and 180 ms). The dynamics of explosion flame propagation and pressure behavior under non-premixed CO₂ injection were analyzed. Results showed that injection pressure and injection time significantly influence the premixed explosion process. The injection of non-premixed CO₂ into the premixed explosion induces turbulence, causing flame wrinkling. Structural changes in wrinkled flames increase the flame surface area, leading to accelerate flame propagation and enhance explosion intensity. For a given injected time (e.g., 0 or 120 ms), increasing the injection pressure introduces more CO₂, which enhances localized turbulence and disturbance in the flame, leading to further flame acceleration and more severe

* 收稿日期: 2025-02-19; 修回日期: 2025-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(52278415, 52204241, U24A20172)

第一作者: 张玉春(1980—), 男, 博士, 教授, zycfire@home.swjtu.edu.cn

通信作者: 阳旭峰(1992—), 男, 博士, 副教授, xf_yang718@swjtu.edu.cn

explosion consequences. As the injection time increases, the maximum explosion pressure of different injection pressures increases and then decreases. CO₂ injection in the explosion plays a competitive relationship between turbulence promotion and dilution effect, with a critical injection time. Excessive CO₂ injection can enhance its dilution effect, weakening the CO₂ injection on the explosion of turbulence perturbation ability, which reduces the explosion intensity. Moreover, a higher injection pressures correspond to shorter injection time. Meanwhile, the maximum explosion pressure at larger injection pressures is more sensitive to changes in injection time. Injection pressure and injection time are the key parameters governing the impact of CO₂ injection on the explosion hazard of hydrogen-doped natural gas. The findings provide fundamental guidelines for the safety prevention and control strategy of hydrogen transportation in the natural gas pipeline network.

Keywords: coal-to-hydrogen; methane/hydrogen; premixed explosion; CO₂ injection; injection pressure

我国能源结构以煤为主且短期不会发生根本改变^[1]。为实现“双碳”目标以应对环境污染、气候变化挑战^[2],煤炭低碳化转型势在必行。煤制氢是煤炭能源转型的重要途径^[3-4],但其发展受氢气基础设施薄弱、输氢管道建设成本高等严重制约。为突破这一困境,将氢气掺入现有天然气管网(甲烷-氢气混合运输)是具有成本效益的氢气储存和运输方式^[5]。但天然气管网掺氢运输会诱发管道氢脆或腐蚀^[6],增加其输运过程中的泄漏风险。此外,烷烃燃料中添加氢气会引起其物化性质变化(如扩大可燃极限范围、扩散系数等),加剧爆炸风险和严重程度^[7]。因此,为预防和减轻掺氢天然气(CH₄/H₂燃料)爆炸危害,有必要深入研究 CH₄/H₂/空气混合物的爆炸特性及探究相应的抑爆措施。

当前,天然气掺氢运输已在一些国家和地区实践,如德国规定混氢比例不得超过 10%^[8],香港城燃管网中含氢比例达 49%。不同掺氢比例对爆炸特性有重要影响。罗振敏等^[9]利用 20 L 球形爆炸容器针对掺氢比和 CO₂ 添加对掺氢天然气爆炸特性的影响开展了研究,发现掺氢比对其爆炸压力和火焰传播速度有促进作用。梅亮等^[10]采用圆柱形密闭容器进行爆炸实验,并讨论了掺氢比和当量比对火焰演化和压力特性的影响,发现在固定当量比下,随着掺氢比增大,最大爆炸压力、爆炸指数和层流燃烧速度随之增大,形成最大压力和最大压升速率的时间被缩短。然而,一旦掺氢比过高,可能会导致爆炸危险性急剧增加^[11-12]。Lowesmith 等^[13]利用 69.3 m³ 爆炸室开展了实验,评估了氢气浓度对甲烷/氢气混合物爆炸超压的影响,结果表明,在甲烷中加入 20% 的氢气会导致爆炸火焰速度和超压略有增大,但加入 50% 的氢气时,则会显著增大。Shang 等^[14]研究了掺氢比、等效比及二氧化碳和氮气稀释下的 CH₄/H₂/空气的混合气体层流燃烧速度,结果表明,在氢气体积分数低于 50% 的情况下,CH₄/H₂/空气混合物的层流燃烧速度随着氢气体积分数增加而呈线性增长,但随着氢气体积分数的增加而进一步增大,CH₄ 主导的燃烧逐渐转变为 CH₄ 抑制下的氢气燃烧,导致层流火焰速度呈非线性的剧烈增长。另外,考虑到天然气运输管道的材料,天然气中 50% 氢气比例被称为临界值,一旦超过该比例,管道材料失效^[15],掺氢天然气管道输送中的泄漏风险极大增加。

针对 CH₄/H₂ 混合气体的爆炸危险,亟需有效抑制手段减轻其爆炸后果。惰性气体(如 CO₂)凭借高效、清洁和低成本特点成为优选方案^[16]。Zhang 等^[17]通过实验研究了 N₂ 和 CO₂ 对预混 H₂/空气爆炸火焰行为的影响,结果表明, N₂ 和 CO₂ 都能抑制火焰变形,其中 CO₂ 的抑制作用更强。Wang 等^[18]研究了 N₂ 和 CO₂ 对可燃气体在密闭空间内爆炸行为的影响,实验证实了 CO₂ 会延长爆炸持续时间和降低爆炸压力。惰性气体的稀释效应可分为物理效应(降低氧浓度)和化学效应(参与反应)^[19]。Luo 等^[20]测试了 20 L 球中 CO₂ 对富氢天然气爆炸的抑制作用及化学动力学机制,结果表明,CO₂ 在反应体系中主要起到稳定第三体反应的作用,从而减缓爆炸链式反应的增长。

现有研究多集中于预混条件下惰性气体抑爆(惰性气体与燃料/空气预先均匀混合)。在实际工业场景中,惰性气体通过高压储气装置主动释放后与可燃气体形成非预混体系,这种动态混合过程会形成局部浓度梯度,扰动爆炸过程。惰性气体的初始释放状态(如喷射压力)可能会扰乱气体流动状态,使得爆炸更为复杂。本文中通过惰性气体主动喷射系统,研究不同喷射压力下非预混 CO₂ 喷射对 CH₄/H₂/空气预混气爆炸行为的影响,研究成果以期为实际场景可燃混合气爆炸安全防控提供支持。

1 实 验

1.1 实验装置

实验利用自主搭建的可视化爆炸实验平台,由爆炸管道、气体分配系统、脉冲点火系统、数据采集系统和主动式惰性气喷射系统等组成,如图 1 所示。具体包括:(1)爆炸管道总长度为 1500 mm,横截面 100 mm×100 mm,管道两端刚性封闭,考虑到安全因素,在距右端 100 mm 处设置泄爆口并用 PVC 膜封闭。(2)气体分配系统包括 H₂、CH₄ 和空气(纯度>99.99%)的高压气瓶、质量流量控制器和气管通路。由质量流量控制器精确控制 H₂、CH₄ 和空气的体积分数并在气管通路中混合成为预混 CH₄/H₂/空气混合气体,随后将其通入爆炸管道。为保证管道内气体均匀和排除管道内杂气,将至少 5 倍管道体积的预混混合气后通入管道^[21]。(3)脉冲点火系统为自制脉冲点火器,安装在管道左端中心,电压为 6 V,释放约 100 mJ 点火能量。(4)数据采集系统包括高速摄像机、2 个高频压力传感器、同步控制器。高速摄像机以 4000 s⁻¹ 的频率捕捉爆炸火焰瞬态。2 个高频压力传感器测量爆炸压力信号随时间的变化,分别安装在管道的左右两端,左端的压力传感器为 PT₁,右端为 PT₂。图像和压力数据采集由同步控制器控制和激发。(5)主动式惰性气喷射系统由 1 L 储气罐、电磁阀、压力表和 CO₂ 气瓶(纯度>99.99%)组成。储气罐安装在距管道左端 250 mm 处。储气罐进出口处的电磁阀控制 CO₂ 进入储气罐和喷射到管道中。储气罐内压力由压力表显示。利用主动式惰性气喷射系统能够实现非预混 CO₂ 的主动喷射,以观察其对预混爆炸的影响。

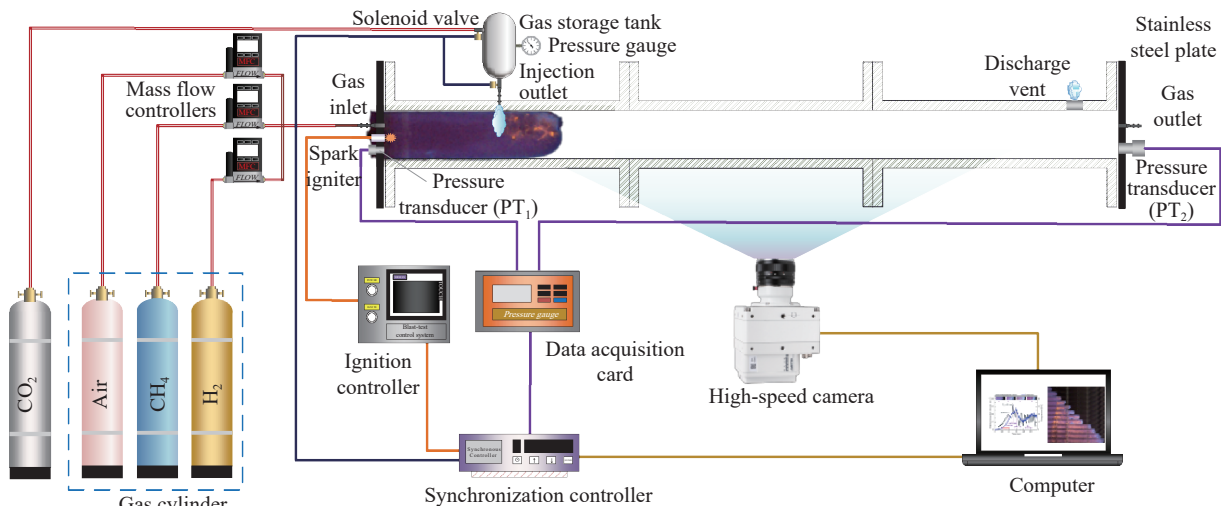


图 1 爆炸实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the explosion experimental system

1.2 实验工况

为模拟真实场景下惰性气主动释放下掺氢天然气爆炸过程,首先通过调整质量流量控制器,配比出当量比 $\phi=1.0$ 、氢气体积分数为 50% 的 CH₄/H₂/空气混合气体并通入密封管道。氢气体积分数 φ_{H_2} 为:

$$\varphi_{H_2} = V_{H_2} / (V_{H_2} + V_{CH_4}) \quad (1)$$

式中: V_{H_2} 和 V_{CH_4} 分别为 H₂ 和 CH₄ 的体积。然后,将非预混的高纯度 CO₂ 通过惰性气喷射系统喷射进爆炸管道,随后点火引燃管道内可燃气。通过控制高压储气罐内充装 CO₂ 的体积,设置初始喷射压力 p_i 分别为 0(即无喷射)、0.50、0.75 和 1.00 MPa。将惰性气喷射开始和点火开始之间的时间间隔定义为喷射时间 t_i 。当 $t_i > 0$ ms 时,喷射早于点火开启建立非预混 CO₂ 主动释放的惰化环境。当 $t_i = 0$ ms 时,点火和喷射同时触发,CO₂ 动态释放和燃烧同步发展。 t_i 分别设置为 0、60、120 和 180 ms。实验工况见表 1。实验在冬季进行,环境温度为 (288 ± 2) K,压力为标准大气压 101.325 kPa。为保证实验数据的准确性和减小实验误差,每组实验工况重复 3~5 次。

表 1 实验配置

Table 1 Experimental settings

ϕ	$\varphi_{H_2}/\%$	喷射位置/mm	p_i/MPa	平均流量/(L·s ⁻¹)
1.0	50	250	0(无喷射)	—
			0.50	1.33
			0.75	2.00
			1.00	3.33

2 结果与讨论

2.1 火焰演化过程

图 2 为 $t_i = 0$ ms 时不同 CO₂ 喷射压力下的 CH₄/H₂/空气预混气爆炸火焰的传播过程。从图 2(a) 可以看出, $p_i = 0$ MPa 即无喷射的情况下, 火焰呈现经典四阶段结构演化, 即半球形、指形、平面形和郁金香形^[22], 随后火焰演化为扭曲郁金香形火焰^[23-24]。

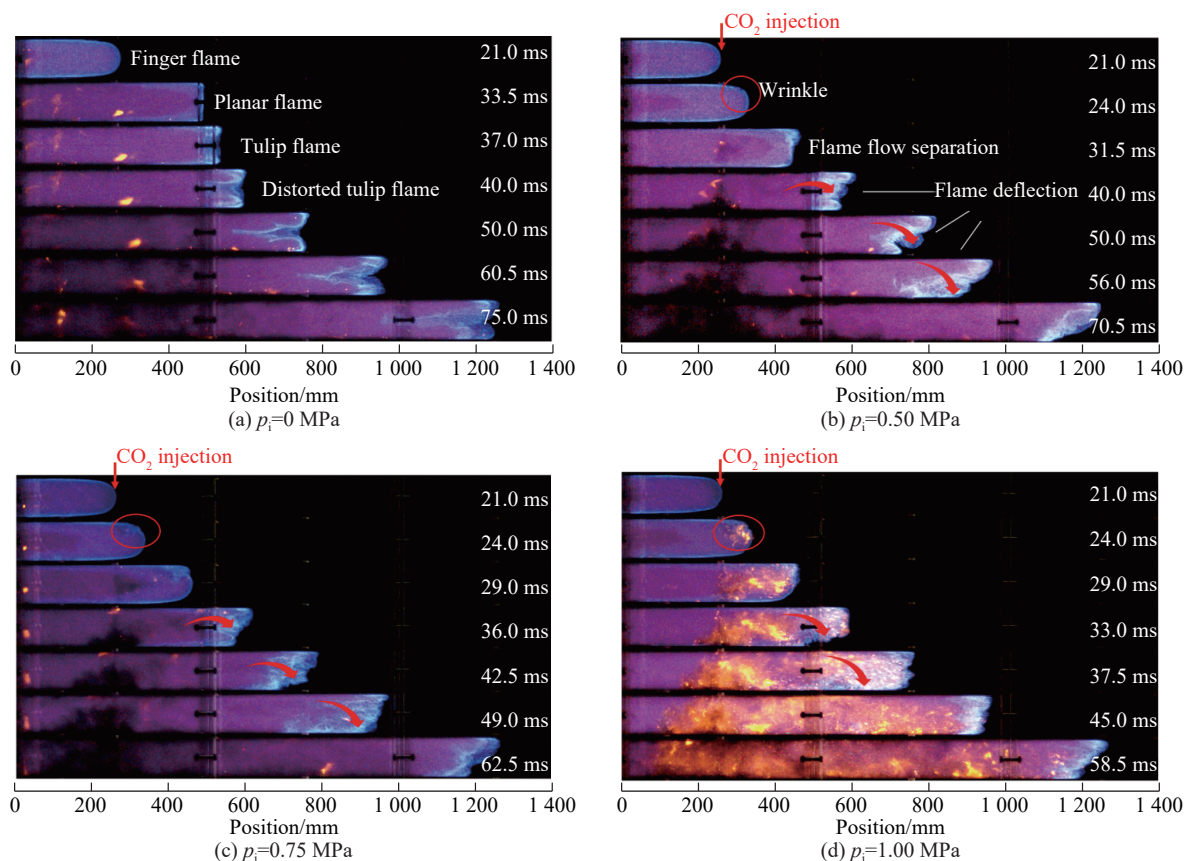


图 2 喷射时间为 0 ms 时火焰瞬态

Fig. 2 Flame transient when injection duration is 0 ms

从图 2(b)~(d) 可以看出, CO₂ 喷射显著改变火焰结构。以 $p_i = 0.50$ MPa 为例, 点火后 0~21.0 ms 内火焰呈指形传播, 与无 CO₂ 喷射情况下表现一致; $t = 24.0$ ms 时, CO₂ 喷射破坏火焰上侧表面(即火焰上层)并诱发湍流褶皱; $t = 31.5$ ms 时, 喷射增强的火焰上层的轴向流动快于下层, 其速度差引发火焰流动分离; 随后, $t = 40.0 \sim 56.0$ ms 时, 分离的火焰因燃烧膨胀产生径向扩展, 火焰流动偏转直至接触管壁; 最终形成湍流火焰($t = 70.5$ ms)。随着 p_i 增大(0.75 和 1.00 MPa), 导致火焰传播时间进一步缩短, 例如火焰传播至

1 300 mm 位置所需时间由 75.0 ms($p_i=0$ MPa)缩短至 58.5 ms($p_i=1.00$ MPa), 降幅为 22.0%。当喷射压力增大时, 单位时间内更多体积的 CO₂ 喷射入管道参与燃烧过程, 从而增强 CO₂ 的流动动量, 提升局部湍流强度; 另外, 增大 CO₂ 的喷射压力会提升对火焰的破坏和褶皱程度, 从而通过增大燃烧表面积强化热释放速率。以往研究表明, 火焰的加速度取决于燃料的反应性和火焰前沿的湍流强度^[25]。这种 CO₂ 喷射对火焰起到增强局部湍流和热释放的作用, 从而促进火焰加速传播。

图 3 所示为 $t_i=120$ ms 条件下喷射压力对爆炸火焰结构的影响。相比于 $t_i=0$ ms, $t_i=120$ ms 时 CO₂ 喷射会建立湍流区域, 引起指形火焰前沿产生湍流结构, 从而显著加速火焰早期传播。随着 p_i 从 0.50 MPa 增至 1.00 MPa, 火焰到达喷射位置的时间由 20.5 ms 缩短至 16.0 ms, 降幅为 21.9%。当 $t_i>0$ ms 时, CO₂ 会提前在喷射口附近扩散形成非均匀混合区域; 此外, CO₂ 的流动惯性会引发湍流扰动, 火焰接触扰动区时增强局部物质传输和热量释放, 导致火焰界面褶皱。这种非均匀分布的密度梯度与火焰界面不平衡燃烧的压力梯度会加剧火焰的不稳定性, 促使火焰由层流向湍流转变。而增大 p_i , 无疑会引入更多的 CO₂, 增强和扩大了这一湍流扰动范围, 强化 $t_i=120$ ms 时 CO₂ 喷射对火焰的加速传播。

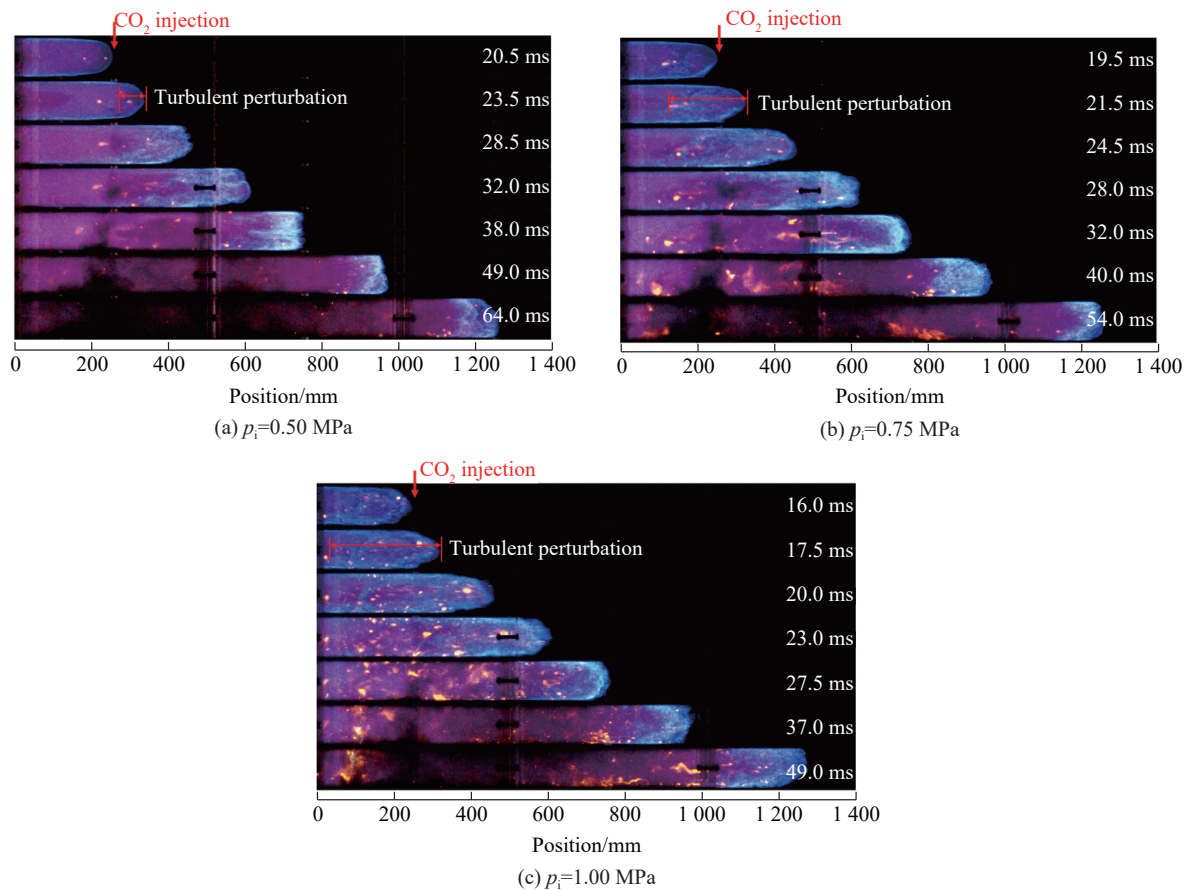


图 3 喷射时间为 120 ms 时火焰瞬态

Fig. 3 Flame transient when injection duration is 120 ms

2.2 火焰传播动力学分析

为分析 CO₂ 喷射对火焰动力学的影响, 定义火焰前沿位置 Z_{tip} 为火焰前沿距管道最左侧的轴向距离, 火焰传播速度 v 由相邻图像火焰位移与时间的比值计算获得。图 4 给出了无喷射($p_i=0$ MPa)情况下, 火焰前沿位置和火焰传播速度的耦合关系。联系图 2(a) 可知, 点火后, 半球形或指形火焰表面积急剧增大, 燃烧热释放驱动火焰前沿位置和火焰传播速度呈指数增长^[26]。当指形火焰裙边接触管壁淬灭^[27], 火焰表面积减小引发火焰传播减速并形成平面和郁金香形火焰。随后, 火焰形成扭曲郁金香形火

焰并伴随周期性速度振荡, 其平均振幅为 7.5 m/s。这种火焰速度振荡行为与火焰-压力波相互作用有关^[28], 即压力波在管道内往复运动并与火焰相互作用, 触发 Rayleigh-Taylor 不稳定性导致火焰表面周期性扭曲及表面面积变化^[23], 形成速度振荡特征。

如图 5 所示, CO₂ 喷射(以 $p_i=1.00$ MPa 为例)可显著影响爆炸火焰传播行为。对于 $t_i=0$ ms (图 5(a)), 在 $t=0\sim 21.0$ ms 内火焰并未受到 CO₂ 喷射的影响, 仍保持光滑半球形或指形火焰结构; 在 $t=21.0\sim 42.0$ ms 内, CO₂ 喷射引起火焰流动分离与偏转, 促使局部湍流增强和火焰加速, 并形成速度峰值 v_{max} , 该工况下 $v_{max}=47.0$ m/s; 在 $t=42.0\sim 63.5$ ms 内, 火焰完全湍流化并呈现稳定速度振荡。对于 $t_i=120$ ms (图 5(b)), CO₂ 喷射早于点火开启所建立的局部湍流环境使得火焰早期加速, 形成更高的速度峰值 $v_{max}=63.9$ m/s。此外, 相比于无喷射工况(图 4), CO₂ 喷射表现出不同火焰振荡模式。相较于无喷射工况(速度平均振幅 7.5 m/s), $t_i=0$ ms 时的平均振幅显著增大至 29.7 m/s, 而 $t_i=120$ ms 时则降低至 5.9 m/s。在 $t_i=0$ ms 时 CO₂ 喷射通过火焰偏转增强燃烧反应, 诱发压力波-火焰强耦合作用, 导致振荡加剧; 在 $t_i=120$ ms 时, 虽然 CO₂ 喷射显著促进了早期火焰发展, 但燃料的过多消耗与喷射的部分 CO₂ 被推向管道下游发挥稀释作用, 两者共同抑制火焰中后期燃烧, 从而降低振荡强度。

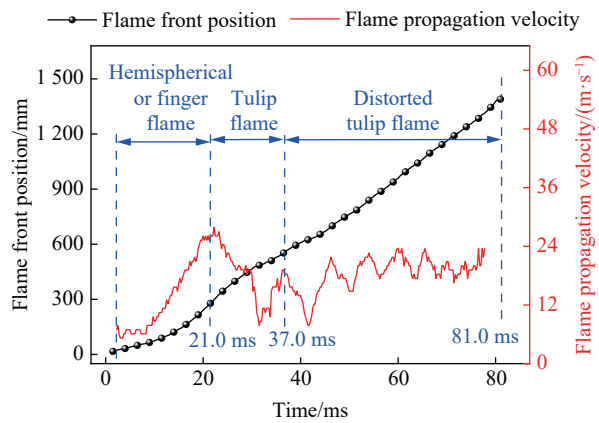


图 4 $p_i=0$ MPa 时火焰前沿位置和火焰传播速度的耦合关系

Fig. 4 Coupling relationship of flame front position and flame propagation velocity for $p_i=0$ MPa

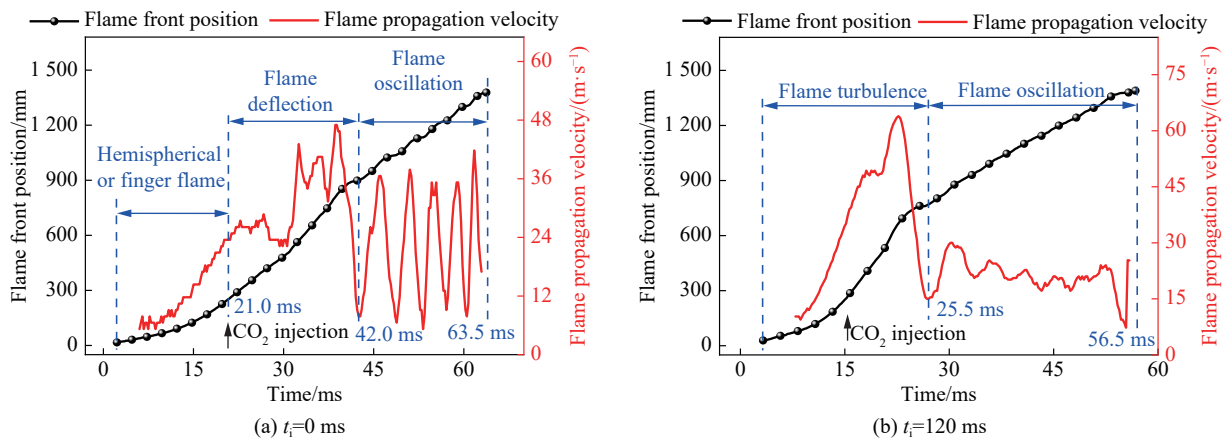


图 5 $p_i=1.00$ MPa 时火焰前沿位置和火焰传播速度的耦合关系

Fig. 5 Coupling of relationship flame front position and flame propagation velocity when $p_i=1.00$ MPa

图 6 展示了不同喷射压力下的火焰前沿位置随时间的演变。当 $t_i=0$ ms 时(图 6(a)), Z_{tip} 在到达喷射口前基本重合, 但后续位置曲线在不同喷射压力下有着显著差异。随着 p_i 由 0 MPa 增至 1.00 MPa, Z_{tip} 变得更为陡峭, 火焰传播至管道末端所需的时间 t_d 从 81.0 ms 递减至 63.5 ms, 降幅为 21.6%。这归因于更高的喷射压力提升了 CO₂ 流量, 加剧 CO₂ 流动和湍流扰动对火焰的影响。当 $t_i=120$ ms 时(图 6(b)), 提前 CO₂ 喷射会形成湍流扰动区, Z_{tip} 在未到达喷射口前受湍流扰动而加速, 进而缩短整体火焰进程, $p_i=1.00$ MPa 工况的 t_d 进一步缩短至 56.5 ms, 降幅为 30.2%(相较于 $p_i=0$ MPa 时)。结合图 3 分析, 提前喷射形成的 CO₂ 扩散湍流区加速火焰初期发展, 而升高 p_i 会增大扩散范围和初始湍流强度进一步加快火焰进程, 使得 Z_{tip} 传播至相同位置有着更短的火焰传播时间。

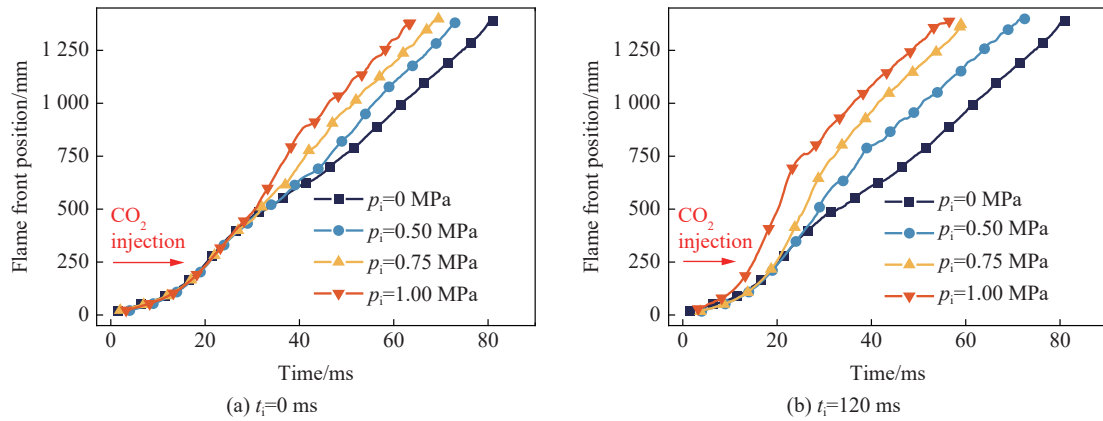


图 6 火焰前沿位置随时间的变化关系

Fig. 6 Variation of flame front position with time

图 7 给出了不同喷射时间 (t_i 分别为 0 和 120 ms) 下火焰传播速度对喷射压力的响应变化。两类喷射时间工况的速度曲线均呈现 CO₂ 喷射诱发火焰加速并形成速度峰值。当 $t_i=0$ ms 时, 随着 p_i 的升高, v_{max} 从 27.9 m/s ($p_i=0$ MPa) 增至 47.0 m/s ($p_i=1.00$ MPa), 增幅为 68.5%; $t_i=120$ ms 时最大增幅 129% ($v_{max}=63.9$ m/s)。无论在 $t_i=0$ 或 120 ms, CO₂ 喷射下的 v_{max} 均随 p_i 的升高而显著增大。值得注意的是, 不同喷射时间下, p_i 从 0.50 到 1.00 MPa 升高时其速度振荡幅度呈不同趋势, $t_i=0$ ms 时振幅增大, 而当 $t_i=120$ ms 时振幅减小。分析可知, $t_i=0$ ms 时 p_i 的升高会导致更强的燃烧, 增强压力波和火焰相互作用引起更大的振幅; 而 $t_i=120$ ms 时, 提前喷射形成的湍流扰动区主导燃烧和加速火焰初期速度, 但随着火焰传播出 CO₂ 扰动区, 其 CO₂ 惰化作用会弱化火焰振荡, 由于 p_i 的升高引入了更多 CO₂, 则会增大速度峰值并使其振幅出现衰减。

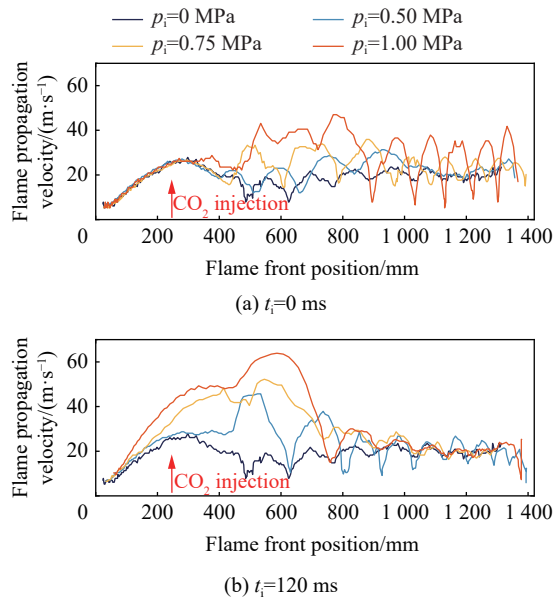


图 7 火焰传播速度随火焰前沿位置的变化关系

Fig. 7 Variation of flame propagation velocity with flame front position

2.3 爆炸压力分析

图 8 展示了不同喷射压力下爆炸压力的变化特征。基于压力传感器 PT₁ 捕获的压力瞬变数据(见图 1, PT₂ 易受泄爆和外部干扰而未采用), 无喷射工况下(即 $p_i=0$ MPa), 点火后压力因火焰热膨胀而迅速升高^[29]; 当火焰裙边接触侧壁与泄爆膜破裂泄放引起压力下降, 并形成第 1 个压力峰值, 随后出现特征性压力振荡。压力振荡是燃烧激发的压力波经管壁反射并往复运动, 压力波与火焰相互作用会驱动火焰失稳并形成扭曲郁金香形火焰周期演化(尖点的持续生成和坍塌并伴随火焰加速和减速), 同时火焰反过来进一步激发和积聚压力波^[23,30-31]。当火焰逐渐接近泄爆口(为安全考虑而设置), 积聚的压力被释放而降低形成第 2 个压力峰值。

如图 8(a) 所示, 当 $t_i=0$ ms 时, 随着 CO₂ 喷射介入, 其湍流扰动导致爆炸压力峰值 p_{max} 增大, 例如 p_{max} 从 29.3 kPa ($p_i=0$ MPa 时) 增至 43.2 kPa ($p_i=1.00$ MPa 时), 增幅为 47.4%。特别是 $p_i=1.00$ MPa, p_{max} 形成在第 1 个压力峰值而不是第 2 个压力峰值。这表明增大提高 CO₂ 喷射压力会进一步增强火焰面燃烧和爆炸强度, 从而抵消火焰接触管壁时表面积损失所引起的压力下降, 甚至在较大喷射压力时, 其爆炸

早期阶段会引起更剧烈爆炸。由图 8(b) 可知, $t_i=120$ ms 时, CO₂ 喷射的 p_{\max} 均为第 1 个压力峰值, 形成 p_{\max} 的时间随喷射压力升高而被显著缩短, 其压力曲线斜率是增大的; 同时随着喷射压力升高, p_{\max} 最大提升至 57.5 kPa ($p_i=1.00$ MPa), 增幅 96.2% (相较于 $p_i=0$ MPa)。此外, 在 p_i 较高时, 压力振荡阶段所形成的第 2 个压力峰值是降低的, 这与速度振荡的平均幅度随 p_i 的升高而降低是吻合的。当 $t_i=120$ ms 时 CO₂ 提前喷射通过湍流扰动增强早期燃烧的能量释放和提升爆炸压力, 而在压力振荡阶段的压力峰值因残余 CO₂ 惰化而被削弱。

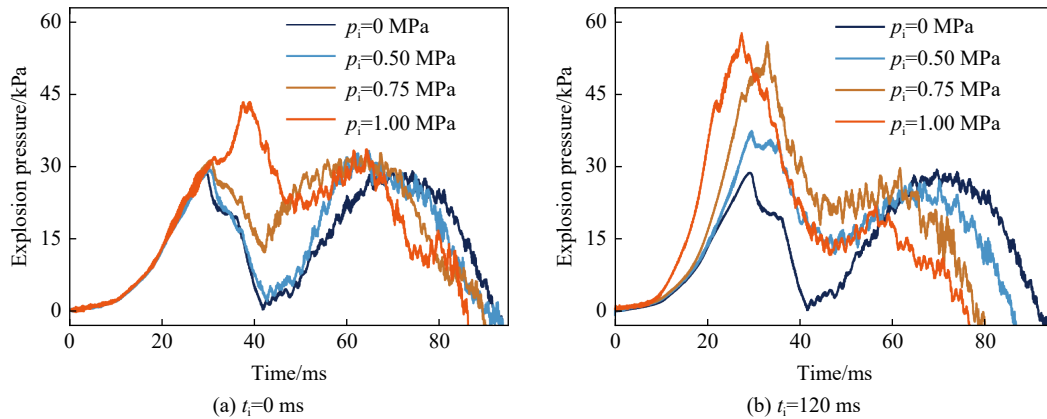
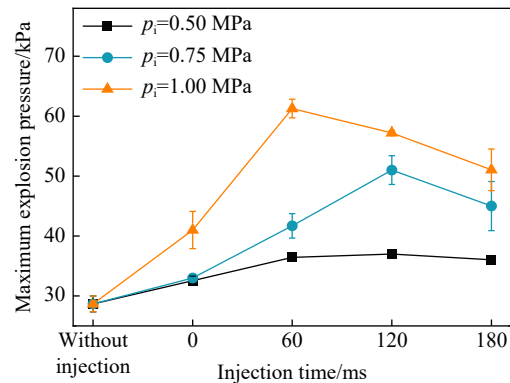


图 8 爆炸压力变化曲线

Fig. 8 Histories of explosion pressure

图 9 给出了不同喷射条件 (p_i 和 t_i) 与最大爆炸压力的关系。当 t_i 不变时, p_{\max} 均随喷射压力升高而升高, 相同喷射时间下提高喷射压力会引入更多 CO₂ 体积与增强流动惯性, 进一步促进爆炸。当 p_i 不变时, p_{\max} 随喷射时间变化呈先升后降的趋势。随着 t_i 的增大, 更多 CO₂ 喷射会增强对爆炸的湍流扰动, 从而使 p_{\max} 增大; 但在 t_i 较大时, 随着引入了更多 CO₂, 其稀释、惰化的作用逐渐增强, 从而削弱了 CO₂ 喷射对爆炸湍流扰动的能力, 导致 p_{\max} 降低并形成极大值。该 p_{\max} 的极大值所对应的喷射时间为因稀释导致湍流扰动能力减弱的临界喷射时间。这表明 CO₂ 喷射对爆炸存在促爆-惰化共存的竞争关系^[32]。同时较高的喷射压力对应更短的临界喷射时间 ($p_i=1.00$ MPa 时 p_{\max} 极大值对应发生在 $t_i=60$ ms 条件下, $p_i=0.50$ 和 0.75 MPa 时, p_{\max} 极大值对应发生在 $t_i=120$ ms 条件下), 其湍流扰动能力更易受到 CO₂ 的稀释而减弱。此外, 这也从侧面验证了图 5(b) 中火焰速度振荡阶段随 p_i 而降低的原因是受到了 CO₂ 的稀释作用。总体上 CO₂ 喷射会引起管道内的爆炸压力的提升并促进火焰发展, 且 p_i 越高, 爆炸压力越高; 在较高喷射压力影响下, p_{\max} 对 t_i 的变化也更敏感。

如图 10 所示, p_{\max} 和 v_{\max} 之间呈线性正相关, 决定系数 $R^2 = 0.904$ 。整体上, 当 CO₂ 喷射参与爆炸时 ($p_i > 0$ 或 $t_i > 0$), 通过扰乱局部流体状态促进火焰传播并增强爆炸的反应强度, 即产生了更高的 p_{\max} 和 v_{\max} 。当喷射压力和喷射时间变化时, CO₂ 喷射的湍流程度决定了湍流扰动影响爆炸强度的能力。此外, 联系图 9 可知, 一旦过多的 CO₂ 喷射, CO₂ 稀释作用会削弱它的湍流增强作用, 相应的弱化喷射对爆炸的

图 9 不同 CO₂ 喷射压力下的最大爆炸压力和喷射时间的关系Fig. 9 Relationship between maximum explosion pressure and injection duration under different CO₂ injection pressures

增强作用。这种喷射压力和喷射时间下 CO₂ 喷射的湍流增强-稀释惰化竞争机制决定了 CO₂ 喷射对爆炸的湍流扰动能力,从而导致不同的爆炸特征。

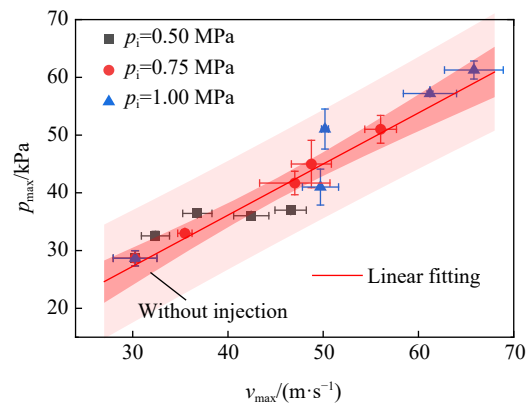


图 10 不同 CO₂ 喷射压力下最大爆炸压力和最大火焰传播速度的关系

Fig. 10 Relationship between maximum explosion pressure and maximum flame propagation velocity under different CO₂ injection pressures

3 结 论

基于自主搭建的爆炸实验平台,研究了主动喷射 CO₂ 的不同喷射压力和时间对 CH₄/H₂/空气的混合气体爆炸的影响,得到的主要结论如下。

(1) CO₂ 喷射通过湍流效应加速爆炸火焰传播。当 $t_i=0$ ms 时,喷射的 CO₂ 流直接破坏和褶皱火焰界面上侧,引起火焰流动分离和流动偏转,从而增强火焰前沿湍流程度。当 $t_i=120$ ms 时,提前喷射的 CO₂ 流扩散并与管道中未燃气混合,形成密度不均匀分布的湍流扰动区域,从而在火焰面引起密度梯度和压力梯度产生湍流火焰结构,进一步促进火焰湍流发展。

(2) 提高 CO₂ 的喷射压力会加剧爆炸的严重程度。对于相同喷射时间,提高 p_i 会引入更多的 CO₂ 喷射至管道同时引发更强的 CO₂ 流动,这会增强对火焰的湍流扰动引起更剧烈的湍流火焰结构,提升局部物质传输和热释放,从而促进燃烧反应导致更高的火焰传播速度和爆炸压力。例如在 $t_i=120$ ms 时,相较于无喷射, $p_i=1.00$ MPa 的最大火焰速度增幅 129% 及最大爆炸压力增幅 96.2%。

(3) 喷射时间和喷射压力对 CO₂ 喷射下的爆炸行为有重要影响。随着喷射时间增加,不同喷射压力的 p_{max} 均呈先升高后降低的趋势。喷射时间和喷射压力会影响 CO₂ 喷射体积和流动动能,引起湍流增强作用和 CO₂ 稀释作用的竞争,改变对爆炸的湍流扰动能力。这种竞争下湍流扰动能力的提升和降低存在临界喷射时间,且喷射压力越高,临界喷射时间越短。

参考文献:

- [1] 秦勇, 易同生, 周永锋, 等. 煤炭地下气化碳减排技术研究进展与未来探索 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 495–512. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1329.
QIN Y, YI T S, ZHOU Y F, et al. Research progress and future study of carbon emission reduction for UCG [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 495–512. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1329.
- [2] 谭厚章, 王学斌, 杨富鑫, 等. 大型燃煤发电机组低碳技术进展 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(2): 1052–1066. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ZZ24.0060.
TAN H Z, WANG X B, YANG F X, et al. Progress in low carbon technologies for large-scale coal-fired power plants [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 1052–1066. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ZZ24.0060.
- [3] 洪皓. 煤炭制氢经济适用性分析 [J]. *能源与节能*, 2020(12): 82–85. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2020.12.034.
HONG H. Analysis on economic applicability of hydrogen production from coal [J]. *Energy and Energy Conservation*,

- 2020(12): 82–85. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2020.12.034.
- [4] 李刚. 煤制氢技术发展与应用 [J]. *科技创新与生产力*, 2024, 45(11): 54–57. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9146.2024.11.054.
LI G. Development and application of coal based hydrogen production technology [J]. *Sci-tech Innovation and Productivity*, 2024, 45(11): 54–57. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9146.2024.11.054.
- [5] ERDENER B C, SERGI B, GUERRA O J, et al. A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(14): 5595–5617. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.254.
- [6] ZHANG H W, ZHAO J, LI J F, et al. Research progress on corrosion and hydrogen embrittlement in hydrogen–natural gas pipeline transportation [J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(6): 570–582. DOI: 10.1016/j.ngib.2023.11.001.
- [7] ARAVINDAN M, PRAVEEN KUMAR G, ARULANANDAM M K, et al. Multi-objective optimization and analysis of chemical kinetics properties: exploring the impact of different hydrogen blending ratios on LPG and methane–air mixtures [J]. *Energy Conversion and Management: X*, 2024, 22: 100532. DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100532.
- [8] LO BASSO G, PASTORE L M, SGA RAMELLA A, et al. Recent progresses in H₂NG blends use downstream power-to-gas policies application: an overview over the last decade [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 51: 424–453. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.141.
- [9] 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]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(11): 111405. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0282.
LUO Z M, NAN F, SUN Y L, et al. Effects of hydrogen ratio and CO₂ on the explosion characteristics of hydrogen-doped natural gas [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(11): 111405. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0282.
- [10] 梅亮, 郭进, 黄时凯, 等. 密闭容器内氢气-甲烷-空气的爆炸特性 [J]. *含能材料*, 2025, 33(3): 225–235. DOI: 10.11943/CJEM2024186.
MEI L, GUO J, HUANG SK, et al. Explosion characteristics of hydrogen-methane-air in a closed vessel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2025, 33(3): 225–235. DOI: 10.11943/CJEM2024186.
- [11] WANG T, LIANG H, LIN J J, et al. The explosion thermal behavior of H₂/CH₄/air mixtures in a closed 20 L vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(2): 1390–1400. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.092.
- [12] MA Q J, ZHANG Q, CHEN J C, et al. Effects of hydrogen on combustion characteristics of methane in air [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(21): 11291–11298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.030.
- [13] LOWESMITH B J, MUMBY C, HANKINSON G, et al. Vented confined explosions involving methane/hydrogen mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3): 2337–2343. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.084.
- [14] SHANG R X, ZHUANG Z X, YANG Y, et al. Laminar flame speed of H₂/CH₄/air mixtures with CO₂ and N₂ dilution [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(75): 32315–32329. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.099.
- [15] GONDAL I A. Hydrogen integration in power-to-gas networks [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(3): 1803–1815. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.164.
- [16] SHANG R X, ZHANG Y, ZHU M M, et al. Laminar flame speed of CO₂ and N₂ diluted H₂/CO/air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(33): 15056–15067. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.064.
- [17] ZHANG C, WEN J, SHEN X B, et al. Experimental study of hydrogen/air premixed flame propagation in a closed channel with inhibitions for safety consideration [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(40): 22654–22660. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.032.
- [18] WANG J Y, LIANG Y T, ZHAO Z Z. Effect of N₂ and CO₂ on explosion behavior of H₂-liquefied petroleum gas-air mixtures in a confined space [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(56): 23887–23897. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.152.
- [19] WANG D, JI C W, WANG S F, et al. Chemical effects of CO₂ dilution on CH₄ and H₂ spherical flame [J]. *Energy*, 2019, 185: 316–326. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.032.
- [20] LUO Z M, ZHOU S Y, WANG T, et al. 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, 48(82): 32179–32190. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.029.
- [21] WANG M Z, WEN X P, DIAO S T, et al. Effect of obstacle position and equivalence ratio on syngas explosion characteristics [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 56: 735–747. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.235.
- [22] CHRISTOPHE C, GEOFFREY S. On the “tulip flame” phenomenon [J]. *Combustion and Flame*, 1996(105): 225–238. DOI:

- 10.1016/0010-2180(95)00195-6.
- [23] XIAO H H, HOUIM R W, ORAN E S. Formation and evolution of distorted tulip flames [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(11): 4084–4101. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.08.020.
- [24] XIAO H H, WANG Q S, SHEN X B, et al. An experimental study of distorted tulip flame formation in a closed duct [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(9): 1725–1728. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.03.011.
- [25] LI T, HAMPP F, LINDSTEDT R P. Experimental study of turbulent explosions in hydrogen enriched syngas related fuels [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 116: 663–676. DOI: 10.1016/j.psep.2018.03.032.
- [26] BYCHKOV V, AKKERMAN V, FRU G, et al. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 150(4): 263–276. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.01.004.
- [27] ZHENG K, SONG Z Y, SONG C, et al. Investigation on the explosion of ammonia/hydrogen/air in a closed duct by experiments and numerical simulations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 79: 1267–1277. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.124.
- [28] GONZALEZ M. Acoustic instability of a premixed flame propagating in a tube [J]. *Combustion and Flame*, 1996, 107(3): 245–259. DOI: 10.1016/S0010-2180(96)00069-7.
- [29] SHEN X B, HE X C, SUN J H. A comparative study on premixed hydrogen-air and propane-air flame propagations with tulip distortion in a closed duct[J]. *Fuel*, 2015, 161. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.08.043.
- [30] SHEN X B, ZHANG C, XIU G L, et al. Evolution of premixed stoichiometric hydrogen/air flame in a closed duct [J]. *Energy*, 2019, 176: 265–271. DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.193.
- [31] LEYER J C, MANSON N. Development of vibratory flame propagation in short closed tubes and vessels [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1971, 13(1): 551–558. DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80056-5.
- [32] YANG W, YANG X F, ZHANG K, et al. Experimental study on the explosion flame propagation behavior of premixed CH₄/H₂/air mixtures with inert gas injection [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 84: 106–117. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.120.

(责任编辑 王易难)