

文章编号: 1000-8055(2009)09-1977-04

某型干式低 NO_x 燃烧室污染物排放试验

刘 凯^{1,2}, 蔡九菊¹, 张宝诚², 马洪安²

(1. 东北大学 热能工程系, 沈阳 110003;

2. 沈阳航空工业学院 动力工程学院, 沈阳 110034)

摘 要: 应用高压试验台完成了某重型燃气轮机(E级)干式低 NO_x (DLN) 燃烧室烧天然气污染排放性能试验与研究. 各工况下 CO 及 UHC 质量分数很低, 燃烧室能够保证稳定高效燃烧. 燃烧效率达到 99 % 以上; 额定工况 NO_x 质量分数 $204 \text{ mg/N} \cdot \text{m}^3$ (15 % O_2), 大大超出设计要求. 试验结果表明: 该燃烧室值班燃料比例过大, 导致扩散燃烧产生 NO_x 效果明显; 燃料预混不均匀是 NO_x 质量分数过高的另一重要原因. 这一结论为该燃机的改进提供了可靠参考和依据.

关 键 词: 重型燃气轮机; 燃烧室; 污染; 试验

中图分类号: TK474

文献标识码: A

Experimental study of pollution emissions of a dry low NO_x combustor

LIU Kai^{1,2}, CAI Jiur-ju¹, ZHANG Bao-cheng², MA Hong-an²

(1. Department of Thermal Engineering, Northeastern University, Shenyang 110003, China;

2. School of Power Engineering,

Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China)

Abstract: Experimental study of combustor of heavy-duty gas turbine (E) was conducted on high-pressure test system. The content of CO and UHC was very low, the combustion was stable and efficient, with the combustion efficiency over 99 % and pollution emissions (NO_x) up to $204 \text{ mg/N} \cdot \text{m}^3$ (15 % O_2) under rated condition. But, this couldn't meet the design requirements. The results indicate that: the ratio of on-watch-fuel is large, which makes the content of NO_x larger; uneven premixed fuel is another important reason that makes the content of NO_x larger. The conclusion has provided a reliable basis for gas turbine's design and development.

Key words: heavy-duty gas turbine; combustor; pollution; experiment

重型燃气轮机是一种高效、清洁动力装置, 它广泛应用于发电、独立能源系统、机械驱动、船舶工程领域. 作为发电设备, 它具有效率高、污染小的优点, 可以代替煤电, 改造煤电. 随着环保要求的日益严格, 燃气轮机燃烧室主要围绕如何降低氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和未燃碳氢化合物(UHC)等燃烧产物进行^[1]. 污染控制主要有向燃烧室喷水、干式低 NO_x (dry low- NO_x , DLN) 或稀

相预混燃烧、选择性催化还原及催化燃烧等技术方式. 其中 DLN 燃烧技术虽费用较高, 但应用最为广泛, 取得效果也最为明显. 国外先进燃机已达到 NO_x 个位数排放^[1-2]. DLN 燃烧室基本原理是根据泽尔多维奇理论, 通过燃料-空气的均匀预混, 实现将燃烧温度控制在 $1670 \sim 1900 \text{ K}$ 的范围来控制 NO_x 生成. 摸清某重型燃气轮机各工况下污染物排放对该燃机的运行及后续开发具有重

收稿日期: 2008-09-09; 修订日期: 2008-11-25

基金项目: 国家 863 项目(2002AA503010/ZXD0705)

作者简介: 刘凯(1971-), 男, 辽宁沈阳人, 沈阳航空工业学院讲师, 博士生, 研究方向: 航空发动机、地面燃机燃油雾化、燃烧.

要意义. 本文针对该燃气轮机 DLN 燃烧室燃烧天然气时各工况污染物排放进行了试验研究.

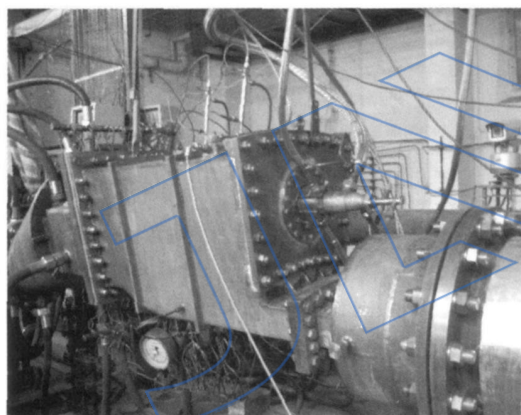
1 试验系统及试验件

1.1 试验系统

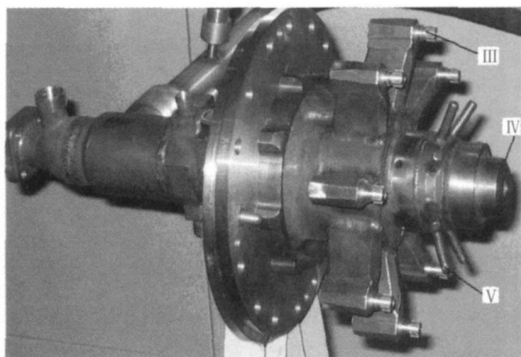
该试验在中国一航涡轮院高压 II 试验台完成. 试验台由空气系统、燃料系统、测控系统、加温系统、冷却水系统等组成. 其中最关键的测控系统可实现实时测量温度点数 <100 点, 压力点数 <80 点, 数字信号 <8 路. 可实现燃烧室燃烧效率、出口温度场、火焰筒壁温、排气污染等各项性能指标试验, 是国内功能最完善的试验装置^[3].

1.2 试验件

该燃机为环管型 DLN 燃烧室, 周向 20 个火焰筒. 试验采用单管燃烧试验, 即装配一个火焰筒, 一套燃料喷嘴组, 截取全尺寸环形燃烧室 1/20 组成 18° 扇形试验段, 并加工前后转接段. 试验件连接及所装燃料喷嘴组示于图 1.



(a) 燃烧室扇形试验段



(b) 火焰筒及燃料喷嘴组

图 1 试验件

Fig. 1 Experimental parts

DLN 燃烧室的关键技术是实现燃料的均匀预混. 该燃料喷嘴组采用径向分级供给方式, 分为外环、中环和中心, 分别对应环形区、主燃区和值

班燃料. 通过调整各路供给量及供给方式既适应不同工况调节, 又实现不同燃烧方式切换, 提高燃烧效率, 降低排放污染物质量分数. 火焰筒头部结构如图 2 所示.

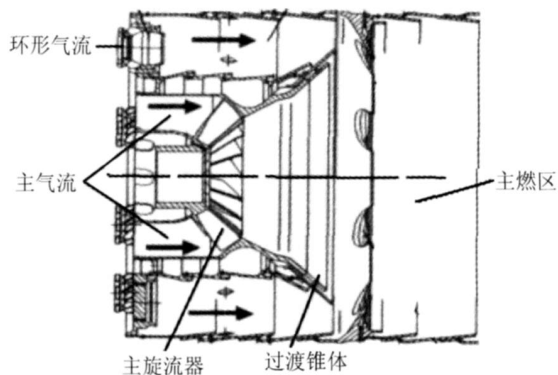


图 2 火焰筒头部结构

Fig. 2 Structure of the head of chamber

燃气轮机设计负荷变化规律为: 相对功率 0.3 和 0.7 进行燃料切换. 相对功率 0~0.3 时, 仅环形区工作; 然后环形区燃料降至零功率水平, 主燃区和值班燃料投入, 此后各路燃料量随功率线性升高; 至 0.7 时, 环形区燃料再降, 主燃区和值班燃料同时跃升, 然后随功率线性升高直至满负荷. 环形区和主燃区分别按扩散燃烧和预混燃烧进行.

3 试验及结果分析

燃烧室全尺寸试验是一项复杂的工作, 周期长, 耗费大. 本试验采用节流模化, 在保证进口马赫数不变的前提下, 将进气压力由 1.48 MPa 降为 0.545 MPa, 相应空气流量由 15.52 kg/s 降为 5.6~7.2 kg/s, 以满足设备能力. 空气流量由孔板流量计测量, 天然气流量由 V-cone 锥形流量计及涡街流量计测量, 误差小于 1%, 压力进口由 3 支 3 点压力耙, 出口 8 支 6 点压力耙取样接传感器, 误差小于 2%, 温度进口 1 支单点 K 型电偶, 出口 10 支 11 点 B 型电偶, 误差小于 2°C, 燃气成分由出口 6 支 8 点取样耙取样, 混合后接燃气分析仪测量效率及污染物. 试验中燃烧效率由燃气分析利用全成分法计算.

3.1 不同功率燃烧效率及污染物质量分数

试验中录取了相对功率分别为 0, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.09, 1.2 时的燃烧效率和污染物质量分数, 如图 3 所示.

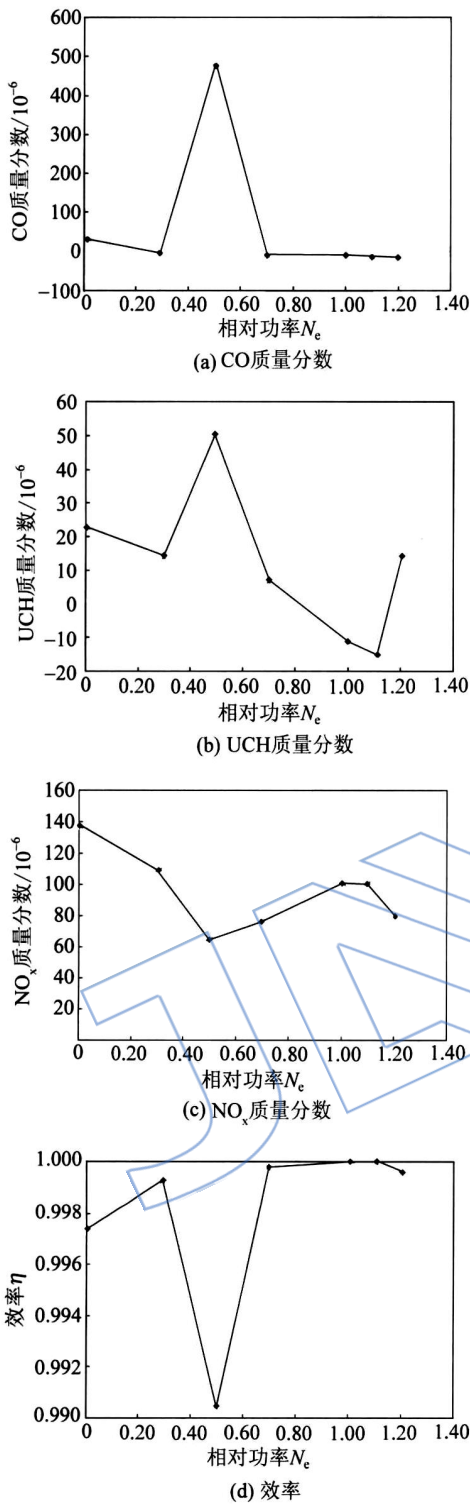


图 3 效率及污染物质量分数

Fig. 3 Efficiency and the content of pollution

由图 3(a)~(b) 可以看出,该燃机大部分状态 UHC,CO 质量分数均很低,很多状态已检测不到(其中负值表示燃气成分检测仪校准曲线截距),整体看燃烧充分,对应效率均超过 99 %,完全满足设计要求.只有相对功率 $N_e = 0.5$ 时,UHC,CO 质量分数激增,效率较低,重复试验仍

得到相同结果,排除了试验误差.分析认为该状态的燃料-空气配比混合出现较大问题.如前所述, $N_e = 0.3$ 时进行燃料切换,环形区降为零功率,燃烧室温度较低,此时主燃区和值班燃料大量燃料投入,造成局部缺氧,燃烧温度较低,进而造成了 NO_x 质量分数低,而 UHC,CO 质量分数高,考虑到该状态不是常用状态,且火焰筒空气流量改变具有多方面的联动影响,没有进一步调节^[4].

由 NO_x 质量分数曲线可以看出,NO_x 随功率增加先降低,至 0.5 达到最低值后再增加,至 1.0 再次达到最大值,而后略有降低.但整个功率范围 NO_x 均严重超标.试验结果证明了燃烧理论中 CO,UHC 与 NO_x 相反的变化趋势,相对功率为 0.5 时,CO,UHC 达到最大值而 NO_x 达到最小值.分析认为,该燃机为增强燃烧稳定性,值班燃料比例设计过大,即参与扩散燃烧的燃料比例过大是导致 NO_x 超标的主要原因.该燃机各工况值班燃料比例约 14 %,额定工况占 11.59 %.这一比例远远超过国外先进燃机比例(GE 公司 DLN-1 型燃烧室值班燃烧比例仅 2 %,NO_x 排放实现 30~50 mg/N·m³)^[5].因此决定降低值班燃料比例考察 NO_x 排放.

3.2 调整值班燃料比例 NO_x 质量分数

试验中值班燃料比例由约 14 %降为约 4 %,将减少的燃料由主燃区预混通道补充,以保证总燃料量不变.试验录取了相对功率 0.5,0.7,1.0,1.09,1.2 时 NO_x 质量分数,试验结果见图 4.

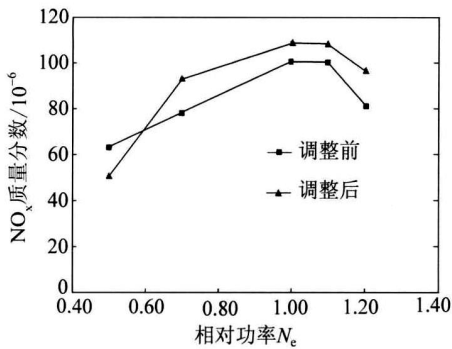


图 4 NO_x 质量分数曲线

Fig. 4 Curve of NO_x

由图 4 可知,降低值班燃料比例后,NO_x 变化趋势基本未变,但数值并未取得预期效果.相反相对功率大于 0.6 后,NO_x 反而增加,相对功率 1.0 时,NO_x 质量分数从 204 mg/N·m³ 升至 224 mg/N·m³,升幅近 10 %,这显然与前面分析不符.

将易产生 NO_x 的扩散燃烧燃料转至预混燃烧区反而使 NO_x 质量分数增加,这一试验结果说明,该燃机主燃区预混通道设计不够合理,燃料没有实现均匀预混。值班燃料比例较高时,主燃区头部缺氧状态,尽管是扩散燃烧, NO_x 质量分数不是很高,而降低值班燃料后,氧质量分数相对增加,易于 NO_x 生成;而转移到预混通道的燃料却因预混效果不好导致 NO_x 质量分数过高,因此有了降低值班燃料后 NO_x 增加的效果。这一结果再一次证明了对于预混燃烧,燃料均匀预混的重要性,它是实现低 NO_x 排放的必要条件^[6]。

对于该燃机要实现设计要求的 $50 \text{ mg/N} \cdot \text{m}^3$ NO_x 排放,还需要做很多改进工作。结构上应进一步改善火焰筒头部燃烧组织,增强燃料预混均匀性;燃烧方式上,大幅减小扩散燃烧燃料比例:该燃机满负荷时值班燃料与环形区燃料比例已达 53.7%,以此比例是难以实现低 NO_x 排放的。建议参考 GE 公司 DLN-1 型燃烧室,改为另外一种燃烧模式,即环形区在相对功率 0.4 时熄火后,再继续供应燃料,此时环形区实现预混通道功能,预混后在主燃区实现预混燃烧^[7]。这需要配合各区空气流量重新分配。这是一个复杂工作,也是一个高性能燃机研制中必须经历的过程。

4 结 论

本文应用高压试验台对某重型燃机燃烧室污染物排放进行了全面的试验,得到以下结论:

1) 各工况下火焰筒空气流量分配及燃料喷嘴燃料供应能够保证充分、稳定、高效燃烧,燃烧效率超过 99%;

2) 各工况下 CO 及 UHC 质量分数很低,但

NO_x 质量分数较高,超出设计指标,额定工况达到 $204 \text{ mg/N} \cdot \text{m}^3$;

3) 燃烧室扩散燃烧的值班燃料比例过大是 NO_x 质量分数超标的原因之一;主燃区燃料预混均匀性差是 NO_x 质量分数超标的另一重要原因。这两点是该重型燃机重点改进方向和目标。同时建议改用另一种燃烧方式以改善环形区燃烧。

参考文献:

- [1] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
ZHANG Baocheng. Experiment and testing technology of aero-engine [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 祁海鹰,李宗红. 关于 R0110 重型燃气轮机部件性能的理论分析与试验研究[R]. 北京:清华大学,2007.
QI Haiying, LI Zonghong. Theoretical analysis and experimental study of performance of R0110 heavy-duty gas turbine [R]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [3] Lefebvre A H. Gas turbine combustion [M]. U. S. A.: Taylor and Francis Press, 1998.
- [4] Khanna V. Near-zero NO_x gas turbine combustion [C]// Proceedings of the 2nd Distributed Energy PeerReview. Washington D C, U. S. A.: Solar Turbine Inc, 2003.
- [5] Eggle R L G, Brown C T. Comparison of numeril and experimental results of a premixed DLE gas turbine combustor [R]. ASME Paper 2001-GT-65, 2001.
- [6] Joshi C T, Epstein M J, Durlak S, et al. Development of a fuel-air premixer for aero-derivative dry low emission combustors [R]. ASME Paper 94-GT-253, 1994.
- [7] Frazier T R. Fuel/air mixing and NO_x formation in a lean premixed gas turbine combustor [D]. U. S. A.: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.