

氢燃料微混燃烧技术研究进展

邱朋华, 卢 成, 张林瑶, 邢 畅

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:微混燃烧技术采用数量众多、结构简单的微型喷嘴替代传统的大直径喷嘴,主要目的是通过减小喷嘴直径,提高微混喷嘴的混合强度,从而提高预混气的混合均匀度,以促进 H_2 在燃气轮机中的安全稳定燃烧,并降低 NO_x 排放。本文总结了氢燃料微混燃烧技术的研究进展,对 H_2 在燃气轮机中的工业化应用中进行了探索。结果表明:微混燃烧技术在 H_2 稳定燃烧及降低 NO_x 排放方面表现出巨大的潜力。目前,已经发展了纯氢燃烧的微混燃烧技术,该技术最终有望在燃气轮机中大规模应用。

关键词:微混燃烧;氢燃烧; NO_x 排放;燃气轮机

中图分类号:TK471 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.002

[引用本文格式]邱朋华,卢 成,张林瑶,等.氢燃料微混燃烧技术研究进展[J].热能动力工程,2023,38(5):14-23. QIU Peng-hua, LU Cheng, ZHANG Lin-yao, et al. Research progress of hydrogen micromix combustion technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 14-23.

Research Progress of Hydrogen Micromix Combustion Technology

QIU Peng-hua, LU Cheng, ZHANG Lin-yao, XING Chang

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code:150001)

Abstract: The micromix combustion technology uses a large number of micro-nozzles with simple structure to replace the traditional large-diameter nozzle, and its purpose is to improve the mixing intensity of the micro-mixing nozzle and the mixing uniformity of the mixture by reducing the nozzle diameter, so as to promote the safe and stable combustion of hydrogen with low NO_x emission in gas turbines. This paper summarizes the research progress of hydrogen micromix combustion technology and explores the combustion characteristics of H_2 and its industrial application in gas turbines. The results show that the micromix combustion has great potential in stable H_2 combustion with low NO_x emission. Presently, micromix combustion technology of pure H_2 combustion has been developed, which is expected to be widely used in gas turbines.

Key words: micromix combustion, hydrogen combustion, NO_x emission, gas turbines

引 言

目前,世界范围内约 80% 的电力生产来自燃气轮机和蒸汽轮机,其中燃气轮机联合循环 (GTCC)

是最清洁、高效的发电系统之一,现代先进燃气轮机简单循环效率可以达到 42%,而联合循环效率可高达 61%^[1-3]。天然气是目前燃气轮机最常用的气体燃料之一,但其燃烧产生大量的温室气体 CO_2 。在过去的几十年中, H_2 作为一种高效、清洁的能源,

收稿日期:2022-12-30; 修订日期:2023-03-09

基金项目:国家自然科学基金(51976048,52206138);国家科技重大专项(J2019-III-0018-0062)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51976048,52206138); National Science and Technology Major Project (J2019-III-0018-0062)

作者简介:邱朋华(1973-),男,哈尔滨工业大学教授。

通讯作者:张林瑶(1991-),男,哈尔滨工业大学讲师。

由于其来源广泛、热值高、零碳排放等优点,得到了广泛重视和深入研究。 H_2 在燃烧过程中具有零碳排放的特性,可作为燃气轮机燃烧发电的无碳替代燃料^[4],如何安全稳定地组织纯氢燃烧依旧是氢燃气轮机一个重大挑战^[5-6]。相比于天然气, H_2 具有密度低、可燃范围宽和点火能量低等特点,这些特点增加了氢燃烧发生回火的可能性^[7]。另外,由于氢燃烧温度高,会产生大量的 NO_x , 如何降低 NO_x 排放是燃气轮机氢燃烧面临的另外一个挑战^[8]。氢的燃料特性(较高的火焰传播速度、燃烧速率和火焰温度)对燃烧过程和燃气轮机氢燃烧技术发展的影响很大。

本文首先从 H_2 的热值、层流火焰传播速度、可燃极限、点火延迟时间和绝热火焰温度等方面进行阐述,总结现有燃气轮机氢燃烧技术的现状及存在的问题,最后详细介绍一种极具潜力的燃气轮机氢燃烧技术——微混燃烧技术,为后续燃气轮机氢燃烧的研究提供参考。

1 H_2 基础燃烧特性

H_2 作为一种零碳燃料,将其应用于燃气轮机中时,需要了解其燃烧特性,便于高效、稳定、超低 NO_x 排放燃烧技术的开发。 H_2 是分子质量最小的气体燃料,其燃烧特性与 CH_4 的对比如表 1 所示^[9-10]。其中,角标 a 表示 273.15 K,101.3 kPa 工况,角标 b 表示当量比 1.8 工况,角标 c 表示当量比 1.08 工况,角标 d 表示当量比 1.0 工况。

表 1 H_2 与 CH_4 燃烧特性对比

Tab.1 Combustion characteristic comparison
of H_2 and CH_4

燃烧特性	H_2	CH_4
分子量/ $g\cdot mol^{-1}$	2.016	16.04
质量低位热值(LHV)/ $MJ\cdot kg^{-1}$	120	50
质量高位热值(HHV)/ $MJ\cdot kg^{-1}$	141.75	55.5
体积低位热值(LHV) ^a / $MJ\cdot Nm^{-3}$	10.78	35.8
体积高位热值(HHV) ^a / $MJ\cdot Nm^{-3}$	12.75	47.84
最大层流火焰速度/ $cm\cdot s^{-1}$	325 ^b	45 ^c
可燃极限(空气) vol/%	4~75	5~15
最小点火能/MJ	0.02	0.29~0.33
自燃温度 ^d /K	845~858	813~905
定压绝热火焰温度 ^d /K	2 318~2 400	2 158~2 226

燃料热值决定了燃料的能量密度,与其他燃料不同, H_2 的质量低位热值(LHV)较高(大概是 CH_4 的 2.4 倍),而其体积低位热值较低(大概是 CH_4 的 30%)。因此,当 H_2 与其他燃料混合时,导致混合物的体积低位热值降低,这意味着相同功率下需要更高体积流量的混合物^[11-12]。当燃料的流量增加时,空气流量也相应增加,从而增大了压缩机的压比,降低其喘振裕度,对压缩机的性能产生较大影响^[13]。

层流火焰速度对燃烧速度、火焰前沿位置以及火焰稳定性均有重要影响^[14-15]。由于动力学、热力学和扩散效应的不同, H_2 最大层流火焰速度约是 CH_4 的 7 倍^[16]。研究表明,添加 H_2 会增加混合物的层流火焰速度,但层流火焰速度不一定随着 H_2 质量分数的增加而线性增加^[17-18]。但是,目前对高温、高压、贫当量比等典型燃气轮机燃烧工况条件下的 H_2 层流火焰传播速度的试验研究不足^[19]。另外,由于 H_2 具有较高的层流火焰速度和较强扩散系数,其可燃范围比较宽,具备使用贫燃条件来改善排放和效率的优势^[20-22]。但 H_2 反应性强、自燃能量低,当混合物中 H_2 体积分数增加时,点火延迟时间缩短,可能导致混合物发生自燃,这成为氢燃烧技术亟需关注的问题之一^[23]。在相同当量比下, H_2 的绝热火焰温度比 CH_4 约高 150 K,这导致 H_2 火焰的热力型 NO_x 生成量是 CH_4 火焰的 4 倍^[24]。在氢燃料中,随着 H_2 体积分数的增加,绝热火焰温度和 NO_x 排放增加^[25]。绝热火焰温度影响燃气轮机效率以及燃烧室和涡轮叶片材料的选择,需要避免因过热而损坏燃烧器部件,这也是氢燃烧技术需要解决的问题之一。

综上所述,与目前燃气轮机中常用的天然气(主要成分是 CH_4) 相比, H_2 具备高质量热值、低体积热值、高层流火焰速度、低点火延迟以及高绝热火焰温度等特点,这些燃烧特性导致 H_2 在传统燃气轮机中燃烧时容易出现回火以及 NO_x 排放高等问题。目前,各大燃气轮机公司一直致力于发展燃气轮机氢燃烧技术,后文将总结目前商用燃气轮机氢燃烧进展,分析目前燃气轮机氢燃烧现状以及存在的问题,为后续技术发展提供参考。

2 商用燃气轮机 H₂ 燃烧技术研究进展

H₂ 作为一种高效、清洁的燃料,其应用于燃气轮机中的燃烧技术研究已在世界范围内引起关注。表 2 给出了全球主要的商用燃气轮机厂家氢燃烧技术进展。从表中可以看出,目前燃气轮机氢燃烧技术主要采用干式贫预混低排放(DLE)燃烧技术,其利用旋流将燃料和过量空气充分混合,通过提高火焰温度分布的均匀性来降低 NO_x 的生成,同时旋流形成的高温回流区能够确保燃烧稳定。DLE 燃烧技

术在 CH₄燃烧中取得了很好的效果,目前已大规模应用于燃气轮机中。由于氢燃烧特性的不同,在传统 DLE 燃烧室中燃用 H₂ 时容易发生回火或自燃,NO_x 排放也会更高。为了保证氢稳定燃烧,燃烧器采用扩散燃烧的方式进行燃烧,但会导致 NO_x 排放增加,必须加入稀释剂以降低火焰温度和 NO_x 排放^[9,12];另一部分燃烧器采用新型燃烧组织方式,即微混燃烧,可实现燃气轮机中纯 H₂ 稳定、低 NO_x 燃烧^[26-27]。下面将讨论商用燃气轮机氢燃烧技术进展,重点介绍微混燃烧技术。

表 2 高氢燃料商用燃气轮机
Tab. 2 Commercial gas turbines tested with high hydrogen content fuels

公司	型号	功率/MW	H ₂ 体积分数/%	燃烧方式	NO _x 排放体积分数/10 ⁻⁶	开发程度
川崎重工	M1A ^[26]	2	100	微混	< 30	试验
	L30A-01D/DLH	30	≤60	DLE	< 25	商用
通用电气	GE10 ^[28]	11.25	≤100	扩散/DLE	< 25	商用
	GE-9F ^[9]	286	≤47.5	扩散	< 25	商用
西门子	SGT-200 ^[13]	7	80 ~ 85	DLE	≤25	商用
	SGT-400 ^[12]	15	30	DLE	—	试验
	SGT-6000G ^[13]	270	50	DLE(掺氮气)	< 15	商用
	SGT-600 ^[29]	24.77	20 ~ 90	DLE	< 58	商用
阿尔斯通	GT13E2 ^[9]	200	≤45	部分预混(掺氮气)	20 ~ 25	试验
	GT24 ^[30]	250	≤70	DLE	< 25	试验
三菱日立	MHPS H-14 ^[27]	8	20	微混	< 10.9	试验

2.1 川崎重工

为了能够将 H₂ 用于发电,川崎重工正在设计开发氢燃气轮机及相关系统配件,其中一个项目的重点是开发一种氢燃烧室,该燃烧室可以限制 NO_x 的生成,同时提高稳定运行工况下涡轮的整体性能。由表 2 可知,川崎重工已经有 1 台商用 L30A-01D 燃气轮机,可以使用体积分数 60% 的氢燃料实现稳定运行,且 NO_x 排放较低。为了实现体积分数 100% 氢燃烧,同时解决氢燃烧带来的高火焰温度、回火及高 NO_x 排放问题,川崎重工从 2011 年起与德国亚琛应用技术大学共同开发了一种低 NO_x 排放的燃气轮机 H₂ 微混燃烧技术。试验结果表明,该微混燃烧技术可以实现体积分数小于 40 × 10⁻⁶ 的 NO_x 排放^[31]。从 2020 年开始,应用该技术的 2 MW-M1A 燃气轮机已经在日本神户进行测试工

作。M1A 燃气轮机燃烧室结构如图 1 所示^[26]。



图 1 川崎重工 M1A 燃气轮机燃烧室
Fig. 1 Kawasaki M1A micromix combustor

2.2 通用电气

美国通用电气(GE)一直致力于在燃气轮机中使用高含氢燃料的研究,目前已有约 28 台燃气轮机使用 H_2 体积分数占比超过 45% 的混合燃料。其中 1 台燃气轮机使用的燃料中 H_2 体积分数占比达到了 97%,但其整体性能受到了一定的影响^[3,32]。图 2 给出了美国 GE 公司 9F 燃气轮机。为了提高燃气轮机效率($>3\%$)、降低 NO_x 排放,美国能源部与 GE 合作开展了先进 IGCC/ H_2 燃气轮机项目,采用交叉射流的方式促进燃料与空气混合,最终基于 GE 提出的分布式微混燃烧概念进行技术开发,并开展了台架试验。试验结果表明,该微混燃烧技术可解决纯氢燃烧回火问题,并有效降低 NO_x 排放^[33-34]。

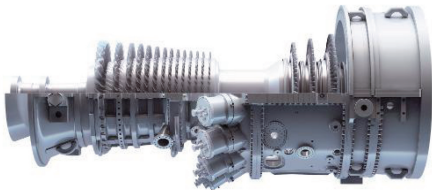


图 2 美国通用电气 9F 燃气轮机
Fig.2 9F gas turbine of GE

2.3 西门子

德国西门子公司一直致力于研究高含氢燃料在其 DLE 燃烧器中的应用。西门子公司 Lam 等人^[12]在瑞典的试验台上研究了富氢气体对不同型号的燃气轮机(从 SGT-100 ~ SGT-400)燃烧过程的影响。SGT-400 燃气轮机及燃烧器如图 3 所示。该燃烧器中燃料和空气主要靠 1 个径向旋流器产生的旋流进行充分混合,并在高旋流数作用下形成沿轴向的回流区以稳定火焰。同时还研究了燃料成分、空气预热温度、空气流速和火焰温度对燃烧稳定性和 NO_x 排放的影响。试验结果表明,当燃料中 H_2 体积分数占比达到 30% 时,整个燃烧系统能够稳定运行;当燃料中 H_2 体积分数占比达到 80% 时,燃烧器不会发生回火; H_2 体积分数占比越高,火焰稳定的位置越靠近燃烧器头部,即越靠近点火器(设置在燃烧器头部);当燃料中 H_2 体积分数占比超过 70% 时,会出现点火器过热的现象,造成损坏。

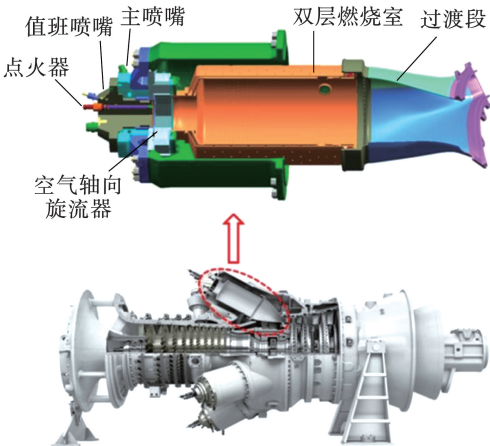


图 3 SGT-400 燃气轮机及燃烧器
Fig.3 SGT-400 gas turbine and burner

2.4 三菱日立微混燃烧室

从 2008 年开始,日本三菱重工基于先进零排放煤制气发电项目—IGCC 高氢合成气低 NO_x 排放燃烧技术开发项目开发出一种多孔同轴喷射微混燃烧室,结构如图 4 所示。该微混燃烧室可以稳定燃烧高含氢合成气,并在不使用稀释剂的情况下实现体积分数小于 10×10^{-6} 的 NO_x 排放。从 2015 年起,三菱重工在日本福岡 IGCC 试验工厂(EAGLE)开始进行 8 MW-MHPS H-14 燃气轮机测试工作,主要研究火焰形状对燃烧器性能的影响^[27]。研究结果表明,较细的火焰能够有效降低 NO_x 的排放和燃烧室内衬的温度。

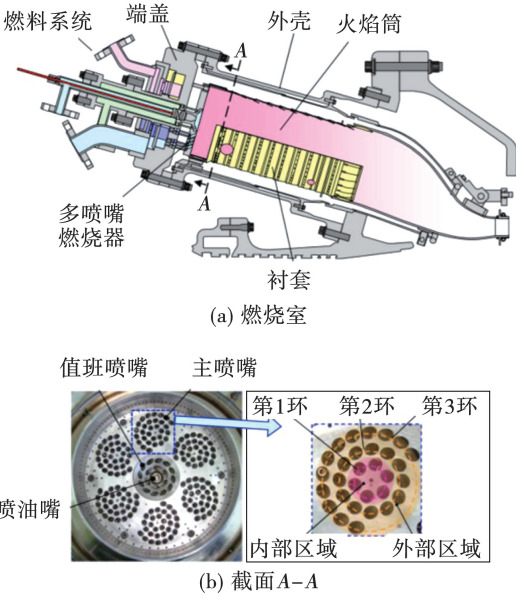


图 4 三菱日立微混燃烧室结构
Fig.4 Mitsubishi-Hitachi micromix combustor structure

3 微混燃烧技术

西门子公司的研究表明,当 H_2 体积分数占比超过 30% 时,其传统的贫预混燃烧喷嘴结构需要进行优化设计;当 H_2 体积分数占比超过 50% ~ 70% 时,需要进行全新燃烧技术开发。为了解决燃气轮机在燃烧高含氢甚至是纯氢燃料时带来的高回火风险和 NO_x 排放高等问题,研究者主要从两方面进行了技术尝试。一方面采用扩散燃烧,其稳定性高,适合氢燃烧。但扩散燃烧是一种化学恰当比燃烧,火焰温度高,会导致较高的 NO_x 排放。为了降低 NO_x 排放,需要在燃烧过程中掺入稀释剂(N_2, H_2O 等),但会引入额外设备,增加系统复杂性。另一方面采用新型燃烧组织方式,其中代表性的技术是微混燃烧。微混燃烧是用数量众多、结构简单的微型喷嘴替代传统的大直径喷嘴,主要目的是通过减少喷嘴直径提高单支微混喷嘴的混合强度,从而提高预混气体的混合均匀度,降低 NO_x 排放,提高燃烧器抗回火能力。目前,微混燃烧受到各国研发组织的重视,并不断进行技术完善。

3.1 德国亚琛应用技术大学

20 世纪 90 年代,为了解决商用燃气轮机燃烧纯 H_2 时存在的问题,德国亚琛应用技术大学研究人员提出了微混燃烧的概念^[35]。研究人员采用数千个微扩散喷嘴替代传统的预混喷嘴,当喷嘴直径足够小,微扩散喷嘴可以在出口很短距离内实现充分混合,该微扩散喷嘴同时具备了预混燃烧低排放和扩散燃烧不回火的特点,可以解决商用燃气轮机纯 H_2 燃烧时存在的问题^[36]。图 5 给出了亚琛应用技术大学 1.6 MW 环形微混燃烧器结构。由图 5 可知,该燃烧器空气喷嘴和燃料喷嘴呈 90° 布置,其中空气喷嘴的直径约为 1 ~ 3 mm。燃料和空气通过不同的管路进入喷嘴,在交界处混合燃烧,共形成约 1 600 个微扩散火焰。试验结果表明,在常压、空气入口温度达到 560 K、当量比小于 0.5 时, NO_x 的排放体积分数小于 4×10^{-6} ^[26]。

3.2 三菱日立微混燃烧器

三菱日立公司研究人员借用微扩散的设计思想开发了多簇旋流燃烧器用于燃烧 H_2 ^[37],燃烧器结构如图 6 所示。该燃烧器头部由 1 个空气分配盘和

数百个内径 2 mm、外径 5 mm 的燃料喷嘴组成,燃料和空气在内径 13 mm 的混气通道中混合。与环形微混合燃烧器不同的是,多簇旋流燃烧器依靠扩散和空气旋流促进燃料和空气混合,结构相对简单,降低燃烧器零件的加工困难。研究结果表明,在燃烧器出口温度达到 1 775 K 的情况下, NO_x 的排放体积分数不大于 11×10^{-6} ,而且燃烧稳定,不存在回火现象^[38]。

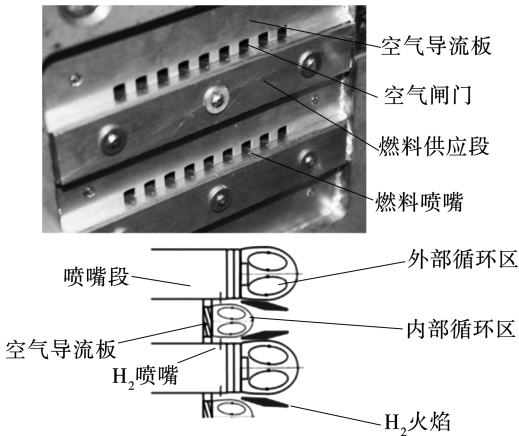


图 5 亚琛应用技术大学微混燃烧器结构
Fig. 5 Micromix burner structure in Aachen University of Applied Technology

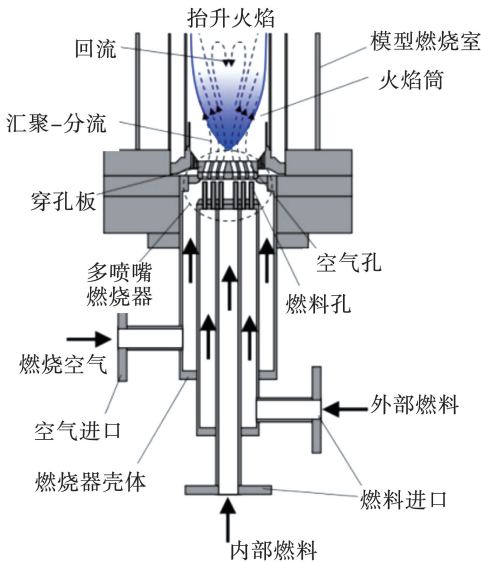


图 6 三菱日立微混燃烧器结构
Fig. 6 Mitsubishi-Hitachi micromix burner structure

3.3 加州大学

由于微扩散设计不能解决微混合燃烧器中燃料和氧化剂完全预混的问题,导致无法进一步降低

NO_x 的排放,一部分研究者采用微预混的方式来组织燃烧。加州大学欧文分校和 Parker 公司联合开发了微混合杯 (Micro-Mixing Cups, MMC) 燃烧技术^[39]。图 7 给出了微混合杯。其中微混合杯的直径在 6 ~ 12 mm 之间,内部由多个旋流空气孔和燃料孔组成,旋流数在 0.5 左右,底座还配备气体稀释喷嘴以调节火焰温度。与微扩散设计不同,微混合杯采用旋流和射流的方式,增强了燃料和空气的混合效果。

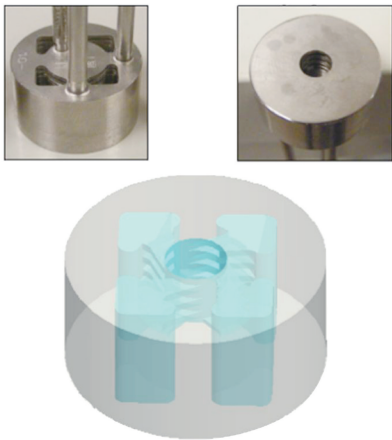


图 7 微混合杯
Fig. 7 Micro-mixing cup (MMC)

3.4 美国通用电气公司 (GE)

基于微混合的设计思想,美国通用电气公司 (GE) 开发了多管微混燃烧器 (Multi-Tube Mixer, MTM)^[33],如图 8 所示。其采用密集的微管替代传统喷嘴,燃料从微管进入,空气从轴向进入混合管,燃烧器中间设置了值班喷嘴,提高了燃烧稳定性。微混合管的直径分布在 0.5 ~ 2 mm 之间,加上高空气流速,可以有效防止回火。燃烧试验结果表明,在进口压力 1.7 MPa、燃烧温度 1 900 K 的工况条件下, NO_x 的排放体积分数不大于 6×10^{-6} 。GE 将微混喷嘴应用于 DLN2.6e 燃烧系统的值班喷嘴中,试验结果表明,微混值班喷嘴能够在贫燃条件下降低 25% 的 NO_x 排放量^[40]。

3.5 韩国科学技术院

图 9 给出了韩国科学技术院开发的多管微混燃烧器。该燃烧器中混合管的管径为 6.5 mm,空气通过轴向旋流进入混合管中,与燃料进行混合,主要通过旋流和扩散加强混合效果^[41]。试验结果表明,在

相同工况范围内,甲烷/空气火焰之间的相互作用明显。这归因于甲烷火焰的动力学受到火焰的集体运动控制,这其中涉及大尺度结构之间相互作用的复杂过程^[42]。相比之下,多喷嘴配置中的氢火焰在短距离内孤立振荡,没有强烈的火焰与火焰相互作用,特别适用于高频热释放的调制。同时贫预混、中尺度的氢火焰会产生强烈的声音,从而破坏火焰的表面。这些结果首次突出了中尺度多喷嘴氢-空气火焰自激燃烧不稳定性的关键特征,并可能为未来的氢燃气轮机燃烧技术铺平道路。另外还发现,在定绝热火焰温度条件下, NO_x 排放几乎不受燃料成分的影响,但燃料成分的变化对自激不稳定性有显著影响,自激不稳定性会随着 H_2 体积分数的增加而趋于高频振荡^[43-44]。

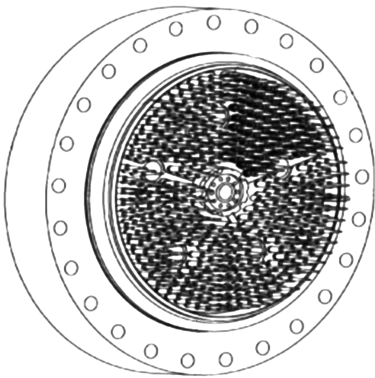


图 8 美国通用电气多管微混燃烧器
Fig. 8 GE multi-tube micromix (MTM) burner

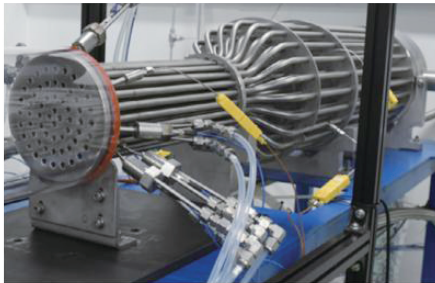


图 9 韩国科学技术院多管微混燃烧器
Fig. 9 Micromix burner in KAIST

3.6 华北电力大学

目前,国内关于微混燃烧技术研究相对较少。华北电力大学 Zhang 等人^[45-46]采用微扩散设计思想开发了阵列式微混燃烧器,其结构如图 10 所示。其中,每个微喷嘴由 8 个直径为 1.22 mm 的旋流空

气孔和 1 个直径为 2 mm 的燃料孔组成,通过旋流增强混合效果。并基于该阵列式微混燃烧器研究了不同稀释剂对合成气 NO_x 排放的影响。

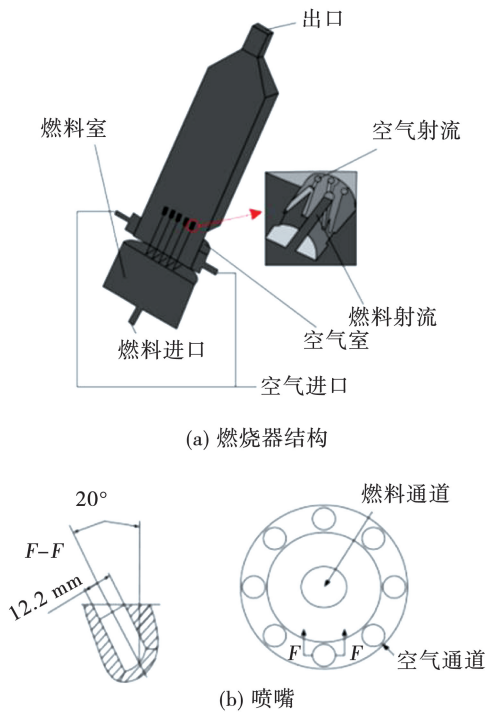


图 10 华北电力大学微混燃烧器结构

Fig. 10 Micromix burner structure in NCEPU

3.7 中科院热物理所

中国科学院工程热物理所的邵卫卫等人^[47-48]设计了一种结构简单的射流多喷嘴微混燃烧器,结构如图 11 所示,并对富氢微混火焰的稳定燃烧机理和流动特性进行了深入研究。结果表明,剪切层拉伸效应是富氢微混火焰稳定燃烧的主要机理,其火焰的稳定主要依赖于燃烧器的喷嘴厚度和角度。

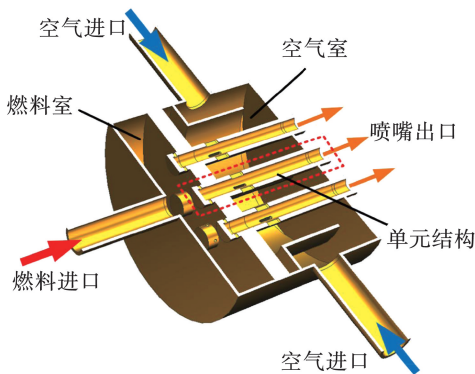


图 11 中国科学院工程热物理所微混燃烧器结构

Fig. 11 Micromix burner structure in Institute of Engineering Thermal Physics of CAS

3.8 哈尔滨工业大学

哈尔滨工业大学的邱朋华教授课题组从 2018 年开始进行微混燃烧原理探索和技术开发,自主设计开发了 1 种氢稀释燃烧微混喷嘴,结构如图 12 所示。空气和稀释剂通过微混管侧壁 24 个旋流孔与底部 8 个燃料孔进入的燃料在预混段进行充分混合后在出口充分燃烧,主要原理是通过空气旋流来加强 H_2 和氧化剂的混合效果。试验结果表明,随着稀释量的增加,火焰面积减少,平均曲率半径随着当量比的增加或者稀释量的减少而增加,表明产生了更多小尺度褶皱结构^[49]。火焰频率分析表明,随着当量比的增加,火焰长度逐渐延长,但二次谐波频率只出现在火焰臂区。蒸汽含量对放热的影响明显,掺水量为 25% 时存在明显的周期性振荡。此外,蒸汽含量的增加或减少都会使 OH 自由基浓度和分布发生显著变化。模态分解分析表明,振荡区的生长与火焰臂区密切相关,并随着当量比的增加向火焰尾区过渡^[50]。相同工况下,水蒸气稀释的 NO_x 排放量为 N_2 稀释的 20% ~ 50%,这表明水蒸气对降低 NO_x 排放的作用更加显著。其中,水蒸气的化学作用对降低 NO_x 排放占比在 6% ~ 16% 之间,不可忽略^[51]。

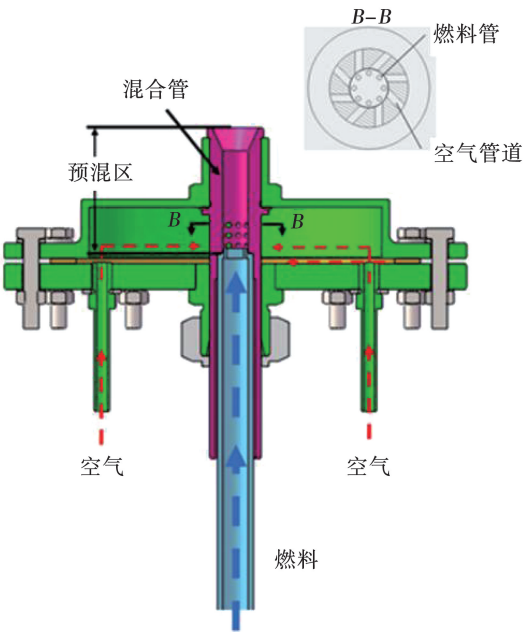


图 12 氢稀释燃烧微混喷嘴

Fig. 12 Micromix burners in HIT

同时,邱朋华教授课题组还提出了采用微混燃

烧喷嘴的燃气轮机燃烧室原型^[52-53]。其中,外交叉射流喷嘴结构如图13所示。

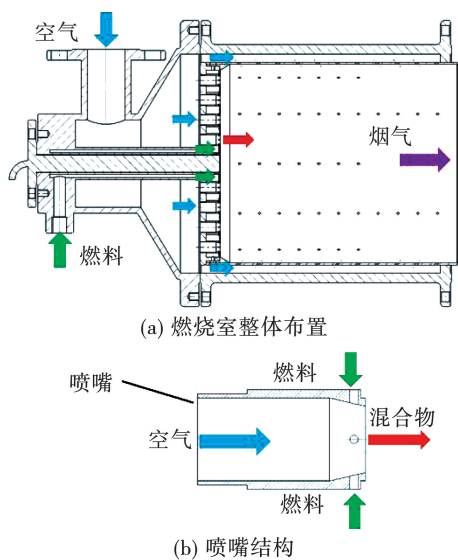


图13 外交叉射流喷嘴结构

Fig. 13 External cross jet micromix combustor in HIT

通过数值模拟研究了外交叉射流微混燃烧室的燃料灵活性(合成气 $H_2/CO = 50\%/50\%$ 、纯 H_2)及进口温度对火焰结构和 NO_x 排放特性的影响^[54-55]。结果表明,在 473 K 的额定燃料温度及 423, 523 和 573 K 的非设计燃料温度下,该微混燃烧室原型具有很高的燃料灵活性,其中 NO_x 排放体积分数低于 15×10^{-6} ,出口温度分布系数低于 15%,燃烧效率高于 99%,不同燃料的总压力恢复系数均高于 95%。同时,通过不同径向平面燃烧性能的变化趋势可知, H_2 产生的烟气高温区比 H_2/CO (50%/50%) 合成气更长,并且远离喷嘴。因此,使用纯 H_2 燃料的原型微混燃烧室需要更长的轴向衬套长度,以实现更高的温度分布均匀性和燃烧效率。

4 结论

本文通过分析氢燃烧特性及氢燃烧在燃气轮机中应用进展发现,微混燃烧技术可以解决氢燃烧容易出现回火以及 NO_x 排放高的问题,实现 H_2 在燃气轮机中安全、稳定、低排放燃烧。

微混燃烧技术采用数量众多、结构简单的微型喷嘴替代传统的大直径喷嘴,主要目的是通过减少喷嘴直径,提高单微型喷嘴的混合强度,从而提高预混气的混合均匀度。另外,与传统喷嘴尺度相比,微

混喷嘴的特征直径在 1 ~ 10 mm 范围内,比传统喷嘴小,有效减少微混火焰的长度,温度分布更加均匀,大大降低了 NO_x 的生成。此外,喷嘴尺度的减少,增加了喷嘴的散热面积,提高了燃烧器抗回火能力,保证了燃烧器燃烧 H_2 的安全性。

参考文献:

- [1] CECERE D, GIACOMAZZI E, INGENITO A. A review on hydrogen industrial aerospace applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (20): 10731 - 10747.
- [2] ARRIETA C E, GARCIA A M, AMELL A A. Experimental study of the combustion of natural gas and high-hydrogen content syngases in a radiant porous media burner [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (17): 12669 - 12680.
- [3] DU-TOIT M H, AVDEENKOV A V, BESSARABOV D. Reviewing H_2 combustion: a case study for non-fuel-cell power systems and safety in passive autocatalytic recombiners [J]. Energy & Fuels, 2018, 32 (6): 6401 - 6422.
- [4] GOKALP I, LEBAS E. Alternative fuels for industrial gas turbines (AFTUR) [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24 (11/12): 1655 - 1663.
- [5] XIE Y L, LI Q Z. Effect of the initial pressures on evolution of intrinsically unstable hydrogen/air premixed flame fronts [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (31): 17030 - 17040.
- [6] CAPPELLETTI A, MARTELLI F. Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (15): 10513 - 10523.
- [7] SANDEEP K C, BHATTACHARYYA R, WARGHAT C, et al. Experimental investigation on the kinetics of catalytic recombination of hydrogen with oxygen in air [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (31): 17906 - 17912.
- [8] TAKAGI Y, OIKAWA M, SATO R, et al. Near-zero emissions with high thermal efficiency realized by optimizing jet plume location relative to combustion chamber wall, jet geometry and injection timing in a direct-injection hydrogen engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (18): 9456 - 9465.
- [9] TAAMALLAH S, VOGIATZAKI K, ALZHRANI 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.
- [10] TANG C L, ZHANG Y J, HUANG Z H. Progress in combustion investigations of hydrogen enriched hydrocarbons [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 195 - 216.
- [11] SHIH H Y, LIU C R. A computational study on the combustion of hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbines [J]. In-

- ternational Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (27) : 15103 – 15115.
- [12] 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. 1 – 021502. 7.
- [13] WU J F, BROWN P, DIAKUNCHAK I, et al. Advanced gas turbine combustion system development for high hydrogen fuels [C]//Montreal, Canada: ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, 2007.
- [14] ZHANG W K, GOU X L, KONG W J, et al. Laminar flame speeds of lean high-hydrogen syngas at normal and elevated pressures [J]. Fuel, 2016, 181: 958 – 963.
- [15] LYU Y, QIU P, LIU L, et al. Effects of steam dilution on laminar flame speeds of H_2 /air/ H_2O mixtures at atmospheric and elevated pressures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(15) : 7538 – 7549.
- [16] TANG C L, HUANG Z H, LAW C K. Determination, correlation, and mechanistic interpretation of effects of hydrogen addition on laminar flame speeds of hydrocarbon-air mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 921 – 928.
- [17] TAHTOUH T, HALTER F, SAMSON E, et al. Effects of hydrogen addition and nitrogen dilution on the laminar flame characteristics of premixed methane-air flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(19) : 8329 – 8338.
- [18] HAMED A M, HUSSIN A E, KAMAL M M, et al. Combustion of a hydrogen jet normal to multiple pairs of opposing methane-air mixtures [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A - Journal of Power and Energy, 2017, 231(2) : 145 – 158.
- [19] WANG S X, WANG Z H, HAN X L, et al. Experimental and numerical study of the effect of elevated pressure on laminar burning velocity of lean H_2 /CO/ O_2 /diluent flames [J]. Fuel, 2020, 273: 117753.
- [20] WIERZBA I, WANG Q. The flammability limits of H_2 – CO – CH_4 mixtures in air at elevated temperatures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(4) : 485 – 489.
- [21] ZHEN H S, LEUNG C W, CHEUNG C S, et al. Characterization of biogas-hydrogen premixed flames using Bunsen burner [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25) : 13292 – 13299.
- [22] RIAHI Z, MERGHENI M A, SAUTET J C, et al. Experimental study of natural gas flame enriched by hydrogen and oxygen in a coaxial burner [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 287 – 295.
- [23] RASHWAN S S, NEMITALLAH M A, HABIB M A. Review on premixed combustion technology: stability, emission control, applications, and numerical case study [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(12) : 9981 – 10014.
- [24] ROKKE N A, LANGGORGEN O. Enabling pre-combustion plants- the DECARBit project [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1) : 1435 – 1442.
- [25] ZHENG K, YU M G, ZHENG L G, et al. Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(8) : 5426 – 5438.
- [26] FUNKE H H W, 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. 1 – 071002. 13.
- [27] ASAI T, DODO S, KARISHUKU M, et al. Performance of multiple-injection dry low- NO_x combustors on hydrogen-rich syngas fuel in an IGCC pilot plant [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(9) : 091504. 1 – 091504. 11.
- [28] COCCHI S, PROVENZALE M, CINTI V, et al. Experimental characterization of a hydrogen fuelled combustor with reduced NO_x emissions for a 10 MW class gas turbine [C]//Berlin, Germany: ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, 2008.
- [29] SUBASH A A, KIM H, MOLLER 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. 1 – 081009. 9.
- [30] POYYAPAKKAM M, WOOD J, MAYERS S, et al. Hydrogen combustion within a gas turbine reheat combustor [C]//Copenhagen, Denmark: ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, 2012.
- [31] FUNKE H H W, 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.
- [32] LEE M C, SEO S B, CHUNG J H, et al. Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas [J]. Fuel, 2010, 89(7) : 1485 – 1491.
- [33] 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. 1 – 022001. 8.
- [34] YORK W D, SIMONS D W, FU Y Q, et al. Operational flexibility of GE's F-Class gas turbines with the DLN2.6 + combustion system [C]//Oslo, Norway: ASME, 2018.
- [35] FUNKE H H W, BOERNER S, KREBS W, et al. Experimental characterization of low NO_x micromix prototype combustors for in-

- dustrial gas turbine applications [C]//Vancouver, Canada; ASME Turbo Expo 2011; Turbine Technical Conference and Exposition, 2011.
- [36] FUNKE H H W, KEINZ J, KUSTERER K, et al. 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.
- [37] ASAI T, KOIZUMI H, DODO S, et al. Applicability of a multiple-injection burner to dry low- NO_x combustion of hydrogen-rich fuels [C]//Glasgow, Scotland; Proceedings of ASME Turbo Expo 2010; Power for Land, Sea and Air, 2010.
- [38] DODO S, ASAI T, KOIZUMI H, et al. Performance of a multiple-injection dry low NO_x combustor with hydrogen-rich syngas fuels [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(1): 011501. 1–01151. 7.
- [39] HERNANDEZ S R, WANG Q, MC-DONELL V, et al. Micro mixing fuel injectors for low emissions hydrogen combustion [C]//Berlin, Germany; ASME Turbo Expo 2008; Power for Land, Sea, and Air, 2008.
- [40] 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]//Montreal, Canada; ASME Turbo Expo 2015; Turbine Technical Conference and Exposition, 2015.
- [41] LEE T, KIM K T. Combustion dynamics of lean fully-premixed hydrogen-air flames in a mesoscale multinozzle array [J]. Combustion and Flame, 2020, 218: 234–246.
- [42] KANG H, LEE T, JIN U, et al. Experimental investigation of combustion instabilities of a mesoscale multinozzle array in a lean-premixed combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 6035–6042.
- [43] JIN U, KIM K T. Experimental investigation of combustion dynamics and NO_x/CO emissions from densely distributed lean-premixed multinozzle $\text{CH}_4/\text{C}_3\text{H}_8/\text{H}_2/\text{air}$ flames [J]. Combustion and Flame, 2021, 229: 111410.
- [44] LEE T, KIM K T. Direct comparison of self-excited instabilities in mesoscale multinozzle flames and conventional large-scale swirl-stabilized flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 6005–6013.
- [45] ZHANG Y S, YANG T M, LIU X Q, et al. Reduction of emissions from a syngas flame using micromixing and dilution with CO_2 [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11): 6595–6601.
- [46] ZHANG Y S, ZHANG H L, TIAN L, et al. Temperature and emissions characteristics of a micro-mixing injection hydrogen-rich syngas flame diluted with N_2 [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(36): 12550–12559.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] LYU Y J, XING C, LIU L, et al. Study of turbulent flame characteristics of water vapor diluted hydrogen-air micro-mixing combustion [J]. Renewable Energy, 2022, 189: 1194–1205.
- [50] CAO Z, LYU Y J, PENG J B, et al. Experimental study of flame evolution, frequency and oscillation characteristics of steam diluted micro-mixing hydrogen flame [J]. Fuel, 2021, 301: 121078. 1–121078. 11.
- [51] LU C, ZHANG L Y, CAO C, et al. The effects of N_2 and steam dilution on NO emission for a H_2/air micromix flame [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47: 27266–27278.
- [52] 邢畅, 邱朋华, 刘栗, 等. 一种加湿燃烧器 [P]. 中国: CN112856483B, 2021–05–28.
- XING Chang, QIU Peng-hua, LIU Li, et al. A steam dilution burner [P]. China: CN112856483B, 2021–05–28.
- [53] 邢畅, 邱朋华, 刘栗, 等. 一种微小尺度预混分级燃烧器 [P]. 中国: CN113310049A, 2021–08–27.
- XING Chang, QIU Peng-hua, LIU Li, et al. A micromix staged burner [P]. China: CN113310049A, 2021–08–27.
- [54] XING C, CHEN X Y, QIU P H, et al. Effect of fuel flexibility on combustion performance of a micro-mixing gas turbine combustor at different fuel temperatures [J]. Journal of the Energy Institute, 2022, 102: 100–117.
- [55] XING C, LIU L, QIU P H, et al. Research on combustion performance of a micro-mixing combustor for methane-fueled gas turbine [J]. Journal of the Energy Institute, 2022, 103: 72–83.

(刘颖编辑)