

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.01.005

不同温度对 TC4-DT 钛合金摩擦磨损性能的影响

陆海峰 缪强 梁文萍 任蓓蕾 王昉

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,211106)

摘要:以 TC4-DT 钛合金为研究对象,研究不同温度(20,300,500 °C)对 TC4-DT 的摩擦磨损性能的影响。采用 HT-500 型摩擦磨损试验机对 TC4-DT 合金进行摩擦磨损实验,分析温度对摩擦因数及磨损率的影响;通过扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)和能谱(Energy dispersive spectrometer, EDS)等方法探究磨痕的形貌和成分变化及磨损机理。结果表明,随着温度的升高,磨损过程中 TC4-DT 合金表面不断生成氧化膜,摩擦因数从 0.493 下降到 0.298,磨痕不断变窄变浅,磨损率大大降低;磨损机理在 20 °C 时以粘着磨损、磨粒磨损为主,伴随着疲劳磨损;在 300,500 °C 时以剥层磨损和氧化磨损为主,伴随少量的粘着磨损和磨粒磨损。

关键词:TC4-DT 钛合金;摩擦磨损;温度;摩擦因数;磨损机理

中图分类号:V252.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2016)01-0029-06

Effect of Different Temperatures on Tribological Properties of TC4-DT Alloy

Lu Haifeng, Miao Qiang, Liang Wenping, Ren Beilei, Wang Fang

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: The tribological properties of TC4-DT alloy at different temperatures (20, 300, 500 °C) are studied. The friction and the wear experiments are performed on TC4-DT alloy by the friction and wear tester, and the effects of temperature on the friction coefficient and the wear ratio are analyzed. Moreover, the changes of morphology and chemical elements on wear scar and the wear mechanism of TC4-DT alloy are discussed by the means of scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and so on. The results show that: the oxide film appears on the surface of TC4-DT alloy, the friction coefficient of TC4-DT alloy decreases from 0.493 to 0.278 with the rise of temperature, the wear scar of TC4-DT alloy becomes narrower and shallower, and the wear ratio decreases a lot with the increase of temperature. The primary wear mechanism of TC4-DT alloy is abrasive wear and adhesive wear, along with fatigue wear at the temperature of 20 °C, and that is delamination wear and oxidation wear at the temperatures of 300, 500 °C, along with a little abrasive wear and adhesive wear.

Key words: TC4-DT alloy; friction and wear; temperature; friction coefficient; wear mechanism

基金项目:国家自然科学基金(51174119)面上资助项目;南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ14-11)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2015-07-10; **修订日期:**2015-10-20

通信作者:缪强,男,教授,博士生导师, E-mail: miaoqiang@nuaa.edu.cn。

引用格式: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 temperature on tribological properties of TC4-DT alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 29-34.

TC4-DT 钛合金是中国自主研发的新型中强损伤容限型两相($\alpha+\beta$)钛合金,它是在普通 TC4 钛合金基础上通过进行纯净化熔炼、优化成分设计和 β 热加工等途径制成的。与普通 TC4 合金相比,TC4-DT 钛合金中元素 Al, V 允许波动的范围较窄,间隙元素 C, N, O 和杂质元素 Fe 的最高允许含量大大降低,因此该合金具有较高的韧性、优异的焊接性、低的疲劳裂纹扩展速率以及高的疲劳寿命等综合性能,与美国的 TC4 ELI 相当,特别适合制造飞机大型整体框、梁、接头等关键承力构件^[1-7]。但是,TC4-DT 钛合金的塑性和剪切抗力比较低,表面氧化物的保护作用比较微弱,从而导致钛合金的冲击韧性和耐磨性较差,而接头等承力构件受力比较复杂,一般需要材料在具有高强度和韧性的同时,还需要具有良好的耐磨性,以提高钛合金构件的安全性和可靠性^[8-12]。目前,国内对 TC4-DT 钛合金的研究多集中在电子束焊接接头性能^[13-15]、热变形行为^[16-18]等方面,虽然胥军、卢文壮等人对 TC4-DT 钛合金的磨削特性及工艺进行了相关研究^[19-20],但是国内对其摩擦磨损性能的研究较少。因此本文通过对 TC4-DT 钛合金进行摩擦磨损实验,观察其在不同温度(20, 300, 500 °C)的摩擦磨损情况,分析并总结磨损规律,探究磨损机理,从而为 TC4-DT 钛合金在航空等领域的应用提供一定的理论指导。

1 实验方法

实验采用的是北京航材院研制的 TC4-DT 钛合金,显微硬度值为 340HV0.1,其化学成分见表 1。

表 1 TC4-DT 钛合金的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of TC4-DT titanium alloy

								wt%
Ti	Al	V	Fe	C	H	O	N	
Bal.	6.16	3.95	0.03	0.04	0.005	0.06	0.014	

实验采用的 TC4-DT 钛合金试样尺寸为 15 mm×15 mm×5 mm,磨损面依次用 400[#], 500[#], 600[#], 800[#], 1000[#] 号 SiC 金相砂纸打磨,并进行机械抛光至镜面。

实验采用 HT-500 型高温摩擦磨损实验机对试样表面进行干摩擦磨损实验,探究不同温度下试样的摩擦磨损性能。对磨材料为 Si₃N₄ 陶瓷球,直径 $\phi=4.763$ mm,硬度 75~80 HRC,对磨半径 2 mm,测试载荷 2.3 N,转速 560 r/min,磨损时间 30 min,实验温度为 20, 300 和 500 °C。实验前,对

试样进行乙醇超声波清洗,清洗时间 15 min。采用精度为 0.1 mg 的电子天平称量磨损实验前后的试样质量损失。实验后,采用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观察磨痕表面宏观和微观形貌;用其自带的能谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS)检测磨痕的化学成分;计算比磨损率,并探究试样在不同温度下的磨损机理。

2 实验结果与讨论

2.1 摩擦因数

TC4-DT 钛合金摩擦因数随磨损时间变化的关系曲线如图 1 所示。TC4-DT 钛合金在磨损开始的 10 min 内处于预磨期。随着时间的延长,摩擦因数不断增大。因磨损开始时,合金表面比较光滑,粗糙度小,摩擦阻力比较小,从而导致摩擦因数低。随着摩擦的不断进行,合金表面出现磨损造成的沟槽,一方面使表面粗糙度不断增大;另一方面对摩擦副有阻碍作用,摩擦阻力逐渐变大,因此摩擦因数不断提高。当磨损进入平稳期时,合金表面的粗糙度保持稳定,摩擦力变化不大,摩擦因数也趋于稳定^[21]。图 2 是 TC4-DT 合金的平均摩擦系数随温度变化的关系曲线。由图 2 可见,随着温度的升高,TC4-DT 合金的平均摩擦因数从 20 °C 的 0.493 下降到 500 °C 的 0.298,这是因为随着温度不断升高,摩擦表面的温度逐渐升高,合金变软,导致工件表面硬度降低,对塑性变形的抗力下降,而且 Si₃N₄ 陶瓷球与合金的硬度差不断增加,导致陶瓷球可以更加压入合金表面,磨损产生的磨屑此时就会充当润滑作用,因此摩擦因数不断降低。

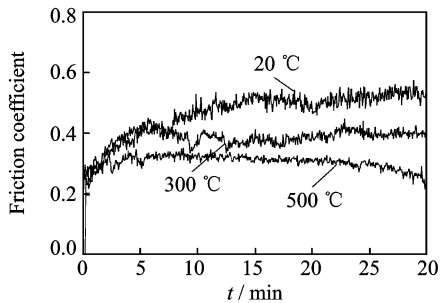


图 1 摩擦因数与磨损时间的关系

Fig. 1 Relationship between friction coefficient and test time

2.2 磨损率

磨损前后在分析天平(感量为 0.1 mg)上测量 TC4-DT 钛合金试样的质量,得到试样的失重,如图 3 所示。20 °C 时,试样的失重为 8.2 mg; 300 °C

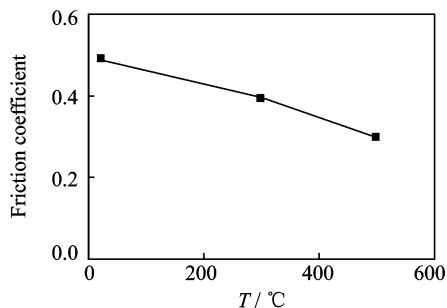


图 2 平均摩擦因数与温度的关系

Fig. 2 Relationship between average friction coefficient and temperature

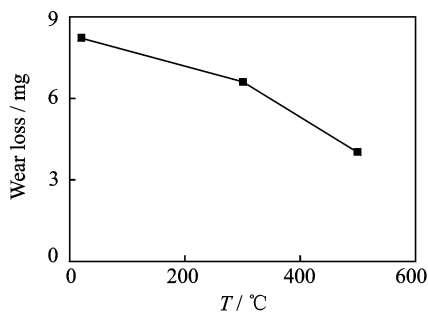


图 3 磨损量与温度的关系

Fig. 3 Relationship between wear loss and temperature

时,试样的失重有所减少,为 6.6 mg;当温度达到 500 °C 时,失重进一步减少,达到最小值 4.0 mg。由此可以看出,试样的磨损量随温度的升高而不断减少。

为了更加准确地比较试样在不同温度下摩擦磨损造成的失重,采取另一种测量方法,即通过磨损体积来计算磨损率。

球体积磨损计算公式为

$$V_{\text{ball}} = \frac{\pi}{64} \times \frac{W^4}{R}$$

式中: V 为试样磨损体积, mm^3 ; W 为磨痕宽度, mm ; R 为磨损球半径, mm 。

真正衡量一个材料摩擦磨损性能的重要指标

是比磨损率^[22]。比磨损率定义公式为

$$K = \frac{V}{PS}$$

式中: K 为比磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; P 为法向载荷, N ; S 为滑动距离, m 。

经过计算,不同温度下 TC4-DT 钛合金试样的比磨损率如表 2 所示。可以看出,随着温度的升高,TC4-DT 钛合金的比磨损率不断降低。300 °C 时,试样的比磨损率不足 20 °C 的 1/2,降幅为 60.7%;500 °C 时,试样的比磨损率接近 300 °C 的 1/2,降幅达 83.7%。这说明 TC4-DT 钛合金在低温时的磨损比高温时严重。

表 2 不同温度下 TC4-DT 钛合金的磨损体积和比磨损率
Tab. 2 Wear volume and wear ratio of TC4-DT at different temperatures

温度 / °C	W/mm	V/mm ³	K/ (mm ³ · (N · m) ⁻¹)
20	1.391	9.19×10^{-2}	4.35×10^{-4}
300	1.102	3.62×10^{-2}	1.71×10^{-4}
500	0.884	1.50×10^{-2}	0.71×10^{-4}

2.3 磨痕形貌

TC4-DT 钛合金磨痕的宏观形貌如图 4 所示。图中黑箭头所指为磨痕表面凸起。20 °C 时,磨痕比较宽,犁沟细而密,并且深度较大。随着温度的升高,磨痕宽度不断减小,磨痕不断变浅,犁沟处因粘着引起的凸起数量增多,面积增大^[23]。这说明 TC4-DT 钛合金的磨损程度随温度的升高而减小。图 5 是 TC4-DT 钛合金磨痕的微观形貌。由图可见,磨损后的 TC4-DT 钛合金磨痕底部分布着犁沟,磨痕表面粘附着磨屑,并且随着温度的升高,残留磨屑的数量不断增加,体积也明显增大。在 300 °C 时,磨痕表面出现剥层,到 500 °C 时,剥层面积进一步扩大,加上粘着效应,导致磨痕处块状脱落变大。 Si_3N_4 对磨球与 TC4-DT 钛合金表面摩擦的对磨面微观形貌如图 6 所示,可以看到,20 °C

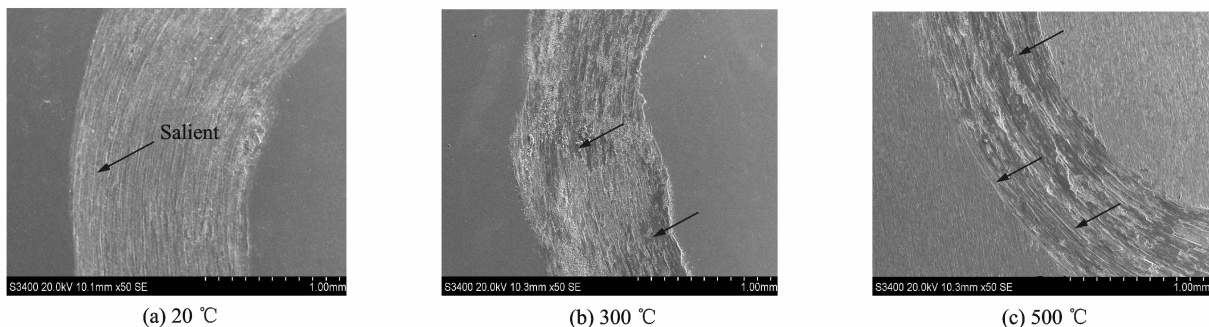


图 4 不同温度下 TC4-DT 钛合金磨痕宏观形貌

Fig. 4 Macrotopography of wear trace of TC4-DT at different temperatures

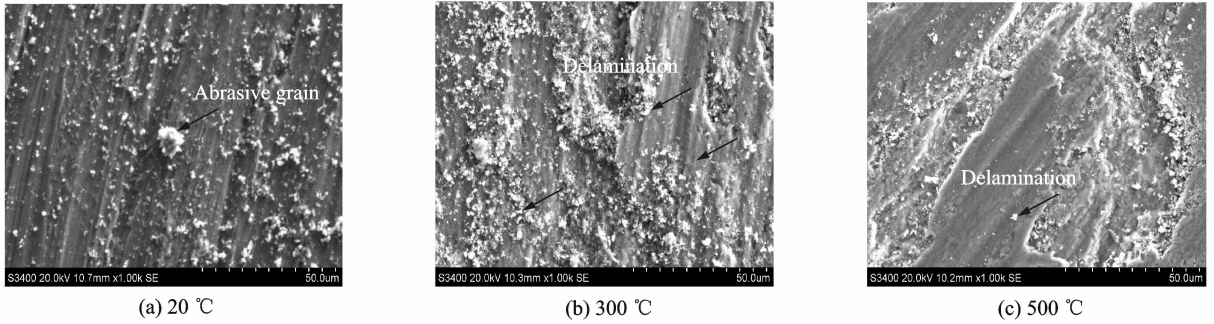


图 5 不同温度下 TC4-DT 钛合金磨痕微观形貌

Fig. 5 Microtopography of wear trace of TC4-DT at different temperatures

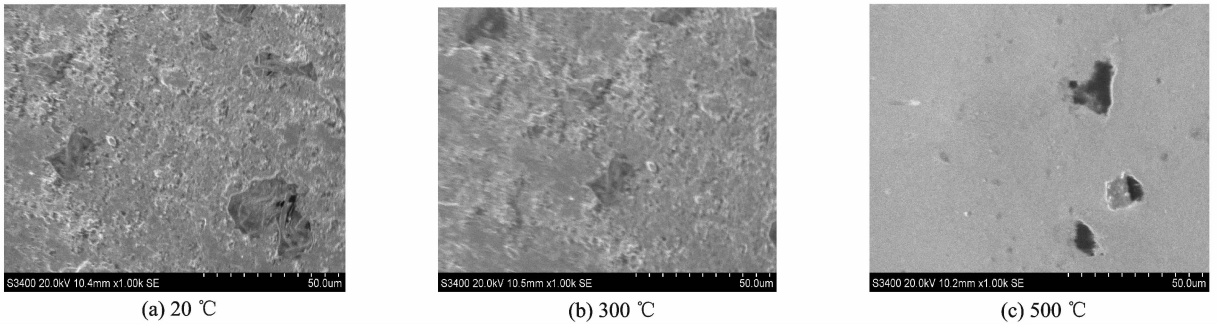


图 6 不同温度下对磨球对磨面微观形貌

Fig. 6 Microtopography of grinding surface of grinding ball at different temperatures

时球面上分布着粘着力造成的凹坑,并且粘附着磨屑。随着温度的升高,凹坑逐渐消失,球面变得光滑。在 500 °C 时,球面上几乎没有凹坑,仅仅有一些磨屑。

2.4 磨损机理

钛合金化学活性比较高,合金表面在摩擦力和摩擦温度的共同作用下容易受空气等外在因素影响,一些外来元素(C、N、O 等)扩散至磨损表面,使表层元素重新分布,可能形成钛的固溶体,也可能形成钛的氧化物和碳化物^[20]。采用 EDS 对 TC4-DT 合金表面磨痕处和对磨球磨面处的成分进行分析,元素含量见表 3,4。如表 3 所示,随着温度不断升高,合金表面 O 含量从 20 °C 的 17.87% 增加到 500 °C 的 36.19%。合金磨痕处的 O 元素含量较高,说明了 TC4-DT 钛合金在磨损过程中发生了氧化反应。由于钛合金的热传导率比较低,所以在 300,500 °C 时,热量来不及散失,再加上合金

表 3 TC4-DT 合金磨痕表面的 EDS 成分分析

温度 / °C	Ti	Al	V	O
20	73.81	4.20	2.25	17.87
300	69.96	3.66	2.16	22.58
500	58.97	2.49	1.17	36.19

表 4 Si₃N₄ 磨球磨痕表面的 EDS 成分分析Tab. 4 Chemical composition of wear mark surface of Si₃N₄ by EDS

温度 / °C	O	N	Si	Ti
20	10.11	46.20	33.25	8.87
300	29.96	31.66	28.16	7.58
500	38.97	21.49	30.17	8.19

表面与对磨球相互摩擦,导致磨痕处温度不断升高,氧化反应越来越严重^[10]。而且在 300,500 °C 时,从合金表面磨痕微观形貌可以看出,磨痕表面存在大片的剥层,即钛的氧化物,由此可知合金发生了氧化磨损。

20 °C 时,在 TC4-DT 合金表面与 Si₃N₄ 对磨球面相互接触,发生滑动摩擦时,形成粘着现象和犁沟效应。在载荷的作用下,接触点的单位压力很大,并且向切向和法向传递,在合金表面的微凸体上产生剪切应力和正应力^[24-25]。一方面,TC4-DT 合金的硬度较 Si₃N₄ 陶瓷球低很多,在载荷对合金表面施加的正应力作用下,合金表面发生塑性变形,一些接触点将产生牢固的粘着。随着滑动摩擦的进行,由于滑移剪切力的作用,合金表面发生粘着撕裂,造成粘着磨损并产生凹坑。另一方面,在摩擦过程中,合金表面的微凸体在剪切应力的作用

下受到挤压发生断裂,形成磨屑。硬度较大的 Si_3N_4 陶瓷球将磨屑压入 TC4-DT 合金表面,在滑动过程中推动钛合金,使它产生塑性流动,从而形成犁沟^[26-27],同时犁沟两侧的金属发生塑性形变并向两侧翻起,形成堆积物,随着磨损的进行,堆积物又被压平,如此反复多次塑性变形,导致裂纹形成,当裂纹扩散至合金表面时就会引起剥落,造成疲劳破坏。因此,低温下 TC4-DT 合金的磨损机理以磨粒磨损和粘着磨损为主,伴有疲劳磨损。

随着温度的升高,在 300,500 °C 时,合金表面 O 元素含量不断增多,形成一层氧化薄膜。在磨损的过程中,合金表面出现大量的位错和滑移带。当合金表面在载荷和滑动速度的作用下发生塑性变形时,表面层的应变速率大大提高,造成变形速率高于位错滑移速率,导致材料的连续性被破坏,引起显微裂纹的形成。在循环应力的作用下,裂纹不断扩展,当其扩展到合金表面时,发生断裂,造成薄片状脱落,形成剥层磨损^[28]。氧化薄膜在循环接触应力的作用下容易脱落,裸露的表面又继续生成新的氧化薄膜而产生氧化磨损^[29]。而且由于氧化膜覆盖合金表面,在一定程度上减轻了磨粒磨损和粘着磨损。如表 4 所示的 EDS 结果,随着温度的升高,对磨球上的 O 元素也在不断增加,并且存在着少数的钛元素,说明了存在少量的合金磨粒转移到了对磨球表面。因此,高温下 TC4-DT 合金的磨损机理以氧化磨损和剥层磨损为主,伴随着少量的粘着和磨粒磨损。

3 结 论

(1)随着温度的升高,TC4-DT 合金的摩擦因数不断降低,磨损率大大减小,降幅达 83.7%; TC4-DT 合金和 Si_3N_4 对磨球的磨损程度随温度的升高而减小。

(2)TC4-DT 合金表面的 O 元素含量随温度升高而逐渐增大,不断在合金表面形成氧化薄膜。

(3)TC4-DT 合金在 20 °C 时的磨损机理以粘着磨损、磨粒磨损为主,同时伴有少量的疲劳磨损;在 300,500 °C 时,磨损机理以剥层磨损和氧化磨损为主,伴随少量的粘着磨损和磨粒磨损。

参考文献:

[1] 房卫萍,陈沦,史耀武,等. 损伤容限钛合金的研究进展及应用现状[J]. 材料工程,2010,38(9):95-98.
Fang Weiping, Chen Lun, Shi Yaowu, et al. Research development and application of damage tolerance titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering,

2010,38(9):95-98.

- [2] 朱知寿,王新南,童路,等. 航空用损伤容限型钛合金研究与应用[J]. 中国材料进展,2010,29(5):14-17.
Zhu Zhishou, Wang Xinnan, Tong Lu, et al. Research and application of damage tolerance titanium alloys for aeronautical use[J]. Materials China, 2010, 29 (5):14-17.
- [3] Shi Qi, He Ning, Li Liang, et al. Analysis on surnalysis on surface integrity during high speed milling for new damage-tolerant titanium alloy[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 29(3):222-226.
- [4] 刘志东,徐安阳,王振兴,等. 柔性电极电火花强化钛合金表面性能[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(2):222-227.
Liu Zhidong, Xu Anyang, Wang Zhenxing, et al. Surface property of titanium alloys by electrospark surface strengthening of flexible electrode[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(2):222-227.
- [5] Huo Wenguo, Xu Jiuhua, Fu Yucan. Dry grinding of Ti6Al4V alloy with flap wheels[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 27(2):131-137.
- [6] 刘鹏,徐九华,冯素玲,等. PCD 刀具高速铣削 TA15 钛合金切削力的研究[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(2):224-229.
Liu Peng, Xu Jiuhua, Feng Suling, et al. Cutting forces in high speed milling of titanium alloy with PCD tool[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(2):224-229.
- [7] 赵永庆,葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展[J]. 航空材料学报,2014,34(4):51-61.
Zhao Yongqing, Ge Peng. Current situation and development of new titanium alloys invented in China [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(3): 51-61.
- [8] 姚小飞,谢发勤,韩勇,等. 温度对 TC4 钛合金磨损性能 and 摩擦因数的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(8):1463-1466.
Yao Xiaofei, Xie Faqin, Han Yong, et al. Effects of temperature on wear properties and friction coefficient of TC4 alloy[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2012, 41(8):1463-1466.
- [9] 张平则,徐重,张高会,等. 纯 Ti 及 Ti-6Al-4V 双层辉光离子渗 Mo[J]. 南京航空航天大学学报,2005, 37(5):582-586
Zhang Pingze, Xu Zhong, Zhang Gaohui, et al. Double glow plasma surface molybdenizing of pure Ti and Ti-6Al-4V[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(5):582-586.
- [10] 袁宝国,王成国,魏圣泉,等. 不同氢含量 Ti6Al4V 合金的磨损性能研究[J]. 稀有金属材料与工程,2014, 43(2):399-402.

- Yuan Baoguo, Wang Chengguo, Wei Shengquan, et al. Wear property of Ti6Al4V alloy with different hydrogen contents[J]. *Rare Metal Material and Engineering*, 2014, 43(2):399-402.
- [11] Molinari A, Straffelini G, Tesi B, et al. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy[J]. *Wear*, 1997, 208(1/2):105-112.
- [12] Bahadur S, Chiennan Yang. Friction and wear behavior of tungsten and titanium carbide coatings[J]. *Wear*, 1996, 196(1/2):156-163.
- [13] Fu Pengfei, Mao Zhiyong, Zuo Congjin, et al. Microstructures and fatigue properties of electron beam welds with beam oscillation for heavy section TC4-DT alloy[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(4):1015-1021.
- [14] 侯琦, 倪家强, 刘胜男, 等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头性能研究[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2014(4):17-20.
Hou Qi, Ni Jiaqiang, Liu Shengnan, et al. Research of the properties of EBW joint of TC4-DT titanium alloy[J]. *Welding Digest of Machinery Manufacturing*, 2014(4):17-20.
- [15] Lu Wei, Shi Yaowu, Li Xiaoyan. Correlation between tensile strength and hardness of electron beam welded TC4-DT joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(6):1694-1700.
- [16] 王小芳, 陈明和, 陈伟, 等. TC4-DT 钛合金高温热变形行为研究[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(1):30-34.
Wang Xiaofang, Chen Minghe, Chen Wei, et al. Study on hot deformation behavior of TC4-DT titanium alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(1):30-34.
- [17] 王小芳, 陈明和, 陈伟, 等. TC4-DT 钛合金不同热变形条件下流变应力[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(1):117-120.
Wang Xiaofang, Chen Minghe, Chen Wei, et al. Flow stress of TC4-DT titanium alloy under different hot deformation conditions[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(1):117-120.
- [18] 刘青, 薛祥义, 付宝全, 等. TC4-DT 钛合金的热变形行为研究[J]. *材料热处理技术*, 2009, 38(12):43-47.
Liu Qing, Xue Xiangyi, Fu Baoquan, et al. Study on hot deformation behavior of TC4-DT titanium alloy[J]. *Material and Heat Treatment*, 2009, 38(12):43-47.
- [19] 胥军, 卢文壮, 王晗, 等. 陶瓷结合剂 CBN 砂轮高速磨削钛合金 TC4-DT[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2013, 33(5):12-16.
Xu Jun, Lu Wenzhuang, Wang Han, et al. High speed grinding TC4-DT alloy with vitrified CBN wheel[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2013, 33(5):12-16.
- [20] 胥军, 卢文壮, 王晗, 等. TC4-DT 钛合金磨削表面特性和其摩擦磨损性能研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(1):1-7.
- Xu Jun, Lu Wenzhuang, Wang Han, et al. Characteristics and wear properties of grinding surface of TC4-DT titanium alloy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(1):1-7.
- [21] 孟庆武, 耿林, 王春华, 等. 两种热处理钛合金的摩擦磨损性能[J]. *大庆石油学院学报*, 2006, 30(4):46-48.
- [22] 许玮. TiAl 基金合金表面改性层耐磨性能及高温氧化性能的研究[D]. 太原:太原理工大学, 2006.
- [23] 郭华锋, 孙涛, 李菊丽. 不同摩擦条件下 TC4 钛合金摩擦学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(10):40-43.
Guo Huafeng, Sun Tao, Li Juli. Tribological properties of TC4 alloy under different friction conditions[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(10):40-43.
- [24] Wilsdorf D K. What role for contact spots and dislocations in friction and wear? [J]. *Wear*, 1996, 200:8-29
- [25] Straffelini G, Molinari A. Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions[J]. *Wear*, 1999, 236:328-338.
- [26] 蔡文俊, 卢文壮, 王晗, 等. TC21 钛合金稀土渗硼强化表面组织及性能研究[J]. *航空学报*, 2014, 35(5):1713-1721.
Cai Wenjun, Lu Wenzhuang, Wang Han, et al. Microstructure and friction and wear property of the new damage tolerance TC21 titanium alloy surface strengthened by RE solid-state boriding[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(5):1713-1721.
- [27] 程俊静, 贲能军, 梁文萍. TC4 钛合金表面等离子渗钼后的摩擦磨损性能[J]. *机械工程材料*, 2013, 37(9):59-63.
Cheng Junjing, Ben Nengjun, Liang Wenping. Friction and wear properties of TC4 alloy after surface plasma Mo penetration[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2013, 37(9):59-63.
- [28] 刘勇, 杨德庄, 何世禹, 等. TC4 合金的磨损率及磨损表面层的显微组织变化[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 34(1):128-131.
Liu Yong, Yang Dezhuang, He Shiyu, et al. Study on dry sliding wear of TC4 alloy in vacuum[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 34(1):128-131.
- [29] 孙荣禄, 刘勇, 杨德庄. TC4 合金及其表面 TiCp/Ni 基金合金激光熔覆层的摩擦磨损性能[J]. *摩擦学学报*, 2003, 23(6):457-462.
Sun Ronglu, Liu Yong, Yang Dezhuang. Friction and wear properties of TiCp/Ni based laser clad layer on TC4 alloy[J]. *Tribology*, 2003, 23(6):457-462.