

# 航天器机构固体润滑球轴承磨损失效模型

李新立 刘志全 遇 今  
(中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要** 根据赫兹接触理论和运动学基本原理, 推导了固体润滑球轴承的接触应力和滑动速度公式。基于“航天器机构固体润滑球轴承的失效主要取决于固体润滑膜磨损”的分析结论, 建立了固体润滑球轴承的磨损失效模型, 并用已有的试验数据进行了初步验证。

**关键词** 航天器 机构 固体润滑 球轴承 失效模型

中图分类号: V423; TH117. 1 文献标志码: A 文章编号: 1673-8748(2008)04-0109-05

## A Wear Failure Model for Solid-lubricated Ball Bearings of Spacecraft Mechanisms

LI Xinli LIU Zhiquan YU Jin  
(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The formulae of contact stress and sliding velocity of solid-lubricated ball bearings are deduced by Hertzian contact theory and kinematics of ball bearing. A wear failure model of solid-lubricated ball bearings is established based on such analysis which concludes that the wear of solid lubrication film is the main cause of failure for solid-lubricated ball bearings of spacecraft mechanisms. The test data obtained prove that the failure model is useful to guide the accelerated life test for solid-lubricated ball bearings of long life spacecraft mechanisms.

**Key words:** spacecraft; mechanism; solid-lubricated; ball bearings; failure model

### 1 引言

有长寿命要求的航天器机构(如太阳翼驱动机构、天线指向机构等)球轴承的加速寿命试验方法一直是空间机构领域的重要研究内容之一, 而研究长寿命航天器机构固体润滑球轴承加速寿命试验方法的关键是确定影响轴承寿命的加速应力(广义上的应力)和加速方程。为此, 首先需要研究清楚轴承的主要失效模式及机理, 获得固体润滑球轴承寿命与应力之间的关系模型, 即失效模型<sup>[1]</sup>。本文以固体润滑角接触球轴承作为研究对象, 建立其失效模型, 为开展加速寿命试验提供理论依据。

### 2 固体润滑球轴承的磨损失效及机理

航天器机构固体润滑球轴承主要失效模式通常是由润滑不良引起的摩擦阻力矩过大、运转不稳、旋转精度降低等。因此, 轴承的寿命在很大程度上取决于固体润滑的寿命。

固体润滑球轴承的寿命通常为轴承滚道上的固体润滑膜(如 MoS<sub>2</sub> 膜)和自润滑保持架(如聚四氟乙烯复合材料)所提供的转移膜寿命之和。在轴承寿命初期起主要润滑作用的是轴承套圈滚道上的固体润滑膜, 随着膜的不断磨损, 轴承逐渐过渡到转移膜润滑, 最后转移膜起主要润滑作用<sup>[2-3]</sup>。球轴承固

收稿日期: 2008-04-10; 修回日期: 2008-06-05

作者简介: 李新立(1981-), 男, 硕士, 主要从事航天器机构设计工作。

体润滑失效的机理是钢球循环滚动所造成的固体润滑膜的疲劳磨损,以及伴随钢球滑动所造成的磨粒磨损<sup>[4,5]</sup>。其中,磨粒磨损自轴承运转开始就导致固体润滑膜不断耗损。而疲劳磨损主要取决于润滑膜表面的接触应力大小和循环作用次数,当循环作用次数不超过某一极限时,疲劳磨损并不明显。对于工作在轻载低速工况下的航天器机构固体润滑球轴承,接触应力也不会很大,所以疲劳磨损不会占有主导地位。此外,只有在固体润滑膜寿命末期,当固体润滑膜减薄(磨粒磨损)到一定程度时,润滑膜才将出现明显的疲劳磨损(疲劳裂纹和点蚀),轴承摩擦力矩迅速增大。当自润滑保持架无法提供稳定的转移膜润滑时,轴承将很快发生失效。而保持架转移膜的寿命一般难以定量预测<sup>[2,3]</sup>,所以本文仅对滚道固体润滑膜寿命进行分析,建立球轴承的磨损失效模型。

### 3 固体润滑球轴承的磨损失效模型

如前所述,固体润滑球轴承磨损失效机理主要是固体润滑膜的磨粒磨损。基于固体润滑膜的磨粒磨损失效机理,下文将对固体润滑球轴承的磨损失效模型进行推导。

#### 3.1 磨损方程

磨粒磨损的机理是磨粒的犁沟作用,而影响磨粒磨损的主要因素是摩擦表面的接触应力和相对滑动速度。令  $W$  表示固体润滑材料的体积磨损量,则滑动摩擦中,  $W$  与摩擦表面的接触应力  $P$  和滑动速度  $V$  以及摩擦时间  $t$  满足下面的关系,即磨损方程<sup>[6,7]</sup>

$$W = K_0 P^c V^d t^e \quad (1)$$

式中,  $K_0, c, d, e$  为与润滑材料材质、摩擦表面摩擦磨损性能、工况条件等有关经验常数,一般由试验来确定。

在寿命初期,固体润滑球轴承的摩擦力矩较大,这时固体润滑膜磨损较大。随着轴承的不断运转,摩擦力矩逐渐降低并在某一水平上保持平稳,即轴承固体润滑进入稳定磨损阶段,这是固体润滑膜起润滑作用的主要阶段,固体润滑膜的寿命通常指这一阶段的持续时间。在固体润滑膜寿命末期,轴承摩擦力矩逐渐增大,并随着润滑膜的耗尽而急剧上升。因此,对于固体润滑球轴承,在应用之前通常需要进行预跑合,使轴承固体润滑膜从工作一开始就进入稳定磨损阶段。

在稳定磨损阶段可认为固体润滑膜的体积磨损率  $w$  随时间保持不变<sup>[8]</sup>。此时,式(1)中的参数  $e=1$ 。

$$w = \frac{dW}{dt} = K_0 P^c V^d \quad (2)$$

若以磨损厚度  $h$  表示磨损量,摩擦面面积为  $A$ ,线磨损率  $\gamma$  为

$$\gamma = \frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} = K_1 P^c V^d = \text{常数} \quad (3)$$

式中,  $K_1 = K_0/A$ 。

上述公式(1)~(3)仅给出的是磨粒磨损的一般经验公式,通常无法直接用来定量描述固体润滑球轴承固体润滑膜的磨损及寿命。只有对球轴承钢球与滚道之间摩擦表面的接触应力和滑动速度进行具体分析,才能建立适合球轴承的磨损方程和失效模型。

#### 3.2 球轴承摩擦表面的接触应力和滑动速度

航天器机构固体润滑球轴承一般工作在轻载低速工况下。而对于角接触球轴承,常施加一定的轴向预紧载荷以提高轴承的刚度和旋转精度。

为了简化分析计算,本文做以下两点假设:

- 1) 在低速工况下,球运动所产生的惯性载荷忽略不计。
- 2) 在空间微重力环境下,球轴承仅承受预紧载荷。

当轴承承受中心轴向预紧载荷  $F_a$  时,各球的接触载荷  $Q$  相同,即

$$Q = \frac{F_a}{Z \sin \alpha} \quad (4)$$

式中,  $Z$  为球的个数,  $\alpha$  为轴承实际接触角。

依据点接触赫兹理论,球和套圈滚道的接触区为椭圆。建立坐标系  $s = \{o, x, y, z\}$ , 坐标系  $s$  的原点  $o$  设在椭圆中心,  $x$  轴沿椭圆长轴方向,  $y$  轴沿椭圆短轴指向球的滚动方向,  $z$  轴沿接触面法线方向,如图1所示。

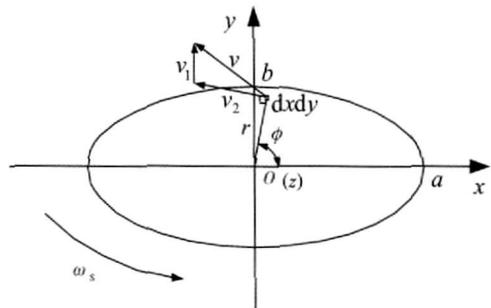


图1 球与滚道的椭圆接触区域

Fig 1 Ellipse contact area of ball-race

椭圆接触区任一点  $(x, y)$  处的接触应力为<sup>[9]</sup>

$$p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (5)$$

式中,  $p_0$  为椭圆接触区的最大接触应力,  $a, b$  分别为椭圆的长、短半轴。

对球轴承的运动分析引入以下几点假设:

- 1) 轴承外圈固定、内圈旋转;
- 2) 在低速工况下, 轴承内外套圈的接触角相同, 且不考虑球的陀螺运动;
- 3) 球在轴承外圈滚道仅发生滚动, 而在内圈滚道既有滚动又有自旋。

椭圆接触区点  $(x, y)$  处球与内圈滚道的相对滑动速度  $v(x, y)$  为该点处沿椭圆短轴方向的差动滑动速度  $v_1(x, y)$  和自旋滑动速度  $v_2(x, y)$  的矢量和<sup>[10]</sup>, 见图 1。

点  $(x, y)$  处滑动速度  $v(x, y)$  为

$$v(x, y) = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos(\pi - \phi)} = g(x, y) \omega \quad (6)$$

式中,  $\omega$  为轴承内圈转动的绝对角速度;  $g(x, y)$  为椭圆接触区  $x, y$  的函数, 与轴承几何特性、工况(载荷)等有关。

### 3.3 固体润滑球轴承磨损失效模型的推导

由式(3)可知, 球与滚道椭圆接触区内任一点  $(x, y)$  处固体润滑膜的线磨损率为

$$\forall(x, y) = K_1 [p(x, y)]^c [v(x, y)]^d \quad (7)$$

如图 1 所示, 在点  $(x, y)$  处取微小面积单元  $dx dy$ 。由式(4)可知, 各球与滚道具有相同的接触, 将  $\forall(x, y)$  在椭圆接触区进行积分, 可得轴承内圈滚道固体润滑膜体积磨损率  $w$  为

$$w = Z \iint \forall(x, y) dx dy = ZK_1 \iint v^d dx dy \quad (8)$$

式中,  $\Omega$  为球与轴承内圈滚道的椭圆接触区。

将式(5)、(6)代入式(8)得

$$w = ZK_1 \iint v^d dx dy$$

$$= ZK_1 p_0^c \omega^d \iint \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_i}\right)^2 - \left(\frac{y}{b_i}\right)^2}^c g^d dx dy \quad (9)$$

式中,  $a_i, b_i$  分别为球与轴承内圈滚道椭圆接触区的半长轴和半短轴, 下标  $i$  表示内圈。

令

$$K_2 = Z \iint \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_i}\right)^2 - \left(\frac{y}{b_i}\right)^2}^c g^d dx dy \quad (10)$$

参数  $K_2$  与椭圆接触区形状、轴承工况和轴承几何特性等有关。

此时, 式(9)可表示为

$$w = K_1 K_2 p_0^c \omega^d \quad (11)$$

若轴承内圈滚道固体润滑膜最大允许体积磨损量为  $W_{rmax}$ ,  $T$  为固体润滑膜的磨损寿命, 则轴承固体润滑膜磨损失效模型为

$$T = \frac{W_{rmax}}{K_3 p_0^c \omega^d} \quad (12)$$

式中, 参数  $K_3 = K_1 K_2$ , 与润滑膜材质、工况条件、轴承几何特性等有关, 由试验来确定。由此可见, 固体润滑球轴承的寿命与润滑材料的摩擦磨损特性、最大磨损量、工况条件(载荷和转速)等有关。

## 4 固体润滑球轴承磨损失效模型的初步验证

对于某一具体的固体润滑球轴承, 固体润滑膜最大允许体积磨损量  $W_{rmax}$  为一定值。忽略轴承载荷对式(12)中参数  $K_3$  的影响, 将式(12)进行变换得

$$T = K p_0^{-c} \omega^{-d} \quad (13)$$

式中,  $K = W_{rmax} / K_3$ 。

为了对式(13)进行验证, 本文采用了文献[2]提供的不同载荷和转速下固体润滑角接触球轴承 B7007 的寿命试验数据, 见表 1。

表 1 球轴承寿命 试验数据

Table 1 Life test data of ball bearings

轴承试验件序号 $j$	工况参数			轴承寿命 $T_j$ / h	总转数 / (r/min)
	轴向载荷 / N	内圈、钢球最大接触应力 $p^{(j)}$ / MPa	轴承转速 $\omega_j$ / (r/min)		
1	25	650.3	120	1483	$1.07 \times 10^7$
2	50	816.3	240	581	$0.84 \times 10^7$
3	150	1167	380	294	$0.67 \times 10^7$
4	200	1279	80	2514	$1.21 \times 10^7$

应当指出, 航天器机构固体润滑膜(如以  $\text{MoS}_2$  为基础的复合膜)在真空环境下的润滑性能一般优于在大气环境下的润滑性能。为了保证试验条件和应用条件的一致性, 固体润滑球轴承的寿命试验一般要求在真空条件下进行, 以保证试验结果的有效性。

表 1 中的固体润滑球轴承寿命试验数据是在大气环境下获得的。单就润滑性能而言, 该试验条件比真空环境更为恶劣, 但是由于试验件在大气条件和真空条件下的热特性有很大差异, 对于摩擦特性可能有更大的影响, 因此正式的寿命试验都应该在真空条件下进行。表 1 中的这些试验数据可用来对本文所建立的固体润滑球轴承磨损失效模型进行大气环境条件下的验证。

验证真空环境下固体润滑球轴承磨损失效模型, 需要真空环境下获得寿命试验数据, 并依据真空环境下的寿命试验数据获得相应的参数  $K$ 、 $c$ 、 $d$  的数值大小, 考察轴承寿命与影响因素(接触应力和转速)是否仍然符合式(13)的关系, 从而取得真空环境下固体润滑球轴承磨损失效模型与大气环境下的失效模型的异同。

另外, 由于目前所获得的上述 4 组寿命试验数据十分有限, 所以通过表 1 这些很有限的试验数据对失效模型进行验证, 只能是一个粗略的验证。

为了便于分析计算, 将式(13)两边取对数得

$$\ln T = M - c \ln p_0 - d \ln \omega \quad (14)$$

式中,  $M = \ln K$ 。

表 2 1# 轴承试验件的寿命预测

Table 2 Life prediction for NO 1 bearing

轴承试验件 序号 $j$	已知数据			模型参数估计值			1# 轴承寿命 预测值 $\hat{T}_1 / \text{h}$	1# 轴承寿命 试验值 $T_1 / \text{h}$
	$T_j / \text{h}$	$p_0^{(j)} / \text{MPa}$	$\omega_j / (\text{r}/\text{min})$	$M$	$c$	$d$		
2	581	816.3	240	14 807.0	0.127 0	1.384 9	1 564	1 483
3	294	1 167	380					
4	2 514	1 279	80					

由表 2 可知, 1# 轴承的寿命预测值为  $\hat{T}_1 = 1 564 \text{ h}$ , 与试验结果  $T_1 = 1 483 \text{ h}$  较为接近。采用相同的方法, 也对其他 3 个轴承的寿命进行了预测, 预测结果表明, 轴承寿命预测值与寿命试验值基本吻合, 从而初步验证了本文所建立的固体润滑球轴承磨损失效模型的正确性。依据该模型, 轴承寿命随接触应力和转速的增加而缩短, 这为长寿命航天器机构固体润滑球轴承的加速寿命试验提供了一定的理论依据。基于该模型所揭示的逆幂律关系, 本文作者对航天器机构固体润滑球轴承的加速寿命试

采用表 1 中的 4 组试验数据中的 3 组可对式(14)的参数  $M$ 、 $c$ 、 $d$  进行估计, 然后根据估计结果来预测另外一个轴承的寿命, 将预测结果与试验结果比较, 从而实现对失效模型的验证。现利用 2#、3#、4# 轴承试验件的已知工况条件及寿命试验结果对第 1 个轴承的寿命进行预测。

首先, 将 2#、3#、4# 轴承的接触应力  $p_0^{(j)}$ 、转速  $\omega_j$  和寿命  $T_j$  作为初始值( $j = 2, 3, 4$ ), 并构造矩阵

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -\ln p_0^{(2)} & -\ln \omega_2 \\ 1 & -\ln p_0^{(3)} & -\ln \omega_3 \\ 1 & -\ln p_0^{(4)} & -\ln \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -6.705 & -5.481 \\ 1 & -7.062 & -5.940 \\ 1 & -7.154 & -4.382 \end{bmatrix} \quad (15)$$

令

$$Y = \begin{bmatrix} \ln T_2 \\ \ln T_3 \\ \ln T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.365 \\ 5.684 \\ 7.830 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} M \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (16)$$

由式(15)和式(16), 利用多元线性回归法获得参数  $M$ 、 $c$ 、 $d$  的估计值为

$$B = \begin{bmatrix} M \\ c \\ d \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{bmatrix} 14.807 \\ 0.127 \\ 1.3849 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由式(17)获得的参数  $M$ 、 $c$ 、 $d$  的估计值及 1# 轴承的工况参数(接触应力  $p_0^{(1)}$  和转速  $\omega_1$ ), 可以求得 1# 轴承的寿命预测值, 具体情况见表 2。

验方法进行了研究, 并给出了示例。

## 5 结 论

综上所述, 可以得出以下几点结论:

1) 基于球轴承赫兹接触理论和运动学基本原理所建立的固体润滑球轴承的磨损失效模型, 适用于轻载低速的长寿命航天器机构固体润滑角接触球轴承应用的一般情况。初步验证结果表明, 在不改变固体润滑膜磨损失效机理的条件下, 轴承寿命随

接触应力和转速的增大而缩短,从而为长寿命航天器机构固体润滑球轴承加速寿命试验提供了一定的理论基础。在重载高速工况下,固体润滑膜的失效机理将发生改变而超出本文失效模型的适用范围。

2) 固体润滑膜在耐磨的致密层的厚度范围内,球轴承寿命  $T$  与固体润滑膜允许的最大磨损量  $W_{r\max}$  成正比,即与膜厚成正比。

3) 本文利用十分有限的试验数据对所建立的固体润滑球轴承在大气环境下的磨损失效模型进行了初步验证和轴承寿命预测,寿命的预测值与试验值基本吻合,从而初步验证了本文所建立的固体润滑球轴承磨损失效模型的正确性。对于真空环境下航天器机构固体润滑球轴承,其失效模型应根据真空环境下固体润滑球轴承寿命试验数据对该失效模型做出修正。

4) 本文建立的失效模型尚未考虑轴承自润滑保持架转移膜的影响,还需进一步研究固体润滑球轴承的性能退化规律和失效机理,从而建立更准确、考虑因素更全面的失效模型。

#### 参考文献 (References)

[1] 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,2008,28(4)

[2] 李建华,张蕾.固体润滑轴承的寿命分析[J].轴承,2002(11):24-23

[3] 李建华,姜伟.固体润滑轴承保持架试验分析[J].轴承,2004(9):18-20,48

[4] 于德洋,赵家政,朱昌铭,等.精密径向推力球轴承的因体润滑失效探讨[C].第五届全国摩擦学学术会议论文集.武汉,1992

[5] 于德洋,汪晓萍.精密角接触球轴承的固体润滑失效分析[J].摩擦学学报,1995(4):310-317

[6] Meeks C R, Bohner J. Predicting life of solid-lubricated ball bearings[J]. ASLE Transactions, 1986, 29(2): 203-213

[7] Meeks C R. Theory and practice of self-lubricated, oscillatory bearing for high-vacuum applications Part II: Accelerated life tests and analysis of bearings[J]. Lubrication Engineering, 37(11): 657-667

[8] 温诗铸,黄平.摩擦学原理(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2002

[9] 万长森.滚动轴承的分析方法[M].北京:机械工业出版社,1985

[10] 李新立.长寿命航天器机构滚动轴承加速寿命试验方法研究[D].北京:中国空间技术研究院,2008

(编辑:程培培)

## 动态新闻

### NASA 公布新登月火箭设计方案

2008年6月25日,NASA公布战神-5登月火箭的新设计方案,并称,战神-5将在2020年搭载4名宇航员重返月球。战神-5长116m;火箭底部原安装5台主发动机,现在变成6台RS-68B液氧/液氢发动机,另将捆绑2个直接由战神-1火箭第一级发展而来的5.5段式固体推进剂火箭助推器;载荷也超过最初计划,比原设计多携带7.07t载荷,总共能将71t的货物运输到月球上,并且将来有一天可把人和货物送往火星。



战神-5 火箭



战神-5 末级火箭

(靳力 瞭望 摘编)