

Experimental Investigation of Fuel Flexibility in Gas Turbine Burning Syngas

Quanbin SONG, Aibing FANG, Gang XU, Weiguang HUANG,

¹ Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, People's Republic of China

Email: sqb@mail.etp.ac.cn

Abstract: Components of syngas always change with different gasification technologies and feedstock resources in coal-based IGCC and poly-generation systems. It is also difficult to get an unchanged syngas in a certain factory, so high fuel flexibility of gas turbine is necessary. This paper introduces the test results that different syngas (added with different quantity of purge gas) burn in the full-scale combustor test-rig and in-site gas turbine. When heat value and Wobbe Index of the fuel gas change in a large range, the gas turbine always operates safely and stably. This means the retrofitting gas turbine has high fuel flexibility. At last, it is suggested that giving different safe limits of fuel gas components according to different loads can improve the fuel flexibility and the economy of gas turbine plants.

Keywords: syngas; purge gas; fuel flexibility; gas turbine

合成气燃气轮机燃料灵活性试验研究

宋权斌, 房爱兵, 徐纲, 黄伟光

中国科学院先进能源动力重点实验室(工程热物理研究所), 北京, 中国, 100190

Email: sqb@mail.etp.ac.cn

摘要: IGCC 和煤炭多联产系统中, 由于气化技术和煤炭组分多种多样, 导致合成气组分变化多端, 即使同一工厂内也很难保证合成气组分的稳定, 这就要求燃气轮机具有很高的燃料灵活性。本文在中压全尺寸燃气轮机燃烧室试验台上和现场燃气轮机上进行了富氢合成气燃料组分变化(掺烧驰放气)的测试, 在燃料热值和韦伯数发生较大变化时, 燃气轮机可以保持安全稳定燃烧, 表明改造后的燃气轮机具有很好的燃料灵活性。最后提出针对厂家的实际运行情况, 按照一些特定工况给出燃料组分的安全范围, 可以进一步扩大机组的燃料灵活性, 提高机组的经济性。

关键词: 合成气; 驰放气; 燃料灵活性; 燃气轮机

1. 引言

燃气轮机的燃料灵活性(Fuel Flexibility)有两层意思: 一是指不同的燃气轮机可以燃烧不同来源的成分迥异的各种类型燃料; 另一层意思是指同一燃气轮机可以燃烧两种或多种不同的燃料, 如可以烧轻柴油和天然气, 或可以烧轻柴油和重油等, 或者是指同一种燃料的成分在较大的范围内变化时, 燃气轮机都可以安全高效的工作。Patrik^[1]分析燃料灵活性具有两大优点: 一是面对燃料供应中断问题提高了电站的安全性; 二是可以引入燃料间的竞争, 签价格主导的燃料短期合同, 从而降低燃料的成本。东京电力公司的 Hiruyoki^[2]对日本未来

的能源供应和燃气轮机的地位进行了研究, 认为日本的能源资源完全依赖进口, 为了保证能源的安全性和经济性, 必须减少对石油和天然气的依赖性, 发展可以应用煤和重油的 IGCC 等燃料灵活的发电设备。燃气轮机如果可以应用各种类型的替代燃料发电, 则能够获得可观的经济回报, 所以燃料灵活性的研究和应用对世界许多地区都至关重要。

各个大型燃气轮机公司都针对燃料灵活性的需求进行了研究并取得的良好业绩。GE 公司历来重视重型燃气轮机中燃料灵活性的研究和应用。Norman Z. Shilling^[3]、刘坚风^[4]从 IGCC 的角度出发, 总结了 GE 公司燃气轮机燃料灵活性对于 IGCC 系统的关键作用, 介绍了 GE 公司 2002 年新投入使用的燃烧实验室, 可

资助信息: 国家自然科学基金面上项目(50976116)

对 GE 的燃气轮机燃烧室进行全温全压全流量的实验，对各种类型燃料的燃烧技术可以进行深入的研究。文章还介绍了 GE 燃烧各种燃料的 IGCC 的运行经验，尤其是已经积累了超过 100 万小时（截止到 2008 年底）的高氢燃料的运行经验。总之，通过多年的研发和运行经验积累，GE 公司在燃气轮机燃料灵活性技术上取得了领先的地位。Frank^[5]总结了西门子利用低品质燃气发电的技术发展、从 ELCOGAS 和 ISAB（两个利用西门子发电设备的 IGCC 系统）获得的多年的运行经验以及从 Puertollano IGCC 电站改造中取得的经验，说明更加可靠的燃料灵活的燃烧系统可以大大提高整个电站的经济性能。而日本三菱公司的燃气轮机燃料灵活性技术已经不再限于轻油和天然气的双燃料燃烧技术，已经对燃烧低热值燃料、生物质燃料的燃料灵活性技术进行了深入的研究，并有商业应用的实例。

在 IGCC 和煤炭多联产系统中，对煤进行气化时可以采用空气或者纯氧气，分别得到低热值合成气和中热值合成气，其热值在 4846~14900kJ/m³ 之间，两者的主要可燃成分都是 CO 和 H₂，只是前者的 N₂ 含量比较高，因此热值更低。由于合成气的热值和可燃成分与天然气和轻柴油等常规燃料存在明显不同，因此当将其直接作为燃气轮机燃料时，会带来一系列的问题。比如对于含有大量 N₂ 的低热值合成气，容易发生稀态熄火现象，并且在低负荷工况下容易发生 CO 燃烧不完全的现象。对于中热值合成气由于其中的 H₂ 含量相对较高，容易导致锥顶过热、回火、“挂火”和热声振荡等问题。由于气化技术和煤炭组分都是多种多样，导致合成气组分变化多端，即使同一厂商也很难保证合成气组分的稳定，这就对燃气轮机燃料灵活性提出了更高的要求，各大燃气轮机厂商并没有能完全解决这一问题。

中国科学院工程热物理研究所与兖矿集团合作，完成了中热值合成气重型燃气轮机关键技术的攻关（即 6B 燃气轮机燃烧系统由天然气改烧合成气），迄今为止，该合成气燃气轮机已经累计运行超过 2 万小时。测试表明，燃气轮机改烧中低热值合成气后没有发生强烈的振荡燃烧现象，保证了燃气轮机的稳定运行^[6-8]。本文根据中压全尺寸燃气轮机燃烧室试验台上和现场燃气轮机上燃料组分变化（掺烧弛放气）的测试对燃气轮机燃料灵活性进行了分析，并提出了进一步提高合成气燃气轮机燃料灵活性的方法。

2. 试验简介

2.1 中压全尺寸燃烧室试验台

根据相似准则，在北京怀柔实验基地中压全尺寸燃气轮机燃烧室试验台上进行现场机组的单筒模块化燃烧试验（机组共有十只火焰筒）。燃烧室火焰筒长度约 800mm、直径约 300mm，火焰筒壁面上也开有多排冷却孔，对壁面起到冷却保护作用。试验台的空气流量 2kg/s，在燃烧室进口的温度为 340℃，燃烧室压力 0.2MPa。试验台系统如图 1 所示。压气机供给的压缩空气先后在回热器和电加热器中被加热。合成气在试验前用罐车从兖矿集团运来，实验室外已预留与罐车连接的接口，在连接前用氮气清吹管道。

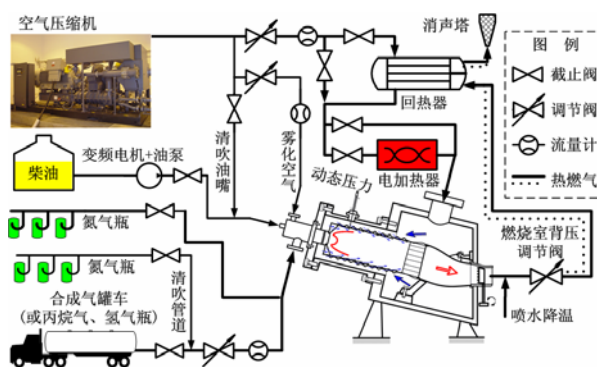


Figure 1. Schematic of medium-pressure test-rig
图 1. 中压试验台系统示意图

2.2 现场燃气轮机燃烧室测试平台

燃气轮机现场测试平台能够测试机组各种参数在调试过程中的变化趋势，例如燃机效率、污染物排放、火焰筒壁温分布和燃烧室动态压力等，通过对这些参数的分析，为设计启动给油规律和油气切换状态等提供支持。燃气轮机结构紧凑，燃烧室中高温高压，测量手段、测点布置均受到制约，平台需要解决传感器的固定和冷却、信号线的布置和引出密封等问题。机组与平台之间有一段距离，为避免信号在传输时遭到干扰，平台使用现场变送和远距离传输技术平台可以实施压力和温度传感器的现场校准与标定，以保证测量精度。

2.3 试验喷嘴结构

试验采用了图 2 所示的油气双燃料型喷嘴，轻柴油喷嘴采用空气雾化方式，合成气喷射孔设置在旋流

器的空气通道内。



Figure 2. Radial swirling nozzle

图 2. 径向旋流喷嘴

2.4 试验工况设置

中压试验平台测试用合成气通过罐车从山东现场运到实验室，其成分见表 1 所示，组分均匀，基本没有波动，热值大致为 17000 KJ/kg。对于合成气燃烧室的动态特性，文献^[6-8]多有分析，本文主要对掺烧弛放气（以纯氢气替代）的六个工况（D1~D6）进行分析，如表 2 所示，理由是燃气轮机额定功率 42MW，全负荷工作时合成气的流量大约为 47000Nm³/h，多联产系统要求合成气燃气轮机的甲醇弛放气掺混量在 0~10000Nm³/h 之间变化、醋酸弛放气掺混量在 0~2000Nm³/h 之间变化，那么总计弛放气掺混量在 0~12000Nm³/h 之间变化。

在多联产现场进行了燃气轮机掺烧弛放气的实验。在满负荷 42MW 下进行了四个工况试验，如表 3 所示。由于现场弛放气和合成气成份都有波动，所以混合进气的燃料组分以现场测试的为准，燃气组分分析见下文的试验结果分析。

Table 1. Component analysis of syngas
表 1. 中压测试用合成气

合成气成分	%	合成气成分	%
一氧化碳	37.184	丁烷	2.357
氢气	36.667	戊烷	0.320
甲烷	6.423	二氧化碳	10.426
乙烷	0.975	氮气	1.352
丙烷	2.454	其它	1.842

Table 2. Experimental conditions in medium-pressure test-rig
表 2. 中压测试平台测试工况 (D1~D6)

	70% 负荷[g/s]	100% 负荷[g/s]
纯合成气工况	D1(82 合成气, 0 氢气)	D2(107 合成气, 0 氢气)
合成气+6000m ³ /h 弛放气工况	D3(67 合成气, 2.3 氢气)	D4(83 合成气, 2.6 氢气)
合成气+12000m ³ /h 弛放气工况	D5(53 合成气, 3.9 氢气)	D6(67 合成气, 4.7 氢气)

Table 3. In-site Experimental Conditions
表 3. 现场燃气轮机测试工况 (A1~A4)

工况序号	A1	A2	A3	A4
燃机功率	满负荷 42MW			
弛放气 Nm ³ /h	0	3327	2684	2797
合成气 Nm ³ /h	47416	47447	47046	46888

3. 试验结果和讨论

通过对以上各个测试工况下头部鱼鳞板锥罩的温度分布、火焰筒壁面温度分布、燃烧室出口温度场分布、动态压力特性和排放特性的分析，可以知道在各个测试工况下，燃烧是稳定的，温度场分布是安全合理的，污染物排放是可以接受的^[6-8]，下面根据这些工况的测试对燃烧室的燃料灵活性进行分析。

3.1 燃料灵活性指示参数

虽然燃气轮机能够燃烧各种各样的燃料，但是对于某一固定的燃气轮机的燃料供应系统其燃料的特性参数变化范围则是有限的。GE 燃料规范^[9]中考虑的气体燃料的特性参数包括热值、MWI、过热度、露点、可燃极限、气体组分极限、燃料供给压力等，对传统的碳氢燃料提供这些参数是可行的。但是对于富含氢气的合成气燃料，由于氢气的输运特性和火焰传播速度与其他气体差别很大，上述传统的指标不足以描述燃料的特性。Lieuwen^[10]认为对于富氢合成气燃料，尤其是对于预混燃烧，除了考虑上述参数，还要考虑燃料层流和湍流火焰传播速度、自动点火延迟时间和化学反应时间等基本特性以及和运行相关的吹熄、回火、燃烧不稳定和自动点火等特性，这才能全面考核燃料组分变化对燃烧室性能的影响。对于燃料的灵活性相关学者提出了一些特性参数来描述，GE 普遍使用的是和热值相关的韦伯数 (Wobbe Index, WI) 和改进韦伯数 (Modified Wobbe Index, MWI)，其定义如下：

$$WI = \frac{LHV}{\sqrt{SG}}, \quad MWI = \frac{LHV}{\sqrt{SG \times T_{gas}}}$$

其中 SG 是燃料气的密度于空气密度的比值， T_{gas} 是燃料气进气温度。一般 GE 要求 WI 和 MWI 的变化不要超过设计工况的 5%。Ferguson^[11]总结了一些其他的参数，包括考虑了层流火焰传播速度的 Schuster 数。除了单个特性参数，Weaver^[12]还提出了一组考虑了升力、回火、火焰传播速度等的特性参数组来描述燃料的灵活性。本文侧重于应用研究，采用的是富氢合成气加湿扩散燃烧方式，对燃料灵活性限于合成气加弛放气掺混燃烧和加入水蒸气或氮气的加湿燃烧，进气温度是相同的，所以重点考察反映燃料灵活性特性的韦伯数和气体组分极限。

3.2 燃料灵活性分析

表 4 是单喷嘴燃烧室中压实验台测试 6 个工况中所用燃料韦伯数表。由于使用纯氢气代替的合成气，所以燃料韦伯数变化完全是因为燃料中添加纯氢气所引起的。由于前面提到氢气的特殊性质，所以燃料在因为氢气增加使得韦伯数变化达到 5.88% 而能够安全运行说明我们的设计是合理的，燃烧室具有很好的燃料灵活性。

表 5 列出了现场燃气轮机测试用燃料特性和韦伯数，可以看到弛放气的增加使得燃烧室进口燃料热值最大变化 7.1%，韦伯数最大变化 4.2%，在富氢燃料的热值和韦伯数这么大范围变化中燃气轮机可以安全稳定运行，说明我们改造的燃烧合成气的燃气轮机具有很好的燃料灵活性。

对于气体组分极限指标，本文有限的几个工况测试还不足以给出定量的结果。本文针对实际的需求进行定性的分析，给出一种更合理的提供方法。综合考虑各种因素（包括温度分布、动态特性、排放等），不同工况下燃料成分极限不同，如图 3 所示。对于每一个负荷工况得到一个气体组分含量的取值范围，不

Table 4. Test results in medium-pressure test-rig
表 4. 中压测试平台测试结果分析

工况	D1/D2	D3/D4	D5/D6
热值 (KJ/m ³)	15786	14599	13551
密度 (Kg/m ³)	0.84761	0.6934	0.55718
韦伯数 (KJ/m ³)	18620	19038	19714
韦伯数变化	0	2.25%	5.88%

Table 5. In-site test results
表 5. 现场测试结果分析

工况	A1	A2	A3	A4
弛放气 Nm ³ /h	0	3327	2684	2797
合成气 Nm ³ /h	47416	47447	47046	46888
燃烧效率	0.998	0.998	0.999	0.998
燃机净效率	0.321	0.318	0.324	0.324
燃烧室进口燃气（合成气+弛放气）组分及特性				
H ₂ %	36.26	39.84	38.63	38.77
CO%	48.22	45.12	45.80	45.83
CO ₂ %	14.45	13.20	13.28	13.26
CH ₄ %	0.04	0.34	0.26	0.27
N ₂ ,Ar%	1.03	1.5	2.02	1.87
热值	10775	11542	11230	11338
热值变动	0%	7.1%	4.2%	5.2%
韦伯数变动	0%	4.2%	2.8%	3.0%

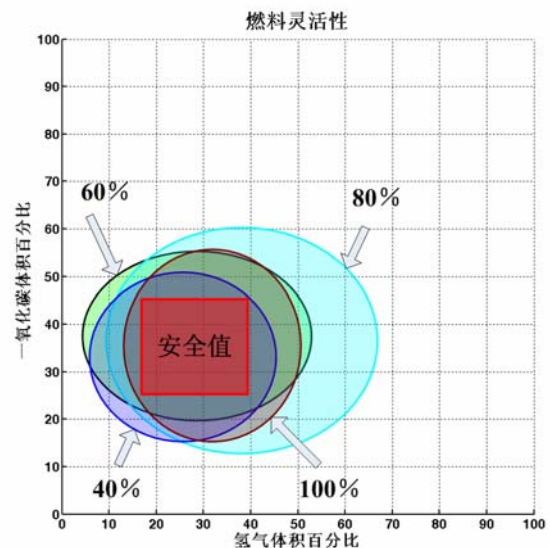


Figure 3. Schematic diagram of safe component limits
图 3. 燃料组分安全范围示意图

同的负荷该范围不一样的。根据上面现场和中压实验台的数据分析，100% 负荷和低负荷时燃烧噪声增加，对燃料组分要求更为严格。60%~80% 负荷左右对燃料成分的变化相对宽容一些。如果对燃气轮机的灵活性只是给定一个取值范围，则此范围是各个工况安全

取值范围的交集,为图中正方形部分所示。Antonio^[13]就是为 MS5002E 型燃气轮机给出这样的一个安全范围。但是这个范围太苛刻了,具体到实际的机组,给出一些特定工况的安全范围更有意义。如山东兖矿现场的燃气轮机,由于合成气量缺乏,同时需要掺烧弛放气,而发电负荷很难达到满负荷,基本在 40%~80% 负荷之间变化,这种情况下,可以按照不同负荷给出相应的合成气和弛放气的安全取值范围,就能在保证机组安全性的前提下获得更高的经济性。

根据各种实验测试分析,认识到提高机组的燃料灵活性,在技术上并没有通用的方法适用于所有类型的燃气轮机和燃料。必须考察可能的燃料组分变化对燃气轮机的安全、排放、经济性等各种指标的影响,在权衡各种指标后才能确定合适的喷嘴和燃烧室的结构改进方案。

4. 结论

中压全尺寸燃气轮机燃烧室试验台上和现场燃气轮机上富氢合成气燃料组分变化(掺烧弛放气)的测试表明,在各个测试工况下,燃料热值和韦伯数变化较大,燃气轮机可以保持安全稳定燃烧,说明改造后的燃气轮机具有很好的燃料灵活性。对于燃料灵活性,可以用通用指标如韦伯数、燃料组分等的取值范围来表征。针对厂家的实际运行情况,按照一些特定工况给出燃料组分的安全范围,可以进一步扩大机组的燃料灵活性,提高机组的经济性。

致 谢

本文所介绍的燃烧室的设计、实验平台的建设和实验测试是中国科学院先进能源动力实验室(工程热物理研究所)的整个研究团队所共同完成的,作者主要是参与了实验平台的建设和测试数据分析工作。在此对整个研究团队表示衷心的感谢。

References (参考文献)

- [1] Patrik Soderholm, Fuel Flexibility in the West European Power Sector, Resources Policy 26 (2000) 157-170
- [2] Hiruyoki INO, Future View of Energy Supply & Role of Gas Turbine in Japan, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo, Nov2-7, 2003.
- [3] Norman Z. Shilling, Dan T. Lee, IGCC – Clean Power Generation Alternative For Solid Fuels, PowerGen Asia 2003
- [4] Liu Jianfeng, Li Daniao, GE Technologies and Experience of IGCC, GE Modern Power Technology 2002, GE Power System 刘坚风,李大年,GE 整体煤气化联合循环 IGCC 技术与经验, GE 现代电力技术 2002, GE Power Systems
- [5] Frank Hannemann, Berthold Koestlin, Gerhard Zimmermann, Pushing Forward IGCC Technology at Siemens, 2003 Gasification Technologies Conference, San Francisco, California, 2003
- [6] Lei Yu, etc. Experimental Investigation on the Dynamic Characteristics of a Gas Turbine Combustor Firing Syngas, *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, Vol.26 No.6, P.1057~1060 雷宇等,燃气轮机合成气燃烧室动态特性的实验研究,工程热物理学报, 2005, Vol.26 No.6, P.1057~1060
- [7] Xu Gang, Fang Aibing, Lei Yu, etc., Retrofitting Technology of Gas Turbine Combustor in Order to Burning Medium-heating-value Syngas: Site Debug and Assess. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, Vol.28 No.6, P.1043~1046 徐纲,房爱兵,雷宇,俞斌,刘庆国,聂超群,黄伟光,燃气轮机中热值合成气燃烧室改造技术——现场调试与考核,工程热物理学报, 2007, Vol.28 No.6, P.1043~1046
- [8] Song Quanbin, Fang Aibing, Xu Gang, Zhang Yan, Experimental Investigation of Syngas Mixing-burned with Hydrogen-enriched Purge Gas in Heavy Duty Gas Turbine. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, Vol.31 No.2, P.327~330 宋权斌,房爱兵,徐纲,张彦,重型合成气燃气轮机掺烧高氢弛放气的实验研究,工程热物理学报, 2010.2, 第 31 卷第 2 期, P327-330
- [9] GE Power Systems, Specification for Fuel Gases for Combustion in Heavy-Duty Gas Turbines, GEI 41040G, Revised Jan. 2002
- [10] Tim Lieuwen, Vince McDonnell, Eric Petersen, and Domenic Santavicca, "Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, January 2008, Vol. 130
- [11] Don Ferguson, Geo. A. Richard and Doug Straub, Fuel Interchangeability for Lean Premixed Combustion in Gas Turbine Engines, Proceedings of ASME Turbo Expo 2008, GT2008-51261
- [12] Harsha, P., Edelman, R. and France, D., "Catalogue of Existing Interchangeability Prediction Methods", Gas Research Institute, SAI-80-024-CP, 1980.
- [13] Antonio Asti, Jesse F. Stewart, "Enlarging the Fuel Flexibility Boundaries: Theoretical and Experimental Application to a New Heavy-Duty Gas Turbine (MS5002E)", Proceedings of ASME Turbo Expo 2008, GT2008-50773.