

微型分轴燃气轮机 HAT 循环性能的机理试验研究

蒲 强, 卫琛喻, 葛 冰, 臧树升

(上海交通大学 机械与动力工程学院 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 基于微型分轴燃气轮机, 通过加入饱和器, 构成了微型分轴燃气轮机 HAT 循环性能的试验装置, 并开展了 HAT 循环性能的机理性试验。试验结果表明, 空气加湿后对循环性能有明显影响, 循环比功及效率相对简单循环都有很大的提高, 当加湿量达到最大的 4.2% 时, 循环输出功率增加了 16%。根据试验条件进行的模拟计算结果与试验结果能很好地吻合。在此基础上, 对带有回热器的试验系统进行了模拟计算, 结果显示在不改变燃气初温的情况下, 由于回热器的加入使系统压力损失加大, 装置比功将减少 3%~10% 左右; 但同时耗油率下降 20%~45%, 效率增加了 30%~80%, 此时系统的性能得到了显著的提高。

关 键 词: 微型分轴燃气轮机试验台; HAT 循环; 燃气轮机性能计算

中图分类号: TK477 文献标识码: A
符号说明

τ —循环温比;
 D —湿空气含湿量 $g \cdot kg^{-1}$ (干空气);
 δ —回热器换热有效系数

引 言

HAT(Humid Air Turbine) 循环于 20 世纪 80 年代由 Mori 教授提出, 该循环以其效率高和成本低等优点引起广泛的重视^[1]。

目前, 对 HAT 循环装置的研究, 不仅只围绕大型燃气轮机展开对微、小型燃气轮机的该项研究渐引起行业的关注, 这些主要是因为 HAT 循环装置其独特的优势: (1) 充分利用燃气轮机循环中余热, 效率得到了提高; (2) 空气加湿后, 涡轮流量增大, 加之蒸汽具有做功能力大的特点, 循环比功得到了提高; (3) 空气加湿燃烧, NO_x 排放降低; (4) 由于回收余热的回热器换热面积远小于蒸汽余热锅炉中蒸发段的换热面积, 其成本较燃-蒸复合循环及回注

蒸汽循环有大幅降低; (5) HAT 循环可在不改变涡轮初温和压比下提高其比功及效率^[2~3]。

瑞典的 LUND 理工学院与皇家理工学院共同搭建了第一座 600 kW 的燃气轮机试验电站, 该电站选用一台 VT 600 Volvo 的单轴燃气轮机, 透平前温度为 1 000 °C, 压比为 8, 循环效率约为 35%。对饱和器、大湿度燃烧室的研究得到了许多宝贵的试验数据, 为建立中等规模循环电厂提供了试验依据^[4~5]。除此之外, 日本也建立了一个 AHAT(Advanced Humid Air Turbine) 试验电站, 设计输出功率为 3.6 MW, 效率为 42% (LHV), 并进行了包括水雾化冷却系统、燃烧室、饱和器以及水回收系统在内的一系列研究^[6~7]。

本研究依托于试验室中建立的微型分轴燃气轮机试验台, 对 HAT 循环进行试验改造, 得到了微型燃气轮机 HAT 循环的试验数据, 并与模拟计算结果进行比较, 验证了 HAT 循环的性能变化规律。

1 分轴燃气轮机 HAT 循环试验系统

图 1 为试验系统原理。经由压气机压缩后的空气, 进入饱和器, 同时在经济器中吸收排气低温余热的循环水自饱和器顶部喷下, 与空气充分混合, 混合而成的湿空气进入回热器吸收排气高温余热后进入燃烧室, 高温燃气经过高压涡轮、动力涡轮做功, 最终通过回热器及经济器后排入大气。

1.1 实验台简介

图 2 为分轴燃气轮机 HAT 循环系统试验台布置图, 主要由压气机、饱和器、燃烧室、高压涡轮、动力涡轮以及电涡流测功机组成。压气机为 1 级离心式压气机, 高压涡轮为 1 级向心式涡轮, 动力涡轮为

收稿日期: 2011-12-07; 修订日期: 2012-06-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划) 基金资助项目(2007CB210102)

作者简介: 蒲 强(1987-), 男, 四川绵阳人, 上海交通大学硕士研究生。

1 级轴流式涡轮 齿轮变速箱传动比为 4.667。电涡流测功机型号为 GW100, 额定吸收功率 100 kW。试验台的燃油系统使用由 WOODWARD 公司生产的 LQ3 燃油计量调节阀控制, 燃料为轻质柴油。该燃气轮机使用组合式启动方式中的空气启动系统, 由电动机驱动的气源压气机启动, 气源压气机为 JTY001 型离心式压气机, 压力 3.0 MPa, 供气流量 2.5 kg/s, 电动机为额定功率 400 kW 的三相异步电动机。

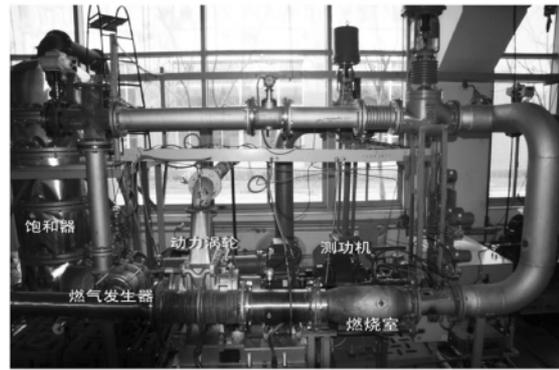


图 2 HAT 循环试验台
Fig. 2 HAT cycle test rig

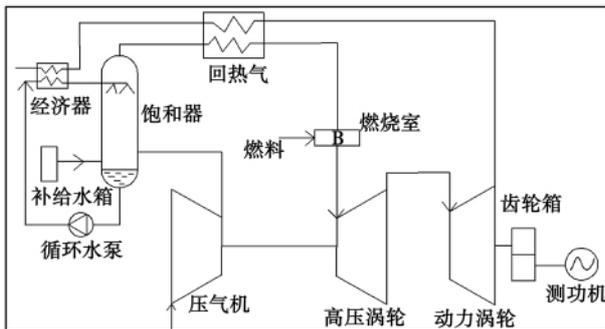


图 1 分轴燃气轮机 HAT 循环原理图
Fig. 1 Schematic drawing of the HAT cycle for a split-shaft gas turbine

1.2 测量及控制

本试验台采用远程控制, 所有信号的采集与反馈都通过 PLC 数据采集系统获得, 系统采样频率为 1Hz。压力信号经压力信号变送器转变为 4~20 mA 电流信号输送至 PLC 系统; 各部件进出口温度使用 K 型热电偶测量, 热电偶测量范围为 0~800℃, 测量精度为 ±0.4%, 热电偶使用补偿导线接温度变送器转化为标准信号。试验台除了采集试验信号外, 还使用了 3 个振动传感器, 分别监测气源压气机、压气机以及涡轮振动情况用于安全控制。

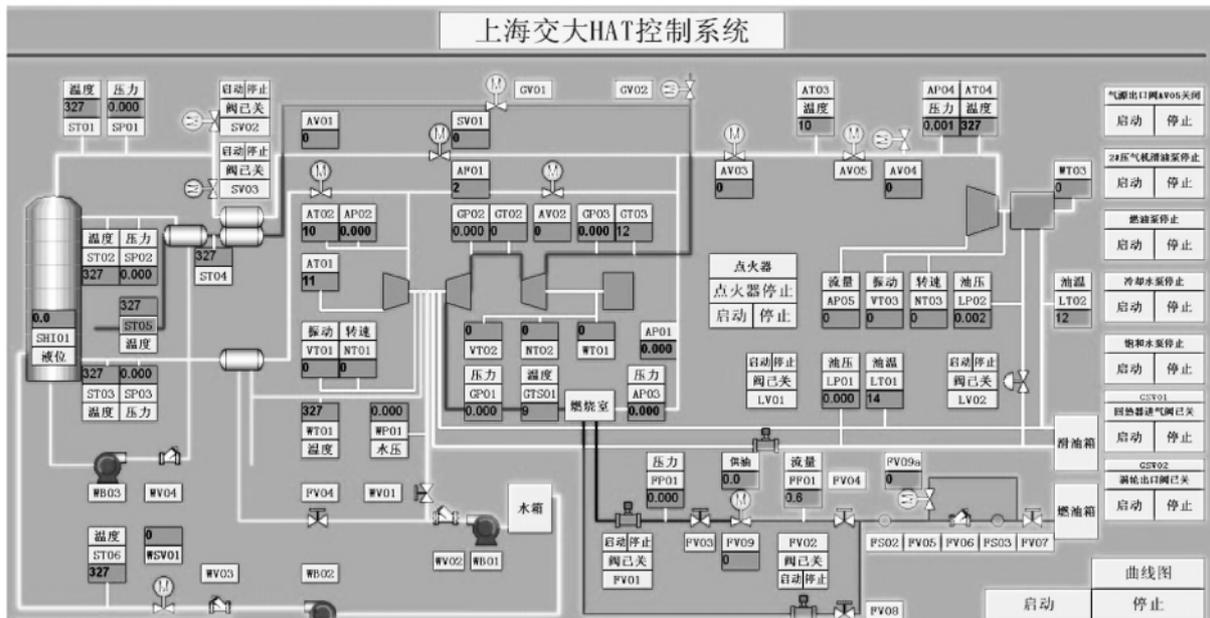


图 3 HAT 试验台控制系统
Fig. 3 HAT test rig control system

2 试验结果及分析

2.1 试验工况

试验共分为两个阶段,即加湿阶段和减湿阶段。第一阶段试验供油量基本保持在 47 kg/h,压气机转

速稳定在 672 r/s,喷入饱和器的水量由 0.8 逐步增加至 1.7 m³/h,即工况 1~工况 5;第二阶段试验供油量增至 57 kg/h,压气机转速升至 733 r/s,喷入饱和器的水量由 1.7 m³/h 逐步减至 0.6 m³/h,即工况 6~工况 10。试验工况参数如表 1 所示。

表 1 HAT 循环试验工况表

Tab.1 Table listing the test operating conditions of the HAT cycle

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9	工况 10
压气机压比	1.71	1.70	1.70	1.71	1.71	1.896	1.888	1.875	1.87	1.864
压气机转速/r·s ⁻¹	673	672	670	672	669	739	738	734	732	725
喷水量/m ³ ·h ⁻¹	0.86	1.05	1.19	1.41	1.72	1.46	1.17	1.05	0.86	0.58
液气比	0.25	0.31	0.35	0.41	0.51	0.38	0.30	0.27	0.22	0.15
燃油量/kg·h ⁻¹	47.4	47.23	46.93	46.78	46.64	57.35	56.94	56.61	56.48	55.67
燃气初温/°C	647	642	638	635	630	662	664	666	674	679

2.2 试验结果

整个实验过程及结果如图 4 所示。开始加湿时燃气初温由 690 °C 下降至 650 °C 左右,同时压气机压比由 1.67 升至 1.71,压气机功率有所增大,高压涡轮的功率也增大,显示了加湿对燃气轮机性能的显著影响。在试验的加湿阶段,当保持燃油流量基本不变时,随着喷入饱和器水量的逐渐增大,压气机状态基本保持不变,燃烧室出口温度呈现减小的趋势,测功机测得的动力涡轮功率逐渐增大,当加湿量达到最大的 4.2% 时,动力涡轮的功率增加了 16%。

热水蒸气的混合物,按照混合气体的热力性质计算湿燃气的热力性质。计算了与试验点相同的温比及含湿量情况下的变工况性能。

图 5~图 7 为性能计算结果与试验值的比较,实心点为计算值,空心点为试验值。从图中可看出,计算结果与试验值能很好地吻合,在低压比工况下,计算与实验的误差为 2%,而在高压比工况下,误差有所增加,达到 5%。同时,结合压气机部件特性的计算还揭示了 HAT 循环性能变化的基本规律:温比越高,比功和效率越大,耗油率越低;在一定含湿量下,对某一温比存在一个最佳压比,在此压比下比功效率都最大,且温比越高,最佳压比也相应地提高。

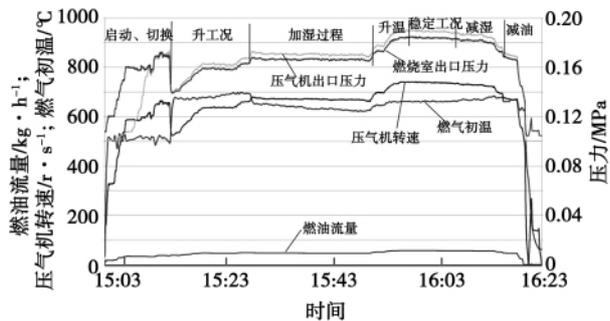


图 4 HAT 循环试验结果
Fig.4 HAT cycle test results

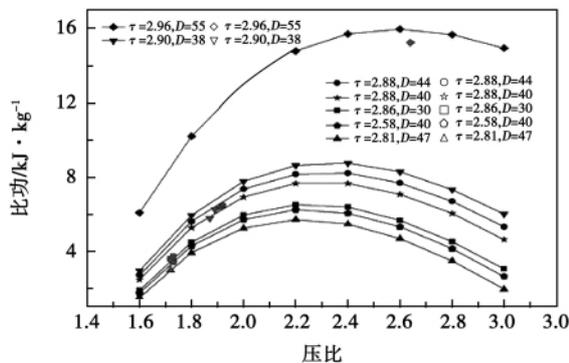


图 5 比功计算值与试验值
Fig.5 Calculated values and test ones of the specific power

2.3 HAT 循环分轴燃气轮机变工况计算

本研究根据压气机性能曲线对实验用 HAT 循环分轴燃气轮机的变工况性能进行了计算,其中考虑了湿空气的热物性^[8],并认为湿燃气是燃气与过

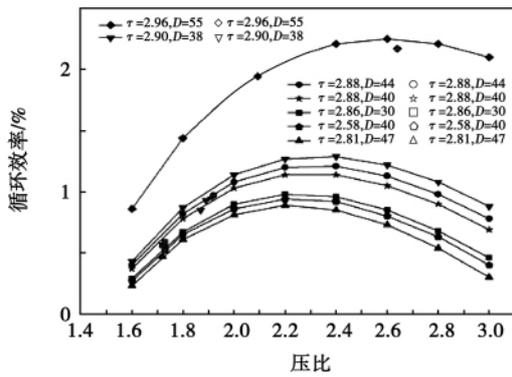


图 6 效率计算值与试验值

Fig. 6 Calculated values and test ones of the efficiency

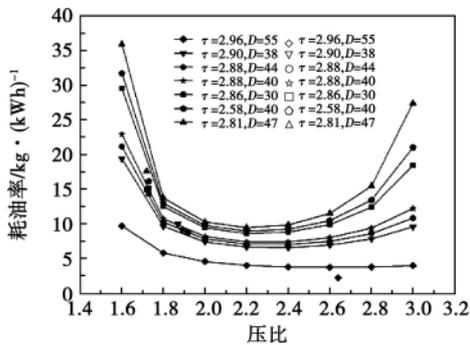


图 7 耗油率计算值与试验值

Fig. 7 Calculated values and test ones of the oil consumption rate

3 带回热器下的 HAT 循环性能计算

试验台加入回热器可进一步提高循环性能。将循环排气温度定为 250 ℃,回热器换热有效系数 δ 分别取为 0.75、0.8 和 0.85,热端和冷端压力损失系数均取为 0.02。燃气初温取试验最高工况的 662 ℃及含湿量 D 为 55 g/kg(干空气)下加入回热器来考察其不同回热度下 HAT 循环燃气轮机性能随压比的变化情况。计算结果如图 8 ~ 图 10 所示。

由结果知,在不改变燃气初温的情况下,以回热度为 0.85 为例,在系统中加入回热器以后,由于循环燃油量的减少导致涡轮工质减少,随着压比由 1.6 增加至 3.0,比功的减少量将由 4% 增加到 10%,但同时耗油率的减少量将由 53% 减少至 34%,效率增加量将由 82% 减少至 37%,可见回热器的使用对燃气轮机低压比情况下的性能改善最为明显,随着压

比的增大,对性能的改善越来越小。同时,回热器的回热度越高,对系统性能改善越明显,但回热度越高,回热面积越大,成本越高,所以从经济性考虑,存在着一个最佳回热度。

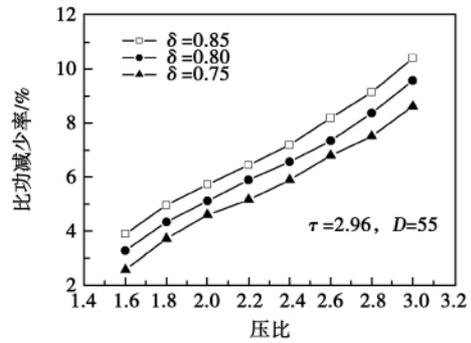


图 8 HAT 循环比功减少量随压比的变化

Fig. 8 Change of the decrease in the specific work of the HAT cycle with the pressure ratio

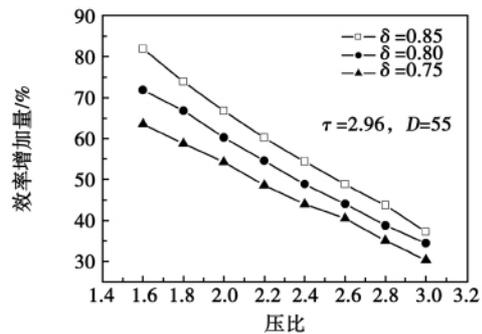


图 9 HAT 循环效率增加量随压比的变化

Fig. 9 Change of the increase in the efficiency of the HAT cycle with the pressure ratio

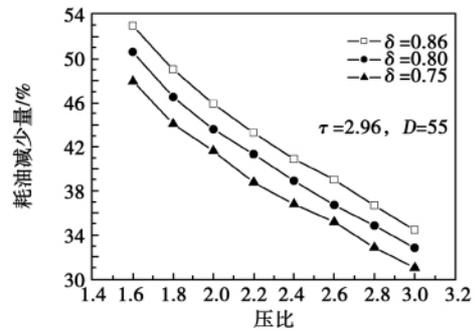


图 10 HAT 循环耗油率减少量随压比的变化

Fig. 10 Change of the decrease in the oil consumption rate of the HAT cycle with the pressure ratio

4 结 论

(1) 所建立的分轴燃气轮机 HAT 循环系统试验揭示了 HAT 循环规律,通过饱和器对空气加湿之后,对循环功率的提升具有明显作用;当加湿量为 4.2% 时,循环输出功率增长了 16%。

(2) 本研究结合实际的压气机特性曲线进行的 HAT 循环燃气轮机变工况性能计算方法其结果与试验吻合较好,改变了以往只是从循环角度考察 HAT 循环性能的状况,利用此方法可以准确地预测实际 HAT 循环燃气轮机的变工况特性。

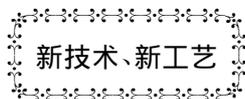
(3) 计算分析表明,带有回热器的 HAT 循环燃气轮机与不带回热器的相比其性能将会得到进一步提高,特别是在燃气轮机低压比情况下性能改善的效果十分明显,在较高回热度下其效率的增加十分显著。

参考文献:

[1] Mori Y ,Nakamura H. A highly efficient regenerative gas turbine system by new method of heat recovery with water injection [C]//To-

kyo: Proceedings of the International Gas Turbine Congress ,1983.
 [2] Jonsson M ,Yan J. Humidified gas turbines—a review of proposed and Implemented cycles [J]. Energy 2005 30: 1013 – 1078.
 [3] Parente M ,Traverso A ,Massardo A. Micro humid air cycle for distributed power generation [C]//Proc Power-Gen Europe , Milan 2002.
 [4] Paul von Heiroth ,Jan-Olof Gustafsson. A model of an evaporative cycle for heat and power production [J]. Energy Conversion & Management ,1999 40: 1701 – 1711.
 [5] Ehsan Mesbahi ,Mohsen Assadi. A unique correction technique for evaporative gas turbine(EVGT) parameters [C]//New Orleans: Proceedings of Asme Turbo Expo 2001.
 [6] Hatamiya S. Gas turbine power generation technology utilizing high humidity air[J]. Thermal Nuclear Power 2002 53: 1031 – 1038.
 [7] Higuchi S ,Hatamiya S ,Seiki N ,et al. A study of performance on advanced humid air turbine systems [C]//Tokyo: Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003.
 [8] 严家驊 ,尚德敏. 湿空气和烃燃气热力性质图表 [M]. 北京: 高等教育出版社 ,1989.
 YAN Jia-lu ,SHANG De-min. Chart and table showing the thermodynamic properties of humid air and hydrocarbon gases [M]. Beijing: Higher Education Press ,1989.

(辉 编辑)



新技术、新工艺

强化换热结构的工业应用

据《Теплоэнергетика》2012 年 1 月刊报道,热能动力装置的技术经济指标在很大程度上取决于热交换器的参数,这些热交换器的质量和尺寸都很大。随着动力装置单机功率的提高,其中热交换器的绝对质量和尺寸越来越大,相应提高了热交换器性能。借助于有效的强化换热方法,可以减少其尺寸和质量并降低泵载热体通过热交换器所消耗的功率。

提供了动力装置和工业热力工程设备的强化换热方法,给出了这些方法的分类为主动、被动和复合方法。分析了相应形式的强化换热器。

一些换热强化的方法已成功地应用在国内外的热能动力装置上,包括 ППА-Ц16 和 ГТК-10-4 燃气轮机的余热锅炉。结果表明,应用这些强化方法既可以使热交换器的尺寸更加紧凑,又明显提高了换热效果。

(吉桂明 摘译)

0.54% ,having a relatively high contrast reliability. Through a comparison of the test data with the calculation results obtained by using the method in question ,the relative deviations of the test values from the calculation ones are all within a range of 1% at five operating conditions ,thus verifying the correctness of the method under discussion.

Key words: turbo-generator unit ,vacuum system ,gas leakage rate ,experimental study

微型分轴燃气轮机 HAT 循环性能的机理试验研究 = **Experimental Study of the Mechanism Governing the**

HAT (Humid Air Turbine) Cycle Performance of a Split-shaft Micro Gas Turbine [刊 ,汉] /PU Qiang ,WEI

Chen-yu ,GE Bin ZANG Shu-sheng(Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering ,College of Mechanical and Power Engineering ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) //

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(5) . -544 ~ 548

Based on a split shaft micro gas turbine and through a saturator additionally installed ,constituted was the HAT cycle performance test rig of the turbine. On this basis ,tests of the mechanism governing the HAT cycle performance were carried out. The test results show that after the air is humidified ,it has a conspicuous influence on the cycle performance and both specific power and efficiency of the cycle have a very big enhancement when compared with that of the simple cycle. When the humidification quantity reaches its maximum of 4.2% ,the output power of the cycle will increase by 16% . The simulation results under the test conditions are in very good agreement with the test ones. On this basis ,a simulation calculation was performed of the test system with a recuperator. The calculation results show that under the condition that the initial gas temperature is kept unchanged ,the incorporation of the recuperator will result in an increase of the pressure loss of the system and the specific power of the device will decrease by about 3% -10% ,however ,in the meantime ,the oil consumption rate will lower by 20% -45% and the efficiency will go up by 30% -80% . In such a case ,the performance of the system is markedly enhanced. **Key words:** split shaft micro gas turbine test rig ,HAT cycle ,gas turbine performance calculation

基于遗传算法的联合循环机组模型参数辨识 = **Parameter Discrimination of a Combined Cycle Unit Based**

on the Genetic Algorithm [刊 ,汉] /QIU Xiao-zhi ,SI Pai-you ,HUANG Bao-hua (North China Electric Power Sci-

ence Academy Co. Ltd. ,Beijing ,China ,Post Code: 100045) ,WANG Wei (Dispatchment and Communication Center ,Beijing City Electric Power Company ,Beijing ,China ,Post Code: 100031) //Journal of Engineering for Thermal

Energy & Power. -2012 27(5) . -549 ~ 553

In the light of the actual demand of introducing a model for combined cycle units into an electric power system sta-