

沙海伟, 韩倩倩. 甲烷-氢气混合射流火焰燃烧特性试验研究[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2324–2331.

SHA H W, HAN Q Q. Experimental study on the combustion characteristics of methane-hydrogen mixed jet flames[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2324–2331.

甲烷-氢气混合射流火焰燃烧特性试验研究*

沙海伟, 韩倩倩

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京 211102)

摘要:在“双碳”目标背景下, 掺氢天然气输送技术已成为能源结构调整的重要研究方向。通过试验探究了甲烷-氢气混合气体的燃烧特性, 重点分析了不同掺氢比例对射流火焰温度、尺寸及燃烧时间的影响规律。使用电火花点燃不同体积分数的甲烷与氢气混合气, 利用多通道火焰捕捉相机进行记录。结果表明: 体积分数为 5% ~ 30% 的氢气掺入使火焰最高温度从 992.0 °C 提高至 1 021 °C, 提升了 3.0%; 氢气体积分数增加至 80% 和 100% 时, 火焰温度明显增高; 甲烷体积分数为 80% 时, 稳定燃烧阶段平均火焰高度峰值为 44.39 cm; 氢气体积分数的增加能够缩短燃烧时间; 纯甲烷火焰前期呈现蓝色, 后期呈现橙红色, 而随着氢气体积分数的增加混合气体火焰颜色逐步由蓝变红。研究结果可为天然气掺氢输送优化设计提供试验数据参考。

关键词:安全工程; 火焰温度; 燃烧; 射流火焰; 掺氢天然气

中图分类号: X932; TE88

文献标志码: A

文章编号: 1009-6094(2026)06-2324-08

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0996

0 引言

掺氢天然气管道输送是实现氢能高效经济输送的有效途径, 掺氢天然气燃料体系通过特定体积比例调配甲烷与氢气, 形成具有优化燃烧特性的混合燃料。其中天然气是优质高效的低碳能源, 同时, 氢气凭借零碳属性、高能量密度特性, 在实现清洁燃烧与碳减排方面展现出独特优势^[1-3], 研究证实, 引入适量氢气可显著提升燃烧特性^[4]。表 1^[1]列举了氢气与甲烷的燃烧特性差异。

在掺氢天然气燃烧研究中, 掺氢比例是影响掺氢天然气燃烧特性的核心参数。2002 年, Schefer 等^[5]最先研究了预混掺氢甲烷火焰的燃烧特性, 结果表明, 在甲烷/空气混合物中加入适量的氢气会增加 OH 自由基峰值浓度。Huang 等^[6]通过试验研究了天然气-氢气-空气预混合气的层流燃烧特性及火焰传播规律, 结果表明, 掺氢可显著提升混合气燃烧

速率, 有效改善天然气燃烧效率。尉庆国等^[7]通过定容燃烧试验发现, 混合气燃烧速率与压力峰值均随掺氢比例升高而增大。张勇等^[8]、Law 等^[9]通过定容燃烧试验系统分析了天然气-氢气-空气混合气的火焰传播动力学特性, 结果显示, 随着氢气比例上升, 火焰前锋热扩散不稳定性增强, 混合气燃烧稳定性随之降低。谢萍等^[10]通过试验发现, 天然气掺氢可显著促进燃烧动力学进程。Rajpara 等^[11]基于数值模拟揭示了掺氢比例对火焰形态的调控规律。Shen 等^[12]、Salzano 等^[13]基于 20 L 球形容器的试验平台, 系统测试了甲烷-氢气-空气混合体系的燃烧特性, 试验数据表明, 混合气的层流燃烧速度与氢气添加量呈正相关, 但在氢气比例低于 30% 的工况下, 其最大爆炸压力参数与纯甲烷体系基本持平。孔莹莹等^[14-15]研究了部分掺氢天然气比例下火焰燃烧特性, 提出了掺氢天然气火焰长度量纲一预测模型。

另外, 掺氢比例增加能够改变混合气体活化能

表 1 常温下甲烷和氢气的燃烧特性参数

Table 1 Parameters of methane and hydrogen combustion characteristics at normal temperature

名称	相对分子质量	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空气中最小 点火能量/MJ	完全燃烧时 的空燃比	低位质量热值/ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	低位体积热值/ ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	燃烧热量 温度/K	爆炸极限(体积 分数)/%	燃烧产物
甲烷	16.043	0.659	0.274	9.52	50.02	35.90	2 148	5 ~ 15	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
氢气	2.016	0.083	0.017	2.38	119.93	10.22	2 318	4 ~ 75	H_2O

* 收稿日期: 2025-06-10

作者简介: 沙海伟, 高级工程师, 硕士, 从事氢能相关的设计研究, shahaiwei@jdpdi.com.cn。

分布与自由基链式反应路径,导致可燃极限范围扩展^[16-19]。2021 年,Hao 等^[20]开创性地通过试验观测了微量氢气添加对不同当量比甲烷/空气预混体系可燃极限的影响规律。Miao 等^[21]通过试验发现,混合气体的可燃下限随氢气比例增加呈现先降低后升高的非线性演变趋势,揭示了甲烷与氢气在可燃极限调控中的协同作用机制。同时还发现,掺氢天然气混合气体的最小点火能由掺氢比例、初始压力和淬熄距离等多参数共同调控^[22-25]。

现有研究表明,掺氢比例能够显著改变天然气燃料的层流燃烧速度、火焰稳定性及排放特性,但针对混合燃料的扩散火焰演化规律尚缺乏系统性研究。目前,关于掺混比对火焰形态学特征的影响,以及火焰尺寸与温度场特性的关联机制仍不明确。因此,本文通过构建掺氢天然气释放-点火试验平台,系统研究不同掺混比下火焰演变规律、结构特征及温度场分布特性,为掺氢天然气的安全利用提供理论支撑。

1 试验装置与流程

图 1 为试验装置示意图,试验系统主要由气体供应、气体混合、释放点火及数据采集模块组成,用以探究甲烷(CH_4)与氢气(H_2)混合气体的燃烧特性。试验采用充装纯度为 99.999% 的甲烷气瓶和氢气气瓶作为气体燃料供应源;上游氮气气瓶则用于试验结束后储罐及管路系统吹扫,以确保试验过程的安全可靠。气瓶通过管路与容积为 4 L 的储罐相连,储罐装有压力传感器和压力表监控传感内部气体压力。调控混合气体的不同体积分数进行试验,混合充分后通过下游管道进行释放,管口直径为 3 mm。利用电火花点火针在管口上方触发燃烧,电火花点火能量为 20 mJ,电极间距为 2 mm,同时采用宽光谱、红外、普通彩色相机同步观测火焰数据。宽光谱相机记录观测位于 350 ~ 1 350 nm 波段的火焰细节和锋面发展,帧率为 3 000 帧/s。红外相机(型号为 Yoseen X)记录火焰温度场分布,通过捕获火焰

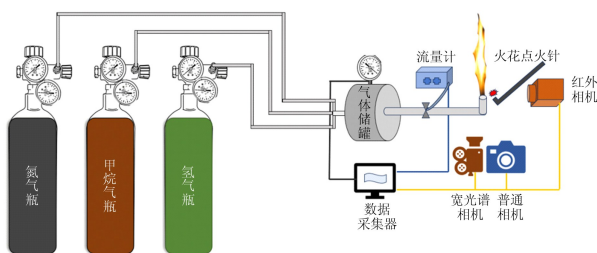


图 1 试验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

核心区域的最高温度表征燃烧最大强度,其帧率为 30 帧/s;红外相机捕获温度参数精度为 $\pm 2\%$,量程为 0 ~ 1 600 $^{\circ}\text{C}$ 。普通彩色相机追踪火焰动态形态,其帧率设置为 60 帧/s。各相机连接数据采集器以进行数据的采集。

试验流程如下:首先进行试验装置调试与准备,依次连接气瓶至气体混合系统,校准储罐压力传感器与压力表,安装储罐下游释放管道,并调试相机;随后抽真空检查系统气密性,启动真空泵对储罐及管路系统抽真空,使储罐真空度保持在 100 Pa 左右,稳定 4 ~ 5 min 后储罐压力传感器无明显波动,确保试验系统气密性良好;然后,根据预设甲烷-氢气体积分数,依次开启对应气瓶阀门,向 4 L 储罐内注入气体,控制混合气体总压在 200 kPa^[14],关闭气瓶阀门,静置 5 min 以确保储罐中气体混合均匀;接着启动点火与数据采集系统,开启电火花点火针电源并激活相机进行记录;开启下游电磁阀释放混合气体,电火花瞬时点火触发燃烧,同步捕捉火焰光谱、温度场分布及动态形态;试验结束后切换至氮气气瓶对储罐及管路进行吹扫以清除残余可燃气体,并抽真空消除残留气体和确保系统气密性,重复上述流程开展后续试验。

2 结果与讨论

2.1 混合气体射流火焰颜色变化与结构特征

图 2 展示了甲烷-氢气混合气体在不同体积分数下的燃烧火焰颜色变化规律,选取火焰燃烧的典型画面进行对比。射流火焰的颜色与亮度差异,本质是燃料射流与空气的混合过程、化学反应路径及能量释放形式共同作用的结果。甲烷作为含碳燃料,燃烧时会经历碳氢链断裂生成 CH 、 C_2 等自由基。如图 2(a)所示,当甲烷体积分数为 100% 时,火焰呈现深蓝色,其颜色主要源于高温碳烟颗粒的热辐射及波段长度为 430 nm 左右的 CH 自由基的蓝光化学发光,外层则因完全燃烧呈现淡蓝色与浅紫色光晕,燃烧后期会因为碳烟颗粒增加出现浅橙红色。随着氢气体积分数逐渐增加,如图 2(b) ~ (d)所示,火焰颜色发生显著变化。如图 2(c)所示,甲烷与氢气体积分数各占 50% 时,火焰核心区域蓝色减弱,上部分出现浅橙红色火焰。这是因为氢气燃烧速度远高于甲烷,导致火焰锋面变薄,局部燃烧强度降低,可能是未完全燃烧的中间产物和碳烟颗粒的波长约 650 nm 红光辐射占比增加。图 2(e)中,纯氢气火焰整体呈现橙红色,其颜色主要归因于氢

气燃烧时生成的水分子振动跃迁释放的部分可见光波段红外辐射特征光谱。值得注意的是,纯氢气火焰的亮度低于纯甲烷火焰,因为纯氢气燃烧产物不含碳烟,热辐射强度较弱,其颜色差异更多反映化学发光机制的变化。因此,混合气体中高甲烷比例下碳烟热辐射主导蓝色火焰,而氢气比例升高时,快速燃烧导致的局部不完全反应及特定自由基的化学发光共同作用使火焰逐渐向橙红色过渡。

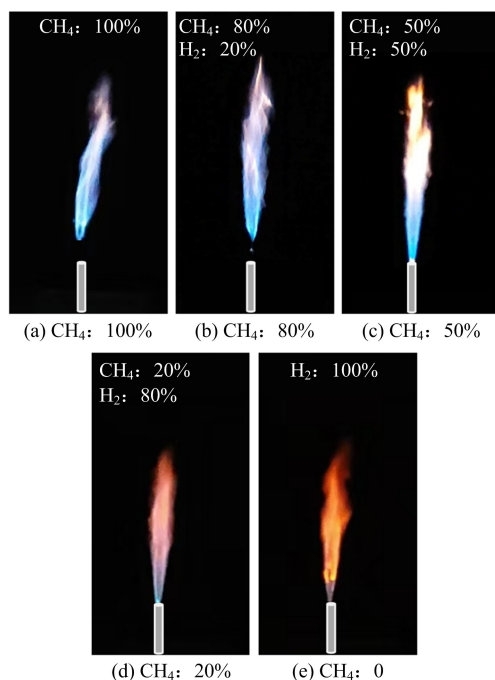


图2 不同体积分数混合气体火焰颜色变化规律

Fig. 2 Flame color change rule of mixed gas with different volume fraction

试验通过光谱图像捕捉火焰发展细节,并基于宽光谱图像对火焰尺寸进行测量标定。图3显示了纯甲烷火焰演变过程。在黑白光谱图像中,灰度梯度表征火焰不同区域的辐射强度。在点火开始瞬间,火焰高度从0.13 s的14.37 cm增至0.64 s的42.13 cm,火焰锋面也存在不同程度的褶皱,这表明火焰燃烧初期有较为强烈的射流混合与快速传播过程,但后期火焰逐渐趋于稳定后,锋面波动幅度减小。图3(c)、(d)和(g)中火焰出现了亮斑,局部区域的亮度显著增强,这是因为甲烷燃烧产物碳烟颗粒的高温热辐射集中释放。此外,锋面边缘褶皱可能源于湍流脉动引起的局部燃烧不稳定性。图3(h)展示了燃料即将耗尽火焰形态,火焰由射流火变为小火苗,亮度更高。射流火焰还存在火焰推举高度,但稳定燃烧过程中火焰推举高度也较为稳定,没有明显大范围波动。光谱图像通过高帧率捕捉火

焰锋面的形态变化特性,为火焰燃烧提供了直观的试验依据,因此选取纯甲烷火焰作为典型工况进行详细分析,其他工况情况与此相似。

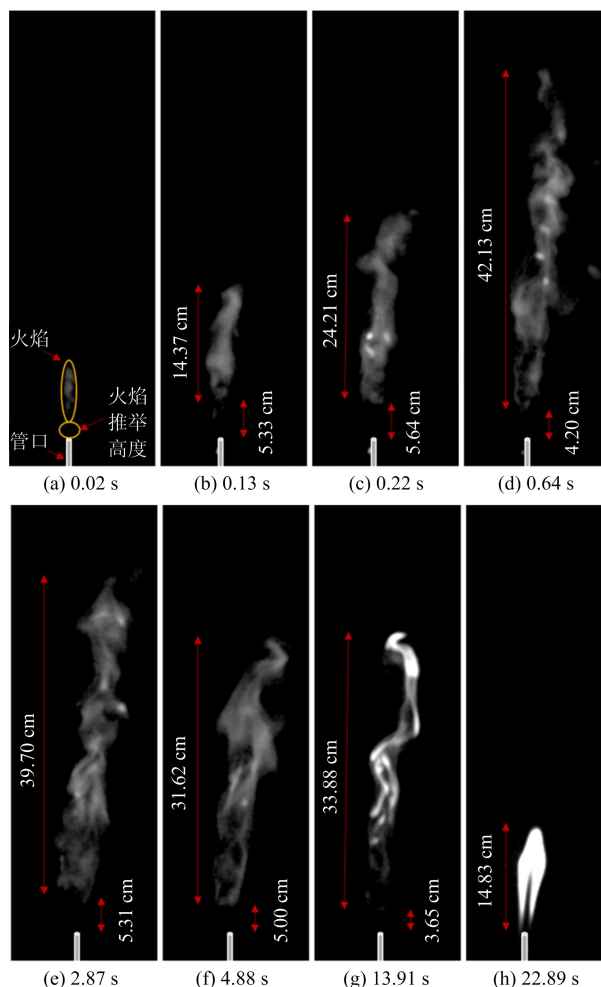


图3 纯甲烷火焰宽光谱图片

Fig. 3 Broad spectrum picture of pure methane flame

2.2 混合气体火焰尺寸演变规律

图4分析了纯甲烷火焰的高度变化。根据火焰高度变化特性,可以将火焰燃烧阶段分为点火瞬间及稳定燃烧阶段一、二和三。结果显示,点火瞬间火焰高度迅速增加,结合图3(c)和(d)分析可知,0.22 s时火焰高度已达到24.21 cm,而0.64 s时对应火焰高度为42.13 cm,从图4中能够看出此时火焰已进入较为稳定燃烧的阶段一。不同阶段中火焰平均高度呈现显著差异。阶段一中,燃料较为充足,火焰高度存在波动,可能由于点火初期射流混合导致的火焰膨胀与后续稳定收缩,进而展现出较明显的变化情况,阶段一中平均火焰高度也较大,达到了37.88 cm。射流初期高流速带来高动量,燃料与空气的湍流混合剧烈,燃烧反应在较宽的混合层内进

行,火焰因未充分混合的燃料持续燃烧而呈现高度波动。阶段二的火焰高度较为稳定,平均火焰高度相较于阶段一略有降低,为 32.25 cm,这表明阶段二随着射流动量降低,燃烧进入相对稳定阶段,燃料供应与空气混合过程也更为平衡。后期阶段三则受限于储罐中燃料减少,进而燃料压力降低,导致火焰高度逐渐降低直至火焰熄灭。同时在阶段一中,储罐内燃料压力较高,气体释放流速快,火焰根部动量较大,推动火焰脱离管口,导致火焰推举高度显著。进入阶段二后,燃料流速因储罐压力下降而降低,混合气体趋于稳定,燃烧锋面贴近管口,推举高度降至 3.22 cm,推举现象减弱。阶段三中储罐燃料接近耗尽,气体流速大幅下降,火焰难以维持稳定燃烧,推举效应消失。

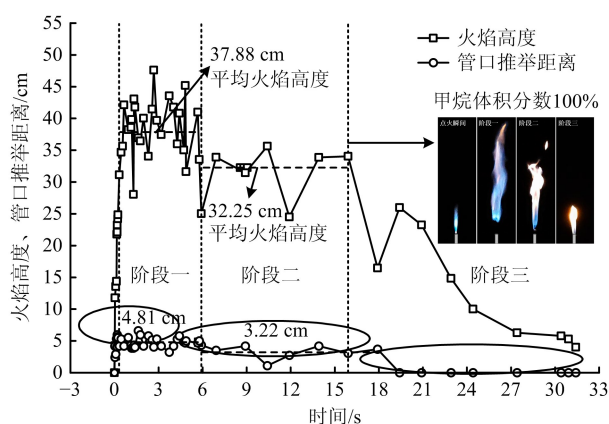


图 4 纯甲烷火焰高度特征

Fig. 4 Flame height characterization of pure methane flame

结合火焰发展演变图片可以看出,燃烧初期在高温下激发 CH 和 C_2 等自由基的蓝光辐射,呈现火焰的蓝色特征。稳定燃烧过程中,随着燃料减少,与空气混合相对不足,局部发生不完全燃烧生成碳烟颗粒。碳烟在高温下通过黑体辐射呈现橙红色,且随着燃料进一步耗尽,碳烟生成与积聚速率超过氧化速率,最终表现为红色小火苗直至熄灭。

实际天然气掺氢输送场景中氢气体积分数处于 30% 以下,因此图 5 主要分析低氢气体积分数下的甲烷-氢气混合火焰尺寸特征。试验通过调节甲烷-氢气混合比例,系统观测了两种气体不同掺混比例条件下的火焰高度演变规律。通过图像分析可以看出,在混合气体中甲烷体积分数 70% ~ 95% 范围内,火焰稳定燃烧阶段二中平均高度随甲烷体积分数增加呈现先升高后轻微波动的趋势,甲烷体积分数为 80% 时,火焰平均高度最大,达到了 44.39 cm。同时,在相同甲烷体积分数下,火焰高度随时间推移

呈现阶段性衰减,这与储罐燃料压力逐渐降低导致的射流动量衰减相关。甲烷体积分数为 70% 时,火焰平均高度为 35.16 cm,维持时间为 9.0 s;当甲烷体积分数提升至 75% 时,火焰高度显著增至 39.25 cm,火焰稳定燃烧维持时间也增至 11.5 s,火焰高度增幅达 11.6%。而甲烷体积分数进一步提高至 85% ~ 95% 时,氢气体积分数相对较低,混合火焰高度稳定在 36.74 ~ 39.16 cm,反映出氢气体积分数较低时混合气体的燃烧更为稳定。

进一步分析火焰稳定燃烧时间特征发现,氢气体积分数越高,火焰能够维持稳定燃烧的时间越短。甲烷体积分数为 95%、氢气体积分数为 5% 时,火焰稳定燃烧阶段二时间为 16.7 s,而甲烷体积分数为 90% 和 85% 时,这一时间缩短至 14.0 s;氢气体积分数进一步增加,火焰燃烧速率进一步加快。这一现象源于氢气与甲烷燃烧特性的显著差异,氢气具有更高的燃烧速率,掺氢比例增加会加速混合气体的整体燃烧反应进程,进而缩短稳定燃烧与整体燃烧时间。另外,甲烷体积分数较高时,火焰燃烧管口推举距离持续时间较长,甲烷的燃烧速度显著低于氢气,使得燃料释放初期高压状态维持更久,火焰根部动量持续推动火焰脱离管口,而掺氢混合气体氢气体积分数越高,燃烧速度越快,射流动量迅速衰减,推举现象维持时间越短。

针对甲烷体积分数 φ 为 70% ~ 100% 的混合气体,通过量纲一分析构建火焰高度预测模型。定义稳定阶段火焰高度为 L , L 与甲烷体积分数的量纲一公式为: $L = -0.0539\varphi^2 + 8.97\varphi - 328.25$ 。该公式在甲烷体积分数 $\varphi = 70\% \sim 80\%$ 拟合最佳,误差 < 0.6%;但在 $\varphi = 85\%$ 处误差较大,误差约为 17.9%。进一步对拟合结果进行评估,结果均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) ≈ 3.56 ,表明整体趋势可接受。

图 6 为不同甲烷体积分数 (70% ~ 100%) 混合气体的火焰最大高度。图 6 显示,当甲烷体积分数为 100% 时,火焰最大高度达 47.60 cm,随着氢气体积分数增加,火焰高度先上升后下降并小范围波动。甲烷体积分数为 90% 时,火焰最大高度最大,为 56.00 cm,结合图 4 和 5 分析,这出现在火焰燃烧初始阶段一中。当甲烷体积分数为 90% 时,燃烧初始氢气的极高扩散性加速了燃料与空气的湍流混合,形成更剧烈的卷吸效应,可能会促使火焰锋面向上拉伸。然而混合气体中氢气比例继续增加导致混合气体燃烧速度加速、火焰锋面薄,限制了火焰高度的

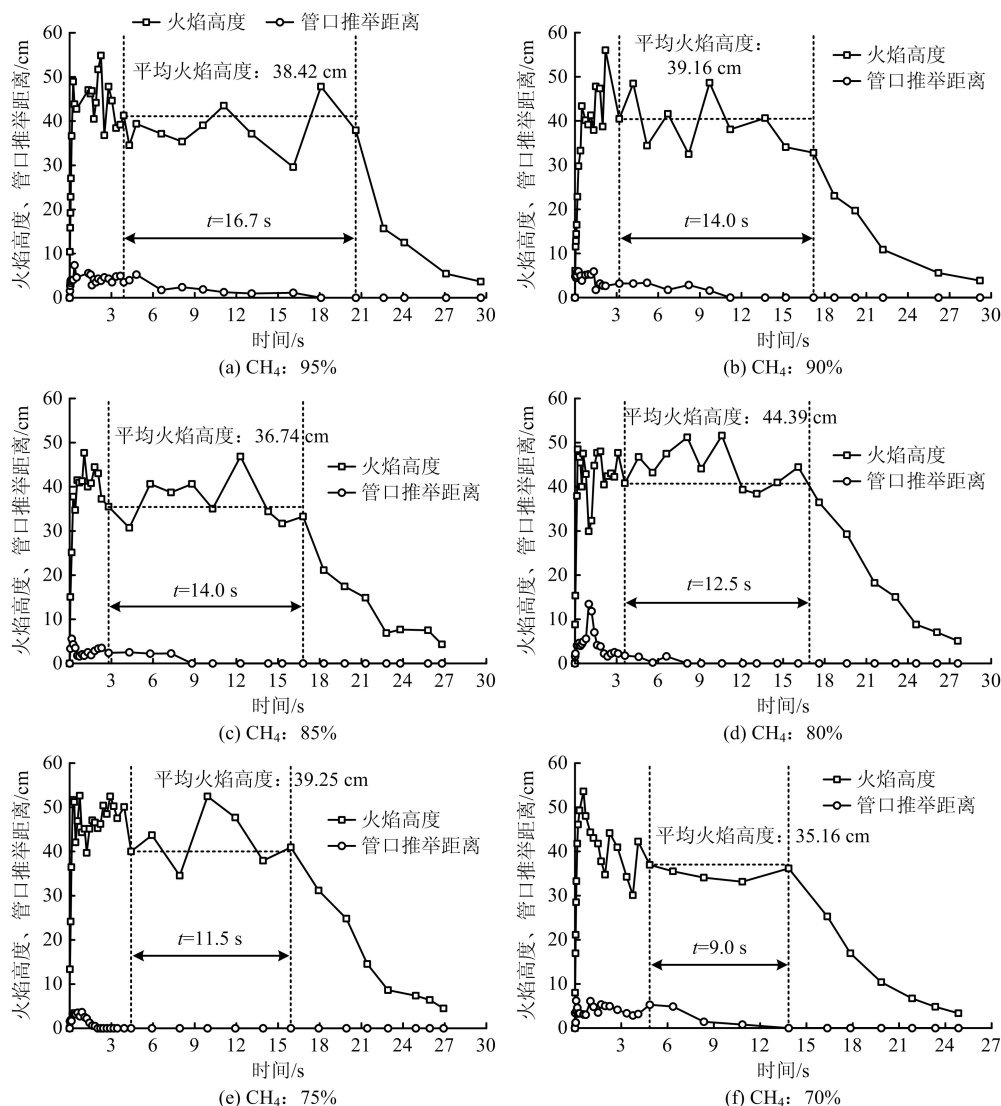


图5 低氢气体积分数掺混下甲烷-氢气混合火焰高度特征

Fig. 5 Height characteristics of methane-hydrogen mixture flame under low hydrogen volume fraction blending

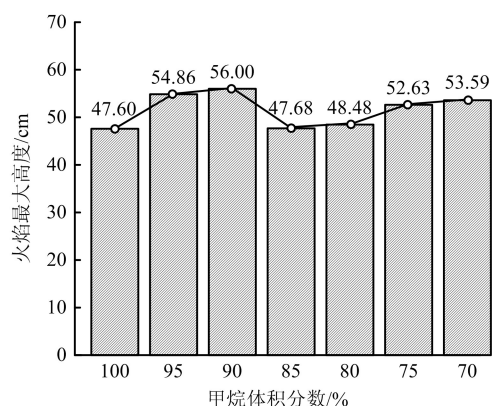


图6 混合气体燃烧过程中火焰最大高度对比

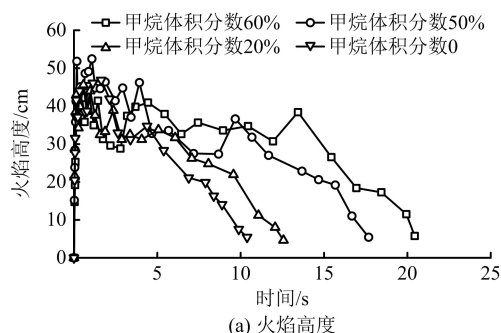
Fig. 6 Comparison of the maximum flame height during combustion of gas mixture

增长,最终表现为火焰高度的回落。

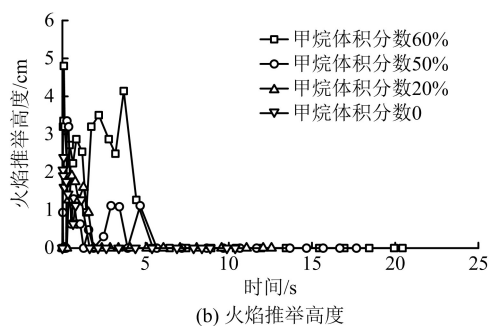
图7显示了甲烷体积分数为0、20%、50%、60%四个梯度组,即较高氢气体积分数掺混下,混合气体燃烧火焰高度特性。甲烷体积分数为60%时,整体火焰高度比其他三个工况高,同时火焰推举高度也较为明显。随着氢气体积分数的进一步增大,甲烷体积分数占比减小,火焰高度降低,一定程度上也增加了火焰燃烧的不稳定性。氢气的高燃烧速率加速火焰锋面传播,同时氢气的高扩散性导致火焰锋面过度拉伸甚至断裂,导致火焰高度有所下降。

2.3 混合气体火焰温度发展特性

图8展示了甲烷体积分数为70%~95%的甲烷-氢气混合气体燃烧火焰温度变化。通过红外相机实时监测火焰燃烧温度,结果表明,当混合气体中氢气体积分数从5%增至30%时,最高温度由992℃提升至1021℃,增幅达3.0%。随着混合气体中



(a) 火焰高度



(b) 火焰抬举高度

图 7 高氢气体积分数掺混下甲烷-氢气混合火焰高度与火焰抬举高度对比

Fig. 7 Comparison of flame height and flame lift height of methane-hydrogen mixture under high hydrogen volume fraction blending

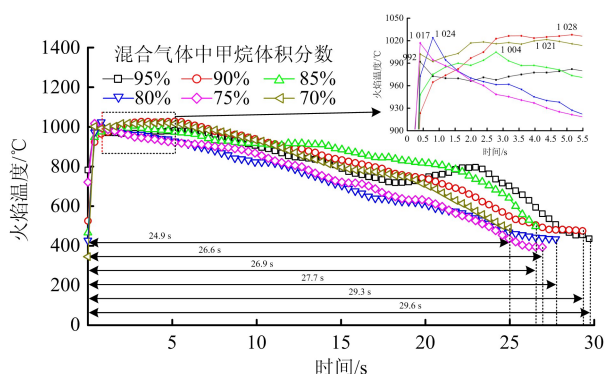


图 8 甲烷-氢气混合气体火焰温度

Fig. 8 Temperature of methane-hydrogen mixed gas flame

氢气体积分数增高,混合气体燃烧火焰最大温度略有提升。但燃烧稳定阶段后,氢气体积分数越高,部分工况中火焰温度反而有所下降,可能是因为氢气的高扩散性和快速燃烧特性,导致热量局部集中但整体散失较快。同时还可以看出,混合气体中氢气体积分数增加导致燃烧总时长缩短,甲烷体积分数为 95% 时,火焰燃烧时间为 29.6 s,70% 时为 24.9 s,缩短了近 15.88%,氢气加速了混合气体整体燃烧反应速率。

图 9 进一步展示了甲烷-氢气混合气体射流燃烧的温度特性。氢气体积分数的提升,一定程度上增加了混合气体火焰的温度。当甲烷体积分数为

70% ~ 100% 时,燃烧过程以甲烷为主导,其较高的碳含量可能生成更多辐射性碳烟颗粒,增强火焰的辐射传热,使局部高温区域维持更久,同时火焰燃烧时间也更长。随着氢气体积分数提升,氢气快速燃烧特性占据主导,主要表现为燃烧时间大幅缩减。但氢气体积分数为 80% 和 100% 时,即甲烷体积分数为 20% 和 0,燃烧前期火焰温度较其他工况有所提升,这可能是因为燃烧由氢气主导,氢气燃烧速度快、无碳烟生成,减少了一定的热辐射损失;氢气加速燃烧释放瞬时高温,但其低热值与高导热性导致整体放热量下降且热量散失加快,最终表现为高温但燃烧火焰维持时间短的特性。

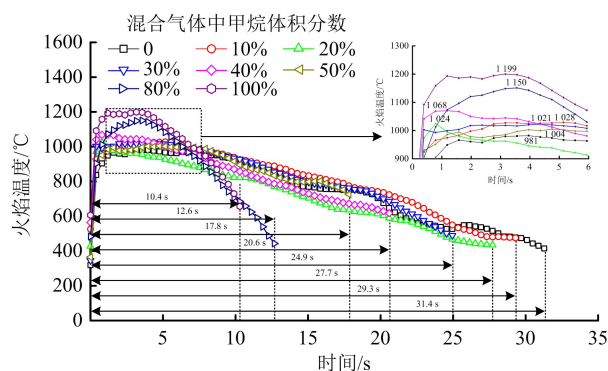


图 9 甲烷-氢气混合气体射流燃烧的温度特性

Fig. 9 Temperature characteristics of jet combustion in methane-hydrogen mixed gas

图 10 展示了不同甲烷体积分数下火焰稳定燃烧持续时间。当甲烷体积分数从 100% 逐渐降低至 0,即氢气比例相应增加,火焰燃烧所需时间基本呈递减趋势。纯甲烷对应的燃烧时间为 31.41 s,随着氢气体积分数提升至 20%、甲烷体积分数 80% 时,燃烧时间缩短至 27.60 s。当甲烷体积分数进一步

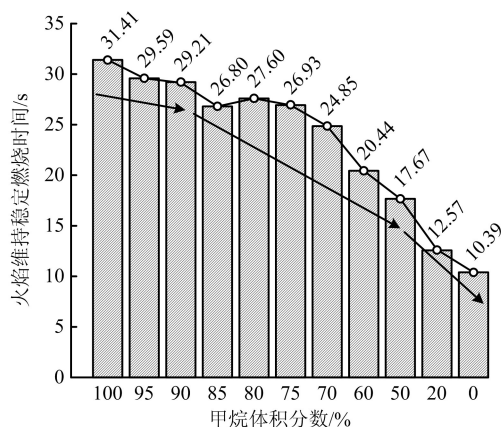


图 10 不同工况下火焰维持稳定燃烧时间

Fig. 10 Time of maintaining stable combustion under different operating conditions

降至60%及以下时,燃烧时间锐减至20.44 s及以下,其中纯氢气的燃烧时间最短,仅为10.39 s。进一步分析发现,燃烧稳定性转折点出现在甲烷体积分数70%附近。在甲烷体积分数大于70%时,每降低5百分点甲烷体积分数对应的稳定时间缩短程度变缓,这主要归因于燃料热值的线性下降;但在甲烷体积分数为60%及以下时,混合气体中以氢气性质为主导,燃烧速度明显加快,火焰所能维持的燃烧时间缩短。

3 结 论

(1)混合气体中甲烷体积分数为80%时,稳定燃烧阶段平均火焰高度最高,达到了44.39 cm,但甲烷体积分数为90%时,火焰最高能达到56.00 cm。氢气体积分数的增加会提高混合气体火焰的燃烧不稳定性。

(2)纯甲烷火焰初期为蓝色,后期向橙红色转变,揭示了甲烷从完全燃烧到不完全燃烧的演化过程。同时随着氢气体积分数的增加,混合气体火焰也从蓝色向蓝紫色和红色转变。

(3)氢气体积分数增加,燃烧初期火焰最高温度小幅提升,同时随着氢气体积分数的增加,混合气体维持燃烧时间缩短,氢气体积分数每增加5百分点,燃烧总时长缩短约12%。

参考文献 (References):

- [1] 肖华华, 赵春祥. 掺氢甲烷非预混射流火研究现状及展望[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3094-3103.
XIAO H H, ZHAO C X. Advances and the prospect of research on blended hydrogen-methane non-premixed jet flame[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3094-3103.
- [2] 江军, 杨波, 潘军, 等. 氢能源的制备与储运的研究探讨[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(1): 106-108.
JIANG J, YANG B, PAN J, et al. Research discussion on hydrogen energy production and storage[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2025, 51(1): 106-108.
- [3] 章楚. 氢能储运技术发展现状与前景展望[J]. 能源化工财经与管理, 2024, 3(2): 1-9, 25.
ZHANG C. Development status and prospect of hydrogen energy storage and transportation technologies [J]. Finance and Management of Energy Chemical Industry, 2024, 3(2): 1-9, 25.
- [4] 许艺鸣, 单春贤, 唐爱坤, 等. 微型燃烧器内掺氢甲烷燃烧特性的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2015, 51(18): 151-157.
XU Y M, SHAN C X, TANG A K, et al. Numerical simulation of methane combustion characteristics with hydrogen addition in a micro-combustor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(18): 151-157.
- [5] SCHEFER R W, WICKSALL D M, AGRAWAL A K. Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 843-851.
- [6] HUANG Z H, ZHANG Y, ZENG K, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 302-311.
- [7] 尉庆国, 白小磊, 张红光. 甲烷-氢气-空气预混合气燃烧特性研究[J]. 车辆与动力技术, 2011(4): 13-17.
WEI Q G, BAI X L, ZHANG H G. Combustion characteristics research on methane-hydrogen-air pre-mixture[J]. Vehicle & Power Technology, 2011(4): 13-17.
- [8] 张勇, 黄佐华, 王倩, 等. 天然气-氢气-空气混合气火焰传播特性研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(6): 481-488.
ZHANG Y, HUANG Z H, WANG Q, et al. Flame propagation characteristics of natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(6): 481-488.
- [9] LAW C, KWON O. Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen-air flame propagation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29: 867-879.
- [10] 谢萍, 伍奕, 李长俊, 等. 混氢天然气管道输送技术研究进展[J]. 油气储运, 2021, 40(4): 361-370.
XIE P, WU Y, LI C J, et al. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogen-mixed natural gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 361-370.
- [11] RAJPARA P, SHAH R, BANERJEE J. Effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of methane fuelled upward swirl can combustor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(36): 17505-17519.
- [12] SHEN X B, XIU G L, WU S Z. Experimental study on the explosion characteristics of methane/air mixtures with hydrogen addition [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 741-747.
- [13] SALZANO E, CAMMAROTA F, BENEDETTO A D, et al. Explosion behavior of hydrogen-methane/air mixtures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25: 443-447.
- [14] 孔莹莹, 胡若炜, 王赛磊, 等. 掺氢天然气喷射火燃烧特性实验研究[J]. 天然气与石油, 2023, 41(6): 1-7.
KONG Y Y, HU R W, WANG S L, et al. Experimental study on the combustion characteristics of hydrogen-blended natural gas jet fires[J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(6): 1-7.
- [15] 孔莹莹, 胡若炜, 秦子康, 等. 掺氢天然气燃烧特性与应用[J]. 油气储运, 2025, 44(2): 153-167.
KONG Y Y, HU R W, QIN Z K, et al. Research progress

- on combustion characteristics and technical applications of hydrogen-blended natural gas[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(2): 153–167.
- [16] KUZNETSOV M, KOBELT S, GRUNE J, et al. Flammability limits and laminar flame speed of hydrogen-air mixtures at sub-atmospheric pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(22): 17580–17588.
- [17] 胡舸, 魏胜, 廖世勇, 等. 甲烷及掺氢甲烷预混火焰的稳定性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(12): 4402–4406.
- HU G, WEI S, LIAO S Y, et al. Stabilization of methane and air premixed flames with and without hydrogen addition [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4402–4406.
- [18] LIU X L, ZHANG Q. Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen-air [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(12): 6774–6782.
- [19] 陈肯, 张一泽, 孙肇林, 等. O_2/CO_2 气氛下 CH_4/H_2 可燃下极限的实验研究[J]. *冶金能源*, 2019, 38(6): 31–36.
- CHEN K, ZHANG Y Z, SUN Z L, et al. Experimental study on the lower flammability limits of CH_4/H_2 in O_2/CO_2 atmosphere[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2019, 38(6): 31–36.
- [20] HAO Q Q, LUO Z M, WANG T, et al. The flammability limits and explosion behaviors of hydrogen-enriched methane-air mixtures [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 126(4): 110395.
- [21] MIAO H Y, LU L, HUANG Z H. Flammability limits of hydro-gen-enriched natural gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(11): 6937–6947.
- [22] LI Z S, HAN W, LIU D, et al. Laminar flame propagation and ignition properties of premixed iso-octane/air with hydrogen addition [J]. *Fuel*, 2015, 158: 443–450.
- [23] JANÈS A, LESAGE J, WEINBERGER B, et al. Experimental determination of Minimum Ignition Current (MIC) ratio of hydrogen/methane (H_2/NG) blends up to 20 vol.% of hydrogen [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 107: 299–308.
- [24] 余明高, 阳旭峰, 郑凯, 等. 障碍物对甲烷/氢气爆炸特性的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 19–27.
- YU M G, YANG X F, ZHENG K, et al. Effect of obstacles on explosion characteristics of methane/hydrogen [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 19–27.
- [25] SHCHELKIN K I. Influence of tube roughness on the formation and detonation propagation in gas[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1940, 10(10): 823–827.

Experimental study on the combustion characteristics of methane-hydrogen mixed jet flames

SHA Haiwei, HAN Qianqian

(Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Nanjing 211102, China)

Abstract: This study experimentally investigates the combustion characteristics of a methane-hydrogen gas mixture, specifically analyzing the influence of varying hydrogen doping ratios on jet flame temperature, size, and combustion duration. The experimental setup comprises gas supply, mixing, ignition release, and data acquisition modules. Methane and hydrogen serve as fuels, while nitrogen is used to purge the system. The experimental procedure includes debugging, vacuuming, leak detection, proportional gas input, ignition, data collection, and nitrogen purging. During the experiment, the total pressure of the mixed gas in the storage tank was maintained at 200 kPa. Various volume fraction ratios of methane mixed with hydrogen were tested and ignited using electric sparks, with the results recorded by a multi-channel flame capture camera. The main conclusions are as follows: a hydrogen doping volume fraction ranging from 5% to 30% resulted in an increase in the maximum flame temperature from 992.0 °C to 1 021.7 °C, representing a 3.0% enhancement. As the volume fraction of hydrogen increased to 80% and 100%, the flame temperature rose significantly. At an 80% methane volume fraction, the average flame height reached its peak at 44.39 cm during the stable combustion stage. Although the maximum flame temperature in the initial combustion stage showed only a slight increase with a higher hydrogen blending ratio, the overall combustion duration of the mixed gas decreased as the hydrogen volume fraction increased. Specifically, for every 5 percentage points rise in hydrogen volume fraction, the total combustion time was reduced by approximately 12%. This indicates that increasing the percentage of hydrogen can effectively shorten the combustion time. The flame of pure methane exhibited a blue color in the early stage and transitioned to orange-red in the late stage. In contrast, the flame color of the mixed gas gradually changed from blue to red as the hydrogen volume fraction increased. This research provides valuable experimental data that can serve as a reference for the optimized design of natural gas with hydrogen doping for delivery.

Key words: safety engineering; flame temperature; combustion; jet flame; hydrogen doping natural gas