

载荷对 TC21 钛合金微弧氧化涂层微动磨损性能的影响

周 恺, 谢发勤, 吴向清, 王少青

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘 要: 采用球盘接触形式, 在 50 和 150 μm 位移振幅条件下, 研究了载荷(60、40 和 20 N)对 TC21 钛合金及其表面微弧氧化(PEO)涂层切向微动磨损性能的影响。结果显示, 随着位移振幅的增大和载荷的减小, TC21 钛合金和 PEO 涂层的微动区域均由部分滑移区向滑移区转变。在部分滑移区, 2 种材料沿微动方向的磨痕宽度随载荷的减小而减小。虽均未出现明显的材料损失, 但 TC21 钛合金边缘微滑区存在微裂纹的萌生和扩展, 其程度随载荷的减小而加重, 而微动对 PEO 涂层只起到了平滑作用。在滑移区, 2 种材料的磨痕宽度随载荷的减小而增大, 且均存在局部磨损。磨损程度随振幅的增大和载荷的减小而加深。其中, PEO 涂层的最大磨痕深度小于 TC21 钛合金, 显示出更好的抗微动磨损性能。

关键词: TC21 钛合金; 微弧氧化; 微动磨损; 损伤机理

中图分类号: TG146.23; TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-2831-10

TC21 是一种高强高韧损伤容限型钛合金, 但和其他牌号钛合金类似, 存在硬度低、耐磨性能差和对微动损伤敏感等问题^[1, 2]。各学者对 TC21 钛合金的抗滑动磨损性能已开展了较为广泛的研究^[3-5], 但针对其微动磨损行为的报道仍相对较少。在微动磨损过程中, 存在 3 种微动区域: 部分滑移区(PSR)、混合滑移区(MSR)和滑移区(SR)^[6]。不同的微动区域会呈现不同的微动磨损形貌(图 1)^[7, 8]; 也会存在不同的微动损伤机制, 例如由微动引起的疲劳裂纹萌生、扩展或由微动引起的材料磨损。影响材料所处微动区域的因素很多, 位移振幅和载荷是最重要的影响因素^[9]。

在微动磨损过程中, 可采用液体润滑的方式来减轻微动损伤。Shen^[10]等发现润滑油会进入微动接触界面并形成润滑膜, 改变微动区域和第 3 体作用行为并降低磨损率。Zhang^[11]等证实润滑油可降低摩擦系数(COF), 并减少微动过程产生的磨损产物。另外, 通过表面工程制备涂层, 改变表面成分、形貌、组织结构和应力状态, 以提高材料的抗微动磨损性能, 也是减轻微动损伤的有效途径。根据所制备涂层性质的不同, 可将其分为固体润滑涂层和耐磨涂层。常见的固体润滑涂层包括 DLC 涂层^[12]、GLC 涂层^[13]、MoS₂ 涂层^[14]和聚合物涂层^[15], 此类涂层可大幅降低微动过程中的 COF, 提高材料的抗

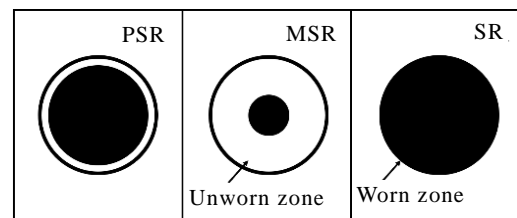


图 1 不同微动区域磨痕形貌示意图

Fig.1 Schematic diagram of wear tracks morphology in different fretting regimes

微动磨损性能。而复合电刷镀^[16]、热喷涂^[17]、物理气相沉积^[18]、激光熔覆^[19]、包埋渗^[20]和微弧氧化(PEO)^[21]等技术都被应用于制备抗微动耐磨涂层。此类涂层多具有硬度高、结合力强等优点, 可应用于各类微动磨损工况。

利用微弧氧化技术在钛合金表面制备耐磨陶瓷涂层已有诸多报道, 但研究多针对滑动磨损, 关于微动磨损的研究仍相对较少^[22, 23]。因此, 本实验在 TC21 钛合金表面利用微弧氧化技术制备了陶瓷涂层, 研究了在不同位移振幅和载荷条件下的微动磨损行为, 通过扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜表征了微动磨痕的形貌、成分、三维形貌和二维轮廓, 进而对微动损伤机理进行了系统阐述。

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 陕西省自然科学基金(2021JM-055); 国家自然科学基金(52001256)

作者简介: 周 恺, 男, 1984 年生, 博士生, 高级工程师, 西北工业大学民航学院, 陕西 西安 710072, E-mail: zhouk785@163.com

1 实 验

实验中 TC21 钛合金样品的化学成分(原子分数)为 Ti-9.9Al-1.1Mo-0.9Sn-1.2Zr-0.9Nb-1.4Cr。将其加工成 30 mm×20 mm×2 mm 的长方体试样作为工作电极, 分别用 240#、400#、800#和 1000# SiC 砂纸对试样各表面逐级打磨, 并先后在乙醇和去离子水中超声波清洗, 空干后进行微弧氧化。微弧氧化实验按文献[24]进行, 电解液为偏铝酸钠 15 g/L、磷酸钠 4 g/L 和氢氧化钠 1.5 g/L; 电参数为电流 10 A/dm², 占空比 10%, 频率 600 Hz 和氧化时间 20 min。所制备的 PEO 涂层由 Al₂TiO₅ 相组成, 化学成分(原子分数)为 10.9Ti-30.7Al-58.4O^[24]。用 1000 # SiC 砂纸对 PEO 涂层打磨后进行微动磨损实验。

实验采用的微动磨损设备是 WDF 300 微动摩擦磨损试验机, 配副材料是直径为 5 mm 的 GCr15 钢球(硬度 63 HRC)。微动运行模式为球盘接触的切向微动, 位移振幅 50 和 150 μm, 载荷(F_n)60、40 和 20 N, 频率 100 Hz, 时间 30 min, 循环周次共计 3.6×10⁵。通过 JSM-6700 型扫描电子显微镜对微动磨痕的形貌和成分进行表征, 通过 LSM-800 型激光共聚焦显微镜对微动磨痕的三维形貌进行表征。

2 结果与讨论

2.1 摩擦系数(COF)

2.1.1 振幅 50 μm

图 2 为振幅 50 μm 时, TC21 钛合金和 PEO 涂层在不同载荷条件下的 COF 曲线。各条曲线均存在 3 个阶段: 实验初期, 由于表面氧化膜和污染膜的存在, COF 很低; 而随着氧化膜和污染膜的破坏, COF 快速增大; 最终进入稳定阶段。在同一载荷条件下, 合金和涂层稳定阶段的 COF 基本一致。当载荷为 60 N 时, 稳定阶段的 COF 均处于 0.50 附近; 当载荷为 40 N 时, COF 稳定在 0.80; 当载荷为 20 N 时, 稳定阶段的 COF 则均位于 1.40 左右。从结果可见, 随着载荷的减小, 合金和涂层的 COF 均有增大的趋势。因为在此振幅条件下, 材料的损伤相对轻微, 但当载荷较大时, 两接触体表面的微凸体会发生变形, 咬合程度减小, COF 较低; 而当载荷较小时, 接触表面微凸体之间相互咬合作用较强, COF 也相对较大^[25]。另外, 随着载荷的减小, 材料的粘着磨损程度均有不同程度的加深(见 2.2.1 章节), 也会导致 COF 变大。

2.1.2 振幅 150 μm

图 3 为振幅 150 μm 时的 COF 曲线。当载荷为

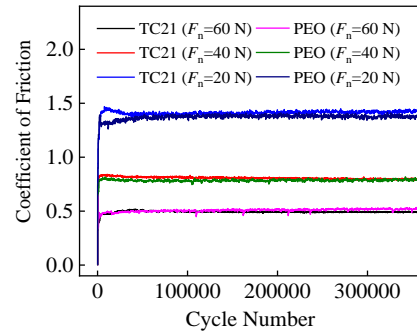


图 2 振幅 50 μm 摩擦系数曲线

Fig.2 COF curves at 50 μm displacement amplitude

60 N 时, 2 种材料的 COF 曲线仅包括初始阶段、快速上升阶段和稳定阶段; 而当载荷为 40 和 20 N 时, 合金和涂层的 COF 快速增加到最大后, 均存在下降阶段。因为在此微动条件下, 磨痕中存在较多的第三体磨屑, 当 COF 达到最大后, 因为磨屑的承载作用, COF 开始下降, 随后磨屑的产生和排出达到相对稳定, COF 也随之稳定^[26]。在相对稳定阶段, 涂层的 COF 均稍小于合金。其中, 当载荷为 60 N 时, 合金的 COF 约为 1.2, 涂层的 COF 约为 1.0; 当载荷为 40 N 时, 合金的 COF 约为 1.5, 涂层的 COF 约为 1.2; 当载荷为 20 N 时, 合金的 COF 约为 2.6, 涂层的 COF 约为 2.3。

从以上数据可以看出, 2 种材料的 COF 随载荷的变化趋势与振幅 50 μm 时的实验结果相同, COF 随载荷的增大而减小。因为当振幅为 150 μm 时, 两接触体表面的滑移相对充分, 但随着载荷的增大, 相对滑移减少, 开始向接触粘着状态发展; 同时, 接触应力增加, 微动过程产生的磨屑难以转移和排出, 使得两摩擦副接触机会降低, 导致 COF 下降。另外, 随着载荷的减小, COF 曲线的波动增大, 说

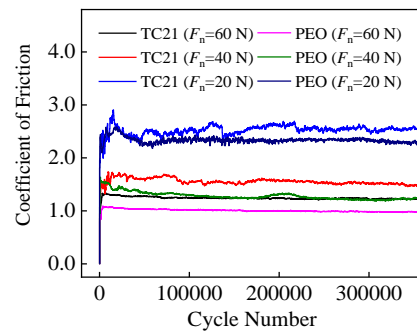


图 3 振幅 150 μm 摩擦系数曲线

Fig.3 COF curves at 150 μm displacement amplitude

明粘着磨损程度加深。其中，合金的 COF 曲线波动明显大于涂层，说明合金在微动过程中的塑性变形程度更大，微动损伤更为严重。

2.2 磨损机理

2.2.1 振幅 50 μm

图 4 为振幅 50 μm 时，TC21 钛合金在不同载荷条件下微动磨痕的 SEM 形貌。在此振幅条件下，磨痕均呈现圆环状(图 4a、4d 和 4g)，微动处于部分滑移区。当载荷为 60 N 时，沿微动方向的磨痕宽度为 262 μm，当载荷为 40 和 20 N 时，磨痕宽度分别减小为 231 和 225 μm。因为根据 Hertz 弹性接触理论，两接触表面的实际接触面积随载荷的减小而减小。

在部分滑移区,TC21 钛合金的磨损特征较为相似，微动磨痕可分为大范围的中心区和少部分的边缘磨损区。中心区并未出现明显的磨损现象(图 4b、

4e 和 4h)，但存在少量的擦伤和塑性变形，当载荷为 20 N 时，还能观察到散落分布的小坑。对 T1、T3 和 T5 区域进行 EDS 分析，结果见表 1。由表中数据可见，其成分较基体并未发生变化。形貌和成分结果说明，磨痕中心区未发生滑移，微动位移主要由弹性变形和少量的塑性变形调节。而在边缘磨损区则能观察到裂纹、剥层以及分布在最外侧的少量细碎磨屑(图 4c、4f 和 4i)。其中，当载荷为 20 N 时，裂纹增长变粗，表明裂纹的萌生和扩展随载荷的减小而越发明显。由表 1 中 T2、T4 和 T6 区域的 EDS 成分结果可见，磨损区均含有少量的 Fe 元素和大量的 O 元素，说明发生了轻微的粘着磨损和严重的氧化磨损；并且随着载荷的减小，Fe 元素和 O 元素含量均有增大的趋势，意味着粘着磨损和氧化磨损的程度增加。同时，随着载荷的减小，边缘磨

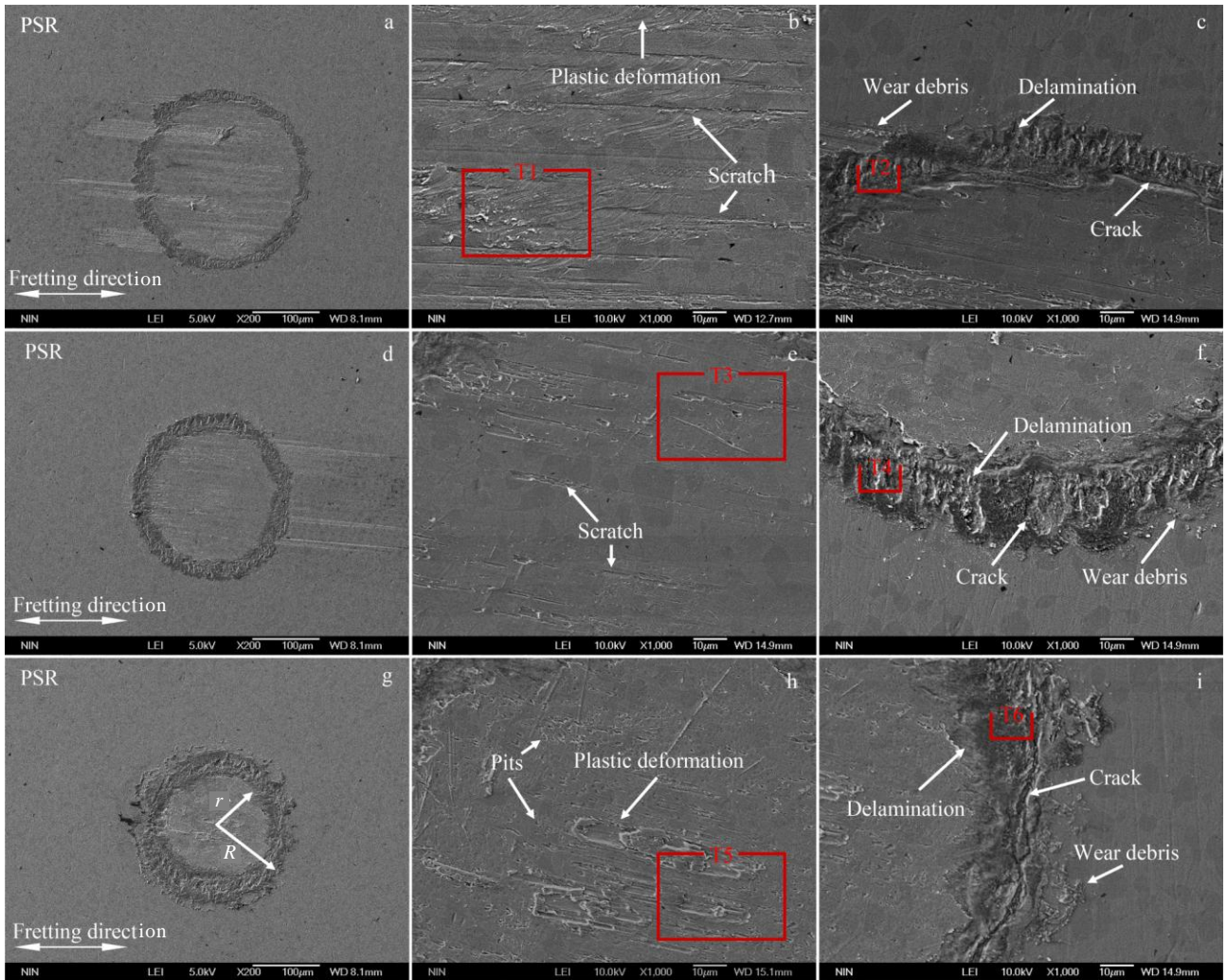


图 4 TC21 钛合金在 50 μm 振幅条件下的微动磨痕形貌

Fig.4 SEM morphologies of fretting wear tracks of the TC21 alloys at 50 μm displacement amplitude and load of 60 N (a-c), 40 N (d~f) and 20 N (g~i)

损区的面积占比明显增大,中心区半径(r)和整体磨痕半径(R)之比分别为 0.82、0.70 和 0.58,说明两接触表面的边缘微滑程度随着载荷的减小而增大。因为在部分滑移区减小载荷会导致切向力随之减小,从而导致较小的弹性变形,使得两接触表面的微滑程度增加。

图 5 为振幅 50 μm 时,PEO 涂层微动磨痕的 SEM 形貌。在 3 种载荷条件下,沿微动方向的磨痕宽度相差不大,分别为 340、315 和 324 μm ,但三者形貌则明显不同。当载荷为 60 和 40 N 时,微动磨痕的中心区域仍呈现出 PEO 涂层的放电微孔形貌(图 5a, 5b),在微孔中分布有颗粒状磨屑(图 5d,

5e);而当载荷为 20 N 时,中心区域已观察不出原先的放电微孔形貌(图 5c),但存在浅色和深色区域(图 5f)。对 P1~P6 区域和 P7 位置进行 EDS 分析,结果见表 2。

由 P1~P6 区域成分结果可见,磨痕中心和边缘区域均能观察到 Fe 元素,并且随着载荷的减小,Fe 元素含量增大,说明粘着磨损程度加剧;P7 位置的 Fe 元素含量很高,说明亮色区域为微动过程产生的摩擦转移层。值得注意的是,当载荷为 60 和 40 N 时,磨痕中心区域的 Fe 元素含量低于边缘区域;而当载荷为 20 N 时,中心区域的 Fe 元素含量却高于边缘区域。以上结果说明,当载荷为 60 和

表 1 图 4 中 TC21 钛合金在 50 μm 振幅条件下的微动磨痕不同区域的成分

Table 1 EDS analysis results of different zones for fretting wear tracks of the TC21 alloys at 50 μm displacement amplitude in Fig.4 (at%)

Zone	Ti	Al	Mo	Sn	Zr	Nb	Cr	Fe	O
T1	84.6	9.9	1.1	0.9	1.2	0.9	1.4	-	-
T2	51.3	5.0	1.2	0.7	0.8	0.9	0.8	1.8	37.5
T3	84.5	9.8	1.2	0.9	1.2	0.9	1.5	-	-
T4	48.7	4.6	0.7	0.5	1.0	0.8	0.9	2.0	40.8
T5	84.3	9.9	1.2	1.0	1.2	0.9	1.5	-	-
T6	43.9	4.5	1.2	0.3	1.0	0.9	1.0	2.8	44.4

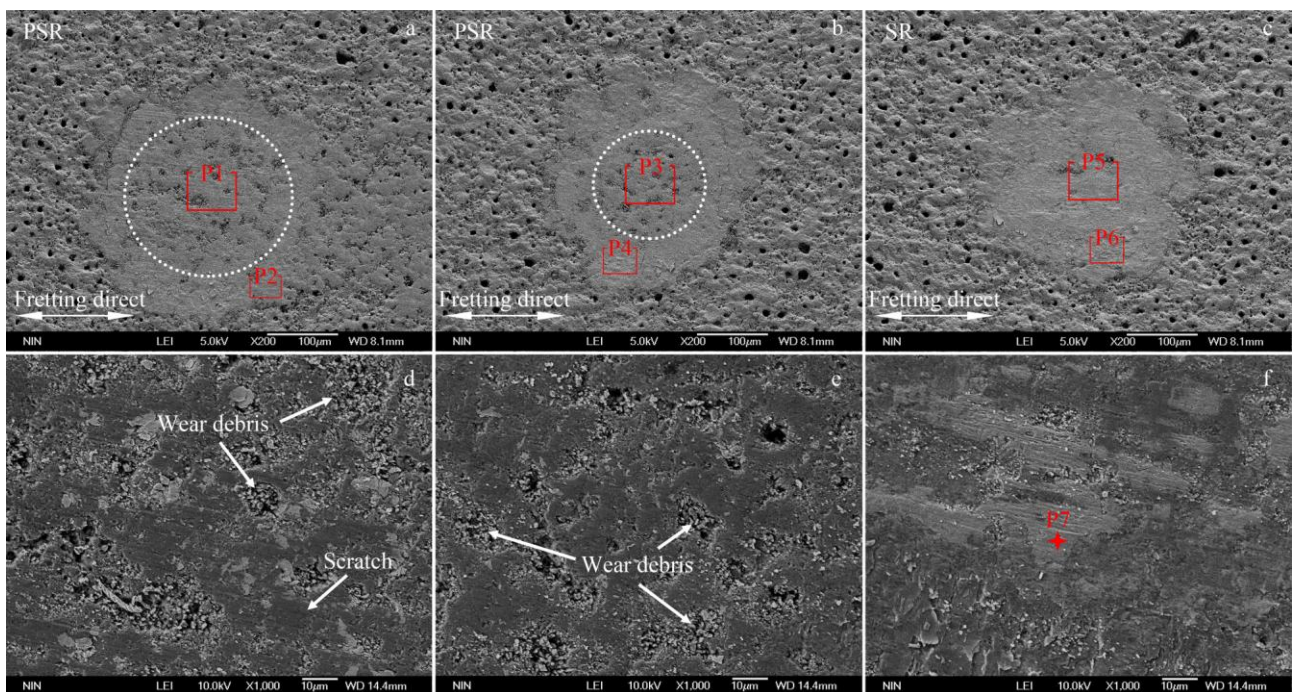


图 5 PEO 涂层在 50 μm 振幅条件下的微动磨痕形貌

Fig.5 SEM morphologies of fretting wear tracks of PEO coatings at 50 μm displacement amplitude and load of 60 N (a, d), 40 N (b, e) and 20 N (c, f)

40 N 时，微动处于部分滑移区；而当载荷为 20 N 时，微动则进入滑移区。在 3 种载荷条件下，微动使涂层表面的微凸体被磨平，起到了平滑涂层的作用，磨损轻微；同时涂层均未出现类似 TC21 钛合金边缘磨损区的裂纹和剥层现象，磨损机理主要包括磨粒磨损和粘着磨损。

2.2.2 振幅 150 μm

图 6 为振幅 150 μm 时，TC21 钛合金微动磨痕的 SEM 形貌。当载荷为 60 N 时，磨痕呈椭圆形，沿微动方向的磨痕宽度为 495 μm。其中心仍存在少量的粘着区域(图 6a,6b)；而边缘大部分区域则出现了明显的磨损，可观察到钛合金典型的滑动卡片状塑性变形以及剥层现象(图 6c)。整体磨痕形貌说明微动处于混合滑移区。从表 3 中的 EDS 结果可见，中心 T2 区域成分相比较基体未发生变化，而 T1 区域则存在大量的 Fe 元素和 O 元素。当载荷为 40 N 时，磨痕同样呈椭圆形，但面积明显增大，沿微动

方向的磨痕宽度为 815 μm (图 6d)。中心已不存在粘着区域，微动进入滑移区。从图 6e 和 6f 可观察到，磨痕区塑性变形程度更大，且存在大量的犁沟和磨屑。从表 3 中 T3 和 T4 区域的成分可知，Fe

表 2 图 5 中 PEO 涂层在 50 μm 振幅条件下的微动磨痕不同区域的成分

Table 2 EDS analysis results of different zones for fretting wear tracks of the PEO coatings at 50 μm displacement amplitude in Fig.5 (at%)

Zone	Ti	Al	Fe	O
P1	15.3	34.9	2.2	47.6
P2	14.3	32.7	6.2	46.8
P3	14.7	34.4	3.1	47.8
P4	12.0	30.9	7.3	49.8
P5	11.9	28.7	14.4	45.0
P6	11.7	28.4	11.5	48.4
P7	5.9	9.8	48.4	35.9

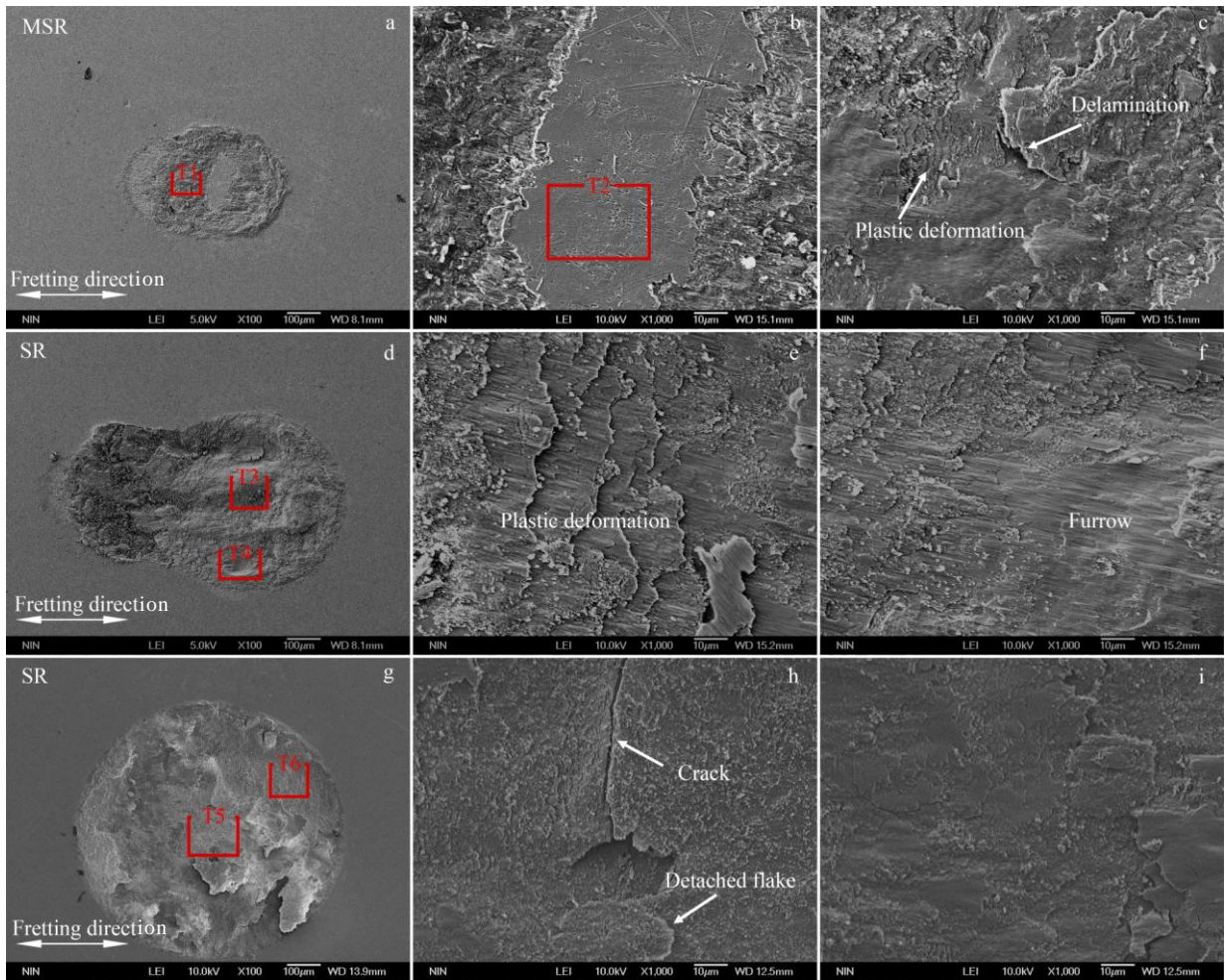


图 6 TC21 钛合金在 150 μm 振幅条件下的微动磨损形貌

Fig.6 SEM morphologies of fretting wear tracks of the TC21 alloys at 150 μm displacement amplitude and load of 60 N (a~c), 40 N (d~f) and 20 N (g~i)

表 3 图 6 中 TC21 钛合金在 150 μm 振幅条件下的微动磨痕不同区域的成分

Table 3 EDS analysis results of different zones for fretting wear tracks of the TC21 alloys at 150 μm displacement amplitude in Fig.6 (at%)

Zone	Ti	Al	Mo	Sn	Zr	Nb	Cr	Fe	O
T1	15.7	1.5	0.2	0.2	0.4	0.2	0.7	29.2	51.9
T2	84.9	9.7	1.2	0.9	1.2	0.9	1.2	-	-
T3	5.7	0.6	-	-	0.1	0.2	1.1	51.4	40.9
T4	14.8	1.7	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	28.7	53.7
T5	4.9	1.3	0.4	0.1	-	0.1	1.1	52.8	39.3
T6	8.1	1.6	0.4	0.3	-	0.5	1.0	38.6	49.5

元素含量高于载荷为 60 N 时的实验结果, 证明粘着磨损程度加深; 并且 T3 区域 Fe 元素含量大于 T4 区域, 证明粘着磨损程度中心大边缘小。当载荷为 20 N 时, 磨痕呈圆形, 磨损面积最大, 磨痕宽度为 785 μm, 微动同样处于滑移区。其磨痕表面能观察到大片的剥落现象和裂纹, 同时分布有大量的细小磨屑。T5 和 T6 区域同样可检测出 Fe 元素和 O 元素, 其中 Fe 元素含量稍高于载荷为 40 N 时的实验结果; 另外, T5 和 T6 区域的 Fe 元素含量

较为相似, 说明整个磨痕的粘着磨损程度相近。

在 150 μm 位移振幅、3 种载荷条件下, TC21 钛合金处于 2 种不同的微动区域, 但均发生了较为严重的剥层磨损、磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损。

图 7 为振幅 150 μm 时, PEO 涂层微动磨痕的 SEM 形貌。3 种载荷条件下的磨痕宽度分别为 515、728 和 947 μm。在图 7a、7d 和 7g 中均能观察到滑移和磨损现象, 微动处于滑移区。

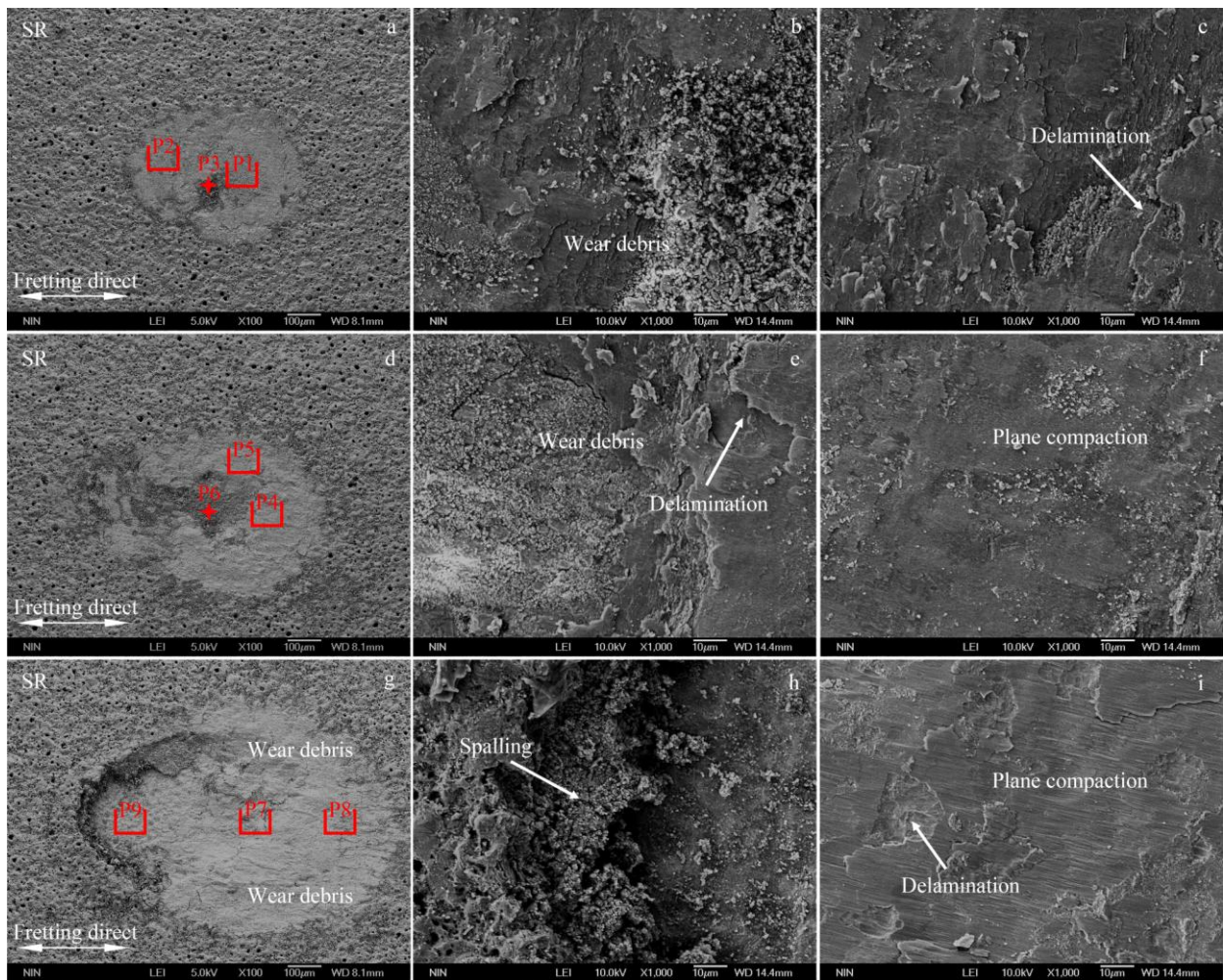


图 7 PEO 涂层在 150 μm 振幅条件下的微动磨痕形貌

Fig.7 SEM morphologies of fretting wear tracks of the PEO coatings at 150 μm displacement amplitude and load of 60 N (a-c), 40 N (d~f) and 20 N (g~i)

当载荷为 60 和 40 N 时，磨痕形貌和成分变化趋势较为相似。大部分磨痕区域较为平整，为平面状压实区；局部区域分布有微动产生的细碎磨屑，为磨屑分布区；同时还存在剥层现象。另外，由于涂层硬度较高，未观察到明显的塑性变形。由表 4 中的 EDS 结果可见，磨屑分布区 P3 位置的 Fe 元素含量低于 P1 和 P2 区域，P6 位置的 Fe 元素含量低于 P4 和 P5 区域；而磨痕中心 P1 和 P4 区域的 Fe 元素含量又分别高于边缘 P2 和 P5 区域，这也符合滑移区粘着磨损程度中心高边缘低的典型特征。

当载荷为 20 N 时，涂层发生了明显的剥落，在平面状压实区也能观察到剥层现象，同时存在大量的磨屑堆积。其中，P7 和 P8 区域含有大量的 Fe 元素；P9 区域的 Fe 元素含量较少，但仍主要为涂层元素，未检测到 TC21 的合金元素，证明涂层并未被磨穿，在 3.6×10^5 次微动循环后仍能对基体起到一定的保护作用。PEO 涂层和 TC21 钛合金在此振幅条件下磨损机理相同，包括剥层磨损、磨粒磨损、氧化磨损和粘着磨损。

2.3 磨损量

2.3.1 振幅 50 μm

在微动实验中，常采用最大磨痕深度对材料的磨损量进行评价。图 8 为振幅 50 μm 时，TC21 钛合金和 PEO 涂层在不同载荷条件下微动磨痕的三维共聚焦形貌和垂直于微动方向的二维轮廓。从图 8a~8c 可以看出，TC21 钛合金的三维形貌均呈现圆

表 4 图 7 中 PEO 涂层在 150 μm 振幅条件下的微动磨痕不同区域的成分

Table 4 EDS analysis results of different zones for fretting wear tracks of the PEO coatings at 150 μm displacement amplitude in Fig.7 (at%)

Zone	Ti	Al	Fe	O
P1	11.0	28.4	11.1	49.5
P2	12.9	33.1	9.2	44.8
P3	14.1	32.0	5.4	48.5
P4	3.2	7.0	51.1	38.7
P5	4.0	13.0	39.5	43.5
P6	8.0	17.3	29.3	45.4
P7	-	-	62.7	37.3
P8	3.1	-	56.6	40.3
P9	20.3	22.9	4.5	52.3

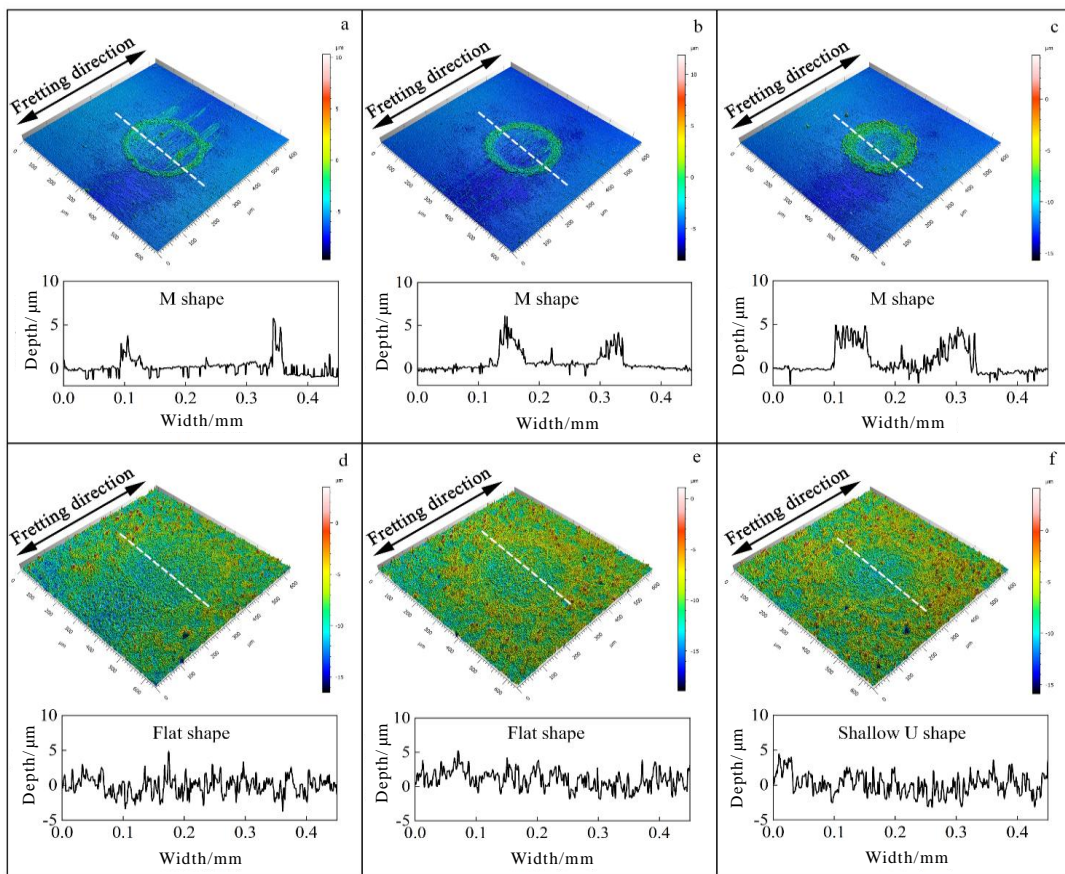


图 8 TC21 钛合金和 PEO 涂层在 50 μm 振幅条件下的三维形貌和二维轮廓

Fig.8 Three dimensional topography and two dimensional profile of fretting wear tracks of the TC21 alloys (a~c) and PEO coatings (d~f) at 50 μm displacement amplitude and load of 60 N (a, d), 40 N (b, e), and 20 N (c, f)

环状。结合二维轮廓，边缘磨损区存在高度 5~6 μm 的凸起，其面积占比随载荷的减小而增大；中心区域未出现明显形变，但能观察到因划痕导致的凹陷；整体磨痕呈“M”型。凸起产生的原因主要是微动处于部分滑移区，边缘微滑使材料结构疏松，同时 Fe 元素从对磨球转移至合金表面。在摩擦热作用下，疏松材料和转移 Fe 元素发生氧化生成了氧化磨屑。但在此振幅条件下，磨屑无法排出而在微滑区域产生了堆积。

从图 8d~8f 可观察到，PEO 涂层磨痕处的粗糙度较原涂层均有所降低。其中，当载荷为 60 和 40 N 时，微动处于部分滑移区，微动过程只起到了平滑涂层的作用，整体磨痕呈“Flat”型。但当载荷为 20 N 时，微动进入滑移区，磨痕中心区域可观察到约 2 μm 的凹陷，整体磨痕呈“shallow U”型。

2.3.2 振幅 150 μm

图 9 为振幅 150 μm 时，TC21 钛合金和 PEO 涂层微动磨痕的三维共聚焦形貌和垂直于微动方向的二维轮廓。对于 TC21 钛合金，当载荷为 60 N 时，

微动处于混合滑移区，在磨痕边缘区域因存在磨屑和氧化产物堆积，形成了约 8 μm 高的凸起，磨痕呈“M”型。当载荷为 40 N 时，微动处于滑移区，伴随着粘着磨损和塑性变形程度的加深，磨痕呈“W”型。在磨痕边缘和中心区域都存在因磨损产物堆积而出现的凸起状物质，并且由于中心粘着磨损程度最大，磨损产物堆积最多，最大凸起高度达到约 30 μm；同时最大磨损深度约为 14 μm (图 9b)。当载荷为 20 N 时，微动磨损程度进一步加深。一方面，由于磨屑在微动过程中被排出磨痕并产生堆积，从二维轮廓可以观察到磨痕边缘约 15 μm 高的凸起；另一方面，磨痕区域的最大磨痕深度达到约 26 μm，磨痕呈“U”型 (图 9c)。PEO 涂层在 3 种载荷条件下的磨痕轮廓则较为相似，均呈“U”型，最大磨痕深度分别为 4、9 和 16 μm (图 9d~9f)。在 40 和 20 N 2 种载荷条件下，其最大磨痕深度均小于 TC21 钛合金，说明 PEO 涂层一定程度上能提高基体材料在滑移区的抗微动磨损性能。

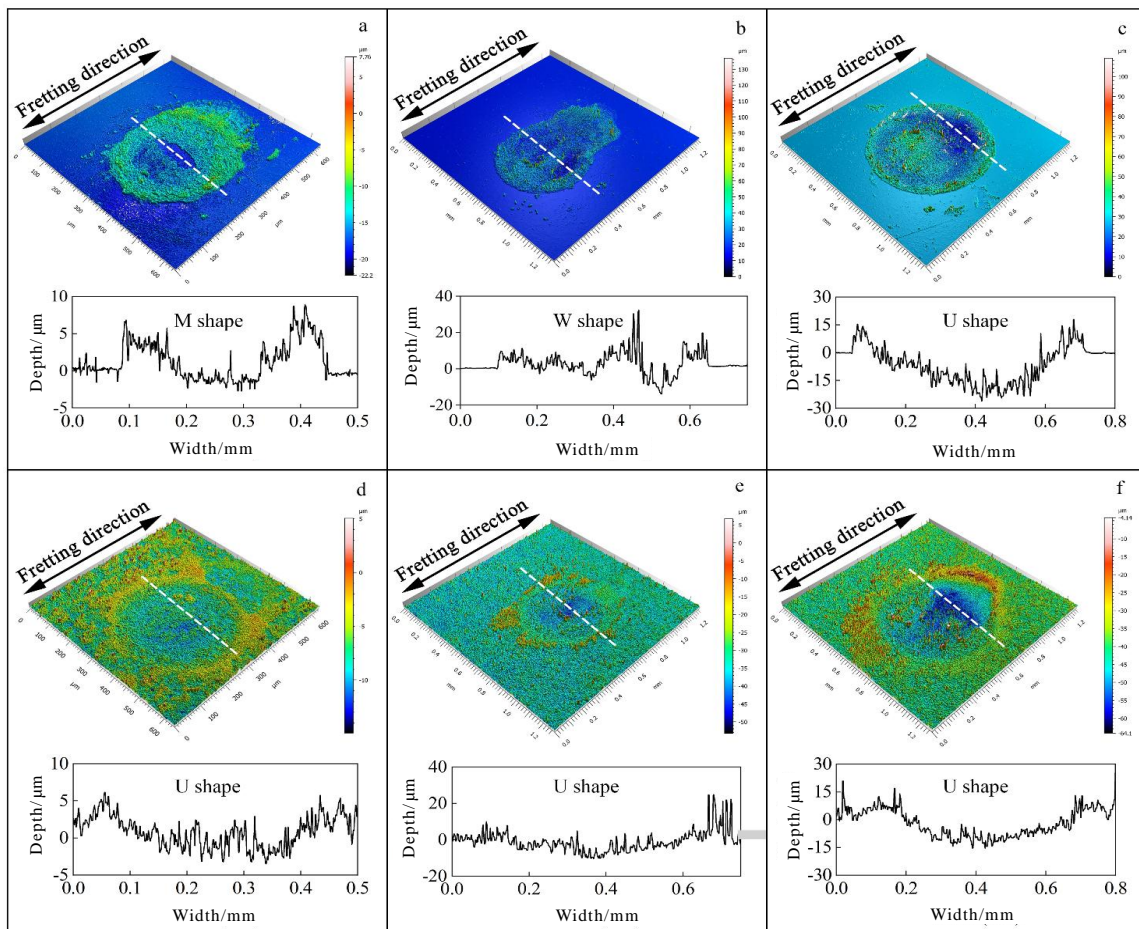


图 9 TC21 钛合金和 PEO 涂层在 150 μm 振幅条件下的三维形貌和二维轮廓

Fig. 9 Three dimensional topography and two dimensional profile of fretting wear tracks of the TC21 alloys (a~c) and PEO coatings (d~f) at 150 μm displacement amplitude and load of 60 N (a, d), 40 N (b, e), and 20 N (c, f)

3 结 论

1) 随着振幅的增大和载荷的减小, 微动区域由部分滑移区向滑移区转变。其中 PEO 涂层较 TC21 钛合金更易发生滑移。当振幅为 50 μm 时, TC21 钛合金在 60、40 和 20 N 载荷条件下均处于部分滑移区, 而 PEO 涂层在载荷为 20 N 时已进入滑移区; 当振幅为 150 μm 时, TC21 钛合金在 60 N 载荷条件下处于混合滑移区, 在 40 和 20 N 载荷条件下处于滑移区, 而 PEO 涂层则均处于滑移区。

2) 在部分滑移区, 因主要由弹性变形调节微动位移, TC21 钛合金和 PEO 涂层的 COF 相近; 而在滑移区, PEO 涂层的 COF 则稍低于 TC21 钛合金。

3) 在部分滑移区, 因氧化磨屑堆积, TC21 钛合金磨痕呈“M”型, 边缘微滑区存在微裂纹的萌生和扩展, 磨损机理主要为剥层磨损和氧化磨损; 而微动对 PEO 涂层仅起到了平滑作用, 涂层表面未出现微裂纹, 磨痕呈“Flat”型, 磨损机理主要为磨粒磨损和粘着磨损。

4) 在滑移区, TC21 钛合金和 PEO 涂层均发生了剥层磨损、磨粒磨损、氧化磨损和粘着磨损, 都存在明显的局部材料损失。其中 TC21 钛合金的磨痕呈“W”型和“U”型, PEO 涂层的磨痕则均呈“U”型。但 PEO 涂层的最大磨痕深度较浅, 一定程度上提高了 TC21 钛合金基体的抗微动磨损性能。

参考文献 References

- [1] Song Jingwen(宋静雯), Tan Changsheng(谭长生), Sun Qiaoyan(孙巧艳) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(4): 1260
- [2] Li Feizhou, Guo Bian. *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2018, 743: 576
- [3] Ji Shouchang(姬寿长), Li Zhengxian(李争显), Luo Xiaofeng(罗小峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(12): 3114
- [4] Zhang Xian(张显), Hu Ji(胡记), Sui Xinmeng(隋欣梦) *et al. Surface Technology*(表面技术)[J], 2020, 49(1): 311
- [5] Ding Yan(丁燕), Bai Lin(柏林), Xue Chaofan(薛超凡) *et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*(南京航空航天大学学报)[J], 2018, 50(1): 126
- [6] Ma Lifeng, Eom Kilho, Geringer Jean *et al. Coatings*[J], 2019, 9(8): 501
- [7] Cai Zhenbing, Zhu Minhao, Shen Huoming *et al. Wear*[J], 2009, 267(1): 330
- [8] Fouvry Siegfried, Kapsa Philippe, Vincent Leo. *Wear*[J], 1996, 200(1-2): 186
- [9] Lavella M. *Tribology International*[J], 2020, 146: 106 163
- [10] Shen M X, Cai Z B, Peng J F *et al. Wear*[J], 2013, 301(1): 540
- [11] Zhang Po, Liu Xiaojun, Lu Wenlong *et al. Tribology International*[J], 2018, 117: 59
- [12] Ding H H, Fridrici V, Geringer J *et al. Wear*[J], 2018, 406-407: 53
- [13] Shi Xiangru, Liskiewicz Tomasz W, Beake Ben D *et al. Applied Surface Science*[J], 2019, 494: 929
- [14] Barman K, Shipway P H, Voisey K T *et al. Progress in Organic Coatings*[J], 2017, 105: 67
- [15] Yeo Seung Min, Polycarpou Andreas A. *Tribology International* [J], 2014, 79: 16
- [16] Xu Binshi(徐滨士), Wang Haidou(王海斗), Dong Shiyun(董世运) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(8): 785
- [17] Sharma Akshat, Sadeghi Farshid, Sharma Atin. *Wear*[J], 2020, 446-447: 203 200
- [18] Kowalski Slawomir, Cygnar Mariusz. *Wear*[J], 2019, 426-427: 725
- [19] Ke Jin, Liu Xiubo, Liang Jue *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2019, 119: 105 599
- [20] Bose Sivakumar, Pathak Lokesh Chandra, Singh Raghuvir. *Applied Surface Science*[J], 2018, 433: 1158
- [21] Li Kang(李康), Fu Xuesong(付雪松), Hu Jianjun(胡建军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(3): 765
- [22] Wang Yaming, Lei Tingquan, Guo Lixin *et al. Applied Surface Science*[J], 2006, 252(23): 8113
- [23] Lin Xiuzhou, Zhu Minhao, Zheng Jianfeng *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(4): 537
- [24] Zhou Kai, Xie Faqin, Wu Xiangqing *et al. Materials*[J], 2020, 13(1): 11
- [25] Zhang D K, Ge S R, Qiang Y H. *Wear*[J], 2003, 255(7): 1233
- [26] Zhu M H, Cai Z B, Lin X Z. *et al. Wear*[J], 2007, 263(1): 472

Effects of Normal Load on Fretting Wear Properties of TC21 Titanium Alloy with Plasma Electrolytic Oxidation Coatings

Zhou Kai, Xie Faqin, Wu Xiangqing, Wang Shaoqing
(Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The effects of normal load (60, 40 and 20 N) on the tangential fretting wear properties of the TC21 titanium alloy and plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings were investigated under displacement amplitudes of 50 and 150 μm with a ball-on-plate contact configuration. The results show that with the increase of the displacement amplitude and decrease of the normal load, the fretting wear regime changes from partial slip regime to slip regime. In partial slip regime, the widths of the wear tracks along the fretting direction decrease with the decreasing normal load. Although there is no significant material loss, the extent of micro-cracks initiation and propagation in the micro-slip zone of the TC21 titanium alloy deepens with the decreasing normal load. However, the fretting only plays a smooth effect on the PEO coatings. In slip regime, the widths of the wear tracks along the fretting direction increase with the decreasing normal load. There exists local wear in both materials, and the wear degree increases with the increasing amplitude and decreasing normal load. The maximum wear depth of the PEO coatings is shallower than that of the TC21 titanium alloy, which proves that they could improve the fretting wear resistance.

Key words: TC21 titanium alloy; plasma electrolytic oxidation; fretting wear; damage mechanism

Corresponding author: Xie Faqin, Ph. D., Professor, School of Civil Aviation, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, E-mail: fqxie@nwpu.edu.cn