

低温透平制冷机的静压气体润滑轴承研究

陈汝刚, 侯予, 袁秀玲, 陈纯正

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 对西安交通大学在研发低温装置的关键产冷机械——透平膨胀机的静压气体轴承时所取得的经验,进行了简要的回顾及总结.特别是对所研制的几种型式小孔供气静压气体轴承(双排径向、双排切向、多排切向等)进行了讨论,得出了小孔供气轴承间隙与失稳转速之间的关系以及最佳轴承间隙规律.研究发现:由普通的径向小孔供气轴承改为切向小孔供气轴承后,最佳轴承间隙增大75%,相应地失稳转速可提高30%.

关键词: 气体润滑;静压气体轴承;透平膨胀机;制冷机;多排切向

中图分类号: TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0792-05

Study of Gas Lubrication Externally-Pressurized Air Bearing for Cryogenic Turbo-Refrigerator

Chen Rugang, Hou Yu, Yuan Xiuling, Chen Chunzheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Gas lubrication technology applied in a cryogenic turbo-refrigerator is outlined and discussed on the basis of the investigations of externally-pressurized gas bearing turbo-expander. In particular, the valuable experience to develop several different kinds of external-pressurized gas bearings including double row radial gas supply, double row tangential gas supply, multi-row tangential gas supply is presented and summarized. Moreover, the relationship between gas supply bearing clearance and whirling speed is deduced. The optimal bearing clearance is also obtained. It is found that the optimal bearing clearance will increase by 75% when a common radial feeding-hole bearing is changed to tangential feeding-hole bearing. Correspondingly, the whirling speed can be improved by 30%.

Keywords: gas lubrication; static gas bearing; turbo-expander; refrigerator; multi-row tangential

在低温技术领域小型透平机械的发展过程中,解决高速轴承的润滑问题十分重要.西安交通大学具有30多年研发气体润滑轴承低温透平制冷机的经验及丰硕成果,近几年来在涉及空间制冷的科研中,着重于研发动压气体轴承用于微小型低温透平膨胀机.目前,美国最新研制的新型复合式脉管/逆布雷顿低温制冷机试验样机中,逆布雷顿级的透平膨胀机支承采用的是静压气体轴承,改变了航天逆布雷顿制冷机中只能使用动压气体轴承的情况,显示了静压气体轴承在复合式低温制冷机系统中的独

特应用,可提高系统的可靠性,该低温制冷机系统的性能在很大程度上取决于静压气体轴承的性能(刚度及耗气量)^[1-2].鉴于目前我校正在开展空间逆布雷顿制冷机的研究工作,适时总结以往我校在开发气体轴承过程中的经验是必要的.因此,本文主要结合低温装置的关键产冷机械——透平膨胀机的气体轴承,对透平式低温制冷机的气体润滑进行阐述,重点对我校在开发空分装置气体轴承透平膨胀机的历程中所取得的经验进行适当的回顾及总结.

1 透平制冷机械的小孔供气静压气体轴承

目前,在我国低温技术领域的高速透平制冷机械中,除少数国外进口的低温透平装置采用动压气体轴承外,大多数低温装置采用的仍是静压气体轴承,其中应用量最大的是空分装置中的低温透平膨胀机。下面,以我校与校外单位协作自主开发设计制造的 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 制氧机配套的 $10.7 \times 10^4 \text{ r/min}$ 静压气体轴承透平膨胀机为例,简要阐述几种不同静压气体轴承的研制经验,以便进一步加深了解并促进透平制冷机械中气体轴承的应用。

1.1 径向小孔供气的径向轴承

目前,高速静压气体径向轴承普遍应用的是刚性支承的双排径向小孔供气形式,最典型的为 $1/4$ 供气,每排 $4 \sim 8$ 个供气小孔,小孔直径为 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。为了保证气膜具有一定的刚度,需向轴承供给一定压力的气体,通常轴承的供气压力 p_s 保持在 0.6 MPa 。图 1 所示为我校研制的 150 制氧机气体轴承透平膨胀机转子-轴承系统示意图,其结构为:双排小孔供气,每排 8 孔,轴径为 25 mm ,轴承长度为 36 mm ,孔径为 0.35 mm ,转子的质量为 890 g ,设计转速为 $10.7 \times 10^4 \text{ r/min}$ [3]。

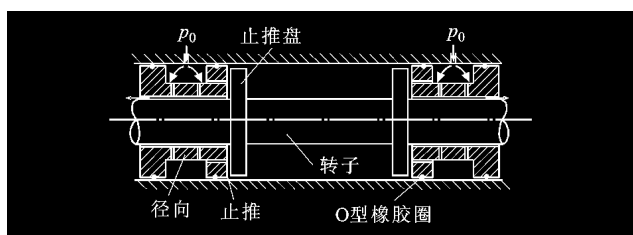


图1 透平膨胀机转子-轴承系统示意图

研制高速气体轴承的关键在于保证气体轴承在高速下具有足够高的稳定性,亦即转子具有高的自激涡动起始速度或失稳转速,提高气体轴承的失稳转速是开发气体轴承的关键。我校在研制 150 制氧机气体轴承透平膨胀机的过程中,为了在低轴承供气压力下达到高的失稳转速,曾对各种不同参数(如轴承间隙)的近 200 多副双排径向小孔供气轴承在不同供气压力下反复进行了大量试验,最终获得了图 2 所示的失稳转速 n_c 与轴承径向间隙(直径) $2Cr$ 的关系,表明在各种不同的轴承供气压力下,这种轴承均存在一个能使转子失稳转速达最大值的最佳间

隙 $2Cr_{\text{opt}}$,并且转子失稳转速对轴承间隙的变化相当敏感,即当轴承间隙偏离此最佳间隙时,则转子失稳转速迅速降低。

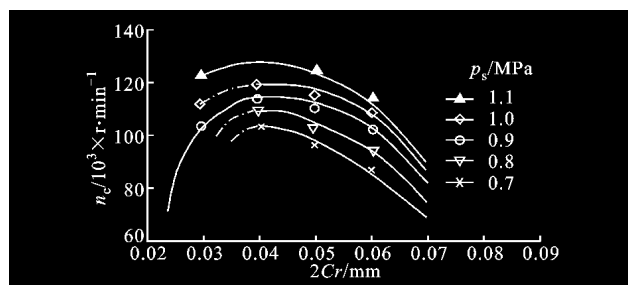


图2 双排径向小孔供气轴承失稳转速与径向间隙的关系

通常机器在运转使用时,希望轴承能保持最佳间隙(文献[3]的试验结果为 $2Cr_{\text{opt}} = 0.04 \text{ mm}$)。但是,在研制过程中发现,即使轴承保持在最佳间隙,这种简单的双排径向小孔供气轴承也需要较高的供气压力(0.7 MPa 以上),才能满足较高失稳转速的需求。显然,高供气压力导致高的轴承耗气量,这会降低透平膨胀机的经济性。为此,我校在 150 制氧机气体轴承透平膨胀机上曾进一步开发研制了弹性支承的双排径向小孔供气轴承,即在原轴承体外侧两端加工 2 个环槽并装设 2 个 O 形橡胶圈,使装在透平膨胀机机体上的轴承体处于弹性支承状态。由图 3 可以看出,转子(质量为 m_1)支撑在代表气膜的弹簧 1(刚度系数为 K_1 、阻尼系数为 C_1)上,轴承体(质量为 m_2)支撑在代表 O 形橡胶圈的弹簧 2(刚度系数为 K_2 、阻尼系数为 C_2)上,对这种采用 O 形橡胶圈的弹性支承气体轴承的简化模型进行理论分析及计算后,可得出转子失稳转速 [3]

$$n_c = \frac{60(1+R)}{\pi} \left(\frac{K_2 C_1 R + K_1 C_2}{(m_1 + m_2) C_1 R + m_2 C_2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

而刚性支承时的失稳转速

$$n_c = \frac{60}{\pi} \left(\frac{K_1}{m_1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

显然,弹性支承的转子失稳转速比刚性支承的失稳转速大,表明在提高透平膨胀机的气体轴承稳定性方面,弹性支承比刚性支承好。大量的试验研究也表明,所采用的橡皮加稳空气轴承与普通的刚性支承双排径向小孔供气轴承相比,透平膨胀机的失稳转速得到了显著提高。但是, O 形橡胶圈受到了使用温度、工质等条件的限制(通常橡胶玻璃化温度在 -100°C 以上),因此这种橡皮加稳空气轴承只能用于温度不太低的使用场合。

为了适应更低的使用温度及不同使用工质的需

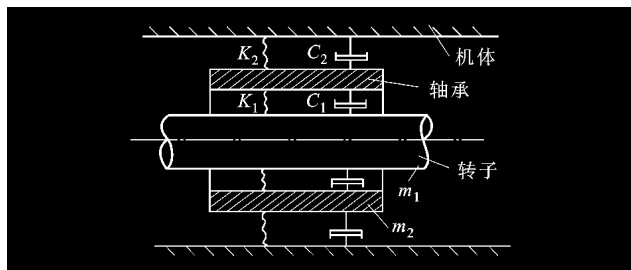


图3 弹性支承转子-轴承系统简化模型

要,发挥弹性支承能提高稳定性的特点,我校还曾在透平膨胀机上开发研制了另一种稳定性较好的新结构——统一供气双气膜轴承(见图4),即在轴承体的外圆柱面与机体的内表面之间保持一定的间隙,通以带压气体,形成具有一定刚度的外层气膜。以这一外层气膜代替橡皮加稳轴承中的O型橡胶圈,不仅结构简单,而且适用范围更广泛,但该间隙需严格选择,其大小会大大影响透平膨胀机的可靠性及经济性,经理论分析计算及试验,该间隙同样存在一个能达到最大失稳转速的最佳值。因此,这种双气膜轴承在研制时必须严格控制轴承的内外两个间隙(即内外两层气膜),以保证透平膨胀机达到高失稳转速^[4]。试验研究表明,这种轴承的失稳转速与橡皮加稳气体轴承的失稳转速相当,但其轴承耗气量较一般气体轴承略大,在不计较轴承耗气量的使用场合,它不失为一种提高失稳转速的有效措施。

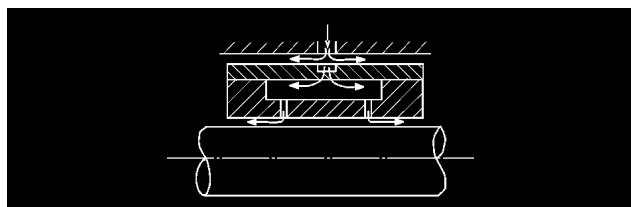


图4 双气膜气体轴承

1.2 切向小孔供气的径向轴承

将径向方向的小孔供气改为与轴承内孔相切的切向方向的小孔供气后,气体进入轴承间隙的方向与转子的旋转方向相反,是另一种可行的方式。我校曾对切向小孔供气轴承作了深入研究,将原有轴承的双排径向小孔供气改为双排切向小孔供气(见图5)。由于在较大轴承间隙中产生的与转子转向相反的附加周向流动,可以部分抵消轴旋转带动气膜的黏性环流,提供了附加阻尼,轴承的稳定性得以改善。根据分析计算,可得到双排切向小孔供气及双排径向小孔供气轴承的失稳转速 n_{ct} 及 n_{cr} 所分别对应的角速度 ω_{ct} 及 ω_{cr} 之间的关系^[5]为

$$\omega_{ct} = \omega_{cr} + \omega_0 \quad (3)$$

$$\omega_{ct} = \frac{n_{ct}\pi}{30}; \quad \omega_{cr} = \frac{n_{cr}\pi}{30} \quad (4)$$

式中: ω_0 为气体绕轴承中心的附加环流角速度。显然,切向供气时的失稳转速要高于径向供气时的失稳转速。在轴承其他结构参数保持不变、仅改变不同的轴承间隙情况下,曾对100多副切向小孔供气轴承进行了大量的试验对比,得到了图6所示的双排切向小孔供气轴承的最佳参数规律,亦即双排切向小孔供气轴承能达到最大失稳转速 n_{max} 时的最佳轴承间隙,它比双排径向小孔供气轴承的最佳轴承间隙增大了75%,相应地失稳转速可提高30%。在一些仅要求适当提高运转稳定性的情况下,将双排径向小孔供气轴承改为双排切向小孔供气轴承是一种行之有效的措施。

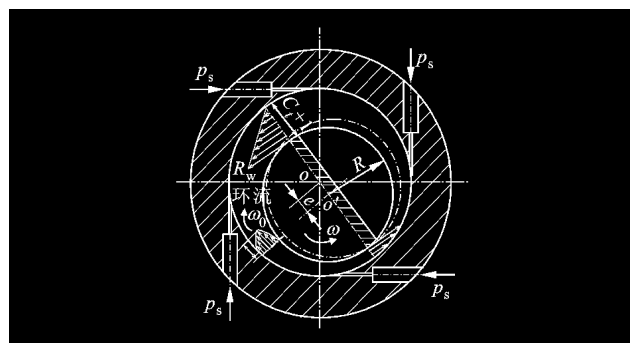


图5 切向小孔供气轴承及其间隙中的附加环流流动示意图

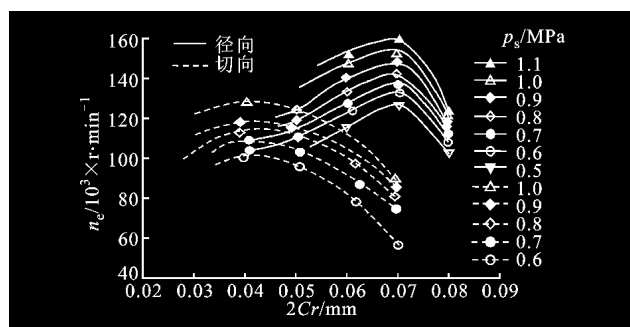


图6 双排切向小孔供气轴承失稳转速与轴承间隙

此外,顺切向供气方向与逆切向供气方向测试试验还表明,双排切向小孔供气轴承的进气方向若与转子旋转方向相同,轴承的稳定性不仅不能改善,还会明显降低,因此一副切向小孔供气轴承应有一定标记,安装时应注意方向,不得装反。在研制气体轴承透平膨胀机时,最大限度地提高失稳转速始终是要努力达到的目标,虽然改为双排切向小孔供气轴承后,在提高供气压力的情况下,研制的透平膨胀

机转速可以达到 $10.7 \times 10^4 \text{ r/min}$ 的使用要求,但为了保证该膨胀机在较低供气压力下失稳转速大于 $14 \times 10^4 \text{ r/min}$ 的要求(考虑到超速工况),1981 年我校又首次提出了多排切向小孔供气轴承的新设想:即在原来的两排切向小孔之间增加了 1~9 排切向小孔,每排 4~8 孔,形成了 2~10 排的各种多排切向小孔供气轴承,曾经在轴承间隙为 0.05~0.12 mm 及供气压力为 0.5~6 MPa 的众多工况下,对各种不同方案的多排切向小孔供气轴承进行了大量试验研究.结果证明,这种新结构是提高运转稳定性简易可行、十分有效的方法^[6].根据大量的试验数据整理得出了图 7 所示的失稳转速随轴承间隙变化的规律^[7],可以看出:多排切向小孔供气轴承的失稳转速受轴承径向间隙的影响较小,双排小孔供气轴承受轴承径向间隙的影响较大;多排切向小孔与普通的双排径向小孔供气轴承相比,失稳转速可提高 2 倍以上.

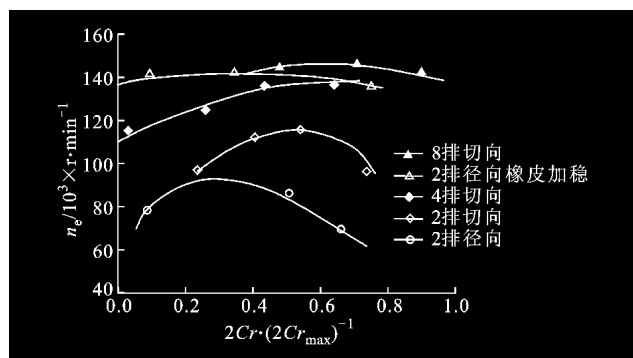


图7 多排切向小孔供气轴承的稳定性

1.3 小孔供气的止推轴承

目前,国内生产的静压气体轴承低温透平膨胀机上的止推轴承基本上都采用多供气孔的平板止推轴承,且多数均设有均压槽,通常径向轴承与止推轴承连为一体,由同一压力气源供气.由于止推轴承承受了透平膨胀机转子较大的轴向推力,因此要求止推轴承具有良好的承载能力,特别是当前低温透平膨胀机的制动风机希望改用增压风机的情况下,进一步增大了轴向推力,则更要求提高止推轴承的承载能力.国内在开发气体轴承透平膨胀机的过程中,曾经在止推轴承结构上采取过一些提高承载能力的改进措施(包括改变供气小孔的布置方案等).由我校提出的高刚度止推轴承专利技术在大型增压透平膨胀机中发挥了很好的作用,保证了膨胀机的稳定运转,目前已在国内的诸多中小型增压透平膨胀机上付诸实用.

2 透平制冷机械的狭缝供气轴承

上述小孔供气的静压气体轴承,小孔是使外部加压气体进入轴承前产生节流效果的节流器,以便形成具有一定刚度及承载能力的润滑气膜.除此之外,在静压气体轴承领域还有狭缝节流、多孔质节流、环面浅腔节流等多种节流器型式.我国在发展低温透平膨胀机的过程中曾对狭缝供气轴承进行过开发研究,都是针对径向气体轴承的.其中,原中科院低温中心在微型试验透平上,对单排径向缝、环切缝及双排环切缝进行了试验研究.我校在 150 透平膨胀机上对双排环切缝、三排环切缝等狭缝供气轴承进行了试验研究,并进行了初步的理论分析与计算,均显示了切向缝对提高稳定性的积极作用^[8],但由于制造工艺复杂,这些试验研究也仅限于实验室范围,未能推广到工业产品上.在提高静压气体轴承稳定性方面,气体润滑理论分析表明轴向切向缝是最好的选择,但因加工限制,国内外过去一直未能进行试验研究.我校在探索高稳定性气体轴承的进程中,曾于 20 世纪 80 年代克服了重重困难在实验室内完成了这种轴向切向缝的研制及初步试验研究,并显示了它的有效性.本文因篇幅限制以及考虑目前国内尚无狭缝供气轴承透平制冷机械产品应用,因此这里对狭缝供气轴承不作进一步阐述.

3 结论和展望

从所研制的不同类型的气体轴承可以看出:轴承间隙中产生的与转子转向相反的附加周向流动,可以部分抵消轴旋转带动气膜的黏性环流,提供了附加阻尼,使轴承的稳定性得以改善.在不考虑轴承耗气量的使用场合,双气膜轴承不失为一种提高失稳转速的有效措施.多排切向小孔供气轴承的失稳转速受轴承径向间隙的影响不如双排小孔供气轴承的敏感,而且与普通的双排径向小孔供气轴承相比,失稳转速可提高 2 倍以上.

在普冷领域,静压空气轴承透平膨胀机作为环境模拟装置的冷源或各种不同用途的空气制冷机而具有一定的应用前景.虽然航空空调的涡轮冷却器、空间微型低温制冷机、高速透平压缩机等很多制冷与低温领域必须开发动压气体轴承才能满足使用要求,但透平低温机械的静压气体润滑轴承在高性能复合式低温制冷机中仍具有其独特的应用.复合式低温制冷机的关键部件之一是低温透平膨胀机,而

低温透平膨胀机的关键部分是用以支承高速转轴的转子-动力系统. 选择应用静压气体轴承, 是因为它简单, 而且能利用较大的轴承间隙, 相对于动压气体轴承, 其提供支撑时没有金属间的磨损. 这些特征使得低温制冷机制造费用降低, 运转可靠性高. 在努力开发研制新型动压气体轴承膨胀机的同时, 通过总结以往的经验, 有助于增加未来在复合式脉管/逆布雷顿低温制冷机上尝试使用静压气体轴承的可能性.

参考文献:

- [1] Evans J C, Nellis G F. Design and test of hydrostatic gas bearings for a hybrid cryogenic refrigerator [C]// Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division. New York, USA: ASME, 2003: 67-76.
- [2] Evans J C, Potratz S A, Maddocks J R, et al. Progress toward a pulse-tube/reverse-Brayton hybrid cryocooler [J]. Transactions of the Cryogenic Engineering Conference Advances in Cryogenic Engineering, 2006, 51:1481-1488.
- [3] 陈纯正. 中压透平膨胀机橡皮加稳空气轴承稳定性[J]. 西安交通大学学报, 1981, 15(4):13-24.
Chen Chunzheng. The stability of rubber-stabilized air bearings for medium-pressure expansion turbines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1981, 15(4):13-24.
- [4] Chen Chunzheng, Xia Xiangzu, Zhu Renchu. The double-gas-film bearing equipped on the cryogenic expansion turbine [C]// International Conference on Energy Saving in Refrigeration. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986:17-19.
- [5] 陈纯正, 夏祥祖. 低温透平膨胀机切向供气轴承的研究[J]. 西安交通大学学报, 1982, 16(3):101-107.
Chen Chunzheng, Xia Xiangzu. The research of tangential-hole gas supply bearings for the cryogenic expansion turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1982, 16(3):101-107.
- [6] 陈纯正, 夏祥祖. 透平膨胀机多排切向小孔供气静压气体轴承[J]. 西安交通大学学报, 1983, 17(4):1-4.
Chen Chunzheng, Xia Xiangzu. Externally-pressured gas bearings with multiple-rows of tangential feed-holes equipped on expansion turbines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1983, 17(4):1-4.
- [7] Chen Chunzheng, Xia Xiangzu. Stability research of external pressurized gas bearings for the cryogenic expansion turbine [J]. Cryogenics, 1986, 26 (7): 423-426.
- [8] Mori A, Chen Chunzheng, Mori H. Analysis of whirl instability in externally pressurized gas bearings with circular slots of tangential supply [J]. JSME International Journal, 1989, 32 (2): 308-315.

(编辑 王焕雪)