

M50高温轴承钢表面TiN涂层与镀银层对磨的摩擦特性*

葛泉江¹, 张兴洪², 马欣新³, 陈雄刚³, 唐光泽³

(1. 中国人民解放军驻哈尔滨轴承集团公司军事代表室, 哈尔滨 150036;

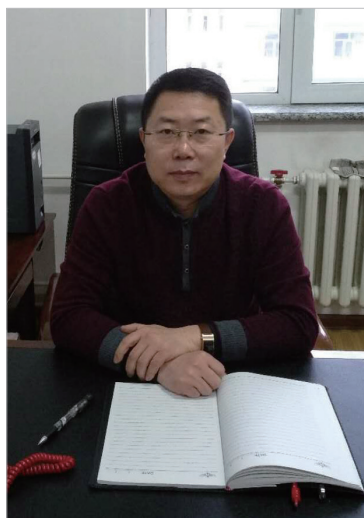
2. 中国航发哈尔滨轴承集团公司, 哈尔滨 150025;

3. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘要] 以航空发动机主轴轴承引导面与保持架之间的异常磨损为背景, 研究了 M50 钢及 M50 钢表面沉积 TiN 涂层与保持架材料镀银层之间对磨时的摩擦特性, 分析了干摩擦条件下相对滑动速度、接触应力及其交互作用对摩擦系数随时间变化的影响规律。采用 SEM 观察了摩擦表面的形貌, 并用 EDS 对表面成分进行了分析。结果表明, 摩擦系数随时间逐渐增大, 存在明显的转变点; 在低滑动速度和较低接触应力时, 摩擦系数可以长时间维持在 0.15~0.25 较低水平, 在较高滑动速度和较高接触应力时, 摩擦系数很快上升到 0.5 左右, 在试验选择的参数范围内, 该转变时间与接触应力 P 和滑动速度 V 的乘积 PV 值基本上呈线性关系; 高速大接触应力摩擦时, M50 钢表面会受到硬质颗粒的作用产生划伤, 而 TiN 涂层对 M50 钢具有良好的防护作用, 可以明显延缓高摩擦系数出现的时间, 阻止 M50 钢中碳化物脱落, 防止表面磨损。

关键词: 高温轴承钢; TiN 涂层; 摩擦

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.054



葛泉江
高级工程师, 主要开展轴承方向的研究。

主轴轴承作为航空发动机的关键部件, 地位与叶片同等重要, 轴承的性能直接决定了发动机的可靠性和使用寿命^[1]。对发动机性能要求的日益提高, 轴承的工作条件也越来越苛刻, 其转速已经达到几万 r/min, DN 值已经接近 300 万, 对其旋转精度、抗污染能力、可靠性和使用寿命等提出更高的要求^[2-3]。

目前主轴轴承的保持架一般采用 40CrNiMoA 制造, 为了降低摩擦系数, 表面进行了电镀银处理。但是存在的问题是, 硬质颗粒很容易镶嵌在银层中, 成为磨粒使轴承套圈或滚动体产生磨损^[4]。在套圈引导面处, 由于与保持架的间隙很小, 在起停、乏油或冲击载荷作用下, 引导间隙会变得更小, 更容易产生引导面的磨

损。一旦磨损产生, 磨损脱落的硬质颗粒会进一步镶嵌在银层中, 使磨损更加加剧。这种情况在高温轴承钢 M50 和 M50NiL 上都可能出现, 并以 M50NiL 更为明显, 严重时, 可导致轴承抱死, 形成重大事故隐患^[5]。

文献[6]中指出, 在轴承套圈引导面上沉积硬质 TiN 可以提高引导面的抗磨损能力, 但对 TiN 与银层之间的摩擦特性还没有具体数据。TiN 涂层作为一种常用的涂层, 已在工模具领域得到了广泛的应用^[7], 但在主轴轴承方面应用不多^[8-10]。由于目前还没有 M50NiL 渗碳的钢球可供使用, 本研究选用 M50 钢球作为基体材料, 在其表面沉积 TiN 涂层, 研究 TiN 与 40CrNiMoA 钢圆盘镀银层之间组成摩擦副的摩擦磨损特

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863项目)(2015AA034303); 黑龙江省应用技术研究开发与开发计划(GX16A004)。

性。相比渗碳状态使用的 M50NiL, 由于 M50 的碳含量为 0.8% 左右, 内部存在有一次碳化物, 其耐磨性优于 M50NiL, 从 M50 钢上获得的数据对 M50NiL 同样适用。

试验及方法

1 材料选取

本研究中采用 M50 高温轴承钢和 40CrNiMoA 两种基体材料, 其化学成分如表 1 所示。

其中 M50 钢为 $\phi 5\text{mm}$ 的钢球, 分成两种状态, 一种是淬火回火后直接使用, 硬度 HRC62; 另一种是淬火回火后表面沉积 TiN 涂层。TiN 涂层采用多弧离子镀方法沉积, 厚度 $1.5\ \mu\text{m}$, 与基体结合力 60N, 纳米硬度 32GPa。

40CrNiMoA 为 $\phi 30\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的圆盘, 硬度 HRC33, 表面电镀银处理, 厚度 $30\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $0.26\ \mu\text{m}$, 镀银层纳米硬度为 1.4GPa。

2 测试方法

采用美国 BRUKER 公司 CETR-UMT 型摩擦磨损试验机测量摩擦副的滑动摩擦系数, 摩擦方式为球-盘式室温干摩擦, 试验的名义接触应力选择范围为 600~2000MPa, 相对滑动速度范围选择 40~120mm/s, 对磨时间为 600s。

采用美国 FEI 公司 Qanta200F 型扫描电镜观察摩擦表面的形貌, 并采用附带的能谱仪进行样品表面微区成分分析。

结果与讨论

1 M50钢与镀银层之间对磨的摩擦特性

图 1 为直接采用 M50 钢球与 40CrNiMoA 表面镀银层对磨时不同接触应力条件下摩擦系数与对磨时间之间关系曲线, 其中滑动速度为 40mm/s。可见, 在较低接触应力 600MPa 情况下, 摩擦系数随对磨时间缓慢增长, 但变化不明显, 数值在

0.15~0.25 之间。随接触应力的增加, 从 700MPa 增加到 1000MPa 时, 摩擦系数开始阶段较低, 然后出现急剧增加, 随后保持一定值的现象, 即出现第二个较稳定阶段, 该阶段的摩擦系数在 0.4~0.6 之间, 摩擦系数出现显著增加的时间点也随接触应力的增加愈来愈提前, 且该阶段的稳定摩擦系数值也随接触应力的增加而增加。另外, 更高的载荷和滑动速度的情况下, 该摩擦系数还会达到 0.8 左右。

摩擦系数-时间曲线对应的两个稳定的摩擦系数, 说明有两种较稳定的摩擦状态存在。第一种是较低的摩擦系数, 对应较低接触应力和较低滑动速度, 在此情况下, 镀银层以剪切滑动为主, 起到良好的固体润滑作用, 因此具有良好的润滑性能。图 2 给出了滑动速度 40mm/s, 600MPa 接触应力条件下银层表面的摩擦形貌, 由图 2 可知, 银层仅产生了变形, 表面平整完好。

第二种状态是较高的摩擦系数,

数值在 0.5 左右, 在高接触应力或高速摩擦摩擦时出现, 该过程银层表面产生了磨损。图 3 给出了该摩擦状态银层摩擦表面的磨痕形貌, 可以看出, 与图 2 不同, 银层表面有非常严重的划痕, 出现了磨粒磨损的特征。这是由于钢球表面的硬质颗粒等微凸体压入银表层, 产生犁削作用, 导致了摩擦系数增加, 此时银层仍然完好。

更高接触应力时还可以看到 M50 钢球表面产生的划伤, 如图 4 所示, 此时的接触应力为 2GPa, 相对滑动速度为 100mm/s。观察 M50 钢球表面, 可见有硬质颗粒产生的划伤。

进一步研究表明, 在更高的接触应力和滑动速度下, 同样对磨时间, 摩擦系数可以达到 0.8 左右, 此时镀银层被磨破, M50 钢与 40CrNiMoA 钢直接接触。

2 TiN-Ag对磨的摩擦特性

采用与图 1 相同的对磨条件, 将沉积 TiN 涂层的钢球与镀银层对

表1 M50钢和40CrNiMoA钢的化学成分(质量分数) %

材料	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	Ni
M50	0.78	4.15	4.42	1.01	0.27	0.34	—
40CrNiMoA	0.41	0.73	0.19	≤ 0.05	0.74	0.24	1.50

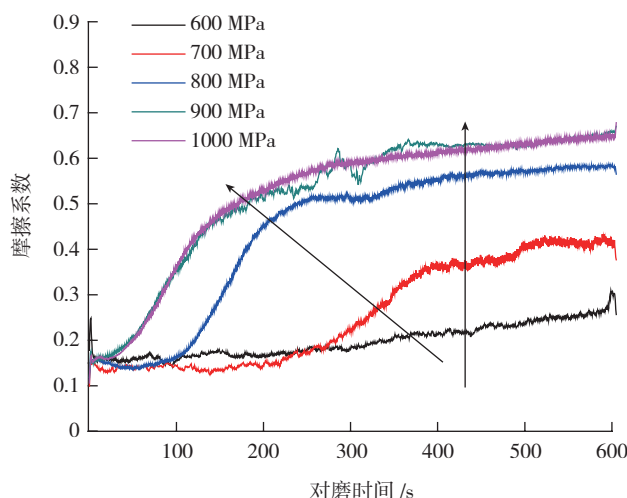


图1 40mm/s条件下M50钢与镀银层之间对磨摩擦系数随对磨时间变化曲线
Fig.1 Relationship between friction coefficient and sliding time for M50 steel ball on Ag-plating disk with speed of 40mm/s

磨,得到如图5所示的摩擦曲线。由图5可知,在滑动速度40mm/s情况下,接触应力从600MPa提高到1000MPa时,两种状态下的摩擦系数

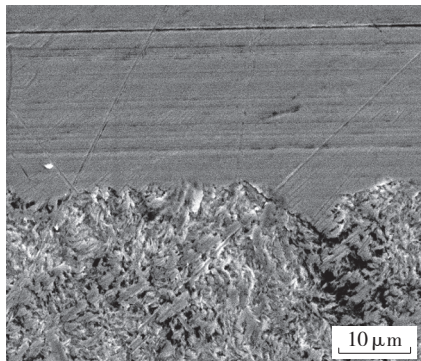


图2 滑动速度40mm/s, 600MPa接触应力条件下与M50钢对磨的镀银层的磨痕形貌
Fig.2 Surface morphology of Ag worn trace against M50 steel under condition of sliding speed of 40mm/s, contact stress of 600MPa

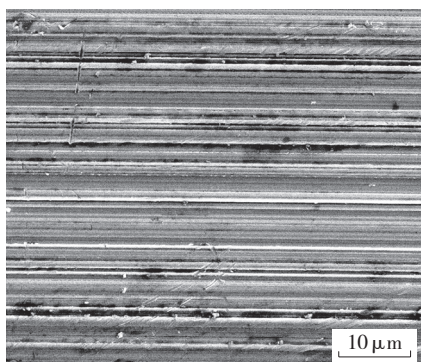


图3 滑动速度40mm/s, 900MPa接触应力条件下与M50钢对磨的镀银层的磨痕形貌
Fig.3 Surface morphology of Ag worn trace against M50 steel under condition of sliding speed of 40mm/s, contact stress of 900MPa

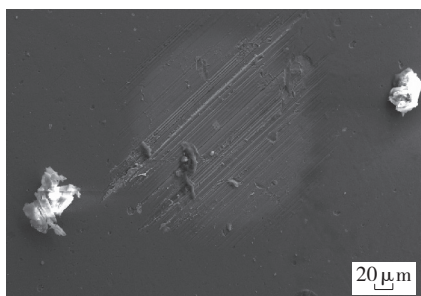


图4 接触应力2GPa转速100mm/s下M50钢球表面的磨损形貌
Fig.4 Surface morphology of M50 ball under condition of sliding speed of 100mm/s and contact stress of 2GPa

曲线基本重合,数值稳定在0.15~0.2之间,仅出现了上述第一阶段的摩擦。

进一步提高接触应力, TiN 涂层与银镀层之间也会出现第二阶段的摩擦,摩擦系数也会升高,如图6所示,摩擦条件为滑动速度80mm/s,接触应力600~1000MPa。可见,在较高接触应力900MPa和1000MPa时,也出现了第二个稳定摩擦系数的阶段。由于TiN涂层的硬度高,且晶体结构与金属Ag相差较大,因此与镀银层对磨时摩擦系数小,使高摩擦系数阶段向更高载荷推移。

图7(a)给出了接触应力

2000MPa、滑动速度120mm/s下TiN涂层的表面磨损形貌,可见与图4不同,仅在中心部位出现了一小块黑斑,对黑斑部位进行能谱分析,结果如图7(b)所示,说明即使在更高的接触应力和滑动速度情况下,600s的摩擦条件下,球的表面仍为纯的TiN涂层,没有基体材料出现,该结果表明TiN涂层对套圈引导面具有很好的保护作用。

3 讨论

对比以上研究结果看出, TiN 涂层与镀银层对磨时,摩擦系数明显降低,摩擦系数与对磨时间的关系曲线趋势也有所变化,但总体上还会出现

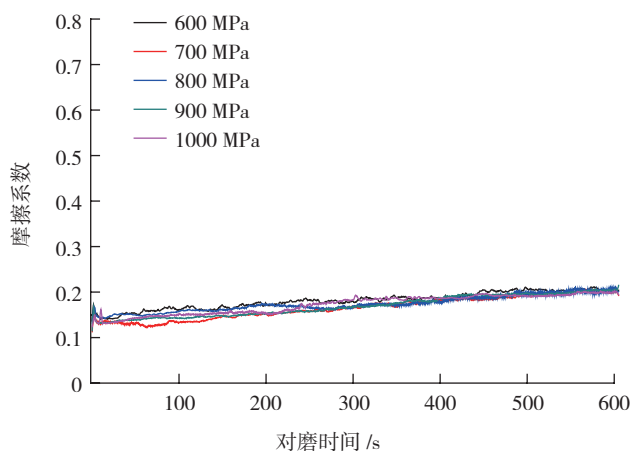


图5 40mm/s条件下TiN涂层与镀银层之间对磨摩擦系数随对磨时间变化曲线
Fig.5 Relationship between friction coefficient and sliding time for TiN coated ball on Ag-plating disk with speed of 40 mm/s

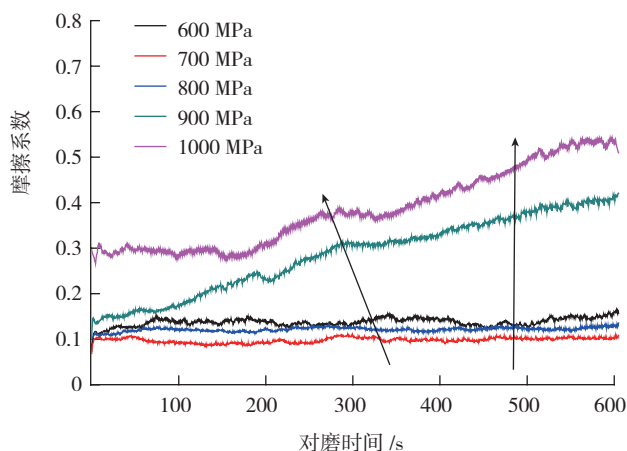
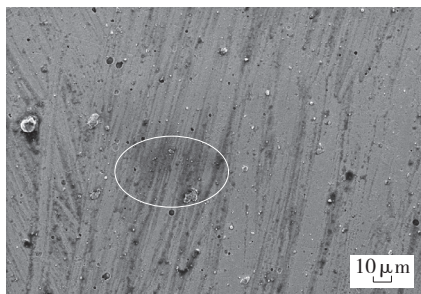
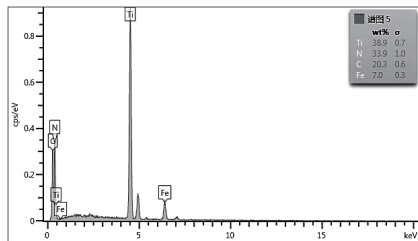


图6 80mm/s条件下TiN层与镀银层之间对磨摩擦系数随对磨时间变化曲线
Fig.6 Relationship between friction coefficient and sliding time for TiN coated ball on Ag-plating disk with speed of 80 mm/s



(a) TiN 表面的磨痕形貌



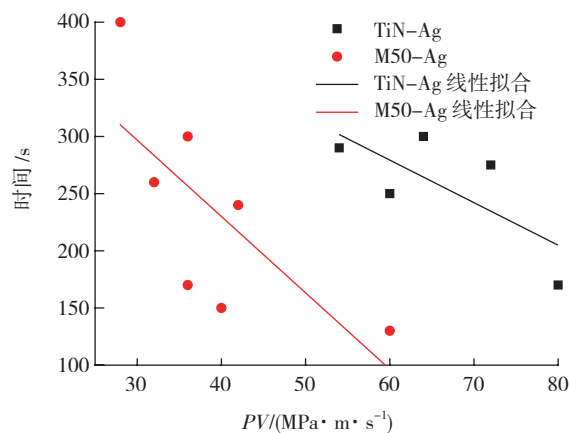
(b) EDS 分析结果

图7 120mm/s, 2000MPa接触应力条件下 TiN涂层的表面形貌和EDS分析结果

Fig.7 Surface morphology of TiN coated ball under condition of sliding speed of 120mm/s and contact stress of 2000MPa and EDS results from the circle area

第二个摩擦系数稳定的阶段。该阶段出现的时间点明显比 M50 钢长, 且与相对滑动速度和接触应力相关。

图 8 给出了接触应力 $P \times$ 滑动速度 V 和综合作用下的摩擦系数第二阶段的出现时间点之间的关系, 摩擦曲线上没有明显台阶的取摩擦系数为 0.4 对应的数值。由图 8 可见, 第二阶段出现的时间与 PV 值有

图8 PV 值与摩擦系数突变时间点的关系Fig.8 Relationship between PV value and the abrupt change point of friction coefficient

近似的线性关系。 PV 值越高, 转变点出现得越早。以 $PV=60\text{MPa} \cdot \text{mm/s}$ 为例, M50 钢摩擦系数转变点位于 125s 处, TiN 涂层摩擦系数转变点位于 250s 处, 说明在此条件下 TiN 涂层的存在使 M50 钢抗磨粒磨损性能提高约 1 倍。对图 8 的数据进行线性拟合, M50 钢与银层之间的摩擦 PV 值与摩擦系数转变点的关系的斜率为 -3.7 , TiN 涂层与银层之间摩擦系数的转变点关系斜率为 -6.7 , 说明 TiN 涂层对载荷和滑动速度不敏感, 在高载荷和高摩擦速度情况下, 耐磨性更高。

摩擦系数的大小与摩擦过程中材料的行为相关, 第一阶段低摩擦系数来源于表面银层的剪切滑移, 是典型的固体润滑作用; 第二阶段的较高摩擦系数与硬质颗粒对银层的犁削作用直接相关^[11]。摩擦曲线形状上的差异, 主要与材料体系及材料的表面状态相关。对于 M50 钢, 由于其组织特征为一次碳化物、回火马氏体和细小的二次碳化物, 其中一次碳化物尺寸约 $20\sim 30\mu\text{m}$, 硬度高, 裸露在表面的碳化物在相对滑动时对银层有强烈的犁削作用, 导致摩擦系数的增加; 而在摩擦过程中, M50 材料也会被磨损, 其脱落的碳化物很容易镶嵌在银层中, 从而形成如图 4 所示的基体材料的磨损, 这样将导致更多

的磨粒产生。磨损会随时间的增加愈来愈剧烈, 最终使银层磨穿, 两种钢材直接接触, 摩擦系数可达到 0.8 左右。载荷的增加与滑动速度的增加在摩擦机制上起到相似的作用, 因此随 PV 值增加, 摩擦系数突变时间提前。

TiN 涂层是在 M50 钢基体上沉积的, 当 TiN 与银之间组成摩擦副时, 二者之间结构差异很大, 图 7 的表面成分分析结果表明未形成转移膜。在 PV 值较低的情况下, TiN 对银有碾平作用, 如图 9 所示, 银层的固体润滑得到充分体现, 因此摩擦系数较低, 为 0.2 左右。

当 PV 值较高时, 虽然也会存在微凸体的划擦, 但是由于 TiN 涂层的存在, 阻挡了 M50 钢基体中大颗粒的脱落, 另外由于 TiN 硬度高达 30GPa , 一般的颗粒物很难将其划伤, 因此, 表面没有 M50 钢那种划痕存在, 抗磨粒磨损性能得到了大幅度的提高, 从而防止了轴承引导面的磨损。

结论

(1) M50 钢和 M50 钢表面涂覆 TiN 后与 40CrNiMoA 表面镀银层干摩擦时, 摩擦系数与滑动速度和接触应力有关。在较低滑动速度和较低接触应力条件下, 摩擦系数约 0.15~0.25, 此时主要以银层中银的剪

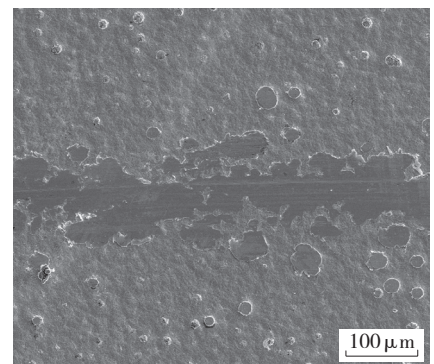


图9 600MPa, 40mm/s条件下TiN-Ag对磨600s时镀银层的表面形貌

Fig.9 Surface morphology of the silver plating layer when TiN-Ag pair grind 600s under the condition of 40mm/s, 600MPa

切滑移为主;当滑动速度较高和接触应力较大时,摩擦系数提高至 0.5 左右,此时以钢球表面的微凸体划擦银层,形成磨粒磨损为主。

(2) TiN 涂层与银层摩擦时,摩擦系数低,与无涂层相比,在 $PV=60\text{MPa}\cdot\text{mm/s}$ 时,可将磨粒磨损出现的时间推迟 1 倍。

(3) 滑动速度和接触应力的综合作用(PV 值)与摩擦系数出现明显变化的时间近似呈线性关系,随 PV 值增大,该时间点缩短。TiN 涂层更适合于高载荷和高摩擦速度的场合。

参考文献

[1] FLOUROS M. Correlations for heat generation and outer ring temperature of high speed and highly loaded ball bearings in an aero-engine[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006, 7(10): 611-617.
 [2] MUKHOPADHYAY P, KANNAKI P S, SRINIVAS M, et al. Microstructural developments during abrasion of M50 bearing steel[J].

Wear, 2014, 315(1): 31-37.

[3] PEISSL S, LEITNER H, EBNER R, et al. Characterization of wear and surface reaction layer formation on aerospace bearing Steel M50 and a nitrogen-alloyed stainless steel[J]. *Journal of ASTM International*, 2006, 3(2): 1-10.

[4] 王黎钦,李秀娟,古乐,等.一类极苛刻条件下的异常磨损现象“软磨硬”[C]//第七届全国摩擦学大会论文集.兰州,2002.

WANG Liqin, LI Xiujuan, GU Le, et al. One kind the most demanding conditions of abnormal wear phenomenon "the soft abrade the hard"[C]// *Proceedings of the Seventh National tribology Conference*. Lanzhou, 2002

[5] 闫国斌,孙东,刘森,等. M50NiL 与 M50 制轴承套圈引导面耐磨性能对比分析[J]. *轴承*, 2017(5): 23-25, 29.

YAN Guobin, SUN Dong, LIU Sen, et al. Comparative analysis on wear resistance of M50NiL and M50 bearing cage-land shoulder[J]. *Bearing*, 2017(5): 23-25, 29.

[6] HALUCK DA, CHIN HA, BLACK W. M50NiL abrasive wear resistance[C]//15th International Conference on Experimental Mechanics. Porto, 2012.

[7] SUNDGREN J E. Structure and

properties of TiN coatings[J]. *Thin Solid Films*, 1985, 128(1): 21-44.

[8] DIMOFTE F, KRANTZ T L, DIMOFTE F, et al. Tests of bearings and gears with PVD coatings for aerospace transmissions; results and problems[C]//3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN).Chalkidiki, 2008.

[9] ERDERNIR A. Rolling-contact fatigue life and wear resistance of hard coatings on bearing-steel substrates[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1992, 54/55: 482-489.

[10] 陈雄刚. 轴承钢表面 TiN 涂层与电镀银层摩擦磨损行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

CHEN Xionggang. Research on tribological behavior of tin coating on bearing steel against electroplating silver layer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[11] ITPG A. An introduction to tribology[J]. *Journal of Surgical Orthopaedic Advances*, 2008, 17(1): 2-5.

通讯作者: 马欣新, 教授, 研究方向为轴承材料热处理与应用、等离子体化学热处理, E-mail: maxin@hit.edu.cn.

Tribological Properties of TiN Coated M50 Steel for High Temperature Bearing Against Silver Coatings

GE Quanjiang¹, ZHANG Xinghong², MA Xinxin³, CHEN Xionggang³, TANG Guangze³

(1. Military Delegate Office of PLA Residing Harbin Bearing Group Corporation, Harbin 150036, China;

2. AECC Harbin Bearing Group Corporation, Harbin 150025, China;

3. School of Material Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] This work investigated the tribological properties of M50 steel and TiN coated M50 steel against silver coatings, based on the abnormal wear existing in aerospace engine bearing. The effect of relative sliding speed, contact stress as well as the interaction between the two parameters on friction coefficient with time were analyzed. SEM and EDS were used to observe the surface morphology and the compositions of the worn traces. The results show that, friction coefficient increases with sliding time, and exists an abrupt change time. With lower sliding speed and lower contact stress, the friction coefficient keeps on 0.15-0.25. However, with higher sliding speed and higher contact stress, the friction coefficient rises quickly and reaches about 0.5. Within the range of parameters in this test, the change time has an approximate linear relationship with PV value, which is the product of contact stress P and sliding speed V . Sliding with high speed and high contact stress, the scratch will occur on the surface of M50 steel by the large hard particles. TiN coating can obviously postpone the time of the high friction coefficient, and has the advantage to prevent the worn of M50 steel due to impeding the peel off of the large carbides

Keywords: High temperature bearing steel; TiN coating; Friction

(责编 大漠)