

# PTFE/30CrMnSiNi2A 的重载摩擦性能

丁水 张绪虎 吴阳 叶呈武 黄思原

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 采用 PTFE 与 30CrMnSiNi2A 钢制成自润滑轴承,在重载工况下进行了数值模拟及试验分析,研究了自润滑轴承的主要失效形式、摩擦面状态及性能对摩擦性能的影响,并分析了轴承的磨损机理。结果表明:该轴承在重载下以润滑层失效为主要破坏形式,改善摩擦面能够有效提高轴承的摩擦性能;在摩擦过程中 PTFE 不断被挤出,形成转移润滑膜,起到了减小摩擦因数的作用。

**关键词** 重载,摩擦,自润滑轴承,聚四氟乙烯

## Friction Properties of PTFE/30CrMnSiNi2A Bearing at Heavy Load

Ding Shui Zhang Xuhu Wu Yang Ye Chengwu Huang Siyuan

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The self-lubricating bearings which were made up of PTFE and a ultrahigh strength steel 30CrMnSiNi2A were investigated by numerical simulation and experiments. The failure mode and influence of friction surface on the friction properties were analyzed. The wear mechanism was also studied based on the observation of the worn friction surface. It was found that the failure of self-lubricating bearing is attributed to the damage of lubricating layer, which is improved by excellent friction surface. Owing to the transferred lubricating film made by PTFE fabric, the friction coefficient reduced eventually.

**Key words** Heavy load, Friction, Self-lubricating bearing, PTFE

### 0 引言

自润滑轴承在要求高承载、低速摆动和具有自位能力的机构中有重要的作用,为解决航空、航天及机械等典型特殊工况条件下的摩擦磨损问题提供了强有力的技术支持<sup>[1-5]</sup>。PTFE 自润滑轴承因具有结构简单、承载力大、摩擦因数小、转动灵活等特性,获得了愈来愈广泛的关注<sup>[6]</sup>。自润滑轴承在工作时处于干摩擦状态,摩擦表面如能形成有效的全膜润滑,则可减轻磨损,延长轴承使用寿命。然而,在航天领域重载的苛刻环境条件下,随着轴承接触面的正压力增加,磨损速率增快,轴承很容易因磨损造成减摩失效而导致灾难性的后果。

本文采用模拟与试验相结合的方法,以某型号助推器捆绑连接机构用自润滑轴承工况条件为试验依据,研究了重载下 PTFE 自润滑轴承的失效形式及摩擦性能。

### 1 实验

#### 1.1 原材料与试样

PTFE 自润滑轴承结构如图 1 所示。轴承头与轴承座为球面接触,其间粘接润滑层,在使用过程中起到自润滑作用。轴承头、座为 30CrMnSiNi2A 钢,润滑层为 PTFE/高强纤维混编织物。

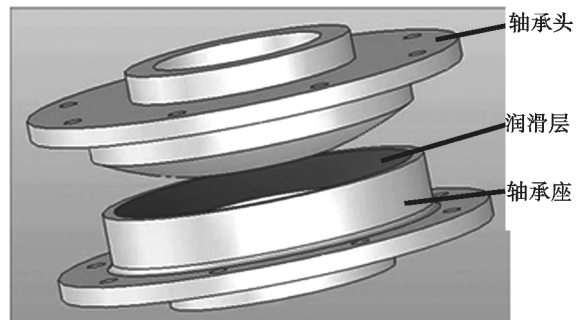


图 1 自润滑轴承组件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-lubricating bearing

收稿日期:2011-11-21;修回日期:2011-12-14

作者简介:丁水,1978 年出生,高级工程师,主要从事高性能金属材料及工艺研究。E-mail:dingshui@yahoo.cn

## 1.2 试验设备

摩擦试验设备及加载情况如图2所示。将轴承安装在试验工装上,轴承座固定,轴承头可移动。为模拟助推器飞行时的轴向载荷,在工装上施加轴向压力;为模拟助推器捆绑机构转动,在工装上施加往复作用力,往复力等效于摩擦力,使轴承头绕转轴产生转动,与轴承座间形成相对滑动摩擦。

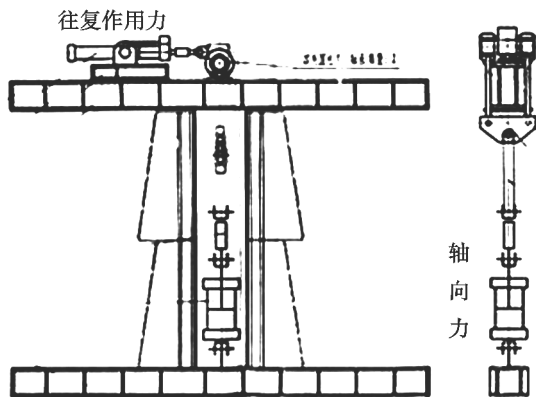


图2 试验设备示意图

Fig.2 Schematic diagram of friction tester

## 1.3 测量分析方法

### 1.3.1 温度、应力应变测量

采用铂电阻测量轴承头和轴承座内外壁的温度变化及内腔的空气温度,采用高温应变片测量轴承头和轴承座内外壁的应力变化,采用 PAC6000 型数据采集系统测量温度、应力/应变和载荷数据,并生成曲

线。

### 1.3.2 载荷、摩擦因数测量

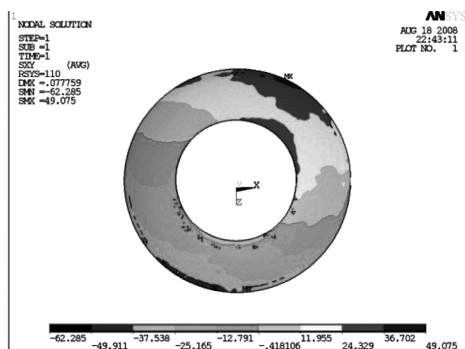
采用 3 500 及 400 kN 载荷传感器分别跟踪测量轴向载荷及往复作用力的大小,两路载荷信号通过变送器送入数据采集系统。某时刻下往复作用力和轴向力之比即为该时刻下的摩擦因数。

## 2 结果与分析

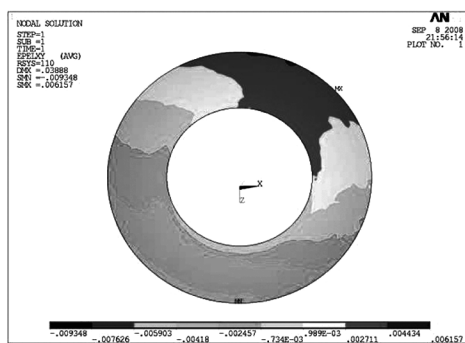
### 2.1 重载下自润滑轴承的失效形式

自润滑轴承在重载干摩擦条件下工作,材料各处应力应变等因素分布复杂,成形过程实时检测困难。利用有限元方法模拟了轴承工作过程中的温度和应力、应变等情况,据此掌握轴承结构的失效形式。

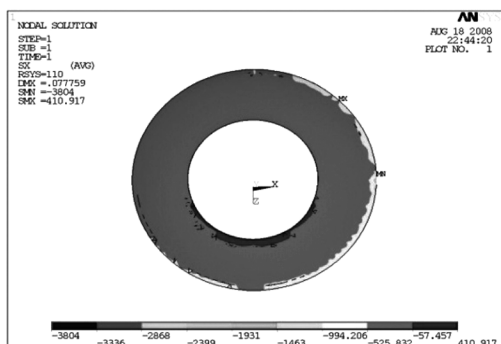
轴承工作时的应力、应变如图3所示,由图可知,最大剪切应力和剪切应变分布在润滑层的外边缘,最大值分别为 49.1 MPa 和 0.9%;最大径向拉应力和径向应变分布在润滑层材料层的内边缘,从绝对值上看最大压应力远大于拉应力,最大值分别为 410.9 MPa 和 1.1%,因此 PTFE 润滑层的内外边缘是失效的薄弱区域。对于 PTFE 自润滑轴承在工作过程中,摩擦副之间的接触表现为转移膜同轴承头表面的接触,减轻了轴承滑动时的摩擦阻力,降低了摩擦因数。在磨损过程中,随着转移膜不断被挤出,自润滑层不断减薄,轴承磨损深度增大,自润滑功能下降,最终导致轴承卡合失效。



(a) 剪切应力云图



(b) 剪切应变云图



(c) 径向应力云图



(d) 径向应变云图

图3 润滑层模拟结果

Fig.3 Numerical simulation results of lubricating layer

## 2.2 表面状态对重载轴承摩擦性能的影响

由模拟结果可知,润滑层内边缘是失效的薄弱区域。为了提高润滑层的耐磨性,考察了轴承头表面粗糙度对重载轴承摩擦性能的影响,结果如表 1 所示。轴承头表面粗糙度较高时,润滑层表面出现明显的斑痕,这表明摩擦时润滑膜转移得并不均匀,摩擦面配合过程中出现了局部接触问题;而降低了轴承头表面粗糙度后,润滑转移膜建立的过程明显好转。由表 1 所示的测试数据可见,减小轴承头表面粗糙度后,轴承头、轴承座的温度降低了约 20℃,摩擦因数由 0.025 降低至 0.017。在重载下,摩擦面接触区域微小偏离都会产生压力集中,使得加热集中到界面的特殊区域,这些区域在周围表面的水平之上膨胀并使实际接触区域的面积减小,从而导致接触集中并使局部温度升高<sup>[7]</sup>。较小的粗糙度避免了上述问题,从而改善了润滑层薄弱区域的承载及温升状态,提高了自润滑轴承在重载下的摩擦性能。

表 1 不同表面状态的轴承摩擦性能

Tab.1 Friction properties of bearing with different surface state

表面粗糙度 / $\mu\text{m}$	轴承头温度 / $^{\circ}\text{C}$	轴承座温度 / $^{\circ}\text{C}$	轴承头应力 / $\text{MPa}$	摩擦因数
0.8	197	83.5	482	0.025
0.2	182	67.4	475	0.017

## 2.3 表面性能对重载轴承摩擦性能的影响

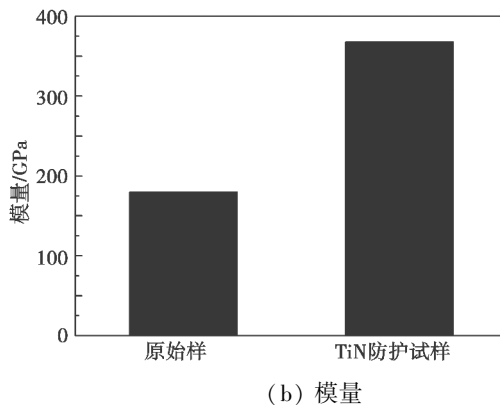
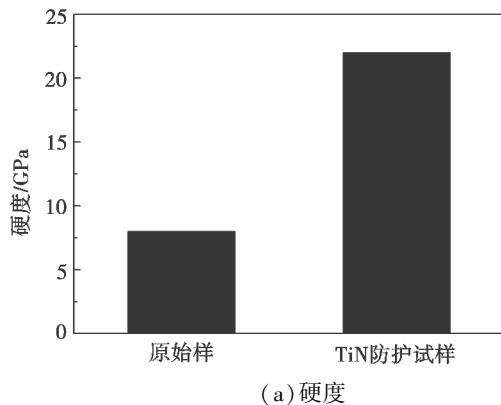


图 5 原始试样和 TiN 防护试样的硬度和弹性模量

Fig. 5 Hardness and elastic modulus of original and TiN protected specimens

图 6 为采用球-盘式摩擦磨损试验机对原始试样和 TiN 复合防护试样的耐磨性测试结果。从磨痕横截面轮廓对比,原始试样的最大磨削深度为 14  $\mu\text{m}$ ,而 TiN 复合防护试样的最大磨削深度为 4.5  $\mu\text{m}$ ,表明防护对材料耐磨性能的提高。未防护及 TiN 防护后轴承地面摩擦试验结果见图 7 及表 2。未防护轴承试样在摩擦试验后,轴承头由于局部温升出现了氧化层;而防护后轴承头表面均匀一致。防护后轴承的润滑层更为平整、光滑,表面的树脂层保存完好,此时其表层材料以 PTFE 膜润滑为主。由表 2 所示的测试数据可见,经 TiN 防护后,轴承温度及摩擦

根据鲍登理论<sup>[8]</sup>,提高摩擦副表面硬度能够有效提高摩擦性能,因此针对轴承头表面开展了增硬防护工艺。TiN 膜是一种具有高硬度、耐磨损、耐腐蚀、不粘性好、化学稳定性好和摩擦因数低等优良性能,特别是由于其低的黏着倾向,拓宽了在许多磨损系统中的应用。图 4 给出了 TiN 防护层的界面组织图片,由图可知,防护层与基体间界面也清晰完整,界面处没有微裂纹和孔洞。复合防护层组织致密,没有观察到贯穿整个防护层的缺陷存在。

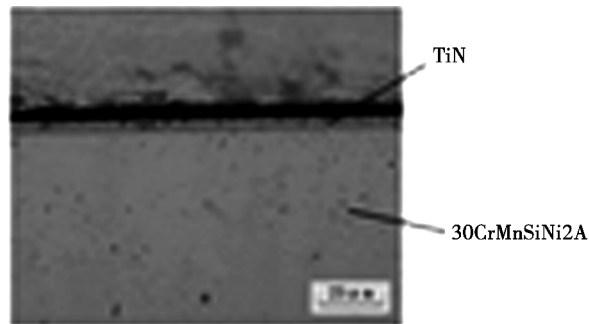
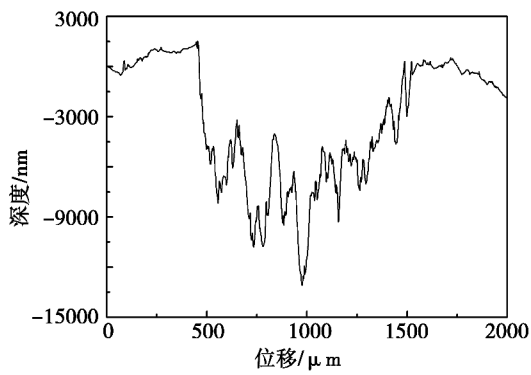


图 4 TiN 防护试样界面组织

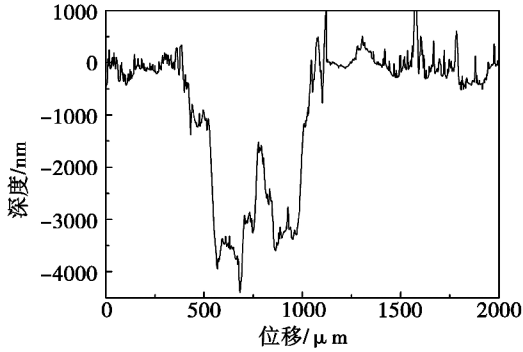
Fig. 4 Interface of TiN protected specimen

图 5 给出了原始试样和 TiN 防护试样的硬度和弹性模量对比,可见和原始试样相比,经过表面改性处理防护层的硬度和弹性模量都有大幅提高,表明经防护处理后材料的耐磨性和承载能力都将得到提高。

因数均有所降低。轴承在 TiN 防护过程中,元素的高能注入引起表面层组分与结构的变化,形成的细小弥散硬质相强化了表面硬度。由于硬度的提高,增加了轴承头的表面承载能力,在摩擦过程中轴承头与润滑层的真实接触面积减少,从而使黏着倾向下降,使摩擦因数明显减小;同时高能注入对轴承头表面状态起到了削平作用,使轴承头的微凸体对 PTFE 润滑层的擦伤作用明显得到了抑制和减轻。此时摩擦副间的接触表现为转移膜与轴承头表面之间的接触,这种接触会大大降低轴承转动时的摩擦阻力,提高摩擦性能。



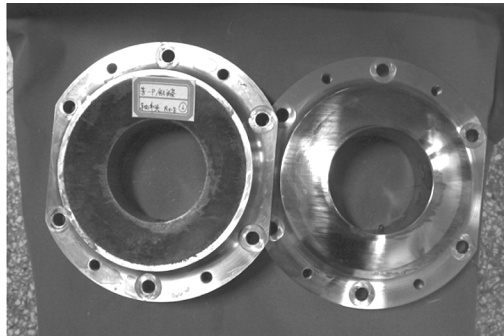
(a) 原始试样



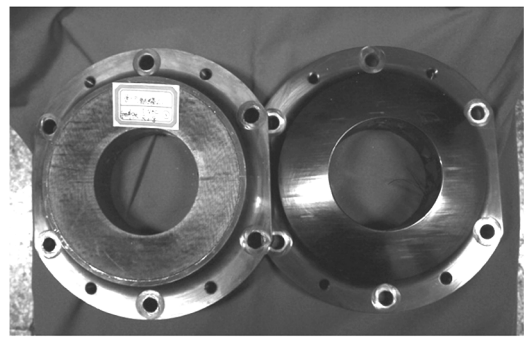
(b) TiN 防护试样

图6 原始试样和TiN防护试样的磨痕轮廓

Fig. 6 Wear scar of original and TiN protected specimens



(a) 未防护试样



(b) TiN 防护试样

图7 摩擦试验后不同表面硬度的轴承样件

Fig. 7 Bearing with different surface hardness after friction experiment

表2 不同表面硬度的轴承摩擦性能

Tab. 2 Friction properties of bearing with different surface hardness

表面硬度 /GPa	轴承头温度 /°C	轴承座温度 /°C	轴承头应力 /MPa	摩擦因数
8	212	112	500	0.024
22	204	98.5	423	0.023

## 2.4 重载轴承磨损机理

为了揭示自润滑轴承的磨损机理,对轴承润滑层 PTFE 编织复合材料摩擦前后的实体显微形貌进行了分析,如图 8 所示。摩擦前的润滑层表面,深色的 PTFE 纤维束和浅色的高强纤维束编织纹路清晰可见。随重载摩擦试验的进行,自润滑轴承摩擦因数由起始的 0.14,迅速单调下降并稳定在 0.018,该数值与纯 PTFE 的摩擦因数相近。摩擦后润滑层表面的编织纹路没有规律,织物中凸起的纤维束经摩擦后形成白色斑点,深色 PTFE 显微明显增多。

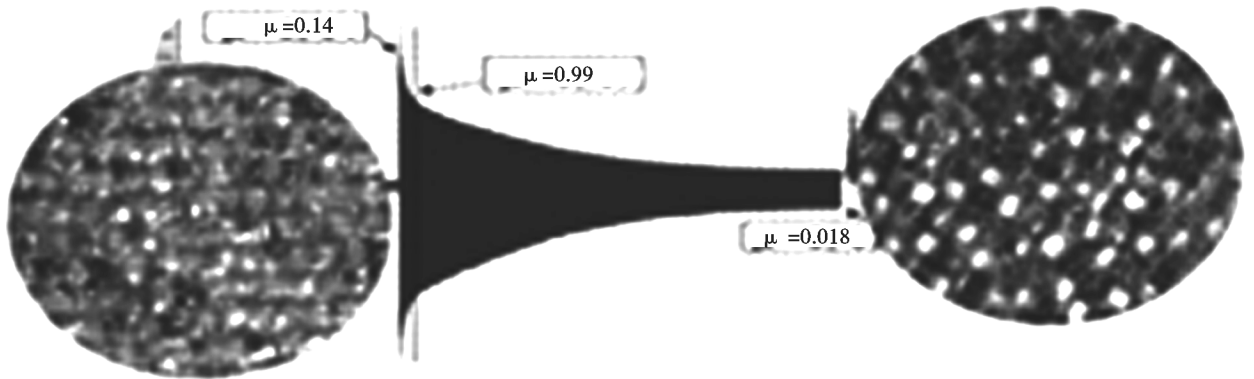


图8 润滑层材料表面 25 倍体视显微镜照片

Fig. 8 Optical micrograph of surface lubricating layer

PTFE/高强纤维混编织物与金属组成摩擦副时,由于剪切强度与金属的相差百倍以上,在摩擦的作用

下剪切自然主要发生在织物上,因此观察到白色的纤维磨损痕迹。轴承在重载滑动过程中,PTFE 具有低

摩擦因数的特性,同时又能够在滑动过程中在对偶面上形成薄的转移膜。但其转移过程中不断被对偶面的硬质微凸体犁削剥落,当 PTFE 纤维消耗殆尽,则减摩作用终止。由于高强纤维的加入,可以有限承受和分散载荷,在一定程度上阻止了硬质微凸体对 PTFE 大面积破坏。高强纤维与 PTFE 纤维混编形成整体,使得 PTFE 纤维在蠕变和转移过程中仍能牢固附着于织物表面,难于剥落脱离,共同实现了重载下的减摩作用。

### 3 结论

(1) 重载下,自润滑轴承的主要失效形式为润滑层破坏。

(2) 通过改善自润滑轴承表面状态及性能,能够有效增加轴承头与润滑层的真实接触面积,避免局部接触引发的润滑层破坏。

(3) 自润滑轴承在重载摩擦时,PTFE 润滑膜的建立及转移是降低摩擦因数的关键因素。同时高强纤维的承载作用,增加了 PTFE 润滑膜的抗磨损能力,在一定程度上起到了协助减摩作用。

#### 参考文献

[1] Kim B C, Park D C, Kim H S, et al. Development of composite spherical bearing [J]. *Composite Structures*, 2006, 75:

31-40

[2] Fleszar M E. Thermal behaviour of teflon/phenolic liners in self-lubricating bearings [J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1997, 49: 19-26

[3] 向定汉,潘青林,姚正军. 聚四氟乙烯自润滑编织复合材料关节轴承的摆动摩擦磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2003, 23(1): 72-75

[4] Xiang D H, Yao Z J, Wen J P. Experimental investigation on dry frictional behavior of the two self-lubricating composites under heavy loading conditions [J]. *Materials Letters*, 2005, 59: 352-356

[5] Guo Q, Song Y F, Qiao H B, et al. The friction and wear properties of the spherical plain bearings with self-lubricating composite liner in oscillatory movement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2004, 19: 86-91

[6] 李如琰. 聚四氟乙烯纤维织物在关节轴承上的应用 [J]. *功能材料*, 2004, 35: 2221-2223

[7] Johnson K L. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 255-265

[8] 鲍登 F P, 泰伯 D. 固体的摩擦与润滑 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982

(编辑 吴坚)

(上接第 76 页)

### 3 结论

(1) 搅拌摩擦焊接头的小尺寸隧道缺陷,通过采用不超过 3 次重复搅拌摩擦焊的补焊方法,可以获得与无缺陷原始焊缝等强的补焊接头。

(2) 对于大尺寸隧道缺陷,采用缺陷排挖+填丝熔焊+搅拌摩擦焊的补焊方法,可以适用于不同缺陷深度、不同熔焊次数条件下的缺陷补焊,同样能够获得与无缺陷原始焊缝近似的接头力学性能。

(3) 通过对不同补焊条件下的接头微观组织观察,发现在不超过 3 次“熔焊+搅拌摩擦焊”的补焊工艺条件下,补焊接头与原始接头具有相似的微观组织特征与晶粒尺寸。

(4) 对于隧道类搅拌摩擦焊焊缝缺陷,采用“手工 TIG 填丝熔补+FSW”补焊工艺,能够获得等强无变形的优异接头,可以应用于实际产品的焊接生产。

#### 参考文献

[1] Johnson Marry Ruth. Friction stir welding takes off at Boeing [J]. *Welding Journal*, 1999, 78(2): 35-39

[2] 姚君山,徐萌,贾洪德. 推进剂贮箱先进焊接工艺研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2008, (8): 32-35

[3] 邢美源,姚君山,刘杰. 火箭贮箱搅拌摩擦焊应用研究 [J]. *上海航天*. 2006, 23(4): 39-43

[4] 姚君山,王国庆,孙忠绍. 火箭贮箱纵环缝焊接方法的选择 [R]. 中国国防科技报告火箭贮箱焊接方案论证报告

(编辑 任涛)