

微型燃气轮机燃油 燃烧室燃烧特性的模化试验研究

汪凤山, 孔文俊, 王宝瑞, 艾育华

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

摘要: 基于模化试验方法, 对设计的 100 kW 级微型燃气轮机燃油燃烧室在额定工况下的性能以及在保持微型燃气轮机燃烧室出口排气温度不变的情况下, 改变进口空气温度对燃烧室燃烧特性的影响进行了研究。结果表明, 燃烧室燃烧效率达到 99% 以上, 总压恢复系数达到 94.5%, 出口温度最大不均匀度低于 20%, NO_x 排放指标低于 9 g/kWh。火焰筒壁面温度分布均匀。此外, 随着燃烧室进口温度的升高, 燃烧效率增大, 出口温度最大不均匀度减少, CO 和 UHC 的排放指标明显降低, 但总压恢复系数有所降低, NO_x 排放指标有所升高。

关键词: 微型燃气轮机; 燃烧室; 进口温度; 燃烧特性; 污染物排放

中图分类号: TK473 文献标识码: A

引言

燃烧室是微型燃气轮机的核心部件之一。近年来, 随着微型燃气轮机技术的发展, 国内外对其进行了大量的研究^[1-2], 低排放技术 (尤其是低 NO_x) 是微型燃气轮机燃烧室的重要方向之一^[3-4]。微型燃气轮机通常采用回热循环, 利用透平出口排气预热燃烧室进口空气, 工况的改变以及回热器性能的改变均会影响到燃烧室的进口空气温度, 从而改变燃烧室的燃烧特性。本研究概述了 100 kW 级微型燃气轮机燃油燃烧室的设计方法, 给出了额定工况下的性能试验结果, 同时, 研究了在保持燃烧室排气平均温度不变的条件下, 进口温度的改变对燃烧室燃烧特性的影响。

1 燃烧室设计概述

根据总体要求, 额定工况下, 所设计的燃烧室进

口温度为 600 °C, 进口总压为 375 kPa; 燃烧室出口平均温度为 900 °C。按照低 NO_x 设计原则, 总体过量空气系数为 4.95, 总压恢复系数、燃烧效率以及出口温度最大不均匀度的设计目标分别为不低于 95%、不低于 99% 和不高于 35%; 火焰筒壁面最高温度不高于 850 °C。燃烧室采用单管结构, 以轻柴油作为燃料, 具体结构如图 1 所示。燃油雾化喷嘴采用混合式气动雾化喷嘴, 具体结构与性能参见文献 [5~6], 该喷嘴可在较大流量范围内保持良好的雾化性能。

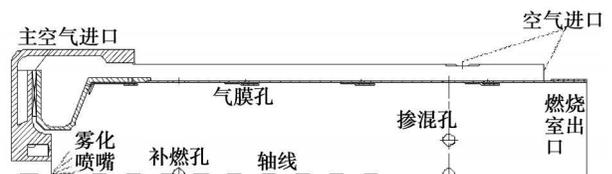


图 1 燃烧室结构示意图

根据计算得到燃烧室进口空气流量为 0.998 kg/s; 燃烧室热容强度为 118 W/(m³·Pa); 燃烧室总压恢复系数为 95%; 燃烧室外套内径为 192 mm; 火焰筒外径为 165 mm; 火焰筒长度为 473 mm。

2 试验装置与方法

2.1 试验装置与设备

图 2 为试验测量系统示意图。试验系统气源由罗茨鼓风机提供, 进口空气经稳压罐后被电加热器加热到合适温度后进入燃烧室, 燃油由油泵加压, 并通过调节阀得到所需的流量后, 由气动雾化喷嘴进行燃油雾化。燃烧室出口排气经水冷套管冷却后排入大气。

收稿日期: 2009-01-17 修订日期: 2009-06-01

基金项目: 国家 863 能源领域专项基金资助项目 (2002AA503020 2004AA503020 2007AA050501)

作者简介: 汪凤山 (1981-) 男, 河南潢川人, 中国科学院工程热物理研究所博士研究生。

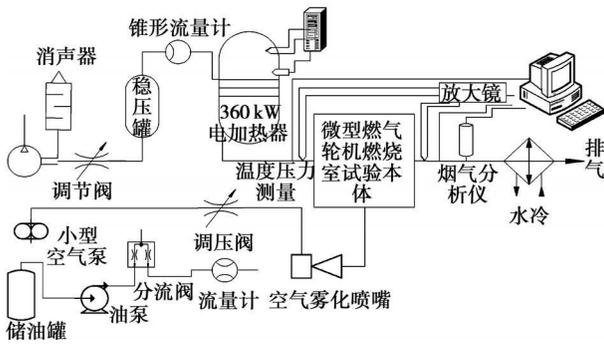


图 2 试验装置系统图

试验系统的压力和温度测量通过传感器将所有压力测量模拟信号转换成数字信号后接入计算机数据采集系统。其中, 燃烧室出口压力和温度分布分别由自制的测量耙子得到, 在同一截面上沿径向与轴向均匀布置 12 个传感器, 试验系统中进出口温度均由 K 分度铠装热电偶测量得到。燃烧室火焰筒壁面温度采用示温漆显示法测量。燃烧室出口烟气成分由德国 TESIO 公司生产的 Testo 350 烟气分析仪进行分析得到。

2.2 模化试验方法

燃烧室试验在常压下进行, 参考文献 [7], 采用等容积流率模化试验方法对燃烧室性能进行研究。在试验过程中, 采用全尺寸燃烧室作为试验件, 燃料(轻质柴油)和氧化剂(空气)均与设计工质相同, 并保证燃烧室进出口温度和容积流量与设计值相同, 得到燃烧室试验工况参数如表 1 所示。

表 1 燃烧室模化试验参数

	模化试验	额定工况
燃烧室进口总压 P_3^*/kPa	110	375
空气流量 $m_{a, \text{in}}/kg \cdot s^{-1}$	0.293	0.998
燃料流量 $m_{\text{fuel}}/kg \cdot h^{-1}$	9.68	33
进口总温 $T_3^*/^{\circ}C$	600	600
出口总温 $T_4^*/^{\circ}C$	900	900
喷嘴雾粒索泰尔平均直径 $SMD/\mu m$	35	33

燃烧效率采用燃气分析方法, 根据燃烧室出口燃烧产物中 CO 以及 UHC 的排放指标得到^[8], 计算公式参见文献 [9]; 燃烧室总压恢复系数和燃烧室出口温度最大不均匀度根据文献 [10] 中公式计算得到。

3 结果与讨论

3.1 燃烧室额定工况试验

由试验得到: 燃烧室在额定工况下燃烧效率达到 99.5%, 总压恢复系数为 94.5%, NO_x 排放指标为 8.21 g/kg, CO 排放指标为 1.6 g/kg, UHC 排放指标为 3.88 g/kg。燃烧室出口温度分布试验结果如图 3 所示, 燃烧室出口温度最大不均匀度 $\theta = 18.1\%$, 优于设计值。取火焰筒头部喷嘴出口处为轴向原点, 点火电嘴安装面为周向零点, 将火焰筒壁面沿周向取 4 个方向, 轴向取 10 个间距, 均匀分布, 得到火焰筒壁面温度分布如图 4 所示。从图中可以看出, 火焰筒壁面最高温度约为 840 °C, 比设计要求值稍低, 极值区域位于火焰筒补燃孔附近。火焰筒壁面温差约为 50 °C, 壁面温度分布较为均匀。

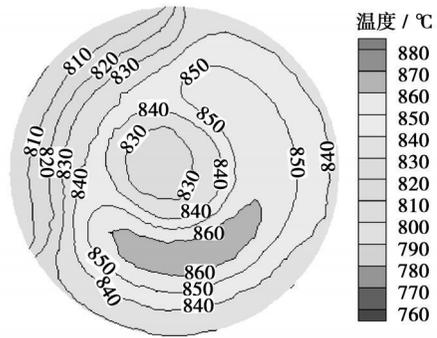


图 3 额定工况下燃烧室出口温度分布

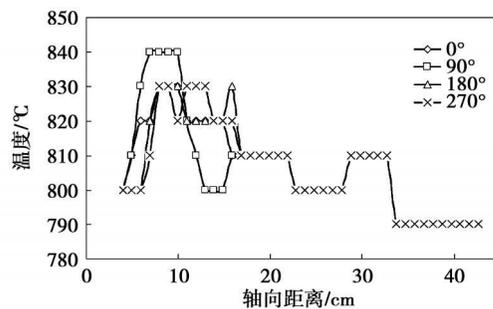


图 4 额定工况下火焰筒壁面温度分布

可见, 设计燃烧室除总压恢复系数稍低外, 燃烧效率、出口温度分布品质以及火焰筒壁面温度均达到了设计目标。总压恢复系数稍低是因为燃烧室采用逆向进气和径向涡流器, 导致气流在燃烧室套管内流阻增大所致。

3.2 改变进口空气温度对燃烧室性能的影响

保持燃烧室空气流量不变, 选取 5 个不同进口温度, 即 180、300、400、500 以及 600 °C。通过调整燃料流量, 燃烧室出口平均温度基本保持在 760 °C 左右, 并保持喷嘴平均雾化粒度即雾化角不变。得到燃烧室性能随进口温度变化结果如图 5~图 7 所

示。

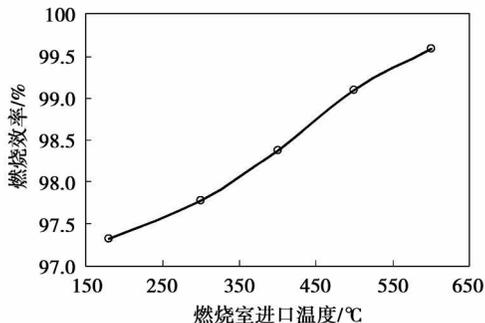


图 5 燃烧效率随燃烧室进口温度变化

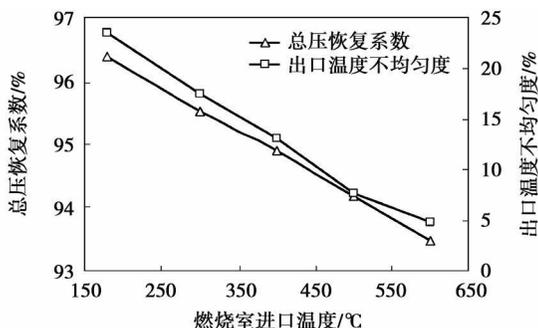


图 6 出口温度最大不均匀度和总压恢复系数随进口温度变化

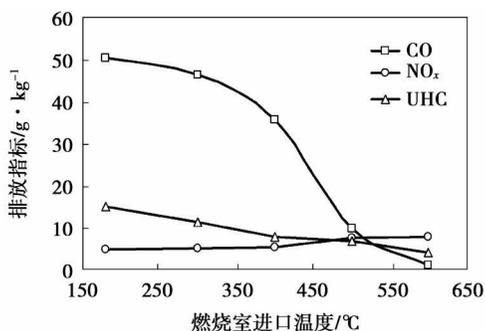


图 7 CO、NO_x和 UHC 排放指标随燃烧室进口温度变化

从图 5 可以看出,随着燃烧室进口温度的升高,燃烧效率不断升高;从图 6 可以看出,总压恢复系数和出口温度最大不均匀度随着燃烧室进口温度的升高逐渐降低;污染物排放特性如图 7 所示。随着燃烧室进口温度的提高,CO 和 UHC 的排放指标明显降低,而 NO_x 排放指标却有所升高。

燃烧室进口温度的升高,提高了燃烧室的参考速度,加快了燃油雾粒的蒸发以及与来流空气的混合过程,更有利于燃料在燃烧室内的燃尽,从而提高燃烧室的燃烧效率。同时由于燃烧室温度逐渐减

小,燃烧室出口温度分布品质也得以改善。但是由于燃烧室参考速度的增加,增加流动阻力,导致总压恢复系数降低。另外,燃气轮机燃烧室中生成 NO_x 的主要成分为 NO,其生成与火焰温度呈指数关系^[11],提高进口温度会导致燃烧室内火焰峰值温度的升高,从而导致 NO_x 生成量的增加。

对于常规的微型燃气轮机燃油燃烧室,提高进口温度虽然能改善部分性能指标,如燃烧效率、出口温度分布品质以及降低 CO 和 UHC 的排放指标等,但也会带来燃烧室总压恢复系数降低以及 NO_x 排放指标增加等不利影响。在本设计中,尽管对喷嘴进行了特殊处理,提高了燃油雾化质量,降低了污染物排放,但其本质还是基于常规的燃油燃烧室的设计思路,所以进一步降低 NO_x 排放的潜力是有限的。因此,未来的工作是研究极低 NO_x 排放的燃油燃烧室设计技术,如采用 LD 或者 LPP 设计技术等,进一步降低微型燃气轮机燃油燃烧室的污染物排放。

4 结 论

研究设计了一种高效低污染 100 kW 级微型燃气轮机燃油燃烧室,并对该燃烧室进行了模化试验研究。试验结果表明,该燃烧室燃烧效率可达到 99.5%;出口温度最大不均匀度为 18.1%;E_{CO}、E_{UHC} 和 E_{NO_x} 排放指标分别可以达到 1.6、3.88 和 8.21 g/kg。试验证明了该型燃烧室具有燃烧效率高、出口温度分布品质好、火焰筒壁面温度分布合理、污染物排放水平低等优良性能。

此外,还研究了进口温度的改变对燃烧室燃烧特性的影响。试验结果表明,随着燃烧室进口温度的升高,燃烧效率增大,出口温度最大不均匀度减少,温度分布更均匀,CO 和 UHC 的排放指标明显降低;但随着进口温度的增加,总压恢复系数有所降低,NO_x 排放有所升高。

致谢:高丽君、吴文东研究员,劳世奇工程师,张培元高级工程师参加了试验工作,特此感谢。

参考文献:

[1] 翁一武,苏民,翁史烈.先进微型燃气轮机的特点与应用前景[J].热能动力工程,2003,18(2):111-116
 [2] CLAIRE SOARES. Microturbines applications for distributed energy systems[M]. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007
 [3] FURUHATA T, AMANO S, YOTORIYAMA K, et al. Develop-

- ment of can type low NO_x combustor for micro gas turbine (fundamental characteristics in a primary combustion zone with upward swirl) [J]. Fuel 2007, 86 (15): 2463—2474
- [4] LEDIKE Q, SCHULZ A. Development of a new lean burning combustor with fuel film evaporation for a micro gas turbine [J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2003, 27 (4): 363—369
- [5] 孔文俊, 汪凤山, 王宝瑞, 等. 一种微型燃气轮机燃烧室喷嘴 [P]. 中国: 200610165542, 2008
- [6] 汪凤山, 孔文俊, 王宝瑞, 等. 进口温度对微燃机燃烧室燃烧特性的影响分析 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28 (2): 331—334
- [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] 刘高恩, 王华芳, 吕 品, 等. 飞机发动机排气污染物的测量 [J]. 航空动力学报, 2003, 18 (3): 348—352
- [9] SUZUKI Y, SAITO H T. Combustion test results of an uncooled combustor with ceramic matrix composite liner [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 2003, 125 (1): 28—33
- [10] 焦树建. 燃气轮机燃烧室 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [11] MILLER J A, BOWMAN C T. Mechanism and modeling of Nitrogen Chemistry in combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science 1989, 15 (4): 287—338

(本文责任编辑 何静芳)

新技术、新设计

水力蒸汽轮机在供暖锅炉房内的热力试验

《Теплоэнергетика》2009年4月号提出了利用网路水的低位热量来生产电能的设想, 实现这个设想能减少从区域电网购买电力的费用, 并保证锅炉房的独立性。

水力蒸汽轮机由具有6个喷嘴的工作轮组成。工质是从热水锅炉后面抽取的锅炉房网路水, 水温为90~120℃。工质水沿进水管供到工作轮的中心, 然后沿6个直径为20 mm的槽流到布置在工作轮周边的工作喷嘴。

阐述了功率为10 kW的反冲式水力蒸汽轮机和安装在供暖锅炉房的试验台的结构, 提供了这种水力蒸汽轮机试验的结果; 规划了水力蒸汽轮机改进的途径, 列出了功率为300 kW的水力蒸汽轮机的设计指标。

水力蒸汽轮机在供暖锅炉房内的试验证明了它的工作能力、可靠性和运行简单。在能够有效利用供暖系统内废水热量的条件下, 配置这种水力蒸汽轮机是合理的。

考虑到有关工作喷嘴效果以及液相与汽相速度差的试验数据, 制定的计算方法能够精确地确定水力蒸汽轮机在额定工况和变工况时的运行特性。

下面列出功率为300 kW的水力蒸汽轮机的技术特性:

水温: 工作水 120℃, 冷却水 50℃;

压力: 工作水 300 kPa, 冷凝器内 20 kPa;

流量: 工作水 48.5 kg/s, 冷却的网路水 242.2 kg/s;

转子的转速: 3 000 r/min;

工作轮直径 (按喷嘴中心线): 485 mm;

装置的质量 (不包括发电机): 1 460 kg

(吉桂明 摘译)

IT Θ -65型—新研制的发电用燃气轮机 = Newly-developed IT Θ -65 Type Power-generation Gas Turbine 刊, 汉] / JIGuim ing WU Qiong WANG Chong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036), GAO Yuxiang (Harbin Electric Power Vocational Technical College, Harbin, China, Post Code 150030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(1). — 1 ~ 7

An overview was given of the development process and design philosophy of a newly-developed IT Θ -65 type power generation gas turbine, including the choice of the parameters for the thermodynamic system, design and features of the three major components: compressor, combustor and turbine models and test rig tests for the main components, possibility of their applications as well as further upgrading approaches. By making use of the currently available achievements and employing a plotting mode at a proportional range, a full scale simulation design was adopted for the compressor. According to DLN (dry low NO_x) or DLE (dry low emissions) theory and by meeting various conditions for achieving low emission combustion of the fuel, designed was a low emission annular combustor. Through a comparison of various versions, the four-stage turbine design was finalized. Apart from the rotating blades in stage No. 4, all the turbine blades were cooled. The IT Θ -65 type gas turbine is regarded as a medium power one meeting modern P class technical level and can be used for both simple cycle gas turbine power plants and gas turbine-based steam-gas combined ones, applicable for not only basic load operation but also semi-peak and peak load one.

Key words: gas turbine, power generation, thermodynamic system, compressor, combustion chamber, blade

微型燃气轮机燃油燃烧室燃烧特性的模化试验研究 = Experimental Study of the Modeling of the Combustion Characteristics of a Micro Gas Turbine Oil-fired Combustor 刊, 汉] / WANG Feng-shan, KONG Wen-jun, WANG Bao-ru, et al (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(1). — 8 ~ 11

On the basis of modeling test methods, a study was conducted of the performance of a 100 kW class micro gas turbine oil-fired combustor at the rated operating condition. Also the influence of the inlet air temperature change on the combustion characteristics of the combustor was studied under the condition of maintaining its outlet exhaust temperature unchanged. It has been found that the combustion efficiency of the combustor can reach more than 99%, and the total pressure recovery coefficient will amount to 94.5% with the maximal unevenness of the outlet temperature being less than 20% and NO_x emission index being below 9 g/kg. The burner liner wall surface temperature will assume a uniform distribution. In addition, with an increase of the inlet temperature of the combustor and enhancement of the combustion efficiency, the maximal outlet temperature non-uniformity will decrease and the emission indexes of CO and UHC (unburned hydrogen carbon), conspicuously drop. The total pressure recovery coefficient, however, will somewhat decrease and the NO_x emission index somehow increase.

Key words: micro gas turbine, combustor, inlet temperature, combustion characteristics, pollutant emissions

湍流燃烧模型在燃气轮机燃烧室模拟中的运用与对比 = Application and Contrast of Turbulent-flow Combustion Models for Simulating a Gas Turbine Combustor 刊, 汉] / ZHENG Hong-tao, MU Yong, LI Zhiming, et al (College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(1). — 12 ~ 16

By using commercial software Fluent, numerically simulated was the C₁₆H₃₀ non-premixed combustion flow field of a gas turbine combustor. At the rated operating condition of the combustor, a contrast numerical analysis was conducted of the above flow field by adopting the two-step reaction process and five-step one of a simple probability density function (PDF) model, eddy dissipation (ED) model and eddy dissipation concept (EDC) model respectively. In the meantime, the thermal and prompt NO_x emission performance of the combustor was also investigated. Through a comparison, it has been found that the temperature in the combustion zone resulting from an endothermic reaction