

DOI:10.11918/202207079

# TC4 钛合金表面微织构干摩擦特性

殷唯<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 位博宇<sup>1</sup>, 李东山<sup>1,2</sup>, 孔宁<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 固体润滑国家重点实验室(中国科学院兰州化学物理研究所), 兰州 730000)

**摘要:** 为改善 TC4 钛合金表面摩擦学性能, 采用皮秒紫外激光技术在 TC4 钛合金表面加工了 3 种形状的微织构。使用多功能摩擦磨损试验机研究了织构化 TC4 钛合金在多接触条件下的摩擦学特性, 并采用显微硬度仪、扫描电镜、激光共聚焦显微镜对织构化 TC4 钛合金的表面硬度、表面粗糙度、磨痕三维轮廓和磨痕形貌等进行分析。结果表明, 织构化 TC4 表面硬度提升约 60%, 其中三角形凹坑织构表面综合硬度最高; 微织构能有效降低 TC4 表面接触过程的摩擦系数, 其中圆形与矩形织构摩擦系数最低, 较无织构表面减少约 10%; 微织构能捕获磨屑, 减少磨粒磨损, 提高耐磨性能, 相同接触条件下, 织构化试样磨损量减少了 50%; 当载荷一定时, 速度增加可使织构化 TC4 表面摩擦系数降低; 当摩擦速度一定时, 载荷降低可导致织构化 TC4 表面摩擦系数降低。本研究可为提升钛合金表面摩擦学性能提供研究思路, 减少钛合金因摩擦磨损造成的损失与事故。

**关键词:** TC4 钛合金; 皮秒激光加工; 微织构; 摩擦学特性; 耐磨性

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)04-0130-08

## Surface dry tribological properties of TC4 titanium alloy with micro texture

YIN Wei<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, WEI Boyu<sup>1</sup>, LI Dongshan<sup>1,2</sup>, KONG Ning<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication (Lanzhou Institute of Chemicals Physics, Chinese Academy of Sciences), Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** To improve the surface tribological properties of TC4 titanium alloy, three kinds of micro textures have been processed on the surface of TC4 titanium alloy by picosecond ultraviolet laser technology. The tribological properties of the textured TC4 titanium alloy under multi-contact conditions were investigated by multifunctional friction and wear testing machine. The surface hardness, surface roughness, three-dimensional profile and morphology of wear marks of textured TC4 titanium alloy were analyzed by microhardness tester, scanning electron microscope and laser confocal microscope. The results reveal that the surface hardness of textured TC4 surface increases by about 60%, and the triangular textured surface shows the highest hardness. Micro texture effectively reduces the friction coefficient of the TC4 surface. The circular and rectangular textured surfaces indicate the lowest friction coefficient, about 10% lower than that of non-textured surface. Capable of capturing the wear debris, the micro texture can reduce abrasive wear and improve wear resistance. Under the same contact conditions, the wear volume of textured samples is reduced by about 50% compared with no-textured surface. When the load is constant, the friction coefficient of textured TC4 surface decreases with the increase of velocity. Under the same wear speed, the lower load leads to a decrease of friction coefficient on the textured TC4 surface. This study presents an effective way to improve the tribological properties of titanium alloy, providing an alternative way to reduce the loss and failure caused by the friction and wear on titanium alloy.

**Keywords:** TC4 titanium alloy; picosecond laser processing; micro texture; tribological characteristics; wear resistance

在航天工程应用中, TC4 钛合金由于其良好的综合力学性能、优良的耐腐蚀性、耐高温以及低密度等已被广泛应用于航天运动机构, 但由于其本身硬度低, 耐磨性能较差<sup>[1-2]</sup>, 且容易因疲劳脱层、磨粒磨损而造成损伤<sup>[3]</sup>, 钛合金的摩擦磨损也成为航天

运动机构失效的主要原因之一<sup>[4-5]</sup>

目前表面织构技术已成为改善材料表面摩擦学性能的主要方法之一<sup>[6-7]</sup>。织构技术是由仿生技术渐渐发展而来<sup>[8-9]</sup>, 表面织构技术可以利用激光技术加工、电火花加工、微铣削加工、光刻法加工、电解

收稿日期: 2022-07-17; 录用日期: 2022-09-19; 网络首发日期: 2023-03-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230313.0833.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51605026)

作者简介: 殷唯(1997—), 男, 硕士研究生; 张杰(1960—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 孔宁, kongning@ustb.edu.cn

加工、压印加工、磨料射流加工等手段均能在材料表面实现微观造型,其中激光加工技术具有能量密度高、可控性好、速度快、精度高的优点,在生产实践和科学研究中得到了广泛应用。此外不同形式的织构具有不同的摩擦特性<sup>[10-11]</sup>,还可与涂层相结合能实现结构超润滑性<sup>[12]</sup>。经研究表明,凹坑微织构具有储存润滑油并二次释放、储存磨粒,减少磨粒磨损以及产生动压效应,进而形成动压润滑的效果<sup>[13-16]</sup>。尹明虎等<sup>[17]</sup>采用基于 N-S 方程的计算流体力学 (CFD) 技术对含微织构的滑动轴承模型进行仿真,发现当微织构布置在滑动轴承主要承载区时,可提高滑动轴承的承载能力,降低润滑油流量和摩擦系数。陈进等<sup>[18]</sup>研究了凹坑织构对 4Cr13 不锈钢的摩擦学性能,结果表明无论是在干摩擦条件还是盐水条件下微织构均能减少摩擦系数。Qin 等<sup>[19]</sup>研究了钴-铬-钼合金上不同形状凹坑织构的摩擦性能,发现圆形凹坑织构具有最稳定的湿润性以及更好的耐磨性能。Andersson 等<sup>[20]</sup>使用激光在钢表面制备了圆形凹坑微织构,并进行了摩擦磨损试验,研究结果表明钢表面的微织构显著降低了其表面摩擦系数以及摩擦磨损的发生。唐志成等<sup>[21]</sup>研究了组合型微织构对铝合金表面摩擦学性能影响,结果表明组合型织构具有较低的摩擦系数。华希俊等<sup>[22]</sup>研究了织构化固体润滑的摩擦学性能,结果表明织

构能进一步改善涂层的润滑性能。

表面微织构技术已表现出了巨大的减磨应用潜力,可成为目前钛合金表面改性,如化学热处理、气相沉积、静电冷却技术<sup>[23]</sup>的替代方案。同时微织构在不同材料表面摩擦学特性研究,如织构深度、尺寸、形式等对摩擦性能的影响,已在钢铁等材料开展研究,但基于航天接触条件在 TC4 表面制备不同形状的凹坑织构,并在不同接触条件下研究凹坑微织构对摩擦性能的影响还未形成系统研究,具有广泛的应用前景。本文以 TC4 钛合金为研究对象,基于皮秒激光技术在其表面进行了不同形状的微织构加工。将试样在不同的接触条件下进行了摩擦磨损试验,并采用电镜、激光共聚焦显微镜等设备研究微织构形状以及接触条件对表面形貌、粗糙度、磨损量的影响,并在此基础上分析其摩擦学特性。本研究工作可对航天钛合金接触界面延长服役寿命提供理论与应用指导。

## 1 试验材料和方法

研究所采用的基体材料为 TC4 钛合金板,其化学成分组成见表 1 所示,力学性能见表 2。在激光加工之前,先利用线切割将合金板切割成尺寸为 20 mm × 20 mm × 5 mm 的试样,并做表面均一化处理。

表 1 TC4 合金化学组成成分表

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

元素	钛 (Ti)	铁 (Fe)	碳 (C)	氮 (N)	氢 (H)	氧 (O)	铝 (Al)	钒 (V)
质量分数	余量	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.2	5.5~6.8	3.5~4.5

表 2 TC4 合金性能指标

Tab.2 Performance index of TC4 titanium alloy

硬度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
2 891	895	110	860	0.34	4.51

### 1.1 表面微织构加工

在激光加工前,分别用 400#、800#以及 1 200#的砂纸逐级打磨,再将试样放入无水乙醇中进行 20 min 的超声波清洗。使用武汉元禄光电技术有限公司的皮秒紫外激光加工系统对试件进行微织构加工,激光波长 355 nm,脉宽 15 ps,功率 15 W,频率 200 kHz,扫描速度 500 m/s。为了降低织构面密度对微织构的摩擦学特性产生影响,3 种微织构尺寸的选取兼顾织构面密度的一致性和加工时尺寸的标注及传递。通过皮秒紫外激光制备了织构间距为 200 μm,直径 90 μm 的圆形、边长为 80 μm 的矩形

以及边长为 120 μm 的三角形织构,平均加工深度为 40 μm,3 种微织构的织构面密度基本一致,分别为 15.9%、16.0% 和 15.6%。

### 1.2 性能测试与表征

使用奥林巴斯 OLS4000 激光共聚焦显微镜对微织构以及磨痕三维形貌进行表征并对不同试样表面粗糙度进行测量;使用 FEI Quanta 650FEG 扫描电镜对表面磨痕形貌进行观察;采用 EM-1500L 显微硬度仪对织构凹坑附近硬度进行测量标定;使用 NANOVEA T50 Tribometer 多功能摩擦磨损机,分析不同接触条件对摩擦系数的影响。试验采用直线往

复式的球-盘摩擦副,摩擦偶件为  $\Phi 6$  mm 的 304 不锈钢球。试验环境为 25  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 40%。试验参数见表 3,每组试验做 3 次。

表 3 摩擦试验参数

Tab. 3 Tribological test parameters

工况	载荷/ N	滑动速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	滑动行程/ mm	周期	时长/ min
1	4	20	10	900	15
2	4	10	10	900	30
3	3	10	10	900	30

## 2 微织构表面形貌及性能验证

### 2.1 微织构表面形貌

图 1 为采用光学显微镜和激光共聚焦显微镜观测的在 TC4 表面加工的圆形、矩形以及三角形微织构的微观表面形貌及三维形貌。可以看到,微织构按照设计阵列依次排列,试样表面形成了排列规则的凹坑微织构,间距与尺寸符合设计要求,整体加工效果良好。但由于激光脉冲热效应等原因,在微织构周围形成火山状的熔融物,如图 1 中微小凸起区域所示。

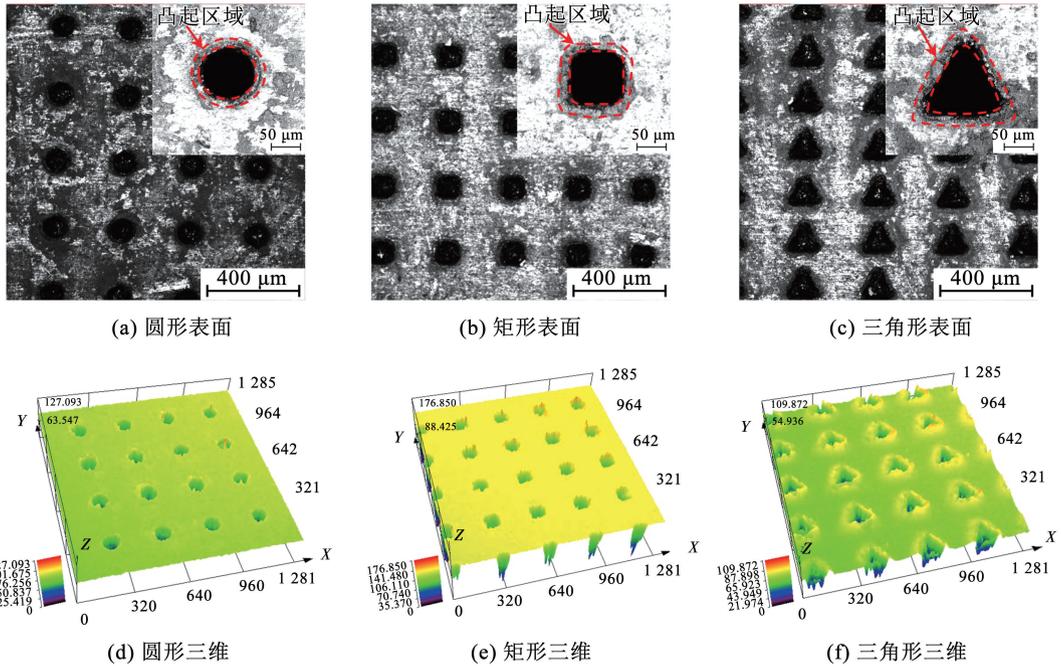


图 1 凹坑微织构形貌

Fig. 1 Micro texture morphology

### 2.2 微织构试样表面粗糙度

图 2 所示为不同形状表面织构的粗糙度,其中预处理表面为 1 200#砂纸打磨后试样,可以看出激光加工后的基体表面粗糙度由原来 0.589  $\mu\text{m}$  上升到 2.673  $\mu\text{m}$  以上。矩形微织构与圆形微织构粗糙约为 2.600  $\mu\text{m}$ ,而三角形微织构表面粗糙度最大为 3.253  $\mu\text{m}$ 。

### 2.3 试样表面显微硬度

在未进行微织构加工的光滑表面选取 5 个点进行显微硬度测量,评价带织构表面的力学性能。在不同形状微织构表面选取边缘附近任意单个微织构进行硬度测量,在距离微织构凹坑边缘每隔 50  $\mu\text{m}$ 处测量一次显微硬度。硬度测量时载荷为 0.05 kg,保载时间 15 s,如图 3 所示。

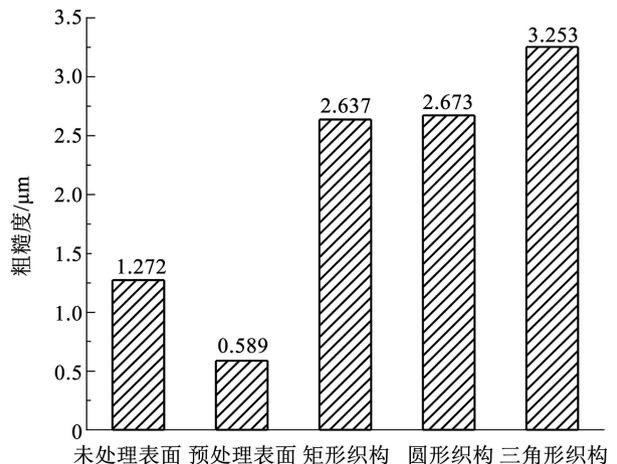


图 2 不同试样表面粗糙度

Fig. 2 Surface roughness on various samples

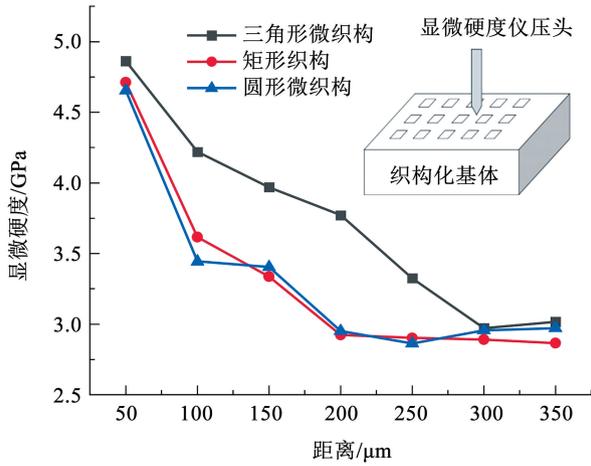


图 3 不同形状微织构凹坑附近表面显微硬度

Fig. 3 Surface micro-hardness near micro texture pits with different shapes

试样光滑表面的平均显微硬度为 2.89 GPa, 三角形织构凹坑边缘附近硬度最高为 4.86 GPa 比光滑表面硬度高约 68.14%; 矩形织构凹坑边缘附近硬度为 4.71 GPa, 比光滑表面硬度高约 63.02%; 圆形织构凹坑边缘附近硬度为 4.66 GPa, 比光滑表

面硬度高约 61.27%。说明织构化能有效提高材料表面硬度, 增加其耐磨性, 这是因为激光加工时激光束带有极大的能量, 会使得加工区域温度迅速升高又快速自冷导致相变硬化。随着凹坑边缘距离增加, 材料表面硬度越低直至恢复到 TC4 基体硬度, 这是由于激光束能量集中, 热影响区域小, 而三角形织构附近硬度最大且下降趋势小则是由于相同面积下三角形织构加工时间最长, 热影响区域最大。

### 3 微织构形状与接触条件对摩擦系数的影响

图 4 为不同接触条件下无织构试样与微织构试样摩擦系数随摩擦周期变化的曲线图以及对应的平均摩擦系数。可以看出, 无论是无织构还是有微织构基体表面在初始的跑合磨损阶段摩擦系数都较大, 随着摩擦进入稳定磨损阶段, 摩擦系数总体呈下降趋势后趋于稳定。TC4 钛合金自身耐磨性能差, 因此随着摩擦过程继续进行, 其磨损加剧, 摩擦系数呈现一定的上升趋势, 间接反映了表面接触状态的恶化。

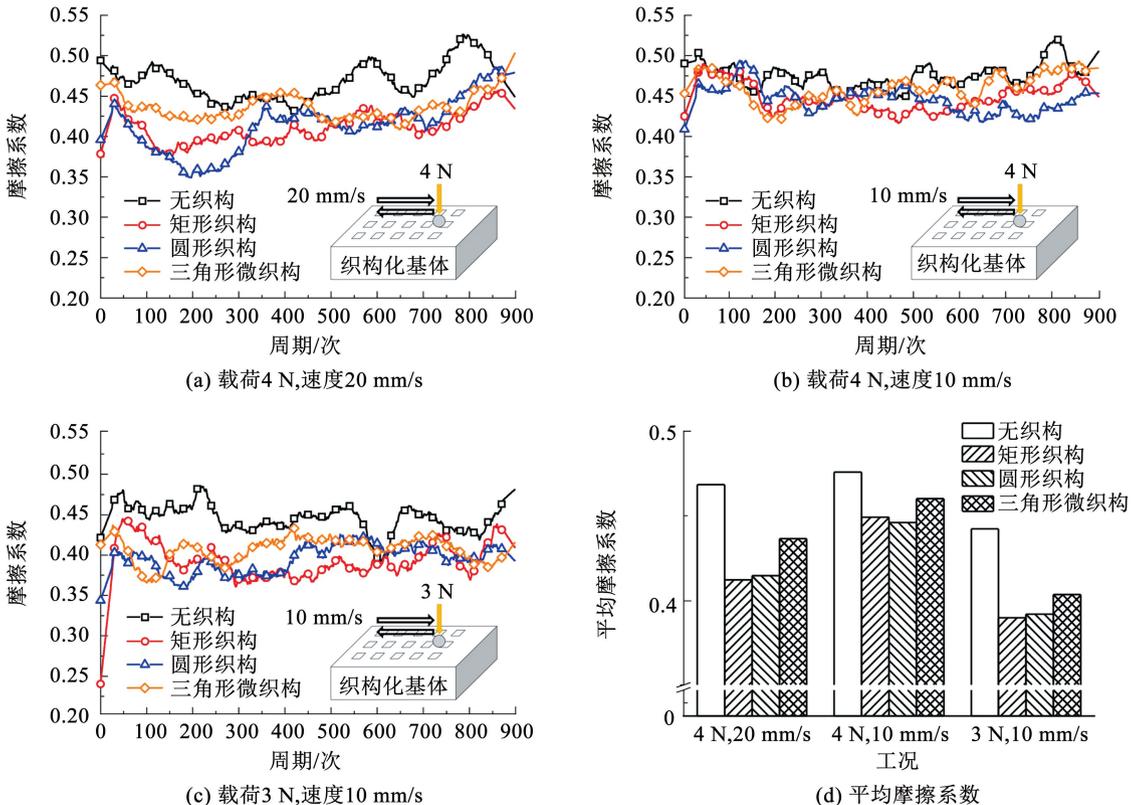


图 4 不同接触条件下无织构与织构化表面摩擦系数随时间变化曲线以及平均摩擦系数

Fig. 4 Time varying curves and average friction coefficients of non-textured and textured surfaces under different contact conditions

如图 4(d) 所示, 不同接触条件下织构化基体表面摩擦系数均小于无织构表面。在载荷为 4 N 及摩擦速度为 20 mm/s 条件下, 无织构表面平均摩擦系数为 0.468 4, 矩形、圆形以及三角形平均摩擦系数

分别为 0.412 2、0.414 5、0.436 5, 相较于无织构表面分别下降了约 12.00%、11.51%、6.18%。在载荷为 4 N, 摩擦速度降为 10 mm/s 条件下, 无织构表面平均摩擦系数为 0.475 7, 而矩形、圆形以及三角

形平均摩擦系数分别为 0.449 2、0.446 0、0.460 1，相较于无织构表面分别下降了约 5.57%、6.24%、3.28%；在载荷为 3 N 及摩擦速度为 10 mm/s 条件下，无织构表面平均摩擦系数为 0.442 2，矩形、圆形以及三角形平均摩擦系数分别为 0.389 7、0.391 7、0.403 4，相较于无织构表面分别下降了约 11.97%、11.42%、8.77%。从上述结果来看，矩形与圆形凹坑织构都具有较好的减摩效果，而三角形织构减摩效果与二者相比较弱。在干摩擦下表面微织构能够储存摩擦副表面的磨粒和磨屑，减少三体摩擦的产生从而降低摩擦。同时表面微织构能有效减少摩擦副间的实际接触面积，减少固体间的直接接触，进而起到降低摩擦和减小磨损的作用<sup>[24]</sup>。三角形织构减摩效果弱于矩形与圆形的原因可能在于其取向效应和自身的磨损，本文摩擦试验中对磨球滑动方向垂直于三角形织构的底边，底边附近织构的宽度较其他两种类型织构更宽，织构宽深比的改变在一定程度上会对织构的减摩效果造成影响<sup>[17]</sup>。在流体润滑的摩擦形式下，三角形织构的取向会显著影响油膜的动压效应<sup>[25]</sup>，而在干摩擦中，三角形织构由于取向效应及其在往复运动过程中接触非对称引起其对磨屑捕获能力的变化也可能是影响其减摩效果的原因之一。此外，与圆形和矩形织构相比，三角形织构存在更为尖锐边缘，会引起应力分布加剧进而导致织构的磨损<sup>[26-27]</sup>，因此三角形织构的减摩效果弱于其他两种织构。在相同载荷下，摩擦速度越快织构化基体摩擦系数越小；相同速度下，载荷越小微织构接触界面摩擦系数越小。在低载高速接触条件下，微织构的变形较小，更容易捕获磨屑，因此使用寿命更长。

### 4 耐磨性能分析

对摩擦试验后的试样进行超声波乙醇清洗，以此去除表面磨屑后，对 4 N 及 20 mm/s 接触条件下不同试样的磨痕表面进行三维形貌表征，并测量计算磨痕横截面积。如图 5 所示，可以发现无织构表面磨痕的平均深度显著大于织构化表面。图 5(e) 为磨痕横截面积情况统计，可以发现织构化试样磨损量远低于无织构试样。矩形微织构的磨损截面积相较于无织构表面降低了约 50.97%，圆形微织构的磨痕截面积降低了 49.54%，而三角形织构磨损界面面积降低了 52.18%。对于表面无织构 TC4 钛合金，较硬的对磨球会对硬度较低的钛合金表面进行犁削，并撕裂基体发生材料剥落，由于剥落的材料不易被排除，在对磨副之间形成三体磨粒磨损，进一步加剧钛合金基体表面的磨损。对于表面织构化的 TC4 钛合金，从图 3 能够看出微织构附近具有更高的表面显微硬度，表明通过激光加工技术对 TC4 钛合金进行表面织构化处理，能够提高材料的表面硬度，进而提升材料承载能力、降低表面磨损。此外，在磨损过程中，微织构周围较硬微凸体因磨损脱落，同时由于摩擦能量耗散所产生的局部高温环境会促进了金属氧化物颗粒的形成<sup>[28-29]</sup>，上述硬度较高的磨粒会被微织构捕获，逐步充满微织构并被压实，进一步增强了基体的表面硬度，显著降低了基体磨损和磨痕截面积。上述现象表明织构化表面能提高 TC4 钛合金的耐磨性能，降低基体的磨痕截面积。而同工况下三角形微织构表现出更好的耐磨性能，这与图 3 中三角形微织构较高的表面显微硬度相对应。

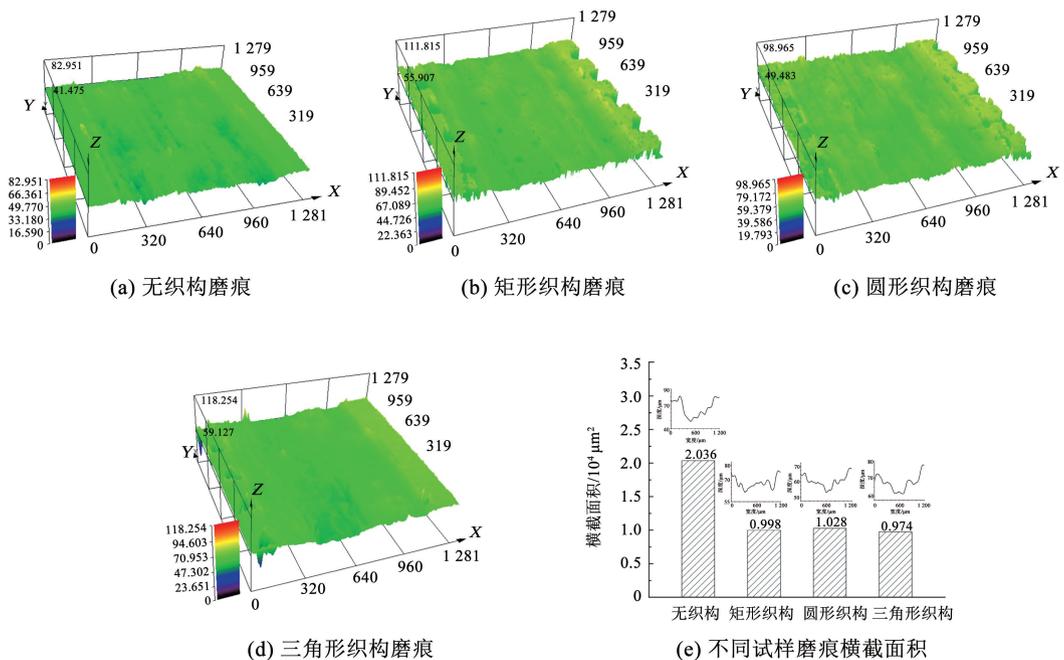


图 5 不同试样磨痕的三维形貌与磨痕横截面积 (4 N, 20 mm/s)

Fig. 5 Three-dimensional morphology and cross-sectional area of wear marks of samples with different micro textures (4 N, 20 mm/s)

为了比较不同接触条件对织构磨损截面积的影响,对3种接触条件下的矩形织构磨痕进行观察与测量,得到图6所示的三维形貌与磨痕横截面积。可以看出,接触条件的改变对织构化试样的磨损量具有显著影响。在相同摩擦行程下,当摩擦速度从20 mm/s降低至10 mm/s时,磨损量增加了13.26%,从磨痕三维形貌能够看出,摩擦速度为20 mm/s时,更多的硬质凸起参与磨损,磨痕深度较浅、磨痕宽度较宽;而摩擦速度为10 mm/s时,磨痕宽度变窄,磨痕深度加大,磨损量也随之增大。当载荷从4 N降低至3 N时,织构磨损量降低了39.07%。表明接触条件会显著影响织构的变形与磨损,减低微织构在摩擦中起到的减摩作用。在高速低载下,微织构的变形较小,能更有效的起到捕获磨屑进而减少摩擦磨损的作用,减摩耐磨效果更好,该结果也验证了前述分析中不同接触条件对摩擦系数影响的分析结果。

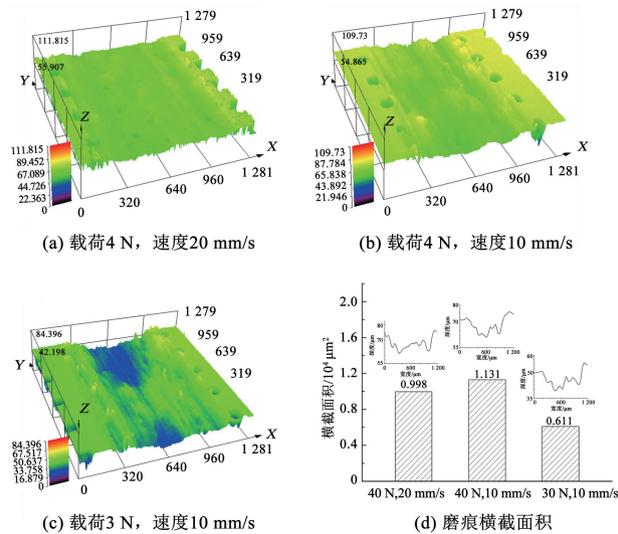


图6 不同摩擦速度与载荷下矩形微织构磨痕的三维形貌与横截面积

Fig. 6 Three-dimensional morphology and cross-sectional area of rectangular textured wear marks under different friction speeds and loads

### 5 磨痕形貌分析

为了比较织构形状对摩擦的影响,选取4 N及摩擦速度为20 mm/s条件下不同试样表面磨痕进行对比观察,如图7所示。由图7(a)可以看出,无织构表面磨损最为严重,存在大量的基体脱落以及沿摩擦方向的犁沟状磨痕,磨损形态表现为严重黏着磨损及磨粒磨损。图7(b)~图7(d)中,织构化表面主要存在沿摩擦方向的犁沟状磨痕,磨粒磨损程度表现较轻,且部分微织构因摩擦而导致磨损变形,使织构接触面积减少甚至完全被覆盖。

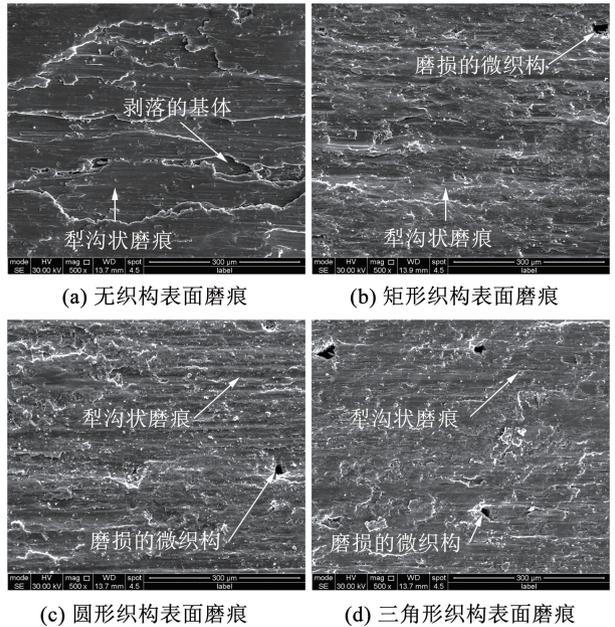


图7 不同微织构试样表面磨痕的SEM图(4 N, 20 mm/s)  
Fig. 7 SEM images of wear marks on the surface of samples with different micro textures (4 N, 20 mm/s)

图8所示为矩形织构的磨痕区域横截面形貌,可以发现微织构明显的被磨屑填满或因变形导致闭合,且填充与闭合程度不同。部分微织构凹坑已被掉落的磨损颗粒填满,而有的凹坑仅有少量填充,仍具有继续填充磨损颗粒的效果。上述现象与图4中稳定磨损阶段摩擦系数波动较小相对应,在摩擦初期由于对磨球与试样表面较硬微凸体之间的真实接触面积小,所受应力大,磨损比较剧烈。随着磨损时间的增加,试样表面较硬的微凸体逐渐被磨平并被微织构捕获,对磨球与试样表面的真实接触面积增大,减小了表面接触应力,使得磨损较为平稳<sup>[29]</sup>。在这个稳定磨损的过程中,未被磨屑充满的织构占比虽然下降,但磨屑的形成和微织构对磨屑的捕获处于动态平衡的状态,对摩擦系数的影响较为有限。因此,可通过试验观察发现微织构具有良好的捕获磨屑能力,从而降低由于磨粒引起的三体或多体磨损,进而起到降低摩擦系数以及减小磨损量的效果。

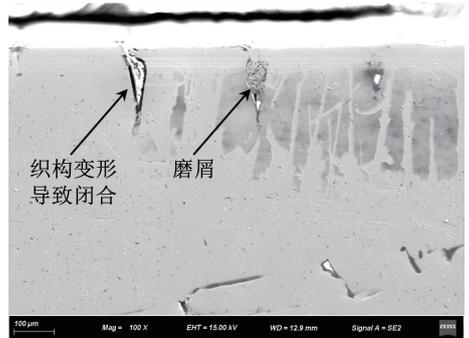


图8 矩形织构磨痕区域横截面的SEM图  
Fig. 8 SEM image of cross section of rectangular textured wear mark area

## 6 结 论

1) 通过激光加工技术对 TC4 钛合金进行表面织构化处理虽会增大材料表面粗糙度, 但激光加工的高能量会使 TC4 钛合金加工区域发生相变硬化, 增加材料表面硬度, 提升材料承载能力, 降低材料表面摩擦磨损。

2) TC4 钛合金表面织构化处理能够提高 TC4 钛合金基材的减摩和耐磨特性, 在干摩擦下表面微织构能够储存摩擦副表面的磨粒和磨屑, 减少三体摩擦的产生从而降低摩擦, 同时表面微织构能有效减少摩擦副间的实际接触面积, 减少固体间的直接接触, 进而起到降低摩擦和减小磨损的作用。由于自身取向效应、结构特点以及往复摩擦过程的接触不对称等因素, 三角形织构的减摩效果弱于矩形与圆形。

3) 微织构能有效增加 TC4 钛合金的耐磨性能, 与无织构相比, 织构化基体表面在相同的接触条件下磨损截面积降低了 50% 以上。微织构凹坑在摩擦过程中由于被磨屑填满或因变形导致闭合, 避免了接触界面因磨粒增加导致的接触条件恶化, 进而达到了降低摩擦磨损、提升表面质量的效果。与圆形和矩形织构相比, 激光加工的三角形织构具有更高的表面显微硬度, 在同工况下三角形微织构表现出更好的耐磨性能。此外接触条件的改变对织构化试样的磨损量具有显著影响, 在高速低载条件下, 微织构的变形较小, 能更有效的起到捕获磨屑进而减少摩擦磨损的作用, 减摩耐磨效果更好。

## 参 考 文 献

- [1] ANANTH M P, RAMESH R. Sliding wear characteristics of solid lubricant coating on titanium alloy surface modified by laser texturing and ternary hard coatings [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(4): 839. DOI: 10.1016/S1003-6326(17)60096-7
- [2] LAO Xingsheng, ZHAO Xufeng, LIU Yong, et al. Study on the friction characteristics of plasma spray modified layer on titanium alloy in artificial sea water environment [J]. Materials Science Forum, 2020, 990: 73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.990.73
- [3] 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  
SONG Wei, SUN Lu, JING Pengfei, et al. Fretting wear characteristics of TC4 alloy in distilled water [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 328. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.02.011
- [4] PROZHEGA M, ALBAGACHIEV A Y, SMIRNOV N I, et al. Lubricating materials for mechanisms operating in space [J]. Journal of Friction and Wear, 2018, 39(4): 335. DOI: 10.3103/S106836661804013X
- [5] JANSEN M J, JR JONES W R, Pepper S V. Evaluation of an in-situ liquid lubrication system for space mechanisms using a vacuum spiral orbit tribometer [J]. Tribology Letters, 2003, 14(2): 61. DOI: 10.1023/A:1021791817718
- [6] 高贵, 龚俊, 李瑞红, 等. 表面织构对 PTFE 复合材料摩擦磨损行为的影响 [J]. 摩擦学学报, 2020, 40(6): 697  
GAO Gui, GONG Jun, LI Ruihong, et al. Effect of surface texture on friction and wear behavior of PTFE composites [J]. Tribology, 2020, 40(6): 697. DOI: 10.16078/j.tribology.2020030
- [7] 林乃明, 谢瑞珍, 邹娟娟, 等. 表面织构改善钛合金摩擦学性能的研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(8): 2592  
LIN Naiming, XIE Ruizhen, ZOU Jiaojuan, et al. Research progress on surface texture for improving tribological properties of titanium alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(8): 2592
- [8] LU Yan, HUA Meng, LIU Zuomin. The biomimetic shark skin optimization design method for improving lubrication effect of engineering surface [J]. Journal of Tribology, 2014, 136(3): 031703. DOI: 10.1115/1.4026972
- [9] LIU Ning, WANG Jianzhang, CHEN Beibei, et al. Tribochemical aspects of silicon nitride ceramic sliding against stainless steel under the lubrication of seawater [J]. Tribology International, 2013, 61: 205. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.01.011
- [10] CHEN Ping, LI Junling, LI Yunlong. Effect of geometric micro-groove texture patterns on tribological performance of stainless steel [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 331. DOI: 10.1007/s11771-018-3740-9
- [11] KAWASEGI N, SUGIMORI H, MORIMOTO H, et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior [J]. Precision Engineering, 2008, 33(3): 248. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2008.07.005
- [12] LI Panpan, JU Pengfei, JI Li, et al. Toward robust macroscale superlubricity on engineering steel substrate [J]. Advanced Materials, 2020, 32(36): 2002039-1. DOI: 10.1002/adma.202002039
- [13] 郑晓辉, 宋皓, 张庆, 等. 激光表面织构化对材料摩擦学性能影响的研究进展 [J]. 材料导报, 2017, 31(17): 68  
ZHENG Xiao, SONG Hao, ZHANG Qing, et al. Effect of laser surface texturing on tribological properties of materials: A review [J]. Materials Reports, 2017, 31(17): 68. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.017.010
- [14] HAN Jing, FANG Liang, SUN Jiapeng, et al. Hydrodynamic lubrication of micro-dimple textured surface using three-dimensional CFD [J]. Tribology Transaction, 2010, 53(6): 860. DOI: 10.1080/10402004.2010.496070
- [15] 崔海, 郭黎滨, 张彬, 等. 微细电火花线切割与超精磨削加工表面摩擦性能比较 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3687  
CUI Hai, GUO Libin, ZHANG Bin, et al. Tribological property comparison between micro-WEDM and superfinishing grinding machining surfaces [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(9): 3687
- [16] 万轶, 李建亮, 熊党生. 滑动速度对织构化表面润滑状态的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4442  
WAN Yi, LI Jianliang, XIONG Dangsheng. Influence of sliding

- velocity on lubrication state of surface texturing [J]. Journal of Central South University ( Science and Technology ), 2015, 46(12): 4442. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.12.008
- [17] 尹明虎, 陈国定, 高当成, 等. 3种微织构对径向滑动轴承性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(1): 159  
YIN Minghu, CHEN Guoding, GAO Dangcheng, et al. Effects of three types of surface texture on the performances of journal bearing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(1): 159. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.01.024
- [18] 陈进, 郑清春, 胡亚辉, 等. 凹坑微织构对4Cr13 不锈钢/皮质骨摩擦副摩擦性能的影响[J]. 工具技术, 2019, 53(5): 31  
CHEN Jin, ZHENG Qingchun, HU Yahui, et al. Effect of dimple micro-texture on friction properties of 4Cr13 stainless steel/cortical friction pair[J]. Tool Engineering, 2019, 53(5): 31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.05.006
- [19] QIN Liguang, LIN Ping, ZHANG Yali, et al. Influence of surface wettability on the tribological properties of laser textured Co-Cr-Mo alloy in aqueous bovine serum albumin solution[J]. Applied Surface Science, 2013, 268: 79. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.12.003
- [20] ANDERSSON P, KOSKINEN J, VARJUS S, et al. Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces[J]. Wear, 2007, 262(3/4): 369. DOI: 10.1016/j.wear.2006.06.003
- [21] 唐志成, 刘思思, 刘金刚, 等. 组合型微织构化铝合金表面的摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(4): 84  
TANG Zhicheng, LIU Sisi, LIU Jingang, et al. Tribological properties of composite micro-textured aluminum alloy surface[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(4): 84. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2022.04.011
- [22] 华希俊, 朱翊航, 王皓, 等. GCr15 钢微织构表面固体润滑性能研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(9): 12  
HUA Xijun, ZHU Yihang, WANG Hao, et al. Research on solid lubrication properties of micro-textured GCr15 steel[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(9): 12. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2020.09.003
- [23] 戚宝运, 何宁, 李亮, 等. 静电冷却技术对钛合金摩擦磨损性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(5): 106  
QI Baoyun, HE Ning, LI Liang, et al. Effect of static cooling technology on the friction and wear properties of titanium alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(5): 106. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2011.05.021
- [24] 赵立新, 章宝玲, 刘洋, 等. 基于表面织构技术改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(1): 202  
ZHAO Lixin, ZHANG Baoling, LIU Yang, et al. State of the art for improving tribological performance based on of surface texturing technology[J]. Tribology, 2022, 42(1): 202. DOI: 10.16078/j.tribology.2020263
- [25] HSU S M, JING Yang, HUA Diann, et al. Friction reduction using discrete surface textures: Principle and design [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2014, 47(33): 335307. DOI: 10.1088/0022-3727/47/33/335307
- [26] JOSHI G S, PUTIGNANO C, GAUDIUSO C, et al. Effects of the micro surface texturing in lubricated non-conformal point contacts [J]. Tribology International, 2018, 127: 296. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.06.021
- [27] 王泽霄, 陈文刚, 张禄中, 等. 几何特征及工况条件对表面织构摩擦特性影响的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 89  
WANG Zexiao, CHEN Wengang, ZHANG Luzhong, et al. Research progress on the influence of geometric characteristics and working conditions on the friction characteristics of surface texture [J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 89. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.10.010
- [28] 徐家乐, 谭文胜, 胡增荣, 等. TC4 钛合金激光表面微织构的高温摩擦磨损性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1114002-1  
XU Jiale, TAN Wensheng, HU Zengrong, et al. High temperature friction and wear properties of laser surface texturing of TC4 titanium alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1114002-1. DOI: 10.3788/LOP202259.1114002
- [29] 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]. 摩擦学学报, 2022, 42(5): 1012  
WANG Jianfei, XUE Weihai, GAO Siyang, et al. Effect of debris on fretting wear behavior of Ti-6Al-4V alloy [J]. Tribology, 2022, 42(5): 1012. DOI: 10.16078/j.tribology.2021194

(编辑 张红)