

# 接触载荷对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响

景鹏飞, 俞树荣, 宋伟, 何燕妮, 邵晨

(兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 730050)

**摘 要:** **目的** 在不同的载荷和位移幅值下, 结合微动图研究微动接触状态、滑移状态、损伤体积三者对微动摩擦磨损的影响以及不同微动接触状态和滑移状态下材料的损伤机理, 为机械构件的微动磨损防护设计提供一定的理论支持。**方法** 在相对湿度为 50%、干摩擦条件下, 运用 SRV-V 摩擦实验机, 采用球/平面接触形式研究了 TC4 钛合金/GCr15 钢球摩擦副的微动摩擦磨损行为。实验后, 用原子力显微镜、纳米压痕仪、三维光学轮廓仪、场发射扫描电子显微镜及其自带的 EDS, 测试 TC4 试样的表面形貌及粗糙度、弹性模量与硬度、磨损体积与截面形貌和显微结构及磨斑、磨屑形貌成分等。**结果** 在较低法向载荷下, 完全滑移(GSR)占主导地位。磨粒磨损、粘着磨损、氧化磨损以及疲劳脱层是主要的损伤机理。另一方面, 在较高法向载荷下, 混合滑移(MSR)、部分滑移(PSR)占主导地位。损伤机制是由于高的应力集中, 导致疲劳裂纹。此外, 不同的微动运行条件下和材料损伤区域也不相同。完全滑移条件下, 损伤主要集中在磨斑中心, 而部分滑移条件下, 损伤主要集中在磨斑边缘。**结论** 切向摩擦力、微动振幅是影响微动磨损的重要因素。小位移幅值下, 磨屑可以减缓接触面钛合金基体材料的微动磨损; 而大位移幅值下, 磨屑会加剧接触面基体材料的微动磨损。

**关键词:** 微动磨损; 接触状态; 损伤机理; 损伤体积; TC4 钛合金; 微动图

**中图分类号:** TG146.2; TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)11-0266-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.11.029

## Effect of Contact Load on Fretting Wear Behavior of TC4 Titanium Alloy

JING Peng-fei, YU Shu-rong, SONG Wei, HE Yan-ni, SHAO Chen

(School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of fretting contact states, sliding regimes and damaged volumes on fretting wear under different loads and displacement amplitudes with fretting maps and the damage mechanism of materials in different fretting contact and sliding states, so as to provide certain theoretical support for fretting wear protection of mechanical components. The fretting friction and wear behaviors of TC4 titanium alloy against GCr15 steel ball were studied by SRV-V friction tester with a ball/plane contact configuration in a condition of dry friction with 50% relative humidity. After the experiment, the surface morphology, roughness, modulus of elasticity, wear volume, cross sectional morphology, microstructure, wear scar, wear debris, etc. of TC4 samples were tested with atomic force microscope, nanoindentation

收稿日期: 2019-04-11; 修订日期: 2019-06-21

Received: 2019-04-11; Revised: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275225)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51275225)

作者简介: 景鹏飞(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微动磨损。

Biography: JING Peng-fei (1981—), Male, Doctor student, Research focus: fretting wear.

通讯作者: 俞树荣(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为承压类特种设备结构分析。邮箱: yusr@lut.edu.cn

Corresponding author: YU Shu-rong (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: structural analysis of pressure-bearing special equipment. E-mail: yusr@lut.edu.cn

instrument, three-dimensional optical surface profilometer, SEM with EDS. Under low normal load, fretting regime was a gross slip. Abrasive wear, adhesive wear, oxidation wear, and fatigue delamination were the main damage mechanisms. On the other hand, under large loads, fretting regime was a partial slip and a mixed slip. In this case, damage mechanisms were correlated with fatigue cracks due to highly concentrated stress. In addition, under different fretting conditions, material damage areas were also different. Under complete slip regime, the damage was mainly concentrated in the center of the wear scar, and under partial slip conditions, the damage was mainly concentrated on the edge of the wear scar. Tangential friction and fretting amplitude are important factors affecting fretting wear. Wear debris at small displacement amplitude can slow down fretting wear of titanium alloy matrix material at contact surface, while wear debris at large displacement amplitude can intensify fretting wear of matrix material at contact surface.

**KEY WORDS:** fretting wear; contact state; damage mechanism; damage volume; TC4 titanium alloy; fretting map

TC4 钛合金因具有耐腐蚀、密度低、强度高及韧性好等优点,在航空航天等部门得到广泛应用,如航空压气机轮盘、叶片,但其硬度低、耐磨性差等缺点导致它对微动磨损极为敏感,易发生粘着磨损、磨粒磨损、氧化磨损和微动腐蚀等造成压气机叶片失效断裂<sup>[1-2]</sup>。因此钛合金微动磨损的损伤机理以及防护措施成为研究的热点<sup>[3-4]</sup>。

影响微动磨损的参数很多,如接触几何形状、材料特性、位移振幅、接触压力、循环次数、微动振幅和环境因素等,其中主要因素是载荷、位移幅值、频率<sup>[5]</sup>。Vingsbo 和 Soderberg<sup>[6]</sup>、Vincent<sup>[7]</sup>和 Zhou<sup>[8]</sup>等人提出了“微动图”的概念,阐明微动磨损参数与微动磨损之间的关系。最典型的微动图基于法向载荷与位移幅值。之后许多实验得出,微动磨损滑移状态分为部分滑移状态 (PSR)、混合滑移状态 (MSR) 和完全滑移状态 (GSR)。研究微动磨损机制要使用适当接触方式,接触方式可以分为球/平面、圆柱/平面等。球/平面型接触被广泛使用,主要是由于精确的接触位置且实验易于操作。郭薇<sup>[9]</sup>研究了不同微动幅值对钛合金微动摩擦系数及界面形貌的影响。Huang<sup>[10]</sup>研究了大载荷下 TC4 钛合金界面处的微动磨损行为。范娜<sup>[11]</sup>研究了载荷对 304 不锈钢微动磨损性能的影响。在圆柱/平面接触方面, Fouvry 用不同直径的圆柱,研究了循环载荷对钛合金微动磨损的影响<sup>[12]</sup>。柏林<sup>[13]</sup>采用圆柱/平面接触方式,进行了 TC21

钛合金微动磨损实验,研究了微动频率、法向载荷、微动振幅对磨损量的影响。

俞树荣<sup>[14-15]</sup>在 Ti6Al4V 钛合金微动磨损情形下,研究了摩擦转化层 TTS 的形成和它的微裂纹特征。之后,又研究了 GCr15、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等不同摩擦副对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响。陈明<sup>[16]</sup>采用 TC4/TC4 对磨,在高载荷条件下,研究了 TC4 钛合金微动磨损特性。张亚非<sup>[17]</sup>在低频率下研究了 TA16 钛合金微动摩擦磨损特性。综上所述,对 TC4 钛合金在各种影响因素下微动损伤状态的系统性研究较少,尤其载荷条件较为单一,机理研究偏少。本文根据 Mises 屈服准则和 Hertz 接触分析,从材料发生屈服前后不同的应力水平、不同的微动振幅,结合摩擦系数、摩擦耗散、磨损体积、磨损率、磨痕表面形貌等方面,系统探讨了 TC4 在部分滑移、混合滑移、完全滑移三种状态下的微动磨损机理,为机械结构的微动磨损防护设计提供理论支持。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 基体材料

基体材料为宝鸡市三立有色金属有限责任公司生产的  $\alpha+\beta$  双相 TC4 钛合金板材,其表面形貌如图 1 所示。由 TC4 钛合金金相试样的 SEM 照片可知,其

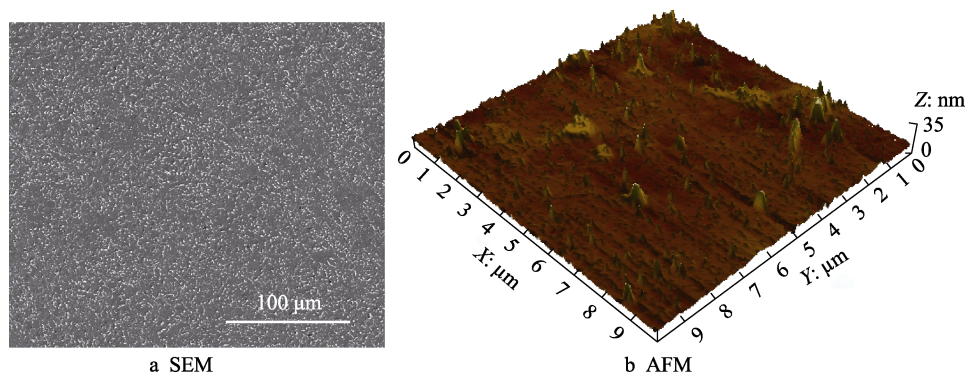


图 1 扫描电镜和原子力显微镜下 TC4 的表面形貌  
Fig.1 Surface morphology of TC4 under SEM and AFM

显微组织为  $\alpha$  相基体上分布着球形和条形  $\beta$  相的两相结构。由 TC4 的 AFM 表面形貌发现, TC4 钛合金基体表面经腐蚀后表面粗糙度为 9.03 nm。其化学成分、机械性能如表 1、表 2 所示。首先对钛合金板材进行线切割, 切取基材试样, 试样尺寸为  $\phi 24 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ , 用不同目数 SiC 金相水磨砂纸进行打磨, 将试样厚度减为 7.85 mm, 最后在抛光机上用  $\text{SiO}_2$  精抛光液将试样抛成镜面, 试样为最终尺寸  $\phi 24 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm}$  的圆柱体, 表面粗糙度  $R_a=0.03 \mu\text{m}$ 。在超声波清洗机里, 分别用丙酮和酒精溶液各超声清洗 10 min, 除去材料表面油污, 以保证表面清洁。

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
wt. %							
6.5	4.3	0.06	0.01	0.01	0.01	0.08	Bal.

表 2 TC4 钛合金的机械性能

Tab.2 Mechanical properties of TC4 titanium alloy

$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$H(\text{HV}_{50 \text{ g}})$	Structure
905	845	114	0.33	350	$\alpha+\beta$

## 1.2 微动磨损实验

微动磨损实验在德国 Optimol 油脂公司 SRV-V 摩擦磨损实验机上进行, 实验采用球/平面的点接触摩擦方式, 如图 2 所示。上试样为  $\phi 10 \text{ mm}$  的 GCr15 球, 下试样为  $\phi 24 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm}$  的 TC4 合金圆柱。实验条件: 微动循环次数  $N=3 \times 10^4$ , 法向载荷  $P$  分别为 5、10、20、50、100 N, 振动幅值  $D$  分别为 25、50、100  $\mu\text{m}$ , 频率  $f=50 \text{ Hz}$ , 实验温度为室温 ( $20 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 相对湿度为 50%, 微动磨损实验在大气环境中进行。实验前对上下试样用酒精进行清洗, 保证接触面洁净。

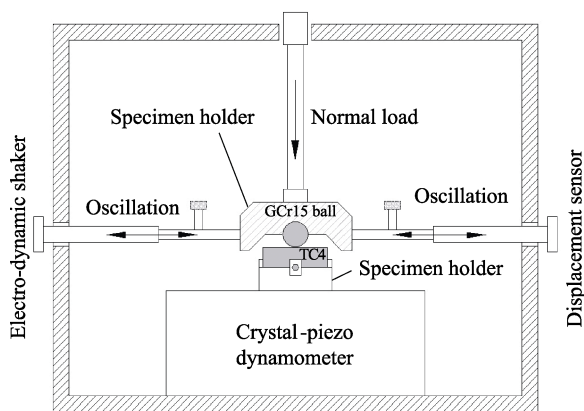


图 2 微动磨损实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of fretting wear test setup

## 1.3 磨损表面接触应力状态

利用 Hertz 接触理论对基体的微动磨损行为进行

分析, 根据载荷得出应力, 判别接触状态, 进而研究接触状态对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响。GCr15 对磨球施加的正压力作用在 TC4 合金表面, 据 Hertz 接触理论<sup>[18]</sup>, 接触面的最大接触应力为:

$$p_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6PE^*}{\pi^3 R^2}} \quad (1)$$

式中:  $P$  为正压力;  $R$  为球半径;  $E^*$  为等效弹性模量,  $E^*$  可由式 (2) 计算得到。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

式中:  $E_1$ 、 $\nu_1$  和  $E_2$ 、 $\nu_2$  分别为 GCr15 与 TC4 钛合金的弹性模量和泊松比,  $E_1=208 \text{ GPa}$ ,  $\nu_1=0.3$ ,  $E_2=120 \text{ GPa}$ ,  $\nu_2=0.34$ 。

接触半径为:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PE}{4E^*}} \quad (3)$$

Hertz 平均接触应力:

$$p_m = \frac{P}{\pi a^2} \quad (4)$$

根据 F P Bowden 和 D Tabor 的理论<sup>[19]</sup>, 在弹性接触状态下,  $p_m$  的上限值为  $1.1Y$  ( $Y$  为 TC4 合金的屈服极限, 其值为 845 MPa)。若  $p_m$  值超过  $1.1Y$ , 则接触区域进入塑性接触状态。根据 Mises 屈服准则, 无摩擦接触时, 材料发生屈服时, 施加的应力约为屈服强度的 1.66 倍<sup>[10]</sup>。然后根据 Hertz 接触理论计算出材料发生屈服时的法向载荷为 50 N, 所以在 5、10、20 N 载荷下, 材料没有进入塑性接触状态, 而 50、100 N 时, 材料进入塑性接触状态, 具体如表 3 所示。如果用最大 Hertz 接触应力来判断接触状态, 可以确定 5、10 N 时, 材料在弹性接触状态。此时  $p_{\max}$  与  $Y$  的比值小于 1。从摩擦系数曲线可以看出, 在弹性接触状态下, 材料摩擦系数很小, 载荷对摩擦系数的影响也较小。

表 3 不同载荷下 TC4 钛合金  $p_m/Y$  及  $p_{\max}/Y$  的值Tab.3 Ratio of  $p_m/Y$  and  $p_{\max}/Y$  of TC4 alloy under different loads

Normal load/N	Contact radius/ $\mu\text{m}$	Hertzian max pressure /MPa	Mean pressure /MPa	Ratio $p_m/Y$	Ratio $p_{\max}/Y$
5	60	651	434	0.513	0.77
10	76	820	546	0.646	0.97
20	96	1034	689	0.815	1.22
50	130	1406	937	1.108	1.66
100	164	1771	1180	1.396	2.09

实验完毕后保持试样原貌, 分别用酒精和丙酮清洗, 干燥后, 用 QUANTA FEG 450 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 分析磨痕表面形貌。结合 EDS 能谱仪对磨痕进行化学元素成分分析, 研究 TC4 钛合金



在不同微动条件下的微动磨损失效机理。实验过程中由计算机自动采集摩擦系数。用三维表面轮廓仪获得磨损形貌截面轮廓（测量磨痕的深度与宽度）和磨损体积（衡量磨损量）。通过磨损试样的磨损体积与摩擦功的比值（载荷与位移的乘积）求得磨损率。利用纳米压痕仪（Nano-indenter II Ti 950, Hysitron, USA）以极小的力将金刚石针尖压入 TC4 钛合金基体表面，通过测试针尖在加载和卸载过程中的深度变化，测量基体的硬度、弹性模量、接触刚度和塑性、弹性恢复等力学性能。

## 2 结果及分析

### 2.1 TC4 钛合金力学性能

TC4 钛合金的加载与卸载曲线均未呈线性关系，如图 3 所示，这表明 TC4 钛合金发生了塑性变形<sup>[20]</sup>。加载和卸载曲线内的区域代表塑性变形能，而卸载位移则与材料弹性有关。从图 3 可以看出，在 3.4 mN 最大法向载荷下，TC4 钛合金基体的最大穿透深度为 150 nm。卸载时，TC4 的弹性恢复深度（百分比）为 50 nm（33%），法向接触刚度为 0.078 N/m。TC4 的硬度和弹性模量分别为 5.6 GPa 和 127.56 GPa。此外，TC4 微动磨损后形成 TTS，经 TTS 纳米压痕实验表明<sup>[14]</sup>，TTS 纳米压痕硬度值为 9.67 GPa。可知，TTS 的硬度比 TC4 基体的硬度高，会对微动磨损产生较大影响。

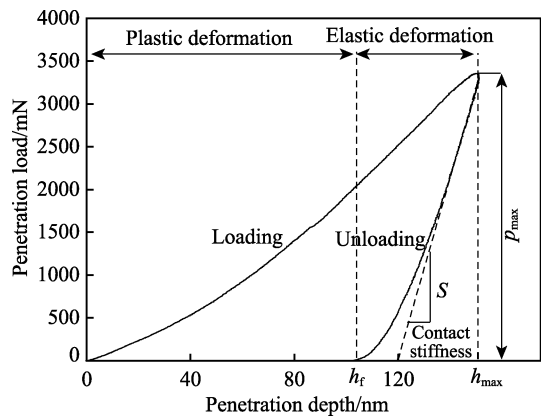


图 3 TC4 钛合金纳米压痕载荷-位移曲线  
Fig.3 Load-displacement curves of TC4 nanoindentation

### 2.2 磨痕表面形貌分析

根据微动磨损现象将图 4 划分出三个区域：部分滑移区（PSR）、混合区（MSR）、完全滑移区（GSR）。从图可见，部分滑移发生在较小相对位移或极大法向力的情况下，完全滑移区则处于较大相对位移或较小法向力的条件下，混合区则介于部分滑移区和完全滑移区之间。载荷不变时，随着位移幅值的增大，磨斑面积也在增大，并且微动损伤变得越严重；位移幅值

为 50、100  $\mu\text{m}$  时，随着载荷的增加，磨斑的面积也在增大且微动损伤变得越严重。但位移幅值为 25  $\mu\text{m}$  时，随着载荷的增加，磨斑的面积没有一直保持增大的趋势。在 100 N 时，磨斑的面积变小了且微动损伤较轻，损伤主要集中在边缘附近，中间出现粘着。这时处于部分滑移区。从磨斑截面轮廓图也可以看出，完全滑移区内，相同载荷下，位移幅值越大，磨痕宽度越宽；相同位移幅值下，载荷越大，磨损深度越深。材料未进入屈服时，TC4 钛合金基体磨损深度和宽度随着载荷的升高或位移幅值的增大而变大。总体轮廓线呈“U”型。材料进入屈服后，TC4 钛合金基体磨损深度和宽度也随着载荷的升高或位移幅值的增大而变大。中间由于磨屑的堆积或者中心的粘着，总体轮廓线呈“W”型。

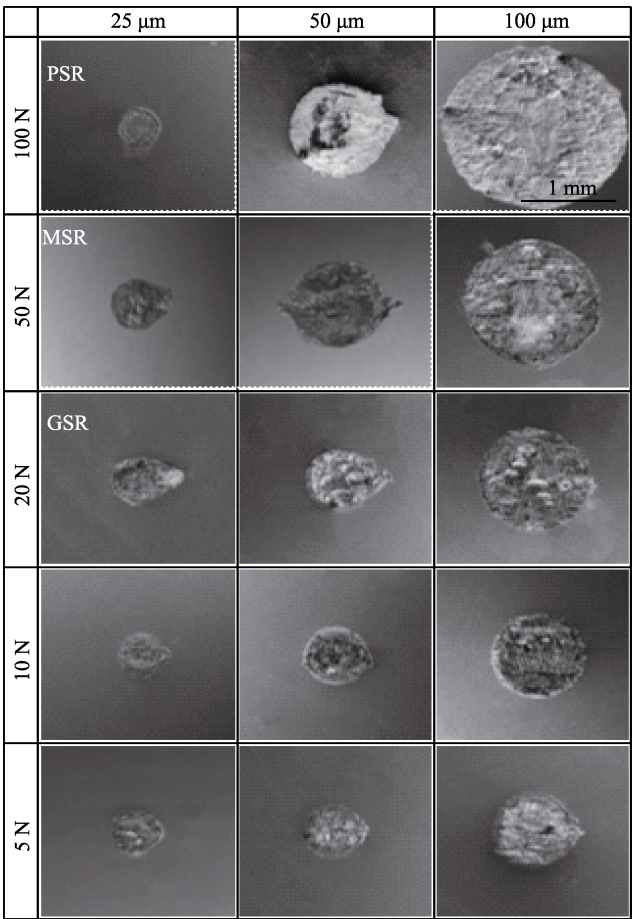


图 4 扫描电镜下磨痕表面形貌  
Fig.4 Morphology of wear scars under SEM

在微动磨损的过程中，GCr15 表面硬质尖锐的微凸体对 TC4 表面产生切削作用，经过一次或者多次切削将 TC4 表面材料切削掉，形成磨屑。在完全滑移状态下，磨屑会被氧化，磨屑层被压实，并发生剥落（图 5a）及断裂、犁沟磨损的现象（图 5b）。在混合滑移状态下，法向载荷较高（50、100 N）时，接触中心发生严重塑性变形、粘着，如图 5c 所示。



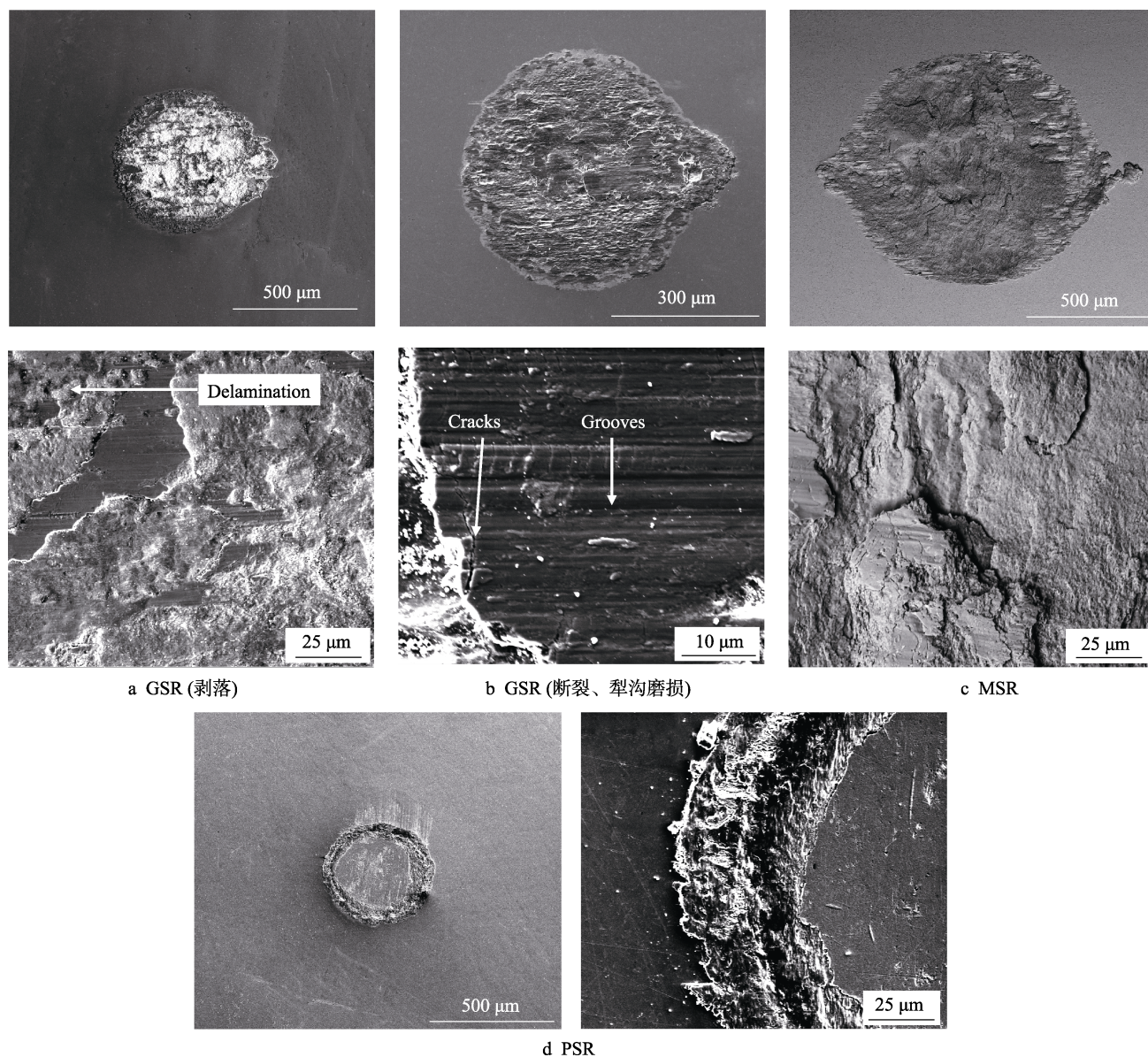


图5 典型的微动磨损失效形貌

Fig.5 Typical failure morphology of fretting wear: (a) spalling in GSR, (b) fracture and ploughing wearing in GSR

磨痕表面存在剥落坑及微裂纹带,这是因为微动磨损过程中交变的法向和切向应力造成 TC4 钛合金表面产生冷作硬化,冷作硬化又使摩擦副亚表面产生严重的塑性变形,金属表面位错增加,形成许多微小的疲劳裂纹,因而中心区域的主要磨损机理是疲劳磨损<sup>[15]</sup>。随着裂纹不断扩展,造成剥落坑的出现。TC4 钛合金磨痕边缘犁沟多且深,说明发生了严重的磨粒磨损。这是因为材料表面发生相互摩擦后产生磨粒,部分磨粒在摩擦热的作用下被氧化、变硬,在法向力的作用下压入材料表面,切向位移使磨粒向前推进,在法向力和切向力的反复作用下,在材料表面划出犁痕。在部分滑移状态下,法向载荷较高(100 N),位移幅值较小(25 μm),接触中心发生粘着,产生的磨损比较轻微,微动接触区边缘发生滑动,造成磨损。如

图 5d 所示,为典型的部分滑移状态。

## 2.3 摩擦系数及摩擦耗散能分析

TC4 钛合金微动磨损过程中摩擦系数的变化曲线如图 6 所示。在微动磨损初期,TC4 由于表面完整性较好及氧化膜的存在,所以摩擦系数较小,随着表面完整性及氧化膜被破坏,摩擦系数开始变大。总体上,摩擦系数曲线前期波动较大,后期趋于平滑。这是因为 TC4 与 GCr15 接触产生粘着,摩擦系数上升;随着磨屑的产生和增多,粘着变小,摩擦系数降低;接着磨屑被排出,粘着又增加,摩擦系数上升,接触面发生粘着磨损和磨粒磨损的交替作用,从而导致摩擦系数的波动。当磨屑的产生与排出速率相同时,会形成稳定的第三体层,在第三体层的润滑作用下,摩

摩擦系数开始变得平稳<sup>[21]</sup>。实验在弹性接触条件下(5、10 N), 摩擦系数较小, 大部分时间摩擦系数在 0.1 左右。随着位移幅值的增加, 摩擦系数增大, 且摩擦系数波动现象变剧烈, 持续时间变长最后趋于平稳。说明位移幅值的增大会导致材料粘着现象变剧烈。随着载荷的增加, 摩擦系数迅速从 0.4 开始增加。在非弹性接触条件下(20、50、100 N), 如图 6c 所示, 摩擦系数曲线出现了剧烈波动, 说明材料发生了严重的粘着磨损。此外, 在低载荷与高载荷时, 摩擦曲线出现了明显分层, 这是由接触应力状态决定的。根据

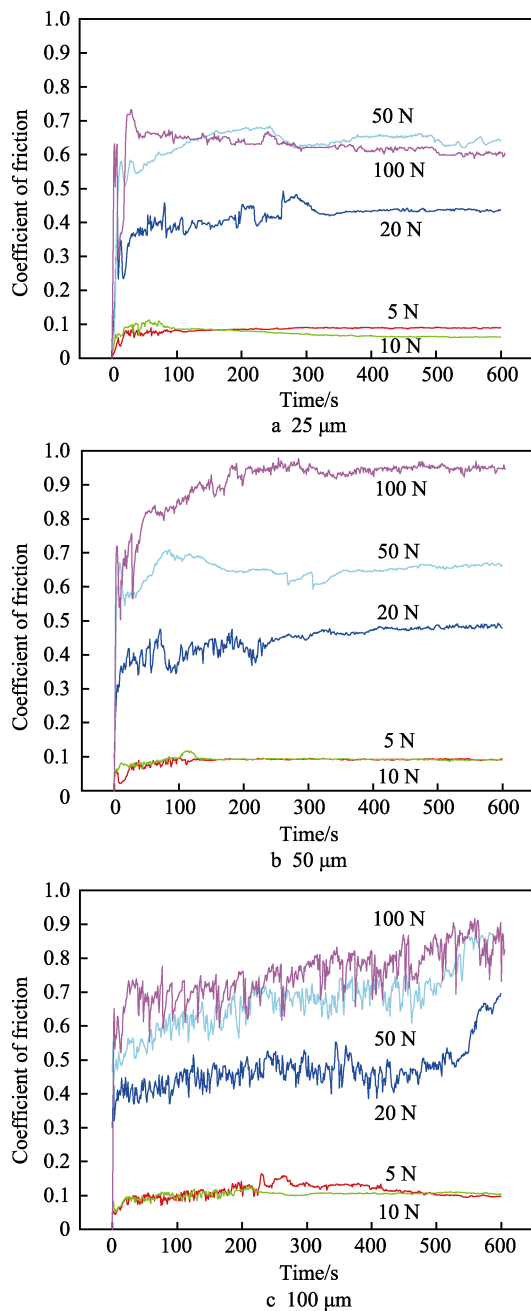


图 6 不同载荷下 TC4 的摩擦系数随循环次数的变化关系

Fig.6 Relationship between friction coefficient of TC4 and cycle times at different loads

Hertz 接触公式, 低载荷时, 接触区域是弹性变形; 高载荷时, 接触区域处于弹塑性变形甚至塑性变形区, 这时材料刚度变大, 很难压缩, 更容易产生粘着。

摩擦耗散能是研究微动磨损的一个重要指标, 它可由公式(5)计算得到<sup>[22]</sup>。

$$E_d = \sum_{i=1}^n T_i D_i \quad (5)$$

式中:  $E_d$  为摩擦耗散能,  $D$  为位移,  $T$  为切向摩擦力。应用式(5)可以得到摩擦耗散能随循环次数增加的变化曲线, 如图 7 所示。载荷为 5、10 N, 位移幅值为 25、50  $\mu\text{m}$  时, 摩擦耗散增长缓慢。当载荷为 20、50 N 或位移幅值为 100  $\mu\text{m}$  时, 摩擦耗散增长加快。此外, 摩擦耗散能与循环次数是一种线性关系。根据能量模型<sup>[23]</sup>可知, 磨损体积与接触面间的总耗散能成正比, 即:

$$\alpha = \frac{V}{E_d} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为能耗法能量体积磨损系数;  $V$  为磨损体积;  $E_d$  为总耗散能。

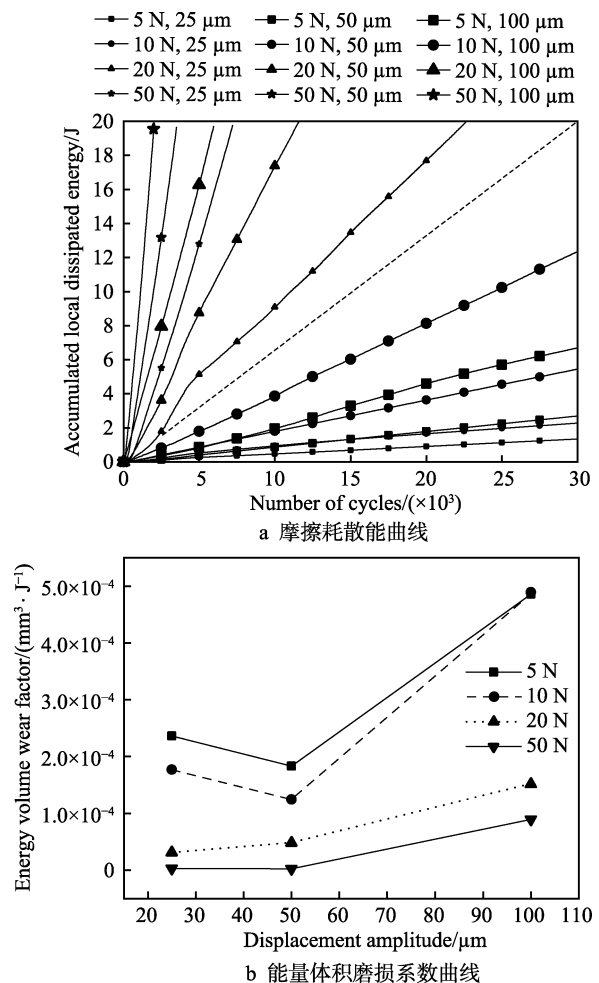


图 7 不同条件下 TC4 的摩擦耗散能曲线及能量体积磨损系数曲线

Fig.7 Dissipated energy (a) and energy volume wear factor (b) curves of TC4 at different conditions



## 2.4 磨损体积与磨损率分析

磨损体积和磨损率是衡量 TC4 微动磨损性能的重要指标。载荷、位移幅值对 TC4 磨损体积和磨损率的影响分别如图 8 所示。磨损体积由三维轮廓仪直接测得。由图 8a 可知,材料进入屈服前后,磨损体积有不同的变化规律。在 25、50  $\mu\text{m}$  位移幅值下,材料屈服后磨损体积远小于屈服前磨损体积;100  $\mu\text{m}$  位移幅值下,材料屈服后磨损体积大于屈服前磨损体积。法向载荷相同时,磨损体积随位移幅值的增加而增加。这是因为小位移幅值使得磨屑不易溢出,在接触中心堆积,从而导致第三体层的形成,在第三体层润滑作用下,减缓磨损。之后摩擦热将促进接触面间的氧化反应,使得减摩膜层的形成速率加快,虽然它硬度较高,但由于其厚度较薄,易被破坏,因此在大位移幅值下,易于排出,微动过程中减摩膜层剥落形成的过程不断交替进行,加剧 TC4 的磨损。

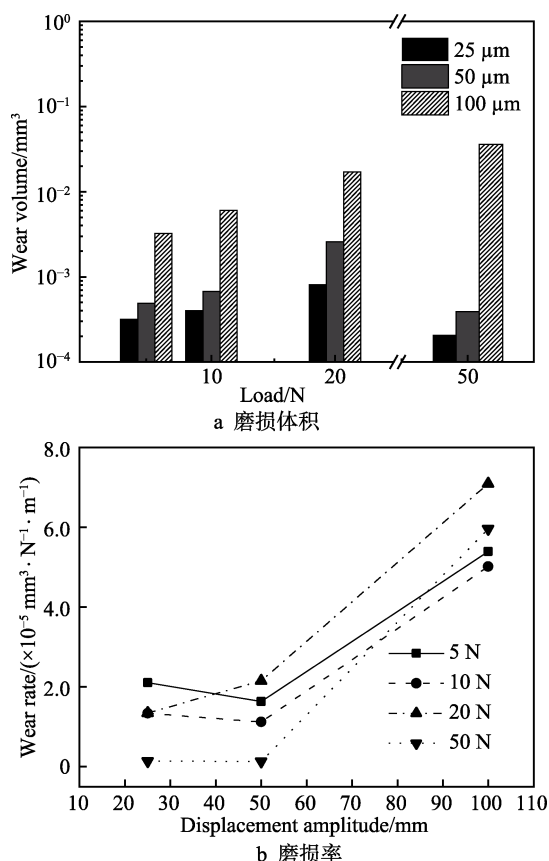


图 8 不同载荷及位移幅值下 TC4 的磨损体积和磨损率  
Fig.8 Wear volume (a) and wear rate (b) of TC4 at different loads and displacement amplitudes

磨损率  $K_{\text{Archard}}$  可以通过磨损体积与循环次数、位移幅值和载荷的比值得出<sup>[24]</sup>:

$$K_{\text{Archard}} = \frac{V}{4NDP} \quad (7)$$

式中,  $K_{\text{Archard}}$  为磨损率 ( $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ );  $V$  为磨损体积 ( $\text{mm}^3$ );  $N$  为循环次数;  $D$  为位移幅值 ( $\mu\text{m}$ );  $P$  为载荷 (N)。

如图 8b 所示,小位移幅值下的磨损率明显低于大位移幅值下的磨损率。主要有两个原因:(1)在微动磨损实验时,位移幅值小时,大多数接触面处于重叠状态,微动磨损表面的应变硬化比位移幅值大时的磨损表面严重得多,可以通过磨斑处的纳米硬度来反映,通常认为磨损量与目标材料的硬度大致成反比;(2)在微动磨损实验中产生的磨屑残留在接触界面之间,起到固体润滑剂的作用,也能减少磨损<sup>[21]</sup>。因此载荷不变,位移幅值增大,磨损率先下降后上升。这种现象可用位移比率<sup>[25]</sup>(an amplitude ratio,  $A$ )的概念来解释,即位移幅值与 Hertz 接触半径之比:

$$A = D/a \quad (8)$$

随着位移幅值的增大,钛合金损伤体积变大。当位移幅值为 25  $\mu\text{m}$  时,位移小,摩擦耗散能也小。小微动振幅时,部分甚至全部微动振幅可被表面处的弹性变形吸收<sup>[26]</sup>。但有限的损伤体积在不断的循环切应力作用下快速失效。当位移幅值为 50  $\mu\text{m}$  时,位移增大,损伤体积增大,强度有所提高,储存的应变变大。摩擦耗散能有很大一部分转移成应变能,所以磨损较小。当位移幅值为 100  $\mu\text{m}$  时,位移变大,摩擦耗散能也大。这时由于损伤体积变大,切向刚度变大,切应力产生的应变变小,存储应变能也较小,所以造成摩擦磨损很严重。位移幅值不变,随着载荷的增加,TC4 磨损率会有波动,25、50、100  $\mu\text{m}$  情况下的磨损率相差很大。要想降低磨损率,位移幅值必须要小。此外在小位移幅值下,增大法向载荷,可以降低磨损率,抑制微动磨损。这是由于载荷增加使接触面积和摩擦力增加,进而导致冷作硬化现象严重,这在一定程度上会减缓 TC4 的磨损<sup>[26]</sup>,降低磨损率。

## 2.5 EDS 分析

当 TC4 与 GCr15 对磨时,由于 TC4 钛合金基体硬度比摩擦副 GCr15 低得多,摩擦副表面出现了粘着现象。摩擦副表面磨斑处的 EDS 元素分析如图 9 所示。

主要结果表明由氧元素组成,此外还有钛、铝和钒等元素。这说明磨屑与摩擦副表面发生了化学元素的剧烈氧化以及基体材料向摩擦副的转移<sup>[27]</sup>,这是因为钛合金等韧性材料对粘附现象十分敏感。在法向载荷和切向载荷共同作用下,基体表面材料脱落,产生磨屑并向对偶球表面转移。磨屑在整个摩擦过程中起到磨料作用,加剧基体的磨粒磨损。此外,材料冷作硬化、摩擦转化层 TTS 形成,也能加剧基体的磨粒磨损。由于它们硬度较高,当它们脱落时,会进一步加剧磨损。



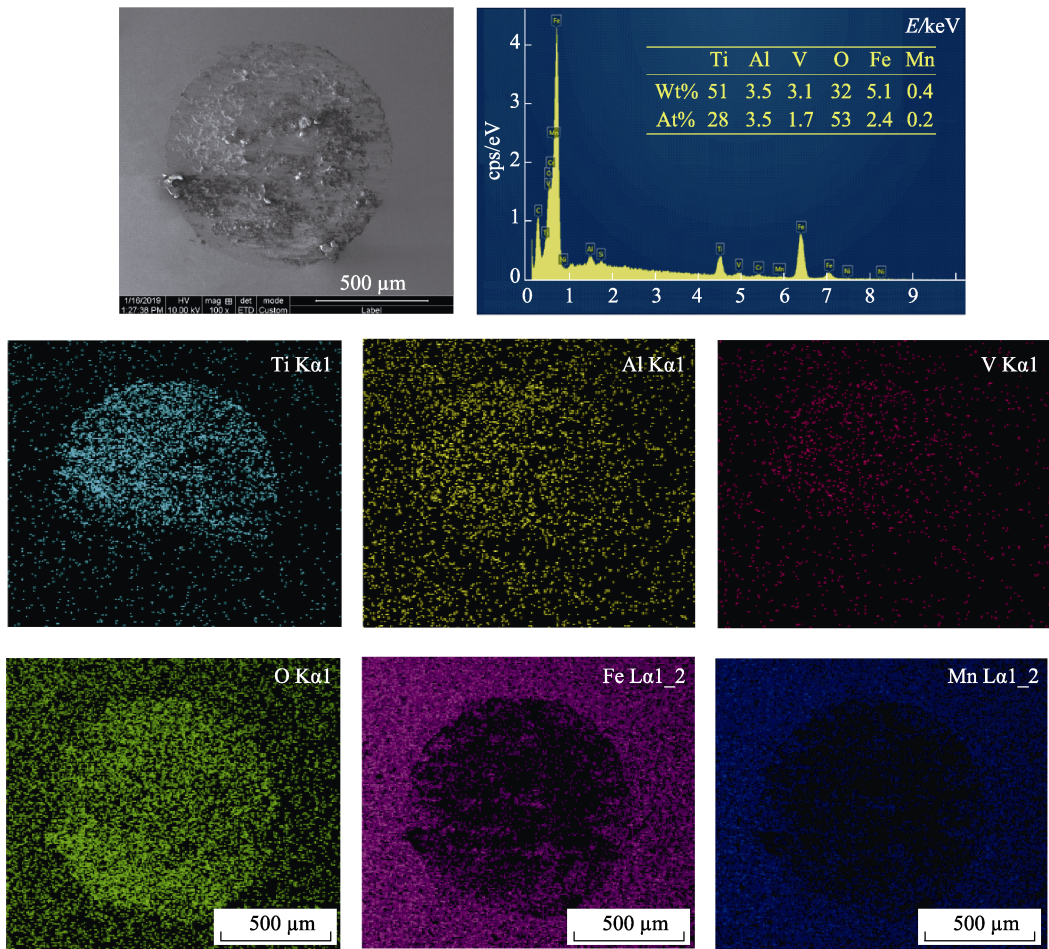


图 9 GCr15 摩擦副表面磨斑 EDS 元素分析  
Fig.9 EDS elemental analysis of the wear scar of the GCr15 friction pair

3 磨损机理

弹性接触情形下, TC4 钛合金的磨损机理主要是氧化磨损, 这是导致材料失效的主要原因。从磨斑处断面形态来看, 当位移幅值很小时, 可以观察到磨屑层表面附近的材料微观结构只有薄薄的塑性变形层。正是循环切向力作用推动它的形成。由于 TC4 钛合金良好的延展性, 它可能会诱发微观组织结构发生变化, 如摩擦学转变层 (TTS)。随着位移幅值的增加, 接触区域的表面在磨屑切削作用下, 形成粗糙的磨损表面, 且在磨损表面附近出现微观结构的塑性变形。但磨屑层下面基体没有发生塑性变形。塑性接触情形下, 磨屑层下面基体部分发生了塑性变形, 并对磨屑层有着良好的支撑作用, 在法向载荷与切向载荷联合作用下加剧了材料磨损。综上所述, 弹性接触状态下, 磨屑层下面的基体材料不会出现塑性变形层; 塑性接触状态下, 磨屑层下面的基体材料会出现塑性变形层, 而磨屑层的塑性变形主要是循环切向载荷作用的结果。

4 结论

1) 根据 Hertz 最大接触应力可以很好地反映 TC4

钛合金基体与 GCr15 对磨球的应力接触状态, 法向载荷造成了磨损区域组织结构直接变形。实验后, 从磨斑处断面可以发现这一点。应用 Mises 屈服准则对微动磨损来说偏于保守, 这是因为微动磨损影响下的损伤体积是有限的。

2) 切向摩擦力、微动振幅是影响微动磨损的重要因素, 位移幅值越大, 微动磨损越严重。位移幅值一定时, 增加法向载荷, 可以增加接触面的粘着, 微动振幅可被粘着表面处的弹性变形吸收。切向摩擦力与法向载荷有关。切向摩擦力值越大, 微动磨损越严重。当法向载荷一定时, 可以考虑采用液体、固体润滑等措施减小切向摩擦力。

3) 钛合金基体微动磨损表现为粘着磨损、磨粒磨损、氧化磨损。小位移幅值下, 钛合金基体在第三体进行自润滑保护下, 可以减缓接触面材料的微动磨损; 而大位移幅值下, 钛合金基体粘着脱层、磨粒磨损明显, 使磨损不断向基体进行。

4) 结合微动图理论分析可知, 在部分滑移区时, 给材料造成的微动磨损损伤最小。当机械构件的实际工况不能改变时, 只能通过表面改性技术来提高了钛合金的抗微动损伤性能。

## 参考文献:

- [1] 段家宽, 杨兴宇, 董立伟, 等. 微动磨损引起的压气机叶片榫头断裂故障研究[J]. 燃气涡轮实验与研究, 2009, 22(3): 28-32.  
DUAN Jia-kuan, YANG Xing-yu, DONG Li-wei, et al. Research on fracture of compressor blade dovetail from fretting wear[J]. Gas turbine experiment and research, 2009, 22(3): 28-32.
- [2] 杨兴宇, 史海秋, 蔡向晖. 某型发动机第 4 级压气机叶片振动特性及断裂机理分析[J]. 航空发动机, 2003, 29(4): 19-21.  
YANG Xing-yu, SHI Hai-qiu, CAI Xiang-hui. The analysis of vibration and fracture of the stage 4 compressor blade in a typical aeroengine[J]. Aeroengine, 2003, 29(4): 19-21.
- [3] 刘道新, 何家文. 经不同表面改性处理的钛合金的微动疲劳和微动磨损行为对比研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 13-17.  
LIU Dao-xin, HE Jia-wen. Comparative study on the fretting fatigue and fretting wear behaviors of titanium alloy subject to various surface modifications[J]. Tribology, 2005, 25(1): 13-17.
- [4] 张新华, 付雪松, 盖鹏涛, 等. 湿喷丸处理 Ti-6Al-4V 合金微动磨损行为影响[J]. 航空制造技术, 2017(13): 44-47.  
ZHANG Xin-hua, FU Xue-song, GAI Peng-tao, et al. Investigation on the fretting wear of Ti-6Al-4V alloy treated with wet peening[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2017(13): 44-47.
- [5] 刘道新, 何家文. 微动疲劳影响因素及钛合金微动疲劳行为[J]. 航空学报, 2001, 22(5): 454-457.  
LIU Dao-xin, HE Jia-wen. Review of factors that influence fretting fatigue (FF) and investigation on FF behavior of Ti-alloy[J]. Acta aeronautica ET astronautica sinica, 2001, 22(5): 454-457.
- [6] VINGSBO O, STAFFAN Söderberg. On fretting maps[J]. Wear, 1988, 126(2): 131-147.
- [7] VINCENT L, BERTHIER Y, DUBOURG M C, et al. Mechanics and materials in fretting[J]. Wear, 1992, 153(1): 135-148.
- [8] ZHOU Z R, NAKAZAWA, ZHU M H, et al. Progress in fretting maps[J]. Tribology international, 2006, 39(10): 1068-1073.
- [9] 郭薇, 李健, 黄淑梅, 等. 微动幅值对 Ti-6Al-4V 合金摩擦特性的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(5): 16-20.  
GUO Wei, LI Jian, HUANG Shu-mei, et al. Effect of fretting amplitude on friction properties of Ti-6Al-4V alloy[J]. Titanium industry progress, 2016, 33(5): 16-20.
- [10] HUANG X, NEU R W. High-load fretting of Ti-6Al-4V interfaces in point contact[J]. Wear, 2008, 265(7): 971-978.
- [11] 范娜, 王云霞, 王秋风, 等. 载荷对 304 不锈钢微动磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 555-561.  
FAN Na, WANG Yun-xia, WANG Qiu-feng, et al. Effects of load on fretting wear behaviors of 304 stainless steels[J]. Tribology, 2016, 36(5): 555-561.
- [12] FOUVRY S, ARNAUD P, MIGNOT A, et al. Contact size, frequency and cyclic normal force effects on Ti-6Al-4V fretting wear processes: An approach combining friction power and contact oxygenation[J]. Tribology international, 2017, 113(1): 460-473.
- [13] 柏林, 丁燕, 邓凯, 等. TC21 钛合金微动磨损特性的研究[J]. 材料导报, 2013, 27(10): 79-82.  
BAI Lin, DING Yan, DENG Kai, et al. Fretting wear behavior of TC21 alloy materials[J]. Materials review, 2013, 27(10): 79-82.
- [14] 俞树荣, 蔡洁琼, 何燕妮, 等. Ti6Al4V 钛合金在粘着作用影响下微动磨损的微裂特征[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(4): 12-15.  
YU Shu-rong, CAI Jie-qiong, HE Yan-ni, et al. Micro-cracking characteristics of Ti6Al4V titanium alloy fretting under influence of sticking[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43(4): 12-15.
- [15] 俞树荣, 白利蓉, 景鹏飞, 等. 摩擦副材料对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(8): 14-18.  
YU Shu-rong, BAI Li-rong, JING Peng-fei, et al. Effect of counterpart materials on fretting wear behavior of TC4 titanium alloy[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(8): 14-18.
- [16] 张亚非, 任平弟, 张晓宇, 等. TA16 钛合金微动磨损特性[J]. 核动力工程, 2011, 32(4): 24-28.  
ZHANG Ya-fei, REN Ping-di, ZHANG Xiao-yu, et al. Fretting wear behavior of TA16 alloy materials[J]. Nuclear power engineering, 2011, 32(4): 24-28.
- [17] 陈明, 周文龙, 李志强. TC4 钛合金微动磨损特性研究[C]//全国耐磨材料大会. 西安: 中国金属学会, 2012: 164.  
CHEN Ming, ZHOU Wen-long, LI Zhi-qiang. Research on gross-slip fretting wear behavior of TC4 titanium alloy[C]//National Wearable Materials Conference. Xi'an: The Chinese Society for Metals, 2012: 164.
- [18] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. New York: Cambridge University Press, 1985.
- [19] BOWDEN F P, TABOR D. The friction and lubrication of solids[M]. Beijing: China Machine Press, China, 1982.
- [20] 王大勇, 张连勇, 谌岩, 等. 高压高温处理对 TC4 钛合金微观力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(2): 143-146.  
WANG Da-yong, ZHANG Lian-yong, CHEN Yan, et al. Effect of high pressure-high temperature treatment on micro-mechanical properties of TC4 alloy[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(2): 143-146.
- [21] DIOMIDIS N, MISCHLER S. Third body effects on friction and wear during the fretting of steel contacts[J]. Tribology international, 2010, 44(11): 1452-1460.
- [22] LESNEVSKIY L N, LYAKHOVETSKIY M A, SAVUSHKINA S V. Fretting wear of composite ceramic coating produced on D16 aluminum-based alloy using microarc oxidation[J]. Journal of friction and wear, 2016, 37(3): 268-273.
- [23] FOUVRY S, KAPSA P, ZAHOUANI H, et al. Wear analysis in fretting of hard coatings through a dissipated energy concept[J]. Wear, 1997, 203-204: 393-403.
- [24] PEARSON S R, SHIPWAY P H. Is the wear coefficient dependent upon slip amplitude in fretting? Vingsbo and Söderberg revisited[J]. Wear, 2015, 330-331: 93-102.
- [25] KALIN M, JOŽE Vižintin. The tribological performance of DLC coatings under oil-lubricated fretting conditions[J]. Tribology international, 2006, 39(10): 1060-1067.
- [26] 周仲荣. 微动图在抗微动失效中的应用[J]. 中国表面工程, 1998(1): 41-45.  
ZHOU Zhong-rong. An application of fretting maps to palliative treatments for fretting failure[J]. China surface engineering, 1998(1): 41-45.
- [27] VARENBERG M, HALPERIN G, ETSION I. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear[J]. Wear, 2002, 252(11-12): 902-910.