

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20211029001

表面织构下钛合金不同周次的微动磨损行为^{*}

王剑飞^{1,2} 薛伟海^{1,2} 高祺洋^{1,2} 段德莉^{1,2} 李 曙^{1,2}

(1. 中国科学院金属研究所辽宁省航发材料摩擦学重点实验室 沈阳 110016;

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院 沈阳 110016)

摘要: 在航空发动机中, 钛合金零部件的微动磨损不可避免。表面织构能在一定程度上减缓微动磨损, 然而目前对表面织构下钛合金不同周次微动磨损行为的认识尚有不足。在 TC4 钛合金表面通过激光加工制备不同方向的沟槽状表面织构, 随后进行不同周次的微动磨损试验。试验结果表明, 在磨损的初期, 有垂直方向表面织构的样品微动循环图更“瘦长”; 随着磨损的进行, 磨屑的分布状态发生了改变, 其微动循环图变的和平行织构的样品以及无织构的样品相同。整个磨损过程随微动周次增加, 分为黏着阶段和稳定阶段, 垂直织构的样品上, 黏着阶段又可被细分为黏着区域分散的阶段和黏着区域成片的阶段。随周次增加, 磨屑的演变是由大块的磨屑层经不断被碾碎、氧化, 转换成小块的磨屑, 并且最终转换成细小的颗粒磨屑, 被排出到磨损区域之外。研究结果对认识微动磨损行为中不同周次下表面织构的作用及磨屑的演化具有一定理论意义。

关键词: 钛合金; 微动磨损; 表面织构; 磨损过程; 激光加工; 磨屑

中图分类号: TH117

Fretting Wear Behavior of Ti Alloy under Different Cycles with Surface Texture

WANG Jianfei^{1,2} XUE Weihai^{1,2} GAO Siyang^{1,2} DUAN Deli^{1,2} LI Shu^{1,2}

(1. Liaoning Key Laboratory of Aero-engine Materials Tribology, Institute of Metal Research,

Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

Abstract: In aero engines, fretting wear of titanium alloy parts is inevitable. Studies have shown that surface texture can slow down fretting wear to a certain extent. However, the understanding of fretting wear behavior under different cycles is insufficient. The groove surface textures in different orientations are prepared on the surface of Ti-6Al-4V alloy by laser processing and different cycles of fretting wear tests are carried out. The results show that in the initial stage of wear, the fretting loops of samples with perpendicular grooves are “slimmer” than the others. As wear progresses, the distribution of wear debris changes, and the fretting loops of the 3 samples are similar. As the fretting cycle increases, the entire wear process can be divided into an adhesion stage and a stable stage. However, on samples with perpendicular grooves, the adhesion stage can be further subdivided into two stages according to whether the adhesion area is connected into one part. According to the distribution of wear debris and the results of EDS under different cycles, it can be found that the evolution of wear debris is the continuous grinding and oxidation of the large wear debris layer, which is converted into small pieces of wear debris, and finally into fine particle grinding. The research results have important theoretical significance for understanding the role of surface texture and the evolution of debris under different cycles in fretting wear behavior.

Keywords: titanium alloy; fretting wear; surface texture; wear process; laser processing; debris

0 前言

钛合金由于其具有密度低、比强度高特点,

广泛用于制作航空发动机压气机和风扇的叶片^[1]。

微动磨损是指两固体接触面上因出现周期性小振幅振动造成损伤的一种特有的磨损方式^[2-3], 主要分为切向微动、径向微动、扭动微动以及转动微动四

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (C 类) (XDC04040400)。

Fund: Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDC04040400).

20211029 收到初稿, 20220406 收到修改稿

种^[4-5]，其中，切向微动最为常见^[6]。航空发动机高速运转时，在叶片根部的榫槽连接处，以及相邻叶片的减振凸肩搭接处，切向微动磨损不可避免。在交变的位移以及应力的作用下，构件的表面极易萌生早期的裂纹，而产生的裂纹往往会降低整个部件的疲劳寿命^[7]。因此，研究钛合金间的微动磨损，具有重要的应用价值^[8-9]。

表面织构作为一种表面改性手段，起初被大量用于普通的滑动磨损工况中^[10-12]。在有润滑的情况下，表面织构的存在可以增加流体动压、储存润滑油，进而达到减摩的效果^[13-15]；在干摩擦的情况下，表面织构可以储存磨屑，进而减缓第三体磨粒磨损^[16-17]。因此，在材料的表面制备织构，通常可以起到耐磨减摩的作用^[12]。然而，对于不同类型的表面织构，其产生的作用也有所不同。对于点阵状的织构而言，每个孔洞都能储存一定的润滑油，而这些润滑油在摩擦的过程中不易溢出，因此，可以带来更好的润滑效果。但对于沟槽状的表面织构而言，润滑油容易流动，相比于无织构的样品，织构的存在并不能带来显著的益处^[14]。

微动磨损相比于普通的滑动磨损，其一大特点就是位移极小，导致产生的磨屑难以从接触面之间排出^[18]。而表面织构的存在能够有效地改变磨屑在接触面之间的分布状态。比如，点阵状的孔洞织构，能将磨屑的分布束缚成点阵状；沟槽状的织构，能使磨屑排列成平行的条状。磨屑分布状态的不同，对微动磨损的影响也有所不同^[19]。SUH 等^[20]研究了网格状表面织构的几何参数对微动磨损行为的影响，结果表明，降低沟槽的纵横比以及增大沟槽的长度都能有效降低摩擦因数。SINGH 等^[21]制备了三种不同密度的凸台状织构，发现随着凸台密度的增加，接触面积的减小，摩擦因数也随之降低。LU 等^[22]在 CuNiAl

上铣出沟槽状的表面织构，然后在与织构平行和垂直的方向上进行扭动微动磨损试验，结果表明，织构方向与微动方向平行时的摩擦因数较低，但磨损量较高。WANG 等^[23]在 TC4 钛合金上用激光制备出不同方向的沟槽状表面织构，随后进行了微动磨损试验。结果显示，垂直方向的表面织构和 45° 方向的表面织构的摩擦因数随运行周次的变化曲线相似；平行方向的表面织构和没有表面织构的样品的摩擦因数曲线相似。在之后的研究中^[23-24]，他们还发现，当微动磨损处于滑移区时，有垂直方向表面织构的系统形变量最大，有平行方向表面织构的系统形变量最小，然后没有织构的样品的系统形变量大于有 45° 织构样品的系统形变量。因此，可以尝试通过设计不同方向的表面织构，进而改变系统形变量的大小，进而在一定程度上控制微动磨损的运行区域，使之达到设计者们希望其处于的运行区域^[23]。

相比于其他形式的表面织构，沟槽状的表面织构存在织构方向的影响。另外，沟槽状表面织构可以大量储存磨屑，而在不同周次下，磨屑的形态、分布也不同，进而导致对微动磨损的影响也不同。因此，本文通过在 TC4 钛合金表面用激光加工制备沟槽状的表面织构，然后进行不同周次的微动磨损试验，研究沟槽状表面织构下 TC4 钛合金不同周次微动磨损行为以及磨损机理的影响。

1 试验准备

1.1 样品制备

此试验采用球-平面的接触形式，上下试样均使用 TC4 钛合金，其中球的直径为 10 mm，下试样的尺寸为 20 mm × 10 mm × 6 mm，试验所用 TC4 钛合金的化学组成以及硬度在中表 1 列出。

表 1 试验用的 TC4 钛合金的化学组成以及硬度

Table 1 Compositions and hardness of the tested Ti-6Al-4V alloy

Chemical composition / wt. %								Hardness / HRC
Ti	Al	V	Fe	C	N	O	H	
Bal.	6.2	3.8	0.09	0.08	0.009	0.07	0.009	32.5

使用大族激光 YLP-MP20 型激光打标机（最大输出功率 20 W、光束质量 ≤ 1.5、脉冲宽度 4~200 ns、脉冲重复频率 1.6~1 000 kHz）进行表面织构的制备。

选用的输出功率为 10 W（50 %），激光在每一个点重复扫描 20 次，相邻激光束中心的间隔为 120 μm。激光加工完成之后，使用 2000 号的砂纸对样品进行打

磨, 以便去除在激光加工过程中飞溅的熔滴。沟槽的宽度约为 $40\ \mu\text{m}$, 深度在 $50\sim 60\ \mu\text{m}$ 。

1.2 试验方法

样品准备就绪后, 使用 Rtec 微动磨损试验机进行微动磨损试验。如图 1 所示, 下试样被固

定, 上梁在两个高频电机的带动下左右往复运动, 进而带动球试样。两个压电陶瓷传感器分别记录切向力和法向力, 位移传感器记录位移。图 2 表示球运动的方向垂直和平行于织构方向的两种情况。

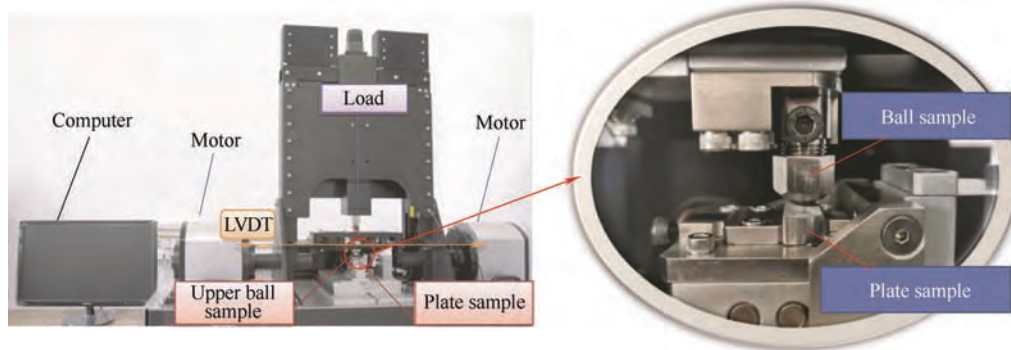


图 1 Rtec 微动磨损试验机

Fig. 1 Rtec fretting machine

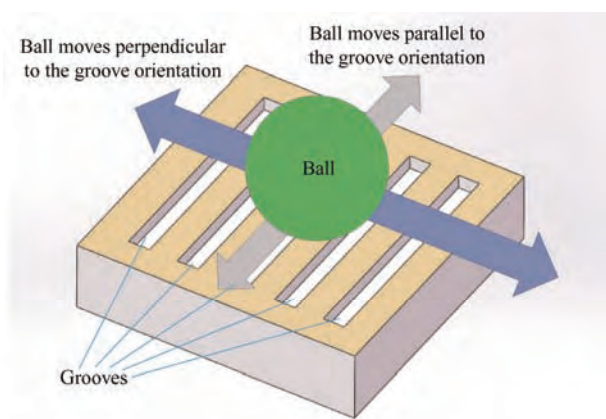


图 2 平行与织构方向的微动磨损和垂直于织构方向的微动磨损示意图

Fig. 2 Illustration of the groove orientation to the fretting movement direction: perpendicular and parallel

本试验设置的是不同循环周次的微动磨损试验, 且不同周次的试验是单独的试验而非一次试验, 微动磨损的试验参数设置如表 2 所示。

表 2 微动磨损的试验参数

Table 2 Test parameters of fretting wear

Applied displacement / μm	Frequency / Hz	Load / N	Fretting cycles / 10^3
40	100	40	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000

试验结束后, 使用基恩士 VHX-6000 光学显微镜观察样品的表面形貌以及 3 维轮廓, 使用

INSPECT F50 场发射扫描电镜对样品的微观结构进行观测, 并用其自带的能谱进行元素分析。

2 结果

2.1 微动循环图

图 3 记录了在不同周次下没有织构的样品、有垂直于微动方向的织构样品、有平行于微动方向的织构样品的微动循环图 (摩擦力-位移曲线)。结果表明, 在 1 000 和 2 000 周次下, 有垂直于微动方向的织构样品的微动循环图与另外两个样品差别明显, 在形状上表现为更“瘦长”。这意味着当运动方向垂直于表面织构时, 两接触面间真正的滑移位移更短, 并且在运动的两端, 摩擦力更大。另外, 无织构的样品和有平行于运动方向织构的样品的微动循环图几乎重合, 这意味着平行状的表面织构并不能改变微动磨损过程中的摩擦力和位移的关系。

随着磨损的继续进行, 往复运动达到 1 万周次之后, 三个样品的微动循环图都几乎重合。其实, 在微动磨损中, 表面织构的一个重要作用就是, 能有效改变磨屑的分布状态以及磨屑的产生和排出之间的关系。随着磨屑的堆积, 接触区域下的织构坑被磨屑充满, 改变了垂直织构样品上的接触状态, 即磨屑逐渐开始将两接触面分隔开。因此, 其微动循环图发生改变, 接近于另外两个样品的微动循环图。

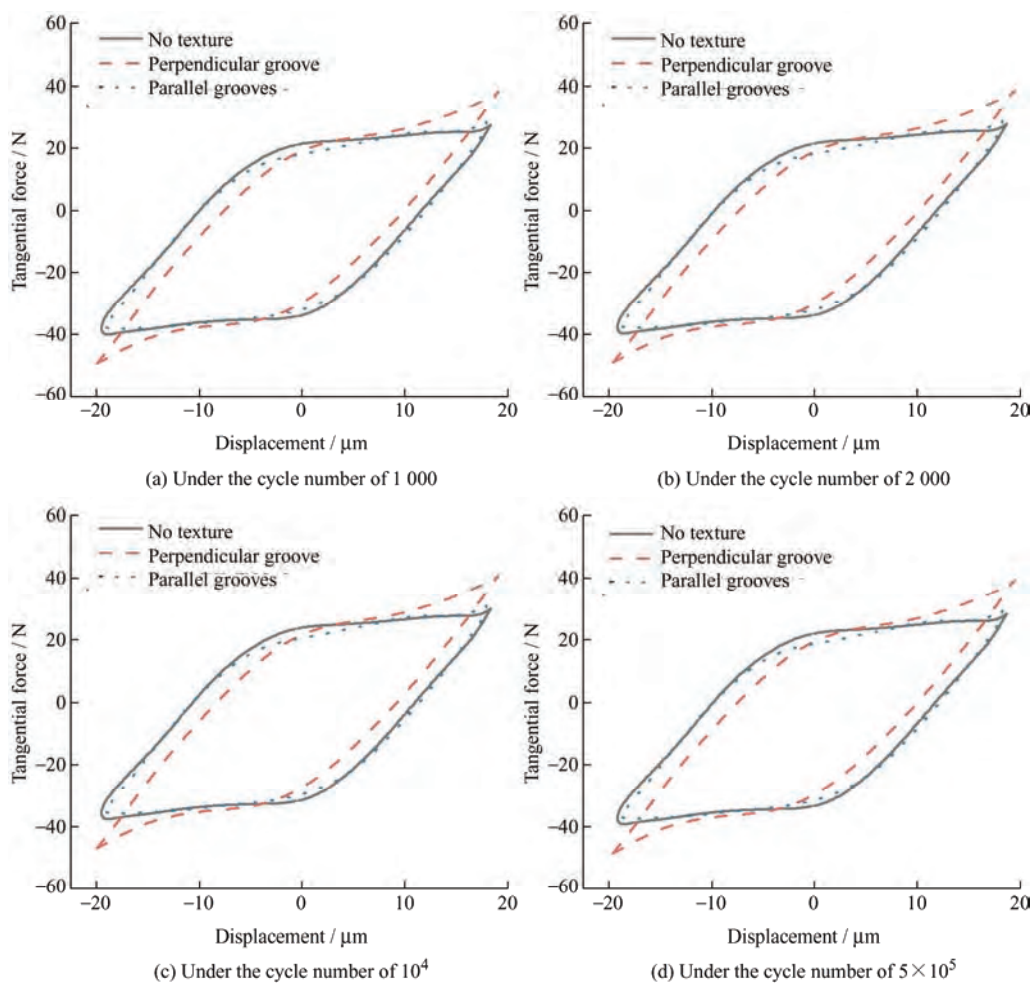


图3 在不同周次下的微动循环图

Fig. 3 Fretting loops under different cycles

2.2 摩擦因数

图4a表示3个样品在100万周次内的摩擦因数曲线。结果表明,在经过试验刚开始几千周次之后,3个样品的摩擦因数曲线均表现出缓慢上

升的现象。当往复运动达到30万周次左右时,摩擦因数则开始趋于稳定。有垂直织构样品的稳定摩擦因数最大,而无织构样品的稳定摩擦因数最小。

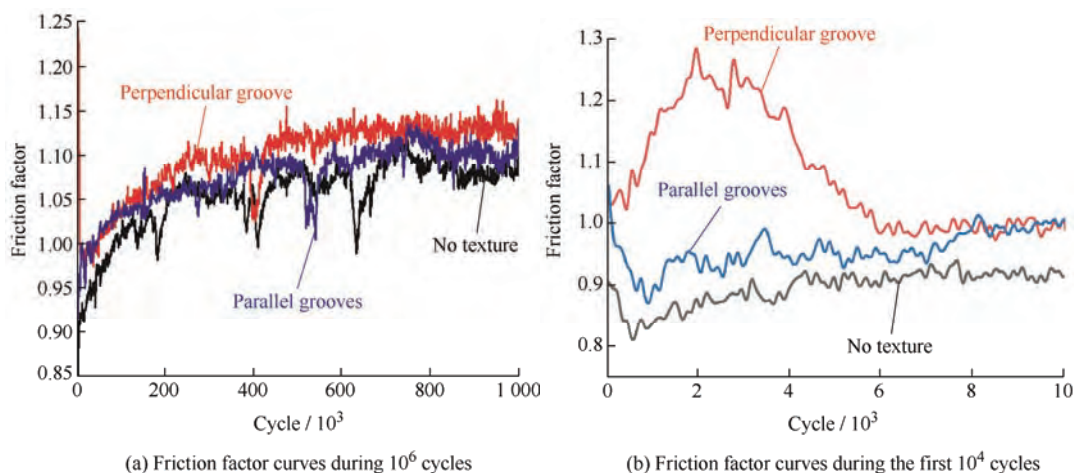


图4 不同样品的摩擦因数变化曲线

Fig. 4 Friction factor curves of different samples

为了更清楚地对比3个样品在磨损前期的摩擦因数,将其前1万周次放大,绘成图4b。结果表明,在

前5000周次,有垂直织构样品的摩擦因数明显最大,其曲线具体表现为先急剧上升、再平稳下降;另外,

有平行织构样品的摩擦因数稍大于无织构的样品, 2 者的曲线都较为稳定。这是因为, 在磨损的前期, 材料的黏着转移严重 (图 5), 磨屑的存在会隔开两直接接触的钛合金面, 进而能在一定程度上避免黏着磨损^[17]。因此, 有表面织构的样品, 由于磨屑易于被排到织构的沟槽中, 所以摩擦因数比无织构的样品大。

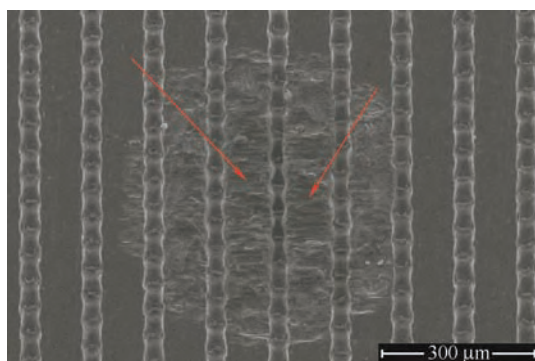


图 5 有垂直织构的样品在经过 2 000 周次微动磨损后的磨损区域扫描电镜的照片

Fig. 5 SEM images of wear scar of samples with perpendicular grooves after fretting wear of 2 000 cycles

然而, 当表面织构垂直于运动方向时, 磨屑极易随着球的运动被挤到织构坑里面 (图 6a), 不能

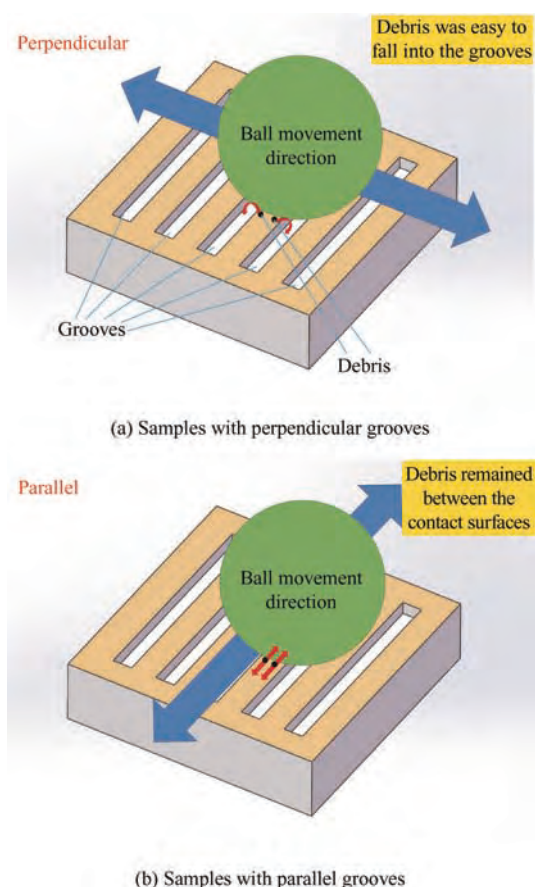


图 6 不同方向织构样品上在磨损初期磨屑的运动趋势
Fig. 6 Movement of debris at the initial wear stage on samples with different groove orientations

实现隔开接触面、降低黏着磨损的效果; 当表面织构平行于运动方向时, 在磨损的初期, 磨屑不太容易被挤到织构坑里面 (图 6b), 在接触面之间能够起到一定的降低黏着磨损的效果。

另外, 从图 4a 中还能发现, 三个样品在磨损达到稳定阶段之后, 其摩擦因数都会出现突降的现象。其中, 无织构的样品摩擦因数出现了 3 次突降, 分别在 17~21 万周次、37~44 万周次、61~68 万周次。有垂直织构的样品和有平行织构的样品的摩擦因数均只出现了 1 次突降的现象, 分别发生在 39~43 万周次 (垂直织构) 和 51~56 万周次 (平行织构)。

2.3 磨损过程

通过观察经过不同周次微动磨损后的磨痕 2 维和 3 维形貌, 并且结合摩擦因数, 可将微动磨损的过程分成不同的阶段。

图 7 和图 8 分别表示有平行方向织构的样品和无织构的样品在不同周次微动磨损后的磨痕二维和三维形貌。根据磨损区域的中部有无材料的黏着涂抹的现象, 可以将整个磨损过程分为两个阶段, 即黏着阶段和稳定阶段。在第一个阶段, 黏着涂抹的材料会由于上试样的运动, 顺着其方向发生材料的转移。而在织构的方向和微动方向平行的情况下 (图 7a), 黏着涂抹的材料转移的方向, 会沿着织构的方向。因此, 这部分涂抹的材料无法覆盖织构坑, 也就无法使各个发生黏着涂抹的区域跨过织构坑、连成一块。

图 9 表示运动方向和织构方向垂直时, 黏着阶段又可被细分为黏着区域分散的阶段和黏着区域成片的阶段。第一阶段, 在 5 000 周次之前, 磨痕中心存在材料的黏着涂抹的现象 (图 9a), 对比摩擦因数的曲线 (图 4b), 可以发现, 这个阶段正好和垂直织构摩擦因数明显较高的阶段完全对应。第二阶段, 随着磨损的继续进行, 中部的黏着区域会由于材料顺着微动方向的流动, 连成一块 (图 9b)。此时, 磨损区域中部新产生的磨屑, 由于没有织构坑的容纳, 便会留在接触面之间, 降低黏着磨损。因此, 中部黏着的区域逐渐缩小 (图 9b), 直至消失。第三阶段, 磨屑的产生和排出达到了平衡, 整个磨损区域越磨越大、越磨越深 (图 9c)。

另外, 表面无织构的样品在磨损达到 20 万周次后, 磨损区域的底部不是太平整, 表现为“坑坑洼洼”的形貌特点 (图 8b)。而对于有表面织构的 2 种样品, 在进行了相同周次的微动磨损之后, 磨损区域的底部并没有出现上述现象, 而是整个区域较为均匀地磨损。这个现象表明, 当有表面织构时, 微动磨损进入稳定阶段后, 其磨损过程要比无织构样品的磨损过程更加

稳定。其实,从摩擦因数的曲线上(图 4a)也能看出,有表面织构的两种样品的摩擦因数在稳定阶段仅有 1

次突降,而无织构样品的摩擦因数在稳定阶段则有 3 次突降,并且后 2 次突降持续的时间较长。

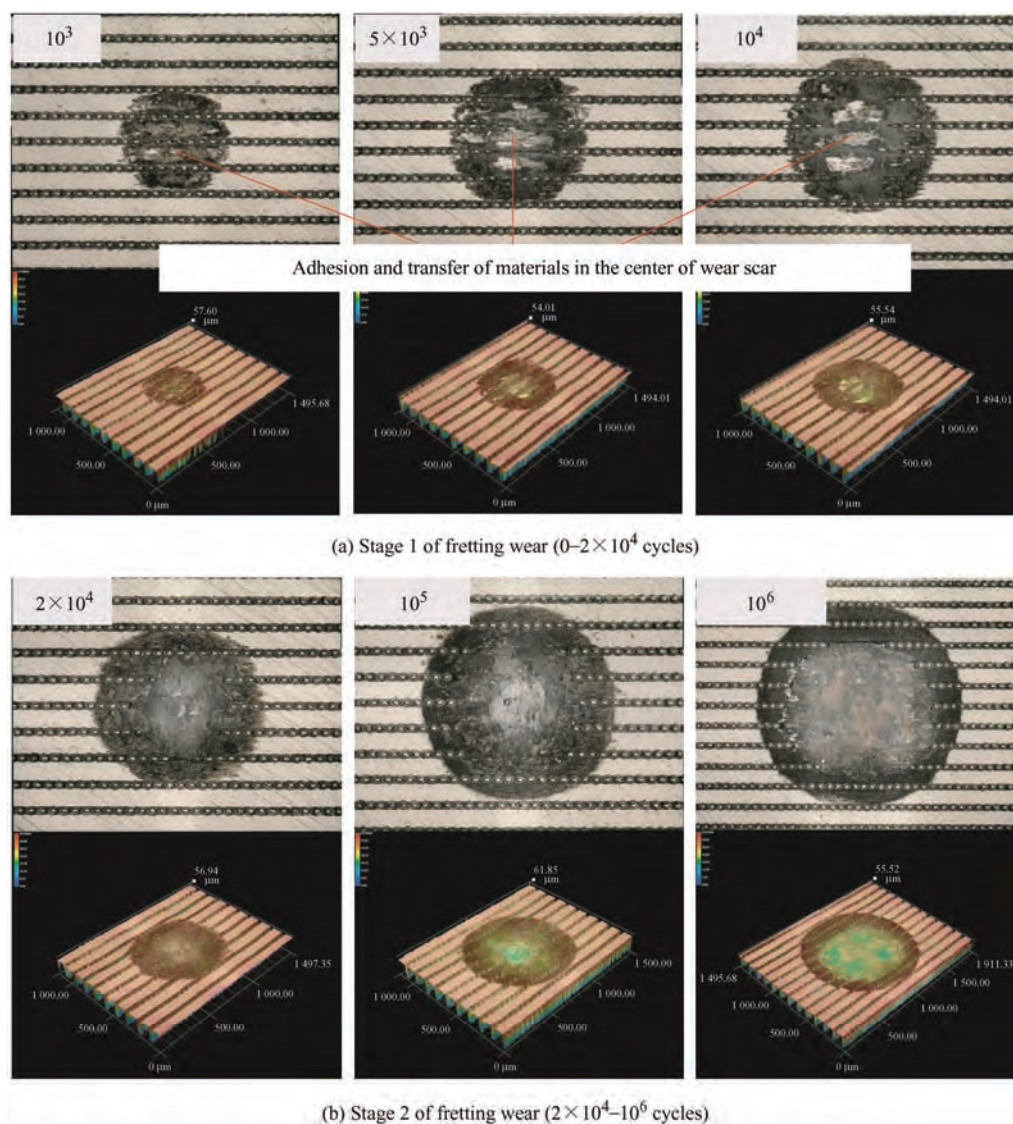
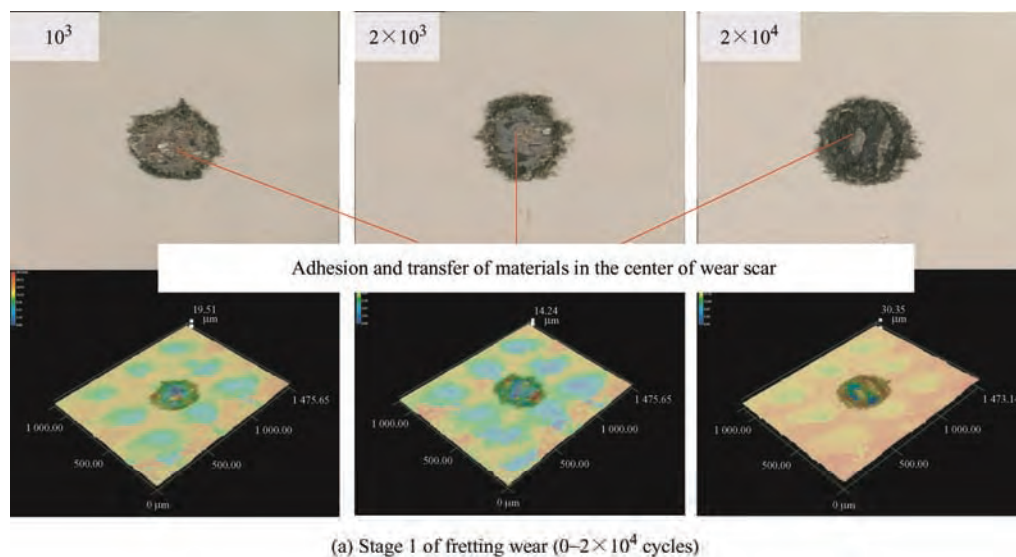


图 7 有平行方向表面织构的样品微动磨损经历的 2 个阶段

Fig. 7 Two stages of fretting wear of samples with parallel grooves



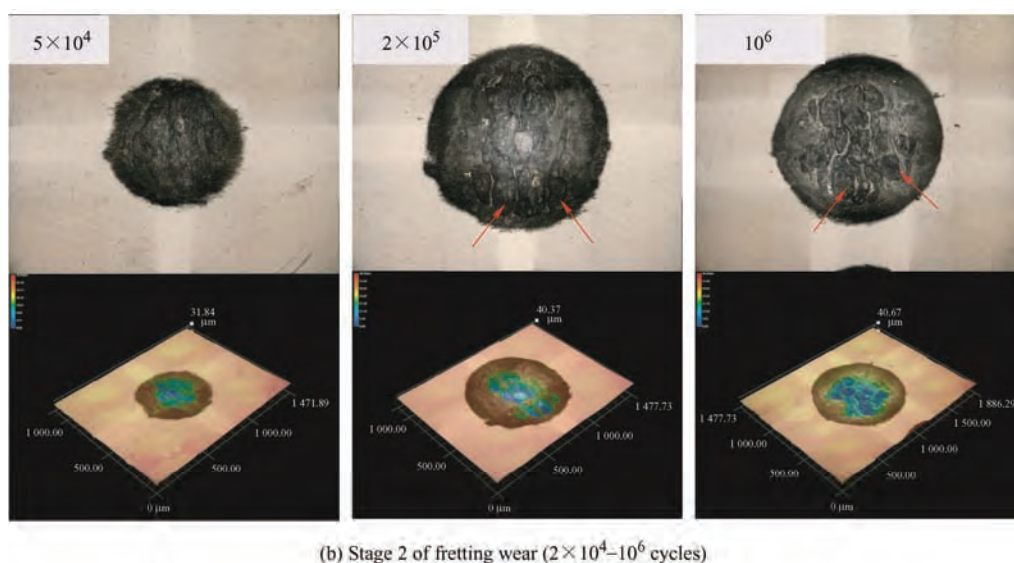
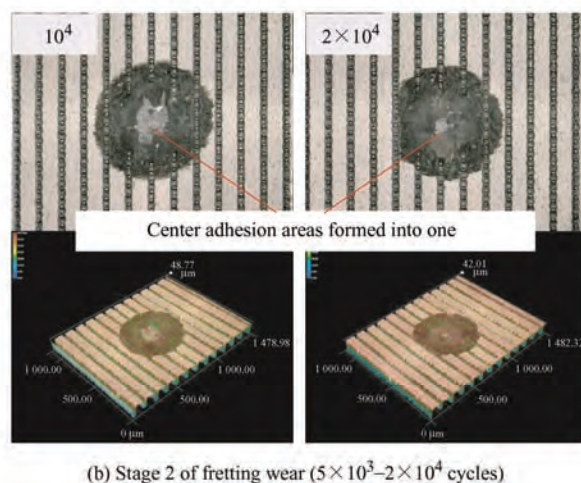
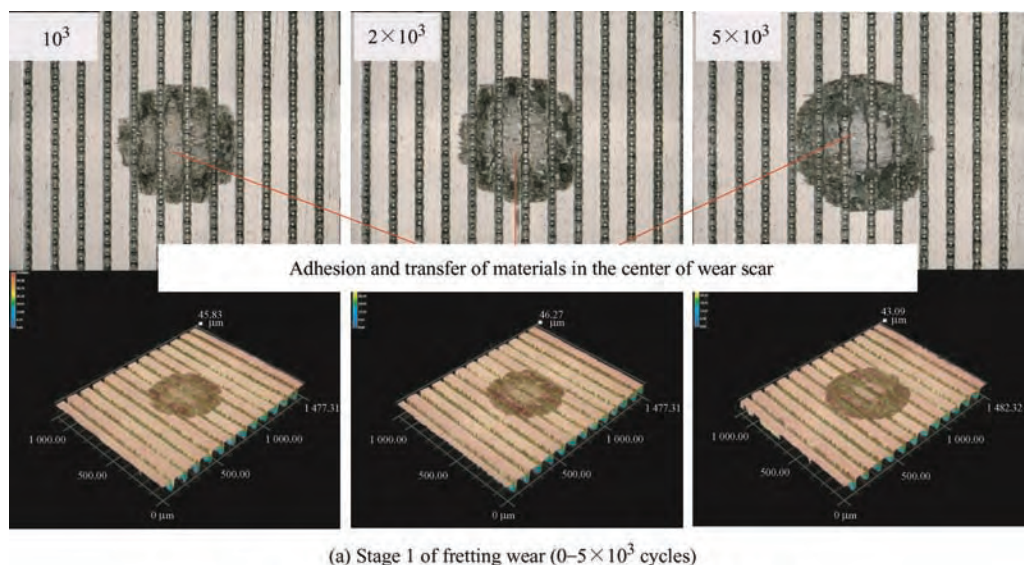


图8 无表面织构的样品微动磨损经历的2个阶段

Fig. 8 Two stages of fretting wear of untextured samples



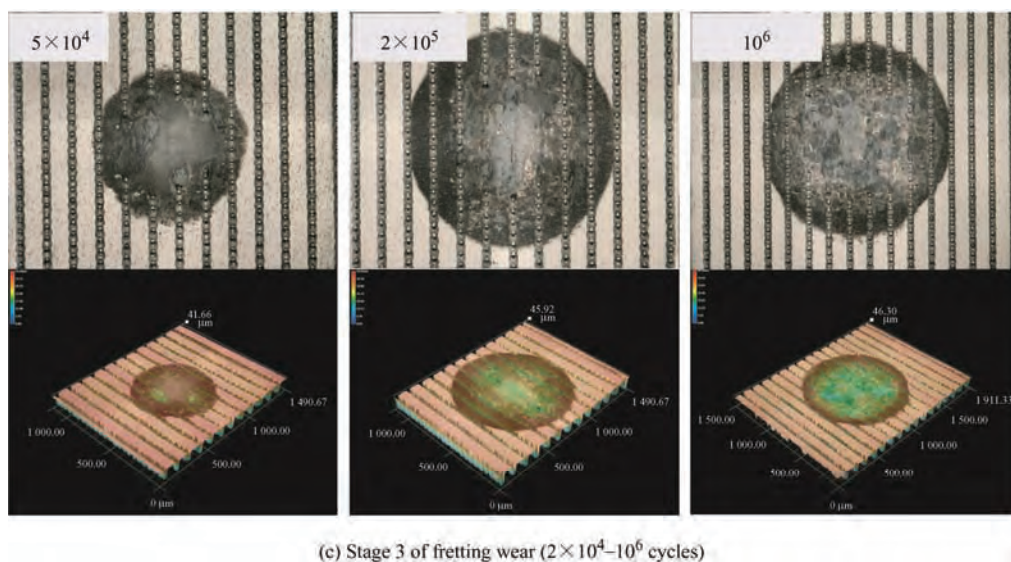


图 9 有垂直方向表面织构的样品微动磨损经历的 3 个阶段

Fig. 9 3 stages of fretting wear of samples with perpendicular grooves

图 10 为球与有垂直方向织构样品磨损后的形貌。由于与球对磨的下试样上存在条状的凹坑（表面织构），球上的磨痕也是很明显的一条一条的。可

以发现，和下试样的磨损过程相同，球的磨损，也经历了 3 个阶段，即黏着涂抹阶段、黏着区域连成一片阶段、稳定磨损阶段。

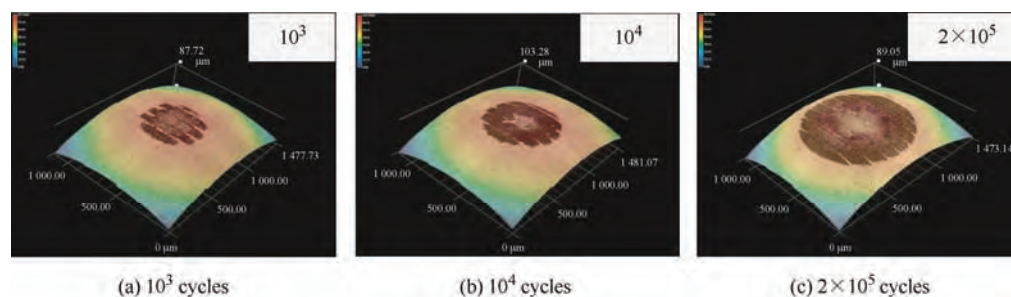


图 10 球在不同周次微动磨损后的 3 维形貌

Fig. 10 3D morphology of the wear scars of ball after different fretting wear cycles

3 讨论

磨损试验结束后，用导电胶从上球试样和下平面试样上粘取磨屑，确保磨屑的分布状态不发生改变，然后放入扫描电镜中观察。图 11 为当织构方向

与微动方向垂直时，进行 20 万周次的微动磨损之后，从球和平面试样上收集的磨屑的扫描电镜照片。可以发现，无论是球试样上还是平面试样上的磨屑，都表现为 A、B 两种形态。其中，A 形态的磨屑非常密实，作为紧实的磨屑层存在于磨损区域的中部；B 形态的磨屑则是细小的颗粒，十分松散，分布在

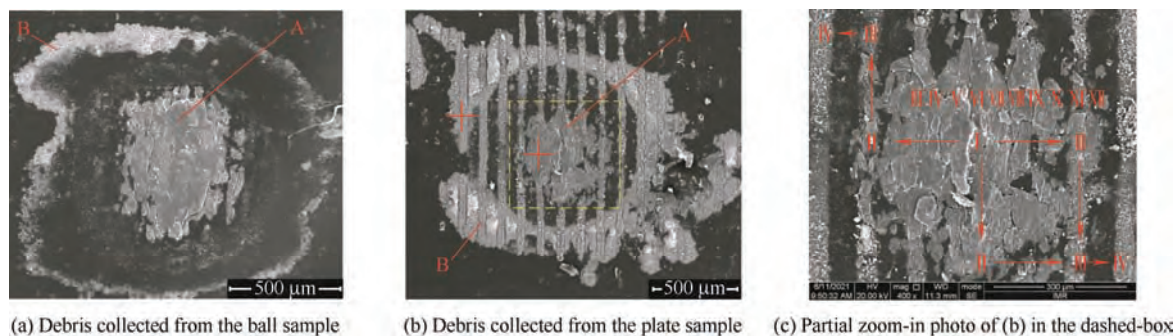


图 11 从球和平面试样上收集的磨屑的扫描电镜照片

Fig. 11 SEM images of debris collected from the ball and the plate samples

磨损区域的外部以及磨损区域内部的织构坑中。在图 11b 中部区域的放大照片 (图 11c) 中还能发现, A 形态的磨屑也不是一个整体, 而是由被分成了很多小块。并且, 中心区域 (I 区) 的块状最大, 越远离磨损区域中心的地方 (I 区——II 区——III 区——IV 区), A 形态磨屑的尺寸越小, 最终转化成 B 形态颗粒状的磨屑。

从 A、B 磨屑能谱的结果上来看, A 磨屑的氧含量为 39.7%, B 磨屑的氧含量为 43.6% (表 3), 说明了磨屑从 A 形态到 B 形态的过程中, 发生了进一步更充分的氧化。也就是说, A 形态的磨屑经过进一步的破碎、研磨、氧化, 逐步被排出到磨损区域之外, 形成了颗粒状的 B 磨屑。

表 3 A、B 区域的元素含量(wt. %)

Table 3 Compositions of debris in area A and B (wt. %)

Element	Ti	O	Al	V
A	Bal.	39.7	3.1	2.8
B	Bal.	43.6	3.4	2.7

其实, 当微动磨损处于稳定阶段之后, 在磨损区域截面由下至上, 会依次形成塑性变形层、摩擦改变的结构 (TTS, Tribologically transformed structure) 层以及磨屑层 (图 12) [2, 25-26]。而随着磨损的进行, 塑性变形层以及 TTS 层逐渐向下发展, 磨屑层则会被逐渐破碎, 被碾成细小的磨屑, 从而随着上试样的往复运动, 被排到磨损区域之外。上述的过程保证了层与层之间始终处于一个动态平衡的过程。

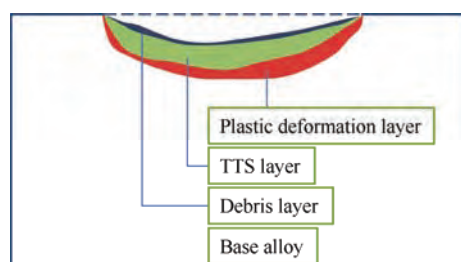


图 12 微动磨损之后磨损区域的截面分层结构示意图 [2, 25]

Fig. 12 Schematic diagram of the cross-section feature of the fretting wear scar [2, 25]

本试验中发现的摩擦因数突降的现象, 可能是由于局部的磨屑层从 TTS 层上突然剥落、然后快速破碎造成的。磨屑层的突然剥落、快速破碎, 会造成接触面之间细小磨屑颗粒的数量迅速增加。根据其他学者的研究 [1], 细小颗粒状磨屑能在接触面之间起到类似于滚珠轴承的效果, 具有较好的减摩作用, 而紧实的磨屑层则没有这个作用。因此, 摩擦

因数会出现突降。紧接着, 随着磨损的进行, TTS 层又转换成磨屑层, 摩擦因数又上升, 并且再次达到稳定。

当样品表面无织构时, 磨损达到稳定阶段之后, 磨损区域的底部极不平整, 形成一块一块不连续的坑 (图 8b)。此时, 一旦某个坑里面出现空隙, 磨屑没能完全填充, 随着上试样的高频往复运动, 附近的某个小片磨屑层就极易从 TTS 层上脱落, 进入到这个空隙中。而当样品表面存在织构时, 根据从下试样上收集的磨屑的分布 (图 11b) 可以看出, 磨屑会非常密实地填入进织构坑中。也就是说, 在有表面织构的情况下, 和 TTS 层连接的磨屑层附近出现空隙的可能性较低, 磨屑层局部脱落的概率也较低。因此, 有织构的样品比无织构的样品摩擦因数突降的次数要少。

4 结论

利用激光制备沟槽状表面织构, 通过进行不同周次的微动磨损试验, 研究了表面织构下钛合金不同周次的微动磨损行为。主要结论如下:

(1) 沟槽的方向对磨损初期的摩擦因数有较明显的影响。由于有垂直织构样品接触面之间的磨屑最少, 材料的黏着现象最严重, 其摩擦因数在前 5 000 周次明显更大。

(2) 磨屑的演变影响微动磨损过程。根据磨屑在微动磨损不同阶段中发挥的作用, 可以将整个磨损过程分为黏着阶段和稳定阶段。

(3) 磨屑的演变是由大块的磨屑层到小块的磨屑, 再到细小的颗粒磨屑, 不断被碾碎、氧化的过程。

研究结果对认识微动磨损行为中不同周次下表面织构的作用及磨屑的演化具有一定理论意义。

参 考 文 献

- [1] FRIDRICI V, FOUVRY S, KAPSA P. Fretting wear behavior of a Cu-Ni-In plasma coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 163: 429-434.
- [2] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
LI Shizhuo, DONG Xianglin. Erosive wear and fretting wear of materials[M]. Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese)
- [3] 周仲荣. 微动磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
ZHOU Zhongrong. Fretting wear[M]. Beijing: Science

- Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 蔡振兵, 朱旻昊. 扭动微动磨损的研究进展和现状[J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 1-11.
- CAI Zhenbin, ZHU Minhao. Research and prospect on the torsional fretting wear [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(4): 1-11. (in Chinese)
- [5] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- ZHOU Zhongrong, ZHU Minhao. Compound fretting wear [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004. (in Chinese)
- [6] ZHU M H, ZHOU Z R. On the mechanisms of various fretting wear modes [J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1378-1388.
- [7] 周仲荣. 关于微动磨损与微动疲劳的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(10): 1146-1150.
- ZHOU Zhongrong. On fretting wear and fretting fatigue [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(10): 1146-1150. (in Chinese)
- [8] WANG J, DUAN D, XUE W, et al. Ti-6Al-4V fretting wear and a quantitative indicator for fretting regime evaluation [J]. Journal of Engineering Tribology, 2021, 235(2): 423-433.
- [9] WANG J, XUE W, GAO S, et al. System deformation behavior of friction pair in fretting wear[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2020, 142(12): 121702-1-121702-8.
- [10] ROSENKRANZ A, COSTA H L, BAYKARA M Z, et al. Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear—A review [J]. Tribology International, 2021, 155, 106792.
- [11] MAO B, SIDDAIAH A, LIAO Y, et al. Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53. 153-173.
- [12] GACHOT C, ROSENKRANZ A, HSU S M, et al. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement [J]. Wear, 2017, 372. 21-41.
- [13] LENART A, PAWLUS P, DZIERWA A, et al. The effect of surface texture on lubricated fretting [J]. Materials, 2020, 13(21): 1-20.
- [14] BOIDI G, GRUETZMACHER P G, KADIRIC A, et al. Fast laser surface texturing of spherical samples to improve the frictional performance of elasto-hydrodynamic lubricated contacts [J]. Friction, 2021, 9(5): 1227-1241.
- [15] WANG J, ZHUANG W, LIANG W, et al. Inorganic nanomaterial lubricant additives for base fluids, to improve tribological performance: Recent developments [J]. Friction, 2022, 10: 645-676.
- [16] WU J, YU A, CHEN Q, et al. Tribological properties of bronze surface with dimple textures fabricated by the indentation method [J]. P I Mech Eng J-J Eng, 2020, 234(10): 1680-1694.
- [17] 王明政, 王成彪, 康嘉杰, 等. 激光表面织构形状参数对钛合金摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 71-77.
- WANG Minzheng, WANG Chengbiao, KANG Jiajie, et al. Effects of shape parameters of laser surface texture on tribological performance of titanium alloy [J]. China Surface Engineering 2017, 30(4): 71-77. (in Chinese)
- [18] WANG Y, LIANG G, LIU S, et al. Coupling fractal model for fretting wear on rough contact surfaces [J]. Journal of Tribology, 2020: 1-32.
- [19] VAREMBERG M, HALPERIN G, ETSION I. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear [J]. Wear, 2002, 252(11-12): 902-910.
- [20] SUH M S, CHAE Y H, KIM S S, et al. Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction [J]. Tribology International, 2010, 43(8): 1508-1517.
- [21] SINGH A, PATEL D S, RAMKUMAR J, et al. Single step laser surface texturing for enhancing contact angle and tribological properties [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5-8): 1253-1267.
- [22] LU W, ZHANG P, LIU X, et al. Influence of surface topography on torsional fretting wear under flat-on-flat contact [J]. Tribology International, 2017, 109(3): 67-72.
- [23] WANG J, XUE W, GAO S, et al. Effect of groove surface texture on the fretting wear of Ti-6Al-4V alloy [J/OL]. Wear, 2021[2022-04-06]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164821004658?via%3Dihub>. Doi: 10.1016/j.wear.2021. 204079.
- [24] 王剑飞, 薛伟海, 高祺洋, 等. 磨屑对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响[J / OL]. 摩擦学学报, 2021

- [2022-04-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1095.O4.20211115.2029.006.html>. Doi: 10.16078/j.tribology.20211194.
- WANG Jianfei, XUE Weihai, GAO Siyang, et al. Effect of debris on fretting wear behavior of Ti-6Al-4V alloy[J / OL]. Tribology, 2021[2022-04-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1095.O4.20211115.2029.006.html>. Doi: 10.16078/j.tribology. 20211194. (in Chinese)
- [25] ZHOU Z R, SAUGER E, LIU J J, et al. Nucleation and early growth of tribologically transformed structure (TTS) induced by fretting [J]. Wear, 1997, 212(1): 50-58.
- [26] FAYEULLE S, BLANCHARD P, VINCENT L. Fretting behavior of titanium alloys [J]. Tribology Transactions, 1993, 36(2): 267-75.
-
- 作者简介: 王剑飞, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为钛合金的微动磨损。
E-mail: jfwang17s@imr.ac.cn
- 薛伟海 (通信作者), 男, 1985 年出生, 副研究员。主要研究方向为特殊工况材料摩擦学。
E-mail: whxue@imr.ac.cn