

微弧氧化对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响

俞树荣, 马邦豪, 宋伟, 何燕妮, 景鹏飞, 尘强

(兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用微弧氧化技术, 在 TC4 钛合金表面制备高硬度氧化陶瓷层(MAO), 对比研究了 TC4 钛合金基体与微弧氧化陶瓷层在 2 种不同位移幅值下的微动磨损行为。结果表明: 位移幅值由 80 μm 增大到 150 μm 时, TC4 钛合金基体微动损伤机制由粘着磨损和磨粒磨损转变为疲劳磨损和氧化磨损, 而微弧氧化陶瓷层的损伤机制始终以氧化磨损为主; 位移幅值为 80 μm 时, TC4 钛合金基体与微弧氧化陶瓷层磨损量均较小, 而摩擦系数大且波动大; 位移幅值为 150 μm 时, 两者磨损量出现不同程度的增大, 而摩擦系数略有下降且趋于平稳; 与 TC4 钛合金基体相比, 微弧氧化陶瓷层的平均摩擦系数小, 磨损轮廓浅, 且磨损量仅为钛合金基体的 70%。微弧氧化陶瓷涂层能够保护钛合金基体表面, 有效改善 TC4 钛合金耐磨性。

关键词: TC4 钛合金; 微动磨损; 微弧氧化; 表面形貌; 磨损机制

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)01-006-07

Effect of Micro-arc Oxidation on Fretting Wear Behavior of TC4 Titanium Alloy

Yu Shurong, Ma Banghao, Song Wei, He Yanni, Jing Pengfei, Chen Qiang

(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: With micro-arc oxidation technique, the high hardness ceramic oxide layer (MAO) was prepared on the surface of TC4 alloy, and the fretting wear behavior of TC4 alloy substrate and micro-arc oxide ceramic layer under two different displacement amplitudes was studied. The results show that, when the displacement amplitude increases from 80 μm to 150 μm , the fretting damage mechanism of TC4 substrate changes from adhesive wear and abrasive wear to fatigue wear and oxidation wear, while the damage mechanism of micro-arc oxide ceramic layer is always dominated by oxidation wear. When the displacement amplitude is 80 μm , the wear amount of TC4 substrate and micro-arc oxide ceramic layer is small, but the friction coefficient is high and fluctuates greatly. When the displacement amplitude is 150 μm , the wear amount increases to different degrees, while the friction coefficient decreases slightly and tends to be stable. Compared with those of TC4 alloy substrate, the average friction coefficient of micro-arc oxide ceramic layer is small, the wear profile is shallow, and the wear amount is only 70% of that of titanium alloy substrate. In summary, the results show that the micro-arc oxide ceramic coating can protect the surface of titanium alloy and effectively improve the wear resistance of TC4 alloy.

Key words: TC4 alloy; fretting wear; micro-arc oxidation; surface morphology; wear mechanism

微动是指名义上静止的两接触体表面在振动工况下(如疲劳载荷、机械振动)发生的极小振幅的相对运动^[1], 其振幅为微米量级(一般小于 300 μm), 普遍存在于航天航空、化工设备、核电能源等众多领域。微动会对机械配合件造成形式复杂且具有隐

蔽性的损伤^[2], 造成巨大的安全隐患和经济损失, 影响构件的安全性和可靠性, 已成为大量关键零部件失效的主要原因之一^[3-5]。

钛合金因其密度低、比强度高、耐腐蚀性良好等特点被广泛应用在众多工程领域^[6], 然而由于硬度低、抗疲劳性能差、耐磨性较差等原因, 使其对微动损伤十分敏感。有研究表明, 微动作用可使钛

合金疲劳极限降低 20%~50%，严重影响其使用寿命，给实际工程应用带来危害^[6-8]。近些年，为提高钛合金表面性能出现了较多的表面改性方法^[9,10]，其中微弧氧化技术是通过电解液与相应电参数组合，在金属表面原位生长出以基体金属氧化物为主的陶瓷涂层。如刘百幸等人^[9]研究了微弧氧化膜的磨损性能及失效机理，发现在干摩擦和油润滑环境下，剪切应力和压应力分别是导致膜层失效的主要因素，采取有效润滑可提高膜层的使用寿命；杨力等人^[11]研究了不同合金表面微弧氧化膜层的硬度及磨损形貌，发现 TA1 和 TC10 钛合金表面微弧氧化膜层的抗磨特性优于 TC4 钛合金表面微弧氧化膜层；齐玉明等人^[12]研究了钛合金表面高硬度微弧氧化膜的耐磨性，发现采用高浓度铝酸盐电解液制备的微弧氧化膜具有较高硬度，在滑动干摩擦条件下表现出优异的耐磨性。由于微弧氧化工艺操作简单、绿色环保，且生成的陶瓷层具有高耐磨性、良好的耐腐蚀性以及与基体结合紧密等特点，成为耐磨性、耐蚀性防护等领域研究热点^[13-16]，但应用于微动损伤防护领域中的研究较少。实验选用应用较广的 TC4 钛合金材料，通过微弧氧化技术在其表面制备陶瓷层，探究 TC4 钛合金在微弧氧化前后表面形貌及摩擦系数等变化，分析氧化陶瓷层对 TC4 钛合金抗微动损伤性能的影响，从而为钛合金抗微动损伤设计提供理论支持与实际参考。

1 实验

截取 $\phi 24 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm}$ 的 TC4 钛合金圆柱试样，表面用 SiC 水磨金相砂纸进行逐级打磨，再用粒度为 $0.04 \text{ }\mu\text{m}$ 的 SiO_2 抛光液进行抛光，使其表面粗糙度 R_a 在 $0.03 \sim 0.04 \text{ }\mu\text{m}$ 之间。抛光试样用丙酮溶液在超声波清洗器中清洗，并用乙醇洗干净以备微弧氧化试验。

采用微弧氧化法在 TC4 钛合金试样表面制备微弧氧化陶瓷层，试验中阳极选用已制备好的 TC4 钛合金，阴极为电解池。电解液采用磷酸盐溶液，配置过程：在烧杯中准备 1600 mL 去离子水，根据电解液浓度计算 Na_3PO_4 质量，并加入去离子水中搅拌至溶解，再加入适量乙酸将 pH 调至 10~11 之间。在试验过程中相应的电参数：电源频率为 500 Hz，电压为 450 V，时间为 30 min。

以球-平面接触方式，采用德国 Optimol 公司制

造的 SRV-IV 微动摩擦磨损试验机进行微动磨损试验。摩擦副上试样选用 $\phi 10 \text{ mm}$ 的 GCr15 钢球，下试样为 TC4 钛合金，上、下试样化学成分和力学性能分别如表 1、表 2 所示。试验参数：法向载荷为 10 N，频率为 25 Hz，位移幅值分别为 80、150 μm ，循环次数为 45 000 次，在室温下摩擦 30 min。微动磨损试验完成后，用 QUANTA FEG 450 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察 TC4 基体和微弧氧化陶瓷层的表面磨损形貌。摩擦系数由计算机实时采集得到。用 OLYMPUS OLS 5000 3D 激光共聚焦显微镜 (LSCM) 测量磨损量和磨痕深度曲线。

表 1 TC4 和 GCr15 化学成分 (w/%)

Table 1 Chemical composition of TC4 and GCr15

Material	Ti	Al	V	O	Fe	C
TC4	Bal.	6.5	4.3	0.08	0.06	0.01
Material	Fe	Cr	C	Mn	Si	Ni
GCr15	Bal.	1.6	1.0	0.3	0.25	0.2

表 2 TC4 和 GCr15 主要力学性能

Table 2 Main mechanical properties of TC4 and GCr15

Material	R_p/MPa	R_m/MPa	HRC	E/GPa
TC4	1700	2000	62	210
GCr15	≥ 825	≥ 895	30	119

2 结果与分析

2.1 摩擦系数

图 1 为 TC4 基体和微弧氧化膜层在位移幅值 D 分别为 80、150 μm 下的摩擦系数随时间变化曲线。从图 1 可以看出，摩擦系数可分为 3 个阶段：快速上升期，波动期，稳定期。

由图 1a 可知，位移幅值为 80 μm 时，初始阶段即 200 s 前，TC4 基体表面与对磨材料接触面积较小，摩擦力也小，但随着摩擦的进行，基体表面膜受挤压摩擦的作用被迅速破坏和去除，金属基体接触面积增大，导致摩擦系数快速上升^[17]；在 300~700 s 之间，摩擦系数处于波动状态。随着循环次数的增加，颗粒不断地剥落，磨痕表面形成具有阻隔作用的第三体层在微动挤压作用下逐渐发生细化，但第三体的产生与接触表面的溢出保持动态平衡，摩擦系数趋于稳定。微弧氧化膜层的摩擦系数在磨损初期较小，300 s 前随着表面膜逐渐破裂，摩擦副

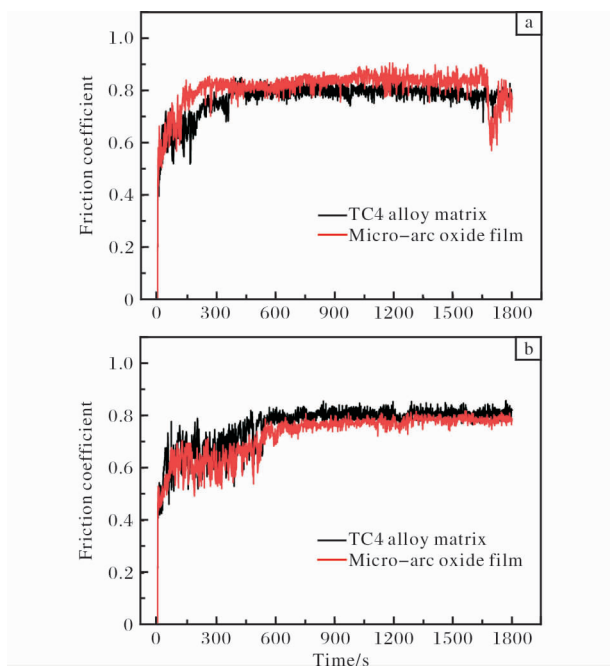


图1 不同位移幅值下 TC4 基体和微弧氧化膜层摩擦系数变化曲线

Fig. 1 Friction coefficient variation curves of TC4 substrate and micro-arc oxide film at different displacement amplitudes: (a) $D = 80 \mu\text{m}$; (b) $D = 150 \mu\text{m}$

发生直接接触使摩擦系数快速上升；300 ~ 900 s 时摩擦系数属于波动状态而后便趋于稳定；由于微弧氧化膜层表面比较粗糙，所以与 TC4 基体相比，同时间段微弧氧化膜层摩擦系数大；但在 1600 ~ 1700 s 时，摩擦系数明显下降，考虑是对磨材料或剥落颗粒填充到微弧氧化膜层微孔凹陷处，与压实氧化层的形成有关^[18]。微弧氧化膜层的平均摩擦系数为 0.811，略高于 TC4 基体(0.773)。

由图 1b 可知，在位移幅值为 150 μm 时，微动初始阶段摩擦系数快速上升，在 200 ~ 600 s 之间，塑性变形—粘着—粘着断裂—再粘着过程反复出现，摩擦系数一直处于波动状态，呈现出类似于锯齿的形状。随后接触面三体作用增强，摩擦系数略微回落且逐渐稳定，随着循环次数的增加，磨屑的产生和排出达到动态平衡，摩擦系数相对趋于稳定。微弧氧化膜层平均摩擦系数(0.727)低于 TC4 基体的平均摩擦系数(0.761)，这是由于此条件下磨损过程中疏松层剥落的颗粒嵌入微弧氧化膜层微孔中，使膜层表面变的平整，磨面摩擦氧化物的出现对摩擦系数变化也会产生一定的影响^[19]。相比于 80 μm 时，位移幅值为 150 μm 微动循环中微弧氧化陶瓷层

的摩擦系数减小，低于 TC4 基体的平均摩擦系数，这是由于增大位移幅值，微动由混合区进入完全滑移区，此时由弹性协调变形向滑移转变，摩擦系数峰值降低。

2.2 磨损量与磨损率

TC4 基体和微弧氧化膜层耐磨性能用磨损量及磨损率来衡量^[20,21]。磨损量用 OLYMPUS OLS 5000 3D 激光共聚焦显微镜测得，磨损率由(1)式得：

$$K = \frac{V}{NDF} \quad (1)$$

式中： K 为磨损率， $\mu\text{m}^3 / (N \cdot \mu\text{m})$ ； V 为磨损量， μm^3 ； N 为微动循环次数； D 为位移幅值， μm ； F 为法向载荷， N 。

图 2 为不同位移幅值下 TC4 基体与微弧氧化膜层的磨损量与磨损率。由图 2a 可知，当法向载荷一定时，位移幅值增加后磨损量随之增加；由图 2b 可知，位移幅值增加后磨损率也随之增大，微弧氧化膜层的磨损率曲线斜率大于 TC4 基体磨损率曲线，这与微弧氧化膜层的疏密程度不均匀/表面粗糙或孔径大小有关；在相同的位移幅值下，基体的磨损量和磨损率均大于微弧氧化陶瓷涂层。位移幅值为 80 μm 时，微动处于混合区，快速滑动产生的磨屑难

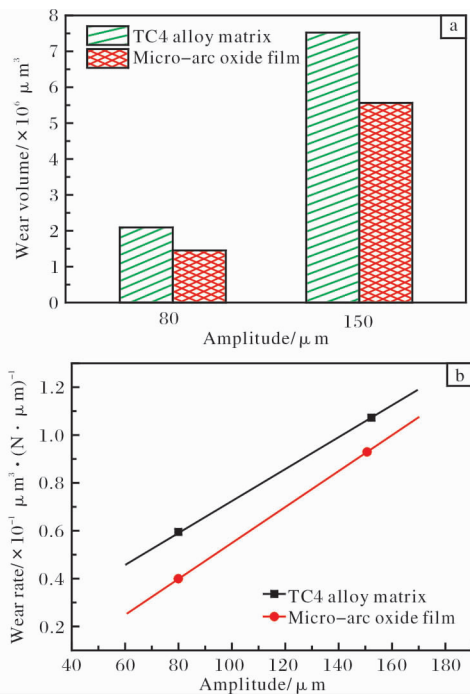


图2 不同位移幅值下 TC4 基体与微弧氧化膜层的磨损量和磨损率

Fig. 2 Wear volume(a) and wear rate(b) of TC4 substrate and micro-arc oxide film at different displacement amplitudes

以排出而积聚在一起,其磨损区域面积较小,对材料和对磨球之间的接触起到隔离的作用,积聚的磨屑对微动起缓冲作用,此时 TC4 基体的磨损量及磨损率约为微弧氧化膜层的 1.4 倍;位移幅值增大到 150 μm 时,微动状态处于完全滑移区,摩擦长度相对较长,微动磨损区域变大,快速滑动产生的磨屑容易排出,造成金属与金属间接触加剧,磨损增大,材料损失更为严重。位移幅值 $D = 150 \mu\text{m}$ 时,两者磨损量明显变大,而微弧氧化陶瓷层的磨损量仅为 TC4 基体的 70%。

图 3 为位移幅值为 80 μm 时 TC4 基体和微弧氧化膜层的磨痕三维形貌和磨痕深度曲线。由图 3a、b 可以看出,在 $D = 80 \mu\text{m}$ 时,微弧氧化膜层微动磨损面积小于钛合金基体,第三体起到固体润滑的作用,磨损坑浅。由图 3c 可知,微弧氧化膜层磨痕深

度较小,与磨损量趋势一致。图 4 为 $D = 150 \mu\text{m}$ 时 TC4 基体和微弧氧化膜层的磨痕三维形貌和磨痕深度曲线。由图 4 可知,位移幅值增大后,TC4 基体与微弧氧化膜磨痕深度明显增大。一方面,在位移幅值较大时,微动过程中产生的摩擦热促进接触区氧化反应进行,加速氧化膜的生成;另一方面,随微动磨损的进行,表面氧化膜二次破裂和形成的时间间隔延长,造成氧化膜破坏^[22]。氧化膜形成—破坏的过程不断重复,磨损严重,加剧材料的流失,造成磨痕深度的增大,但相同位移幅值下,微弧氧化的磨痕深度总是小于 TC4 基体。由磨损量、磨损率、磨痕三维形貌及磨痕深度曲线得出:在相同位移幅值下,微弧氧化膜层磨损量均小于 TC4 基体,磨损率也较小,磨痕深度也较浅,因而微弧氧化膜层改善了 TC4 基体的耐磨性,减弱磨损效果明显^[9,23,24]。

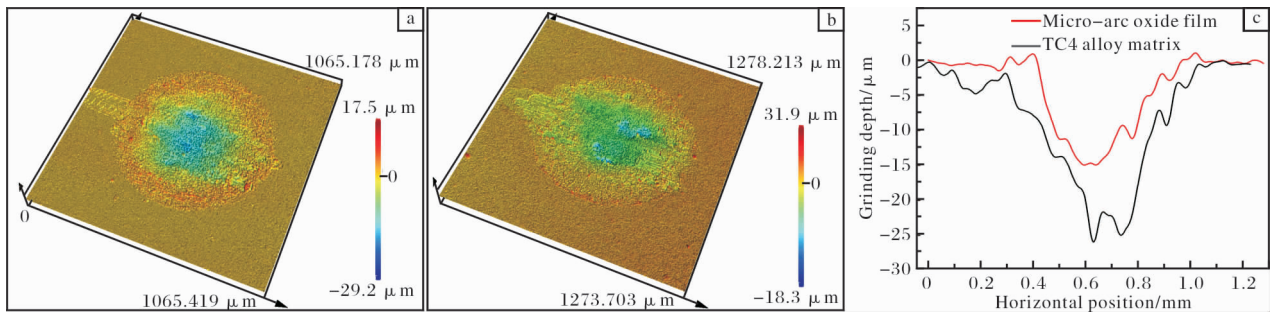


图 3 位移幅值为 80 μm 时磨痕的 LSCM 测试结果

Fig. 3 LSCM test results of wear scar at displacement amplitude of 80 μm : (a) wear trace morphology of TC4 substrate; (b) wear trace morphology of micro-arc oxide film; (c) grinding depth curves

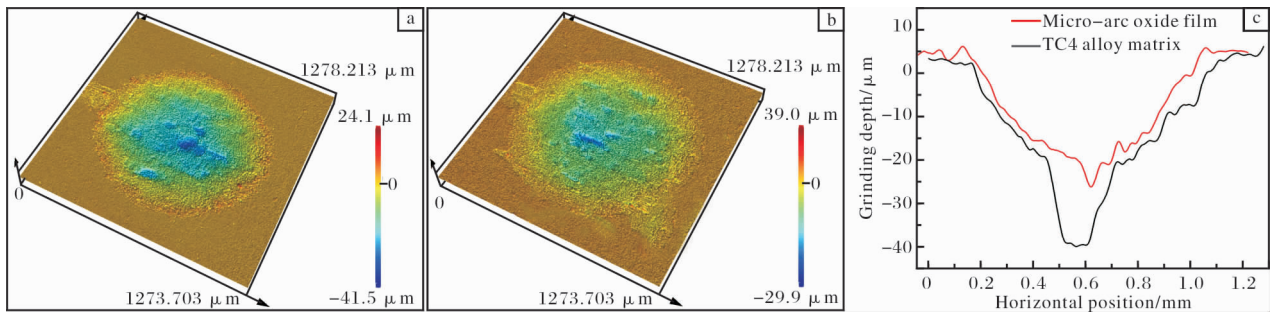


图 4 位移幅值为 150 μm 时磨痕的 LSCM 测试结果

Fig. 4 LSCM test results of wear scar at displacement amplitude of 150 μm : (a) wear trace morphology of TC4 substrate; (b) wear trace morphology of micro-arc oxide film; (c) grinding depth curves

2.3 磨损表面形貌及磨损机制

图 5 为 TC4 基体与微弧氧化膜层表面形貌。图 5a 为 TC4 基体表面形貌,可以看到显微组织由 $\alpha + \beta$ 相组成,灰色的是 α 相,白色的为晶界 β 相,所占体积分数分别约为 60% 和 40%^[25];图 5b、5c 为微

弧氧化膜层表面形貌,粗糙的表面是由于反应时熔融的放电通道在冷却过程中收缩不匀而形成凹凸不平的形态^[11],表面孔洞的尺寸也在一定程度上影响了膜层整体的均匀性和粗糙度^[10-12]。从图 5c 可以看出,微弧氧化膜层中存在许多细小的显微孔

洞,这是微弧氧化过程中反应区与反应物排出的通道^[26]。

图 6a~6c 为 TC4 基体在 $D = 80 \mu\text{m}$ 时的表面磨损形貌。由图 6a 可以看出,磨痕中心位置有片状脱落,表面遍布大量磨屑,考虑是第三体层破裂所致;图 6b 表面呈现出典型的粘着磨损特征,可看到具有层状结构的舌形楔,其反映出塑性变形和撕裂的特征,同时观察到沿微动方向的犁沟形貌^[27,28]。图 6c 表面可观察到松散的磨屑、脱落的片状材料,此时易萌生裂纹,诱发疲劳的产生。图 6d~6f 为微弧氧

化层 $D = 80 \mu\text{m}$ 时的表面磨损形貌。从图 6e 可见,在摩擦力的作用下材料剥离而产生了磨粒,在磨粒摩擦磨损的过程中,膜层表面沿微动方向产生明显的犁沟,形成磨粒磨损;混合区产生的磨屑一部分排出,一部分则堆积粘着。从图 6f 可以看出,微弧氧化膜层出现大范围黑色光滑区和少量剥落坑和裂纹,微弧氧化的光滑区即为含有摩擦氧化物膜层。综上所述,在位移幅值为 $80 \mu\text{m}$ 时,TC4 基体磨损机制以粘着磨损和磨粒磨损为主,微弧氧化膜层磨损机制以氧化磨损为主,并伴有磨粒磨损。

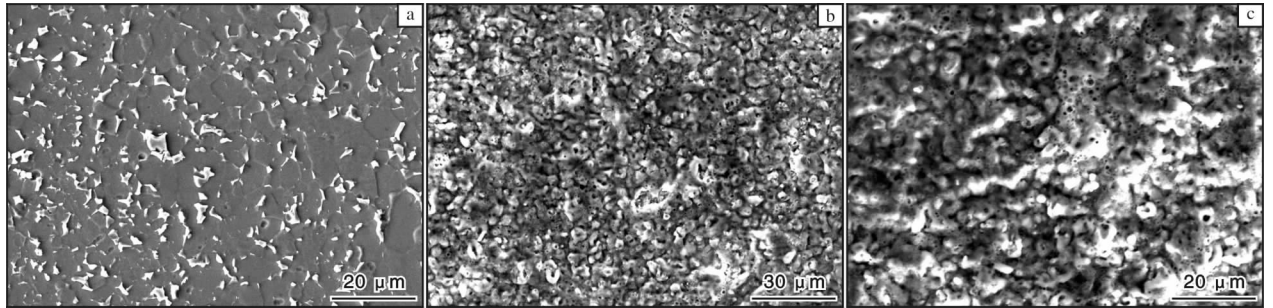


图 5 TC4 基体和微弧氧化膜层的表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of TC4 substrate (a) and micro-arc oxide film (b, c)

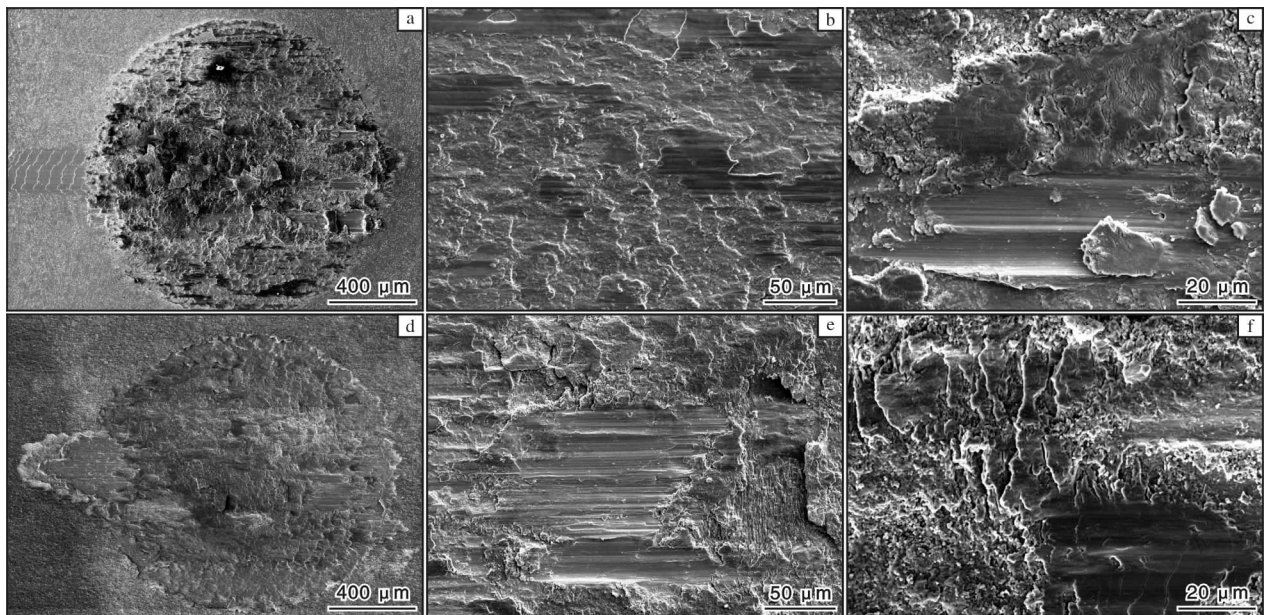


图 6 位移幅值为 $80 \mu\text{m}$ 时 TC4 基体和微弧氧化膜层的表面磨损形貌

Fig. 6 Wear morphologies of TC4 substrate (a~c) and micro-arc oxide film (d~f) at displacement amplitude of $80 \mu\text{m}$

图 7a~7c 为 TC4 基体在 $D = 150 \mu\text{m}$ 时表面磨损形貌。由图 7b、7c 可知,位移幅值增大后,微动磨损区域变大,此时微动处于完全滑移区,快速滑动产生的磨屑有一部分被推挤出接触区,使得基体与对磨球接触增大,摩擦热也增大,氧化膜形成一

破坏过程重复进行,使得氧化磨损进一步加剧;相对滑动更加剧烈,裂纹在更深的亚表层萌生,进一步向表面扩展,与表面裂纹汇合,造成更严重的疲劳脱层,在材料表面以较大片层的形式脱落,因而在图 7c 中可以观察到更大更深的剥落坑。图 7d~7f 为

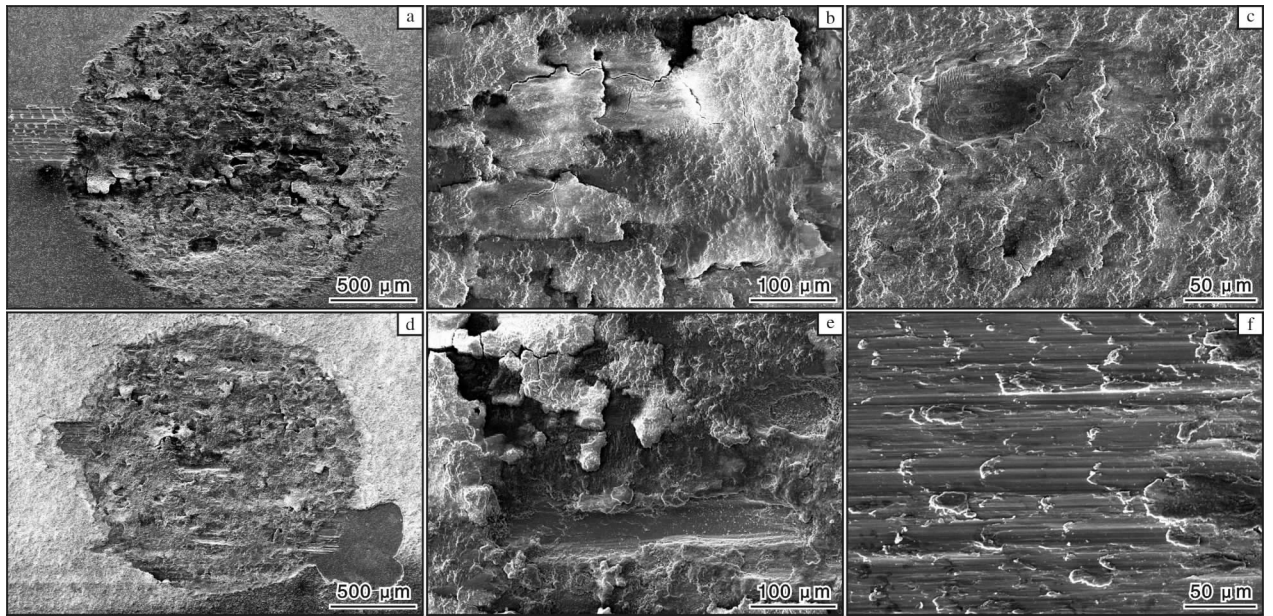


图 7 位移幅值为 $150 \mu\text{m}$ 时 TC4 基体和微弧氧化膜层的表面磨损形貌

Fig. 7 Wear morphologies of TC4 substrate (a~c) and micro-arc oxide film (d~f) at displacement amplitude of $150 \mu\text{m}$

微弧氧化膜层在 $D = 150 \mu\text{m}$ 时的磨损表面形貌。图 7d、7f 表面有沿微动方向的犁沟形貌，这是由于微弧氧化膜层具有较高的粗糙度，凸起部位先被磨平，一部分形成的磨粒镶嵌到膜层孔洞中，一部分破坏脱落而被碾压成硬质颗粒发生机械切削形成犁沟；图 7e 可以观察到材料发生裂纹形核，在切应力作用下，裂纹扩展，使材料发生层状剥落，形成较深的剥落坑，同时看到黑色层覆盖，磨损表面出现黑色区，这是氧化磨损的典型特征；由于微弧氧化表面改性技术所用电解液为碱性体系，较酸性体系而言放出的气体少^[29]，膜层表面的孔径也小，但是裂纹多。从图 7e 也可以观察到较多的裂纹。综上所述，位移幅值 $D = 150 \mu\text{m}$ 时，TC4 基体磨损机制为疲劳磨损和氧化磨损，微弧氧化膜层磨损机制以氧化磨损为主并伴有磨粒磨损。

3 结 论

(1) 相同位移幅值下，TC4 基体与微弧氧化陶瓷层摩擦系数变化趋势相同，为快速上升期—波动期—稳定期；位移幅值较小时，摩擦系数大且波动大；位移幅值较大时，摩擦系数波动较小，两者平均摩擦系数降低。

(2) 在位移幅值为 $80 \mu\text{m}$ 时，TC4 基体的磨损机制以粘着磨损和磨粒磨损为主，微弧氧化陶瓷层磨损机制以氧化磨损为主；在位移幅值为 $150 \mu\text{m}$ 时，

TC4 基体的磨损机制为疲劳磨损和氧化磨损，微弧氧化陶瓷层磨损机制以氧化磨损为主并伴有磨粒磨损。

(3) TC4 基体及微弧氧化陶瓷层的磨损量、磨损率与位移幅值相关；相同位移幅值下，微弧氧化陶瓷层磨损量、磨损率均小于 TC4 基体，磨痕深度曲线也较浅。在微动磨损过程中，经微弧氧化处理的钛合金构件表面生成的陶瓷质氧化膜能够有效地保护材料基材免受磨损的破坏，进而提高钛合金基体的耐磨性。

参考文献 References

- [1] 周仲荣, Vincent L. 微动磨损 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 李康. 湿喷丸强化 Ti-6Al-4V 合金的微动磨损和微动疲劳行为及其机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [3] 周仲荣, 朱昊. 复合微动磨损 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [4] 石炜. 航空发动机榫连接结构微动疲劳寿命研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [5] 周仲荣, 罗唯力. 微动摩擦学的发展现状与趋势 [J]. 摩擦学学报, 1997, 17(3): 272-280.
- [6] 何燕妮, 俞树荣, 李淑欣, 等. TC4 合金微动磨损颗粒的运动分布 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 1250-1255.
- [7] 彭艳萍, 曾凡昌, 王俊杰, 等. 国外航空钛合金的发展

- 应用及其特点分析[J]. 材料工程, 1997(10): 3-6.
- [8] 刘道新, 刘元镛, 刘双梅, 等. 航空钛合金结构的几种典型损伤形式及控制[J]. 航空维修与工程, 2000(4): 22-23, 43.
- [9] 刘百幸, 彭振军, 梁军. TC4 合金微弧氧化膜的摩擦磨损性能及其失效机理研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(1): 50-56.
- [10] 李康, 付雪松, 胡建军, 等. 微弧氧化处理 TC4 合金表面微动磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(3): 765-769.
- [11] 杨力, 王胜. 表面微弧氧化处理对球拍钛合金摩擦磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24): 107-110.
- [12] 齐玉明, 彭振军, 刘百幸, 等. 钛合金表面高硬度微弧氧化膜的制备和耐磨性研究[J]. 表面技术, 2019, 48(7): 81-88.
- [13] Cheng J, Li F, Zhu S, et al. Electrochemical corrosion and tribological evaluation of TiAl alloy for marine application [J]. Tribology International, 2017, 115: 483-492.
- [14] 付颖, 张艳, 包星宇, 等. 钛合金表面耐磨涂层研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(2): 33-39.
- [15] 冯秋元, 张永强, 史文, 等. 钛合金表面改性技术及涂层制备研究[J]. 科技创新与应用, 2017(23): 8-10, 12.
- [16] 周慧, 刘正堂, 李争显, 等. 钛合金表面微弧氧化膜及抗氧化性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(11): 1835-1838.
- [17] 宋伟, 孙璐, 景鹏飞, 等. 蒸馏水中 TC4 合金微动磨损特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 328-335.
- [18] 辛龙, 李杰, 陆永浩. Inconel 690 合金高温微动磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(4): 470-476.
- [19] 张秋阳, 王树奇, 李新星, 等. 对磨材料对 TC11 合金高温磨损行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(9): 2285-2289.
- [20] 俞树荣, 孙璐, 宋伟, 等. TC4 合金微动腐蚀行为的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 159-164.
- [21] 景鹏飞, 俞树荣, 宋伟, 等. 接触载荷对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 266-274.
- [22] 郑超, 魏世丞, 梁义, 等. TC4 钛合金在 3.5% NaCl 溶液中的微动腐蚀特性[J]. 稀有金属, 2018, 42(10): 1018-1023.
- [23] Sharifi H, Aliofkhaezrai M, Darband G B, et al. Tribological properties of PEO nanocomposite coatings on titanium formed in electrolyte containing ketoconazole[J]. Tribology International, 2016, 102: 463-471.
- [24] Wheeler J M, Collier C A, Paillard J M, et al. Evaluation of micromechanical behaviour of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on Ti-6Al-4V[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(21/22): 3399-3409.
- [25] 孙璐. TC4 合金在两种介质下的微动腐蚀特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [26] 李玉海, 张勤, 刘馨, 等. TC4 钛合金微弧氧化复合陶瓷膜制备及耐磨性能研究[J]. 功能材料, 2015, 46(9): 9128-9132.
- [27] 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, 2005, 34(1): 128-131.
- [28] 陈康敏, 张秋阳, 李新星, 等. TC11 合金/GCr15 钢摩擦副的干滑动磨损行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 34(6): 1531-1535.
- [29] 黄利保, 郝建民, 张斌英, 等. 2A12 铝合金在两种体系中微弧氧化膜层的磨损性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 185-190.