R0110 重型燃气轮机分级燃烧室 NOx 排放试验研究

包文飞,李 明,牟 影,王巍龙 (中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司,沈阳 110043)



包文飞(1971),男,高级工程师,主要 从事燃气轮机整体性能及试验工作。 收稿日期:2012-12-18

摘要:R0110 重型燃气轮机是中国第1 台具有自主知识产权的重型燃气轮机,其 燃烧室按照干式低排放(Dry Low NOx,DLN)原理设计,采用燃料径向分级的燃烧技术。 燃烧室设计包括2种分级燃烧模式,第Ⅰ模式为常规燃烧模式,第Ⅱ模式主要是针对 NOx排放问题而设计的。2种燃烧模式试验研究结果表明:第Ⅱ模式较第Ⅰ模式在污染物 排放方面有显著降低,但2种模式均未满足设计要求。通过对试验结果做简要的阐述及 分析,提出可采取调整各燃烧区的燃料分配比例、改进燃烧室结构等措施和建议,以进 一步改善燃烧室 NOx排放特性。

关键词:重型燃机;均匀预混;分级燃烧技术;NOx 排放:航空发动机

Experimental Research on NO_x Emission of Staged Combustor for R0110 Heavy-duty Gas Turbine

BAO Wen-fei, LI Ming, MOU Ying, WANG Wei-long

(AVIC Shenyang Limnig Aero-engine(Group) Co. Ltd., Shenyang 110015, China)

Abstract: The R0110 heavy-duty gas turbine is the first self-developed in China, which the combustor is designed according to the Dry Low NOx (DLN) principle. The fuel of the gas turbine was staged radially. Two kinds of staged combustion mode were included in combustor design, the mode I was the routine mode and the mode II was mainly designed for resolving the NOx emission. Test results for two kinds of combustion mode show that the model II was significantly reduced in pollutant emissions than the mode, but both modes did not meet the design requirements. Based on analysis of the test results briefly, the further measures and suggestions on reducing NOx emission are put forward that fuel distribution ratio in the various stages are adjusted and combustor structure is improved.

Key words: heavy-duty gas turbine; uniform premixed; staged combustion technology ; NOx emission; aeroengine

0 引言

环保意识的增强和排放标准的制定要求航空发 动机和工业燃气轮机必须降低氮氧化物(NO_x)、一氧 化碳(CO)、未燃碳氢化合物(UHC)的排放^{III}。世界发 达国家燃气轮机技术较为成熟,在降低污染物排放方 面成效显著,其中分级燃烧技术尤其是低 NO_x 燃烧 技术应用广泛,现已成功应用于多种燃气轮机机组^{II}。

R0110 重型燃气轮机燃烧室为逆流环管式结构, 采用燃料径向分级燃烧技术,通过向每级燃烧区供入 一定量的空气和燃料,燃烧过程按照均匀预混可燃气 体的火焰传播方式进行,使燃烧温度被限定在1800 K以下,进而控制高负荷下的 NO_x 生成量¹³⁻⁴。R0110 重型燃机第 I 模式为常规燃烧模式,环形区在整个工 作范围内不熄火;第 II 模式为减排放燃烧模式,环形 区在特定状态熄火,作为燃料预混室使用。2种燃烧 模式各燃烧区燃料特性基本保持一致。为验证其燃烧 室的 NO_x 真实排放特性,该燃气轮机研制完成后,在 2006~2011 年先后进行了和第 I 、II 模式单管试验。 试验表明:第 II 模式的污染物排放比第 I 模式的显著 降低。

本文研究了 R0110 重型燃气轮机在 2 种燃烧模 式下的试验过程,通过对 2 种燃烧模式污染物排放结 果进行比较分析,提出进一步改善燃烧室特性的措施 和建议。

1 试验系统和试验过程

1.1 试验系统

试验系统包括空气系统、天然气供气系统、试验 件和测量系统。天然气供气系统如图1所示,来自加 温炉的天然气通过过滤器、V 锥流量计测量后分为4 路进入燃烧室各燃料进口,其中的3条支路都有流量 测量装置和流量调节控制阀,用以控制供入不同燃烧 区的燃料流量;预燃室点火由于流量小,可通过稳压 阀控制天然气的压力来保证流量,不做单独测量。



图 1 天然气供气系统流程

为了测量燃烧室排气污染物的排放量,在试验件

后端安装了6支7点采样 耙,安装位置如图2所示。 所需的样气通过采样耙取 得后混为1点,经过保温管 引到测量仪器即燃气分析 仪,具体燃气分析流程如图 3所示。



1.2 试验过程

1.2.1 燃烧室结构

R0110 重型燃气轮机燃烧室结构剖面如图 4 所

示。该燃烧室主要由环形区、均匀区、扩散区,以及中 心区、1级回流区和2级回流区等组成,火焰筒轴向 布置2道文丘里式节流环,用于收紧火焰和产生回 流,防止火焰筒壁温超标和环形区回火。



环形区位于火焰筒头部外侧,其前壁板上装有 8 个微型涡流器。火焰筒的内、外壁和 1 级文丘里式节流 环所组成的空间形成了环形区,燃料与空气在该预混 室内充分混合,后经 1 级文丘里式节流环产生回流 后,与扩散区的值班火焰相遇燃烧。均匀区位于火焰筒 头部内侧,由中心旋流器、火焰筒内壁和前壁板等组 成。燃料在均匀区内与空气进行短暂混合后,经过中心 旋流器的搅拌,与扩散区的值班火焰相遇燃烧。

1.2.2 燃料分配过程

燃烧室点火成功后,随着相对功率的升高,供入 火焰筒不同燃烧区的燃料量也进行调整。R0110 重型 燃气轮机燃烧室燃料特性如图 5 所示。燃烧室 2 种 燃烧模式各区燃料流量配比,在整个升功率过程中基 本一致,都需要 2 次调节燃料分配比例,分别为相对



样气

图 3 燃气分析系统流程



功率 N_e=0.3 和 0.7。2 种燃烧模式区别在于第 Ⅱ模式 在相对功率 N_e=0.4 之后的过程中,环形区熄火作为 预混室使用,下面主要以第 Ⅱ模式为例,介绍各燃烧 区燃料在整个功率范围内的变化特性,具体如下:

(1)相对功率 N_e=0~0.3:燃料全部进入环形区, 此时,仅环形区工作,燃烧方式为扩散燃烧。

(2)相对功率 N_e=0.3。均匀预混区和扩散区开始 工作,此时,进行第 1 次燃料分配,将 3%的燃料供入 扩散区,35.3%的燃料供入均匀预混区,61.7%的燃料 供入环形区,环形区和扩散区均为扩散燃烧,扩散区火 焰实质是值班火焰,为功率进一步提高做好准备。

(3)相对功率 N_e=0.4。环形区熄火,作为燃料和 空气的预混室使用。此时,燃料分配比例保持不变,混 合气经第1级文丘里式节流环产生回流后,由扩散区 值班火焰点燃,在中心区进行燃烧,燃烧室开始由扩 散燃烧向预混燃烧转换。

(4)相对功率 N_e=0.4~0.7。燃烧室按燃料特性曲 线继续提升相对功率,环形区的燃料量占主导地位。

(5)相对功率 N_e=0.7~1.0。燃料再次进行重新分配,降低环形区燃料量的同时,增加均匀区的燃料量, 保持燃料总量不变,最终完成整个燃烧方式的转换。

从燃烧室的整个工作过程可知,在大功率状态下,燃烧室是以大比例(预混占97%,扩散占3%)的预混燃烧进行工作,燃料和空气的良好混合可使燃烧更加充分,燃气经第1、2级文丘里式节流环产生回流后,增加了在火焰筒内的驻留时间,有效地控制了污染物 CO 的生成;环形区的燃料与空气的混合气经第1级文丘里式节流环产生回流后,与扩散区值班火焰相遇燃烧,并与均匀预混区火焰共同组成中心火焰

炬,在第Ⅱ模式下,环形区是熄火状态,因此,其混合 气温度较低,对中心火焰炬起到了冷却的作用,使中 心火焰炬燃烧温度控制在特定的温度区间内,有效抑 制污染物 NO_x 的生成。

2 试验结果与分析

2.1 2种燃烧模式污染物排放结果及分析

燃烧室第 I、 II 模式试验污染物排放结果见表 1、2。从表中可见,第 I 模式在整个功率范围内,燃烧 效率都较高,CO、UHC 等排放较低,在设计点基本检 测不到,但是 NO_x 排放量却远远超标,设计点状态为 94.3 mg/N·m³(O₂ 质量分数为 15%折算法);第 II 模式 燃烧效率在相对功率 N_e=0.4~0.5 小功率状态下较 低,NO_x 的排放也较低,CO、UHC 的排放较高,在 N_e= 0.7 以上功率状态下燃烧效率较高,CO、UHC 排放明 显降低,但是 NO_x 的排放随之升高,设计点状态为 55.99 mg/N·m³(O₂ 质量分数为 15%折算值)。

表 1 第 | 模式燃烧室排气污染试验结果

试验状态	η	$CO/(mg/N \cdot m^3)$	$CO_2/(mg/N \cdot m^3)$	NO _X 实测 /(mg/N·m ³)	NO _X 折算 /(mg/N·m ³)	α
$N_{\epsilon} = 0$	0.997	37.75	2.69	104.775	282.285	9.326
N₀=0.3(调整前)	0.999	4.63	4.36	138.58	226.935	5.712
$N_{e} = 0.5$	0.990	747.1	5.29	101.475	134.275	4.633
N₀= 0.7(调整前)	0.999	-	6.88	148.215	156.415	3.695
N _e = 0.7(调整后)	0.999	14.1	6.81	173.020	181.015	3.674
$N_e = 1.0$	0.999	-	8.50	231.035	193.315	2.943
$N_{e} = 1.09$	1.000	_	9.19	269.370	205.615	2.686

表 2 第 || 模式燃烧室排气污染试验结果

试验状态	η	CO/(mg/N \cdot m ³)	$\text{CO}_2/(\text{mg/N}\boldsymbol{\cdot}\text{m}^3)$	NO _X 实测 /(mg/N·m ³)	NO _X 折算 /(mg/N·m ³)	α
N₀=0.4	0.931	2196.25	4.66	64.78	96.04	5.10
N _e =0.5	0.773	3081.25	3.96	13.98	13.22	4.31
N,=0.7(调整前) 0.999	111.25	6.35	57.73	42.41	3.68
N₀=0.7(调整后) 0.992	566.25	6.08	141.22	108.63	3.72
N _e =1.0(α=2.87	0.999	9.8	7.84	184.82	114.78	2.91
N _e =1.09	1.000	5.08	8.49	224.65	142.91	2.69

从燃烧室整个工作过程分析,在小功率工作状态下,燃料与空气预混后在主燃区分布比较均匀,燃料质量分数较低,从化学反应速率角度来讲,燃料质量分数过低导致化学反应速度减慢(即燃烧速率降低),因此,部分燃料还未来得及燃烧就离开了燃烧室,使燃烧效率下降,CO、UHC的排放较高⁶⁰。对于 NOx 排放特性,在第Ⅱ模式下,除相对功率 №=0.7 的燃料

调整外,其余状态基本符合 DLN 燃烧室的工作准则。 而试验结果表明:在相对功率 $N_e=0~0.7$ 的过程中, NOx 排放较小。正是因为相对功率 $N_e=0.7$ 的燃料调 整后,才导致了 NOx 排放的逐步升高,最终超出设计 要求,这与环形区和均匀区燃料量的改变有直接关 系。

从燃烧室的结构上分析,R0110 重型燃气轮机燃 烧室虽然采用了燃料分级和稀相预混结构设计,但在 来流空气湍流度、预混距离等方面存在不足。第Ⅱ模 式环形区虽然有了足够的空间来实现燃料与空气的 均匀预混,但是,8个微型旋流器位于燃料喷嘴的下 游,且与燃料喷嘴距离很近,这对来流空气湍流度的 强化和预混距离的延长很不利。均匀区有着同样的弊 端,并且预混空间比 GE 公司的 DLN 燃烧室的小很 多,很难实现燃料与空气的完美混合,第 2 次的燃料 切换加重了此因素的负面影响。

2.2 改善 NOx 排放的措施和建议

通过分析认为,调整好各区之间的燃料比例是降 低 NOx 排放的首选措施。从燃料分配中可见, R0110 重型燃气轮机燃烧室在模式Ⅱ下,相对功率 N_e=1.0 时,扩散区的值班燃料、预混较差的均匀区燃料和环 形区的稀相预混燃料比例分别为 3%、58%和 39%, 而结构与之相似的 GE 公司 DLN-1 燃烧室的 3 部分 燃料比例则为2%、15%和83%,预混较差的均匀区燃 料比例仅为15%,才实现了NOx 排放 <25 mg/N·m3 (15%余氧状态)的要求。R0110 重型燃气轮机燃烧室 均匀区的燃料比例比 DLN-1 燃烧室的高 3~4 倍,使 均匀区过量空气系数过低,而变成预混室的环形区过 量空气系数又显得过高。二者均偏出 DLN 燃烧室所 要求的过量空气系数为1.5~1.6的范围。显然,如将 均匀区的部分燃料供给环形区,使2区的过量空气系 数相互接近或基本一致,有望进一步降低 NOx 排放。 此外,适当的延长均匀区的预混段,提高预混均匀性, 增强环形区和均匀区的扰流进而增加来流空气的湍 流强度,有望进一步改善 NOx 排放特性。

3 结束语

在设计点状态,2种燃烧模式 NO_x 排放量均超标,虽然第 II 模式 NO_x 排放量比第 I 模式的有明显降低,但是仍然不能达到小于 25 mg/N·m³(15%余氧状态)的设计要求。这说明燃烧室的设计存在缺陷,除

了要重新调整各燃烧区的燃料分配比例,在结构上, 环形区和均匀区的旋流器安装位置不当,造成燃烧室 的来流空气湍流强度与预混距离不够等问题也是需 要重新考虑的因素。

参考文献:

 梁春华. 燃气涡轮发动机干低排放燃烧室的研制及发展[J]. 航空发动机,2011,37(4):47-50.

LIANG Chunhua. Research and development of dry low emission combustion chamber of gas turbine engine [J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 47–50. (in Chinese)

[2] 刘静,肇俊武. 国外民用航空发动机低污染燃烧室的发展
[J]. 航空发动机, 2012, 38(4):11-16.
LIU Jing, ZHAO Junwu. Foreign civil aircraft engine develop-

ment of low pollution combustion chamber [J]. Aeroengine, 2012, 38(4):11–16. (in Chinese)

- [3] 侯晓春. 燃气轮机燃烧技术的研究与应用 [J]. 燃气轮机技术,1998,11(2):8-21.
 HOU Xiaochun. Gas turbine combustion technology research and application [J]. Gas Turbine Technology, 1998, 11(2): 8-21. (in Chinese)
- [4] Vermes G. Low NO_x formation emission from an ambient pressure diffusion flame fried gas turbine cycle (APGC) [J].
 ASMEJ of Engineering for Gas Turbines and power, 2003, 125:46–50.
- [5] 雷俊勇,李宇红,由长福. 重型燃机 DLN 燃烧室环形区的 优化研究[J].燃烧科学与技术, 2006,12(4): 340-344.
 LEI Junyong, LI Yuhong, YOU Changfu. Study on optimization of heavy duty gas turbine combustion chamber of the DLN loop region [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006,12(4):340-344. (in Chinese)
- [6] 黄伟,曾汉才. 分级燃烧对 NOx 排放的试验研究[J]. 电站系统工程,2005,21(4): 8-10.
 HUANG Wei, ZENGHancai. Experiment research for the air staging on NOx emissions power system engineering[J]. Power System Engineering, 2006, 27(Suppl.2):227-230. (in Chinese)
- [7] 谢刚,祁海鹰,李宇红,等. R0110 重型燃气轮机燃烧室污染排放性能研究 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(20):
 44-46.

XIE Gang, QI Haiying, LI Yuhong, et al. Emission peformance of Dry Low NO_X combustors for R0110 heavy-duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(20):44–46. (in Chinese)

[8] 周君辉,王力军. 燃烧室贫油多旋流预混合预蒸发特性数值 研究[J]. 航空发动机, 2011,37(1):20-23.

ZHOU Junhui, WANG Lijun. Numerical (下转第 78 页)