不同型线柔性轴承的性能分析及比较

陈 曦 袁重雨 祁影霞

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 柔性轴承的应力分布及动态刚度特性对低温制冷机的整体可靠性尤为重要. 以最大应力值、轴向刚度、径轴向刚度比为性能指标,对新设计的费马型线柔性轴承和其他两种柔性轴承进行对比研究. 通过有限元分析,对比了三者之间应力分布、应力变化及刚度变化特性. 设计制作了这3种不同型线的柔性轴承,并测试了3种柔性轴承的径轴向刚度,结果显示:费马型线柔性轴承的径轴向刚度之比最大,牛津型柔性轴承的径向刚度最小;费马柔性轴承的应力值最大,但最大应力值小于材料的疲劳应力,因此费马型线的柔性轴承在性能上优于其他两种柔性轴承.

关 键 词: 直线压缩机; 柔性轴承; 实验研究; 有限元分析

中图分类号: TB 6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)12-1625-04

Performance analysis and comparison of flexure bearings with different profile lines

Chen Xi Yuan Zhongyu Qi Yingxia

(School of Energy & Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: It is crucial to analyze the performances of flexure bearings which would influence the overall reliability of cryocoolers. The performance parameters of flexure bearings include the stress distribution, axial stiffness, and dynamic radial stiffness and so on. The Fermat flexure bearing was designed, which was analyzed and compared with the other two kinds of flexure bearings in the above aspects by finite element method (FEM) and experimental study. The three flexure bearings were fabricated, and the axial stiffness and dynamic radial stiffness were tested individually. The testing results agree well with the finite element analysis (FEA) results. They indicate that the Fermat flexure bearing owns the highest stiffness ratio. The radial stiffness of the Oxford flexure bearing is minimum. The maximum stress value of the Fermat flexure is highest among the three flexures, but which falls well below the material fatigue limit stress. Hence, the Fermat flexure bearing is superior to other two kinds of flexure bearings.

Key words: linear compressor; flexure bearing; experimental study; finite element analysis

柔性轴承是在圆形弹性金属薄片上通过线切割等方法加工出各种型线,使得在周向固定时,通过轴向力的作用,弹性薄片可以发生一定的轴向位移,同时保证轴承在径向上具有极大的刚度. 在20世纪80年代初,英国牛津大学首次设计了牛津(Oxford)型柔性轴承,应用在低温机械制冷机上,提高了低温制冷机的工作寿命,并在ERS-1ATSR卫星上得到成功应用[1]. 文献[2]阐述了开发和测试用于小型战术低温制冷机上的柔性轴承系统,该系统在一个低成本的程序包里成功的实现了柔性轴承较高径向刚度的设计特点,使得这种低温制冷机在消耗相同成本的情况下能提供

收稿日期: 2011-07-26; **网络出版时间**: 2012-11-16 11:07

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121116.1107.008.html

基金项目: 上海市教育委员会科研创新资助项目(10YZ96); 国家自然科学基金资助项目(50906054); 博士点新教师资助基金(20093120120006)

作者简介: 陈 曦(1977-),男,四川资阳人,副教授,Chenxistudy@163.com.

双倍的工作寿命. 文献[3]引用柔性轴承支撑技术开发了一系列低温制冷机. 该技术使其研发的LSF9 制冷机和 LPT9110 脉管制冷机的制冷量分别达到 6 W@80 K 和 500 mW@80 K,拓宽了 Thales Cryogenics 在民用和空间应用的领域. 美国 Sunpower 公司[4]在开发 M77 和 M87 系列自由活塞斯特林制冷机中使用了独特的两臂柔性轴承,在本文中命名为 Sunpower 柔性轴承. 2010 年,本课题组基于费马曲线方程开发了一种新型的三臂柔性轴承[5],并命名为费马柔性轴承(Fermat flexure bearing).

本文应用 AutoCAD,Pro/E 等工具对 3 种不同型线的柔性轴承建立三维模型,并通过建立有限元分析模型,应用 ANSYS 软件对 3 种型线的柔性轴承的应力分布、轴向刚度、动态径向刚度等性能进行分析. 通过 TLS 系列弹簧刚度测试仪和专门设计的径向刚度测试装置对低温制冷机用柔性轴承进行了实验研究,测试了 3 种柔性轴承的轴向刚度、径向刚度,并与模拟值进行了对比分析.

1 柔性轴承性能参数的分析

一般来讲,柔性轴承的性能主要是从 4 个方面来判断,即疲劳强度、径向刚度、轴向刚度、自然频率[6]. 弹簧的材料选择直接关系到弹簧的疲劳强度的大小,直线压缩机中柔性轴承通常采用优质弹簧钢(如 60Si2Mn)或马氏体不锈钢(如 7C27Mo2). 在给定柔性轴承中心一个轴向位移时,柔性弹簧最大应力值出现的位置和大小除了取决于弹簧材料和厚度外,还与柔性弹簧的型线结构有关. 为保证柔性轴承的长寿命运行,其最大应力值不能超过弹簧疲劳极限 σ_{-1}.

$$\sigma_{\max} = E \cdot \varepsilon < \sigma_{-1} \tag{1}$$

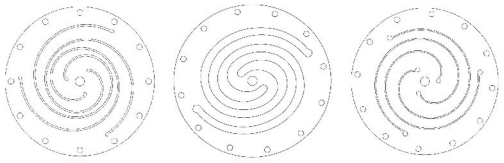
式中,ε 为弹簧的应变;E 是弹簧的弹性模量.

在低温制冷机中,柔性轴承为活塞高频的轴向直线运动提供较大的径向刚度,保证动磁式直线压缩机中的间隙密封不因充磁不均而受破坏,从而提高低温制冷机的使用寿命[7];同时活塞行程与制冷机的输入功率有关,柔性轴承具有合适的轴向刚度能为活塞往复运动提供一定行程的同时可减少活塞组件动子系统的不平衡振动输出,从而减少直线电机的输入功率[8].

2 柔性轴承的有限元分析

本文对如图 1 所示的 3 种柔性轴承运用 CAD 和 PRO-E 软件进行拟合建模后输出 IGES 文件,再将 IGES 文件输入到 Ansys10.0 软件中进行有限元分析.

其中柔性轴承的材料为弹簧不锈钢,材料的力学性能:弹性模量为 2.06×10^5 MPa,密度为 7.908×10^{-3} g·mm^{-3},泊松比为 0.3,疲劳强度为 550 MPa. 柔性轴承厚度为 0.4 mm,外径 65 mm,内孔径 4 mm.

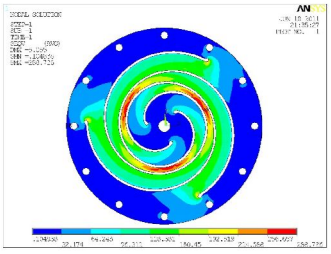


a Oxford 柔性轴承(英国)　b Sunpower 柔性轴承(美国)　c Fermat 柔性轴承(中国)

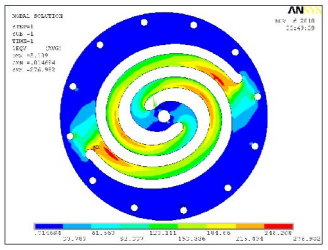
图 1 3 种典型柔性轴承

2.1 应力分析

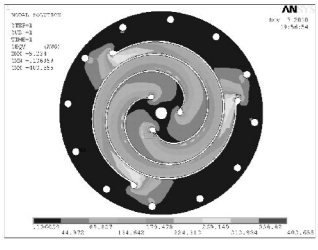
通过在单片弹簧的内孔施加不同的轴向位移负荷时,求解输出不同位移下 3 种弹簧的应力分布等值线图,并观察不同位移下弹簧表面上应力集中分布的位置和最大应力处. 图 2 给出了单片弹簧 5 mm 轴向位移时的应力 σ 分布图,应力 σ 的单位为 MPa.



a Oxford 柔性轴承



b Sunpower 柔性轴承



c Fermat 柔性轴承

图 2 柔性轴承的应力 σ 分布图

从图 2 可以看出 Oxford 柔性轴承最大应力出现在蜗旋臂中间的较窄处,而 Sunpower 和 Fermat 柔性轴承蜗旋臂上应力分布较为均匀,但最大应力出现在蜗旋槽尾端封闭处内侧附近.

在低温机械制冷机中,柔性轴承随活塞和排出器一起作高频往复的直线振动. 在固定的活塞冲程范围内,柔性轴承蜗旋臂的运动振幅不断变化,柔性轴承在最大振幅时的最大应力值必须小于弹簧材料的疲劳极限强度[9]. 结合本课题用斯特林低温制冷机中直线压缩机最大行程的要求,其最大轴向行程为 14 mm,在 0 ~ 7 mm 单向行程范围内,柔性轴承平均最大应力值随轴向位移增加的变化关系如下图 3 所示.

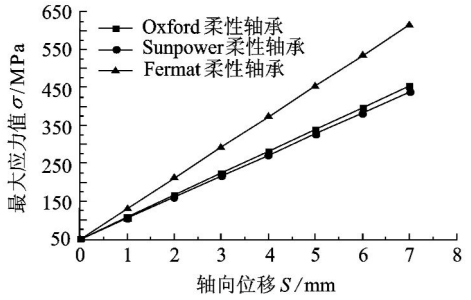


图 3　柔性轴承的最大应力值随轴向位移的变化关系

由图 3 可见,Oxford,Sunpower 和 Fermat 柔性轴承的最大应力值均与轴向位移呈现线性变化的关系. 随着轴向位移的增加,最大应力值不断增大,但 Fermat 型柔性轴承的最大应力值增加幅度更明显. 当单向轴向位移达到 7 mm 时,Fermat 柔性轴承的最大应力值为 565 MPa,稍大于材料允许的疲劳极限应力 550 MPa,长时间运行可能造成柔性轴承的蜗旋槽尾端出现疲劳破坏.

对此问题的解决,可以选用疲劳极限强度比本实验用的弹簧不锈钢更高的柔性轴承用钢材料,如 60Si2CrVAT. 此外,还可以对费马轴承的型线参数、蜗旋槽首尾端封闭方式进一步优化设计,以降低其最大应力值.

2.2　刚度比分析

柔性轴承的刚度定义为作用在柔性轴承上力的增量与在该力方向上产生的位移增量之比,即 $K=\Delta F/\Delta S$. 所研究的柔性轴承刚度包括轴向刚度和径向刚度,其中,径向刚度为径向力作用在柔性轴承内孔边缘上有往复轴向位移的动态刚度的变化特性. 如何衡量设计满足要求的更大径向刚度和合适的轴向刚度,本文采用径向刚度和轴向刚度之比作为标准:

$$\tau=\frac{K_r}{K_a}=\frac{F_r\cdot S_a}{F_a\cdot S_r} \tag{2}$$

式中,下脚标 r,a 分别表示径向和轴向.

结合式(2), 图 4 呈现出在 5 N 径向力作用时柔性轴承随不同轴向位移的动态径向刚度和轴向刚度之比的变化特性. 在 5 mm 轴向位移内,Oxford 和 Sunpower 柔性轴承的曲线基本保持为一条水平线,τ 值稍稍有些降低;Fermat 柔性轴承的刚度比值呈直线下降,但其 τ 值始终大于前两者,Oxford 柔性轴承的 τ 值最小.

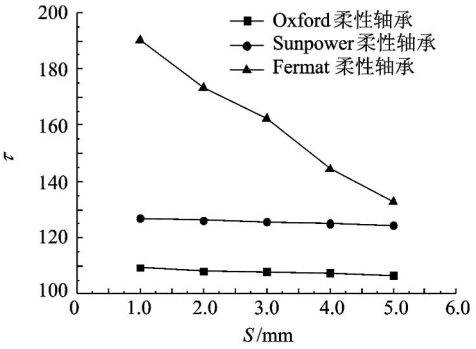


图 4　3 种柔性轴承的径向刚度和轴向刚度之比

3　柔性轴承的刚度测试与分析

本文采用 TLS 系列数显弹簧拉压试验机和自行设计的刚度测试装置(如图 5 所示),结合千分表分别对柔性轴承的轴向刚度和径向刚度进行了测试,并将实验数据与有限元模拟结果进行比较分析.



图 5　径向刚度测试装置

当分别在 TLS 试验机中输入 3 mm 的轴向位移和在刚度测试装置支架杆上施加 5 N 的径向力时,表 1 给出了实验测出的 3 种柔性轴承的轴向刚度值和径向刚度值. Oxford 和 Sunpower 柔性轴承的轴向刚度较为接近,径向刚度相差约 9.9%,而 Fermat 的轴向刚度为前两者的 1.8 倍左右,径向刚度约为前两者的 2.5 倍.

图 6 为 Oxford,Sunpower 和 Fermat 3 种柔性轴承的动态径向刚度的变化特性曲线图 Oxford 和 Sunpower 柔性轴承的实验曲线与模拟曲线在

0 ~ 3 mm 范围内几乎完全重合,同样 Sunpower 柔性轴承始终较 Oxford 柔性轴承的径向刚度大. 而 Fermat 柔性轴承的径向刚度变化较为明显:在0 ~ 1 mm 内,实验值与模拟值的径向刚度曲线相隔较明显,如 $S=0$ 时,实验值为 182 ($N \cdot mm^{-1}$),模拟值为 162 ($N \cdot mm^{-1}$),二者相差率为 10.9%;当轴向位移超过 2 mm 后,实验值与模拟值逐渐靠拢,当 $S=3$ mm 时实验值为 147 ($N \cdot mm^{-1}$),模拟值为 149.8 ($N \cdot mm^{-1}$),二者之间相差为1.8%.

表 1 柔性轴承的刚度实验值比较 ($N \cdot m^{-1}$)

柔性轴承	K_a	K_r
Oxford 柔性轴承	601	60 848
Sunpower 柔性轴承	567	67 568
Fermat 柔性轴承	1 066	166 667

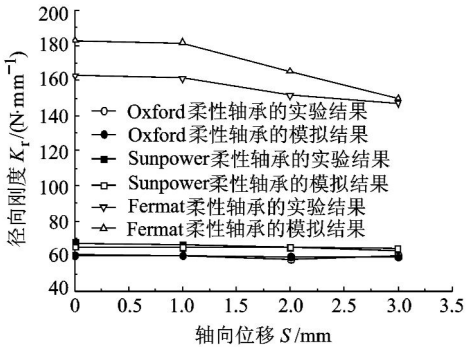


图 6 动态径向刚度实验与模拟的对比

通过实验研究对有限元模拟分析的结果进行了验证,发现 3 种柔性轴承的轴向刚度和动态径向刚度的值与有限元模拟值基本接近,柔性轴承的前期设计采用有限元法分析可以大大缩短开发新型柔性轴承的设计周期.

4 结 论

1) 渐变式臂宽的 Oxford 型柔性轴承的应力主要集中在臂宽较窄的中间部分;Sunpower 和 Fermat 柔性轴承的应力主要集中在蜗旋型线的终端弧形封闭处内侧附近.

2) 柔性轴承的最大应力值随轴向位移的增加而增加,而且采用 Fermat 柔性轴承的最大应力增加的幅度明显大于 Oxford 柔性轴承和 Sunpower 柔性轴承. 优化 Fermat 柔性轴承型线封闭端的应力分布,有利于推广费马型线柔性弹簧的应用.

3) 对比 3 种型线柔性轴承,Fermat 型柔性轴承能提供更大的径向刚度和合适的轴向刚度,即其径轴向刚度之比 τ 较大. 对于小活塞行程的压缩机来说保证间隙密封起到十分重要的作用. 同时有利于减少制冷机压缩机的体积和质量,从而实现制冷机的小型化开发需求.

参考文献 (References)

[1] Chen N, Chen X, Wu Y N. Spiral profile design and parameter analysis of flexure spring [J]. Cryogenics, 2006, 46(6): 409-419

[2] Rawlings R M, Miskimins S M. Flexure springs applied to low-cost linear drive cryocoolers [C]//2000 Infrared Technology and Applications XXVI. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000: 406-412

[3] Meijiers M, Benschop A A J. Flexure bearing cryocoolers at Thales cryogenics [C]//2002 Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference. AIP Conference Proceedings. Madison: American Institute of Physics, 2002: 699-706

[4] Wood J G, Lane N. Development of the Sunpower 35 we free-piston stirling convertor [C]//2005 Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum. Albuquerque: American Institute of Physics, 2005: 682-687

[5] 陈曦, 刘颖, 武卫东, 等. 柔性弹簧: 中国, CN 101893050 A [P]. 2010
Chen Xi, Liu Ying, Wu Weidong, et al. Flexure spring: China, CN101893050 A [P]. 2010 (in Chinese)

[6] Gaunekar A S, Goddenhenrich T, Heiden C. Finite element analysis and testing of flexure bearing elements [J]. Cryogenics, 1996, 36(5): 359-364

[7] 陈曦, 武卫东, 周志刚. 自由活塞斯特林制冷机间隙密封技术研究[J]. 低温与超导, 2008, 36(5): 5-12
Chen Xi, Wu Weidong, Zhou Zhigang. Study on the clearance seal in free-piston Stirling cooler [J]. Cryo & Supercond, 2008, 36(5): 5-12 (in Chinese)

[8] Veprik A, Nachman I, Pundak N. Dynamically counter balanced single-piston linear compressor of a cryogenic cooler [J]. Cryocoolers, 2004, 13: 241-250

[9] 陈楠, 陈曦, 吴亦农, 等. 涡旋柔性弹簧型线设计及有限元分析[J]. 中国机械工程, 2006, 17(12): 1261-1265
Chen Nan, Chen Xi, Wu Yinong, et al. Design and finite element analysis of spiral flexure spring [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 17(12): 1261-1265 (in Chinese)

(编 辑:张 嵘)