中北大学学报(自然科学版)　　2026年 第47卷 第5期(总第229期)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)　　Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0682-15　　J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 682-696.

燃气轮机掺氢燃烧特性及适氢头部结构研究进展

万　斌[1,2]，赵　让[2]，王治武[1*]，李民强[1]，梁　勇[2]

(1. 西北工业大学 动力与能源学院，陕西 西安 710129；2. 太行国家实验室，四川 成都 610213)

摘　要：天然气掺氢是推动燃气轮机低碳化发展的关键技术，但氢气的高扩散、高反应活性及宽可燃极限等特性，会同步影响火焰稳定性和污染物生成规律，对现有燃烧室头部适应性提出了挑战。本文围绕燃料基础物性、火焰传播与结构、火焰稳定性及污染物排放等方面，对天然气掺氢燃烧的研究进展进行了归纳比较，并按旋流燃烧和微混燃烧两条技术路线，梳理了国内外典型适氢头部的稳焰机理、适氢范围与工程表现。结果表明，高比例掺氢的核心矛盾是燃烧活性增强与回火、热声及NO_x排放上升之间的耦合。旋流头部适合现役机组渐进式改造，微混头部在高比例掺氢和纯氢应用方面更具潜力。未来应加强高温高压及变工况下混合尺度、流动速度、当量比分布和声学边界的协同优化，为燃气轮机掺氢燃烧技术的工程应用提供支撑。

关键词：天然气掺氢；燃气轮机；燃烧稳定性；污染物排放；旋流燃烧；微混燃烧

中图分类号：TK471　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.07.0019

引用格式：万斌，赵让，王治武，等. 燃气轮机掺氢燃烧特性及适氢头部结构研究进展[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：682-696.

Wan Bin, Zhao Rang, Wang Zhiwu, et al. Research progress on hydrogen blended combustion characteristics and hydrogen-compatible combustor head structures in gas turbines[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2026, 47(5): 682-696.

Research Progress on Hydrogen Blended Combustion Characteristics and Hydrogen-Compatible Combustor Head Structures in Gas Turbines

Wan Bin[1,2], Zhao Rang[2], Wang Zhiwu[1*], Li Minqiang[1], Liang Yong[2]

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
2. Taihang National Laboratory, Chengdu 610213, China)

Abstract: Hydrogen blending into natural gas serves as a critical technology for promoting the low-carbon development of gas turbines. However, the high diffusivity, high reactivity, and wide flammability limits of hydrogen simultaneously affect flame stability and pollutant formation characteristics, posing challenges to the adaptability of existing combustor heads. This paper systematically summarizes and compares the research progress on hydrogen-blended natural gas combustion, focusing on fuel fundamental properties, flame propagation and structure, flame stability, and pollutant emissions. Furthermore, along two technical routes, namely swirling combustion and micro-mixing combustion, the flame stabilization mecha-

收稿日期：2026-07-17

基金项目：国家自然科学基金项目(12372338)；西北工业大学博士论文创新基金项目(ZX2026037)

作者简介：万　斌(1983—)，男，研究员，硕士，主要从事新型燃烧系统的研究。E-mail：wanbin83@163.com。

* **通信作者：**王治武(1981—)，男，教授，博士，主要从事燃烧与流动、爆震推进等研究。E-mail：malsoo@mail.nwpu.edu.cn。

nisms, hydrogen adaptation ranges, and engineering performance of typical hydrogen-compatible burner heads reported worldwide are comprehensively reviewed. The results indicate that the core contradiction of high-proportion hydrogen blending is the coupling between enhanced combustion activity and increased flashback, thermoacoustic oscillations, and NO_x emissions. The swirl head is suitable for the gradual retrofitting of existing units, while the micro-mixing head shows greater potential for applications involving high-proportion hydrogen blending and pure hydrogen. In the future, research should focus on the coordinated optimization of mixing scale, flow velocity, equivalence ratio distribution, and acoustic boundaries under high-temperature, high-pressure, and variable operating conditions to support the engineering application of hydrogen-blended combustion technology in gas turbines.

Key words: hydrogen-enriched natural gas; gas turbine; combustion stability; pollutant emissions; swirl combustion; micromix combustion

0　引　言

随着全球能源结构转型和“双碳”目标的持续推进，燃气轮机作为现代电力系统中高效发电与快速调峰的关键装备，亟需发展低碳燃烧技术。氢气凭借其零碳排放、清洁高效和来源广泛等优势，被认为是最具发展潜力的清洁能源之一[1-2]。作为利用过剩太阳能或风能驱动水电解的直接产物，氢气相比于电力具有储能周期长、储运灵活等优势。在此背景下，以氢能驱动燃气轮机发电，不仅能够有效解决可再生能源消纳难题，还能充分发挥燃气轮机快速启停和灵活调峰的特点，实现绿色电力的稳定可靠供给[3-4]。因此，燃气轮机燃料正逐步由天然气向富氢天然气乃至纯氢燃料方向发展。

然而，氢气与天然气在物理化学性质方面存在显著差异，这给现有燃气轮机燃烧系统带来了诸多技术挑战[5-6]。首先，氢气的火焰速度约为天然气的数倍，极大地增加了回火的风险。其次，氢气的低位质量热值（Lower Heating Value，LHV）远高于甲烷，在燃料与空气预混不充分时极易形成局部高温热点，从而增加氮氧化物（NO_x）排放。此外，氢气较高的反应活性还可能改变燃烧室内的压力波动特征，增加热声振荡风险。因此，如何有效控制回火、热声振荡及 NO_x 排放等问题，已成为燃气轮机掺氢燃烧技术进一步发展的关键。针对上述问题，国内外研究人员围绕天然气掺氢燃烧开展了大量研究，并针对现有燃烧室结构提出了多种改进方案。基于此，本文从以下两个方面系统综述当前燃气轮机掺氢燃烧技术的研究进展：1）天然气掺氢对燃烧性能的影响，包括燃料基础物性、火焰传播特性、燃烧稳定性以及污染物排放特性；2）当前适用于燃气轮机掺氢燃烧的燃烧室头部结构及其技术特点。这些研究结果可为燃气轮机掺氢燃烧技术的发展提供系统性参考。

1　氢气掺混对燃烧性能的影响

1.1　氢气和甲烷基础物性差异

天然气的主要成分是甲烷（CH_4）。氢气（H_2）和甲烷在 20 ℃和 101.325 kPa 条件下的主要物理化学性质如表 1 所示。由表可知，与甲烷相比，氢气具有更高的低位质量热值、更宽的可燃极限范围、更高的绝热火焰温度以及更强的热扩散和质量扩散能力。上述差异表明，向天然气中掺入氢气将显著改变混合燃料的基础物性，进而影响其火焰传播特性、燃烧稳定性及污染物排放特征。

表 1　20 ℃和 101.325 kPa 下氢气和甲烷的物理化学性质[7-9]

Tab. 1　Physicochemical properties of hydrogen and methane under 20 ℃ and 101.325 kPa[7-9]

物性参数	氢气	甲烷
密度/(kg•m^{-3})	0.0838	0.6512
低位质量热值/(MJ•kg^{-1})	119.93	50.02
低位体积热值/(MJ•m^{-3})	10.05	33.36
可燃极限(体积分数)/%	4～75	5.3～15
最低点火能量/mJ	0.02	0.29
自燃温度/K	858	813
绝热火焰温度/K	2376	2223
最高层流火焰速度/(cm•s^{-1})	306	37.6
热扩散系数/(mm^2•s^{-1})	153.26	23.69
运动黏度/(mm^2•s^{-1})	105.77	16.81
质量扩散系数/(mm^2•s^{-1})	78.79	23.98

动力黏度是表征气体动量传递能力的核心物理量，其主要受温度和组分影响。虽然氢气的运动黏度高于甲烷，但因甲烷的密度约为氢气的 8 倍，故氢气的动力黏度反而低于甲烷。Yaws 等[10]的研究数据表明，随着温度的升高，两种气

体动力黏度的差异进一步增大。此外，甲烷掺氢后热导率和热扩散系数显著升高，使热量能够更快地由高温反应区向未燃混合物传递，从而缩短预热区厚度并促进火焰向未燃区传播。同时，氢气具有较高的反应活性，更容易与氧气或O基快速反应生成O、OH等活性自由基，引发链传播和链分支反应，从而加速CH_4初始活化及后续氧化反应，进而提高整体燃烧反应速率[11]。另一方面，掺氢后质量扩散系数的增大也可加快活性自由基向火焰上游输运的速度[12]。因此，加入氢气有利于提高火焰层流速度，从而促进火焰传播。

总体来看，氢气与甲烷的差异主要体现在热物性、可燃范围以及传热传质能力等方面。天然气掺氢后，混合燃料的输运性质和相关物性随之改变，这是火焰传播、燃烧稳定性及污染物排放特性发生变化的物性基础。

1.2 掺氢对火焰特性的影响

火焰燃烧速度是火焰传播理论的基础，现有研究普遍表明，随着掺氢比例的提高，甲烷/氢气混合燃料的层流火焰速度显著增加[13-14]。Shelil等[15]利用CHEMKIN软件计算了0%～100%掺氢范围内甲烷/氢气混合燃料在0.1 MPa和300 K条件下的层流火焰速度，结果如图1所示。

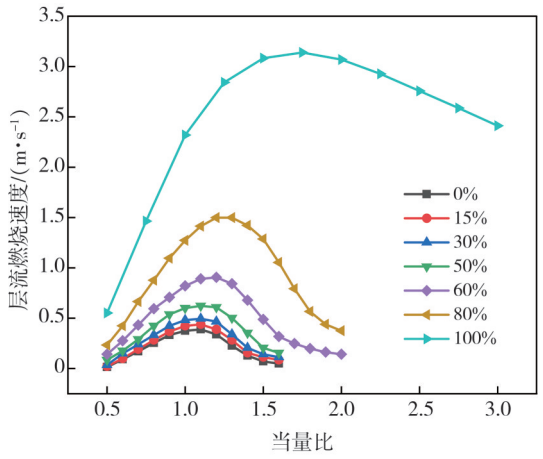


图1 不同甲烷/氢气混合比例下的层流火焰速度[15]

Fig. 1 Laminar flame speed at different CH_4/H_2 mixture ratios[15]

Halter团队[16]结合实验与数值模拟进一步证实，氢气的掺入可使层流燃烧速度提高40%～65%，且该强化效应随掺氢比呈非线性增长。Sakhrieh等[17]的研究表明，在化学计量比条件下，甲烷/空气混合物的层流火焰速度与系统压力呈负相关，而与气体温度呈正相关。在真实燃气轮机工况下，其燃烧过程为湍流燃烧，因此火焰传播应采用湍流火焰速度表征。Wang等[18]的研究发现氢气掺混比例和湍流强度越大，火焰实际燃烧速度越快。Guo等[19]利用激光断层扫描成像技术分析了氢气掺混对燃烧速率的影响，结果表明，在恒定湍流强度条件下，氢气的添加对湍流燃烧速率的促进效果比层流工况更为显著。Kalantari等[20]将湍流火焰速度归纳为多种因素的关联函数

$$\frac{S_T}{S_L}=337.5\left(\frac{L_T}{\delta_f}\right)^{-0.37}\left(\frac{u'}{S_L}\right)^{0.63}\left(\frac{T_u}{T_0}\right)^{-0.63}\left(\frac{P_u}{P_0}\right)^{0.63},\quad(1)$$

式中：S_L为层流火焰速度；S_T为湍流火焰速度；L_T为湍流积分尺度；δ_f为层流火焰厚度；u'为脉动速度；P_u为未燃压力；T_u为未燃混合物温度；T_0为参考温度，300 K；P_0为参考压力，101.325 kPa。

燃烧室内火焰的结构形态是燃烧状态的直观表现。众多学者观察到，掺氢使化学反应前锋向喷嘴方向移动，火焰整体呈现出变短变紧凑的趋势[21-23]，这是由于火焰传播速度提高后，燃烧反应得以在更短距离内完成。Park等[24]的实验结果表明，随着氢气比例的增加，火焰长度逐渐减小而火焰张角明显增大。Shchepakina等[14]从燃烧动力学角度定量分析了掺氢对火焰结构的影响，掺氢比例每提升10%，火焰前沿化学反应强度增强25%～30%，火焰纵向尺寸收缩12%～18%。Rajpara团队[25]在真实燃烧室原型试验中同样发现，在50%掺氢比工况下，火焰宽度增加25%而长度缩短35%。李立新等[26]针对西门子SGT-800燃气轮机开展了掺氢燃烧数值模拟，结果显示，当掺氢比从0%提高至30%时，燃烧区峰值温度升高的同时，火焰轴向延伸范围明显收缩，外围燃烧区域逐渐向中心轴线偏移。

此外，掺氢后火焰传播速度的提高及火焰对应变速率抵抗能力的增强，会进一步诱导火焰形态的转变。Subash等[27]发现，随着掺氢比例的增加，燃料反应速率加快，推动火焰锋面向上游燃烧器端面迁移。由于火焰抗拉伸、抗应变能力增强，火焰逐渐向内外两侧回流区(ORZ)扩展，火焰形态随之由“V”形转变为“M”形。然而，Chterev等[28]在高压燃烧实验中则观察到相反的变化趋势。其研究发现，压力升高会压缩火焰锋面厚度，并增强外剪切层的稳定作用，使火焰倾向于在外剪切层附近形成“M”形结构。但是，掺氢诱发的热声自激振荡会扰动外剪切层的稳定结

构，迫使火焰重新附着于内剪切层，最终形成“V”形火焰。这表明压力同样会影响火焰最终的稳定位置。Liu 等[29]采用高速 OH 化学发光成像和高速 PIV 发现，当氢气含量达到 50% 时，火焰与流场的相互作用改变了内回流区（IRZ）的位置与大小，火焰驻点同时发生轴向后退和径向内收，火焰形态最终由“M”形转变为“II”形结构，如图 2 所示。Therkelsen 等[30]在低旋流燃烧器掺氢燃烧中则观察到火焰由“碗形”向“M”形演变。综上所述，不同研究中初始火焰形态的差异主要源于燃烧器旋流强度、稳焰流场结构及运行压力的不同。总体而言，氢气对火焰传播速度、抗拉伸能力及内外回流区位置的影响，是导致火焰形态发生转变的核心原因。

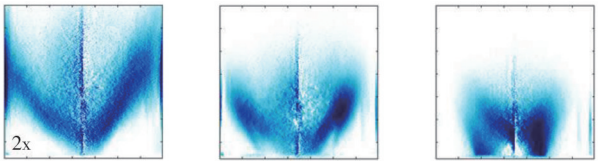


图 2　Re=15 000 和 φ=0.80 时掺氢比对火焰形状的影响[29]

Fig. 2　Effect of hydrogen content on flame shape at Re=15 000 and φ=0.80[29]

在火焰温度方面，由于氢气具有较高的绝热火焰温度以及更快的化学反应速率，当氢气掺混比例升高时，燃烧室内高温区域逐渐扩大，峰值温度明显升高。杨潇[31]根据 CHEMKIN 计算结果的研究表明，当掺氢比达到 80% 时，燃烧室绝热火焰温度较纯天然气工况提高约 150 ℃。Rajpara 等[25]同样指出，掺氢会显著提高燃烧温度并强化燃烧反应过程。赵昊等[32]针对 GE 燃气轮机燃烧室开展数值模拟研究发现，随着掺氢比例的增加，燃烧反应区明显前移，局部释热量增加，火焰温度持续升高。当掺氢比超过 60% 时，燃烧室出口温度分布均匀性系数大幅下降。谭宗洋等[33]观察到掺氢燃烧使外回流区温度降低而中心回流区温度升高，进一步揭示了氢气掺混对燃烧室内温度场空间分布的调控效应。

总体来看，掺氢会加快火焰传播，使反应区前移、火焰缩短并趋于紧凑，同时提高燃烧温度。但是火焰形态的具体演变并不一致，受燃烧室结构、运行压力及流场条件等因素的共同影响。因此，掺氢对火焰特性的影响需结合具体结构与工况综合评价。

1.3　掺氢对燃烧稳定性的影响

火焰稳定性是衡量燃气轮机燃烧系统运行安全性和可靠性的重要指标，直接关系到燃烧效率、设备寿命及机组运行安全。氢气掺混虽然能够提高燃料反应活性并拓宽可燃极限，但同时也会带来自燃、吹熄、热声振荡和回火等稳定性问题。

自燃是指燃料与空气形成的可燃混合物在到达预定燃烧区域之前，无需外部点火源即可发生自主着火的现象。燃气轮机通常在高压高温条件下运行，预混燃料在进入主燃烧区之前存在自燃提前着火的可能。自燃风险一般通过点火延迟时间进行评估，点火延迟时间定义为混合物达到点火条件后至发生明显自持燃烧反应之间的时间间隔。若点火延迟时间短于混合物在预混段内的停留时间，则混合物提前在预混段内着火，从而对燃烧器结构造成严重损伤。尽管氢气的自燃温度略高于天然气，但其点火延迟时间远低于天然气，这表明掺氢会增加燃烧室的自燃风险。Donohoe 等[34]在研究中发现，当氢气掺混比例超过 50% 时，混合燃烧的点火延迟时间显著缩短，而低于 20% 时其影响相对有限。图 3 展示了不同掺氢比例下点火延迟时间的变化规律：随掺氢比例的升高，点火延迟时间持续减小，且降幅逐步增大。此外，Brower 等[35]研究指出增大火焰温度同样会大幅缩短点火延迟时间。

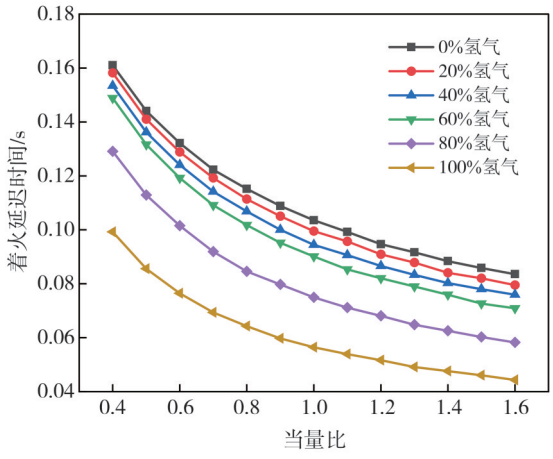


图 3　点火延迟时间随掺氢比例和当量比的变化趋势[31]

Fig. 3　Trends in ignition delay time with variations in hydrogen blending ratio and equivalence ratio[31]

吹熄是指火焰因反应速率不足而无法维持持续燃烧的现象，贫油吹熄（Lean Blowout，LBO）极限常用于评价燃烧系统在低负荷工况下的稳定运行能力。Griebel 等[36]对甲烷/氢气预混射流火焰

的吹熄特性进行了系统研究，结果表明，主流速度增大引起的火焰拉伸效应会导致临界LBO当量比升高，而提高反应物温度或增加掺氢比例则能增强燃料反应活性，拓宽贫燃稳定燃烧范围，使火焰能够在更低当量比条件下保持稳定燃烧。Schefer等[37]通过实验进一步证实，当甲烷掺混41%的氢气时，其贫燃吹熄极限得到明显拓展。其主要原因在于氢气较高的燃烧速度和较宽的可燃极限，使其在极稀薄工况下仍能维持较高的反应速率，可增强火焰抵抗强剪切拉伸熄灭的能力。由此可见，适量掺氢有利于提升燃气轮机低负荷工况下的运行稳定性。

热声振荡(热声不稳定性)是燃气轮机燃烧室面临的重要工程挑战，其本质是燃烧室内压力波动与热释放波动耦合形成的自激振荡现象。热声振荡不仅会降低燃烧效率，还可能导致燃烧室结构疲劳损伤甚至失效。研究表明[38-40]，火焰形态及长度的变化会影响火焰质心的位置，从而影响燃烧室的稳定性。对此，部分学者开始深入探究掺氢比例对燃烧室热声特性的影响规律。

Beita等[7]和Zhang等[41]指出，掺氢后火焰缩短并向上游移动，混合物反应速度加快，对流时间尺度减小，导致压力波动与热释放之间的相位关系发生改变。当掺氢比例达到特定范围时，燃烧室可能出现强烈的非线性不稳定现象。Taamallah等[42]和Karlis等[43]的实验结果均表明，掺入20%的氢气并不会对稀薄预混旋流燃烧的热声学模式产生明显影响。但Karlis指出，当氢气达到30%时，燃烧室开始出现间歇性高振幅振荡，随着进一步增加氢气比例至40%，热释放率与动态压力出现同相位、同频率的强耦合振荡。Wicksall等[44]对不同掺氢比例下燃气轮机燃烧室的声学特性进行了实验测试，结果发现，随着氢气比例由0%升高至40%，燃烧室由275～600 Hz宽频带振动转变为450 Hz高强度单频窄带振动，振动峰值强度达到纯甲烷工况的10倍左右。这表明随着掺氢比例的提高，燃烧室振动能量逐渐向特定频率集中，形成更强烈的压力振荡。

张龙等[45]通过大涡模拟探究了氢燃料热声振荡过程的内在物理机制，发现热声振荡与自由基H参与的链分支反应密切相关，表明除流动与声学因素外，化学动力学过程同样会影响热声振荡行为。Figura等[46]的研究显示，氢气的加入促使热声不稳定区域向更贫燃工况移动。Chterev团队[28]的实验结果表明，掺氢会缩短压力波在燃烧器内的传播时间与火焰长度，改变压力波动与热释放之间的相位延迟，从而使热声振荡幅值随工况不同而增强或减弱。总体来看，热声振荡已成为制约高比例掺氢燃气轮机发展的关键技术难题，亟需发展抑制热声振荡的相关技术。

回火是掺氢燃气轮机燃烧室面临的主要安全风险之一，其主要表现为火焰逆流传播进入预混通道甚至燃烧器内部，严重时会导致燃烧器损坏甚至设备失效。Ebi等[47-48]利用OH平面激光诱导荧光技术记录了甲烷/氢气混合燃料的回火过程：火焰首先附着于中心体尖端形成亚稳态火焰核，随后沿中心体壁面边界层逆主流方向向上游传播，最终穿过预混段驻留于旋流器尾迹区，如图4所示。此外，作者还探究了压力对甲烷/氢气混合燃料旋流火焰回火的影响，当压力从0.1 MPa增加到0.25 MPa时，临界回火当量比向贫燃方向移动。这主要是由于压力升高导致层流火焰厚度减小，从而影响淬熄距离和火焰拉伸特性。

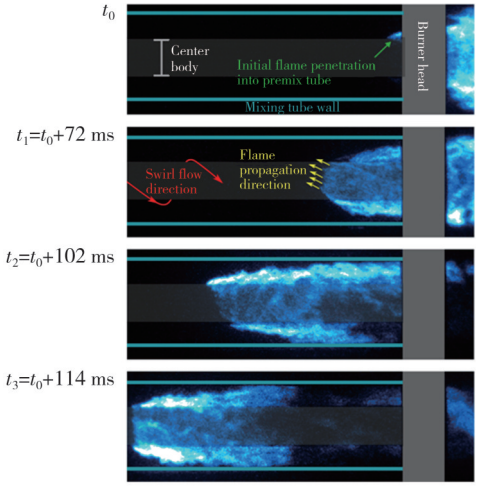


图4 不同回火时刻的OH图像[47]

Fig. 4 OH images at different instants during flashback[47]

Lin等[49]提出采用火焰速度梯度(g_c)和流速梯度(g_f)来评估边界层回火风险，如式(2)和式(3)所示。当火焰速度梯度大于流速梯度时即发生回火，相应地，提高流速梯度有利于增强火焰抵抗边界层传播的能力，从而降低回火风险。

$$g_c = S_T/(Le \times \delta_{L0}), \tag{2}$$

$$g_f = 0.039\,55 \times u_0^{7/4} \times \nu^{-3/4} \times d^{-1/4}, \tag{3}$$

式中：S_T表示基于全局消耗率得出的湍流火焰速度；Le表示路易斯数；δ_{L0}为参考火焰锋面厚度；u_0为燃烧室入口处的平均流速；d为燃烧室入口直径；ν为可燃混合物的运动黏度。

Eichler 等[50]通过实验和数值模拟研究了边界层层流和湍流预混火焰的回火现象，发现经典的临界梯度理论并不能充分描述层流和湍流壁面回火的物理机制，原因在于该理论忽略了火焰拉伸作用下的优先扩散效应，导致回火数据无法归一[51]。Fritz 等[52]认为掺氢后流体气动特性改变所导致的回流区和预混段内部涡结构破碎是引发回火的核心原因。董茹嫣[53]的研究表明，当掺氢比达到35%时，火焰传播速度超过气流速度，易诱发中心流回火，致使高温区向上游扩张，燃烧室温度显著升高。杨书轩[54]的数值模拟研究也表明，在不改变燃烧室结构的条件下，燃气轮机的安全掺氢比例上限约为50%，超过该比例时火焰将无法稳定维持在主燃区并发生回火。Tuncer 等[55]在高掺氢燃烧实验中观察到周期性回火现象，其频率与压力振荡频率基本一致。Garcia-Armingol 等[56]同样发现回火与燃烧室声学模态之间存在耦合关系，说明热声振荡可能促进回火发展，而回火又会进一步增强燃烧不稳定性。

为应对回火风险，研究人员提出了多种抑制措施。董茹嫣[53]通过优化旋流器安装角、调整燃料喷嘴位置及改变主燃级安装角度等措施，成功将燃烧室的掺氢适应性提升至60%以上。Lin 等[49]的研究表明，降低燃烧室入口温度能促使临界回火当量比向富油侧移动，从而降低回火发生的风险。储旭等[57]针对甲烷掺氢预混燃烧火焰的研究指出，适当降低当量比、提高入口流速或增强燃烧室壁面换热，均有助于抑制回火发生。Pappa 等[58]发现向富氢甲烷/空气混合气中添加水分，可有效降低氢气的化学反应活性，从而抑制回火。

总体来看，氢气掺混对燃气轮机火焰稳定性具有双重影响。一方面，氢气优异的燃烧特性能够提高燃料反应活性，拓宽贫燃极限并增强火焰抗吹熄能力。另一方面，其较高的燃烧速度和扩散能力也会缩短点火延迟时间，提高自燃、热声振荡及回火风险。未来需要结合实验测试和数值模拟，深入研究掺氢燃烧不稳定性的形成机制，为高比例乃至纯氢燃气轮机燃烧技术的发展提供理论支撑。

1.4　掺氢对污染物排放特性的影响

污染物排放是评价燃烧性能的重要指标之一，氢气作为零碳清洁能源，其燃烧过程中不会直接产生 CO_2 及未燃碳氢化合物等含碳污染物，因此在天然气中掺混氢气能够从源头上降低碳排放水平。李祥晟等[59]和赵昊等[32]的数值模拟结果均表明，随着掺氢比例的提高，燃气轮机燃烧产物中的 CO 和 CO_2 体积分数显著降低，而 H_2O 含量逐渐增加。Wang 等[60]研究指出氢气可显著减少甲烷燃烧过程中 CH_2O 以及 C_2H_2 的生成，从而有效抑制碳烟的产生。

Rajpara 等[25]发现掺氢后火焰反应区向上游迁移，燃烧反应速率显著提高，从而使燃烧产物中的 CO 体积分数明显下降。王珂[11]从反应动力学角度揭示了氢气对 CO_2 生成的作用机制，氢气引发的链式反应（$O+H_2=H+OH$、$H+O_2=O+OH$），可促进 H 自由基与 OH 自由基的大量生成，从而加速甲烷氧化链式反应的进程。特别是 OH 自由基浓度的升高，有助于增强 $OH+CO=H+CO_2$ 反应，促进 CO 向 CO_2 转化。

相比之下，NO_x 排放控制是掺氢燃烧技术的核心难点。由于氢气具有较高的绝热火焰温度和燃烧速率，氢气的掺混将导致天然气火焰温度升高，局部高温区扩大，促使对温度高度敏感的热力型 NO_x 生成速率呈指数级增长。大量研究表明，掺氢天然气的 NO_x 排放体积分数总体上呈现随掺氢比例增加而升高的趋势。王威等[61]的数值模拟表明，当掺氢比例为30%时，燃气轮机燃烧室的 NO_x 排放体积分数相比天然气增长了31%。杨潇[31]的计算结果也显示，当掺氢比例逐渐增至80%时，燃烧室出口 NO_x 的质量分数从 5.03×10^{-5} 升至 1.30×10^{-4}。需要指出的是，由于上述两项研究所采用的燃烧器结构和功率不同，因此其 NO_x 排放体积分数存在显著差异。

然而，也有研究发现掺氢对 NO_x 生成的影响并非单一促进作用。刘彦鹏等[62]在 AE94.3A 型燃气轮机掺氢燃烧试验中发现，虽然掺氢会促进热力型 NO_x 的生成，但同时降低了 CH 自由基浓度，从而抑制快速型 NO_x 的生成，两种机制相互耦合作用使 NO_x 排放保持相对稳定。此外，赵钦新等[63]指出，在贫燃条件下，掺氢可加快燃烧过程并缩短氧气在高温区内的停留时间，从而减少 NO_x 的生成，Shchepakina 等[14]也观察到了类似现象。这表明 NO_x 的排放不仅受火焰温度影响，还与当量比、停留时间、自由基浓度及燃烧组织方式等因素相关。

总体来看，氢气掺混能够显著降低含碳污染物排放，但在高掺氢比工况下 NO_x 排放增加的问题较为突出。因此，未来研究需进一步发展适用

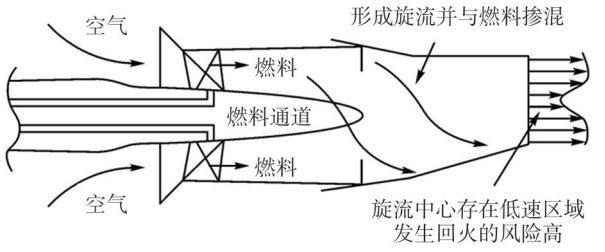
于燃气轮机的天然气掺氢低氮燃烧技术，以实现高比例掺氢燃气轮机的高效清洁燃烧。

2 掺氢燃烧室头部结构

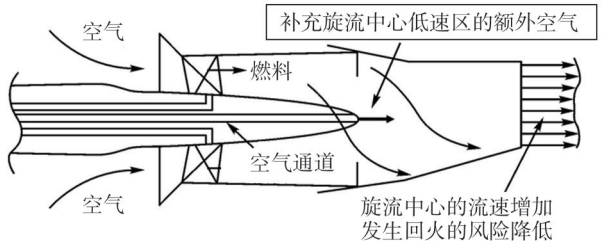
为提升燃气轮机对高比例氢燃料的适应能力，国内外主流燃气轮机制造商和研究机构围绕燃烧室头部结构提出了一系列优化方案和设计方法。目前适用于掺氢燃烧的头部结构主要可分为旋流燃烧头部和微混燃烧头部两大类。

2.1 旋流燃烧头部

旋流燃烧技术是当前天然气燃气轮机应用最广泛的稳焰方式，其通过旋流器诱导形成中心回流区，实现高温燃烧产物回流和火焰稳定。然而，随着氢气掺混比例的提高，火焰前缘向上游迁移，回火风险显著增加。针对这一问题，日本三菱日立电力系统公司(MHPS)在燃烧器头部中心增设空气喷口，通过引入高速空气射流来提高回流区流动速度，推动火焰稳定区域向燃烧室中部迁移，其结构如图5所示。示范实验结果显示，该设计可使高温区域停留时间缩短约18%，并能够适应30%的掺氢天然气燃烧[64-65]。



(a) 传统旋流燃烧头部

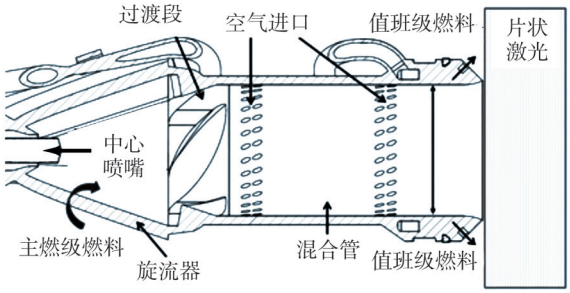


(b) 新型旋流燃烧头部

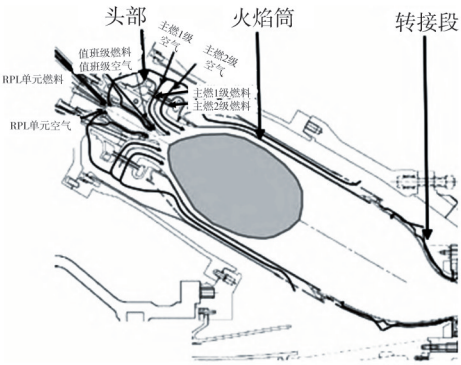
图5 三菱掺氢旋流燃烧头部[64-65]

Fig. 5 MHPS swirl-stabilized burner for hydrogen-enriched fuel[64-65]

西门子公司作为全球技术领先的燃气轮机制造商之一，针对天然气掺氢燃气轮机燃烧室开展了大量试验与运行测试。测试结果表明，现役天然气燃烧室无需进行结构改造即可实现15%～20%氢气体积分数的稳定运行[66]。为进一步提升燃烧器的掺氢适应能力，西门子结合分级预混燃烧与旋流稳焰技术相继开发了第三代和第四代干式低排放(Dry Low Emission，DLE)燃烧室，如图6所示。该燃烧室可通过调整燃料和空气流量来控制局部当量比，从而优化火焰位置和燃烧温度。同时，当含氢量增加时，可通过提高燃烧室下游轴向流速削弱中心回流区强度，以降低回火风险。目前，装载第三代DLE燃烧室的机组(SGT-600、SGT-700和SGT-800)已成功完成50%掺氢比例的燃烧试运行[67]。然而，第四代DLE燃烧室在高掺氢条件下仍面临NO_x排放偏高的问题[68]。



(a) 第三代燃烧室[67]



(b) 第四代燃烧室[68]

图6 西门子DLE燃烧室

Fig. 6 Siemens DLE combustors

安萨尔多公司[69-70]基于轴向分级燃烧和顺序燃烧技术推出了GT26和GT36燃氢燃气轮机。该方案的核心思路是：燃烧室头部在低当量比条件下完成初始点火，使燃烧前沿远离头部区域，在实现稳定自燃的同时有效规避回火风险；随后，在燃烧室下游补充注入燃料以达到目标燃烧温度，进一步稳定头部火焰。GT26目前可适应15%～30%的掺氢天然气，且NO_x排放体积分数小于15×10^{-6}($15\%O_2$基准，干基折算，下同)，而GT36采用顺序燃烧组织方式，最高可支持70%的氢气[71]。

国内上海电气自主研发了F级重型燃气轮机新型DeNO$_x$燃烧器[72]，其采用两级预混旋流结构，可灵活调节与分配燃料。该燃烧器开展了全温、全压、全尺寸燃烧试验，结果显示，在30%～40%掺氢比例下，燃烧器出口温度略微升高且未发生回火，同时，NO$_x$排放体积分数始终在15×10^{-6}以下，温度、污染物排放及火焰稳定性等各项燃烧性能参数均满足要求。

表2汇总了国内外适氢旋流燃烧器的核心技术、最高适氢比例及NO$_x$排放水平。可以看到，国内外主流燃气轮机厂商研制的燃烧头部可掺混30%～70%的氢气，且均已进入试验验证或工程应用阶段。其中，安萨尔多公司的GT36燃气轮机适氢能力最为突出，而国内上海电气研制的DeNO$_x$燃烧器在氮氧化物排放上更有优势，但掺氢比例仍有提升空间。总体而言，旋流燃烧头部的适氢改进主要围绕提高轴向流速、调控中心回流区以及采用分级或顺序燃烧等方向展开，在提升掺氢适应性的同时兼顾火焰稳定。随着掺氢比例的进一步提高，回火风险和NO$_x$排放仍是限制该类头部的重点问题。

表2　国内外适氢旋流燃烧器总结

Tab. 2　Summary of hydrogen-compatible swirl burners around the world

研发机构	燃烧器	燃烧技术	最高适氢比例/%	NO$_x$排放体积分数
日本三菱	掺氢旋流燃烧器（头部中心空气射流）	旋流燃烧技术	30	≤35×10^{-6}
西门子公司	干式低排放燃烧室	分级预混燃烧和旋流稳焰技术	50	≤25×10^{-6}
安萨尔多公司	GT36燃氢燃气轮机	轴向分级燃烧和顺序燃烧技术	70	≤25×10^{-6}
上海电气	DeNO$_x$燃烧器	旋流预混燃烧技术	40	≤15×10^{-6}

2.2　微混燃烧头部

微混燃烧技术最早由德国亚琛工业大学提出，其基本原理是利用大量微型喷孔将燃料喷出，使燃料与空气在极短距离内实现快速混合和燃烧，形成大量相互独立的微小火焰。这种设计不仅能够显著缩短反应物在高温区的停留时间，而且微型喷孔喷出的高速射流可有效阻止火焰向喷口上游回传。因此，微混燃烧技术已成为高比例掺氢及纯氢燃气轮机领域的研究热点，并被认为是实现高比例乃至纯氢燃烧的重要技术路线之一。

微混燃烧器根据燃烧组织方式又可分为微预混燃烧器和微混扩散燃烧器。其中，微预混燃烧器通常采用射流-横流混合、旋流微混及同轴混合等多种方式。NASA最早提出了贫油直喷（Lean Direct Injection，LDI）微预混燃烧器[73]，其结构如图7所示。该燃烧器喷嘴的空气通道直径为6.35 mm，而0.6 mm的燃料喷孔与其同轴嵌套，燃料通过与空气横流剪切的形式实现快速掺混。NASA的纯氢燃烧测试表明，该燃烧器混合极其均匀，燃烧稳定性良好，且污染排放极低。

美国通用电气公司（GE）为重型燃气轮机研制了多管微预混燃烧器[74]，其同样采用交叉射流混合方式，燃料进入微混合管环腔后通过壁面喷孔与轴向进入的空气快速掺混。GE公司在真实燃气轮机工况下对该燃烧器开展了单喷嘴与多喷嘴试验测试，结果发现该喷嘴的总压损失仅有3.5%，NO$_x$排放体积分数低于10×10^{-6}，且未出现回火及燃烧不稳定现象[75-76]。在此基础上，GE公司进一步研发了集成多管微混喷嘴的DLN2.6e燃烧系统[77]，并成功应用于HA级燃气轮机。该机组的氢气掺混比例可达50%，污染物排放较传统方案可降低70%[78]。

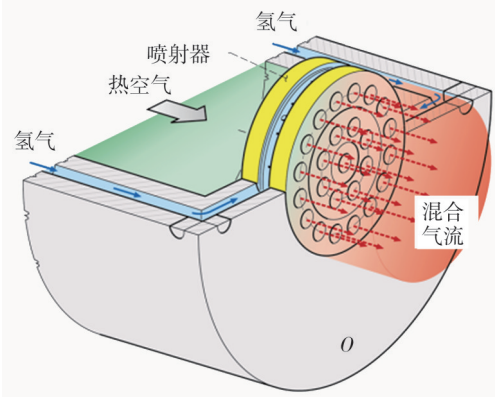


图7　NASA微混燃烧器[73]

Fig. 7　NASA micromix burner[73]

三菱日立则基于同轴混合原理设计了一种多簇微预混燃烧器[64,79]。燃料与空气同轴喷射并在极短的通道内完成混合，其混合段长度可依据燃料的点火延迟时间及金属材料的耐热极限进行设计。此外，各燃烧单元出口设置一定倾角以形成局部旋流，增强混合效果和火焰稳定性。相关测试结果表明，该燃烧器在40%～84%的氢气体积分数条件下可实现低于6×10^{-6}的NO$_x$排放体积分数，且将多孔喷嘴板优化为凸形结构后，还可抑制热声振荡的发生[80]。然而，多簇微预混燃烧器仍存在局限性：在热负荷恒定的前提下，高比例掺氢引起的体积流量增加将

导致燃烧室压降显著上升[81]。

德国MAN Energy公司[82]研究了类似的同轴喷射微混构型。与三菱日立的多簇燃烧器相比，该结构设计了更长的混合通道以进一步提高氢气与空气的混合均匀性。此外，MAN Energy公司还对比了直流喷嘴和螺旋喷嘴的混合性能，结果发现，螺旋喷嘴较直流喷嘴具有更好的混合性能，但螺旋喷嘴产生的局部中心回流区会促使火焰向上游迁移，变得更加紧凑，从而提高局部温度并增加回火风险。

旋流微预混燃烧是利用微型旋流结构强化局部湍流扰动以促进混合，并依靠旋流引起的回流区来稳定火焰。韩国首尔大学研究团队[83]设计的旋流微预混燃烧器，是氢气以垂直射流方式喷入旋流通道与空气进行预混。基于该燃烧器，研究者对掺氢比0%~100%工况下的热声不稳定特性开展了系统试验，发现火焰传播速度和谐振频率随掺氢比例的增大而增加。

Parker公司[84]提出了一种由多个毫米级混合杯紧密排列组成的多杯式喷射微混燃烧器。每个混合杯内设有多个旋流空气孔与燃料喷口，利用切向旋流空气与燃料射流的强烈相互作用实现短距离内的高效掺混，同时，底部设置稀释气喷口用于调节火焰温度。伊利诺伊大学研究团队[85-87]采用旋流与钝体相耦合的设计方案，利用钝体形成回流区稳定火焰，并通过阵列式布置获得均匀火焰结构。实验结果表明，该设计能够降低释热波动并增强热声稳定性。

为实现100%纯氢燃烧，川崎重工业联合德国亚琛工业大学开发了微混扩散燃烧器[88-89]。空气与氢气通过射流横流混合形成内外涡流结构以稳定火焰。该方式接近扩散燃烧，因而可从机理上规避回火风险。该方案已在川崎公司2 MW燃气轮机上完成全尺寸整机测试，纯氢工况运行稳定且NO_x排放体积分数低于35×10^{-6}[90]。2020年，应用该技术的川崎重工M1A-17燃气轮机已在日本神户投入示范运行[91]，但局部高温仍会带来NO_x排放控制压力。克兰菲尔德大学的研究表明，调节燃料与空气动量比可控制射流穿透深度和火焰位置，但仍需关注扩散火焰局部高温导致的壁面热负荷问题[92]。

中国科学院工程热物理所邵卫卫团队提出了一种多喷嘴微混燃烧器[93-95]，该燃烧器由7个单元喷嘴呈阵列排布组成，每个单元喷嘴包含4个圆形燃料孔和4个方形空气孔，单喷嘴出口直径为10 mm，如图8所示。微混燃烧的稳焰机制研究结果表明，该燃烧器依靠剪切层形成的微型回流区稳定火焰，可实现纯氢燃烧，其喷嘴厚度和角度是影响火焰稳定性的关键几何参数。

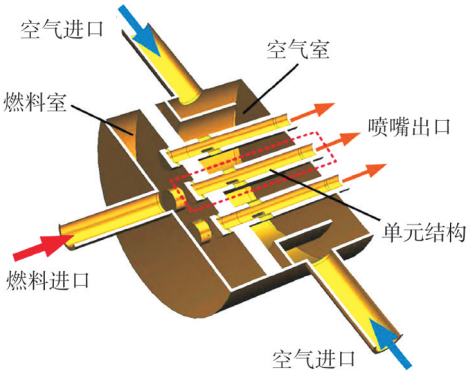


图8 多喷嘴微混燃烧器[95]

Fig. 8 Multi-nozzle micro-mixing burner[95]

中国航发沈阳发动机研究所的莫妲等[96]设计了蜂巢式钝体微混扩散燃烧器，该结构在燃烧器内部布置微型钝体，利用钝体所产生的三维尾迹与氢气射流涡相互耦合，可有效加剧主流扰动从而促进掺混效果。适当范围内增加钝体出口高度有利于降低NO_x排放，NO_x排放体积分数最低可达5×10^{-6}。

哈尔滨工业大学胡启明等[97]搭建了环形射流微混组合喷嘴试验台，测试了氢气掺混对甲烷火焰结构和NO生成特性的影响。测试结果显示，该燃烧器掺混70%~90%的氢气时，在当量比为0.6~0.9条件下可稳定燃烧。此外，若当量比低于0.8，则NO排放体积分数可控制在10×10^{-6}以下。

表3汇总了国内外典型微混燃烧器的结构形式及其基本情况，可以看到，微混燃烧头部呈现多管化、多簇化和阵列化的发展趋势，其共同思路是缩短混合距离和高温停留时间，并结合高速射流、局部旋流或钝体扰流等方式实现快速混合和增强火焰稳定性。因此，微混燃烧头部具有较强的燃料适应性，多数燃烧器的最高适氢比例可达100%，且NO_x排放体积分数基本可控制在10×10^{-6}以内。与国外研究相比，国内研发的微混燃烧器在适氢能力和污染物排放性能上已达到国际同类技术水平，但目前仍处于理论和实验室阶段，尚需进一步开展全尺寸试验和示范运行验证后方能投入工程应用。总体而言，微混燃烧头部在高比例掺氢及纯氢燃烧方面具有良好的应用潜力，但仍需协调混合强化、回火抑制及热声稳

定性之间的关系，这也是该类头部结构迈向工程　　化应用亟待解决的关键问题。

表 3　国内外微混燃烧器总结

Tab. 3　Summary of micro-mixing combustors around the world

研发机构	燃烧器	混合方式	稳焰机制	最高适氢比例/%	NO_x排放体积分数	开发程度
NASA	贫油直喷微预混燃烧器	交叉射流	直喷	100	—	—
GE	多管微预混燃烧器	交叉射流	直喷	50	$\leqslant 10\times10^{-6}$	商用
三菱日立	多簇微预混燃烧器	同轴射流	多管复合角旋流	84	$\leqslant 6\times10^{-6}$	试验
德国MAN Energy公司	同轴喷射微混燃烧器	同轴射流	旋流	100	$\leqslant 10\times10^{-6}$	实验室
首尔大学	旋流微预混燃烧器	交叉射流	旋流	75	—	实验室
Parker公司	多杯式喷射微混燃烧器	交叉射流	旋流	100	$\leqslant 10\times10^{-6}$	实验室
川崎重工	微混扩散燃烧器	交叉射流	钝体、扩散	100	$\leqslant 35\times10^{-6}$	商用
中国科学院工程热物理所	多喷嘴微混燃烧器	交叉射流	直喷	100	$\leqslant 10\times10^{-6}$	实验室
中国航发沈阳发动机研究所	蜂巢式钝体微混扩散燃烧器	交叉射流	钝体扰流	100	5×10^{-6}	理论
哈尔滨工业大学	环形微混组合喷嘴	交叉射流	直喷	90	$\leqslant 10\times10^{-6}$	实验室

3　结　论

本文围绕天然气掺氢燃气轮机燃烧技术，从燃烧基础特性、燃烧稳定性、污染物排放特性以及适氢燃烧室头部结构等方面，对国内外相关研究进展进行了系统梳理与归纳分析，主要结论如下：

1）氢气可增大混合燃料的火焰传播速度和燃烧反应速率，从而改变燃烧室流场分布和燃烧特性，进而影响火焰形态。虽然氢气具有显著的降碳优势，但火焰温度及自由基浓度的变化会影响NO_x的生成。

2）氢气的加入有助于拓宽贫油熄火边界，但同时会缩短点火延迟时间，显著增加自燃和回火风险。此外，掺氢引起的火焰结构及热释放特性变化还可能改变燃烧室热声耦合特征，从而诱发热声振荡。

3）在适氢燃烧室头部结构方面，各燃气轮机厂商通过优化改进现有旋流燃烧器，已实现30%～70%掺氢比的工程应用验证。微混燃烧头部凭借微尺度快速混合、短停留时间的技术优势，在高比例掺氢乃至纯氢场景下展现出优异的低排放与抑制回火潜力。国内微混燃烧相关研究多处于实验室原理验证阶段，工程化应用仍有较多关键问题待突破。

4）未来天然气掺氢燃气轮机研究应进一步加强燃烧机理、燃烧组织与工程应用之间的协同研究。一方面应针对高掺氢及纯氢条件下火焰传播、热声振荡与NO_x生成机制开展深入研究，探索燃烧稳定性与低排放的协同调控方法。另一方面，面向高温、高压及变工况运行环境，进一步优化旋流、微混及复合型燃烧头部结构，提升其对不同掺氢比例和运行工况的适应能力。同时，国内应加强适氢燃烧关键技术从实验室研究向整机工程验证和商业化运行的推进。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] Dawood F, Anda M, Shafiullah G M. Hydrogen production for energy: an overview[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(7): 3847-3869.

[2] 仲冰，张学秀，张博，等. 我国天然气掺氢产业发展研究[J]. 中国工程科学，2022，24(3)：100-107.
Zhong Bing, Zhang Xuexiu, Zhang Bo, et al. Industrial development of hydrogen blending in natural gas pipelines in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 100-107. (in Chinese)

[3] Park J, Minamoto Y, Shimura M, et al. Effects of hydrogen enrichment on CH_4/Air turbulent swirling premixed flames in a cuboid combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 9039-9051.

[4] Taamallah S, Vogiatzaki K, Alzahrani F M, et al. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations[J]. Applied Energy, 2015, 154: 1020-1047.

[5] Xiang L K, Jiang H T, Ren F, et al. 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.

[6] Levinsky H. Why can't we just burn hydrogen? Challenges when changing fuels in an existing infrastructure

[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2021, 84: 100907.
[7] Beita J, Talibi M, Sadasivuni S, et al. Thermoacoustic instability considerations for high hydrogen combustion in lean premixed gas turbine combustors: a review [J]. Hydrogen, 2021, 2(1): 33-57.
[8] Hord J. Is hydrogen a safe fuel?[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1978, 3(2): 157-176.
[9] McCarty R D, Hord J, Roder H M. Selected properties of hydrogen (engineering design data)[M]. Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1981.
[10] Yaws C L. Yaws' critical property data for chemical engineers and chemists[M]. Norwich: Knovel, 2012.
[11] 王珂. 天然气掺氢燃烧特性研究[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
[12] Abbasi-Atibeh E, Bergthorson J M. Differential diffusion effects in counter-flow premixed hydrogen-enriched methane and propane flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(2): 2399-2406.
[13] Ilbas M, Crayford A, Yilmaz I, et al. Laminar-burning velocities of hydrogen - air and hydrogen - methane - air mixtures: an experimental study [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(12): 1768-1779.
[14] Shchepakina E A, Zubrilin I A, Kuznetsov A Y, et al. Physical and chemical features of hydrogen combustion and their influence on the characteristics of gas turbine combustion chambers [J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3754.
[15] Shelil N, Griffiths A, Bagdanavicius A, et al. Flashback limits of premixed H2/CH_4 flames in a swirl-stabilized combustor [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2010: 1247-1258.
[16] Halter F, Chauveau C, Djebaïli-Chaumeix N, et al. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane - hydrogen - air mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 201-208.
[17] Sakhrieh A. The adiabatic flame temperature and laminar flame speed of methane premixed flames at varying pressures [J]. Acta Periodica Technologica, 2019 (50): 220-227.
[18] Wang Y, Zhang X, Li Y F. Numerical simulation of methane-hydrogen-air premixed combustion in turbulence [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(19): 7122-7133.
[19] Guo H S, Tayebi B, Galizzi C, et al. Burning rates and surface characteristics of hydrogen-enriched turbulent lean premixed methane - air flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(20): 11342-11348.
[20] Kalantari A, Auwaijan N, McDonell V. Boundary layer flashback prediction for turbulent premixed jet flames: comparison of two models[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2019: V04AT04A031.
[21] Ge B, Ji Y B, Zhang Z L, et al. Experiment study on the combustion performance of hydrogen-enriched natural gas in a DLE burner [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(26): 14023-14031.
[22] Kim K T, Lee J G, Lee H J, et al. Characterization of forced flame response of swirl-stabilized turbulent lean-premixed flames in a gas turbine combustor [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4): 041502.
[23] Xiao J, Liu Q M, He S, et al. Numerical simulation on combustion characteristics of methane/hydrogen blended fuel for non-premixed conical bluff body burner [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 65: 50-60.
[24] Park S, Kim U, Lee M, et al. The effects and characteristics of hydrogen in SNG on gas turbine combustion using a diffusion type combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(29): 12847-12855.
[25] 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.
[26] 李立新, 刘星雨, 曾过房, 等. 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.
Li Lixin, Liu Xingyu, Zeng Guofang, et al. Numerical modeling of natural gas combustion with hydrogen blending inSGT-800 heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 70-78. (in Chinese)
[27] Subash A A, Kim H, Möller S I, et al. Investigation of fuel and load flexibility in a siemens gas turbine-600/700/800 burner under atmospheric pressure conditions using high-speed hydroxyl-PLIF and hydroxyl radical chemiluminescence imaging [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(8):

081009.

[28] Chterev I, Boxx I. Effect of hydrogen enrichment on the dynamics of a lean technically premixed elevated pressure flame [J]. Combustion and Flame, 2021, 225: 149-159.

[29] Liu X, Bertsch M, Subash A A, 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.

[30] Therkelsen P L, Portillo J E, Littlejohn D, et al. Self-induced unstable behaviors of CH_4 and H_2/CH_4 flames in a model combustor with a low-swirl injector [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(2): 307-321.

[31] 杨潇. 燃气轮机燃烧过程对掺氢天然气的适应性研究[D]. 北京：中国石油大学(北京), 2024.

[32] 赵昊, 楼国锋, 刘少鹏. 掺氢对天然气燃烧室燃烧及排放特性影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(1): 223-229.
Zhao Hao, Lou Guofeng, Liu Shaopeng. Effect of hydrogen mixing on combustion and emission performance of natural gas combustion chamber[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(1): 223-229. (in Chinese)

[33] 谭宗洋, 王丹阳, 许建国, 等. 氢气掺混甲烷对湍流燃烧及NO生成排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(2): 157-168.
Tan Zongyang, Wang Danyang, Xu Jianguo, et al. Effect of hydrogen enrichment of methane on turbulent combustion and NO emission[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2024, 30(2): 157-168. (in Chinese)

[34] Donohoe N, Heufer A, Metcalfe W K, et al. Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(6): 1432-1443.

[35] Brower M, Petersen E L, Metcalfe W, et al. Ignition delay time and laminar flame speed calculations for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(2): 021504.

[36] Griebel P, Boschek E, Jansohn P. Lean blowout limits and NO_x emissions of turbulent, lean premixed, hydrogen-enriched methane/air flames at high pressure [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(2): 404-410.

[37] 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.

[38] Lieuwen T, McDonell V, Petersen E, et al. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130: 011506.

[39] Fritsche D, Füri M, Boulouchos K. An experimental investigation of thermoacoustic instabilities in a premixed swirl-stabilized flame [J]. Combustion and Flame, 2007, 151(1/2): 29-36.

[40] Lee M C, Yoon J, Joo S, et al. Investigation into the cause of high multi-mode combustion instability of H_2/CO/CH_4 syngas in a partially premixed gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3263-3271.

[41] Zhang J, Ratner A. Experimental study on the excitation of thermoacoustic instability of hydrogen-methane/air premixed flames under atmospheric and elevated pressure conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(39): 21324-21335.

[42] Taamallah S, LaBry Z A, Shanbhogue S J, et al. Thermo-acoustic instabilities in lean premixed swirl-stabilized combustion and their link to acoustically coupled and decoupled flame macrostructures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3273-3282.

[43] Karlis E, Liu Y, Hardalupas Y, et al. H_2enrichment of CH $_4$blends in lean premixed gas turbine combustion: an experimental study on effects on flame shape and thermoacoustic oscillation dynamics [J]. Fuel, 2019, 254: 115524.

[44] Wicksall D, Agrawal A. Acoustics measurements in a lean premixed combustor operated on hydrogen/hydrocarbon fuel mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(8): 1103-1112.

[45] 张龙, 梁勇, 王智辉, 等. 氢燃料钝体火焰的热声振荡机理及主动控制研究[J]. 推进技术, 2026, 47(3): 202411050.
Zhang Long, Liang Yong, Wang Zhihui, et al. Thermoacoustic oscillation mechanism and active control of hydrogen bluff-body flame[J]. Journal of Propulsion Technology, 2026, 47(3): 202411050. (in Chinese)

[46] Figura L, Lee J G, Quay B D, et al. The effects of fuel composition on flame structure and combustion dynamics in a lean premixed combustor [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2007:

181-187.

[47] Ebi D, Jansohn P. Boundary layer flashback limits of hydrogen-methane-air flames in a generic swirl burner at gas turbine-relevant conditions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(8): 081011.

[48] Ebi D, Clemens N T. Experimental investigation of upstream flame propagation during boundary layer flashback of swirl flames[J]. Combustion and Flame, 2016, 168: 39-52.

[49] Lin Y C, Daniele S, Jansohn P, et al. Turbulent flame speed as an indicator for flashback propensity of hydrogen-rich fuel gases[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(11): 111503.

[50] Eichler C, Sattelmayer T. Premixed flame flashback in wall boundary layers studied by long-distance micro-PIV[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(2): 347-360.

[51] Vance F H, de Goey L P H, van Oijen J A. Development of a flashback correlation for burner-stabilized hydrogen-air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2022, 243: 112045.

[52] Fritz J, Kro¨ner M, Sattelmayer T. Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 276-283.

[53] 董茹嫣. 天然气掺氢燃烧室回火特性及优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.

[54] 杨书轩. 重型燃气轮机燃烧室掺氢/掺氨燃烧性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2025.

[55] Tuncer O, Acharya S, Uhm J. Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(1): 496-506.

[56] García-Armingol T, Ballester J. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(2): 1229-1243.

[57] 储旭, 丁思宇, 李嘉斌, 等. 甲烷掺氢旋流预混燃烧回火特性研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(6): 1570-1578.
Chu Xu, Ding Siyu, Li Jiabin, et al. Flashback characteristics in CH_4/H_2-air premixed swirl-stabilized combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(6): 1570-1578. (in Chinese)

[58] Pappa A, Bricteux L, Bénard P, et al. Can water dilution avoid flashback on a hydrogen-enriched micro-gas turbine combustion? : a large eddy simulations study[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(4): 041008.

[59] 李祥晟, 郭菡, 郁鸿飞, 等. 掺氢对燃气轮机燃烧室燃烧和排放性能的影响研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 9-16.
Li Xiangsheng, Guo Han, Yu Hongfei, et al. Study on combustion and emission performance of hydrogen fuel gas turbine combustor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 9-16. (in Chinese)

[60] Wang K F, Li F, Zhou T, et al. Numerical study of combustion and emission characteristics for hydrogen mixed fuel in the methane-fueled gas turbine combustor[J]. Aerospace, 2023, 10(1): 72.

[61] 王威, 王玉静, 刘世铮, 等. 贫燃预混燃烧室混氢燃烧性能研究[J]. 应用科技, 2023, 50(2): 7-11.
Wang Wei, Wang Yujing, Liu Shizheng, et al. A study of the combustion performance of fuels mixed with hydrogen in a lean-premixed combustor[J]. Applied Science and Technology, 2023, 50(2): 7-11. (in Chinese)

[62] 刘彦鹏, 许超, 张辉, 等. 掺氢燃烧对燃气轮机排放特性影响研究[J]. 热力透平, 2025, 54(3): 200-204.
Liu Yanpeng, Xu Chao, Zhang Hui, et al. Influence of hydrogen blending combustion on emission performance of gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2025, 54(3): 200-204. (in Chinese)

[63] 赵钦新, 王宗一, 邓世丰, 等. 氢气燃烧技术及其进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 15870-15880.
Zhao Qinxin, Wang Zongyi, Deng Shifeng, et al. Hydrogen combustion technology and progress[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(36): 15870-15880. (in Chinese)

[64] Nose M, Kawakami T, Nakamura S, et al. Development of hydrogen/ammonia firing gas turbine for decarbonized society[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2021, 58(3): 1-7.

[65] Kawakami M N T, Araki H, Senba N, et al. Hydrogen-fired gas turbine targeting realization of CO_2-free society[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2018, 55(4):218672068.

[66] Lam K K, Geipel P, Larfeldt J. Hydrogen enriched combustion testing of siemens industrial SGT-400 at atmospheric conditions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(2): 021502.

[67] Moëll D, Lörstad D, Bai X S. LES of hydrogen

enriched methane/air combustion in the SGT-800 burner at real engine conditions [C]//Turbo Expo: Power For Land, Sea, 2018: V04BT04A023.

[68] Lindman O, Andersson M, Bonaldo A, et al. SGT-750 fuel flexibility: engine and rig tests [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2017: V04AT04A031.

[69] Wind T, Güthe F, Syed K. Co-firing of hydrogen and natural gases in lean premixed conventional and reheat burners (alstom GT26) [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2014: V04AT04A053.

[70] Pennell D A, Bothien M R, Ciani A, et al. An introduction to the ansaldo GT36 constant pressure sequential combustor [C]/Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2017: V04BT04A043.

[71] GT36-The superior value [EB/OL]. [2026-07-17]. https://www. ansaldoenergia. com/offering/equipment/turbomachinery/gt36.

[72] 何磊，张富诚，颜伟，等. F级重型燃气轮机新型DeNO$_x$燃烧器掺氢燃烧试验研究[J]. 动力工程学报，2024，44(9)：1370-1377.
He Lei, Zhang Fucheng, Yan Wei, et al. Experimental study on hydrogen-blended natural gas combustion of a new DeNO$_x$ burner for F-class heavy-duty gas turbine [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(9): 1370-1377. (in Chinese)

[73] Marek C, Smith T, Kundu K. Low emission hydrogen combustors for gas turbines using lean direct injection [C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2005: 3776.

[74] Westmoreland J H, Chila R J, Boardman G A, et al. System and method having multi-tube fuel nozzle with multiple fuel injectors: 9759425[P]. 2017-09-12.

[75] York W D, Ziminsky W S, Yilmaz E. Development and testing of a low NO$_x$ hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(2): 022001.

[76] York W D, Romig B W, Hughes M J, et al. Premixed pilot flames for improved emissions and flexibility in a heavy duty gas turbine combustion system [C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2015: V04BT04A067.

[77] Hughes M, Berry J, Weber J. Advanced multi-tube mixer combustion for 65% efficiency: final technical report: DE-FE0023965 [R]. Schenectady, NY: GE Gas Power, 2021.

[78] Lacy B P, Ziminsky W S, Johnson T E, et al. Bundled multi-tube nozzle for a turbomachine: 9140454[P]. 2015-09-22.

[79] Asai T, Dodo S, Koizumi H, et al. Effects of multiple-injection-burner configurations on combustion characteristics for dry low-NO$_x$ combustion of hydrogen-rich fuels[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2011: 311-320.

[80] Asai T, Koizumi H, Dodo S, et al. Applicability of a multiple-injection burner to dry low-NOx combustion of hydrogen-rich fuels [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2010: 183-192.

[81] Shilling N Z, Pe D. Emissions and performance implications of hydrogen fuel in heavy duty gas turbines [EB/OL]. [2026-07-07]. https://cdn. catf. us/wp-content/uploads/2023/07/13144950/emissions-performance-implications-hydrogen-fuel-heavy-duty-gas-turbines. pdf.

[82] Jaeschke A, Ćosić B, Wassmer D, et al. Experimental investigation of a multi tube burner for premixed hydrogen and natural gas low emission combustion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2023, 145(12): 121010.

[83] Kim D, Joo S, Yoon Y. Effects of fuel line acoustics on the self-excited combustion instability mode transition with hydrogen-enriched laboratory-scale partially premixed combustor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(38): 19956-19964.

[84] Hernandez S R, Wang Q, Mcdonell V, et al. Micro mixing fuel injectors for low emissions hydrogen combustion[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2008: 675-685.

[85] Choi J, Rajasegar R, Lee W, et al. Hydrogen enhancement on a mesoscale swirl stabilized burner array [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(46): 23906-23915.

[86] Rajasegar R, Mitsingas C M, Mayhew E K, et al. Development and experimental characterization of metal 3D-printed scalable swirl stabilized mesoscale burner array [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2017: V006T08A023.

[87] Choi J, Rajasegar R, Mitsingas C M, et al. Effect of flame interaction on swirl-stabilized mesoscale burner array performance[J]. Energy, 2020, 192: 116661.

[88] Funke H H, Beckmann N, Keinz J, et al. 30 years of dry-low-NO$_x$ micromix combustor research for hydrogen-rich fuels: an overview of past and present

activities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(7): 071002.

[89] Benim A C, Syed K J. Flashback Mechanisms in Lean Premixed Gas Turbine Combustion[M]. Waltham: Academic Press, 2015.

[90] Funke H H, Beckmann N, Abanteriba S. An overview on dry low NO_x micromix combustor development for hydrogen-rich gas turbine applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(13): 6978-6990.

[91] Horikawa A, Okada K, Yamaguchi M, et al. Combustor development and engine demonstration of micromix hydrogen combustion applied to M1A-17 gas turbine[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2021: V03BT04A014.

[92] Sun X, Agarwal P, Carbonara F, et al. Numerical investigation into the impact of injector geometrical design parameters on hydrogen micromix combustion characteristics[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2020: V003T03A015.

[93] Liu X W, Shao W W, Liu C, et al. Numerical study of a high-hydrogen micromix model burner using flamelet-generated manifold[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(39): 20750-20764.

[94] Liu X W, Shao W W, Liu Y, et al. Cold flow characteristics of a novel high-hydrogen Micromix model burner based on multiple confluent turbulent round jets[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(7): 5776-5789.

[95] 刘勋伟. 含氢燃料多微混射流火焰的燃烧特性与稳焰机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2021.

[96] 莫妲, 林宇震, 马宏宇, 等. 基于钝体扰流的氢气微混扩散燃烧组织研究[J]. 航空学报, 2024, 45(8): 128928.
Mo Da, Lin Yuzhen, Ma Hongyu, et al. Investigation on hydrogen micromix diffusive combustion organization based on bluff body disturbance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(8): 128928. (in Chinese)

[97] 胡启明, 邱朋华, 刘思冶, 等. 掺氢比对甲烷-氢微混组合火焰燃烧特性的影响[J]. 推进技术, 2025, 46(11): 174-184.
Hu Qiming, Qiu Penghua, Liu Siye, et al. Effects of hydrogen blending ratio on combustion characteristics of methane-hydrogen micro-mixing combined flames[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(11): 174-184. (in Chinese)