

低温空气透平膨胀机的气体槽式动压轴承

郭有仪 叶士禄 邵平 郝彪 周宗瑾

(西安交通大学)

(江西制氧机厂)

摘 要

本文描述了使用于低温空气透平膨胀机的径向及轴向气体槽式动压轴承。透平膨胀机的转子为横卧式,转速为 10.7×10^4 r/min。在槽式动压轴承外使用了O形橡皮圈。与一般动压轴承相比,该轴承的间隙大,稳定性高。此外,为了避免轴承间隙内生成的热量传到透平冷端,采用了轴承内腔水冷却的结构。动压轴承低温空气透平膨胀机的运转试验及稳定性试验表明,该动压轴承的稳定性良好,可以使用于小型低温透平膨胀机上。

关键词: 低温膨胀机; 透平式膨胀机; 动压气体轴承

中国图书资料分类法分类号: T 37

0 概 述

在低温透平膨胀机中用气体轴承取代油轴承后,可使系统简单、紧凑,且膨胀工质不带油,这大大增加了运转的安全可靠性。因此,目前在国内外的各种空气透平膨胀机中均有采用气体轴承的实例^{[1][2]}。

气体轴承有静压轴承及动压轴承(或称自作用式气体轴承)两种型式。它们具有许多优点,如:利用低摩擦系数的气体来润滑轴承,可以实现高速运转;不受环境温度限制;使用寿命长等。动压轴承与静压轴承相比,由于它无需外界供给清洁的压力气体,可节省压缩轴承气所需要的能耗,还能与环境隔离减少事故,以及高速稳定性好等。因此,国内外均积极开展这方面的工作,例如,在国内的低温氮气透平膨胀机上,已开始应用径向气体动压轴承的研究^[3]。国外在立式安装的低温空气透平膨胀机中,载荷较小的径向应用结构复杂、加工难度大的可倾瓦动压轴承,载荷较大的轴向应用静压轴承。具体的实用于小型空气透平膨胀机横卧式转子上的技术未见有公开报导。

本课题是研究将气体动压轴承应用于小型高速旋转的低温空气透平膨胀机上。该膨胀机是配套用于 $150\text{m}^3/\text{h}$ 制氧机,参数为:进气压力 1.96MPa (20kgf/cm^2),进气温度 173K ,

收到日期: 1988-03-19

排气压力 0.589MPa (6kgf/cm^2), 流量 $500\text{m}^3/\text{h}$, 转速 $10.7 \times 10^4 \text{ r/min}$, 转子总质量 890g , 轴向推力 49N (5kgf)。所采用的气体动压轴承的特点为:

(1) 转子为卧式安装。运转的任何时候, 径向及轴向均有载荷的条件下, 同时采用动态稳定性较好的螺旋槽式气体动压轴承;

(2) 为了进一步提高轴承稳定性, 每只轴承外采用两只硬度为 78.5 I.R.H.D 的丁晴橡胶 O 形圈, 成为弹性支承的气体动压轴承;

(3) 为了减少启动及停车时轴承副的磨损, 在转速为 $3 \times 10^4 \text{ r/min}$ 以下时, 采用静压供气, 供气压力为 0.198MPa 。

1 气体动压轴承的结构

气体动压轴承是依靠楔形间隙中的粘性气体在运动时产生的压力与外载荷平衡的。这种由动压力形成的承载能力、刚性以及稳定性等问题的研究文章发表得很多。粘性流体在轴承中的动力学问题已能用数学方程描写, 即普遍化的雷诺方程, 并可用计算机求解。但是, 由于气体的粘性小, 在气体动压轴承中形成一定的承载能力也较为困难。因此, 目前在工业应用上气体动压轴承仅用于无载荷或载荷极小的场合, 而且轴承的精度要求也高。怎样找到结构简单, 承载能力较大, 动态稳定性又好的气体动压轴承是技术关键。经过各种分析研究后, 径向气体动压轴承采用螺旋槽形结构, 如图 1 所示, 其主要结构参数为

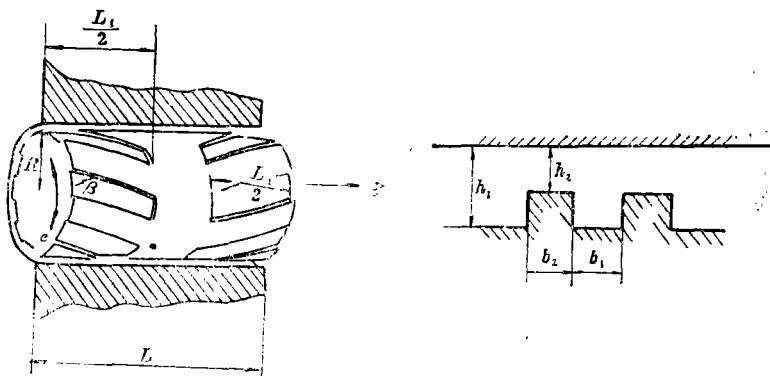


图 1 径向气体动压轴承结构示意图

$$\text{槽长与轴承总长之比为: } \frac{L_1}{L} = 0.35$$

$$\text{槽底与槽台宽度之比为: } \frac{b_1}{b_2} = 0.54$$

$$\text{螺旋槽数为: } n = 11$$

$$\text{螺旋槽角为: } \beta = 25^\circ$$

这种结构较为简单。实验证明能形成较好的承载能力, 而且无“分速混滑”的不稳定现象。

此外，这种结构所产生的摩擦热较小，轴承刚性也较好。轴向止推轴承有许多型式，如阶梯型轴承，可倾瓦型轴承、螺旋槽型轴承等。其中的螺旋槽型轴承的结构相对简单，易于形成动压，而且外侧泵入式结构承载能力及气膜刚度均大于内侧泵入式，并随着压缩性数的增大而增大^[6]。为此，采用外侧泵入式的螺旋槽式动压止推轴承。图 2 示出所用结构的简图及压力分布曲线。其主要结构参数为

$$\text{槽台与槽底宽度之比为: } \frac{b_1}{b_2} = 0.636$$

$$\text{内、外径之比为: } \frac{R_i}{R_o} = 0.5$$

$$\text{有槽面与止推面之比: } \frac{R_o - R_g}{R_o - R_i} = 0.72 \sim 0.75$$

$$\text{槽数: } n = 16$$

由于对数螺旋线比等速螺旋线的流动损失小，在止推面上采用对数螺旋线。

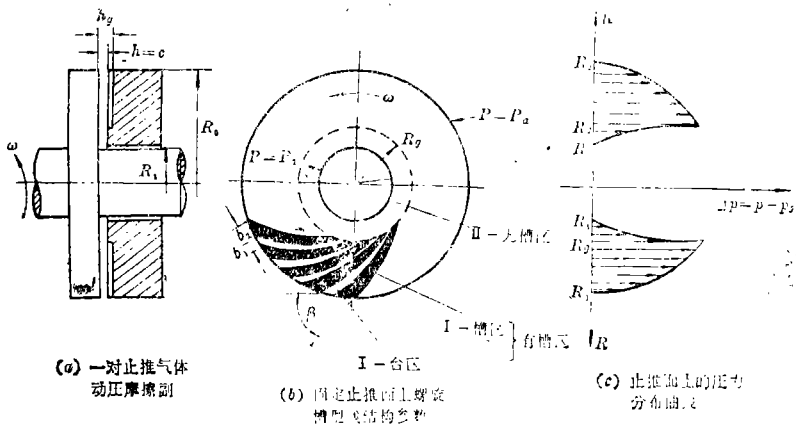


图 2 止推气体动压轴承结构示意图

虽然动压轴承的理论计算已经基本解决^{[7][8]}，但是，在各种计算方法中没有考虑许多实际条件的影响，例如，气流摩擦生成的热量对轴承及轴颈变形的影响，这种变形与选用的摩擦副的材料及结构有密切关系；气体粘性系数与温度的关系；低温条件下运转时引起的变形等。因此，轴承的几何参数是用设计计算与试验相结合的方法确定的。

2 试 验

样机的试验台如图 3 所示。空气经压缩机 1 升压后，在分子筛吸附器 2 之中除去压缩空气中水份及二氧化碳。干燥的空气经过节 1 阀进入透平膨胀机 4，膨胀对外做功，并使转子高速旋转。膨胀后的气体经过稳压容器 5 放空。在启动及停车时，部分干燥气体经节 2 阀进入精过滤器 3，过滤机械杂质后，作动压轴承启动及停车用气。调节节 1 阀可改变膨胀机进气压力，从而达到调节转速的目的。

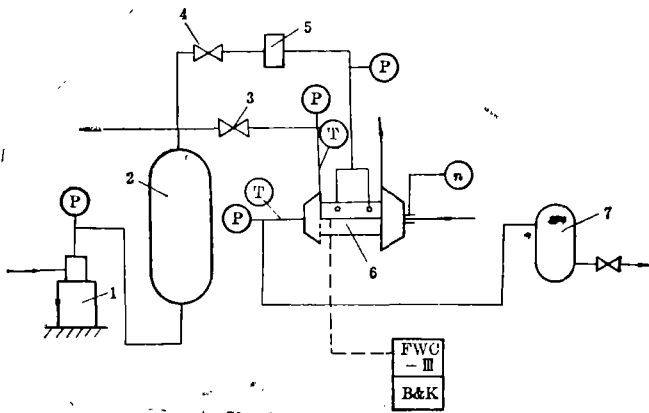


图3 试验台流程图

1—压缩机；2—分子筛吸附器；3—节1阀；4—节2阀；
5—精过滤器；6—透平膨胀机；7—稳压容器

的轴承稳定性及较大的承载能力。但随着间隙的减小，在轴承间隙内粘性流体引起的摩擦热将增大，同时，对制造及装配工艺也带来更大的困难。若摩擦生成热量过大，通过主轴传导到透平膨胀机冷端，也会引起透平膨胀机效率的降低。因此，通过试验选择的间隙只要能满足承载能力，且能稳定运转即可。此外，为了进一步提高轴承的稳定性，在轴承外使用了两只橡胶O形圈，用以吸收轴颈的涡动能量。试验表明，O形圈对轴承的稳定运转起了良好的作用，在试验中未曾发生分速涡动现象。而且，由于O形圈的使用，使轴承间隙比设计值大，这无疑对轴承的制造及装配带来许多好处。

为了确定间隙内粘性流体摩擦所生成热量，对轴承体外表面进行了温度测量，测量结果如图4所示。由图可见，在运转1小时后，轴承体发热及壳体散热达到平衡，此时轴承体的温度约78℃，环境温度为33℃。为了进一步降低轴承体的温度，采用复合结构的轴承，在轴承体的内部空腔内用水冷却。试验时，测得表面温度仅32℃，此时进水温度为31.5℃，出水

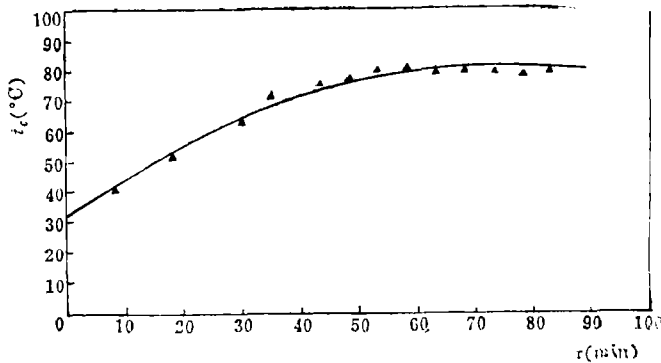


图4 轴承体温度与操作时间之关系

温度最高达 34.5℃，室温为 35℃，水流量为 28.8 L/h。因此，用内冷式水冷却可以收到

为了防止干摩擦的启动及停车对轴承副尺寸精度的破坏，在样机中，当转速在 $3 \times 10^4 \text{r/min}$ 以下时，采用 0.198MPa 的静压供气以保护轴承。

经过50余次的短期、长期、超速及低温条件的运转试验，表明该动压轴承能在 $10.7 \times 10^4 \text{r/min}$ 转速下稳定运转。

一般来讲，如选用较小的径向间隙，则将获得较好的

良好的效果。而且，由于使用了冷却水，可以保证轴承的发热量不致影响透平膨胀机本身的绝热效率。

人们可能认为，使用于低温透平膨胀机的动压轴承，由于轴承径向间隙小而很难制造。事实上，通过我们试验发现，选用螺旋槽式结构，加上O形圈的使用，由于其本身的高速稳定性，其轴承间隙将远大于其他场合下使用的动压轴承间隙，也大于理论计算所确定的轴承间隙。一般来说，轴承间隙可用下述公式表示

$$c = A c_{th}$$

式中

c 为装配间隙

c_{th} 为理论计算的径向间隙

A 为考虑轴承及轴颈变形影响，O形圈使用与否，冷却水使用与否等等因素的修正系数。

为了进一步测定轴承的动态稳定性，采用两只涡流传感器，安装在如图 5 所示的同一平面内互相垂直的位置上，由磁带机将振动信号记录下来，然后由频谱分析仪分析。在测试的同时，用双线示波器监视。图 6、图 7 为两种不同转速下的测试结果。由图可见，该轴承高速运转正常，具有良好的稳定

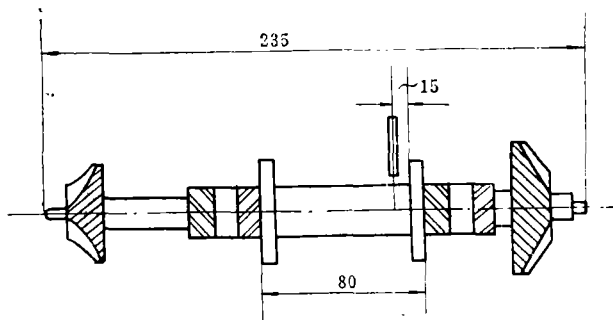


图 5 传感器在转子上的安放位置

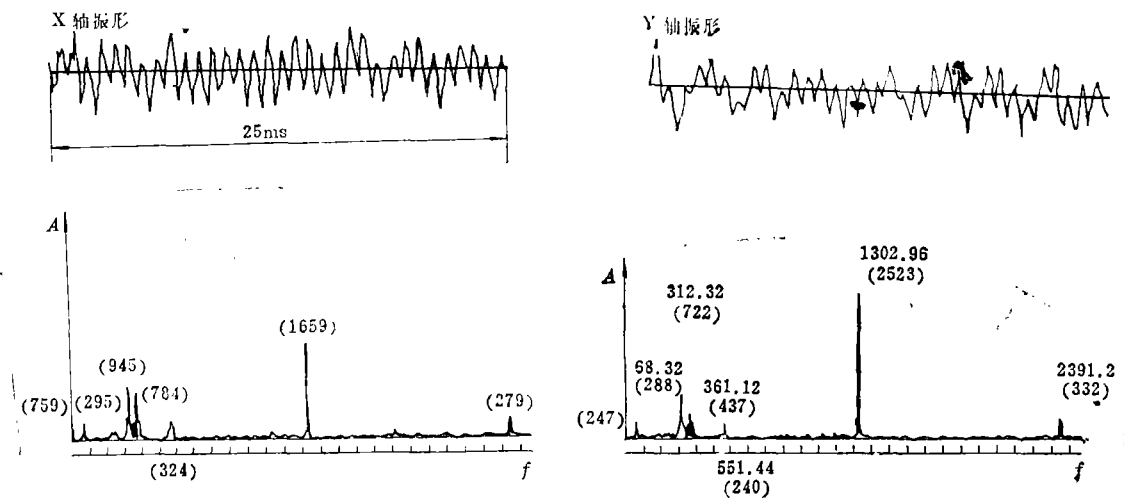


图 6 $7.8 \times 10^4 \text{r/min}$ 时的频谱分析

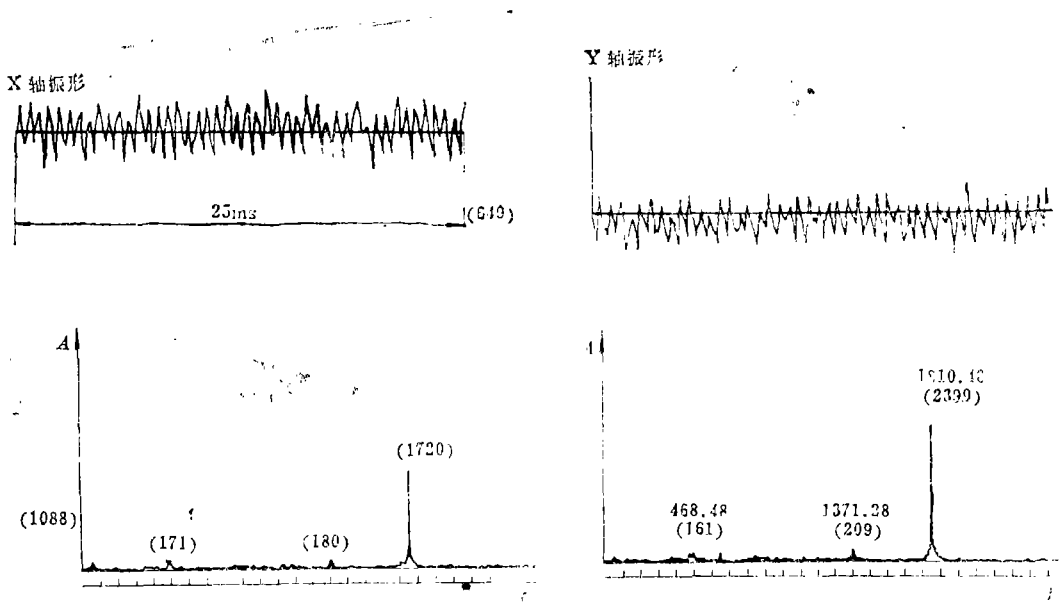


图 7 $10.9 \times 10^4 \text{r/min}$ 时的频谱分析

性，没有低频大振幅的干扰。这也说明在轴承的结构参数选择上所做的大量工作是合理的。

3 结 论

(1) 在小型低温空气透平膨胀机上使用弹性支承的动压轴承装机试验表明，该动压轴承的动态稳定性良好。因此，所选用的轴承结构及其参数，包括通过试验所得间隙是合理的。

(2) 在轴承内部采用水冷却的方法能有效的降低轴承体的温度。

(3) 在轴承外采用 O 形橡胶圈能得到增大径向间隙、放宽制造要求、以及增加轴承稳定性的好处。

感 谢

测试及分析工作是在西安交大轴承研究室朱均教授，丘大谋教授，虞烈及景敏卿老师的具体指导及参加下进行的。

江西制氧机厂许家鹏、于鹏等同志参加了部分试验工作；张祉祐教授对本文提出许多宝贵意见。作者在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 陈纯正, 郭有仪, 叶士禄. 空气轴承中压透平膨胀机试验研究. 制冷学报, 1982, (4)
- 2 计光华. 透平膨胀机. 机械工业出版社, 1982
- 3 Yang K J, Munday A J. A Grooved Self-Acting Gas Bearing for Use in Cryogenic Expansion Turbine. *AIChE Symp.* 1983, 79 (224): 90~93
- 4 Yang K J. Design of an Experimental Device With Herringbone Grooved Gas Journal Bearing for Use in High Speed Cryogenic Expansion Turbine. Report No: ME/82/8, University of Southampton, May, 1982
- 5 Vohr J H, Chow C Y. Characteristics of Herringbone-Grooved Gas-Lubricated Journal Bearings. *Journal of Basic Engineering, Trans ASME*, 1965, 87, Series D (3): 568~576
- 6 Malanoski S B, Pan C H T. The Static and Dynamic Characteristics of the Spiral-Grooved Thrust Bearing. *Journal of Basic Engineering, Trans ASME*, 1965, 87 Series D (3): 547~558
- 7 Wilcock D F. Design of Gas Bearing. Mechanical Technology Incorporated Latham, New York, December 1, 1971
- 8 十合晋一. 气体轴承——设计から製作まで. 共立出版株式会社, 昭和 59 年 12 月 25 日, 初版 1 刷発行.

A GROOVED SELF-ACTING GAS BEARING FOR A CRYOGENIC AIR TURBINE

Guo Youyi Ye Shilu

(Xi'an Jiaotong University)

Shao Ping Yu Biao Zhou Zongjin

(Jiangxi Oxygen Plant Manufactory)

Abstract

The paper describes herringbone journal gas bearing and spiral-grooved thrust gas bearing used in an air cryogenic turbine. The turbine with a rotation speed of 10.7×10^4 r/min is horizontal. The herringbone journal bearings make a feature of their external elastic rubber O-rings. In contrast to the conventional one this kind of bearing possesses better stability and bigger radial space. In addition, in order to avoid conducting the heat which results from the clearance of bearings to the cold end of the turbine, a special construction of journal bearings cooled by water inside is employed. The stability of the grooved self-acting gas bearing at a very high speed and the possibility of its use in a cryogenic air turbine are proved by the experimental results.

Keywords: *cryogenic expansion machines; turbo-expander; hydrodynamic gas-lubricated bearings*