

精密轴承的预紧力定位包装研究

张振宇¹, 智慧², 田野², 孙智慧², 田亚男²

(1.中航工业哈尔滨轴承有限公司, 哈尔滨 150025; 2.哈尔滨商业大学, 哈尔滨 150028)

摘要: **目的** 解决精密轴承现有包装在运输过程中受到振动和冲击影响易导致其接触面间的表面质量下降的问题。**方法** 提出了一种刚柔结合的精密轴承包装方法, 通过预紧力定位装置消除轴承滚动体与内圈两者间游隙, 结合缓冲衬垫对包装件进行防护。通过应力-应变原理设计预紧力定位装置结构, 并利用有限元软件模拟该装置与轴承相互作用的工作过程, 研究该过程中轴承受力变化情况及预紧装置的力学表现。**结果** 仿真结果显示定位装置对轴承施加预紧力后游隙消失, 且轴承的弹性变形在可承受范围内。通过对整体包装件进行自由跌落试验, 测得轴承受到的冲击加速度小于 50G, 并检测轴承接触表面无损伤。**结论** 所提出的精密轴承包装方法能够对精密轴承提供保护作用。

关键词: 精密轴承; 定位装置; 跌落试验; 接触表面

中图分类号: TB482.2; TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0178-05

Pre-tightening Force Positioning Packaging of Precision Bearing

ZHANG Zhen-yu¹, ZHI hui², TIAN Ye², SUN Zhi-hui², TIAN Ya-nan²

(1.AVIC Harbin Bearing Co., Ltd., Harbin 150025, China; 2.Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of vibration and impact in transportation caused to the existing package of precision bearing, which tends to result in the quality deterioration of surface between its contact surfaces. A packaging method for precision bearing in rigid-flexible combination was proposed to eliminate the clearance between rollers and inner ring through pre-tightening force positioning device. The packaging pieces were protected combined with the buffering cushion. Based on stress-strain theory, the pre-tightening force positioning device was designed, and the processing of such device contacting with the bearing was simulated with FEM software. The bearing stress change and the mechanical representation of pre-tightening device during the said process were studied. The simulation results showed that the clearance was eliminated after the positioning device applied pre-tightening force on the bearing, and the elastic deformation of the bearing was acceptable. Through the free-fall test done on the whole packaging pieces, the measured impact acceleration borne by the bearing was less than 50G. According to the detection, the bearing contact surface was not damaged. The proposed packaging method can protect the precision bearing.

KEY WORDS: precision bearings; positioning device; drop test; contact surface

精密轴承是航空发动机中的重要零部件, 其质量决定飞机的性能和寿命。国内外科研人员对轴承在安装和使用过程中的性能表现研究的较为充分, 但在运输搬运过程中, 由于跌落和振动导致的轴承接触表面质量下降研究的较少。

李红光^[1]提出了滚动轴承预紧力的估算方法, 并

给出了预紧施加方式和调整的参考李新宁等人研制了轴承预紧力测试装置, 提高了预紧力测量精度减小了测量精度^[2]。王志伟等^[3]对多次低强度冲击对蜂窝纸板缓冲性能的影响进行了研究, 发现蜂窝纸板经多次低强度冲击后, 虽有局部折叠现象产生但仍能够对内部产品提供一定程度上的保护作用。卢立新等^[4]对

收稿日期: 2016-09-19

基金项目: 哈尔滨商业大学博士科研启动资助项目 (2016BS07)

作者简介: 张振宇 (1984—), 男, 硕士, 中航工业哈尔滨轴承有限公司工程师, 主要研究方向为轴承结构技术及其防护技术。

运输过程中的振动引起纸板疲劳破损情况进行了研究, 研究表明随着疲劳振动次数、振动强度的增加, 瓦楞纸板的承载能力降低, 缓冲性能下降。Wang jun^[5-6]等基于线性和非线性刚度建立了瓦楞纸板的动力学行为的耦合方程, 提出了包装系统跌落破损评估方法, 为产品包装系统的跌落损伤预估提供了理论基础。Griffiths K^[7]等通过对包装系统的振动数据分析, 提出了采用调制均方根和加速度功率密度谱来衡量包装件破损程度。蔡克中等^[8]建立了 C 楞瓦楞纸板的非线性包装系统模型, 并得到系统动力学方程, 通过试验验证了该模型可用于缓冲包装的设计。李志强和李克宏等^[9-10]采用全瓦楞纸板作为液晶显示器的缓冲包装, 通过研究证明了全瓦楞纸板可以对显示器提供缓冲保护作用。王哲等^[11]提出了采用瓦楞纸板作为轴承包装的方法和提高纸箱强度以及减少强度损耗的方法。文中提出了一种预紧力定位装置结合缓冲材料作为航空精密轴承包装的方法。设计加工试验产品并开展试验研究, 以验证该方法对轴承的保护作用。

1 预紧力定位装置结构设计及校核

利用金属弹性变形及应力-应变原理设计预紧装置包装, 见图 1, 通过锁紧螺栓使预紧环的三片结构互相靠近, 在此过程中环体直径变小会与轴承的滚动体相互接触, 产生预紧力, 使其紧靠并固定在轴承的内圈上, 保证轴承内圈与滚动体之间在运输过程中不会产生相对碰撞、磨损, 保护高精密轴承接触表面的质量。

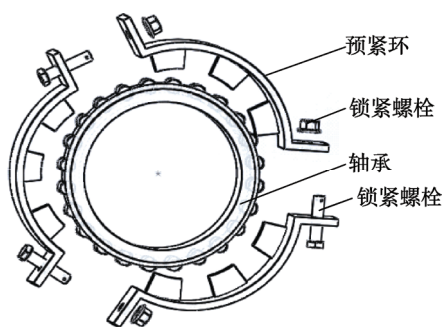


图 1 预紧力定位装置包装装置

Fig.1 Pre-tightening force positioning device and packaging device

高精密轴承的制造材质为 8Gr4Mo4V-YB4105, 屈服强度为 518 MPa, 弹性模量 $E=219 \text{ GN/m}^2$, 泊松比 $\nu=0.3$ 。预紧力定位装置与轴承滚动体直接接触, 而铝合金具有硬度相对较低且易于加工制造, 塑性好等优点, 适于作为预紧力定位装置的材料。预紧装置与圆柱滚子高精密轴承的装配立体图见图 2, 图 2a 显示装配体的正面结构, 图 2b 显示装配体的底面结构。

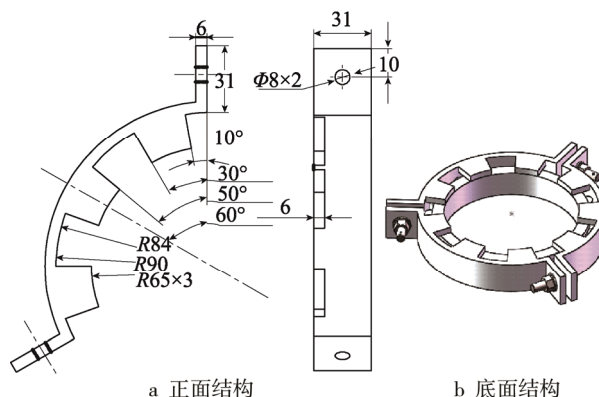


图 2 预紧装置尺寸结构

Fig.2 Structure dimension of pre-tightening device

在载荷 P 作用下, 线接触将扩展为矩形接触面^[24], 矩形接触面的宽度为 $2b$, 长度为 l , 已知高精密轴承的许用应力为 268 MPa。由于预紧力使装置产生弹性变形, 所以服从胡克定律; 载荷垂直于接触表面, 且轴承表面光洁度较高; 接触表面城点接触, 则接触面宽度相对于接触表面曲率变径可忽略不计, 因此, 可用赫兹接触公式^[12]计算滚动体与内外圈最大接触应力 $\sigma_{\text{接触}}$ 。

$$\sigma_{\text{接触}} = \frac{2p}{\pi l \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \frac{q}{\sum \rho}}} \quad (1)$$

式中: q 为载荷线密度; E_1, E_2 为接触面处铝合金和轴承钢的弹性模量; μ_1, μ_2 为接触面处铝合金和轴承钢的泊松比; $\sum \rho$ 为主曲率和; D_e 为高精密轴承内圈直径。当预紧力为 30 N 时, 接触应力 $\sigma_{\text{接触}}$ 为 5.34 MPa, 小于许用应力, 则高精密轴承处于弹性变形内。

高精密轴承各个滚动体与预紧装置接触处所受载荷全部是由锁紧螺母提供, 因此预紧装置所受载荷最大处在锁紧螺母端。

$$F_{\text{螺}} = F_N \sum_{i=0}^{\frac{m}{2}-1} \left[\cos \frac{\pi}{m} \left(\frac{1}{2} + i \right) \right] \quad (2)$$

式中: $F_{\text{螺}}$ 为螺栓处施加载荷; F_N 为每个滚动体承受载荷; m 为单片预紧装置接触滚动体总数; i 为滚动体个数, $i=1, 2, \dots, [(m/2)-1]$ 。

通过计算得到各个预紧装置的锁紧螺母端与螺栓连接处预紧力大小为 96 N; 将三维模型导入 Ansys Workbench 中进行仿真模拟, 进行求解并后处理, 分别查看预紧装置和轴承的总变形情况见图 3。

通过图 3 可以看出, 当锁紧螺母对预紧装置施加 96 N 的预紧力后, 预紧装置和去外圈轴承中各构件皆发生一定量的形变, 图 3a, b 显示装配体的最大变形量为 0.121 66 mm, 发生在预紧装置的锁紧螺母端, 图 3c 显示去外圈轴承被预紧装置预紧后的最大变形

量为 5.7528×10^{-3} mm, 属于弹性形变, 即预紧力产生的应力不会损坏轴承表面。

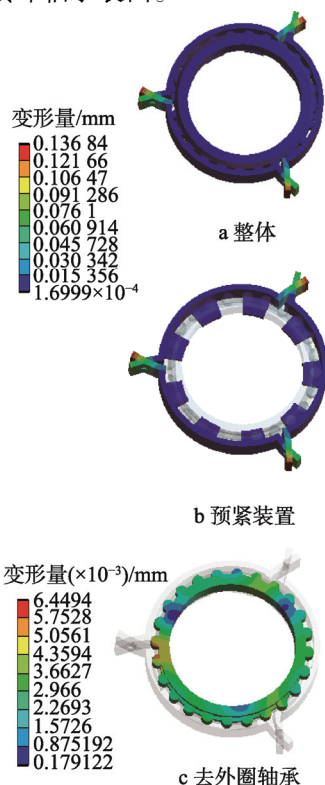


图3 变形云图
Fig.3 Strain contour

2 整体缓冲包装及其计算

该方案将轴承外圈和预紧装置包装件用上、中、下3层缓冲衬垫进行缓冲包装, 见图4。

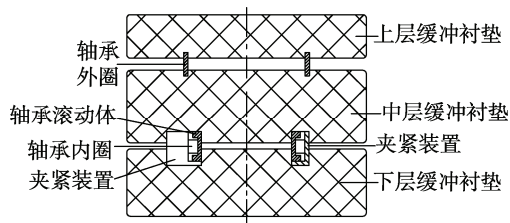


图4 缓冲包装方案
Fig.4 Schematic diagram of cushioning package

采用全面缓冲形式作为高精密轴承的包装形式。预紧装置与轴承装配后: 外包装直径为 200 mm, 质量为 4 kg, 轴承外圈质量为 0.811 kg, 外径为 180 mm, 内径为 170 mm, 由于该轴承用于航空发动机上, 则其脆值为 $50 G^{[13-15]}$ 。缓冲部位衬垫面积等于产品面积则:

$$A_1 = \pi R_1^2 - \pi r_1^2 + lh \quad A_2 = \pi R_2^2 - \pi r_2^2 \quad (3)$$

式中: A_1 为预紧装置包装件缓冲面积; A_2 为轴承外圈缓冲面积; R_1 为预紧包装件外圈半径; R_2 为轴承外圈外表面半径; r_1 为预紧包装件内圈半径; r_2

为轴承外圈内表面半径; l 为锁紧螺母端长; h 为锁紧螺母端缓冲宽度。

缓冲衬垫受最大应力为:

$$\sigma_{m1} = \frac{W_1 G}{A_1}, \quad \sigma_{m2} = \frac{W_2 G}{A_2} \quad (4)$$

式中: σ_{m1} 为预紧装置包装件缓冲衬垫所受应力; σ_{m2} 为轴承外圈缓冲衬垫所受应力; W_1 为预紧装置包装件重量; W_2 为轴承外圈重量; G 为高精密轴承脆值。

发泡聚乙烯目前被广泛应用于各类产品的缓冲包装中^[13]。发泡聚乙烯试样的密度 $\rho = 0.04 \text{ g/cm}^3$, 由于各制造商的工艺及设备选用差异, 需要取该批次产品进行标定。基于静压缩试验得到的 EPE 缓冲系数-应力曲线见图5。

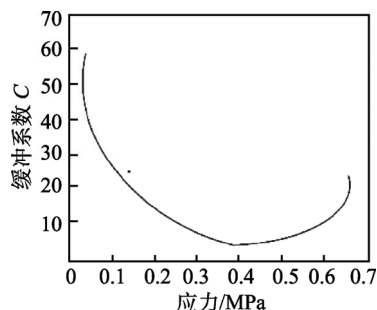


图5 发泡聚乙烯缓冲垫的缓冲系数-应力曲线
Fig.5 Buffer coefficient stress curve of EPE

根据 σ_{m1} 和 σ_{m2} 值做垂线得到低点缓冲系数 C_1 和 C_2 为 5 和 3.6。

缓冲包装的厚度根据式(5)求得:

$$d = \frac{CH}{G} \quad (5)$$

式中: H 为包装件跌落高度。利用公式 $A \geq (1.33T)^2 A$ 校核, 得到预紧装置包装件缓冲衬垫厚度 d_1 为 7.5 cm, 轴承外圈缓冲衬垫厚度 d_2 为 5.4 cm。

3 跌落试验

根据 GB 4857 对包有高精密轴承的整个包装件进行自由跌落性能测试^[16-17], 模拟运输、搬运过程中包装件受跌落冲击的影响程度, 验证包装对内装物的保护能力。将传感器贴附于轴承表面, 调整包装件跌落试验机确使跌落高度为 700 mm, 放置待跌落试验件见图6。跌落试验利用信号采集控制器采集跌落过程中的冲击加速度, 通过跌落冲击响应谱曲线得到相应的跌落加速度。进行 5 次面跌落试验得到跌落加速度分别为 436.519, 442.567, 421.528, 437.425, 441.250 m/s^2 。跌落冲击加速度的最大值皆低于高精密轴承的脆值为 500 m/s^2 , 符合缓冲包装技术要求, 缓冲性能合格。



图6 试验设备
Fig.6 Test equipment

4 接触表面质量检测

待跌落试验完成后拆解轴承,取其内圈与滚动体接触区域进行表面质量检测。普通包装与新型包装在跌落试验后,轴承表面同一接触区上的电子显微镜200倍放大图见图7。从图7中明显看到原有普通包装轴承接触区表面存在线状损伤,而采用新型包装的轴承表面接触区未出现损伤。

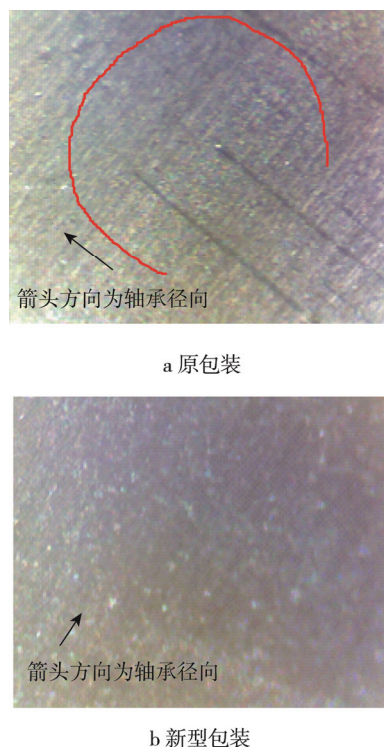


图7 200倍显微镜下轴承接触表面质量对比
Fig.7 Surface quality comparison of bearing under 200 times microscope

5 结语

设计了精密轴承预紧力定位装置,该装置能够利用弹性应变消除轴承游隙。通过对整体包装件进行跌落试验,达到轴承受到的冲击加速度小于50G的脆值要求;通过检测轴承接触表面质量,轴承的接触区

无表面损伤。提出的精密轴承包装方法,可减小跌落过程中轴承受到的冲击加速度,并保护轴承接触表面质量。

参考文献:

- [1] 李红光. 滚动轴承预紧的意义和预紧力的估算及调整[J]. 机械制造, 2004, 481(42): 44—46.
LI Hong-guang. The Significance of the Rolling Bearing Preload and the Estimation and Adjustment of the Preload[J]. Machinery Manufacturing, 2004, 481(42): 44—46.
- [2] 李新宁. 轴承预紧力测试装置的研制[J]. 机械设计与制造, 2009(2): 118—119.
LI Xin-ning. Development of Bearing Preload Testing Device[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009(2): 118—119.
- [3] 王志伟, 王立军, 徐晨翼. 多次低强度冲击对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. 应用力学学报, 2015, 32(3): 31—35.
WANG Zhi-wei, WANG Li-jun, XU Chen-yi. Influence of Many Low Strength Impact on the Cushioning Properties of the Honeycomb Paperboard[J]. Chinese Journal Applied Mechanics, 2015, 32(3): 31—35.
- [4] 卢立新, 孙聚杰, 王军. 疲劳振动效应对瓦楞纸板承载能力与缓冲性能的影响[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 43—48.
LU Li-xin, SUN Ju-jie, WANG Jun. The Effects of Fatigue Vibration on Carry Capacity and Cushion Properties of Corrugated Board[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 43—48.
- [5] WANG J, KHAN Y, YANG R H, et al. Dynamical Behaviors of a Coupled Cushioning Packaging Model with Linear and Nonlinear Stiffness[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38(6): 1625—1629.
- [6] WANG J, DUAN F, JIANG J, et al. Dropping Damage Evaluation for a Hyperbolic Tangent Cushioning System with a Critical Component[J]. Journal of Vibration and Control, 2012, 18(10): 1417—1421.
- [7] GRIFFITHS K, SHIRES D, WHITE W, et al. Correlation Study Using Scuffing Damage to Investigate Improved Simulation Techniques for Packaging Vibration Testing[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(7): 373—383.
- [8] 蔡克中, 王召霞. C楞瓦楞纸板跌落缓冲包装设计[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 25—29.
CAI Ke-zhong, WANG Zhao-xiao. C Flute Corrugated Board Drop Cushioning Packaging Design Optimization[J]. Journal of Packaging Engineering, 2014, 35(21): 25—29.
- [9] 李志强, 刘乘, 李国志. 液晶电视的瓦楞纸板缓冲设计[J]. 包装工程, 2007, 28(11): 103—104.
LI Zhi-qiang, LIU Chen, LI Guo-zhi. LCD TV Corru-

- gated Board Cushioning Packaging Design[J]. Journal of Packaging Engineering, 2007, 28(11): 103—104.
- [10] 张克宏, 杜俊娟, 夏业鲍, 等. 液晶显示器的全瓦楞纸板缓冲包装设计[J]. 包装与食品机械, 2009(6): 43—49.
- ZHANG Ke-hong, DU Jun-juan, XIA Ye-bao, et al. Liquid Crystal Display of the Corrugated Board Cushioning Packaging Design[J]. Packaging and Food Machinery, 2009(6): 43—49.
- [11] 王哲, 张军. 关于提高轴承包装纸箱强度的几点探讨[J]. 哈尔滨轴承, 2010, 31(1): 29—34.
- WANG Zhe, ZHANG Jun. Some Discussion on Improving the Strength of the Bearing Packing Cartons[J]. Journal of Harbin Bearing, 2010, 31(1): 29—34.
- [12] 陈於学. 基于接触力学的圆柱滚子轴承振动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- CHEN Yu-xue. Study on the Vibration of Cylindrical Roller Bearing Based on Contact Mechanics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [13] 高德, 计宏伟. 包装动力学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
- GAO De, JI Hong-wei. Packaging Dynamics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010.
- [14] 薛飞, 张伟. 跌落冲击试验机的控制和数据采集处理系统[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 54—59.
- XUE Fei, ZHAG Wei. Drop Impact Testing Machine Control and Data Acquisition and Processing System[J]. Journal of Packaging Engineering, 2013, 34(23): 54—59.
- [15] WANG L. Stress Analysis of the Packing Boxes of Middle Sized Motor in Dropping Condition of Circulation Environment Based on Finite Element Method[C]//Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), Proceedings 2013 International Conference on IEEE, 2013: 2364—2367.
- [16] TWEDE D, SELKE S E M, KAMDEM D P, et al. Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology[M]. DEStech Publications, Inc, 2014.
- [17] BERNAD C, LASPALAS A, GONZÁLEZ D, et al. Transport Vibration Laboratory Simulation: on the Necessity of Multiaxis Testing[J]. Packaging Technology and Science, 2011, 24(1): 1—14.