

文章编号: 0253-4339(2012)01-0069-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.01.069

高速透平膨胀制冷机热力性能实验研究

刘玉晗^{1,2} 刘宝玉¹ 杨金福² 韩东江² 刘磊³

(1 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院 抚顺 113001; 2 中国科学院工程热物理研究所 北京 100190;
3 中国石油天然气勘探开发公司 北京 100034)

摘要 在增压透平膨胀制冷系统中采用了新型气浮轴承支承结构,并通过系统性能实验对该设备的热力参数进行研究分析。研究表明:当制冷机转速从40000 r/min提高到60000 r/min,制冷性能提高较大,工质流量提高了一倍,压缩机和膨胀机的出入口温差提高了一倍多,而功率却提高了近5倍。该实验结果可为增压透平膨胀机制冷性能的进一步优化提供实验参考依据。

关键词 热工学; 热力性能; 实验研究; 增压透平膨胀制冷机; 气浮轴承

中图分类号: TB65; TB61⁺¹

文献标识码: A

Experimental Investigation of Thermodynamics of High-speed Turbo-expander Refrigerator

Liu Yuhan^{1,2} Liu Baoyu¹ Yang Jinfu² Han Dongjiang² Liu Lei³

(1. Liaoning Shihua University, School of Petroleum and Gas Engineering, Fushun, 113001, China; 2. Institute of Engineering Thermo Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 3. China National Oil&Gas Exploration and Development Corporation, Beijing, 100034, China)

Abstract Applying air-bearings supporting structure to the compressor turbine expander refrigeration system, the thermodynamic parameters of the test equipment was analyzed by means of system performance experimental investigation. The experiment results show that when the refrigerator rotating speed runs from 40000 r/min to 60000 r/min, the refrigerating performance improved greatly; the flow rate at 60000 r/min was twice as much as that at 40000 r/min, the temperature difference of the compressor and the turbo-expander were doubled, while the power was increased five times as much. This test results provided references to the advanced optimization of compressor turbine expander.

Keywords Pyrology; Thermodynamic performance; Experimental investigation; Compressor turbine expander refrigerator; Hybrid air-bearings

高速透平膨胀机是空气压缩制冷循环的核心设备。随着透平机技术的发展和运用,透平膨胀制冷机的性能大大提高,其制冷量在整个空气制冷循环中占80%以上^[1]。制冷机的高速化,能够有效减小制冷机的体积和重量,同时能够增加制冷机的流量以及压缩端和膨胀端的出入口温差,从而增加了制冷机的制冷能力。目前,日本JAERI研制的制冷量为10 kW的膨胀机的工作转速为67200 r/min^[2];日本日立制作所10kW氦制冷机,转速可达79000 r/min^[3]。透平膨胀制冷机的高速化所带来的高效制冷,以及质量的减小和体积的精简,使其得以广泛应用于飞机、坦克环境控制,列车空调以及冷库等领域^[4-5]。

透平膨胀制冷机的高速运行依赖于稳定的轴

系结构,高速气浮轴承旋转机械具有耗功较低的性能优势,得到国内外研究者的广泛关注^[6-8]。文献[9]给出了滑动轴承转子系统工程稳定性判别准则。中国科学院工程热物理研究所,针对高速动静压混合气浮轴承的透平膨胀制冷机的轴系振动性能进行了实验研究;结果表明,用动静压混合气浮轴承代替传统的滚动轴承,有效提高制冷机的转速及性能^[10]。进一步针对应用动静压混合气浮轴承的增压透平膨胀制冷机进行了热力性能实验研究。

1 高速透平膨胀机实验台

高速透平膨胀机主要是由空气压缩机,膨胀机以及以气浮轴承为支撑的轴系三部分构成。工质为洁净干燥的空气。为使透平膨胀机在高转速下稳

定运行, 实验选用的是动静压混合气浮轴承, 文献[11]中已经对该轴承进行了详细介绍, 文献中所进行的转速性能的实验研究说明了这种轴承的高转速性能, 这里不再赘述。

实验是在实验室已有的高速透平式膨胀机上, 采用气浮轴承建成了10kW的高速气浮轴承透平式制冷实验台, 包括高压气源, 实验台轴系控制系统, 轴系振动检测系统(包括信号采集与分析系

统和轴系耦合调频分析系统), 高速透平膨胀制冷机等设备, 如图1所示。实验台轴系控制系统是由主控制阀, 电磁阀, 稳压阀, 流量计, 温度计, 压力表以及管路组成; 空气首先在螺杆式空气压缩机中被压缩为高压气体, 经过除湿后的干燥气体经过上述控制管路, 2号管进入气浮轴承供气管路; 压缩空气通过1号管路进入透平膨胀机, 对1号管路流量进行调节, 进而控制轴系的运行转速。

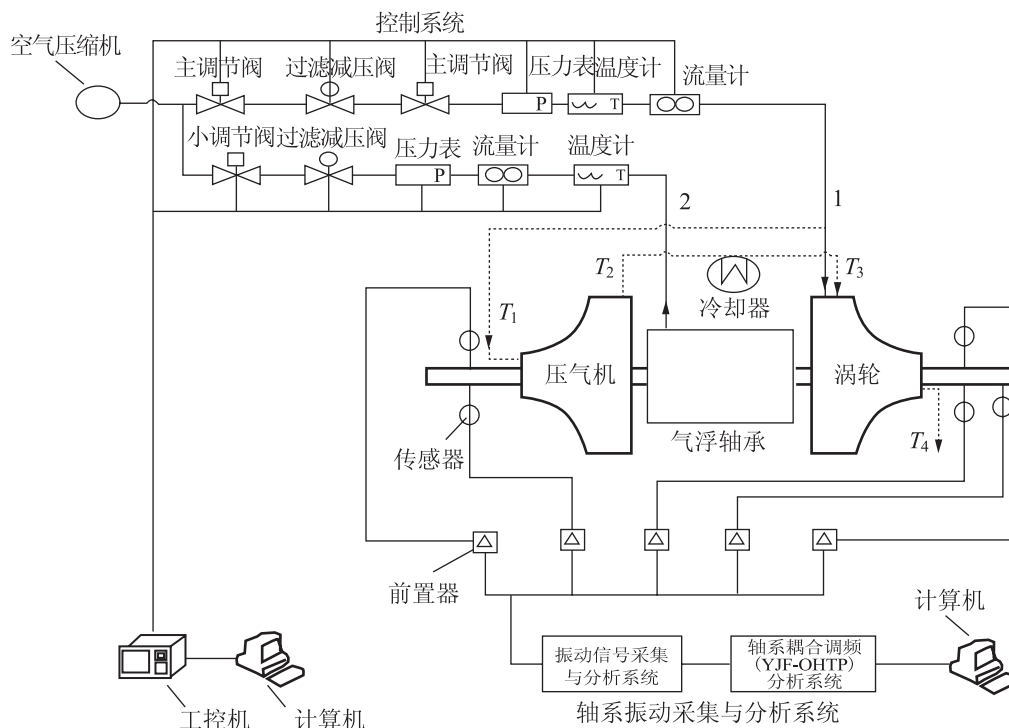


图1 高速透平膨胀制冷实验台控制及监测系统

Fig.1 High-speed turbo-expander refrigerator test-bed control and monitor system

2 制冷机原理

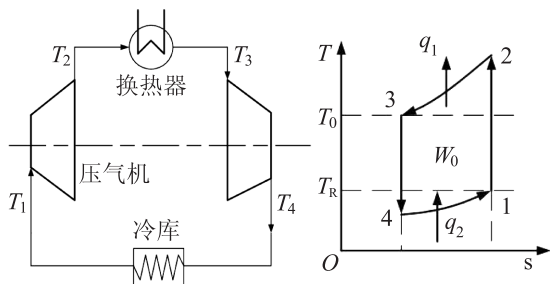


图2 透平膨胀机的结构及热力循环

Fig.2 Turbo-expander refrigerator structure and thermodynamic cycle

典型的空气制冷循环系统如图2所示, 理想工作过程包括等熵压缩、等压冷却、等熵膨胀及等压吸热四个过程, 压缩空气在膨胀机中绝热膨胀获得

低温气流实现制冷。具体工作流程是高压气源将高压气体经管路输送到增压透平机内(压缩机), 气体在空气压缩机中被绝热压缩至较高压力和较高温度, 高温高压气体经过换热器定压降温冷却至环境温度 T_0 , 然后经过冷却降温的压缩空气进入膨胀机中绝热膨胀到背压(大气压力), 得到较低的制冷温度。

实验中直接测量得到的热力参数有空气压缩机入口温度 $T_R=T_1$, 空气压缩机出口温度 T_2 , 透平膨胀机端入口温度 T_3 , 透平膨胀机端出口温度 T_4 , 环境温度 T_0 以及流过制冷机透平膨胀机的工质质量流量。

计算透平膨胀机的制冷量的公式为:

$$Q_0 = PT = q_m (i_3 - i_4) = q_m c_p (T_3 - T_4) \quad (1)$$

压缩机耗功率计算公式为:

$$P_c = q_m(i_2 - i_1) = q_m c_p (T_2 - T_1) \quad (2)$$

其中： Q_0 —透平膨胀机制冷量(P_1 透平膨胀机输出功率)， P_c —空气压缩机耗功率， q_m —工质质量流量， c_p —取值为 $1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。由于公式中温度是实际测量所得，所以公式中包含了摩擦损失，流道损失以及温差引起的冷量损失等。由(1)式中可以看到透平膨胀机出入口温差越大，膨胀机制冷能力就越高。

根据能量平衡原理，得到功率平衡表达式 $N_c = \eta_m P_T^{[12]}$ ，其中 η_m 为增压透平膨胀制冷机的机械效率。透平膨胀机做功与空气压缩机耗功之差则是损失在轴承上的功， $1 - \eta_m$ 则是轴承损失功率。

在制冷循环中，透平膨胀机输出冷量与空气压缩机所消耗的功之比称为制冷系数，即COP值，如下公式(3)：

$$\text{COP} = \frac{Q_0}{q_m(i_1 - i_4)} \quad (3)$$

上式中，制冷机透平压缩轮入口处焓值和膨胀机出口的焓值之差即为高压气源对制冷机的输入功。

3 高速透平膨胀机热力性能实验研究

3.1 转速对空气压缩机、透平膨胀机出入口温差、流量影响

实验运行期间室温为 25.9°C ，湿度为20%，当地大气压 100.67 kPa ，实验过程始终保持轴承供气压力稳定在 $0.6 \sim 0.7 \text{ MPa}$ ，调节主调节阀改变动力涡轮流量，使转速升高到 61874 r/min ，空气压缩机出口温度 T_2 最高升至 82°C ，透平膨胀机出口温度 T_4 最低降低到 -42°C 。

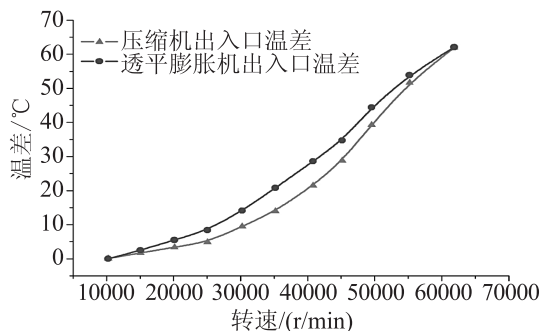


图3 转速对空气压缩机和透平膨胀机出入口温差的影响
Fig.3 Temperature differences of compressor and turbo-expander effected by rotating speed respectively

随着转速的升高，空气压缩机和透平膨胀机出入口温差均呈上升趋势，当转速由 40000 r/min 升高到 61874 r/min 时，如图3所示，空气压缩机温

升和透平膨胀机温降分别由 20.5°C 、 28.7°C 提高 61°C 、 62.2°C ，由此可见，在提高转速的同时增加了透平膨胀机的焓降与空气压缩机的功耗。同样，如图4所示，流量也随着转速的提高而增加，当转速从 45000 r/min 提高到 61874 r/min 时，空气压缩机的压缩能力增加，流量从 $353 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $630 \text{ m}^3/\text{h}$ 。焓降的提高以及制冷系统流量的增加，特别是在高转速区更体现了制冷系统制冷能力的提高。

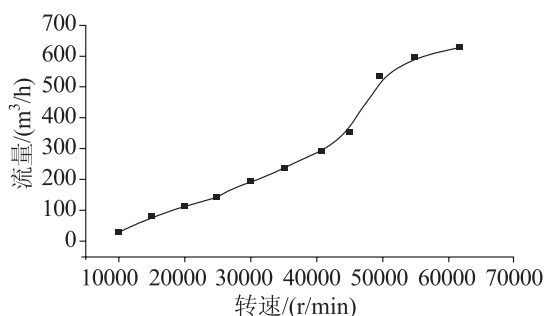


图4 转速-流量关系曲线
Fig.4 Rotating speed-flow relation curve

3.2 转速对功率影响分析

由图5可知空气压缩机耗功率和透平膨胀机的输出功率都是随着转速的提高而增加，在转速大于 45000 r/min 时，透平膨胀机和空气压缩机功率的增加速度要高于低转速二者功率的增加速度。当转速达到设计工作转速时，空气压缩机的耗功率为 13.13 kW ，透平膨胀机的输出功率为 13.15 kW ，能够满足高速增压透平膨胀制冷机对空气压缩机和透平膨胀机输出功率匹配的性能要求。

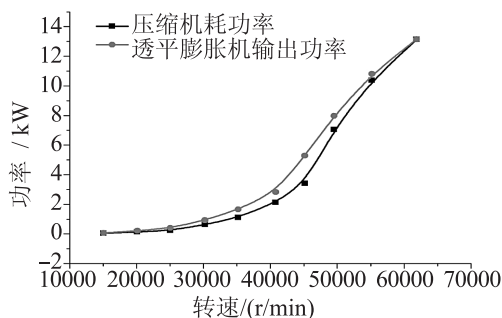


图5 空气压缩机-透平膨胀机功率随转速变化曲线
Fig.5 Curves of compressor-turbine power variation with rotating speed

图6所示的是气浮轴承耗功率和制冷机机械效率随转速变化，当转速小于 40000 r/min 时，两条曲线都有波动，但总体趋势是制冷机的机械效率增加，而轴承耗功相对比值在减小。随着转速的不断加，在 40000 r/min 以后两条曲线的斜率变化很小，在轴承耗功变化很小的情况下，膨胀制冷机的制冷能力不断增加，在达到设计转速

61874r/min时, 制冷机的机械效率也在高转速下达到99.83%, 轴承耗功不足膨胀机做功的1%, 充分体现了气浮轴承在高转速下功耗低的优越性能。

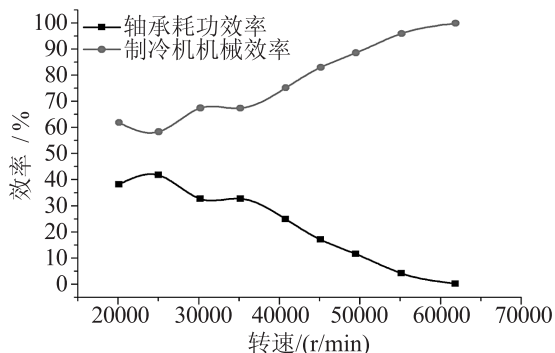


图6 轴承耗功率和制冷机机械效率随转速变化曲线
Fig.6 Bearings consumption efficiency and refrigerator mechanical efficiency variation with rotating speed

3.3 转速对COP值影响

跟据公式(3)求得COP值随转速的提高而增大, 从0.81升高到0.986, 在高转速下COP值提高的速率要明显高于低转速。

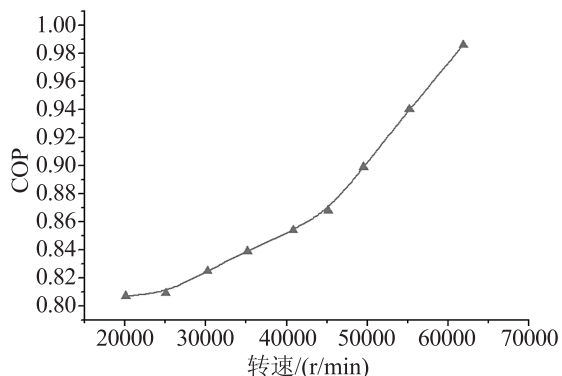


图7 COP值随转速的变化曲线
Fig.7 Curve of COP variation with rotating speed

4 结论

1) 空气压缩机耗功率和透平膨胀机输出功率均随着转子转速的提高而增大, 透平膨胀机的输出功率始终大于空气压缩机的耗功率。转速从20000r/min升高到40000r/min时, 功率增加了2 kW, 当转速从40000r/min提高到60000r/min时, 耗功率提高近10kW, 是低转速下耗功率增加率的5倍, 可见高转速下, 耗功率增加的更快。

2) 随着高速透平膨胀机转速的提高, 轴承的耗功基本不变, 透平膨胀机的输出功不断增加, 则增压透平膨胀机的机械效率相应提高, 充分体现了气浮轴承在高转速下功耗低的性能优势;

3) 高速透平膨胀机的COP值随着转子转速的

提高而增加, 呈非线性变化规律。当转速高于40000r/min时, COP值随转速变化曲线的斜率增加的更快。

4) 针对基于气浮轴承的增压透平膨胀制冷机进行了热力性能实验研究, 实验数据分析结果为后续进一步改进该设备提供了实验依据, 同时为同类型的高速制冷机提供了参考。

参考文献

- [1] 苏兵, 侯予, 赵红利, 等. 飞机空调系统采用动压气动轴承的性能分析[J]. 低温工程, 2008, (3): 50-54. (Su Bing, Hou Yu, Zhao Hongli, et al. Feasibility Analysis on Self-acting Gas Bearings of Air Condition System of Plane[J]. Cryogenics, 2008, (3): 50-54.)
- [2] 朱朝辉, 姚艳霞, 杨金焕, 等. 低温氦气透平膨胀机的研究进展[J]. 低温与特气, 2003, 21(1): 1-6. (Zhu Zhaohui, Yao Yanxia, Yang Jinhuan, et al. The Research Development of Cryogenic Helium Turboexpander[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2003, 21(1): 1-6.)
- [3] 侯予, 王瑾, 熊联友, 等. 气体轴承在低温透平膨胀机上的应用[J]. 低温工程, 2001, 121(3): 29-33. (Hou Yu, Wang Jin, Xiong Lianyou, et al. The Application of Gas-bearing in Cryogenic Turbo-expander[J]. Cryogenics, 2001, 121(3): 29-33.)
- [4] 王湘卿, 李中华. 装甲车辆空气循环空调系统的概况与发展[J]. 车辆与动力技术, 2006, (1): 52-57. (Wang Xiangqing, Li Zhonghua. Survey and Development of Air Refrigeration Conditioning for the Armored Vehicle[J]. Vehicle & Power Technology, 2006, (1): 52-57.)
- [5] 李敏华, 巫江虹. 空气制冷技术的现状及发展探讨[J]. 制冷与空调, 2005, 5(2): 11-15. (Li Minhua, Wu Jianghong. Research about the Actuality and Development of Air Refrigeration Technology[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2005, 5(2): 11-15.)
- [6] 侯予, 王瑾, 熊联友. 高速透平气体轴承试验台的建立[J]. 润滑与密封, 2003, (5): 17-19. (Hou Yu, Wang Jin, Xiong Lianyou, et al. The establishment of multi-function test rig for gas bearings of high-speed turbo-machinery[J]. Lubrication Engineering, 2003, (5): 17-19.)
- [7] Colombo F, Raparelli T, Viktorov V. Externally pressurized gas bearings: A comparison between two supply holes configurations[J]. Tribology International, 2008, (42): 303-310.
- [8] 陈策, 杨金福, 聂超群. 动静压混合气体润滑轴承动态稳定性实验研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(12): 30-35. (Chen Ce, Yang Jinfu, Nie Chaoqun. Experimental Research on Hydrostatic-Dynamic Hybrid Gas Lubrication Bearings Dynamic Stability[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(12): 30-35.)
- [9] 杨金福, 杨晟博, 陈策, 等. 滑动轴承-转子系统的稳

- 定性研究[J].航空动力学报,2008,23(8):1420-1426.
(Yang Jinfu, Yang Shengbo, Chen Ce, et al. Research on sliding bearings and rotor system stability[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(8): 1420-1426.)
- [10] 杨金福, 刘玉晗, 陈策, 等. 高速空气循环制冷机转子性能试验研究[C//CD]. 全国第六届制冷空调新技术研讨会论文集, 武汉: 华中科技大学, 2010. (Yang Jinfu, Liu Yuhuan, Chen Ce, et al. Experimental investigation of the high speed air cycle refrigerator rotor performance[C//CD]. The sixth national cooling air conditioning new technical seminars, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.)
- [11] 刘玉晗, 刘宝玉, 杨金福, 等. 高速空气循环制冷机转速性能的试验研究[J]. 化工学报, 2010, 61(S2): 183-186. (Liu Yuhuan, Liu Baoyu, Yang Jinfu, et al. Experimental investigation on rotor-dynamics performance for high-speed air cycle refrigerator[J]. CIESC Journal, 2010, 61(S2): 183-186.)
- [12] Kulakov V M, Kulakov V. Expanders-compressors for air-separating plants[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2002, 38(3-4): 143-148.

作者简介

刘玉晗, 女(1986-), 硕士研究生, 辽宁石油化工大学, 石油天然气工程学院, 辽宁省抚顺市望花区丹东路西段一号, 113001, 15210467009, E-mail: okliuyuhan@163.com。研究方向: 高速透平膨胀机, 气浮轴承—转子系统稳定性研究。

About the author

Liu Yuhuan (1986-), female, graduate student, School of Petroleum and Gas Engineering, Liaoning Shihua University, Dandong West road 1#, Wanghua district, Fushun, China, 113001, 15210467009, E-mail: okliuyuhan@163.com. Research fields: High-speed Turbo-expander refrigerator, air-bearing system stability research.