

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.01.018

TC21 钛合金的高温微动磨损行为研究

丁燕^{1,2} 柏林³ 薛超凡¹ 王运动¹ 陈光明¹ 于敏¹ 戴振东¹

(1. 南京航空航天大学航天学院, 南京, 210016;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 兰州, 730000;

3. 中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所, 成都, 610041)

摘要:采用高精度 FTM 高温微动磨损试验机研究 TC21 钛合金在 150 °C 下的微动磨损行为。分析温度对摩擦系数及磨损率的影响;通过扫描电镜和能谱等方法研究钛合金 TC21 在高温下磨痕形貌的变化情况、成分的变化和磨损机理。实验结果表明:温度对钛合金 TC21 摩擦系数的影响与微动位移有关,位移越小,温度对其影响越小;温度为 150 °C 时,磨损量较室温降低了 67.4%~86.5%;磨损机理在常温下以磨粒磨损为主,并存在氧化磨损和粘着磨损,在 150 °C 下以氧化磨损为主,伴随少量的磨粒磨损和粘着磨损。

关键词:TC21 钛合金;高温;微动磨损

中图分类号:TH117.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)01-0126-05

Fretting Wear Behavior of TC21 Alloy Materials at Elevated Temperature

DING Yan^{1,2}, BAI Lin³, XUE Chaofan¹, WANG Yundong¹,
CHEN Guangming¹, YU Min¹, DAI Zhendong¹

(1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Lanzhou, 730000, China;

3. China Aviation Industry Corporation, Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu, 610041, China)

Abstract: The fretting wear characteristics of TC21 alloy are studied by using the FTM wear testing machine at the elevated temperature of 150 °C. The influence of temperature on friction coefficient and wear ratio is analyzed. Moreover, the changes of morphology and chemical elements on wear scar and the wear mechanism of TC21 alloy are discussed by the means of scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer. The results show that the influence of temperature on the friction coefficient of TC21 alloy is affected by the displacement. The displacement is small and the temperature has little effect on the friction coefficient of TC21 alloy. Compared with the room temperature, the wear rate is decreased 67.4%—86.5% at 150 °C. The primary wear mechanism of TC21 alloy is mainly abrasive wear, along with oxidation wear and adhesive wear at the room temperature, and that is oxidation wear at the temperatures of 150 °C, along with a little abrasive wear and adhesive wear.

Key words: TC21 alloy; high temperature; fretting wear

TC21 钛合金是中国自主研发的在中等温度使用的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金,是在美国 Ti-6-22-22S 基

础上开发的^[1,2]。TC21 具有良好的强度、塑性、断裂韧性及裂纹扩展速率的匹配^[2-5],成为目前中国

基金项目:固体润滑国家重点实验室开放课题(LSL-1409)资助项目;江苏省仿生功能材料重点实验室资助项目。

收稿日期:2017-11-21;**修订日期:**2018-01-08

通信作者:丁燕,女,实验师,E-mail:nuaadingyan@163.com。

引用格式:丁燕,柏林,薛超凡,等. TC21 钛合金的高温微动磨损行为研究[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(1):126-130. DING Yan, BAI Lin, XUE Chaofan, et al. Fretting wear behavior of TC21 alloy materials at elevated temperature[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(1): 126-130.

高强、高韧钛合金综合力学性能匹配较好的钛合金之一^[6]。在航空航天领域,TC21 以其优异的性能主要用于飞机的发动机、机体和机载设备等对强度及耐久性要求高的重要的承力部件^[7-10]。但用于连接紧固件时,会出现严重的微动损伤问题,不仅影响零件尺寸、降低精度,使配合零件间产生松动,还易引起应力集中,促使微裂纹萌生扩展,由此导致的损伤会严重影响构件的正常工作和安全寿命^[10-14]。柏林等^[15]研究了微动频率、法向载荷、微动振幅对钛合金 TC21 磨损量的影响,磨损机制主要以磨粒磨损为主,随着微动的进行剥落磨损和粘着磨损的作用逐渐明显。而针对钛合金 TC21 在高温条件下的微动损伤研究相对较少^[16],温度是重要的环境参数之一,对于微动磨损有着重要的影响作用。本文利用先进的高精度 FTM 高温微动磨损试验机,研究了 TC21 钛合金在高温时的微动磨损行为。从摩擦系数、磨损体积、磨痕表面形貌及氧化磨屑等方面探讨了其微动磨损机理,为飞行器结构的安全性和可靠性设计提供依据^[17,18]。

1 微动磨损实验

1.1 实验设备和试样制备

飞行器结构中主要金属材料为铝合金、钛合金和钢,某些微动磨损发生在两种不同金属材料接触面,同时由于某些部位紧固件工作时工件温度高达 150 °C,本文根据实际工况,选定实验条件为室温和高温 150 °C 条件下干摩擦,微动磨损实验在高精度 FTM 高温微动磨损试验机上完成,采用圆柱/平面接触方式^[19]。上试样钢 PH13-8Mo 为圆柱销状(直径 $d=6$ mm,长度 $l=16$ mm,接触面表面粗糙度 $Ra \leq 0.8$)。下试样 TC21 钛合金为长方体(长 $a=20$ mm,宽 $b=10$ mm,高 $c=7$ mm,接触面表面粗糙度 $Ra \leq 0.8$),钛合金 TC21 主要成分为 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Cr-Nb。

1.2 实验方法

选用两种微动磨损试验的条件:(1)载荷 $p=100$ N,频率 $f=10$ Hz,位移 $d=100$ μm ;(2)载荷 $p=100$ N,频率 $f=10$ Hz,位移 $d=400$ μm 。温度为室温和 150 °C;选用 4 种循环次数:(1) $N=3.6 \times 10^4$ 次(1 h);(2) $N=5.4 \times 10^4$ 次(1.5 h);(3) $N=7.2 \times 10^4$ 次(2 h);(4) $N=9.0 \times 10^4$ 次(2.5 h)。每组平行实验 3 次。微动磨损实验的高温装置选用的是 MCH 氧化铝陶瓷片对下试样钛合金进行加热,通过调节电压值,将温度升至设定温度,并将温度探测点靠近微动接触表面,以减少微动表面与探测点温度的差异,稳定 10 min 后开始实验。采用光学显微镜(Optical microscope, OM)、扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)对磨痕形貌进行观察分析;用能谱仪(Energy dispersive

spectrometer, EDS)定性分析磨痕氧含量的变化;用 JB-5C 粗糙度轮廓测试仪测量磨损量损失并观察磨痕的二维形貌。

2 实验结果与分析

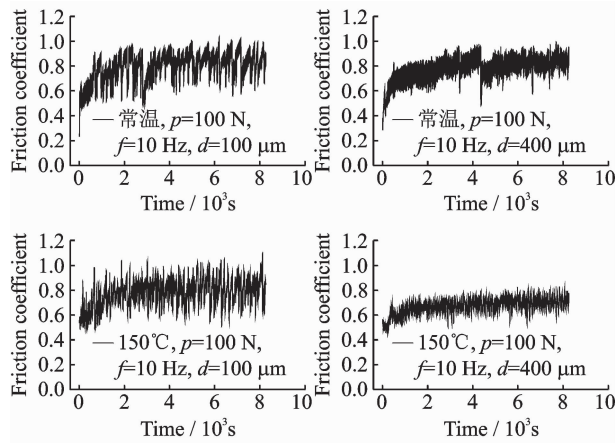
2.1 摩擦系数

图 1 为 TC21 钛合金摩擦系数与微动循环次数及温度的关系曲线。为了解钛合金 TC21 摩擦系数与位移、温度的变化关系。在 4 种循环周次(1, 1.5, 2 和 2.5 h)中,选取了循环周次为 2.5 h ($N=9 \times 10^4$)时,常温和 150 °C 条件下,位移分别为 $d=100$ μm 和 $d=400$ μm 的摩擦系数变化趋势(图 1(a))。由图 1(a)中得知:微动的初始时期,由于钛合金接触表面的氧化膜、吸附物等的保护作用,摩擦系数较低,数个循环后,在往复相对运动作用下,表面膜受到剪切和挤压的作用被破坏和去除,两接触体直接接触,二体作用增强,表面发生塑性变形和粘着,摩擦系数迅速增加。摩擦系数达到最大值后略有降低,由于持续的材料表面加工硬化和材料表层组织发生转变,材料表面脆性增加,接触表面裂纹萌生、扩展和贯通,导致颗粒的剥落,大量颗粒的积累在表面形成第三体,二体接触向三体接触转变,减少粘着作用及参与承载。经过一定的循环后,磨屑在微动挤压过程中被碾碎和氧化,且磨屑的产生和溢出基本达到动态平衡,摩擦系数进入稳定阶段。但在 $d=100$ μm 时,常温和 150 °C 条件下,摩擦点波动范围较大。在 $d=400$ μm 时,常温条件下,摩擦点波动范围较大而温度上升为 150 °C 时,摩擦点波动较小,摩擦系数比较稳定。

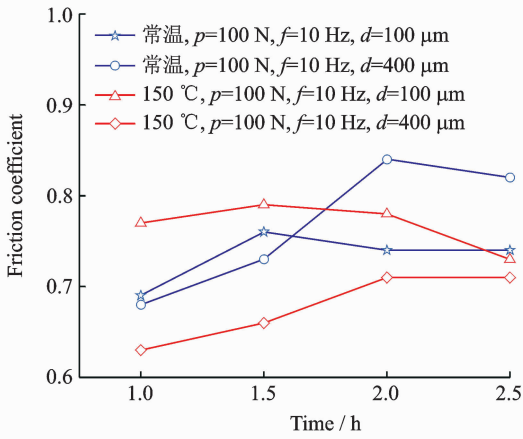
图 1(b)是钛合金 TC21 在常温和 150 °C,位移分别为 $d=100$ μm 和 $d=400$ μm 时,4 种循环周次下摩擦系数值的情况。从图 1(b)中可以看出:当 $d=100$ μm 时,常温条件下,摩擦系数值随着循环周次的变化,范围为 0.69~0.74;150 °C 条件下,摩擦系数值随着循环周次的变化,范围为 0.73~0.79,变化幅度均较小。说明微动摩擦位移较小时,在一定温度范围内,温度对摩擦系数的影响较小。当 $d=400$ μm 时,常温条件下,摩擦系数值随着循环周次的变化,范围为 0.68~0.84;150 °C 条件下,摩擦系数值随着循环周次的变化,范围为 0.63~0.71。说明温度对钛合金 TC21 摩擦系数的影响与微动位移有关,位移较小时,温度对其摩擦系数的影响较小,位移较大时,随着温度升高到 150 °C,摩擦系数降低。

2.2 磨损率

图 2 显示在室温和 150 °C 温度下,位移分别为 $d=100$ μm 和 $d=400$ μm 时,TC21 钛合金在 4 种



(a) Friction coefficient curves of TC21 titanium alloy under different conditions



(b) Friction coefficient curves of TC21 titanium alloy varying with the cycle under different conditions

图1 TC21钛合金摩擦系数曲线图

Fig. 1 Friction coefficient curves of TC21 titanium alloy

循环周次下的磨损体积。由图2可知,在常温条件下,位移 $d=100\ \mu\text{m}$ 和 $d=400\ \mu\text{m}$ 时,磨损量随着循环周次增大而增大;温度为 $150\ ^\circ\text{C}$ 时,位移为 $d=100\ \mu\text{m}$ 和 $d=400\ \mu\text{m}$ 时磨损量并没有随着循环周次增大而出现变化趋势。在循环周次为2.5 h条件下,位移 $d=100\ \mu\text{m}$,温度为 $150\ ^\circ\text{C}$ 时,磨损量较室温降低了约67.4%;位移 $d=400\ \mu\text{m}$ 时,温度为 $150\ ^\circ\text{C}$,磨损量较室温降低了约86.5%。可以看出,两种位移条件下,磨损量均减小是由于随着温度升高到 $150\ ^\circ\text{C}$,钛合金TC21与氧能形成与基体结合牢固、厚度适当的氧化膜,氧化膜具有较好的自愈能力,能较好地阻止基体金属之间的接触,从而大大降低磨损量。图3是钛合金TC21循环周次为2.5 h,常温和 $150\ ^\circ\text{C}$ 条件下,位移分别为 $d=100\ \mu\text{m}$ 和 $d=400\ \mu\text{m}$ 的钛合金磨痕轮廓图。从图3中亦可以看出,随着温度的升高,磨痕宽度虽增大,但深度变浅,TC21合金的磨损程度随温度的升高而减小。

2.3 磨痕形貌及机理分析

选取循环周次在2.5 h条件下,观察钛合金

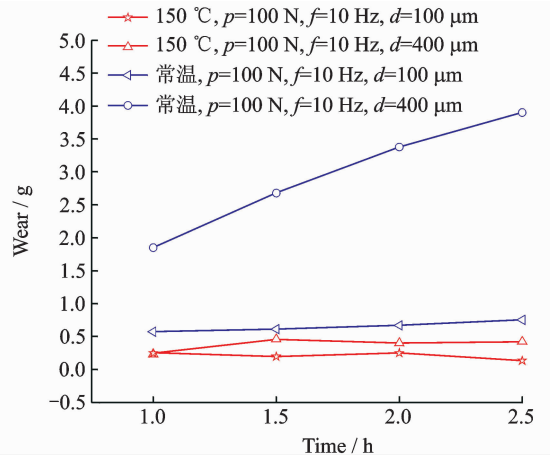


图2 不同试验条件下钛合金TC21磨损量折线图

Fig. 2 Wear capacity curves of TC21 titanium alloy under different conditions

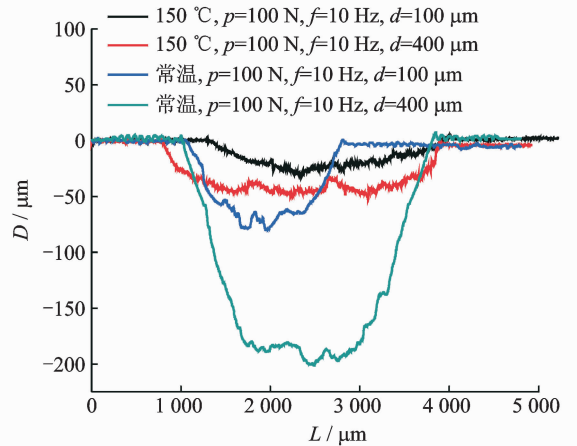


图3 TC21钛合金磨痕轮廓图

Fig. 3 2D surface morphologies of TC21 titanium alloy

TC21在不同温度和位移条件下的微观形貌(图4)。从图4中可以看出,常温条件下,振幅分别为 $d=100\ \mu\text{m}$ 和 $d=400\ \mu\text{m}$ 时(图4(a,b)),磨痕均呈现不同宽度的线状,其摩擦表面凹凸不平,存在平行于滑动方向的沟槽痕迹。接触区局部应力超过材料的塑性抗力极限,磨痕呈现明显的塑性变形,磨痕区主要是由与基体紧密结合的塑性变形层和覆盖于塑变层表面的磨屑附着层共同叠加组成。在 $150\ ^\circ\text{C}$ 条件下,位移分别为 $d=100\ \mu\text{m}$ 和 $d=400\ \mu\text{m}$ 时(图4(c,d)),磨痕表面绝大多数区域被磨屑层覆盖,磨屑多为粒状,局部裸露出塑变层的表面,但平行于滑动方向的沟槽痕迹相对常温较少,局部出现平滑的磨损面,高倍形貌图可以看出细小颗粒状磨屑覆盖层,磨屑多为细碎的颗粒状,直径在 $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 之间。

采用EDS对磨痕表面成分进行进一步分析,选取循环周次为2.5 h,位移为 $d=400\ \mu\text{m}$,常温和 $150\ ^\circ\text{C}$ 条件下,研究钛合金TC21磨痕表面的成分

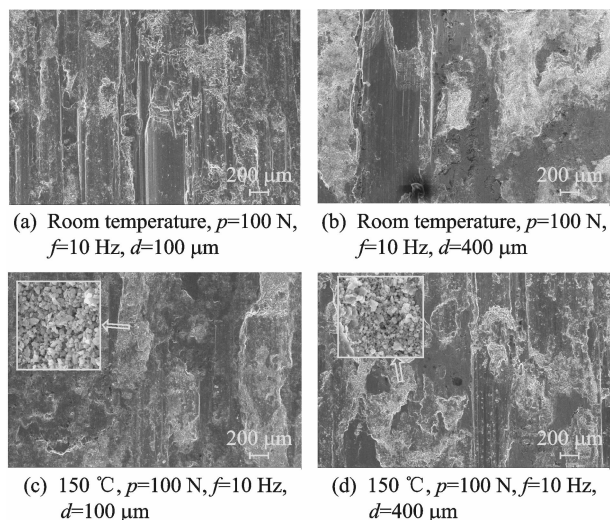
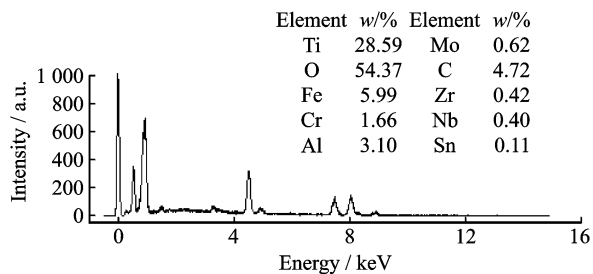
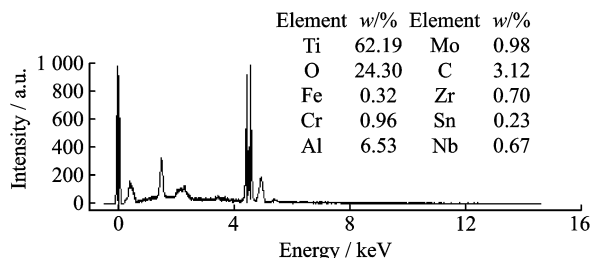


图 4 TC21 钛合金微动磨损区域的 SEM 图
Fig. 4 SEM images of fretting wear area of TC21 titanium alloy

情况(图 5)。由图 5 可知:表面除了钛合金本身的组成成分外,还出现了 Fe 和 O 元素,Fe 是从对摩擦副(PH13-8Mo 钢)转移而来;O 元素含量在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下是常温条件下的 2 倍,说明在高温条件下钛合金磨损面氧化程度进一步增加。由于氧化膜的存在,增加了钛合金耐磨性,这是钛合金在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下磨损量降低的重要原因之一。同时,结合钛合金 TC21 磨痕的微观形貌 SEM 图,可以说明 TC21 钛合金在常温条件下磨损机理以磨粒磨损为主,并存在氧化磨损和粘着磨损,但在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 下,磨损区的氧化程度增大,磨损区由于氧化膜的存在,导致耐磨性增加,所以磨损机理以氧化磨损为主,伴随着磨粒磨损和粘着磨损。



(a) $150\text{ }^\circ\text{C}$, $p=100\text{ N}$, $f=10\text{ Hz}$, $d=400\text{ }\mu\text{m}$



(b) Room temperature, $p=100\text{ N}$, $f=10\text{ Hz}$, $d=400\text{ }\mu\text{m}$

图 5 TC21 合金 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 和常温条件下磨损区域 EDS 分析
Fig. 5 EDS patterns of TC21 titanium alloy under room temperature and $150\text{ }^\circ\text{C}$

3 结 论

(1) 温度对钛合金 TC21 摩擦系数的影响与微动位移有关,位移较小时,温度对其摩擦系数的影响较小,位移较大时,随着温度的升高,摩擦系数降低,摩擦点波动较小,摩擦系数比较稳定。

(2) 温度对钛合金 TC21 磨损量有着重要的影响作用,位移较小时,温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$,磨损量较室温降低了约 67.4%;位移较大时,温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$,磨损量较室温降低了约 86.5%。

(3) 钛合金 TC21 常温下磨损机理以磨粒磨损为主,并存在氧化磨损和粘着磨损,温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时,磨损区氧化膜增加,磨损机理以氧化磨损为主,并伴随磨粒磨损和粘着磨损。

参考文献:

[1] HAMDY M M, WATERHOUSE R B. The fretting wear of Ti-6Al-4V and aged Inconel 718 at elevated temperatures[J]. Wear, 1981, 71(2):237-248.

[2] BUDINSKI K G. Tribological properties of titanium alloys[J]. Wear, 1991, 151(2):203-217.

[3] 赵永庆, 曲恒磊, 冯亮, 等. 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21 研制[J]. 钛工业进展, 2004, 21(1): 22-24.
ZHAO Yongqing, QU Henglei, FENG Liang, et al. Research on high strength, high toughness and high damage-tolerant titanium alloy-TC21[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(1): 22-24.

[4] ROYER R R. Attributes, characteristics, and applications of titanium and its alloys[J]. JOM, 2010, 62(5):21-24.

[5] PETERS M, KUMPFERT J, WARD C H, et al. Titanium alloys for aerospace applications[J]. Advance Engineering Materials, 2003, 5(6): 419-427.

[6] 徐小军, 刘捍卫, 朱旻昊, 等. Ti-Al-Zr 钛合金的高温微动磨损行为研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(5):42-47.
XU Xiaojun, LIU Hanwei, ZHU Minhao, et al. Study on high temperature fretting wear of Ti-Al-Zr alloy[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(5): 42-47.

[7] 戴振东, 王珉, 杨生荣, 等. 面扫描激光淬火对钛合金微动磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(2):107-111.
DAI Zhendong, WANG Min, YANG Shengrong, et al. The effect of band laser beam quenching on fretting wear characteristics of titanium alloy[J]. Tribology, 1999, 19(2):107-111.

- [8] 沈桂琴, 雷杰, 梁佑明, 等. TC4 钛合金的微动磨损及防护[J]. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(2):5-9.
SHEN Guiqin, LEI Jie, LIANG Youming, et al. Fretting wear and the preventions of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 21(2):5-9.
- [9] 邓凯, 于敏, 戴振东, 等. TC11 及表面改性膜层在海水中的微动磨损研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5):1099-1104.
DENG Kai, YU Min, DAI Zhendong, et al. Fretting wear of TC11 and surface modified layers in seawater[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(5):1099-1104.
- [10] 陶峰, 张险峰, 尹明德, 等. 微动损伤的研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(5):545-551.
TAO Feng, ZHANG Xianfeng, YIN Mingde, et al. Research on fretting damage; An review[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(5):545-551.
- [11] 戴振东, 王珉, 朱如鹏, 等. 高温复合载荷下钛合金微动疲劳特性的研究[J]. 应用科学学报, 2001, 19(3):277-282.
DAI Zhendong, WANG Min, ZHU Rupeng, et al. Fretting fatigue characteristics of titanium alloy at elevated temperature under complex loads[J]. Journal of Applied Sciences, 2001, 19(3): 277-282.
- [12] Jr HAGER C H, SANDERS J H, SHARMA S. Effect of high temperature on the characterization of fretting wear regimes at Ti6Al4V interfaces [J]. Wear, 2006, 260: 493-508.
- [13] 戴振东, 杨生荣, 王珉, 等. 微动磨损的热力学研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(2):125-131.
DAI Zhendong, YANG Shengrong, WANG Min, et al. A thermodynamic model of fretting wear[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 32(2):125-131.
- [14] ZHOU Yan, SHEN Mingxue, CAI Zhenbing, et al. Study on dual rotary fretting wear behavior of Ti6Al4V titanium alloy[J]. Wear, 2017, 376:670-679.
- [15] 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(5):79-103.
BAI Lin, DING Yan, DENG Kai, et al. Fretting wear behavior of TC21 alloy materials [J]. Mater Rev, 2013, 27(5):79-103.
- [16] 陆海峰, 缪强, 梁文萍, 等. 不同温度对 TC4-DT 钛合金摩擦磨损性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1):29-34.
LU Haifeng, MIAO Qiang, LIANG Wenping, et al. Effect of different temperatures on tribological properties of TC4-DT alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 29-34.
- [17] MEHDI M, FAROKHZADEH K, EDRISY A. Dry sliding wear behavior of superelastic Ti-10V-2Fe-3Al β -titanium alloy[J]. Wear, 2016, 350:10-20.
- [18] ZHANGA Y S, HAN Z, WANG X, et al. Enhanced strength and wear resistance of a titanium-oxygen alloy with core-shell network structure[J]. Tribology International, 2017, 111:192-196.
- [19] 丁燕, 梁军, 邓凯, 等. 损伤容忍型钛合金 TC4-DT 的微动磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(3):532-538.
DING Yan, LIANG Jun, DENG Kai, et al. Fretting wear of damage tolerance TC4-DT alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(3): 532-538.

(编辑:胥橙庭)

