

F级重型燃气轮机燃烧器天然气掺氢全压试验研究

崔耀欣, 刘晓佩, 陈明敏

(上海电气燃气轮机有限公司, 上海 200240)

摘要:“碳中和”已成为当今世界绿色发展的关键词,而氢能具有零碳排放的优势,其承担着减少碳排放的重要任务,也成为全球最具发展潜力的清洁能源。因此,氢气和燃气轮机的组合成为支撑绿色能源发展的大势所趋,也是全球使用可再生能源实现无碳-氢能社会的关键动力之一。本文通过全温、全压、全流量试验研究分析了天然气掺氢比例对F级重型燃气轮机燃烧器燃烧性能的影响。试验结果表明,该燃烧器在10%到20%的氢含量范围内,可实现安全和稳定燃烧,并满足排放的要求。

关键词: 燃气轮机;燃烧器;氢气;燃烧

中图分类号:TK472

文献标志码:A

文章编号:1009-2889(2021)02-0038-05

“碳中和”作为一种新型环保形式,能够推动绿色的生活、生产,实现全社会绿色发展,全球各个国家已相继宣布相关发展战略。2020年9月,在第七十五届联合国大会上,中国首次正式提出将力争于2030年前达到碳排放峰值,争取2060年前实现碳中和,是迄今为止各国中做出的最大程度减少全球变暖预期的气候承诺。

实现碳中和的方法主要有两种:一是通过特殊方式去除温室气体;二是使用可再生能源减少碳排放^[1]。氢能具有来源广、热值高、零碳排放等优势,成为全球最具发展潜力的清洁能源,许多国家与地区都将氢能作为战略性能源发展。2017年12月,日本公布了“基本氢能战略”,主要实现氢能与其他燃料的成本平价,建设加氢站及天然气发电等^[2];2020年6月,德国宣布一项为期十年、价值90亿欧元的绿色氢能计划;法国也开始着手氢经济发展,计划在未来两年内投资20亿欧元,目标是到2023年在工业中实现10%的脱碳氢,到2028年达到20%至40%^[3]。我国氢能发展起步相对较晚,《中国氢能产业基础设施发展路线图》中提出:到2020年,我国氢能产业基础设施发展将取得重大突破,其中,以能源形式利用的氢气产能规模将达到720亿m³。

在氢能工业应用领域内,燃氢燃气轮机是

“全球使用可再生能源在2050年实现无碳-氢能社会”的关键因素之一。欧盟正在资助一个为期4年的项目,旨在开发出世界上首台配套先进燃氢燃气轮机的“动力到氢能,再到动力”的工业演示器^[3];日本三菱电力公司于2020年9月推出了标准化的“氢存储和网络集成解决方案”;GE燃气发电公司宣布在美国长岭能源码头部署7HA.02机组,规划最初可燃烧15%~20%氢气(体积比),并具有随时时间转变为100%燃氢的能力^[4]。

氢气的燃烧特性参数值与天然气有明显不同。与天然气相比,氢气最小点火能量小,发热量高,气体的扩散系数高,火焰传播速度快,可进行燃烧的浓度范围广,火焰温度高^[5-7]。因此传统运行模式下的天然气燃烧器将不再适用于燃烧含氢气体,需要进行气动、结构、控制等一系列优化改进。

燃料组分的变化会导致其化学和热物理性质的改变,这些性质的改变会影响绝热火焰温度、火焰传播速度、化学反应特征时间等火焰性质。而这些火焰性质的改变进一步将会影响燃气轮机运行,如热声振荡、回火、吹熄以及排放等问题^[8-10]。

根据热声振荡的时间延迟模型,影响热声振荡的关键参数即压力脉动和热释放之间的相位关系受火焰传播速度的影响,燃料组分发生变化时,火焰传

收稿日期:2020-12-16 改稿日期:2020-12-28

项目基金:上海市科学委员会项目(15160701700)

作者简介:崔耀欣(1976—),男,河北人,高级工程师,主要从事燃气轮机技术研究,E-mail:cuiyx@shanghai-electric.com。

播速度发生变化,进而改变压力脉动和热释放之间的相位关系^[11]。根据 Lieuwen^[12]基于热声振荡的机理推导出的热释放率方程,热释放受反应物密度、消耗速率、质量热释放及火焰面积的影响。当燃料组分改变时以上因素均会受影响,最终导致热释放率的变化。根据 Lieuwen^[13]推导的时间延迟模型,对流时间和化学反应时间影响热释放和压力脉动之间的相位关系,当燃料组分变化时,火焰速度和火焰质心均会受影响,从而影响对流时间;同时,由于反应物化学及热物理性质的变化,其化学特征时间会发生变化。对流时间和化学反应特征时间的变化会影响热释放和压力脉动之间的相位关系,这种变化会使得燃烧从稳定状态转变到不稳定状态,或者从不稳定状态转变到稳定状态,也可能使振荡强度增强或者减弱。

目前采用注入氮气或水蒸气作为稀释剂降低 NO_x 的排放^[14-15],该方式仅能将 NO_x 排放降至 $30 \sim 50 \text{ mg/m}^3$ 的水平,且稀释剂会导致燃烧不稳定等问题。采用无稀释预混燃烧方式燃烧富氢燃料依然是重要研发目标。但该技术面临的主要问题是热声振荡、自点燃、回火等造成的燃烧不稳定问题,尤其是回火,不仅会显著增加 NO_x 的排放还会带来安全隐患。而氢气由于其低密度、高火焰传播速度、宽可燃极限等燃烧特性,使得氢燃料燃烧室的回火问题尤为严重,阻碍了氢燃料旋流贫预混燃烧技术的发展^[16]。上海电气针对F级重型燃气轮机燃烧器开展燃氢适应性升级开发,并通过试验的方法对该燃烧器在全温、全压、全流量试验条件下对高氢燃料的适应性进行性能评估。

1 燃烧器结构介绍

试验中采用的燃烧器为两级旋流器,如图1所示,中间级为轴向旋流器,少量空气和燃料由此进入,中间级火焰的主要作用是稳定燃烧。轴向旋流器外为斜向旋流器,燃料的喷射方式为叶片开孔,燃料从叶片喷孔喷出,与来流空气进行掺混。绝大部分的燃料和空气由斜向旋流器进入。

2 试验台介绍

本次试验在位于意大利托斯卡纳地区的SESTA Lab进行,该试验台是全球顶尖燃烧全压试验台之一。试验台的空气流量可达 50 kg/s ,压力可达 $2\,300 \text{ kPa}$,温度可达 520°C ,天然气流量可达

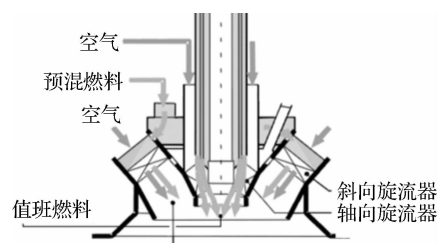


图1 F级重型燃气轮机混合燃烧器

1.5 kg/s 。同时,试验台还可提供氢气、一氧化碳等特种燃料。

燃烧试验段采用全温、全压、全流量单燃烧器设计,依据实际机组的运行曲线设定试验工况。试验段本体结构及与管路连接安装如图2、图3和图4所示。试验段本体采用双层缸设计,内缸为主要燃烧区域,其内侧布置有陶瓷瓦块用于热防护,外侧有冷却通道用于冷却金属壁面及瓦块支撑,外缸为主要承压部件,用于引流燃烧室入口的高温高压空气,双缸夹层通有冷却空气。下游的排气缸对燃烧排出的气体进行冷却。

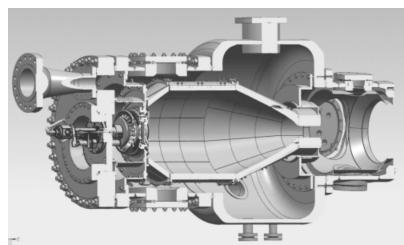


图2 单燃烧器试验段模型示意图

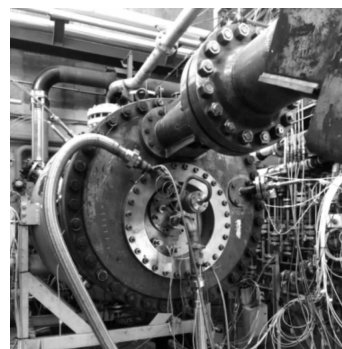


图3 试验台前端

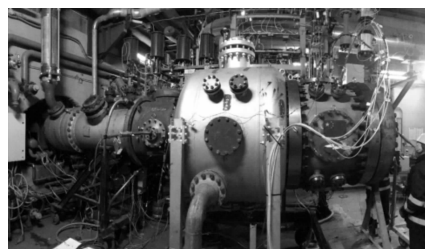


图4 试验台布置

试验过程中为了监测近壁面燃气温度和内缸金属壁温,沿内缸轴向布置若干热电偶,且沿周向布置有两排热电偶,两排热电偶呈 180°。同时,沿内缸轴向布置有压力测点,用于分析试验过程中的压力分布、压差变化、火焰转换等现象。在燃烧振荡监测方面,沿火焰筒轴向和周向均布置有动态压力传感器,同时在火焰筒前段布置有加速度传感器。

结合氢气的特性,天然气掺入氢气会使回火的风险提高,为了判断回火及安全监测,在斜向旋流器的出口沿周向布置四根热电偶监测温度,在轴向旋流器的出口沿周向布置两根热电偶,如图 5 所示。试验中若出现热电偶温度急速升高,则紧急切断燃料,避免燃烧器被损坏,出现危险情况。

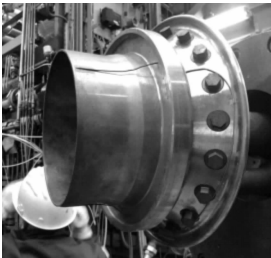


图 5 燃烧器出口热电偶

试验过程中,温度数据由 GE90-70PLC 进行采集,静态压力通过接入 PSI 公司的 9116 型压力扫描阀直接测量,动态压力采用 Kistler 公司的 6021A 型传感器进行测量,燃烧后的烟气成分通过西门子 Ultramat23 进行分析,最终所有的数据通过 SCADA 系统进行显示与记录。

3 试验结果分析

按照机组实际的运行曲线,计算单个燃烧器的输入参数,最终确定试验所用的工况表。该燃烧器试验的基本负荷主要参数如表 1 所示。

表 1 全压试验基本负荷试验参数

入口空气 流量/ (kg·s ⁻¹)	入口空气 压力/ kPa	入口空气 温度/℃	总燃料量(氢气 体积分数为 10%)/(g·s ⁻¹)	总燃料量(氢气 体积分数为 20%)/(g·s ⁻¹)
23	2 100	440	685.5	670

试验过程中采用天然气点火,按照工况表升至全转速空载后开始加入氢气。试验过程中所采用的燃料为天然气和氢气按体积比混合后的燃料,下文中所提到的氢含量均为体积分数。由于试验过程中燃料量较大,氢气和天然气比例稳定调节需要时间较长,故在试验过程中先对 10% 氢含量进行测试,

测试过程中按照工况表升至基本负荷。完成 10% 氢含量的测试后,将氢气比例切换到 20%,按照相同的试验流程进行 20% 氢含量的测试。

试验过程中重点关注了氢含量对排放、燃烧器出口温度、以及嗡鸣和振荡等性能的影响。

氢含量对排放的影响如图 6 所示。其中 BL 表示基本负荷,85% BL 表示 85% 负荷。在测试的负荷段内,在天然气中加入 10%~20% 的氢气均可使 NO_x 排放维持在 50 mg/m³ 以内,同时在 75% 负荷到 100% 负荷段可实现低于 30 mg/m³ 的排放。

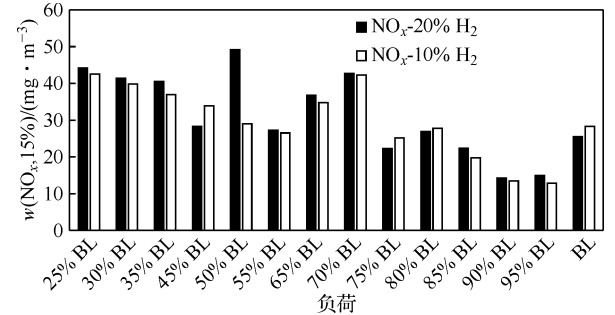


图 6 氢含量对排放的影响

对于 10% 氢含量和 20% 氢含量,在所测试的大部分负荷段,其排放差别不大。在 45% 负荷和 50% 负荷,两者的排放出现明显差别。导致这种现象的主要原因是此负荷段处在火焰转换附近,火焰处在一个相对不稳定的状态,氢含量的影响比较明显,导致排放出现变化。

氢气相比于天然气,其火焰传播速度较快,这一特性使燃烧过程中回火风险提高,本文中通过监测燃烧器的出口温度判断回火的风险。本文中共监测 6 个不同位置的温度。其中:2 个位于轴向旋流器出口,分别位于 12 点和 6 点方向,T_{axial1} 表示位于 12 点方向热电偶的温度,T_{axial2} 表示位于 6 点方向位置热电偶的温度;4 个位于斜向旋流器出口,周向位置分别位于 12 点、3 点、6 点和 9 点方向,T_{burner1}、T_{burner2}、T_{burner3} 和 T_{burner4} 分别为 12 点、3 点、6 点和 9 点方向的热电偶温度。氢含量对不同位置温度的影响如图 7 和图 8 所示。其中,所测量的温度以轴向旋流器出口温度 T_{axial1} 在氢含量为 10% 且 25% 负荷时的温度为参考温度进行归一化处理。

图 8 为氢含量对斜向旋流器出口温度的影响,其影响趋势与轴向旋流器的影响趋势一致。在所测试的负荷段内,氢含量的变化对燃烧器出口温度的影响较小,斜向旋流器出口的温度主要随负荷的升

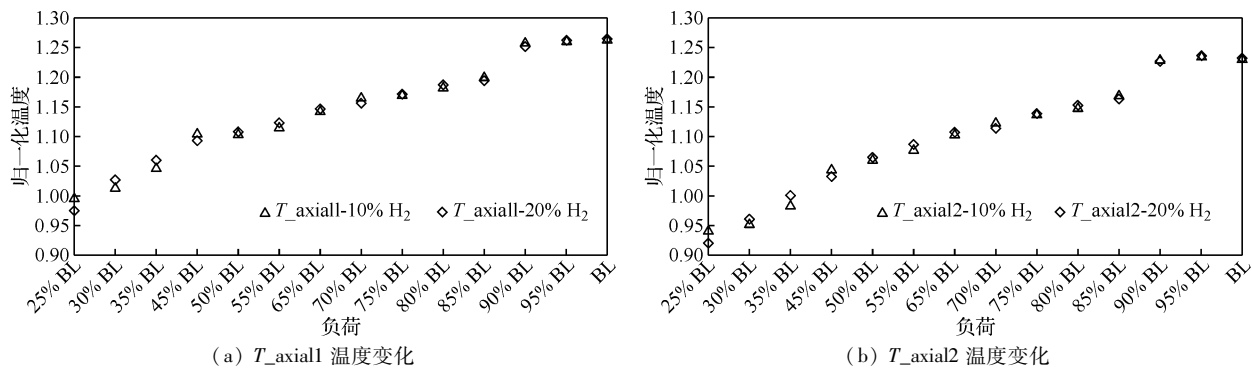


图 7 氢含量对轴向旋流器出口温度的影响

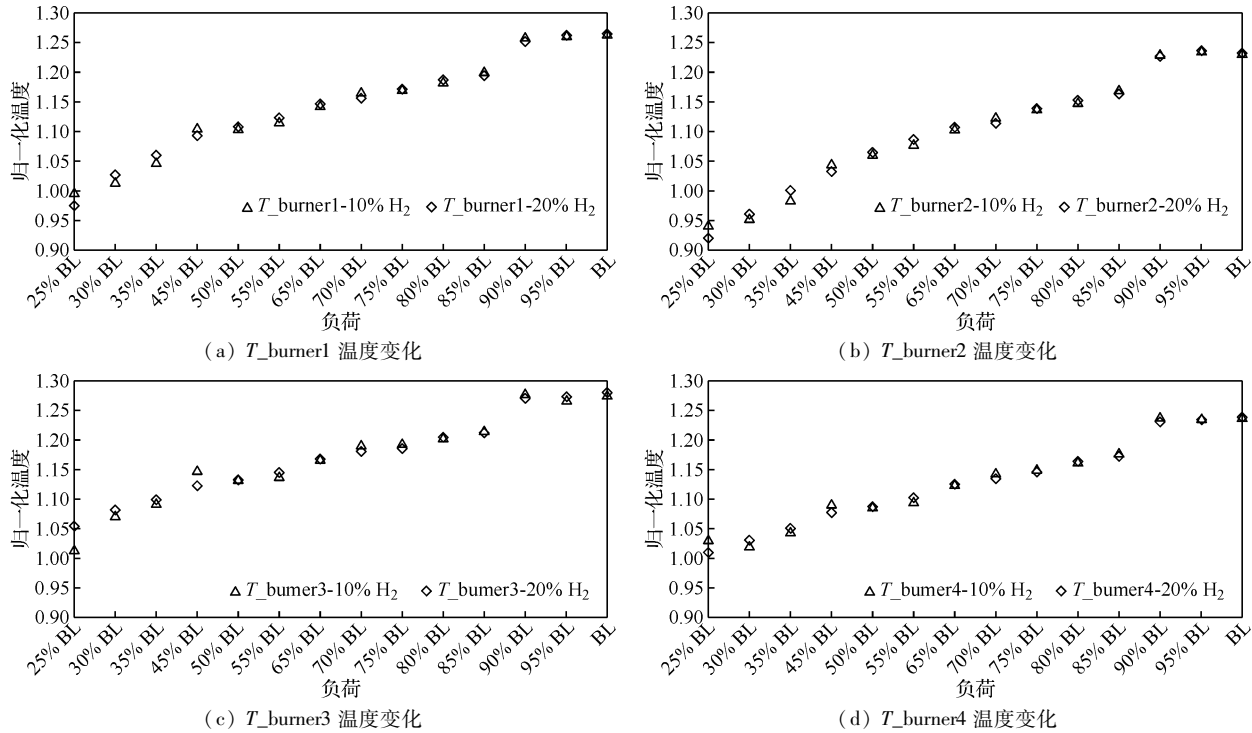


图 8 氢含量对斜向旋流器出口温度的影响

高而升高。综合氢含量对轴向旋流器和斜向旋流器出口温度的影响,氢含量从 10% 增加到 20%, 温度未出现明显的升高,未发生回火。

试验过程中为了监测氢气的加入,燃烧热声嗡鸣对试验段整体振动的影响,在燃烧筒前端布置了加速度传感器。试验过程中加速度幅值的变化如图

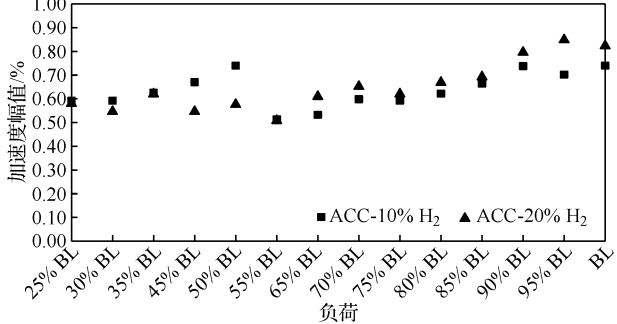


图 9 氢含量对热声振荡特性的影响

9 所示,可见全负荷段加速度值均小于 1 g。在 25% 到 50% 负荷范围内,氢含量的增加有利于稳定性。随着负荷升高,10% 氢含量的加速度幅值先降后升,20% 氢含量时的加速度幅值随负荷的变化,逐渐升高。因此,在高负荷段,增加氢含量不利于燃烧稳定性。

4 结论

本文对 F 级重型燃气轮机燃烧器进行了全温、全压、全流量天然气掺氢燃烧试验,重点关注了氢含量对排放、回火及稳定性的影响,主要结论如下:

- 1) 氢含量在 10% 到 20% 范围内时,氢含量的变化对 NO_x 排放的影响较小,在 75% ~ 100% 负荷间, NO_x 排放可以控制在 30 mg/m^3 以内;
- 2) 氢含量从 10% 增加到 20%, 在各个负荷下,

燃烧器均未出现回火现象；

3) 氢含量对燃烧稳定性的影响与负荷段有关, 未发生燃烧振荡。

综合以上,F 级重型燃气轮机燃烧器在全温、全压试验条件下,加入 20% 以内氢含量,可满足排放、回火及稳定性的要求。

参考文献：

[1] 实现碳中和 我们对 2060 年的承诺 - 认识碳中和[EB/OL]. [2020- 12- 10]. <http://huanbao. bjx. com. cn/news/20201106/1114348. shtml>.

[2] 中国社科院世界经济与政治研究所. 日本的氢能发展战略及启示[EB/OL]. [2020- 12- 10]. <https://baijiahao. baidu. com/s? id = 1669879682361079409&wfr = spider&for = pc>.

[3] 欧洲大力投资绿色氢能燃气轮机技术[EB/OL]. [2020-12-10]. https://www. sohu. com/a/417955933_229282.

[4] GE 将建美国第一座燃气发电厂, 十年内实现 100% 燃氢[EB/OL]. [2020- 12- 10]. <https://baijiahao. baidu. com/s? id = 1680681303101247447&wfr = spider&for = pc>.

[5] ZHANG Q, NOBLE D R, LIEUWEN T. Characterization of fuel composition effects in H₂/CO/CH₄ mixtures upon lean blowout[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129: 688-694.

[6] SCHEFER R W. Hydrogen enrichment for improved lean flame stability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28: 1131-1141.

[7] SCHEFER R W, WICKALL D M, AGRAWAL K A, Combustion of hydrogen-enriched methane in lean premixed swirl stabilized burner

[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29: 843-851.

[8] GAUDUCHEAU J L, DENET B, SEARBY G. A numerical study of lean CH₄/H₂/air premixed flames at high pressure[J]. Combustion Science and Technology, 1998, 137: 81-99

[9] JACKON G S, SAI R, PLAIA G, et al. Influence of H₂ on the response of lean premixed CH₄ flames to high strained flows[J]. Combustion and Flame, 2003, 132: 503-511.

[10] WICKSALL D M, AGRAWAL A K. Acoustics measurements in a lean premixed combustor operated on hydrogen/hydrocarbon fuel mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32: 1103-1112.

[11] SPETH R L. Fundamental studies in hydrogen-rich combustion: instability mechanisms and dynamic mode selection [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2011.

[12] LIEUWEN T C. Unsteady combustor physics [M]. Cambridge : Cambridge University Press, 2012.

[13] 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(1): 601-615.

[14] KLAUS P, ROBERT M J, MARCUS H S. Gas turbine flexibility with carbon constrained fuels [C]// ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. [S. l. : s. n.], 2008.

[15] WU J F, BROWN P, DIAKUNCHAK I, et al. Advanced gas turbine combustion system development for high hydrogen fuels [C]// ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. [S. l. : s. n.], 2007.

[16] 田晓晶. 氢燃料旋流预混火焰燃烧诱导涡破碎回火特性研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2015.

Experimental Study of Natural Gas Mixed with Hydrogen under Full Pressure of F-class Heavy Duty Gas Turbine Burner

Cui Yaoxin, Liu Xiaopei, Chen Mingmin
(Shanghai Electric Gas Turbine Co. , Ltd. , Shanghai 200240, China)

Abstract: Carbon neutral has been the key word of green development all over the world. Hydrogen energy plays an important role in reducing carbon emission because of its zero carbon emission, so it is regarded as the most promising clean energy in the world. Therefore, the combination of hydrogen and gas turbine has become the irreversible trend of supporting green energy development, and also been one of the most important power equipment to achieve carbon-free and hydrogen society. In this paper, the influence of hydrogen content on the combustion performance of a certain F class gas turbine burner is analyzed through full temperature, full pressure and full flow experiment. The experimental results show that the burner can achieve stable combustion in the range of 10% to 20% hydrogen content, which can also meet the requirements of emission.

Key words: gas turbine; burner; hydrogen; combustion