

燃气轮机燃烧室故障分析及试验研究

李名家¹, 钱程², 何万国³, 林枫¹

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036 2. 中海油能源发展股份有限公司 湛江采油服务文昌分公司, 广东 湛江 524057 3. 海军驻第七〇三研究所 军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 按等容积流率的燃烧室模化试验相似准则, 对某型燃气轮机燃烧室火焰筒联焰管附近主燃孔出现裂纹的故障原因进行了试验研究, 验证了火焰筒局部温度过高导致的热应力是故障发生的根本原因。在此基础上, 对燃烧室火焰筒和喷嘴进行了结构改型设计, 并进行了原型与改型喷嘴和改型火焰筒的燃烧室模化试验。试验结果表明, 火焰筒和喷嘴的改型设计可减小火焰筒壁面温升系数及其温度梯度, 改善燃烧室出口温度分布及其熄火特性, 其中火焰筒最高壁温温升系数可减小 53%, 出口温度分布系数由 0.178 降至 0.154 熄火油气比由 0.003 降至 0.001, 而燃烧室出口径向温度分布特性和设计启动状态下的点火特性基本不变。

关 键 词: 燃气轮机; 燃烧室; 故障分析

中图分类号: TK473.2 文献标识码: A

引 言

燃烧室是燃气轮机三大部件之一, 被喻为燃气轮机的“心脏”, 燃气轮机工作的可靠性在很大程度上取决于燃烧室工作的可靠性^[1~3]。火焰筒是燃烧室的核心部件, 要在高温、剧烈振动和严重热冲击等恶劣条件下工作, 承受着交互作用的热应力、蠕变应力和疲劳应力, 因此故障率较高^[2~3]。据统计, 发动机故障中 63% 是火焰筒故障^[3]。可见, 提高燃烧室火焰筒可靠性是实现发动机可靠性增长的重要课题。

燃烧室的研制与发展始终伴随着不断、反复而又大量的试验, 由于试验条件 (特别是气源条件) 的限制, 同时也为了节约试验成本, 缩短试验周期, 在燃烧室部件试验中, 较少直接进行全尺寸、设计参数下试验, 通常只根据具体试验目的, 遵循某种相似准则进行模化试验^[3~7]。目前, 我国基本上都按等容积流率的相似准则进行燃烧室模化试验^[7~8]。

基于等容积流率的相似准则, 通过进行原型和

改型燃烧室模化试验研究, 查找了原型燃烧室出现故障的原因, 探讨了火焰筒及喷嘴结构改进设计对燃烧室性能的影响, 为燃烧室的可靠性增长提供了依据。

1 研究对象

本研究对象为某型燃气轮机逆流环管型燃烧室, 该燃烧室以 -10 号轻柴油为燃料, 采用双油路双喷口机械雾化离心式喷嘴和凸肩式二次膨胀结构气膜冷却火焰筒。火焰筒内、外壁面涂有高温耐热瓷漆。燃烧室由 16 个火焰筒组成, 火焰筒筒体上周向均匀布有 10 个主燃孔, 在 3 号、4 号主燃孔和 8 号、9 号主燃孔之间的前方布置有联焰管。

在燃气轮机耐久性长试考核试验中, 定期对燃烧室的检查, 发现在火焰筒主燃孔边, 特别是联焰管附近的主燃孔边, 出现沿排气方向发展的裂纹, 如图 1 所示。此外, 在火焰筒混合器外壁出现了瓷漆脱落现象, 如图 2 所示。图 3 是燃烧室 16 个火焰筒 10 个主燃孔出现裂纹的统计结果。



图 1 主燃孔裂纹放大图

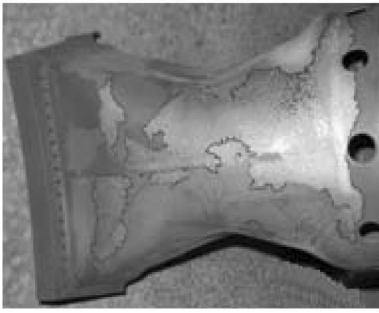


图 2 瓷漆脱落示意图

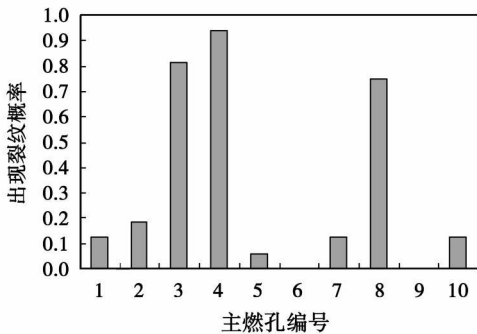


图 3 火焰筒主燃孔出现裂纹统计

2 试验装置及方案

2.1 试验系统

试验在北京航空航天大学热动力工程研究所高温高压燃烧试验台上进行。试验系统如图 4 所示, 主要由空气系统、加热系统、燃油系统、启动系统、冷却系统、吹扫系统以及数据采集系统等组成。试验时, 打开中压暂充气源并启动加热燃烧室供油系统, 启动加热燃烧室。同时打开高压暂充气源和冷却水路, 启动试验燃烧室点火系统, 点火成功后, 启动试验燃烧室主供油系统。调节各流路的气量和油量, 直至经换热器加热后的试验燃烧室进口空气达到设定的压力、温度和流量要求值。待试验进口参数稳定后, 进行相关量的采集。燃烧室试验台架如图 5 所示。

采集系统包括对空气、燃油和燃气流量、压力、温度以及燃烧室火焰筒壁温的测量。其中火焰筒壁温测量采用 26 支 K 型热电偶, 如图 6 所示。燃烧室出口温度测量采用五排四点梳状 S 型气冷热电偶, 如图 7 所示。

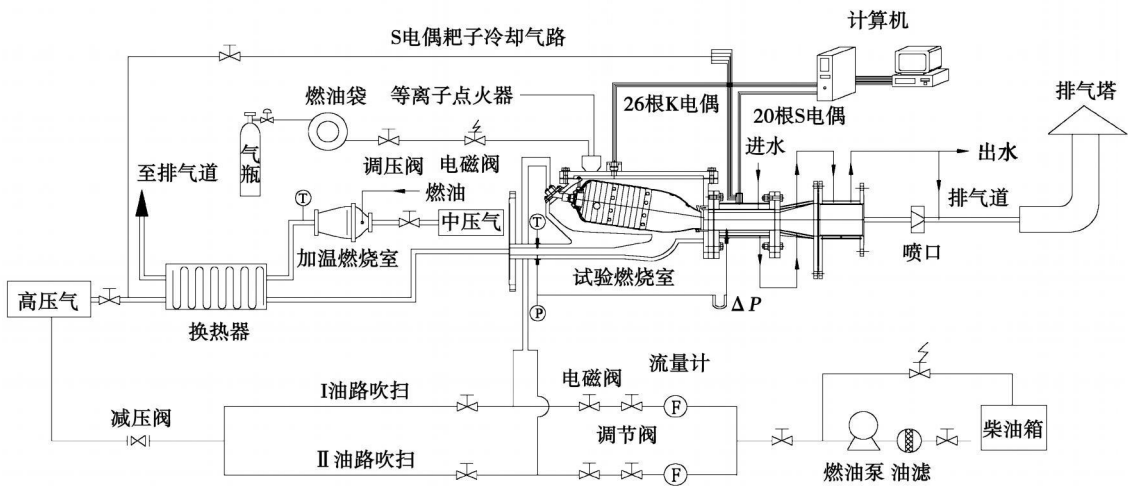


图 4 燃烧室试验系统示意图

2.2 试验参数及参试设备

选取燃烧室 1/16 即单管燃烧室作为试验对象。试验遵循等容积流率的模化准则, 保持火焰筒外形几何尺寸不变, 将燃烧室进口空气压力降至 0.60 MPa, 同时保持燃烧室进口空气温度、油气比、喷嘴压降以及喷雾锥角不变。单管燃烧室试验参数如表 1 所示。

表 1 单管燃烧室试验参数

参数	数值
进口空气流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	1.20
进口空气温度 / $^{\circ}\text{C}$	497
进口空气压力 / MPa	0.60
燃油流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.030
雾化锥角 / $^{\circ}$	75

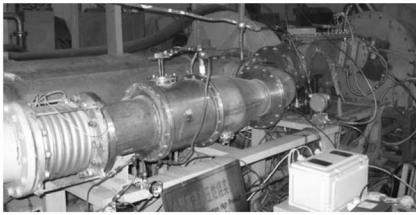


图 5 燃烧室试验台架



图 6 敷设有热电偶的火焰筒



图 7 燃烧室出口梳状热电偶

在表 1 试验参数下,共进行了原型喷嘴与原型火焰筒、原型喷嘴与改型火焰筒、改型喷嘴与改型火焰筒的 3 套燃烧室试验,3 套试验燃烧室中喷嘴与火焰筒的结构差异如表 2 所示。

表 2 3套单管试验燃烧室

试验燃烧室	
1号	原型喷嘴 (双喷口) 原型火焰筒(主燃孔后相邻 5 个气膜冷却孔孔径 1.50 mm;其余孔径 1.20 mm 共 150 个。)
2号	原型喷嘴 改型火焰筒
3号	改型喷嘴 (单喷口) 改型火焰筒(主燃孔后相邻一圈气膜冷却孔孔径均为 2.0 mm 共 100 个。)

3 试验结果及分析

3.1 有关参数定义

为便于进行 3 套试验燃烧室火焰筒壁温比较分析,采用式 (1)对火焰筒壁温进行无量纲化处理,即用壁面温升系数 Δ_{wi} 来判断火焰筒壁面高温点:

$$\Delta_{wi} = \frac{T_{wi} - T_{3ave}}{T_{4ave} - T_{3ave}} \quad (1)$$

式中: T_{wi} —火焰筒壁面测点温度, K; T_{3ave} —燃烧室进口平均温度, K; T_{4ave} —燃烧室出口平均温度, K

燃烧室出口温度分布通常用出口温度分布系数 θ_i 和出口径向温度分布系数 θ_r 来衡量,其定义为:

$$\theta_i = \frac{T_{4max} - T_{4ave}}{T_{4ave} - T_{3ave}} \quad (2)$$

$$\theta_r = \frac{T_{4ave} - T_{4ave}}{T_{4ave} - T_{3ave}} \quad (3)$$

式中: T_{4max} —燃烧室出口最高温度, K; T_{4ave} —燃烧室出口径向温度分布沿周向平均值中的最大值, K

3.2 试验结果及分析

图 8~图 10 是 3 套试验燃烧室火焰筒壁面 26 支热电偶测点温升系数分布图,其中图 8 中第 5 支、图 9 中第 20 支和图 10 中第 8 支热电偶失效。

从图 8 可以看出,第 7 支~第 13 支和第 15 支~第 18 支热电偶测点温升系数较高,该测点位于 3 号、4 号主燃孔和 8 号、9 号主燃孔正下方。此外,处于火焰筒混合器上下侧面的第 23 支~第 26 支热电偶测点温升系数也偏高。结合发动机长试考核试验中出现的燃烧室故障,可以看出,火焰筒局部温度过高导致的热应力是故障发生的根本原因。

为此,在 2 号试验燃烧室中,加强了火焰筒主燃孔后相邻一圈气膜冷却。从图 9 可以看出,气膜冷却的加强并未改变火焰筒壁面高温区分布,但改善了火焰筒筒体壁面温度梯度,有利于减小火焰筒局部温度梯度过大产生的热应力。

3 号试验燃烧室是在 2 号试验燃烧室基础上,将喷嘴由双油路双喷口结构改型为双油路单喷口结构。由图 10 可知,同前两套试验结果相比,火焰筒壁面高温区位置基本未变,但最高壁温温升系数较前两套试验分别减小 5.3% 和 3.6%,同时火焰筒筒体壁面温度梯度较 1 号试验燃烧室也得到了改善。

从 3 套燃烧室试验结果可以看出,火焰筒壁面高温区均出现在联焰管附近主燃孔位置,以及混合器上下侧面,这同耐久性试验中燃烧室故障发生率较高的部位一致。火焰筒和喷嘴的改型设计有利于

减小火焰筒壁面温升系数, 改善壁面温度梯度。

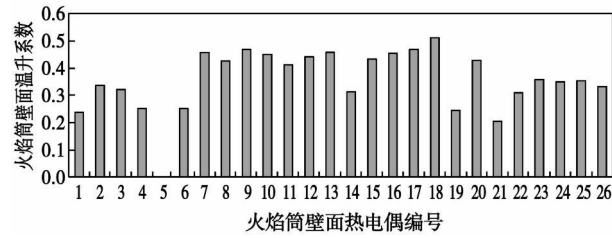


图 8 1 号试验燃烧室火焰筒壁面测点温升系数分布

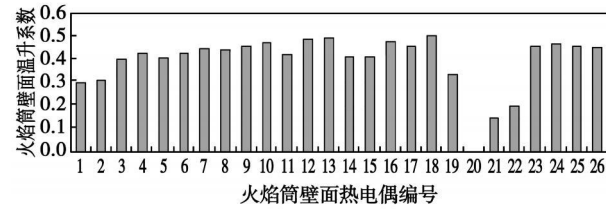


图 9 2 号试验燃烧室火焰筒壁面测点温升系数分布

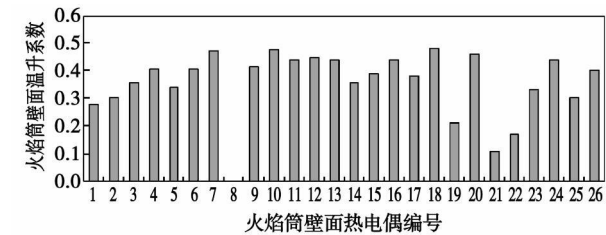


图 10 3 号试验燃烧室火焰筒壁面测点温升系数分布

从表 3 可以看出, 3 套试验燃烧室出口径向温度分布系数 θ_r 基本相当, 而 2 号和 3 号试验燃烧室的出口温度分布系数 θ_t 优于 1 号试验燃烧室, 且满足该系数不大于 0.17 的设计要求, 这表明: 改型设计后的喷嘴与火焰筒有利于改善燃烧室出口温度分布, 改善涡轮叶片的工作环境。

表 3 燃烧室出口温度分布

	1 号	2 号	3 号
θ_t	0.178	0.159	0.154
θ_r	0.074	0.076	0.077

3 套试验燃烧室设计状态下的点火和熄火性能试验结果如表 4 所示。可以看出, 3 套试验燃烧室在设计启动状态 (油气比 0.027) 下均能成功点火, 其中 3 号试验燃烧室的熄火性能较好。可见, 将燃烧室喷嘴由双油路双喷口改为双油路单喷口后, 不仅具有燃烧室先前设计启动状态下的点火性能, 而

且可显著改善燃烧室的熄火特性。

表 4 燃烧室点火和熄火性能

	1 号	2 号	3 号
点火油气比	0.028	0.023	0.024
熄火油气比	0.003	0.005	0.001

4 结 论

(1) 1 号试验燃烧室火焰筒壁面高温区出现在两侧联焰管附近主燃孔下游区域以及火焰筒混合器上下侧面, 这同发动机长试考核试验中出现的燃烧室故障发生率较高的部位基本一致, 验证了火焰筒壁面局部高温区是导致故障发生的根本原因。

(2) 喷嘴与火焰筒的改型设计有利于降低火焰筒壁面最高壁温温升系数, 适当改善火焰筒筒体壁面温度梯度, 但未能从根本上有效改善火焰筒壁面高温区, 这为燃烧室的可靠性增长, 进行下一步改型设计与试验工作提供了依据。

(3) 改型喷嘴和改型火焰筒均有利于改善燃烧室出口温度分布, 从而改善涡轮叶片工作环境, 两者对燃烧室出口径向温度分布影响很小。

(4) 双油路单喷口喷嘴不仅具有先前燃烧室双油路双喷口喷嘴设计启动状态下的点火性能, 而且可显著改善燃烧室的熄火特性。

参考文献:

- [1] TONY GAMPALIO. Gas turbine handbook Principles and Practices [M]. Philadelphia: Taylor and Francis, 2005.
- [2] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册: 第 9 册—主燃烧室 [M]. 北京: 中国航空工业出版社, 2000.
- [3] 侯晓春, 季鹤鸣. 高性能航空燃气轮机燃烧技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 焦树建. 燃气轮机燃烧室 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [5] LEFEBVRE A H. Gas turbine combustion [M]. Philadelphia: Taylor and Francis, 1998.
- [6] 张宝城. 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.
- [7] 焦树建. 原型燃烧室的低压模拟试验 [J]. 燃气轮机技术, 1995, 8(4): 36-43.
- [8] 莫利 A W, 琼法布里. 现代航空发动机试验 [M]. 姚文江, 刘亚真, 译. 北京: 国防工业出版社, 1976.

(编辑 伟)

火电厂综合评估的模糊评价法 = A Fuzzy Evaluation Method for Comprehensively Evaluating a Thermal Power Plant [刊, 汉] / JIN Tao, FU Zhong-guang, MAN Ruo-yan, et al (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 473 ~ 477

Proposed was a new method for comprehensively evaluating a thermal power plant a fuzzy comprehensive evaluation method to avoid the demerit of a complex calculation and poor objectivity based on empirical formulae when evaluating the overall operation condition of the thermal power plant. In the meantime, an overall performance evaluation index system for thermal power plants was established. With a 600 MW unit serving as a main object of study and according to relevant data of the units of various power generation groups operating in 2008, set up was a fuzzy overall evaluation and judgment matrix by using a subordinate function. In addition, importance degree fuzzy sets based on a directly given method and an expert appraisal method (Delphi method) were established respectively. A two-level and two-grade index fuzzy model for comprehensively evaluating the thermal power plant was given along with a contrast analysis. The research results show that the fuzzy evaluation and judgment method can be used to evaluate the comprehensive state of the units in a thermal power plant, examine the completion condition of various indexes of the units, compare various units under the same characteristics and can be also used for competitions among different units. Key words: thermal power plant, overall evaluation, fuzzy overall evaluation, modeling.

燃气轮机燃烧室故障分析及试验研究 = Fault Analysis and Experimental Study of a Gas Turbine Combustor [刊, 汉] / LIMing-jia, LIN Feng (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), QIAN Cheng (Zhanjiang Oil Production Service Wenchang Sub-company, CNOOC Energy Source Development Stock Co., Ltd., Zhanjiang, China, Post Code: 524057), HE Wan-guo (Naval Representative Office Resident at Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 478 ~ 481

According to the similarity criterion for the modeling test of a combustor at an isometric flow rate, experimentally studied was the cause for a fault that cracks emerge in the main combustion holes near the flame tube interconnector of the combustor of a gas turbine and verified was the fact that the thermal stress resulting from an excessively high local temperature on the flame tube is the root cause of the fault. On this basis, a structurally modified design was conducted of the flame tube and nozzles of the combustor. A modeling test of the prototype combustor and modified nozzle as well as the reconstructed flame tube was also performed. The test results show that the modified design of the flame tube and nozzles can reduce the wall surface temperature rise coefficient and its temperature gradient, improve the outlet temperature distribution and fire extinction characteristics. Among others, the maximum wall temperature rise factor can be reduced by 5.3%, its outlet temperature distribution factor from 0.178 to 0.154 and the fire extinguishment oil/gas ratio from 0.003 to 0.001 while the outlet radial temperature distribution characteristics of the combustor and its ignition characteristics in the design startup state remain basically unchanged. Key words: gas turbine, combustor, fault analysis.