

文章编号: 1673-5196(2006)06-0050-04

# 天然气变频涡旋压缩机的性能研究

彭斌<sup>1</sup>, 刘振全<sup>2</sup>, 张洪生<sup>1</sup>, 张力<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃兰州 730050; 2. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃兰州 730050)

**摘要:** 采用变频涡旋压缩机为微型燃气轮机提供天然气, 搭建了供气系统的试验台, 开发了涡旋压缩机的测试与数据采集/分析系统, 对涡旋压缩机的各部件及系统进行了优化, 并对采集的数据进行了详细的分析, 获得了有关天然气变频涡旋压缩机运转的详细情况. 数据分析结果体现出变频涡旋压缩机的高效率 and 低振动优点, 同时高质量地完成了系统 400 h 的寿命试验, 表明天然气变频涡旋压缩机供气系统安全可靠, 完全满足设计要求, 进而为变频涡旋压缩机在天然气压缩中的应用提供了理论和试验依据.

**关键词:** 变频涡旋压缩机; 天然气; 性能; 微型燃气轮机

**中图分类号:** TH45 **文献标识码:** A

## Investigation of performances of frequency convertible scroll compressor of natural gas

PENG Bin<sup>1</sup>, LIU Zhen-quan<sup>2</sup>, ZHANG Hong-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Petrochemical Technology, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A frequency convertible scroll compressor was investigated for supplying natural gas to miniature gas-turbines. A test rig of gas supply system was set up and a testing and data gathering-analyzing system was developed for this scroll compressor in order to optimize its components and overall system. With the help of this system, the data gathered could be analyzed in detail and detailed operational conditions of such compressor could be obtained. It was shown by the data analysis that this frequency convertible scroll compressor exhibited high efficiency and low vibration. In the meantime, a service life test of 400 h was successfully completed for this system, showing the safety and reliability of the gas supply system by using the scroll compressor developed. The special design requirement was satisfied completely, so that this investigation provides a theoretical and experimental basis for application of this frequency convertible scroll compressor in the compression of natural gas.

**Key words:** frequency convertible scroll compressor; natural gas; performance; miniature gas-turbine

微型燃气轮机体积小、重量轻, 适用燃料范围广、发电效率高, 可靠近用户安装, 并可同时提供热力和空调通风服务. 其工作原理为: 轴流式压气机从外部吸收空气, 压缩后送入燃烧室, 同时燃料(气体或液体燃料)也喷入燃烧室与高温压缩空气混合, 在受控方式下进行定压燃烧, 生成的高温高压烟气进入透平膨胀做功, 推动动力叶片高速旋转, 从而使得转子旋转做功. 在工作中为燃烧室提供燃料特别重

要, 不但要保证燃料的及时、充分供应, 而且还对供气机组的性能要求很高, 基于此要求, 并结合涡旋压缩机的特点, 采用变频涡旋压缩机组对燃气轮机进行供气, 本文搭建了天然气变频涡旋压缩机供气系统, 从变频涡旋压缩机的结构优化和系统构造两方面着手, 成功地完成了天然气变频涡旋压缩机的性能试验和寿命试验, 为微型燃气轮机提供了可靠的燃料保证.

### 1 天然气变频涡旋压缩机

变频涡旋压缩机是在定速涡旋压缩机的基础上

收稿日期: 2005-10-19

基金项目: 甘肃省自然科学基金(3ZS051-A25-036)

作者简介: 彭斌(1976), 男, 四川蓬溪人, 博士生, 讲师.

开发而成的, 所以其具有与结构相对应的涡旋压缩机所固有的结构简单、高效、低噪、省材、高可靠性、振动小和变频调速的优点。由于燃气轮机用气量是在不断变化的, 因此需要变频涡旋压缩机的转速也随着变化。以往研究涡旋压缩机大多以定速涡旋压缩机为研究对象, 而变频涡旋压缩机的性能会随着频率的变化而变化, 对变频涡旋压缩机系统的性能做进一步研究显得尤为必要, 本文以天然气作为介质, 对天然气变频涡旋压缩机的性能从理论和试验两方面进行了深入详尽的研究<sup>[1-3]</sup>。

### 1.1 涡旋压缩机的结构设计

作为微型燃气轮机供气系统的主机, 首先要求天然气变频涡旋压缩机在尺寸上尽量紧凑, 同时由于介质的特殊性, 要求绝对不能有外泄漏, 其次在小于 75 Hz 的转速下, 排气温度低于 105 °C (有良好的喷油循环), 设计标况下排气量为 1 m<sup>3</sup>/min, 压缩比为 3.5, 排气量为 0.1~1.5 m<sup>3</sup>/min。根据上述的要求, 从结构上进行了优化。考虑到加工和啮合性能, 涡旋盘采用传统的圆渐开线形式, 同时进行 PMP 修正, 提高了中心涡旋齿的强度, 改善了涡旋齿的受力状况。通过遗传算法对涡旋盘进行优化设计, 得到了最优参数, 提高了涡旋压缩机的比功率。采用新型密封结构对其进行密封设计, 防止了天然气的泄漏。对油路进行了重新设计, 使各部件得到了充分的润滑和冷却。对这些结构的优化和改进, 保证了天然气变频涡旋压缩机的高性能。

### 1.2 天然气变频涡旋压缩机的试验系统

天然气变频涡旋压缩机供气系统由涡旋压缩机、交流防爆变频器、高精度压力变送器、变频器、PID 调节器(可选用带 PID 调节功能的变频器)、PLC、管网等组成, 如图 1 所示。天然气从入口阀进入涡旋压缩机, 经涡旋压缩机压缩达到设计压力后从排气孔排出, 经压缩后的气体经过出口阀进入风冷却器, 风冷却器对排出的气体进行冷却, 然后进入油气分离器, 经过高效的油气分离器可以分离出排气带出的油, 经过处理后的气体进入高压出口储气罐, 这样得到的气体含油量就达到了规定的使用要求。本试验系统采用减压阀将高压储气罐中的天然气降压至吸气压力, 并排入入口储气罐进行循环使用。充气储气瓶通过进气阀对出口储气罐进行充气, 在天然气变频涡旋压缩机系统中通过电磁阀来控制供油, 根据不同的压缩机转速来控制电磁阀的开度, 利用气体压力推动润滑油给涡旋压缩机供油点供油, 该方法比较合理, 安全可靠, 完全实现了润滑和冷却作用。采用天然气变频涡旋压缩机可以实现迅

速、连续地供气, 保证了微型燃气轮机的燃气供应, 该系统具有高效率、低噪声、运转平稳、高可靠性等优点, 在该系统中采用 PLC 和变频器对涡旋压缩机进行联合控制, 通过接口电路与微型燃气轮机的总系统进行连接, 通过总控制系统实现了完全智能化。

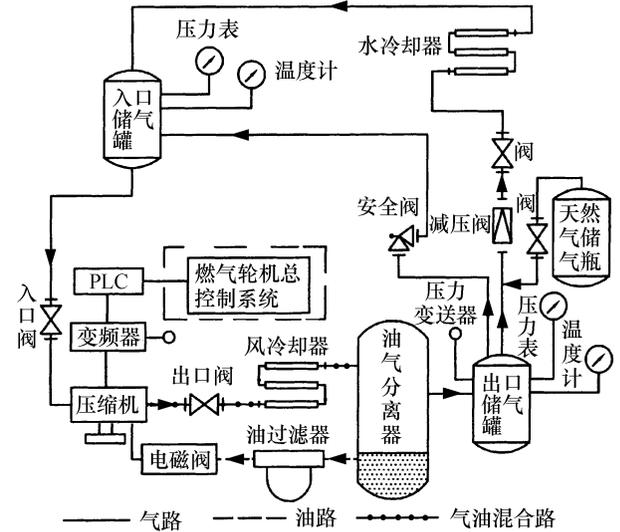


图 1 变频涡旋压缩机的供气系统

Fig. 1 Gas-supply system of frequency convertible scroll compressor

## 2 天然气变频涡旋压缩机的性能研究

本文从理论和实验两个方面对天然气变频涡旋压缩机的性能进行了分析, 在建立的天然气变频涡旋压缩机系统上, 通过数据采集系统对其性能进行了测试。由系统中的变频器可得到电机的功率、电压、电流、转速、频率, 采用高精度压力传感器测量压缩机各压缩腔内的压力以及进、出口压力, 监测主要部位的温度: 气体进、出口温度、主轴承温度、密封处温度、冷却器冷却后温度, 运用涡轮流量计测量气体流量, 利用位置传感器提供角度基准, 同时采集振动信号, 对所采集到的信号进行放大、滤波、A/D 转换处理后, 进入工控机/PC, 利用键盘、鼠标和显示器(动态测试软件)进行人机对话, 通过动态测试界面来设置数据采集的频率、采样时间、次数和其他一些可控参数, 打印测试结果, 进行通讯操作等, 同时显示各测量数据的变化情况<sup>[4]</sup>。

### 2.1 天然气变频涡旋压缩机的压力分析

由于涡旋压缩机的压缩过程是多个压缩腔同时工作, 要了解压缩腔内压力的变化, 就必须要有多个传感器分别对多个压缩腔同步测量。在一台实验用涡旋式压缩机的多个压缩腔上安装几个动态压力传感器, 就可以连续地测量某一流体单元从进气到排气的整个过程, 合并各段测量结果就可得到压力转角

变化的曲线图, 得到进气-压缩-排气的详细过程, 以及进气与排气过程中的损失及涡盘中泄漏严重的区域, 包括涡旋压缩机的内泄漏(轴向泄漏和径向泄漏)和外泄漏. 排气孔的开设影响压缩机的效率, 通过测量排气腔内压力的变化和排气口处的压力, 可以得到过压缩或欠压缩的损失信息, 指导排气口的设计, 所以瞬时的轴速与涡盘内压力的测量对深入了解压缩过程及其制约参数以反映确定问题所在都是有用的. 通过安装在静涡盘上的高精度压力变送器可得到涡盘内各压缩腔的实际压力随曲轴转角的变化过程, 在进行理论压力值和流量的分析中, 根据以往的测试和设计经验, 引入了泄露系数  $\alpha$ , 针对具体的结构确定泄露系数的大小. 图 2 为数值模拟和测试的压力随曲轴转角的变化情况, 从图中可以看到两者的吻合还是不错的. 对于一台已按设计要求加工好的涡旋压缩机来说, 容积尺寸是定的, 压缩介质确定后, 绝热指数也是定的, 得到压力-转角图后, 就很容易进行泄漏和过、欠压缩的分析. 当压缩机存在严重泄漏时, 会出现排气压力比计算值低许多的情况, 当进气被加热时也会出现排气压力比计算值低许多的情况, 当涡旋压缩机内压缩终了时的压力与管网压力不相等时, 在第二压缩腔与第一压缩腔(中心压缩腔)相通的瞬时, 就会发生气体的定容压缩或膨胀, 从而产生过、欠压缩的附加损失功率, 进而影响压缩机的整机械效率<sup>[5]</sup>.

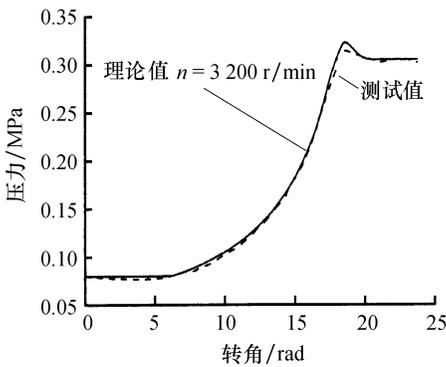


图 2 压力-曲轴转角图

Fig. 2 Diagram of pressure vs. crankshaft

### 2.2 天然气变频涡旋压缩机的温度分析

通过对进、排气温度、润滑油温度、主轴承温度以及其他一些主要部位的温度测量, 可以得出摩擦损失的信息以及整机结构设计的优劣, 在涡旋压缩机中, 其排气温度为

$$T_d = T_s \tau_m^{\frac{m-1}{m}}$$

式中  $T_s$  为吸气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $m$  为温度多方指数;  $\tau$  为外压力比,  $\tau = p_d/p_s$ ,  $p_d$  为排气压力,  $p_s$  为吸气压力.

对于喷油涡旋压缩机来说, 工频运转下排气温度一般在  $80 \sim 110^{\circ}\text{C}$ , 但对于天然气压缩机来说, 由于介质的特殊性, 工频运转下的最高排气温度要控制在  $90^{\circ}\text{C}$  以下. 通过反复试验得到了喷油量、频率和温度的变化关系, 如图 3 所示. 虽然喷油量的增加降低了天然气变频涡旋压缩机的排气温度, 但喷油量也不是越多越好, 太多的油会造成搅油损失, 降低涡旋压缩机的整机效率, 根据天然气变频涡旋压缩机的要求和整体考虑, 对系统的喷油量进行了优化, 重新改进了润滑系统, 由原来的定量喷射变成了变量喷射, 采用改变电磁阀的开度来实现对喷油量大小的控制, 由系统根据电机频率来控制喷油量的大小, 使排气温度和主轴承温度在工频运转下完全控制在  $90^{\circ}\text{C}$  以下. 润滑系统的改进效果非常明显, 不但降低了排气温度, 而且实现了喷油量的自动化调节, 图 4 为改进润滑系统后各主要部位的温度变化<sup>[6]</sup>.

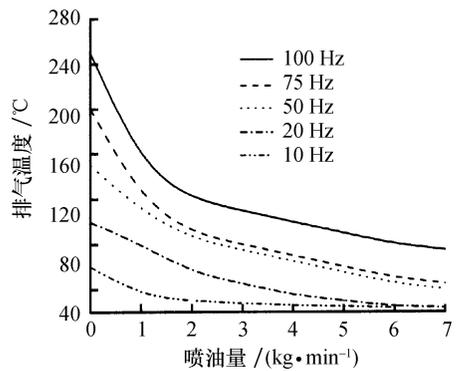


图 3 频率-喷油量与排气温度图

Fig. 3 Diagram of oil injection mass vs. delivery temperature

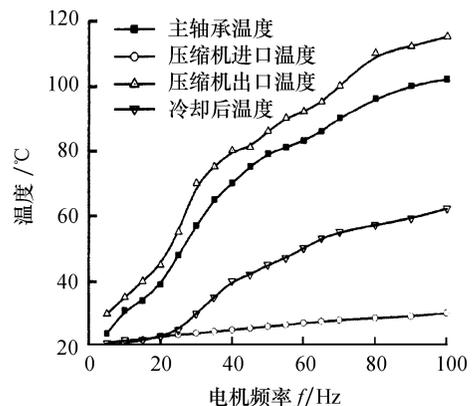


图 4 温度与运转频率的变化关系

Fig. 4 Variation relations of temperature vs. operational frequency

### 2.3 天然气变频涡旋压缩机的排气量分析

变频涡旋压缩机的理论排气量为

$$q_v = V_s n \times 10^6$$

式中:  $V_s$  为吸气容积,  $\text{mm}^3$ ;  $n$  为压缩机转速,  $\text{r}/\text{min}$ .

变频涡旋压缩机的容积效率为

$$\eta_v = q_{v,i} / q_v$$

式中:  $q_{v,i}$  为压缩机实际排气量,  $\text{m}^3/\text{min}$ .

天然气变频涡旋压缩机在低频时会由于内泄漏相对较大而降低排气量, 在高频时会由于摩擦损失增大造成机组温度的升高, 从而对进气加热, 也会降低排气量, 进而降低容积效率. 为了避免气量损失, 在涡旋压缩机的设计中, 首先保证涡旋齿的高精度, 同时采用轴向随变技术; 其次就是通过优化润滑系统降低高频时机组的温度, 主要是排气温度. 图 5 是天然气变频涡旋压缩机的实测和理论排气量, 通过调节频率可改变天然气变频涡旋压缩机的排气量, 从图中二者的吻合程度表明所采取的措施比较有效, 容积效率也达到了 95% 以上.

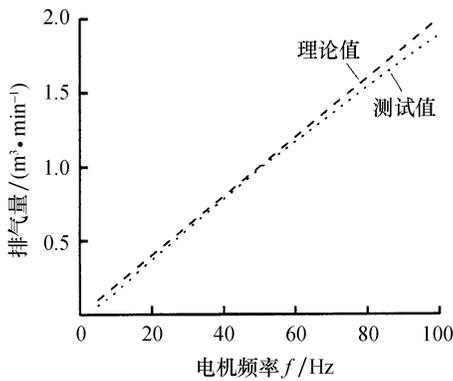


图 5 排气量随频率的变化情况

Fig. 5 Variation situation of delivery vs. frequency

### 2.4 天然气变频涡旋压缩机的效率分析

考虑压缩气体与外界有热交换, 同时计及内、外压力比不相等带来的附加损失, 压缩  $1 \text{ m}^3$  气体所需的压缩内功为

$$W_i = W_p + W_r =$$

$$\frac{m_2}{m_2 - 1} p_s \left( \tau_2^{\frac{m_2-1}{m_2}} - 1 \right) + \tau_2^{\frac{1}{m_2}} (p_d - p_i) + p_s \left[ \frac{k}{k-1} - \frac{m_1}{m_1-1} \right] \left( \tau_1^{\frac{m_1-1}{m_1}} - 1 \right)$$

式中:  $W_p$  为多方压缩功,  $\text{J}/\text{m}^3$ ;  $W_r$  为内部损失,  $\text{J}/\text{m}^3$ .

涡旋压缩机的轴功率

$$N_s = W_i Q / (60 \eta_v \eta_m)$$

式中:  $\eta_m$  为机械效率.

图 6 为电机功率的理论和实际值, 从图中可以看出, 当在低速运转时, 理论与测试功率相差不大,

泄漏损失是主要的损失形式, 随着转速的提高, 泄漏损失降低, 排气脉动加剧, 摩擦等各种机械损失增加, 但功率损失均小于 8%, 实现了天然气变频涡旋压缩机在较宽频率范围内均具有较高的容积效率和整机效率.

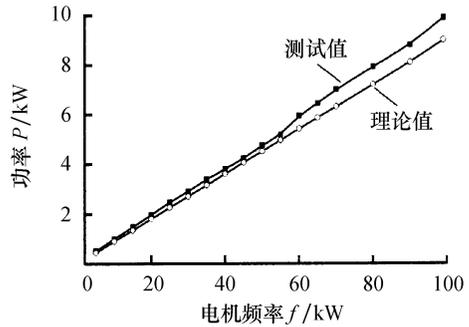


图 6 功率变化图

Fig. 6 Variation of power vs. frequency

在对天然气变频涡旋压缩机性能研究的基础上, 对供气系统进行了 400 h 连续的寿命试验, 涡旋压缩机无任何停机, 实验结束后, 对压缩机进行拆机检查, 各部件均完好, 无明显磨损, 说明在压缩机系统设计中采用的措施效果明显, 满足了功能要求, 提高了系统性能的可靠性, 为变频涡旋压缩机的广泛应用开辟了新的思路.

### 3 结论

1) 根据特殊的介质搭建了天然气变频涡旋压缩机的测试系统.

2) 通过测试系统得到了天然气变频涡旋压缩机的性能实验结果, 并对性能进行了理论和实验分析, 分析结果表明采用的优化结构和搭建的测试系统能很好的满足功能需求.

参考文献:

[1] 彭 斌, 刘振全, 张洪生, 等. 变频涡旋压缩机的研究与应用 [J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(1): 60-63.  
 [2] 刘振全, 杜桂荣. 涡旋压缩机理论机构模型 [J]. 机械工程学报, 1999, 35(2): 38-41.  
 [3] 李连生. 涡旋压缩机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
 [4] 彭 斌, 刘振全, 李海生. 变频涡旋压缩机测试系统的研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(3): 58-61.  
 [5] DUTTA A K, YANAGISAWA T, FUKUTA M. An investigation of the performance of a scroll compressor under liquid refrigerant injection [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24: 577-587.  
 [6] 屈宗长, 李元鹤, 王开宁, 等. 转速对涡旋压缩机性能的影响 [J]. 陕西工学院学报, 1997, 13(4): 32-37.