

文章编号 1004-924X(2014)12-3264-08

## 空间环境对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件寿命的影响

上官爱红<sup>1,2\*</sup>, 穆 猷<sup>1</sup>, 李治国<sup>1</sup>, 刘朝晖<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 西安光学精密研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了获得空间环境对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件寿命的影响情况并预测运动部件在轨寿命, 分析了空间环境对固体润滑膜层的影响。分析显示: 影响空间运动机构寿命主要有三大因素, 分别为: 航天发射环境、真空度和温度交变。设计了某空间运动部件的寿命试验, 试验模拟了影响空间运动机构的三个重要因素: 采用力学试验模拟航天发射环境, 热真空寿命试验模拟真空度和温度交变条件。采用 X 射线能量分散谱仪 (EDS) 对试验中运动部件的轴承未磨损滚道、磨损滚道表面膜层成分和滚珠表面材料进行了分析, 结果显示试验中未形成转移膜。根据试验结果预测试验中的 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件在轨寿命至少为 10<sup>7</sup> 次以上。最后根据影响运动部件寿命的因素, 提出了增加空间运动部件工作可靠性, 提高工作寿命的相关措施。

**关键词:** 空间环境; MoS<sub>2</sub> 固体润滑; 运动部件; 在轨寿命

**中图分类号:** V416.5; TH133 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3264

## Effect of space environment on working life of solid-lubricated rotating parts

SHANGGUAN Ai-hong<sup>1,2\*</sup>, MU You<sup>1</sup>, LI Zhi-guo<sup>1</sup>, LIU Zhao-hui<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: xiner@opt.ac.cn

**Abstract:** To explore the effect of space environment on the working life of solid-lubricated rotating parts and forecast their working life in orbit, the influence of space environment on solid-lubricated films was analyzed. The analysis points out that three main factors are relative to the working life of the space rotating parts, which are space launch environment, vacuum degree and alternating temperature. A life test was designed to simulate the three factors, in which the mechanical test was used to simulate space launch environment, and the thermal vacuum test was taken to simulate the vacuum and alternating temperature. The X-ray Energy Dispersive Spectrometer (EDS) was used to analyze the film composition of the unworn race and the worn race for a bearing in the solid-lubricated rotating part as well as ball surface materials. The analysis results show that the transfer film has not formed. On the result, it forecasts that the working life of the solid-lubricated rotating part in the test would be up to 10<sup>7</sup> times. Finally, it gives some necessary suggests that should be taken to increase the re-

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-02-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA7087034)

liability and improve the work life of space rotating parts.

**Key words:** space environment; MoS<sub>2</sub> solid lubrication; rotating part; life on the orbit

## 1 引言

随着航天事业的发展,空间运动部件如天线消旋机构、红外地平仪、卫星 SADA、扫描机构、二维转台等被广泛应用于空间载荷中,空间运动部件的寿命和可靠性也逐渐被重视。

由于大多数运动部件属于低速使用的部件,因此多使用固体润滑材料。目前在航天器中使用最广泛的固体润滑材料为二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)和聚四氟乙烯聚合物(PTFE),这两种材料均具有极低的滑动摩擦系数。大多数低速部件都采用 MoS<sub>2</sub> 作润滑材料,MoS<sub>2</sub> 润滑膜的可靠性直接影响空间运动部件的寿命<sup>[1]</sup>。目前大多数研究成果讨论固体润滑轴承在真空中的性能变化<sup>[1][9]</sup>,寿命试验时间也是以完成航天寿命要求为目的进行的,对固体润滑运动部件整机在空间环境中的工作寿命分析及寿命预测方面的研究不多。本文针对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件在空间发射环境和使用环境下的特殊性进行了分析,并根据试验结果预测了运动部件在太空中的寿命。

## 2 空间环境对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑膜层的影响

空间环境中可能对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑膜层产生影响的主要包括航天发射环境、真空环境、温度交变、外热流、粒子辐射和原子氧等<sup>[2]</sup>。

### 2.1 发射环境

在发射过程中,运动部件会受到加速度、振动和冲击载荷的影响,从而产生一定的振动响应,而振动响应可能会造成膜层磨损。如伽利略(卫星)上高位放大天线的某些弯曲零件(肋条)使用 MoS<sub>2</sub> 固体润滑膜层,发射后未能展开,就是由于在地面运输过程中的振动和发射过程中的冲击振动引起了磨损运动,磨掉了涂覆的膜层。因此应使用强黏附性涂层,如溅射润滑膜(避免擦涂膜),或者对构件进行预载。

### 2.2 真空环境

空间轨道环境的气压可达  $10^{-2} \sim 10^{-11}$  Pa,而真空条件下运动部件可能产生干摩擦和冷焊效应,当固体表面原有的吸附气膜、氧化膜等在真空中部分或完全消失时,在部件接触表面上就可能造成干摩擦或冷焊现象,从而增加磨损,降低寿命,甚至使运动部件失效。

空间运动部件冷焊的要素是:(1)真空度  $\leq 10^{-7}$  Pa;(2)接触的两个表面为同一种材料;(3)接触表面存在一定的正压力;(4)接触表面的光洁度要高。消除冷焊效应必须避免这 4 个因素同时存在,尤其是轨道高度上气压达到  $10^{-7}$  Pa 以下的运动部件要考虑采取相应的措施,而通过在表面溅射 MoS<sub>2</sub> 可以避免冷焊。

### 2.3 温度交变

空间轨道上的宇宙空间背景的辐射能量很小,相当于 4 K 低温的黑体。运动部件的温度取决于内部有源发热部件辐射的热量、航天器从外热源(太阳辐射、行星辐射、从行星反射的太阳辐射)吸收的热量以及从运动部件向深空辐射的热量。上述外热源对卫星进行不均匀的加热,并且在太阳辐射区和地球阴影区间交替运行。在阴影区时,裸露在空间中的运动部件如天线的温度将降至较低的水平,最低可达  $-100^{\circ}\text{C}$  左右。支承和旋转天线的轴会被冷却并发生收缩,进而冷却和收缩所有与之相连的零件。同样在太阳光的照射下,天线的温度上升,能达到  $+100^{\circ}\text{C}$  左右,这些轴会通过其他连接部件产生温度差,这种温差变化可能会引起轴承载荷的变化,从而作用到润滑膜层上。另外温度交变可能会影响到润滑膜层的附着性,应注意润滑膜的线膨胀系数与基体材料的匹配,避免造成润滑膜层的开裂和剥离。

### 2.4 带电粒子辐射

近地轨道空间中的带电粒子辐射主要包含质子流和电子流,质子流不会穿透航天器的外壳,所以对于裸露在空间中的运动部件,可采取保护措施。电子流有穿透性,但不会破坏固体润滑,一些聚合物如聚四氟乙烯聚合物 PTFE 在长期的使

用中将会受到影响(密度及结晶度增加)。

### 2.5 空间原子氧

近地轨道上主要的气态物质是原子氧。虽然原子氧的压力不是很高( $10^{-7}$  mbar),但入射到正对表面的流量却是显著的,如果运动部件直接暴露于其中,大部分固体润滑剂将会通过氧化及/或腐蚀的方式降解。所以对于在近地轨道长期运行的运动部件要避免直接暴露在原子氧环境中。

空间环境中带电粒子辐射和空间原子氧对固体润滑运动部件的影响可以通过裸露表面防护来减少或消除。而另 3 个环境影响因素:运发射环境、真空环境和温度交变对运动部件的影响只能通过分析和试验进行研究,这也是本文研究的重点。

## 3 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件的寿命影响因素分析

### 3.1 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件的润滑方式

在空间真空环境中,若空间运动部件冷焊的 4 个要素同时存在,可能会导致相互运动的部件表面产生黏合,黏合引起的冷焊可能使轴承出现不能正常动作或损坏等现象,这就是很多空间运动部件在太空中不能正常工作的原因。为防止轴承的冷焊现象,在轴承材料接触表面采用低剪切强度的材料如润滑脂、固体润滑或硬质耐磨薄膜进行摩擦副表面改性处理。

为了避免空间运动部件冷焊,目前常用的方式是将某一厚度的 MoS<sub>2</sub> 固体润滑膜溅射在轴承套圈沟道上,轴承的保持架也要采用自润滑材料。

### 3.2 发射环境对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件的寿命影响

发射后,在振动冲击条件下可能会引起磨损运动磨损涂覆的膜层,这种损坏是发射过程中一次直接造成的,会对运动部件的寿命造成影响,目前只能通过试验获得定性磨损情况。

### 3.3 真空环境对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件的寿命影响

在真空中,固体润滑运动部件的寿命长短主要取决于润滑膜的寿命,即 MoS<sub>2</sub> 膜和转移膜的

寿命。运动部件在运转初期,起主要润滑作用的是套圈沟道上的 MoS<sub>2</sub> 膜,随着 MoS<sub>2</sub> 膜的磨损,保持架的 PTFE 或 PI 通过钢球不断向沟道上转移,MoS<sub>2</sub> 膜润滑过渡为转移膜润滑,最终转移膜润滑起主要润滑作用<sup>[3]</sup>。

运动部件的固体润滑层随着工作时间的增加而磨损,会导致轴系摩擦力矩的增加和轴系膜层的破坏,为此,需要通过试验验证固体润滑轴系在真空中的工作性能以及膜层在试验中的磨损情况。

### 3.4 温度交变对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑运动部件的寿命影响

在溅射 MoS<sub>2</sub> 固体润滑膜层厚度已确定的条件下,温度交变对 MoS<sub>2</sub> 固体润滑膜层的寿命影响主要是由于运动部件应变引起接触应力变化,从而引起摩擦力矩变化,使得 MoS<sub>2</sub> 固体润滑膜层磨损加剧从而影响其寿命。

### 3.5 空间运动部件的寿命影响因素

对于空间运动部件来说,要获得长寿命,主要考虑下面几个因素:

(1)发射环境,要充分分析发射条件,地面试验量级要经过充分的论证。

(2)工作真空度

MoS<sub>2</sub> 固体润滑轴系应在真空度 $\leq 10^{-2}$  Pa 的环境中调试或工作。

MoS<sub>2</sub> 固体润滑轴承应在真空或干燥氮气中运转。这是由于 MoS<sub>2</sub> 是亚稳态的,在干燥或潮湿的空气中,MoS<sub>2</sub> 易与 O<sub>2</sub> 或 H<sub>2</sub>O 发生反应,生成 MoO<sub>2</sub>、MoO<sub>3</sub> 或 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,从而影响膜层性能,增大摩擦系数、减少寿命。理想情况下,这种试验应在真空或干燥氮气中进行,否则会导致润滑失效<sup>[1]</sup>。如果在空气中运行膜层没有被磨穿,低摩擦性能在真空环境下将被恢复。但涂层在空气中运行时间越长,其在真空中的寿命就越短。图 1 和 2 分别为溅射 MoS<sub>2</sub> 的摩擦系数和寿命随环境的变化。

(3)合适的工作温度

为了保证运动部件长寿命工作,要选取合适的工作温度,避免引起较大的结构应变从而加剧膜层的磨损。

其他诸如工作次数、转动速度和轴系预紧力等也会影响运动部件的寿命,这些参数在任务规划时已经确定或通过指标计算获得。

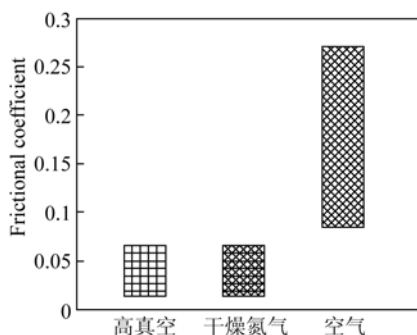


图 1 溅射 MoS<sub>2</sub> 膜层摩擦随环境的变化

Fig. 1 MoS<sub>2</sub> film frictional coefficient changed with environment

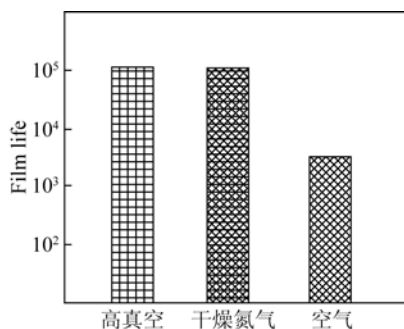


图 2 溅射 MoS<sub>2</sub> 膜层寿命随环境的变化

Fig. 2 MoS<sub>2</sub> film life changed with environment

## 4 某空间运动部件试验结果分析

### 4.1 试验产品选择

某空间运动部件中有 2 种固体润滑轴承分别为 1#、2#, 内外滚道溅射 MoS<sub>2</sub>, 厚度为 2 μm。轴系的运动形式为等速大范围往复转动, 转动速度为 1 和 4 (°) · s<sup>-1</sup>。1# 轴承预载为 150 N, 2# 轴承预载为 300 N。

### 4.2 试验流程

为了试验验证发射环境、真空环境和温度交变对运动部件的影响, 首先进行力学试验模拟力学发射环境, 其次进行热真空试验模拟真空环境

和温度交变。试验流程如图 3 所示。

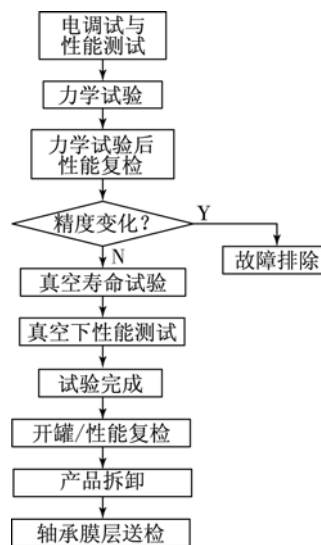


图 3 试验流程

Fig. 3 testing procedure

### 4.3 发射条件的力学试验

按照卫星发射条件对运动部件进行了力学试验, 力学试验在 10 t 振动台上进行, 试验前对运动部件的摩擦力矩进行了测量, 试验后对摩擦力矩进行复测, 摩擦力矩没有明显变化。

### 4.4 热真空寿命试验

发射条件下的力学试验完成后, 设计了热真空寿命试验<sup>[4-13]</sup>, 在西安光机所 KM3 真空罐中进行了热真空寿命试验, 试验条件为: 真空度 ≤ 1.3 × 10<sup>-3</sup> Pa; 高温 +55℃, 低温 -15℃。

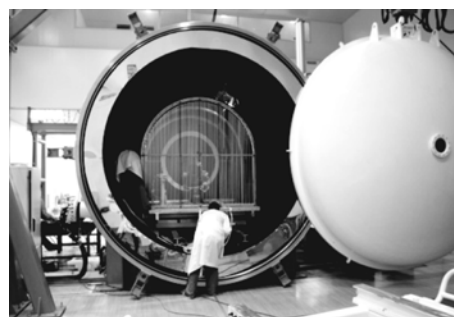


图 4 真空寿命试验所用 KM3 真空罐

Fig. 4 KM3 vacuum container used in vacuum life test

在试验中, 各轴承的轴向预紧力不变, 20℃ 条件下工作了 18 300 次; -15℃ 条件下工作了

8 556次,在+55℃条件下工作了 8 596 次,共工作了 35 452 次。试验过程中对摩擦力矩和运动性能进行了实时检测,在高温或低温时运动性能变差,回到常温时有所恢复。与试验前的摩擦力矩和运动性能相比,试验后的摩擦力矩增加了 30%左右。

#### 4.5 试验后膜层分析

##### 4.5.1 1#轴承膜层分析

试验后,1#轴承内圈滚道未磨损部分的主要元素成分为 S、Cr、Fe 和 Mo,S 和 Mo 为膜层成分。EDS 分析结果如表 1、2 所示,各材料成分的原子数分数为: S 11.14%、Cr 18.18%、Fe 61.86%、Mo 8.82%;1#轴承内圈滚道磨损部分(工作面)主要元素成分为 Cr、Fe、Mo,膜层成分 S 缺失,它们的原子数分数为 Cr 20.86%、Fe 78.23%、Mo 0.9%。

表 1 1#轴承内圈滚道未磨损区域的 EDS 元素分析

Tab.1 EDS elementary analysis on unworn region of inner ring raceway of 1# bearing

Element	Line	Mass fraction /(%)	Cnts/s	Atomic number score/(%)
S	Ka	6.38	64.89	11.14
Cr	Ka	16.87	110.81	18.18
Fe	Ka	61.65	274.60	61.86
Mo	La	15.10	69.26	8.82
Total				100.00

表 2 1#轴承内圈滚道磨损区域的 EDS 元素分析

Tab.2 EDS elementary analysis on worn region of inner ring raceway of 1# bearing

Element	Line	Mass fraction /(%)	Cnts/s	Atomic number score/(%)
Cr	Ka	19.58	137.01	20.86
Fe	Ka	78.85	348.18	78.23
Mo	La	1.57	6.69	0.90
Total				100.00

1#轴承的外圈滚道未磨损部分的主要元素

成分为 S、Cr、Fe 和 Mo,S 和 Mo 为膜层成分。EDS 分析结果如表 3、4 所示,各材料成分的原子数分数为: S 23.03%、Cr 13.13%、Fe 47.57% 和 Mo 16.27%;1#轴承外圈滚道磨损部分(工作面)主要元素成分为 Cr、Fe、Mo,膜层成分 S 缺失,其原子数分数为 Cr 19.99%、Fe 78.23% 和 Mo 1.79%。

表 3 1#轴承外圈滚道未磨损区域的 EDS 元素分析

Tab.3 EDS elementary analysis on unworn region of outer ring raceway of 1# bearing

Element	Line	Mass Fraction /(%)	Cnts/s	Atomic number score/(%)
S	Ka	13.10	139.61	23.03
Cr	Ka	12.11	74.66	13.13
Fe	Ka	47.11	207.78	47.57
Mo	La	27.68	132.98	16.27
Total				100.00

表 4 1#轴承外圈滚道磨损区域的 EDS 元素分析

Tab.4 EDS elementary analysis on worn region of outer ring raceway of 1# bearing

Element	Line	Mass Fraction /(%)	Cnts/s	Atomic number score/(%)
Cr	Ka	18.63	161.19	19.99
Fe	Ka	78.30	430.00	78.23
Mo	La	3.07	16.36	1.79
Total				100.00

由于运动部件的摩擦力矩并未出现大幅度的增加,且膜层成分未完全消失,所以 1#轴承未失效。从上述数据可以看到由于是轴主导转动,所以轴承内圈滚道磨损较外圈严重。

##### 4.5.2 2#轴承膜层分析

试验后,2#轴承内圈滚道未磨损部分的主要元素成分为 S、Fe、Cr、Mo,EDS 分析结果如表 5 所示,它们的原子数分数为 S 27.31%、Cr 12.02%、Fe 43.65% 和 Mo 17.02%;2#轴承内圈滚道磨损部分(工作面)主要元素成分为 Cr、Fe、Mo,膜层成分 S 缺失,它们的原子数分数为 Cr 19.72%、Fe 79.33% 和 Mo 0.95%。

表 5 2# 轴承内圈滚道未磨损区域的 EDS 元素分析

Tab. 5 EDS elementary analysis on unworn region of inner ring raceway of 2# bearing

Element	Line	Mass fraction / (%)	Cnts/s	Atomic number score / (%)
S	Ka	15.72	107.77	27.31
Cr	Ka	11.22	43.43	12.02
Fe	Ka	43.76	122.32	43.65
Mo	La	29.30	90.54	17.02
Total				100.00

表 6 2# 轴承内圈滚道磨损区域的 EDS 元素分析

Tab. 6 EDS elementary analysis on worn region of inner ring raceway of 2# bearing

Element	Line	Mass fraction / (%)	Cnts/s	Atomic number score / (%)
Cr	Ka	18.48	119.32	19.72
Fe	Ka	79.88	324.77	79.33
Mo	La	1.64	6.44	0.95
Total				100.00

2# 轴承外圈滚道未磨损部分的主要元素成分为 S、Fe、Cr、Mo、Au, EDS 分析结果如表 7、8 所示, 它们的原子数分数为 S 44.58%、Cr 4.46%、Fe 9.22% 和 Mo 32.28%, Au 9.47%; 2# 轴承内圈滚道磨损部分(工作面)主要元素成分为 Cr、Fe、Mo, 膜层成分 S 缺失, 它们的原子数分数为 Cr 18.92%、Fe 79.42% 和 Mo 1.66%。

表 7 2# 轴承外圈滚道未磨损区域的 EDS 元素分析

Tab. 7 EDS elementary analysis on unworn region of outer ring raceway of 2# bearing

Element	Line	Mass fraction / (%)	Cnts/s	Atomic number score / (%)
S	Ka	20.03	142.34	44.58
Cr	Ka	3.25	12.29	4.46
Fe	Ka	7.21	21.97	9.22
Mo	La	43.39	139.56	32.28
Au	La	26.12	7.88	9.47
Total				100.00

表 8 2# 轴承外圈滚道磨损区域的 EDS 元素分析

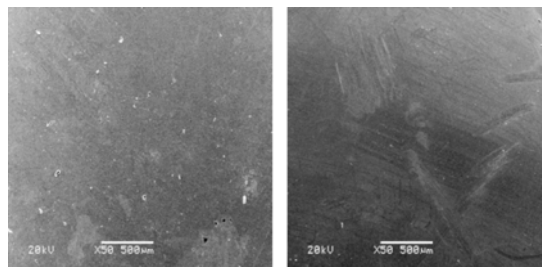
Tab. 8 EDS elementary analysis on worn region of outer ring raceway of 2# bearing

Element	Line	Mass fraction / (%)	Cnts/s	Atomic number score / (%)
Cr	Ka	17.64	119.97	18.92
Fe	Ka	79.51	342.15	79.42
Mo	La	2.85	11.86	1.66
Total				100.00

2# 轴承膜层成分未完全消失, 所以认为 2# 轴承未失效。从上述数据可以看到由于是轴主导转动, 所以轴承内圈滚道磨损较外圈严重。

#### 4.5.3 滚珠表面材料分析

图 5 所示为 2 套轴承滚珠表面 SEM 形貌照片。滚珠表面光滑, 无明显的划伤等异常磨损。表 9、10 所示为轴承滚珠表面的 EDS 元素分析结果。



(a) 1# 轴承滚珠 (b) 2# 轴承滚珠  
(a) 1# bearing ball (b) 2# bearing ball

图 5 滚珠表面 SEM 形貌照片

Fig. 5 SEM topographs of ball bearing surfaces

表 9 1# 轴承滚珠表面区域的 EDS 元素分析

Tab. 9 EDS elementary analysis on ball bearing surface of 1# bearing

Element	Line	Mass fraction / (%)	Cnts/s	Atomic number score / (%)
Cr	Ka	17.18	87.28	18.23
Fe	Ka	82.82	261.77	81.77
Total				100.00

EDS 元素分析结果表明:2 套轴承滚珠表面只检测到基体成分 Fe 和 Cr,没有薄膜组份,说明这 2 套轴承滚珠表面未形成明显转移膜。

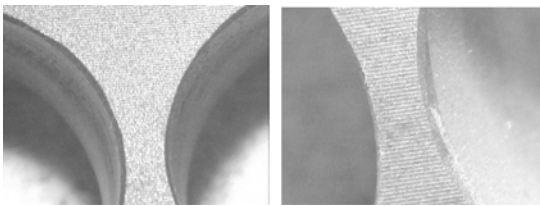
表 10 2# 轴承滚珠表面区域的 EDS 元素分析

Tab.10 EDS elementary analysis on ball bearing surface of 2# bearing

Element	Line	Mass fraction /(%)	Cnts/s	Atomic number score/(%)
Cr	Ka	18.22	126.09	19.30
Fe	Ka	81.78	353.21	80.70
Total				100.00

#### 4.5.4 轴保持架

图 6 所示为 2 套轴保持器光学显微观察照片,可以看出,保持器边缘齐整,形状保持基本完好,表面无明显的划伤等异常磨损痕迹。从照片可以看出,保持架还未磨损形成转移膜。



(a)1# 轴保持架 (b) 2# 轴保持架  
(a)1# bearing retainer (b) 2# bearing retainer

图 6 两种轴保持架的光学显微观察照片(35×)

Fig.6 Observational photos of two bearing retainers under optical microscope(35×)

#### 4.6 试验结果分析及寿命预测

根据上述分析,试验后每组轴承滚道上均有膜层成分,即  $W_r$ (轴承沟道上  $\text{MoS}_2$  镀膜的磨损

消耗体积量)还未达到  $W_{\text{max}}$ ;并且转移膜还未形成,即  $W_{\text{cb}}$ (从轴承保持架向球体上转移的转移膜体积量)还未发挥作用, $W_{\text{cb}}$ 可以达到  $W_{\text{cbmax}}$ ,轴承的寿命主要取决于最大膜层消耗体积量和最大保持架转移膜体积量,试验后轴承的寿命远远未达到。运动部件试验中折合工作次数为  $0.72 \times 10^5$  次,转移膜大约在每  $10^6$  次数后出现,转移膜的出现次数大约为  $10^6$  的 100 倍,假设运动部件试验中的次数后已到了转移膜出现的时候,粗略估计,低速运动的运动部件的寿命至少应在  $0.72 \times 10^5 \times 100 = 0.72 \times 10^7$  次。

## 5 结 论

本文从 3 个方面分析了空间环境对  $\text{MoS}_2$  固体润滑运动部件的寿命的影响:(1)发射环境,发射环境会加剧膜层的损耗,因此应设计使用强黏附性涂层,如溅射润滑膜(避免擦涂膜),或者对构件进行预载。(2)真空度,原则上,空间的真空环境适合固体润滑膜系的工作,但是同时应保证在地面运行的环境最好在真空中进行;另外在高真空环境(真空度  $\leq 10^{-7}$  Pa)下要采取适当的措施防止冷焊的产生,溅射  $\text{MoS}_2$  润滑膜既可以防止磨损失效,又可以防止冷焊。(3)温度交变,温度的变化对运动部件的性能影响主要体现两个方面:首先要注意润滑膜的线膨胀系数与基体材料的匹配,避免造成润滑膜层的开裂和剥离。其次温度引起结构变形会改变轴系预载,从而导致运动部件寿命下降。本文的工作为航天中润滑材料的研究提供了依据。

Defence Industry Press,2002. (in Chinese)

#### 参考文献:

- [1] 欧洲航空局.空间摩擦学手册[M].兰州:兰州化学物理研究所译,2006.  
EUROPEAN S A. *Handbook of Space Tribology* [M]. Lanzhou: Translated by Lanzhou institute of Chemical physics of CAS,2006. (in Chinese)
- [2] 黄本诚,马有礼.航天器空间环境试验技术[M].北京:国防工业出版社,2002.  
HUANG B CH, MA Y L. *Space Environment Test Technology of Spacecraft* [M]. Beijing: National

- [3] 李建华,张蕾.固体润滑轴承的寿命分析[J].轴承,2002,11:21-23.

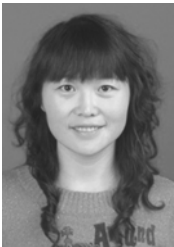
LI J H, ZHANG L. The life analysis of the solid-lubricated bearings[J]. *Bearing*, 2002, 11: 21-23. (in Chinese)

- [4] PHINNEY D D, POLLARD C L. Experi accelerated testing of ball bearings [J]. *Lubrication Engineering*, 1972, 28(10): 373-378.

- [5] GARDOS M N. Self-lubricating composites for extreme environment applications[J]. *Tribology International*,

- 1982,15:273-283.
- [6] ZHAO X H, SHEN Z G, XING Y S, *et al.*. An experimental study of low earth orbit atomic oxygen and ultraviolet radiation effects on a spacecraft material-polytetrafluoroethylene[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 88: 275-285.
- [7] MIYOSHI K. Considerations in vacuum tribology (adhesion, friction, wear, and solid lubrication in vacuum) [J]. *Tribology International*, 1999, 32: 605-616.
- [8] HAMILTON M A, ALVAREZ L A, MAUNTLER N A, *et al.*. A possible link between macroscopic wear and temperature dependent friction behaviors of MoS<sub>2</sub> coatings[J]. *Tribology Letters*, 2008, 32: 91-98.
- [9] 李新立, 刘志全, 遇今. 航天器机构固体润滑球轴承的加速寿命试验方法[J]. *航天器工程*, 2008, 17(5): 82-86.
- LI X L, LIU Z Q, YU J. Method of accelerated life test for solid-lubricated ball bearings of spacecraft mechanisms[J]. *Space Engineering*, 2008, 17(5): 82-86. (in Chinese)
- [10] 刘志全, 李新立, 遇今. 长寿命航天器机构的加速寿命试验方法[J]. *中国空间科学技术*, 2008(4): 65-71.
- LIU ZH Q, LI X L, YU J. Methods of accelerated life tests for long-life spacecraft mechanisms[J]. *Chinese Space science and Technology*, 2008, (4): 65-71. (in Chinese)

#### 作者简介:



上官爱红(1981—),女,河南三门峡人,硕士,高级工程师,2005年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事空间光电跟踪机构环境适应性、寿命、热控制等方面的研究。E-mail: xiner@opt. ac. cn



穆 猷(1983—),男,重庆人,工程师,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间光电跟踪机构环境适应性、寿命、热控制等方面的研究。E-mail: muyou@opt. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)