

文章编号 1004-924X(2016)06-1407-06

空间相机扫描机构固体润滑轴承组件的寿命试验

邓容^{1*}, 袁海涛¹, 胡亭亮¹, 孙小进¹, 杨军²,
伏彦龙², 胡明², 孙胜利¹, 翁立军²

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

摘要:开展了固体润滑轴承组件的真空加速寿命试验,以验证固体润滑轴承组件的设计是否满足在轨寿命要求。研究了MoS₂基薄膜固体润滑轴承组件在小角度摆动情况下的寿命。试验采用4对轴承模拟在轨±6°连续往复摆动,通过检测轴承组件工作时的摩擦力矩、电机电流和轴承温升判断轴承运行状态。结果显示,寿命试验运行正常,累计摩擦次数为 6.2×10^7 次。寿命试验后对轴承进行了尺寸精度和旋转精度复测,然后对轴承组件进行了解剖分析。复测结果显示,轴承尺寸精度和旋转精度与试验前一致,轴承润滑状态良好。试验结果验证了固体润滑轴承组件寿命满足在轨任务要求,为其它空间相机小角度摆动的扫描机构固体润滑轴承组件的长寿命设计提供了依据。

关键词:空间相机;扫描机构;固体润滑轴承;MoS₂;摆动;加速寿命试验

中图分类号:V416.5;TH133.33 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162406.1407

Life test of solid-lubricated bearing assembly for scan mechanism of space camera

DENG Rong^{1*}, YUAN Hai-tao¹, HU Ting-liang¹, SUN Xiao-jin¹, YANG Jun²,
FU Yan-long², HU Ming², SUN Sheng-li¹, WENG Li-jun²

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

* Corresponding author, E-mail: drdengrong@mail.sitp.ac.cn

Abstract: An accelerated vacuum life test for solid-lubricated bearing assemblies of the scan mechanism in a space camera was performed to obtain their working life. The working life of MoS₂ solid based solid lubrication bearing assembly under a small angle oscillation was researched. The continuous oscillation of 4 pairs of bearings at ±6° was simulated and tested. During the life test, the friction moment, the current of motor and the temperature rise of bearings were inspected to estimate their running states. The experiments show that the life test has run very well, the working life of the bearing assemblies is 6.2×10^7 times. The dimensional precision and running accuracy of the bearings were measured after life test, and then the dissection analysis of the bearing assemblies was also

收稿日期:2016-01-10;修订日期:2016-02-15.

基金项目:武器装备预研基金资助项目(No. 9140A21041210ZK0702)

taken. The results indicate that the dimensional precision and running accuracy of the bearings are the same as that of the life test and the lubrication condition of the bearings is good. These results validate that the working life of solid-lubricated bearing assemblies satisfies the requirement of task in orbit. It provides technological supports for the long life design of solid-lubricated bearing assemblies for scan mechanisms of space cameras under smaller angle oscillation.

Key words: space camera; scan mechanism; solid-lubricated bearing; MoS₂; oscillation, accelerated life test

1 引言

随着航天业的发展,人们对空间相机扫描机构的可靠性、寿命等要求越来越高,而固体润滑以其无污染、温度适应范围宽、高承载能力、抗辐照性等优点而得到广泛关注^[1-9]。

扫描机构是某空间相机的关键部件,采用 MoS₂ 基薄膜固体润滑,其在轨工作模式为 $\pm 6^\circ$ 连续往复摆动扫描,等效摩擦次数达到 5.1×10^7 次。由于扫描机构属于单点失效环节,针对其高精度、长寿命和高可靠性要求,开展了轴承组件的真空寿命试验。

目前国内外学者对固体润滑轴承寿命试验研究侧重在轴承的 360° 整圈连续旋转,而对轴承的摆动寿命研究较少。固体润滑轴承摆动寿命试验在国外公开文献中 NASA 有相关研究,而国内各研究单位未见公开文献报导。NASA MTI(Mechanical Technology Incorporated)报告中轴承低速和 $\pm 7^\circ$ 摆动工作模式,其中 $\pm 7^\circ$ 摆动运行次数 5.6×10^7 次, $\pm 80^\circ$ 摆动运行 7.9×10^4 次,试验结束后轴承状态良好^[10]。

本文针对 MoS₂ 基薄膜固体润滑轴承组件的小角度摆动情况下的长寿命进行研究。

2 理论分析

轴承小角度摆动的定义为,当轴承摆动时,轴承内、外圈沟道的同一位置只有一颗钢球经过。

扫描机构固体润滑长寿命设计主要考虑以下 2 点:

(1)在轨环境温度一天一个温度循环变化,扫

描机构不断经历温度循环考验,若轴承和与其有装配关系的轴及轴承座的材料线胀系数不一致,将导致轴承应力跟随环境温度每天一个循环变化,势必降低轴承使用寿命。所以,设计上扫描机构的轴和轴承座的材料与轴承保持一致,为 9Cr18,这样轴和轴承座材料的线胀系数与轴承一致,在外界环境温度交变时,轴承内应力基本不变。

(2)小角度摆动与连续转动的区别为:连续转动时,轴承的每颗钢球都在轴承的内、外圈整圈沟道上摩擦,而小角度摆动时轴承的内、外圈同一位置只有 1 颗钢球经过,容易造成膜屑在摆动角度的极限位置堆积,阻碍固体润滑薄膜转移。扫描机构所用轴承钢球为 25 颗,每颗钢球之间的角度为 14.4° ,因此 $\pm 6^\circ$ 摆动属于小角度摆动。根据扫描机构在轨实际运行模式,轴承在 $\pm 6^\circ$ 小角度摆动工况中插入 $\pm 20^\circ$ 大范围摆动,减少小角度摆动带来的膜屑堆积,同时大范围摆动有利于固体润滑薄膜转移,起补充润滑作用。

3 轴承参数

轴承组件由轴、成对轴承及轴承座组装完成,轴承型号为 71916 角接触球轴承,其轴和轴承座的外形、材料、装配方式与扫描机构整机状态一致。轴承套圈及钢球材料为 9Cr18,轴承内、外套圈工作表面及钢球表面溅射 MoS₂ 基固体润滑薄膜,保持架为聚酰亚胺基复合自润滑材料,轴承背对背成对安装,通过修磨隔圈刚性预紧,预紧力 220 N 和 100 N 试验轴承各 2 对。轴承的主要参数如表 1 所示。

表1 轴承主要参数

Tab.1 Main parameters of bearing

轴承型号	71916
轴承内径	$\varphi 80$ mm
轴承外径	$\varphi 110$ mm
轴承宽度	16 mm
钢球直径	9 mm
接触角	25°
参试轴承数量	4对(8套)
精度等级	P4
预紧力	220 N和100 N各2对
润滑方式	溅射 MoS ₂ 基薄膜

成对轴承与轴及轴承座组装后,进行了力学试验,然后开展寿命试验。

4 试验概述

轴承组件寿命试验分别对1#、2#、3#及4#试验组件分别进行了 6.2×10^7 次摩擦的真空加速寿命试验,轴承摆动角度为 $\pm 6^\circ$,摆动周期0.25 s,寿命试验加速因子为40。轴承组件安装在真空罐内,真空罐的真空度优于 1.3×10^{-3} Pa。试验罐内温度平常保持在 20°C ,且在试验的开始和结束阶段分别各加10个温度循环,低温 -10°C ,高温 40°C ,变温速度 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$,高低温保留时间为6 h。此外,在 $\pm 6^\circ$ 工况每运转5 d后,增加 $\pm 20^\circ$ 摆动运转,每次摆动163次。试验过程中检测并记录真空度、输入扭矩、摩擦力矩数据和参试固体润滑轴承温度。

寿命试验后,首先对轴承进行了尺寸精度和旋转精度复测,包括 Δd_{mp} 单一平面平均内径偏差, ΔD_{mp} 单一平面平均外径偏差, ΔB_s 内圈单一宽度偏差, ΔC_s 外圈单一宽度偏差, K_{ia} 成套轴承内圈的径向跳动, S_{ia} 成套轴承内圈端面对滚道的跳动, K_{ea} 成套轴承外圈的径向跳动, S_{ea} 成套轴承外圈端面对滚道的跳动。

轴承精度复测后,对磨屑、套圈沟道以及轴承钢球解剖分析样品,分别采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)和X射线

能量色散谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)对其表面形貌特征和化学元素成份进行分析。

5 试验结果

5.1 摩擦力矩

图1所示为71916轴承组件的力矩-摩擦次数曲线图。试验开始阶段,轴承组件的摩擦力矩约为 $76 \sim 90$ Nmm,随着试验的进行,摩擦力矩迅速下降,然后摩擦力矩成缓慢下降趋势,摩擦次数在 $1 \times 10^7 \sim 6 \times 10^7$ 次摩擦力矩在 $10 \sim 30$ Nmm左右振荡,试验结束时摩擦力矩约为 $6 \sim 8.7$ Nmm。主要原因首先是轴承组件通过一段时间的跑合,MoS₂基薄膜趋于均匀,有效降低了轴承的摩擦力矩;其次,MoS₂在真空中的摩擦系数比大气中低;再次,随轴承摩擦运转固体润滑薄膜会发生正常磨损损耗,将导致轴承钢球与内外圈之间间隙增加,从而造成轴承预紧力下降。由图1可知,轴承组件的力矩曲线在试验结束时仍然在浴盆曲线的底部,所以,可以推断轴承的寿命大于 6.2×10^7 次。

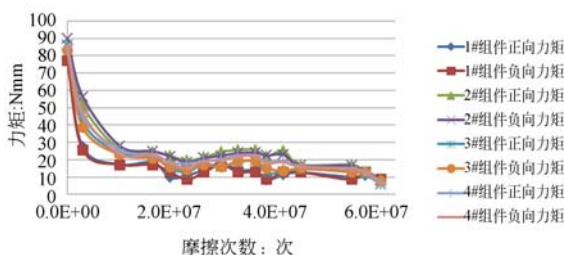


图1 轴承组件寿命试验力矩曲线图

Fig.1 Friction moment curve of life test of bearings assembly

5.2 试验后轴承复测

试验后,轴承组件出罐,对轴承的旋转精度和尺寸精度分别进行了测试。表2为轴承组件寿命试验轴承测试记录,比较试验前后的测试值,可得出结论,轴承精度未见明显变化,且都在P4等级内。所以,完成寿命试验的8套轴承未失效。

表 2 轴承组件寿命试验轴承测试记录

Tab. 2 Test result of bearings

(μm)

测试时间	精度要求 轴承编号	接触角 $23^\circ\sim 27^\circ$	Δd_{mp}	ΔD_{mp}	ΔB_s	ΔC_s	K_{ia}	S_{ia}	K_{ea}	S_{ea}
			$0\sim -7$	$0\sim -8$	$0\sim -150$	$0\sim -150$	≤ 4	≤ 5	≤ 6	≤ 6
试验前	33	$26^\circ 31'$	-1.5	-5	-11	-16	2	3	2	5
	14	$26^\circ 31'$	-0.5	-4.5	-14	-17	2	4	2	6
	40	$25^\circ 2'$	± 0	-2.5	-24	-21	2	3	2	6
	20	$25^\circ 46'$	± 0	-2	-15	-39	2	3	2	5
	23	$25^\circ 1'$	-2.5	-4	-10	-39	2	3	2	6
	26	$25^\circ 1'$	-3	-2.5	-10	-20	2	3	2	4
	13	$24^\circ 56'$	-1	-4	-25	-15	2	4	2	6
	29	$24^\circ 36'$	-1.5	-3	-11	-17	2	4	2	6
试验后	33	$26^\circ 31'$	± 0	-6	-13	-19	2	3	2	4
	14	$26^\circ 31'$	± 0	-5	-17	-21	3	4	2	3
	40	$26^\circ 12'$	± 0	-3.5	-26	-25	2	4	2	3
	20	$25^\circ 46'$	± 0	-4	-17	-43	2	3	3	4
	23	$25^\circ 48'$	-1	-4	-13	-43	2	3	3	5
	26	$25^\circ 1'$	-1.5	-2.5	-13	-22	2	3	3	5
	13	$25^\circ 20'$	-2.5	-5	-28	-19	2	3	2	5
	29	$25^\circ 0'$	-2.5	-4.5	-13	-20	2	4	2	6

5.3 试验后解剖分析

试验后,对磨屑、套圈沟道以及轴承钢球解剖分析样品,分别采用扫描电子显微镜 SEM 和 X 射线能量色散谱仪 EDS 对其表面形貌特征和化学元素成份进行分析。

由图 2 可知,轴承内外圈沟道表面固体润滑薄膜完整,轴承的外圈和内圈工作表面有明显光亮的摩擦痕迹,且沟道局部分布有少量磨屑。

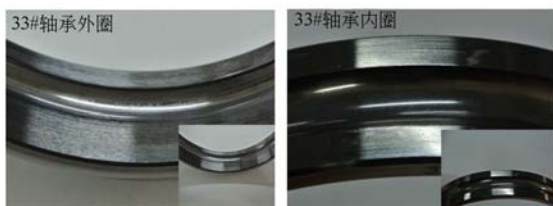


图 2 真空寿命试验后轴承内、外圈沟道

Fig. 2 Outer and inner race of bearings after vacuum life test

由图 3 可知,轴承钢球表面均呈现出较为均匀的灰黑色,钢球表面摩擦痕迹较为轻微,未见明显划痕,脱落及黑带等异常磨损现象。

由图 4 可知,保持架兜孔均有明显的摩擦痕迹。其摩擦痕迹较浅,磨损表面较为光滑,说明保持架在轴承运转中起到了补充润滑作用。保持架兜孔摩擦部位未见异常磨损痕迹。



图 3 真空寿命试验后轴承钢球

Fig. 3 Bearing balls after vacuum life test

图 5 所示为固体润滑轴承组件真空寿命试验后磨屑形貌的典型 SEM 照片。轴承磨屑化学元素成分 EDS 分析结果如表 3 所示。分析结果表明,1#、2#、3#及 4#轴承组件真空寿命试验后,各套轴承组件磨屑化学成分主要为 C、Mo、Au、O 及 S 元素,结合固体润滑薄膜材料及固体润滑保持架材料化学元素成分分析,C、O 元素主要来自保持架,而 Mo、Au 及 S 元素主要来自固体润滑薄膜。说明轴承在真空寿命试验过程中,其沟道工作部位及钢球表面固体润滑薄膜,以及固体润滑保持架因摩擦接触发生了一定程度的正常磨损。值得注意的是,各套固体润滑轴承试验



图 4 真空寿命试验后轴承保持架
Fig. 4 Bearing retainer after vacuum life test

组件磨屑未见明显较高含量 Fe 元素,进一步说明在真空寿命试验过程中两种预紧力轴承组件套圈及钢球均未发生明显基体磨损。

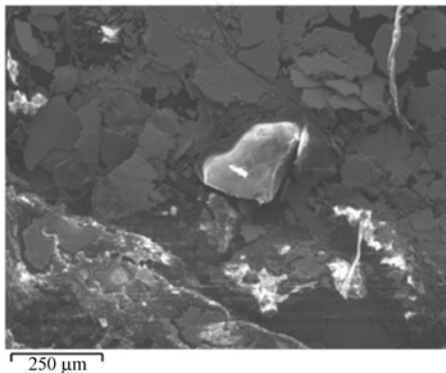


图 5 固体润滑轴承组件真空寿命试验后磨屑形貌图
Fig. 5 SEM photograph of wear debris after vacuum life test

表 3 寿命试验后磨屑成份 EDS 分析结果

Tab. 3 EDS elementary analysis on wear debris after vacuum life test (wt%)

轴承 组件	C	O	S	Mo	Au	Fe	Al	Si
1#	41.66	12.52	10.04	22.06	11.38	0.92	0.70	0.73
2#	13.95	6.60	21.28	38.79	18.84	0.30	0.23	\
3#	13.57	6.90	18.88	41.08	19.42	\	0.15	\
4#	11.55	8.41	20.71	40.36	18.95	\	\	\

图 6 和图 7 所示为固体润滑轴承真空寿命试验后轴承外、内圈摩擦迹部位的表面形貌 SEM 照片以及其化学元素成分的 EDS 分析谱图与结果。从 SEM 照片可能看出,固体润滑轴承工作滚道的表面形貌较为光滑,未发生异常磨损现象。

EDS 分析结果进一步表明,轴承摩擦迹虽已检测出 Fe、Cr 等元素,但仍含有 S、Mo 等元素,尤其是轴承内圈摩擦迹的 S 和 Mo 元素含量较高。检测出 Fe、Cr 的原因是 EDS 分析的电子穿透深度较深,穿透薄膜探测到的基体材料信号。轴承外圈摩擦迹中 S 与 Mo 的含量分别是 1.16 和 2.80 wt%,轴承内圈摩擦迹中 S 和 Mo 的含量分别是 6.56 和 11.98 wt%。

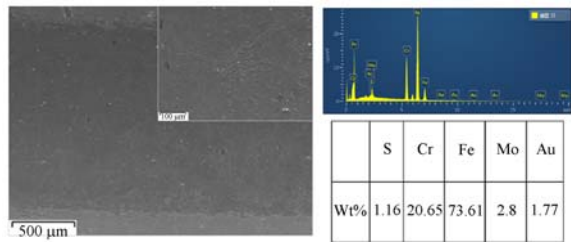


图 6 轴承外圈表面形貌 SEM 照片及 EDS 分析结果
Fig. 6 SEM photographs and EDS elementary analysis of bearing outer race

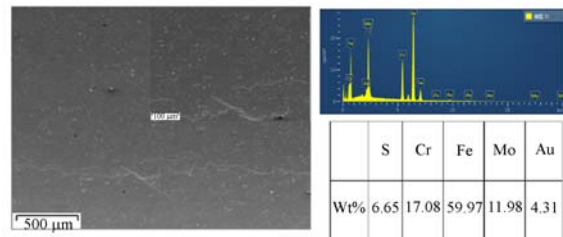


图 7 轴承内圈表面形貌 SEM 照片及 EDS 分析结果
Fig. 7 SEM photographs and EDS elementary analysis of bearing inner race

图 8 所示为固体润滑轴承钢球的 SEM 照片和 EDS 分析结果。由 SEM 照片可知,钢球表面均光滑,没有出现明显的划伤、凹坑及剥落等异常磨损现象。通过 EDS 元素成份分析结果可以看

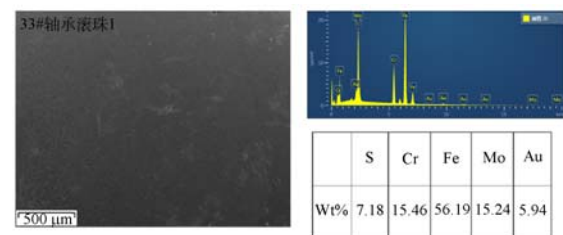


图 8 轴承钢球表面形貌及化学元素 EDS 分析结果
Fig. 8 SEM photographs and EDS elementary analysis of bearing ball

出,轴承钢球样品表面均含有一定量 S 与 Mo 等成份,两种元素的平均含量分别为 3.70 和 6.96 wt%,固体润滑轴承钢球表面仍然保持了较完整的 MoS₂ 基固体润滑薄膜。

6 结 论

某空间相机扫描机构轴承组件 4 对共计 8 套轴承均通过了真空寿命试验考核,轴承单点摩擦次数为 6.2×10^7 次。试验后,轴承旋转精度和尺寸精度与试验前比较未见明显变化,轴承润滑状态良好。所以,溅射 MoS₂ 基薄膜固体润滑轴承

寿命满足某空间相机扫描机构的在轨任务要求,且有 20% 余量。

轴及轴承座的材料与轴承一致,线胀系数一致,有利于减少温度变化对轴承应力影响,提高轴承组件寿命。

$\pm 6^\circ$ 小角度摆动中穿插 $\pm 20^\circ$ 大角度摆扫运转可帮助固体润滑薄膜转移,有效改善轴承组件润滑性能,提高轴承组件的可靠性。

文中的研究工作主要创新点为国内首次通过试验验证固体润滑轴承小角度摆动寿命超过 6.2×10^7 次,为其它空间相机小角度摆动的扫描机构固体润滑长寿命设计提供了依据。

参考文献:

- [1] 樊幼温. 红外地平仪固体润滑轴承组件的寿命试验[J]. 空间科学学报, 1996, (16): 71-76.
FAN Y W. Life test of a solid-lubricated ball bearing assembly used for satellite infrared earth sensor [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1996, (16): 71-76. (in Chinese)
- [2] 周明辉. 空间相机快门装置加速寿命试验方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学硕士论文, 2012.
ZHOU M H. *Research on accelerated life test method for shutter apparatus in space camera* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 上官爱红, 穆猷, 李治国, 等. 空间环境对 MoS₂ 基薄膜固体润滑运动部件寿命的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3264-3271.
SHANGGUAN A H, MU Y, LI ZH G, *et al.*. Effect of space environment on working life of solid-lubricated rotating parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3264-3271. (in Chinese)
- [4] ANDERSON M J, CROPPER M, IRELAND R W, *et al.*. Ball bearing testing in support of MTG IRS instrument [C]. *14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium-ESMATS 2011, Constance Germany*, 2011, 79-85.
- [5] FUJII Y, ONO H. Bearings with solid lubricants [J]. *Koyo Engineering Journal English Edition*, 2004, (164E): 24-29.
- [6] SHANKARA A, MENEZES P L, SIMHA K R Y, *et al.*. Study of solid lubrication with MoS₂ coating in the presence of additives using reciprocating ball-on-flat scratch tester [J]. *Sadhana, Part 3*, 2008, 33(3): 207-220.
- [7] BOHNER J J, CONLEY P L. On the torque and wear behavior of selected thin film MoS₂ lubricated gimbal bearings [R]. New York, NASA, 1988.
- [8] VIDEIRA E, LEBRETON C, LEWIS S. D *et al.*. Design, assembly and preloading of ball bearings for space applications-lessons learned and guidelines for future success [C]. *15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium-ESMATS 2013, Noordwijk, The Netherlands*.
- [9] ZARETSKY E V. *Tribology for aerospace applications* [M]. USA STLE publication, 1997.
- [10] MURRAY S F, HESHMART H, FSARO R. Accelerated testing of space mechanisms [R]. New York, USA. NASA, 1995.

作者简介:



邓 容 (1982—), 男, 湖南双峰人, 硕士, 副研究员, 2008 年于上海交通大学获得硕士学位, 主要从事空间遥感仪器扫描机构研制及试验验证。E-mail: drdengrong@mail. sitp. ac. cn



袁海涛 (1985—), 男, 四川南充人, 硕士, 助理研究员, 2009 年于天津科技大学获得学士学位, 2012 年于天津大学获得硕士学位, 主要从事空间运动部件设计、高轻量化反射镜支撑设计与力学分析。E-mail: yht928@163. com

(版权所有 未经许可 不得转载)