

引文: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 Yingying, HU Ruowei, QIN Zikang, 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.

掺氢天然气燃烧特性与应用

孔莹莹¹ 胡若炜¹ 秦子康¹ 林吴胤¹ 李璐伶² 韩辉¹ 李玉星¹ 陈俊文³

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院·山东省油气储运安全重点实验室; 2. 深圳市燃气集团股份有限公司;

3. 中国石油工程建设有限公司西南分公司

摘要:【目的】化石燃料在全球范围内的大规模使用已带来严重的环境污染与气候问题,氢气因其清洁无污染、来源丰富的特性被认为是未来重要能源载体之一。从经济性与技术可行性角度考虑,利用天然气管网进行掺氢输送及终端掺氢燃烧是实现双碳目标的有效途径。【方法】为研究掺氢对燃气特性和终端用户设备运行工况的影响,从气体互换性、可燃范围、燃烧特性、排放特性、终端应用设备适配性等方面调研了国内外掺氢天然气燃烧技术研究现状,对不同学者的研究成果进行对比分析,阐述了掺氢对燃料燃烧特性与终端应用的影响规律,并阐述了使用掺氢天然气作为燃料所带来的机遇与挑战。【结果】对于现有燃气设备来说,还需通过气体互换性研究开展掺氢燃气的可用性评估。掺氢燃气的可燃范围宽、燃烧速度快、点火延迟时间短等特点对燃烧有明显促进作用。在排放特性方面,可通过掺氢降低 CO 及 CO₂ 排放,然而掺氢会导致火焰温度升高,这在一定程度上会促进 NO_x 的生成,掺氢同时也产生更多的 OH 自由基与 H 自由基以抑制 NO_x 的生成,因此掺氢对于生成 NO_x 的影响并不确定。此外,掺氢还可能導致燃烧器回火、燃具爆炸等安全问题。【结论】如何实现掺氢天然气高效稳定燃烧与低污染排放,同时保障燃烧安全,是掺氢天然气燃烧技术大规模应用所面临的重要挑战。(图 4,表 2,参 112)

关键词: 掺氢天然气; 燃烧; 排放; 燃气具; 安全

中图分类号: TE832; TK91

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)02-0153-15

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.02.004

Research progress on combustion characteristics and technical applications of hydrogen-blended natural gas

KONG Yingying¹, HU Ruowei¹, QIN Zikang¹, LIN Wuyin¹, LI Luling², HAN Hui¹, LI Yuxing¹, CHEN Junwen³

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)//Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety; 2. Shenzhen Gas Corporation Ltd.; 3. Southwest Branch of China Petroleum Engineering Construction Co., Ltd.

Abstract: [Objective] The extensive consumption of fossil fuels globally has led to significant environmental pollution and climate challenges. Hydrogen is recognized as a crucial energy carrier for the future due to its clean, pollution-free properties and abundant sources. From the perspective of economical efficiency and technical feasibility, transmitting hydrogen-blended natural gas through existing natural gas pipeline networks and facilitating hydrogen-blended combustion in end-user applications offers effective ways to achieve “dual carbon” goals. [Methods] To investigate the influence of hydrogen blending on fuel gas characteristics and operational conditions of end-user equipment, this paper reviews the current research status of hydrogen-blended natural gas combustion technologies in China and abroad. The analysis encompasses multiple aspects, including gas interchangeability, flammable ranges, combustion characteristics, emission characteristics, and adaptability to end-user equipment. Comparative analyses highlight findings from various scholars. The influence patterns of hydrogen blending on fuel combustion characteristics and end-user applications are elaborated. Additionally, this paper summarizes the opportunities and challenges associated with the utilization of hydrogen-blended natural gas as a fuel. [Results] Evaluating the operational availability of hydrogen-blended fuel gas from the standpoint of gas interchangeability is essential for existing natural gas equipment. The characteristics of hydrogen-blended fuel gas, such as wide combustible ranges, high combustion velocities, and short ignition delays, were identified as significant factors in enhancing combustion efficiency. Regarding emission characteristics, hydrogen blending has

been shown to reduce CO and CO₂ emissions. However, the effects of hydrogen blending on NO_x emissions remain uncertain due to competing influences: the increase in flame temperature from hydrogen doping promotes NO_x formation, while the generation of additional OH and H radicals can suppress it. Furthermore, hydrogen blending may introduce safety concerns, including burner backfires and potential gas appliance explosions. **[Conclusion]** This paper emphasizes the critical challenges associated with the widespread adoption of hydrogen-blended natural gas combustion technologies, which include achieving efficient and stable combustion, minimizing pollution emissions, and ensuring safety in the combustion process. (4 Figures, 2 Tables, 112 References)

Key words: hydrogen-blended natural gas, combustion, emission, gas appliance, safety

当前,全球 81.7%的能源供应来自传统化石燃料^[1],然而化石燃料的燃烧增加了温室气体与颗粒物排放,加速了气候变化,导致了人类呼吸系统疾病发生率与死亡率的增加^[2]。鉴于其对环境与健康的影响,不断发展的能源系统正逐步减少对传统化石燃料的依赖,并加大清洁可再生能源的应用。氢气因其清洁无污染、来源丰富的特性被认为是未来重要能源载体之一,在燃气领域,绿氢的使用将成为降低碳排放的有效途径^[3]。同时,利用现有天然气管网进行掺氢输送既可以保证输送规模又能降低输送成本^[4],是输氢的重要方式。掺氢天然气综合了天然气与氢气的优点,能够优化燃料燃烧特性,但是对终端用户设备的适配性要求较高。因此,为进一步实现掺氢天然气的高效稳定燃烧与低污染排放,开展了掺氢对气体互换性、可燃范围、燃烧特性及排放特性的影响分析,总结了掺氢天然气在家用燃气具、锅炉、燃气轮机等方面的终端应用情况,探讨了掺氢天然气燃烧技术的应用发展前景,并对掺氢天然气终端安全燃烧提出了可行性建议,相关结论可

为发展掺氢天然气终端燃烧技术提供参考。

1 气体互换性

氢气与典型天然气(主要成分为甲烷)的物化性质具有明显的不同(表 1)。因此,掺氢后燃料的组分、热值、密度等均会改变,燃烧特性、排放特性、安全性等也发生相应变化。在氢气尚未成为主流燃气之前,大面积更换终端用户的燃烧器具需要巨额的投资成本,从技术性与经济性角度考虑,可通过掺氢的方式在不过多改变用户设备的情况下实现氢气的应用,这就必须考虑掺氢天然气的气体互换性问题。气体互换性是指在不改变燃烧装置、操作条件等参数的情况下,用一种燃料替代另一种燃料的能力。可采用美国 AGA(American Gastroenterological Association)研究所^[5]、Weaver^[6]、Delbaug 等^[7]所提方法进行气体互换性计算,华白数与燃烧势是评价燃气互换性的基础指标。

表 1 氢气与甲烷的基础物性表
Table 1 Basic physical properties of hydrogen and methane

气体	密度/ (kg·m ⁻³)	最小点火能/MJ	华白数/ (MJ·m ⁻³)	低位热值/ (MJ·m ⁻³)	高位热值/ (MJ·m ⁻³)	层流燃烧 速度/(m·s ⁻¹)	燃烧温度/K	燃料可燃下限	燃料可燃上限
氢气	0.089	0.017	46.52	10.68	12.62	2.65~3.25	2 318	4%	75%
甲烷	0.717	0.274	51.93	35.85	39.79	0.38~0.45	2 223	5%	15%

王玮等^[8]计算了掺氢比为 0~30%时的气体特性参数,发现掺氢比 30%时燃气的热值、华白数分别降低了 21%、10%,而燃烧势提高了 48%,且混合气体热值随掺氢比增加而下降。李明等^[9]依据 GB 17820—2018《天然气》中相关指标对掺氢天然气进行分类,发现 10%~27%掺氢比下气体热值符合二、三类天然气的热值标准。崔德春等^[10]计算发现当氢气含量达到 24.5%时,混合气的高位热值降至 31.4 MJ/m³。以中国典型燃气灶具适用的 12T 基准气为参考,基于华白数、

燃烧势及 AGA 指数法计算所得满足互换性要求的掺氢比分别为 36.5%、24%及 27.6%^[11],基于华白数分别与燃烧势、高位热值判定满足互换性要求的掺氢比应分别小于 24%、27.6%(图 1,其中,图 1a 的华白数允许互换上、下限分别为 54.77 MJ/m³、45.67 MJ/m³,燃烧势允许互换上、下限分别为 69.3、36.3;图 1b 的华白数允许互换上、下限分别为 54.77 MJ/m³、45.66 MJ/m³,高位热值的允许互换上、下限分别为 43.56 MJ/m³、31.4 MJ/m³)。基于 Weaver 指数法计算得当掺氢比小

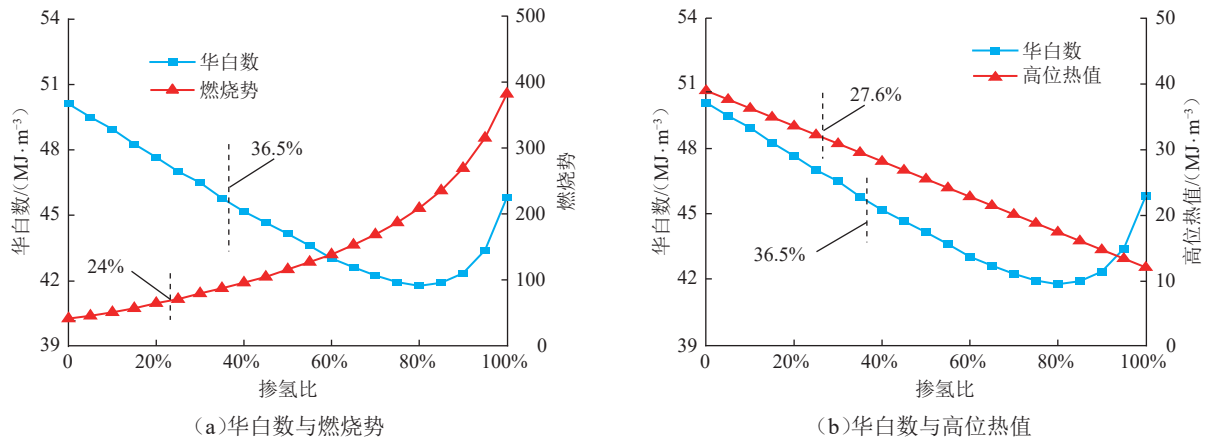


图 1 掺氢天然气华白数分别与燃烧势、高位热值关系图

Fig. 1 Relationship graphs of Wobbe index of hydrogen-blended natural gas with combustion potential & higher heating value

于 13% 时, 掺氢对下游用户的影响较小, 可以进行掺氢互换^[11]。

燃气组分的变化可能会影响燃气具的工作稳定性, 需要确定掺氢后的气体互换性以保证燃气具的安全使用。一般情况下, 当掺氢比小于 20% 时燃气具可稳定运行, 而掺氢比大于 20% 时需要考虑气体互换性并进行适应性调整以保证燃气具安全工作。然而现有掺氢天然气互换性研究中主要考虑纯甲烷的掺氢影响, 对天然气复杂组分的相关考虑较少, 虽有部分研究探讨了天然气组分与掺氢影响之间的关系^[12-14], 但因不同气源的成分组成复杂而尚未得出一致结论。总体而言, 依据不同方法计算所得满足气体互换性要求的掺氢比不同, 不同气源在燃气具上可能出现的问题也存在差异, 应根据实际情况, 采用组分真实的天然气开展相关研

究, 综合考虑安全性与经济性, 以确定满足气体互换性的掺氢极限。

2 燃烧特性

由于氢气的点火能低、燃烧温度高^[15], 向天然气中掺入氢气会改变燃料燃烧的化学反应途径, 并对掺氢天然气的燃烧速度、火焰稳定性及排放特性产生影响。开展掺氢天然气燃烧特性相关研究有助于改善掺氢天然气燃具结构、提高燃烧稳定性及降低污染物排放, 从而提高燃具燃烧性能。

2.1 燃烧机理

在 CH₄ 与 H₂ 混合燃烧过程中(图 2), H₂ 的存在使得 OH 的生成量增加, 提高掺氢比会导致 OH 的物

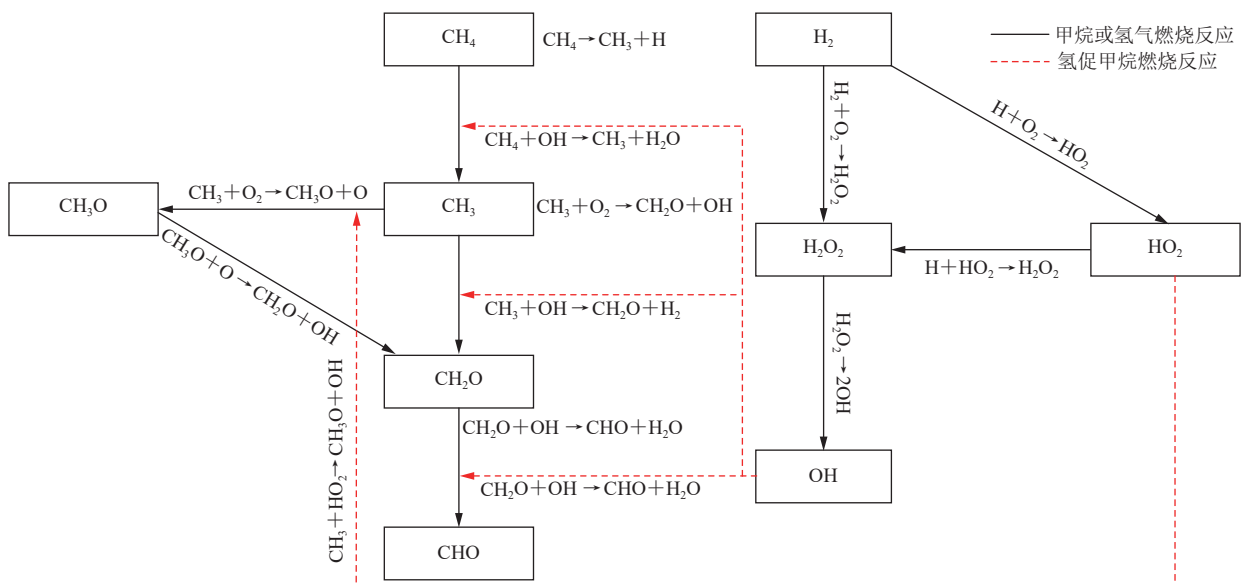


图 2 氢气促进甲烷燃烧的反应机理图

Fig. 2 Reaction mechanism of hydrogen in promoting methane combustion

质的量分数上升^[16], 通过 CH_4 与 OH 反应生成 CH_3 来促进 CH_4 初始反应, 同时通过 CH_3 与 OH 反应生成 CH_2O 、 CH_2O 与 OH 反应生成 CHO 来促进 CH_3 的转化^[17], 总体上添加 H_2 可提升 CH_4 的燃烧速度^[18]。

纯甲烷与纯氢气的燃烧反应机理已被探明, 但甲烷与氢气混合后的燃烧反应机理仍在研究中。目前常见的燃烧反应机理有 GRI-Mech(Gas Research Institute Mechanism)3.0、San Diego、USC-Mech(University of Southern California Mechanism)2.0、Aramco-Mech 1.3。其中, GRI-Mech 3.0 机理的应用最为广泛, 经验证可用于模拟甲烷与低掺氢比工况的燃烧且性能较好, 也是上述机理中唯一包含 NO 生成路径的反应机理。研究表明, 当燃料与空气当量比大于 0.9 时, 应用 GRI-Mech 3.0 机理的预测结果要优于 San Diego 机理与 USC-Mech 2.0 机理^[17]; San Diego 机理可用于掺氢比大于 80% 的富氢燃料燃烧反应^[19]; USC-Mech 2.0 机理在掺氢比小于 30% 的燃料燃烧反应中表现良好^[20], 而当燃料中掺氢比高于 40% 时选用 Aramco-Mech 1.3 机理更优^[21]; 在掺氢比为 50% 时, Aramco-Mech 1.3 机理所预测的层流燃烧速度结果与真实值更接近^[22]。

在选择掺氢天然气的燃烧机理时需考虑多种因素, 如掺氢比、当量比及操作工况等, 需深入评估各机理模型法的适用性, 以确定在不同工况下的应用。此外, 现有的简化机理模型通常是基于层流燃烧速度建立的, 并不能完全反映实际情况。因此, 仍需开展更复杂的非平衡效应与化学动力学研究, 以提高掺氢天然气燃烧机理模型的准确性与可预测性。

2.2 燃烧速度

层流火焰对燃烧速度、火焰前沿位置及火焰稳定性影响较大, 氢气的最大层流火焰速度约为甲烷的 7 倍。研究表明, 掺氢可提高燃气的层流燃烧速度, 但与氢气体积分数并未呈线性相关, 而是受掺氢比、温度、压力、当量比等多种因素的影响, 这种影响在甲烷含量越高的天然气中越突出。此外, 与贫燃料燃烧、化学计量燃烧相比, 掺氢对富燃料燃烧的影响更大^[23]。Okafor 等^[24]在当量比为 0.8、温度为 350 K 的工况下, 对掺氢天然气预混火焰的燃烧速度进行了实验研究, 发现当初始压力一定时, 随着氢气体积分数变化, 燃烧速度呈现非单调变化, 在氢气体积分数一定时, 燃烧速度随初始压力的升高而降低。Shang 等^[25]发现, 在掺氢比小于 50% 时, 氢气/甲烷/空

气混合气的层流燃烧速度随着氢气体积分数的增加而线性增长; 随着氢气体积分数进一步增加, 燃烧过程由甲烷主导逐渐转变为在甲烷抑制作用下的氢气主导, 层流燃烧速度开始呈现非线性增长。这一结果与 Dong 等^[26]在本生灯中的测试结果一致, 即掺氢比超过 60% 时, 层流燃烧速度骤升。层流燃烧速度与燃烧过程中产生的 H 、 O 及 OH 自由基密切相关^[27], 氢气的加入能促使 H 、 O 及 OH 自由基的产生, 从而加快部分基元反应, 提高层流燃烧速度。掺氢比的变化会改变自由基的产生路径与浓度, 从而对基元反应产生影响, 进而影响层流燃烧速度。

准确量化氢气对混合气层流燃烧速度的影响对掺氢天然气燃烧技术的应用至关重要。Huang 等^[28]推导了室温室压下当量比为 0.6~1.4 时层流火焰燃烧速度与掺氢比的经验关系式, Sarli 等^[19]依据 Le Chatelier 原理建立了掺氢天然气层流燃烧速度计算公式, 后来被广泛应用于混合气体的层流燃烧速度计算^[29-31]。

燃料燃烧速度快有助于在短时间内实现高效燃烧, 进而大幅度缩短燃烧室长度, 掺氢有利于燃烧室轻量化设计与性能提升。在较高温度与压力下测量混合气体的层流燃烧速度有助于开展系统设计, 然而当前关于典型燃气轮机燃烧工况下掺氢天然气层流燃烧速度的试验较少, 仍需进一步开展相关研究工作。

2.3 点火延迟

点火延迟是指可燃物的热力学状态满足自燃条件却无法马上点燃的现象。点火延迟会显著影响燃烧特性, 因此对燃烧设备开展设计优化十分重要。

刘晓佩^[32]在对掺氢天然气预混旋流燃烧特性的研究中发现, 随着掺氢比增大, 点火延迟时间缩短, 因此掺氢有利于发动机点火过程的进行^[33]。邓玄亮等^[34]通过对燃气轮机燃烧室内掺氢天然气的燃烧特性研究发现, 在压力 2 MPa、温度 920 K 时, 随着掺氢比增大, 点火延迟时间呈现先增加后降低的趋势, 且随着当量比增大, 点火延迟时间缩短。张永翔^[35]在对掺氢造成的点火特性与层流燃烧变化研究中发现, 低温时当量比的变化对纯甲烷点火延迟时间影响较小, 掺氢天然气的点火延迟时间随当量比增大而略有增加, 但是在高温时掺氢天然气的点火延迟时间随着当量比的增大而急剧增加。王鑫慈等^[36]对使用掺氢天然气作为燃料的燃气轮机进行了数值模拟, 发现点火延迟时间与燃料温

度呈反比关系。Zhang 等^[37]通过实验与模拟研究了温度为 900~1 750 K, 当量比为 0.5~2.0 的甲烷/氢气混合气在冲击管中的自燃特性, 确定了 3 种点火机制, 包括: 甲烷主导的化学点火(掺氢比小于 40%), 甲烷氢气共同主导的化学点火(掺氢比为 40%~60%), 氢气主导的化学点火(掺氢比大于 80%)。Zhang 等^[38]还发现, 随着温度降低, 掺氢可显著降低点火延迟时间, 在 1 750 K 时, 掺氢对点火延迟时间作用较弱, 而在 1 500 K 时, 掺氢比为 20% 时混合气体的点火延迟时间变为原来的 1/3。刘长鹏^[39]在天然气富燃改质燃烧机理研究中发现, 掺氢可缩短点火延迟时间, 在温度高于 950 K 时促进作用非常明显, 在温度低于 950 K 时影响较小。这是因为温度的变化会引起各项反应的敏感性改变, 高温时, H_2 提高了 OH 与 H_2 反应生成 H 与 H_2O 、 H 与 O_2 反应生成 O 与 OH 两过程的反应敏感性; 温度低于 950 K 时, 影响点火延迟时间最主要的反应为 H_2O_2 分解生成 OH , 该反应受 H_2 影响小, 因此 H_2 对点火延迟时间影响较小。

压力同样会对点火延迟时间造成影响(图 3)。郁鸿飞等^[40]通过对甲烷掺氢燃料反应动力学特性进行分析得出, 在常压下, 纯氢气的点火延迟时间远小于甲烷, 高压条件下提高掺氢比可缩短混合燃气的点火延迟时间, 这种影响在高温下增强, 在高压下减弱。深入理解掺氢天然气的点火机理, 可为新型燃烧方式、清洁燃烧技术、排放物控制技术的发展提供理论支撑。

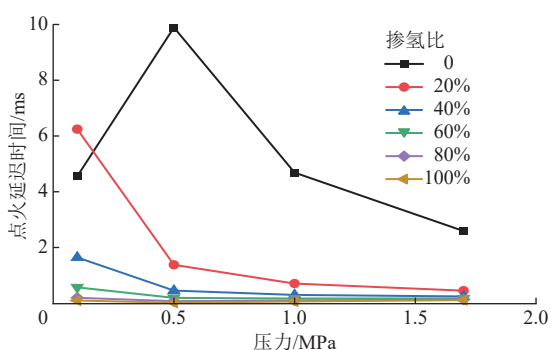


图 3 不同掺氢比时掺氢天然气的点火延迟时间随压力变化曲线
Fig. 3 Variation curves of ignition delay with pressure for hydrogen-blended natural gas at different hydrogen blending ratios

2.4 污染物排放

掺氢天然气燃烧产生的污染物主要为 CO 、 CO_2 及 NO_x , 研究掺氢天然气燃烧排放特性, 优化燃烧系统设计与燃烧控制技术, 降低 CO 、 CO_2 及 NO_x 的排放水

平, 是实现“双碳”目标的重要途径。

CO_2 的生成速率、生成量与燃料中的碳含量紧密相关, 掺氢可降低燃料含碳量, 从而减少 CO_2 的排放。许多^[41]模拟了 HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition)发动机的燃烧过程, 发现掺氢可使 CO_2 更早产生, 并减少 CO_2 排放。在反应时间与反应条件充足的情况下, 掺氢可使得 OH 浓度增加从而促进 CO 全部被氧化为 CO_2 ^[42-43]。董少毅^[44]研究了掺氢对天然气发动机缸内燃烧过程性能的影响, 发现掺氢可使 CO_2 排放情况显著改善。Meziane 等^[45]认为在微型燃烧器中掺入体积分数 10% 的氢气可减少 60% 的 CO 排放。吴子天等^[46]在全预混燃气热水器对掺氢天然气的适应性研究中发现, 掺氢比 20% 热水器在最大负荷时烟气中 CO_2 排放量减少 21%, CO 排放量减少 70% 以上。掺氢可降低 CO 与 CO_2 排放量, 但是会导致燃气温度升高与 NO_x 排放量增加^[47]。

NO_x 按照生成机理可分为燃料型、快速型及热力型 3 种。燃料型 NO_x 是指燃料中含有的氮元素在高温下会裂解生成 CN 、 HCN 等基团, 这些基团极易与 O_2 发生反应生成 NO_x 。快速型 NO_x 主要产生在扩散燃烧火焰前部的富燃料区域, 在燃烧过程中, 随温度升高, 快速型 NO_x 含量逐渐下降^[48]。热力型 NO_x 由 N_2 在高温下直接与 O_2 燃烧发生反应产生。 H_2 燃烧过程中缺少对 NO_x 生成起到抑制作用的基元反应^[49], 因此随着 H_2 的加入, 绝热温度升高, 热效应逐渐增强, 热力型 NO_x 的生成增加。李立新等^[50]对 SGT-800 型燃气轮机单燃烧室掺氢燃烧过程开展了数值模拟, 发现更高的掺氢比会提高燃烧室的总体温度, 促进热力型 NO_x 的生成, 增大燃烧室出口的 NO_x 排放量。Park 等^[51-52]研究发现, 在甲烷/空气混合气体中添加 H_2 (掺氢比 0~30%) 会提高火焰温度, 增加 NO 浓度。

然而, 另一些学者的研究结论正相反。Sun 等^[53]发现燃气具的空气进气方式不同, 掺氢对 NO_x 排放量的影响不同。詹心怡等^[54]通过天然气掺氢时部分预混燃烧器的燃烧特性试验研究发现, 增加掺氢比在多数情况下可改善 NO_x 的排放情况, 在掺氢比为 40% 时 NO_x 的排放改善效果最明显, 但也存在掺氢比为 20% 时 NO_x 排放量升高的情况, 这可能是由于 H_2 的增加提高了 OH 自由基与 H 自由基的含量, OH 自由基抑制了 NO 向 NO_2 的转化过程, 并且 H 自由基促进了 NO_2 向 NO 的分解过程, NO_2 生成受到抑制, NO_x 排放

量略有减少^[55-57]。不同学者关于掺氢比对 NO_x 排放量影响的研究结果不同(图 4), 掺氢对 NO_x 排放性能影响尚未形成统一结论。

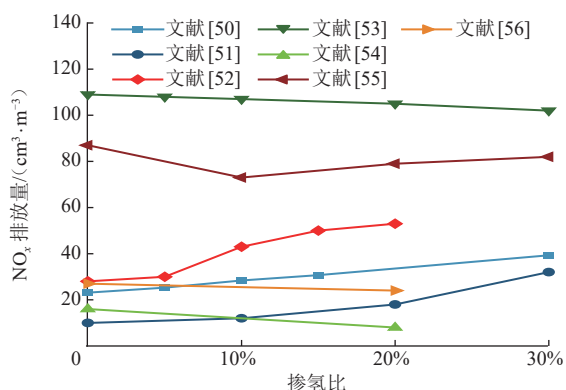


图 4 不同文献中掺氢比对 NO_x 排放量影响变化曲线
Fig. 4 Variation curves of the effect of hydrogen blending ratio on NO_x emissions across different references

3 掺氢燃烧终端应用

掺氢天然气的终端应用是燃气领域的重要研究方向, 欧盟 Naturalhy 项目^[58]、美国可再生能源实验室管道掺氢项目^[59]、荷兰 Ameland 项目^[60]以及法国 GRHYD 项目^[61-62]等均是具有代表性的掺氢天然气应用研究范例。荷兰 Ameland 项目始于 2007 年, 主要研究内容为确定掺氢对管道及附件材料的影响。英国 HyDeploy 项目^[52]对功率达 600 kW 的大型锅炉在未改造情况下进行了掺氢比 28.4% 的燃烧测试, 验证了燃气锅炉对低掺氢比燃烧工况的适应性。万和电气研究设计了纯氢燃气具与适用于掺氢比 20% 以下的掺氢燃气具, 并实现了核心零件的国产化。当前针对掺氢天然气终端应用的研究主要集中在燃烧稳定性、热效率及排放性能上。

3.1 家用燃气具

由于氢气体积热值较低, 对于设计使用标准气体的家用燃气具, 在进口压力不变的情况下, 掺氢后燃气具的输出功率会降低。GB 16410—2020《家用燃气灶具》规定燃烧器的实际热负荷与额定热负荷的偏差应在 $\pm 10\%$ 以内, 理论上家用燃气具可在掺氢比小于 20% 的工况下正常运行, 荷兰 Ameland 项目与法国 GRHYD 项目的研究结果也证明了这一结论。在英国 HyDeploy 项目的测试中, 大多数燃气具可以在掺氢比 28.4% 的工况下正常运行。考虑到家用燃气具在使用掺氢天然气过程中的稳定性与适用性, 相关中

国学者开展了家用燃气灶、燃气热水器、壁挂式燃气锅炉在掺氢比 20% 以内的燃烧与排放特性研究。其中, 马向阳等^[63]发现随着掺氢比增大, 一次空气系数、热负荷及烟气中的 CO 、 NO_x 的含量逐渐减小, 而热效率增加。严荣松等^[64]发现, 随着掺氢比增加, 燃气灶的热效率略有波动, 但在可接受范围内。罗子萱等^[65]发现随着掺氢比增加, 家用燃气灶的 CO 排放量减小, NO_x 排放量未见明显上升或下降, 而使用掺氢天然气的采暖热水炉的 CO 、 NO_x 排放量显著降低。陈豪杰^[66]对 3 种典型燃气热水器的掺氢极限进行了测试, 发现为了在无明显噪声的情况下保持稳定燃烧, 强制排气热水器、冷凝水热水器、烟气热水器的掺氢极限分别为 30%、40%、20%。随着掺氢比的进一步提高, 家用燃气具中的回火问题备受关注。Zhao 等^[67-68]发现正常工作条件下燃气灶不发生回火的掺氢极限为 25%, 而在点燃后再逐渐提高燃气的掺氢比时, 燃气灶的正常工作掺氢极限提升至 75%, 当燃气灶上放有锅具时这一极限降至 55%。Choudhury 等^[69]的实验表明燃烧器可以在低于 10% 的掺氢比下稳定燃烧。Jones 等^[70]分析了掺氢比对火焰传播速度的影响规律, 认为当掺氢比不高于 30% 时, 燃烧器中的回火风险不会显著增加。

由上述研究可知, 低掺氢比(约 20%)的掺氢天然气可在不影响燃气具稳定燃烧的同时提高燃气具的热效率, 并降低污染物排放量, 而对于富氢燃气具则需关注回火问题, 未来仍需探究高效、低污染的掺氢范围, 以保障家用燃气具的安全稳定运行。

3.2 锅炉

掺氢比对锅炉、灶具的运行工况影响也存在差异。Glanville 等^[71]对多种家用锅炉进行了实验研究, 发现随着掺氢比由 0 逐渐增大至 30%, 火焰长度变短, 但点火与燃烧过程未见不同。与纯甲烷相比, 掺氢后锅炉燃烧器内的火焰温度几乎没有变化, 因为层流燃烧速度的增加造成了更高的火焰热损失^[72]。较低的掺氢比似乎不会对锅炉的燃烧造成显著影响, 甚至可以有效防止锅炉的意外熄灭^[73], 提高燃烧安全性。但应特别注意燃烧器的局部高温损伤, 这是因为掺氢后燃烧的空气需求量减少, 过剩空气系数升高, 同时掺氢也会使得层流燃烧速度增加, 从而使火焰更靠近燃烧器喷嘴, 造成燃具局部过热, 甚至发生回火。Pers 等^[74]在富氢预混锅炉的回火现象研究中发现, 回火是由两种

不同的机制引起的,当燃烧器壁温低于 950 K 时回火发生在燃烧孔内,当燃烧器壁温高于 1 000 K 时燃烧器壁处将直接发生自燃。

在排放性能方面,Zhao 等^[75]研究发现在燃气锅炉进口温度为 300 K 时,随着掺氢比由 0 逐渐提升至 80%,CO、CO₂ 的排放量分别减少了 50%、52%,而 NO 的排放量提高了 94%。Lamioni 等^[76]发现在冷凝式燃气锅炉中掺入体积分数 50% 的 H₂ 时,NO 的排放量可减少 70%。冷凝式燃气锅炉因其燃烧温度相对较低,热力型 NO_x 的生成量极大减少^[77]。与传统锅炉相比,冷凝式燃气锅炉在相同的输出功率下每年可节省 17.5% 的燃料^[78],同时减少 23% 的污染物排放^[79]。冷凝式燃气锅炉可通过利用烟气内水蒸气液化时的冷凝潜热提高换热效率,掺氢会导致燃烧产生的烟气中水蒸气的体积分数增加、露点相应提高^[80],从而提高冷凝式燃气锅炉的效率^[81]。Bălănescu 等^[82]发现当冷凝式燃气锅炉中燃烧掺氢比为 80% 时,富氢天然气效率提高了 1.3%,CO₂ 排放量减少了 56.15%。然而,掺氢会导致锅炉的冷凝水量显著增加^[83],对锅炉的冷凝水排水系统提出了更高要求。

3.3 燃气轮机

关于掺氢燃气轮机燃烧技术的研究已在世界范围内引起广泛关注。西门子公司研究发现,使用掺氢比为 15%~20% 的混合燃气不会对现有未经改造的燃气轮机产生影响;当 H₂ 体积分数超过 30% 时,需要对传统贫预混燃烧喷嘴结构进行优化设计;当 H₂ 体积分数超过 50%~70% 时,需进行全新燃烧技术的研发。

根据全球主要燃气轮机厂家掺氢燃烧技术应用现状(表 2)可知,当前燃气轮机主要采用干式低排放(Dry Low Emission, DLE)燃烧技术,即利用旋流将燃料与过量空气充分混合,通过提高火焰温度分布的均匀性来降低 NO_x 排放,同时旋流形成的高温回流区可保障燃料稳定燃烧。由于 H₂ 的燃烧特性不同,在传统 DLE 燃烧室中燃烧 H₂ 会影响火焰的稳定性。Liu 等^[84]认为富氢甲烷会显著影响回火极限,尤其是对 π 型火焰。Li 等^[85]发现 H₂ 体积分数为 50% 时富氢合成气火焰的稳定性降低,同预混燃烧相比,扩散燃烧可有效避免回火问题,但会导致 NO_x 排放量增加。美国通用公司研发了一种采用扩散燃烧的多喷口燃烧室,能够在掺氢比为 89% 的工况下正常运行。Rajpara 等^[86]

表 2 全球主要燃气轮机厂家掺氢燃烧技术应用现状统计表
Table 2 Statistics on application status of hydrogen-blended combustion technologies by global major gas turbine manufacturers

公司	设备型号	掺氢比	燃烧方式
通用电气	GE 10	0~100%	扩散/干式低排放
	GE-9F	0~47.5%	扩散
川崎重工	M1 A	100%	微混
	L30A-01 D/DLH	0~60%	干式低排放
西门子	SGT-200	80%~85%	干式低排放
	SGT-400	30%	干式低排放
	SGT-600	20%~90%	干式低排放
	SGT-6000G	50%	干式低排放
三菱动力	MHPS H-14	20%	微混
安萨尔多	GT 26	0~45%	预混
	GT 36	0~70%	预混
曼恩能源	THM 系列	20%~60%	预混
	MGT 系列	20%~40%	预混
阿尔斯通	GT 24	0~45%	部分预混
	GT 13E2	0~70%	干式低排放

自主设计了一种扩散燃烧室用于开展掺氢试验并进行了相关数值模拟,研究发现在较高掺氢比工况下火焰将变短变宽,掺氢后 CO 排放量降低,但火焰温度的升高使得 NO_x 排放量增大。耿卅捷等^[87]对采用贫预混旋流燃烧技术的燃气轮机掺氢工况进行了模拟,发现当掺氢比从 0 变为 30% 时,在相同热功率下 CO₂ 排放量降低了 15%、NO_x 排放量升高了 362.07%,而在相同热负荷下 NO_x 排放量升高了 438.79%。通过稀薄燃烧技术可以降低燃烧温度,从而降低 NO_x 排放量,也可以通过加入稀释剂来降低燃烧温度与 NO_x 排放量,如日本三菱重工公司通过向扩散燃烧的燃气轮机燃烧室内喷注蒸汽或 N₂ 来降低 NO_x 排放量^[88]。

H₂ 密度小,掺氢后的燃料喷注流速增大,因此无法在大流量、高流速的进口气流中完成充分混合,从而导致局部燃料集中与过热,进而生成大量 NO_x。为保障稳定燃烧,同时降低 NO_x 排放,Ayed 等^[89]提出了微混燃烧技术,采用数千个微扩散喷嘴代替传统预混喷嘴,可在很短的喷嘴出口距离内实现燃料与空气充分混合,降低 NO_x 排放量,提高燃烧器抗回火能力。王阳燊旭等^[90]对天然气燃烧室进行设计优化,通过改变燃烧室腔体长度、扩压器长度、火焰筒长度及直径等参数以适应掺氢燃烧特性,但改进后的燃烧室长度明显增加。Lei 等^[91]通过自主设计的旋流微混燃烧器

增强了 H_2 与空气的混合程度,且减小了火焰尺度与 NO_x 的生成量。Alexandre 等^[92]采用旋流微预混燃烧技术将 NO_x 排放量降低到了预混燃烧的排放水平。

如何在确保富氢燃气轮机高效稳定运行的同时降低 CO_2 、 NO_x 排放量是未来主要研究方向,目前国内外学者已进行了大量掺氢燃气轮机设计与改造的研究工作,但仍需探索并开展相关应用验证。

3.4 发动机

汽车排放是造成空气污染的主要原因之一,为寻求清洁的替代燃料,近十年来,中国研究人员在氢能发动机领域取得了一定成果。汽车发动机主要分为点燃式(Spark Ignition, SI)、压燃式(Compression Ignition, CI)两类。当 SI 发动机用 H_2 作主要或添加燃料时,可在稀薄混合燃料工况下有效运行^[93], CO 与 NO_x 排放量减少^[94]。与传统汽油发动机相比,使用 H_2 作为燃料的 SI 发动机由气缸至冷却液的热传递减少,发动机热效率提高^[95]。同时,相关研究表明,在燃料中添加 H_2 可提高火焰传播速度,进而提高发动机性能^[96], Wang 等^[97]、Ishii 等^[98]的研究均证实了掺氢可为传统 SI 发动机带来积极影响。然而 H_2 的密度低,燃烧所需空气量更小,导致单位体积 H_2 的输出功率减少,氢燃料发动机的最大输出功率约为汽油燃料发动机额定功率的 78%^[99],这给提高氢燃料发动机的容积效率带来了极大挑战。

CI 发动机的主要燃料为柴油,其油耗较低且可持续高功率输出,多用于中型或重型卡车^[100]。与柴油相比, H_2 热值更高,可产生更多能量,然而,除非提高发动机压缩比,否则氢气较高的燃烧温度会导致其难以在传统 CI 发动机中作为单一燃料使用^[101]。因此,建议在压缩比适中的 CI 发动机中采用氢气-柴油双燃料模式,将 H_2 作为添加剂以调节燃烧过程^[102-103]。此外, H_2 的高可燃范围与低点火能也会引起进气回火、缸内燃烧、热释放率增加及爆震等问题^[104-107],必须采取有效措施以保障燃烧安全,如在进气系统中安装阻火器与单向阀、控制合适的 H_2 添加量等^[108-109]。针对上述问题, Saravanan 等^[110]开展了掺氢后柴油发动机的性能研究,发现当发动机满负荷运作时,掺氢比超过 50% 后发动机出现爆震,掺氢后 NO_x 排放量降低,综合各项参数得出柴油发动机中最佳掺氢比为 30%。

整体而言, H_2 燃烧速度快、点火能低、可燃范围广^[111],在燃料中添加一定比例的 H_2 可提高发动机的

效率与性能,减少废气排放,但也会带来回火、缸内燃烧、爆震等问题^[112]。可通过优化发动机设计、燃油喷射策略等方式保证发动机效率与性能,同时减少掺氢带来的不良燃烧影响。

4 结论及建议

氢气具有清洁无污染、来源丰富的特点,是未来重要的能源载体之一,在燃气领域,绿氢的使用可有效降低碳排放。由于气体性质存在差异,掺氢会改变天然气原有燃烧特性,并影响燃烧安全性,深入了解掺氢天然气的燃烧特性及其在终端设备中的应用现状,分析终端设备中引入氢气的相关风险,对掺氢天然气的大规模安全应用具有重要意义。

氢气燃烧速度快、点火能低、可燃范围广等特点有助于优化与增强燃烧过程,但其在燃烧终端中应用时也带来了相关安全问题。氢气的高燃烧速度所引起的回火风险是燃烧应用中的关键安全问题,合理优化燃烧器结构,控制燃料供给速度与空气流速,提高燃烧稳定性是氢能应用中的重点研究方向。掺氢燃烧技术在降低碳排放的同时会带来 NO_x 排放问题,如何进一步调和燃烧强化与污染物排放之间的矛盾,是掺氢燃烧技术大规模应用所面临的挑战。氢气极低的点火能与极宽的爆炸极限范围也增加了掺氢天然气存储泄漏的危险性,仍需进一步研究安全有效的存储方式。此外,相关标准、法规的制定与完善,可有效推动掺氢燃烧技术的发展与应用。

参考文献:

- [1] IEA. Key world energy statistics 2021[R]. Paris: IEA, 2021: 1-10.
- [2] STOUGIE L, GIUSTOZZI N, VAN DER KOOIJ H, STOPPATO A. Environmental, economic and exergetic sustainability assessment of power generation from fossil and renewable energy sources[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(9): 2916-2926. DOI: 10.1002/er.4037.
- [3] KARAYEL G K, JAVANI N, DINCER I. Effective use of geothermal energy for hydrogen production: a comprehensive application[J]. Energy, 2022, 249: 123597. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123597.
- [4] Hydrogen Europe. Green hydrogen for a European green deal a 2x40 GW initiative[R]. Brussels: Hydrogen Europe, 2020: 41.

- [5] Laboratories AGA. Interchangeability of other fuel gases with natural gases: research bulletin number 36[R]. Cleveland, Ohio: AGA Committe Mix. Gas Res. Jt. Committe Nat. Gas Dep. Tech. Sect. Am. Gas Assoc, 1946: 14–28.
- [6] WEAVER E R. Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1951, 46(3): 213–245.
- [7] DELBOURG P. Die austauschbarkeit der gase[J]. Gaswärme International, 1958, 7: 342–357.
- [8] 王玮, 王秋岩, 邓海全, 程光旭, 李云. 天然气管道输送混氢天然气的可行性[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 130–136. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2020.03.016](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2020.03.016).
- WANG W, WANG Q Y, DENG H Q, CHENG G X, LI Y. Feasibility analysis on the transportation of hydrogen-natural gas mixtures in natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 130–136.
- [9] 李明, 陈敏, 王红. 混氢天然气燃气互换性分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(11): 87–89. DOI: [10.3969/j.issn.1673-4076.2022.11.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4076.2022.11.032).
- LI M, CHEN M, WANG H. Analysis of interchangeability of mixed hydrogen natural gas gas[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(11): 87–89.
- [10] 崔德春, 熊亮, 于广欣, 徐庆虎, 李强, 纪钦洪. 掺氢天然气作燃料的掺氢比例与互换性要求[J]. 天然气工业, 2022, 42(增刊 1): 181–185. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2022.S1.029](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2022.S1.029).
- CUI D C, XIONG L, YU G X, XU Q H, LI Q, JI Q H. Hydrogen blending ratio and interchangeability requirements for hydrogen blending natural gas as fuel[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(S1): 181–185.
- [11] 周慧, 李玉星, 朱建鲁. 掺氢天然气使用互换性分析[C]. 重庆: 第 32 届全国天然气学术年会(2020), 2020: 2697–2710.
- ZHOU H, LI Y X, ZHU J L. Analysis of interchangeability in the use of hydrogenated natural gas[C]. Chongqing: 32nd National Natural Gas Academic Annual Conference (2020), 2020: 2697–2710.
- [12] LOZANO-MARTÍN D, PAZOKI F, KIPPHARDT H, KHANIPOUR P, TUMA D, HORRILLO A, et al. Thermodynamic (p , ρ , T) characterization of a reference high-calorific natural gas mixture when hydrogen is added up to 20% (mol/mol)[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 70: 118–135. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.05.028](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.028).
- [13] BOULAHLIB M S, MEDAERTS F, BOUKHALFA M A. Experimental study of combustion performances and emissions of a spark ignition cogeneration engine operating in lean conditions using different fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(6): 3586–3596. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2017.10.041](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.041).
- [14] QI S, LI Y T, ZHOU S, JING Q, ZHANG L B, ZHOU R, et al. The premixed flame structure and combustion mechanism of clean hydrogen mixed with multi-component natural gas[J]. Fuel, 2024, 372: 132240. DOI: [10.1016/j.fuel.2024.132240](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132240).
- [15] CHEN Y Y, LONG L W, HU J, HUANG T M, CHEN X, SONG X X, et al. The combustion characteristics and stable limit of a novel combustor with gradient porous media for hydrogen-enriched natural gas[J]. Journal of the Energy Institute, 2024, 116: 101743. DOI: [10.1016/j.joei.2024.101743](https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101743).
- [16] LIU X T, ZHAO M, FENG M Y, ZHU Y J. Study on mechanisms of methane/hydrogen blended combustion using reactive molecular dynamics simulation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(4): 1625–1635. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.10.050](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.050).
- [17] SUN Y H, ZHANG Y F, HUANG M M, LI Q, WANG W L, ZHAO D P, et al. Effect of hydrogen addition on the combustion and emission characteristics of methane under gas turbine relevant operating condition[J]. Fuel, 2022, 324(Part C): 124707. DOI: [10.1016/j.fuel.2022.124707](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124707).
- [18] XIANG L K, JIANG H T, REN F, CHU H Q, WANG P. Numerical study of the physical and chemical effects of hydrogen addition on laminar premixed combustion characteristics of methane and ethane[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(39): 20501–20514. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2019.11.040](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.040).
- [19] SARLI V D, BENEDETTO A D. Laminar burning velocity of hydrogen-methane/air premixed flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(5): 637–646. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2006.05.016](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.016).
- [20] REN F, CHU H Q, XIANG L K, HAN W W, GU M Y. Effect of hydrogen addition on the laminar premixed combustion characteristics the main components of natural gas[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(4): 1178–1190. DOI: [10.1016/j.joei.2018.05.011](https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.05.011).
- [21] JI C W, WANG D, YANG J X, WANG S F. A comprehensive

- study of light hydrocarbon mechanisms performance in predicting methane/hydrogen/air laminar burning velocities[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17260–17274. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2017.05.203](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.203).
- [22] NILSSON E J K, VAN SPRANG A, LARFELDT J, KONNOV A A. The comparative and combined effects of hydrogen addition on the laminar burning velocities of methane and its blends with ethane and propane[J]. Fuel, 2017, 189: 369–376. DOI: [10.1016/j.fuel.2016.10.103](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.103).
- [23] KHAN A R, RAVI M R, RAY A. Experimental and chemical kinetic studies of the effect of H₂ enrichment on the laminar burning velocity and flame stability of various multicomponent natural gas blends[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(2): 1192–1212. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2018.10.207](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.207).
- [24] OKAFOR E C, NAGANO Y, KITAGAWA T. Experimental and theoretical analysis of cellular instability in lean H₂-CH₄-air flames at elevated pressures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(15): 6581–6592. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2016.02.151](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.151).
- [25] SHANG R X, ZHUANG Z X, YANG Y, LI G. 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](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.099).
- [26] DONG C, ZHOU Q L, ZHANG X G, ZHAO Q X, XU T M, HUI S E. Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/natural gas/air mixtures[J]. Frontiers of Chemical Engineering in China, 2010, 4(4): 417–422. DOI: [10.1007/s11705-010-0515-8](https://doi.org/10.1007/s11705-010-0515-8).
- [27] HU E J, HUANG Z H, ZHENG J J, LI Q Q, HE J J. Numerical study on laminar burning velocity and NO formation of premixed methane-hydrogen-air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(15): 6545–6557. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.05.080](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.080).
- [28] HUANG Z H, ZHANG Y, ZENG K, LIU B, WANG Q, JIANG D M. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 302–311. DOI: [10.1016/j.combustflame.2006.03.003](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.03.003).
- [29] ZHAI Y F, WANG S F, WANG Z, ZHANG T Y, JI C W. Experimental and numerical study on laminar combustion characteristics of by-product hydrogen coke oven gas[J]. Energy, 2023, 278: 127766. DOI: [10.1016/j.energy.2023.127766](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127766).
- [30] ZHAO C X, LI X, WANG X H, LI M, XIAO H H. An experimental study of the characteristics of blended hydrogen-methane non-premixed jet flames[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 174: 838–847. DOI: [10.1016/j.psep.2023.04.041](https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.041).
- [31] KONG Y Y, LI Y X, WANG S L, HAN H, DUAN P F, YU X R, et al. Experimental study on jet fire characteristics of hydrogen-blended natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49(Part D): 1250–1260. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.153](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.153).
- [32] 刘晓佩. 氢气/天然气混合燃料贫预混旋流燃烧特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.
- LIU X P. Investigation on the combustion characteristics of hydrogen/natural gas hybrid fuel of lean-premixed swirl flame[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [33] 苗楠楠. 不同点火参数和燃料掺混条件下汽油转子发动机的燃烧和排放特性[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- MIAO N N. Combustion and emission characteristics of gasoline rotary engine with different ignition parameters and fuel mixing conditions[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [34] 邓玄亮, 孔祥领, 焦永丰, 王平. 燃气轮机燃烧室天然气掺氢的燃烧特性研究[J]. 节能, 2022, 41(12): 38–41. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7948.2022.12.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7948.2022.12.011).
- DENG X L, KONG X L, JIAO Y F, WANG P. Research on combustion characteristics of natural gas mixed with hydrogen in gas turbine combustion chamber[J]. Energy Conservation, 2022, 41(12): 38–41.
- [35] 张永翔. 掺氢对甲烷点火和层流燃烧影响的化学动力学研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- ZHANG Y X. Chemical kinetic study of the effect of hydrogen addition on methane ignition and laminar burning characteristics[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [36] 王鑫慈, 刘爱骅, 吴小取, 张云杰. 甲烷/氢气混合燃料贫预混旋流燃烧特性数值研究[J/OL]. 上海交通大学学报: 1–19 [2023-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1466.U.20230529.1231.004.html>.
- WANG X C, LIU A G, WU X Q, ZHANG Y J. Numerical study on the combustion characteristics of methane/hydrogen hybrid fuel of lean premixed swirl[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1–19[2023-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/>

- detail/31.1466.U.20230529.1231.004.html.
- [37] ZHANG Y J, JIANG X, WEI L J, ZHANG J X, TANG C L, HUANG Z H. Experimental and modeling study on auto-ignition characteristics of methane/hydrogen blends under engine relevant pressure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(24): 19168–19176. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2012.09.056](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.056).
- [38] ZHANG Y J, HUANG Z H, WEI L J, NIU S D. Experimental and kinetic study on ignition delay times of methane/hydrogen/oxygen/nitrogen mixtures by shock tube[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2853–2861. DOI: [10.1007/s11434-011-4635-4](https://doi.org/10.1007/s11434-011-4635-4).
- [39] 刘长鹏. 天然气浓燃改质燃烧机理与试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- LIU C P. Experimental and kinetic modeling study on natural gas rich combustion and reformed combustion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [40] 郁鸿飞, 李祥晟, 郭茜. 甲烷掺氢燃料反应动力学特性分析及机理验证[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(9): 3563–3572. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.223430](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223430).
- YU H F, LI X S, GUO H. Kinetic characteristics analysis and mechanism verification of hydrogen-doped methane fuel[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(9): 3563–3572.
- [41] 许多. 天然气 HCCI 发动机燃烧特性模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022.
- XU D. Simulation study on combustion characteristics of natural gas HCCI engine[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2022.
- [42] 王珂. 天然气掺氢燃烧特性研究[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- WANG K. Research on combustion characteristics of natural gas mixed with hydrogen[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2021.
- [43] 佟灵茹, 潘江如, 何龙, 何田, 张成. 掺氢比对天然气 HCCI 燃烧特性和排放的影响研究[J]. *低温与超导*, 2020, 48(8): 101–106. DOI: [10.16711/j.1001-7100.2020.08.018](https://doi.org/10.16711/j.1001-7100.2020.08.018).
- TONG L R, PAN J R, HE L, HE T, ZHANG C. Effect of hydrogen-doped ratio on combustion characteristics and emission of natural gas HCCI[J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2020, 48(8): 101–106.
- [44] 董少毅. 掺氢对天然气发动机缸内燃烧过程及性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- DONG S Y. Study on the influence of hydrogen blend on the combustion process and performance of CNG engine[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [45] MEZIANE S, BENTEBBICHE A. Numerical study of blended fuel natural gas-hydrogen combustion in rich/quench/lean combustor of a micro gas turbine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(29): 15610–15621. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2019.04.128](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.128).
- [46] 吴子天, 马继卿, 辛森森, 田建均. 全预混燃气热水器对掺氢天然气适应性研究[C]. 宁波: 2022 年中国家用电器技术大会, 2023: 2171–2175.
- WU Z T, MA J Q, XIN S S, TIAN J J. Research on the adaptability of fully premixed gas water heaters to hydrogen doped natural gas[C]. Ningbo: 2022 China Household Appliance Technology Conference, 2023: 2171–2175.
- [47] 冷先银, 葛琪琪, 何志霞, 何东泽, 隆武强. 预燃室式天然气掺氢发动机燃烧及排放模拟[J]. *内燃机学报*, 2021, 39(1): 26–33. DOI: [10.16236/j.cnki.nrjxb.202101004](https://doi.org/10.16236/j.cnki.nrjxb.202101004).
- LENG X Y, GE Q Q, HE Z X, HE D Z, LONG W Q. Numerical study on the combustion and emission characteristics of a pre-chamber engine fueled with hydrogen enriched compressed natural gas[J]. *Transactions of CSICE*, 2021, 39(1): 26–33.
- [48] CELLEK M S, PINARBAŞI A. Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(2): 1194–1207. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2017.05.107](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.107).
- [49] 吕晨腾. 冷壁对天然气燃烧及 NO_x 排放特性的数值模拟[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- LYU C T. Numerical simulation of cold wall effects on natural gas combustion and NO_x emission characteristics[D]. Jinan: Shandong Architectural University, 2022.
- [50] 李立新, 刘星雨, 曾过房, 白红涛, 于红伟, 李靖. SGT-800 重型燃气轮机天然气掺氢燃烧数值模拟研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(12): 70–78. DOI: [10.19666/j.rfd.202303033](https://doi.org/10.19666/j.rfd.202303033).
- LI L X, LIU X Y, ZENG G F, BAI H T, YU H W, LI J. Numerical modeling of natural gas combustion with hydrogen blending in SGT-800 heavy-duty gas turbine[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(12): 70–78.
- [51] PARK S. Hydrogen addition effect on NO formation in methane/air lean-premixed flames at elevated pressure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(50): 34515–34525. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.09.100](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.100).

- 25712–25725. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.05.101](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.101).
- [52] DE PERSIS S, IDIR M, MOLET J, PILLIER L. Effect of hydrogen addition on NO_x formation in high-pressure counter-flow premixed CH₄/air flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(41): 23484–23502. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2019.07.002](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.002).
- [53] SUN M X, HUANG X M, HU Y L, LYU S. Effects on the performance of domestic gas appliances operated on natural gas mixed with hydrogen[J]. *Energy*, 2022, 244(Part A): 122557. DOI: [10.1016/j.energy.2021.122557](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122557).
- [54] 詹心怡, 秦朝葵, 朱海鹏, 陈士柏. 天然气掺氢时部分预混燃烧器的燃烧特性试验研究[J]. *城市燃气*, 2022(2): 1–11. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5152.2022.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5152.2022.02.001).
- ZHAN X Y, QIN C K, ZHU H P, CHEN S B. Experimental study on combustion characteristics of part-premixed burner under natural gas blending hydrogen[J]. *Urban Gas*, 2022(2): 1–11.
- [55] 邓获. 氢气对甲烷/空气对冲扩散火焰燃烧特性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- DENG D. Detailed influences of hydrogen as fuel additive on thermal characteristics of counterflow diffusion methane/air flames[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [56] 王金华. 天然气-氢气混合燃料直喷燃烧特性和预混层流火焰研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- WANG J H. Study on direct injection combustion and laminar premixed flame characteristics fueled with natural gas-hydrogen blends[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009.
- [57] 谢依桐, 秦朝葵, 黄逊青, 江先明. 民用燃气热水器对掺氢天然气的适应性研究[J]. *城市燃气*, 2021(11): 1–5. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5152.2021.11.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5152.2021.11.001).
- XIE Y T, QIN C K, HUANG X Q, JIANG X M. The research on flexibility of domestic gas water heater to hydrogen-enriched natural gas[J]. *Urban Gas*, 2021(11): 1–5.
- [58] TIEKSTRA G C. The NATURALHY project: first step in assessing the potential of the existing natural gas network for hydrogen delivery[C]. Paris: International Gas Union Research Conference 2008, 2008: 1509–1518.
- [59] MELAINA M W, ANTONIA O, PENEV M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues: NREL/TP-5600-51995[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013: 10–15.
- [60] KIPPERS M J, DE LAAT J C, HERMKENS R J M, OVERDIEP J J, VAN DER MOLEN A, VAN ERP W C, et al. Pilot project on hydrogen injection in natural gas on island of Ameland in the Netherlands[C]. Seoul: International Gas Union Research Conference 2011, 2011: 1163–1177.
- [61] BARRETT S. GDF Suez, McPhy in French GRHYD project on methane, hydrogen[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2012, 2012(12): 10. DOI: [10.1016/S1464-2859\(12\)70362-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(12)70362-0).
- [62] ISAAC T. HyDeploy: the UK's first hydrogen blending deployment project[J]. *Clean Energy*, 2019, 3(2): 114–125. DOI: [10.1093/ce/zkz006](https://doi.org/10.1093/ce/zkz006).
- [63] 马向阳, 黄小美, 吴嫦. 天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性的影响研究[J]. *可再生能源*, 2018, 36(12): 1746–1751. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2018.12.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5292.2018.12.002).
- MA X Y, HUANG X M, WU C. Study on the influence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker[J]. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(12): 1746–1751.
- [64] 严荣松, 高文学, 张杨竣, 张建海. 含氢天然气在家用天然气燃气具上的燃烧性能测试[J]. *天然气工业*, 2018, 38(2): 119–124. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2018.02.016](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2018.02.016).
- YAN R S, GAO W X, ZHANG Y J, ZHANG J H. Combustion performance tests of hydrogen-natural gas mixtures as fuels in domestic gas appliances[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 119–124.
- [65] 罗子萱, 徐华池, 袁满. 天然气掺混氢气在家用燃气具上燃烧的安全性及排放性能测试与评价[J]. *石油与天然气化工*, 2019, 48(2): 50–56. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3426.2019.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3426.2019.02.009).
- LUO Z X, XU H C, YUAN M. Safety and emission performance test and evaluation of natural gas mixed with hydrogen combustion on domestic gas appliances[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2019, 48(2): 50–56.
- [66] 陈豪杰. 天然气中含氢量对燃烧设备影响的实验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- CHEN H J. A experimental study on the influence of hydrogen content in natural gas on combustion appliances[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [67] ZHAO Y, MCDONELL V, SAMUELSEN S. Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen[J].

- International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(47): 26049–26062. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2019.08.011](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.011).
- [68] ZHAO Y, MCDONELL V, SAMUELSEN S. Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(19): 11368–11379. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.02.071](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.071).
- [69] CHOUDHURY S, MCDONELL V G, SAMUELSEN S. Combustion performance of low-NO_x and conventional storage water heaters operated on hydrogen enriched natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(3): 2405–2417. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2019.11.043](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.043).
- [70] JONES D R, AL-MASRY W A, DUNNILL C W. Hydrogen-enriched natural gas as a domestic fuel: an analysis based on flash-back and blow-off limits for domestic natural gas appliances within the UK[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2018, 2(4): 710–723. DOI: [10.1039/C7SE00598A](https://doi.org/10.1039/C7SE00598A).
- [71] GLANVILLE P, FRIDLYAND A, SUTHERLAND B, LISZKA M, ZHAO Y, BINGHAM L, et al. Impact of hydrogen/natural gas blends on partially premixed combustion equipment: NO_x emission and operational performance[J]. Energies, 2022, 15(5): 1706. DOI: [10.3390/en15051706](https://doi.org/10.3390/en15051706).
- [72] HINRICHS J, HELLMUTH M, MEYER F, KRUSE S, PLÜMKE M, PITSCH H. Investigation of nitric oxide formation in methane, methane/propane, and methane/hydrogen flames under condensing gas boiler conditions[J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2021, 5: 100014. DOI: [10.1016/j.jaecs.2020.100014](https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2020.100014).
- [73] YANG X H, WANG T T, ZHANG Y, ZHANG H, WU Y X, ZHANG J S. Hydrogen effect on flame extinction of hydrogen-enriched methane/air premixed flames: an assessment from the combustion safety point of view[J]. Energy, 2022, 239(Part C): 122248. DOI: [10.1016/j.energy.2021.122248](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122248).
- [74] PERS H, ANIELLO A, MORISSEAU F, SCHULLER T. Autoignition-induced flashback in hydrogen-enriched laminar premixed burners[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(27): 10235–10249. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.12.041](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.041).
- [75] ZHAO Q N, LIU X M, JIAO A Y, XU H T, LIU F, LIAO X W. A simplified mechanism of hydrogen addition to methane combustion for the pollutant emission characteristics of a gas-fired boiler[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49(Part C): 1376–1390. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.275](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.275).
- [76] LAMIONI R, BRONZONI C, FOLLI M, TOGNOTTI L, GALLETTI C. Feeding H₂-admixtures to domestic condensing boilers: numerical simulations of combustion and pollutant formation in multi-hole burners[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118379. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.118379](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118379).
- [77] LIU F G, ZHENG L F, ZHANG R. Emissions and thermal efficiency for premixed burners in a condensing gas boiler[J]. Energy, 2020, 202: 117449. DOI: [10.1016/j.energy.2020.117449](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117449).
- [78] YANG H, LIN X L, PAN H J T, GENG S J, CHEN Z Y, LIU Y H. Energy saving analysis and thermal performance evaluation of a hydrogen-enriched natural gas-fired condensing boiler[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 19279–19296. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.02.027](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.027).
- [79] BÜYÜKAKIN M K, ÖZTUNA S. Numerical investigation on hydrogen-enriched methane combustion in a domestic back-pressure boiler and non-premixed burner system from flame structure and pollutants aspect[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(60): 35246–35256. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.03.117](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.117).
- [80] SIMIC K, T'JOLLYN I, FAES W, BASTERO J B, LAVERGE J, DE PAEPE M. Modelling of a gas-fired heating boiler unit for residential buildings based on publicly available test data[J]. Energy and Buildings, 2021, 253: 111451. DOI: [10.1016/j.enbuild.2021.111451](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111451).
- [81] MEN Y Y, LIU X H, ZHANG T. A review of boiler waste heat recovery technologies in the medium-low temperature range[J]. Energy, 2021, 237: 121560. DOI: [10.1016/j.energy.2021.121560](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121560).
- [82] BĂLĂNESCU D T, HOMUTESCU V M. Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 32: 504–512. DOI: [10.1016/j.promfg.2019.02.246](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.246).
- [83] BASSO G L, NASTASI B, GARCIA D A, CUMO F. How to handle the hydrogen enriched natural gas blends in combustion efficiency measurement procedure of conventional and condensing boilers[J]. Energy, 2017, 123: 615–636. DOI: [10.1016/j.energy.2017.02.042](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.042).
- [84] LIU X, BERTSCH M, SUBASH A A, YU S B, SZASZ R Z, LI Z S, et al. Investigation of turbulent premixed methane/air and

- hydrogen-enriched methane/air flames in a laboratory-scale gas turbine model combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(24): 13377–13388. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.01.087](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.087).
- [85] LI H M, LI G X, JIANG Y H. Laminar burning velocities and flame instabilities of diluted H₂/CO/air mixtures under different hydrogen fractions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(33): 16344–16354. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2018.06.132](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.132).
- [86] 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. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2018.07.111](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.111).
- [87] 耿州捷, 潘禾吉田, 杨欢, 熊瑶, 刘银河. 燃气轮机天然气掺氢燃烧及排放特性数值模拟研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 1–11. DOI: [10.7652/xjtub202212001](https://doi.org/10.7652/xjtub202212001).
GENG S J, PAN H J T, YANG H, XIONG Y, LIU Y H. Numerical study on influence of H₂ blending on combustion and emission characteristics of gas turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 1–11.
- [88] 邹昆. 日本氢燃气轮机的技术特点[J]. 东方汽轮机, 2022(4): 1–5, 15. DOI: [10.13808/j.cnki.issn1674-9987.2022.04.001](https://doi.org/10.13808/j.cnki.issn1674-9987.2022.04.001).
ZOU K. Technical characteristics of Japan's hydrogen gas turbine[J]. Dangfang Turbine, 2022(4): 1–5, 15.
- [89] AYED A H, KUSTERER K, FUNKE H H W, KEINZ J, STRIEGAN C, BOHN D. Experimental and numerical investigations of the dry-low-NO_x hydrogen micromix combustion chamber of an industrial gas turbine[J]. Propulsion and Power Research, 2015, 4(3): 123–131. DOI: [10.1016/j.jprr.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jprr.2015.07.005).
- [90] 王阳燊旭, 陈洁, 马榕谷, 张宏伟, 赵军超. 燃氢燃气轮机燃烧室结构改进[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 53–57. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3364.2016.08.053](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3364.2016.08.053).
WANG Y L X, CHEN J, MA R G, ZHANG H W, ZHAO J C. Structure modification for combustor in gas turbine turning to burn hydrogen gas[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 53–57.
- [91] LEI H R, KHANDELWAL B. Investigation of novel configuration of hydrogen micromix combustor for low NO_x emission[C]. Orlando: AIAA Scitech 2020 Forum, 2020: AIAA 2020–1933.
- [92] LANDRY-BLAIS A, SIVIĆ S, PICARD M. Micro-mixing combustion for highly recuperated gas turbines: effects of inlet temperature and fuel composition on combustion stability and NO_x emissions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, 144(9): 091014. DOI: [10.1115/1.4055190](https://doi.org/10.1115/1.4055190).
- [93] LI H L, KARIM G A. An experimental investigation of S. I. engine operation on gaseous fuels lean mixtures[J]. SAE transactions, 2005, 114(3): 1600–1608.
- [94] TOPINKA J A, GERTY M D, HEYWOOD J B, KECK J C. Knock behavior of a lean-burn, H₂ and CO enhanced, SI gasoline engine concept[J]. SAE Transactions, 2004, 113(3): 638–650.
- [95] SARAVANAN N, NAGARAJAN G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source[J]. Applied Energy, 2010, 87(7): 2218–2229. DOI: [10.1016/j.apenergy.2010.01.014](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.014).
- [96] GHAZAL O H. A comparative evaluation of the performance of different fuel induction techniques for blends hydrogen-methane SI engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(16): 6848–6856. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2013.03.090](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.090).
- [97] WANG S F, JI C W. Cyclic variation in a hydrogen-enriched spark-ignition gasoline engine under various operating conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(1): 1112–1119. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2011.02.079](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.079).
- [98] ISHII K, SASAKI T, URATA Y, YOSHIDA K, OHNO T. Investigation of cyclic variation of IMEP under lean burn operation in spark-ignition engine[J]. SAE Transactions, 1997, 106(4): 816–825.
- [99] SUBRAMANIAN V, MALLIKARJUNA J M, RAMESH A. Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(9): 1159–1173. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2006.07.022](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.07.022).
- [100] EL-ADAWY M. Effects of diesel-biodiesel fuel blends doped with zinc oxide nanoparticles on performance and combustion attributes of a diesel engine[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 80: 269–281. DOI: [10.1016/j.aej.2023.08.060](https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.060).
- [101] SHARMA H, DHIR A, MAHLA S K. Application of clean gaseous fuels in compression ignition engine under dual fuel mode: a technical review and Indian perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 128052. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.128052](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128052).

- [102] MASOOD M, ISHRAT M M, REDDY A S. Computational combustion and emission analysis of hydrogen-diesel blends with experimental verification[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2539–2547. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2006.11.008](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.008).
- [103] SHARMA P, DHAR A. Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(15): 7570–7580. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2018.02.181](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.181).
- [104] SUN Z H, HONG J C, ZHANG T Z, SUN B B, YANG B B, LU L Q, et al. Hydrogen engine operation strategies: recent progress, industrialization challenges, and perspectives[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(1): 366–392. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.09.256](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.256).
- [105] SHI C, JI C W, WANG S F, YANG J X, LI X Y, GE Y S. Effects of hydrogen direct-injection angle and charge concentration on gasoline-hydrogen blending lean combustion in a Wankel engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 187: 316–327. DOI: [10.1016/j.enconman.2019.03.011](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.011).
- [106] TSUJIMURA T, SUZUKI Y. The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 14019–14029. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2017.01.152](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.152).
- [107] SZWAJA S, GRAB-ROGALINSKI K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(10): 4413–4421. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.03.020](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020).
- [108] GOMES ANTUNES J M, MIKALSEN R, ROSKILLY A P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(15): 6516–6522. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.05.142](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.142).
- [109] DEBNATH B K, SAHA U K, SAHOO N. Effect of hydrogen-diesel quantity variation on brake thermal efficiency of a dual fuelled diesel engine[J]. *Journal of Power Technologies*, 2012, 92(1): 55–67.
- [110] SARAVANAN N, NAGARAJAN G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(6): 1769–1775. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2007.12.065](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.065).
- [111] 程婉静, 李俊杰, 刘欢, 田亚峻. 两种技术路线的煤制氢产业链生命周期成本分析[J]. *煤炭经济研究*, 2020, 40(3): 4–11. DOI: [10.13202/j.cnki.cer.2020.03.002](https://doi.org/10.13202/j.cnki.cer.2020.03.002).
- CHENG W J, LI J J, LIU H, TIAN Y J. Analysis of life cycle cost of coal hydrogen production chain based on two technical routes[J]. *Coal Economic Research*, 2020, 40(3): 4–11.
- [112] 李璐玲, 樊栓狮, 陈秋雄, 杨光, 温永刚. 储氢技术研究现状及展望[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(4): 586–594. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0062](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0062).
- LI L L, FAN S S, CHEN Q X, YANG G, WEN Y G. Hydrogen storage technology: Current status and prospects[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(4): 586–594.

(编辑: 祁梦瑶)

基金项目:国家重点研发计划“氢能技术”重点专项“纯氢与掺氢燃气管道输送及其应用科技试验平台”, 2021YFB4001605。

作者简介:孔莹莹, 女, 1991年生, 在读博士生, 2016年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事氢气管道输送安全方向的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 18589060723。Email: ykong1234@outlook.com

通信作者:李玉星, 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 国家重点研发计划“氢能技术”重点专项首席专家, 1997年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事氢气管道输送安全、油气与特殊气体管输安全技术等方面的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 13370809333。Email: liyxx@upc.edu.cn

• Received: 2024-05-28

• Revised: 2024-06-28

• Online: 2024-10-25

