

激光与光电子学进展

TC4 钛合金激光表面微织构的高温摩擦
磨损性能研究徐家乐^{1*}, 谭文胜¹, 胡增荣², 王松涛³, 周建忠³¹常州信息职业技术学院智能装备学院, 江苏 常州 213164;²苏州大学轨道交通学院 江苏 苏州 215131;³江苏大学机械工程学院 江苏 镇江 212013

摘要 采用激光微织构技术,在钛合金表面上制备了圆形微凹坑,采用HT-1000型高温摩擦磨损试验机考察了微织构试样在常温和高温下的摩擦学性能,通过对摩擦系数、磨损量、磨痕三维轮廓和磨痕形貌的分析,探讨了高温环境对微织构试样耐磨性能和磨损机理的影响。结果表明:激光微织构试样在常温和高温磨损环境下的摩擦学性能均优于钛合金基体;在高温磨损条件下,微织构试样表现出更低的摩擦系数(0.27)、更小的磨损量(1.26 mg)以及更窄更浅的磨痕轮廓;微织构试样的磨损机制从常温下的磨粒磨损和轻微氧化磨损转为高温下的严重氧化磨损。由于微凹坑的磨屑收集特性及微织构表面在摩擦载荷的作用下可形成连续致密的光滑摩擦氧化物层,因此微织构试样表现出更好的高温耐磨性能。

关键词 激光光学; 激光微织构; TC4钛合金; 高温摩擦磨损; 磨损机制

中图分类号 TG146

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1114002

High Temperature Friction and Wear Properties of Laser Surface
Texturing of TC4 Titanium AlloysXu Jiale^{1*}, Tan Wensheng¹, Hu Zengrong², Wang Songtao³, Zhou Jianzhong³

¹Department of Intelligent Equipment, Changzhou College of Information Technology,
Changzhou 213164, Jiangsu, China;

²School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, Jiangsu, China;

³School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China

Abstract The circular micro-pits are prepared on the surface of titanium alloys by the laser surface texturing technology. The tribological properties of micro-textured samples at room and high temperatures are investigated by the HT-1000 high temperature friction and wear tester. The effect of high temperature environment on the wear resistance and wear mechanism of micro-textured samples is discussed by analyzing the friction coefficient, wear amount, three-dimensional profile and morphology of wear marks. The results show that the tribological properties of laser textured samples are better than those of titanium alloys at room temperature and high temperature. Under the high temperature wear conditions, the micro-textured samples show a lower friction coefficient (0.27), smaller

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-06-30; 录用日期: 2021-07-13

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(20KJB460016)、常州信息职业技术学院校级科研课题资助项目(CXKZ201906Y)、江苏省高职院校青年教师企业实践培训资助项目(2020QYSJ129)、常州信息职业技术学院2020年度校级科研平台项目(KYPT202003Z)、常州市科技计划项目(CJ20210034)

通信作者: *xujiale1989@sina.com

wear amount (1.26 mg), and narrower and shallower wear scar profiles. The wear mechanism of the micro-textured specimens changes from abrasive wear and mild oxidation wear at room temperature to severe oxidation wear at high temperature. The micro-textured specimens show better wear resistance at high temperature due to the debris collection characteristics of micro-pits and the formation of continuous and compact smooth friction oxide layers on the micro-textured surface under the action of friction loads.

Key words laser optics; laser micro-texture; TC4 titanium alloy; high temperature friction and wear; wear mechanism

1 引言

钛合金具有高比强度、高比密度、优异的抗腐蚀性能和优异的生物相容性等特性,已被广泛应用于航空航天和生物医药等领域^[1-4]。但是,较低的表面硬度以及较大的滑动摩擦系数严重限制了钛合金的应用范围,因此钛合金表面强化是一种有效提高表面耐磨性能的方法。Liu等^[5]采用激光熔覆技术在 Ti811 钛合金表面上制备了复合涂层,研究了激光能量密度和 CeO₂ 含量对涂层摩擦学性能的影响,当激光能量密度为 45 J/mm²且 CeO₂ 的质量分数为 2% 时,可得到最高的涂层显微硬度和最低的摩擦系数。Wu等^[6]为了提高 TC6 钛合金的微动磨损行为,采用等离子喷涂技术制备了 AT40 和 Al₂O₃/AT40 涂层,发现两种涂层均可显著提高钛合金的微动磨损性能。Zhu等^[7]采用物理气相沉积技术,在纯钛表面上制备了硬度可达 2000 HV 的 TiC 薄膜,硬度较纯钛提高了约 15 倍,显著提高了钛合金的耐磨性能。上述的工艺虽能提高钛合金表面的耐磨性能,但仍存在熔覆层需后续机械加工且残余应力较大、等离子喷涂层结合强度较低以及薄膜厚度受限等不足,且钛合金的摩擦系数和磨损率在干滑动摩擦条件下仍然较高。由文献[8]可知,相较于整体光滑的涂层,具有一定形貌结构的摩擦副表面具有更好的摩擦学性能,在相同条件下,摩擦系数越小,材料的耐磨性能越好。抗磨减摩已成为保护环境、提高效率的迫切要求,表面织构作为一项有效改善机械表面摩擦磨损性能的可控技术而受到国内外的重视。在众多的织构制备工艺中,激光加工技术以其生产效率高、快速灵活、微造型形状尺寸精确可控等特点而被广泛应用于钛合金的表面织构加工^[9]。王明政等^[10]在 Ti-6Al-4V 表面构造了不同形状、间距和宽度(直径)的织构,研究了织构形状参数对润滑油条件下的钛合金摩擦学性能的影响,结果表明,表面织构能起到收集磨屑、储存润滑油的作用,从而可提升钛合金的耐磨性能。

Wu等^[11]研究了激光微织构表面填充固体润滑剂的干滑动摩擦磨损行为,发现填充固体润滑剂的微凹坑可以显著降低摩擦系数和磨损量,其中微凹坑的间距对摩擦学性能的影响最为显著。

综上所述,制备表面微织构可以有效改善钛合金的耐磨性能,当前对钛合金激光表面微织构的摩擦学性能研究主要集中在室温环境,而关于高温下的摩擦磨损研究较少。由文献[12]可知,钛合金在高温磨损条件下可形成具有保护作用的、高硬度的、含更多摩擦氧化物的摩擦层,因此其在高温下的耐磨性能要好于常温,但钛合金的摩擦系数和磨损率在高温环境下依然较高,这限制了其在高温摩擦学领域中的应用。因此,为了进一步提高钛合金在高温磨损环境下的耐磨性能,本文采用激光微织构技术,在 TC4 钛合金表面上制备了圆形微凹坑,探究了其在常温和 600 °C 高温下的摩擦磨损行为,以期拓展钛合金在高温磨损条件下的应用范围。

2 试验材料及方法

试验所用的材料为 TC4 钛合金,其成分如表 1 所示。使用线切割加工的样品尺寸为 40 mm×40 mm×5 mm。依次采用 400、600、800、1000、1500、2000 号金刚石砂纸研磨,并用粒度为 0.5 μm 的金刚石喷雾对试样表面进行抛光处理,最后用乙醇进行超声清洗,冷风吹干待用。

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy

Composition	Al	V	Fe	C	N	H	Ti
Mass fraction /%	6.350	3.270	0.125	0.020	0.008	0.006	Bal.

采用苏州德龙激光股份有限公司生产的皮秒激光器加工设备对表面进行激光微织构试验,激光器波长为 1064 nm,最大功率为 100 W,脉冲频率为 1 Hz≤f≤1 MHz,脉宽为 10 ps。本试验所用的加工参数为:脉冲频率 400 kHz,扫描速度 300 mm/s,输出功率 18 W,光斑直径 50 μm,微凹坑间距(L)

100 μm 。由公式 $s = \frac{\pi d^2}{4l^2}$ (d 是微凹坑直径) 计算得到织构面密度 (s) 为 19.6%。微凹坑表面形貌与三维轮廓形貌如图 1 所示, 可知微凹坑的深度为 7.777 μm 。

采用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机测量基体与微织构试样在室温与高温下的滑动摩擦磨损性能。在高温摩擦试验中, 首先将高温炉内的试样温度加热到 600 $^{\circ}\text{C}$, 升温速度设定为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 再通过加载机构加上载荷 500 g, 同时驱动样品盘上的被测试样转动, 使其与对偶面进行摩擦。对磨材料选 Si_3N_4 陶瓷球, 摩擦半径为 5 mm, 对磨 20 min 后停

止摩擦并开始降温, 待实际温度降至室温时开炉取样, 材料的试验温度、摩擦系数等数据由计算机实时检测并保存。在常温下的摩擦试验中, 温度保持在室温 25 $^{\circ}\text{C}$, 其余磨损条件与高温磨损试验一致。将磨损试样用乙醇进行超声清洗, 吹干后采用精度为 0.001 mg 的电子天平测量磨损量, 并用激光共聚焦显微镜 (LEXTOLS4000, 奥林巴斯公司, 日本) 测量磨痕的宽度和深度。采用扫描电子显微镜 (S-3400N, 日立公司, 日本) 观察磨痕表面形貌并用附带的能谱仪测量化学成分。为了便于分析, 将试样分别标记为基体 (S1)、常温摩擦磨损微织构试样 (S2) 和高温摩擦磨损微织构试样 (S3)。

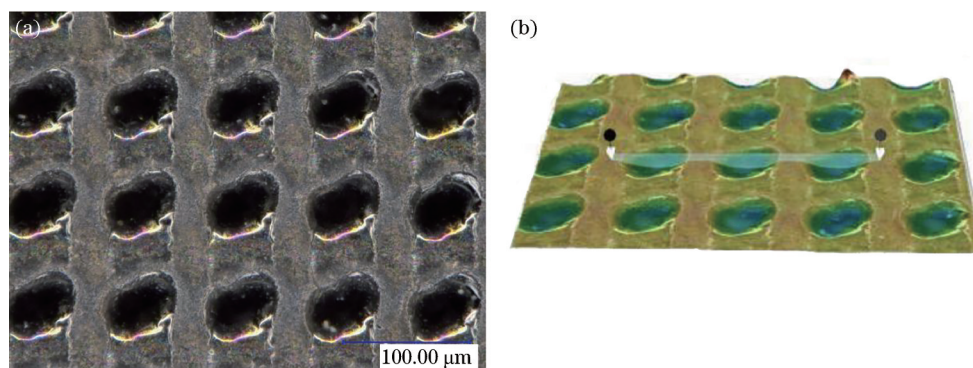


图 1 微凹坑表面形貌与三维轮廓形貌。(a) 表面形貌; (b) 三维轮廓

Fig. 1 Surface morphology and 3D profile of micro-pits. (a) Surface morphology; (b) 3D profile

3 结果及分析

3.1 摩擦系数与磨损量

图 2 所示为不同试样的摩擦系数随时间的变化曲线, 可以发现, 所有试样的摩擦系数都有相似的变化趋势。在磨损开始阶段呈快速上升趋势, 此阶段为磨合阶段, 对磨球与试样表面微凸起之间的真实接触面积小, 所受应力大, 磨损比较剧烈, 因此摩擦系数快速增大^[14]。经过 1 min 左右的磨合后, 摩擦系数开始下降, 并随着磨损时间的延长而逐渐减小并趋于稳定, 在整个稳定磨损阶段, TC4 钛合金基体、常温微织构试样与高温微织构试样的平均摩擦系数均在平均值处上下波动, 对应的平均值分别为 0.38、0.30 和 0.27。这主要是因为随着磨损时间的增加, 对磨球与试样表面之间的硬微凸体逐渐被磨平, 增大了真实接触面积, 减小了表面接触应力, 使得磨损较为平稳。此外, 可以发现, 微织构试样在高温下的摩擦系数相较于常温下的摩擦系数更低, 摩擦系数减小了约 10%。

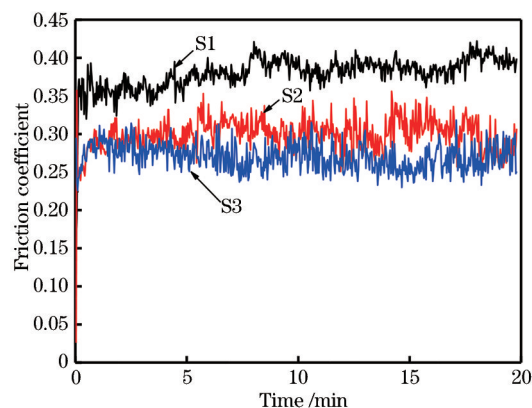


图 2 不同试样的摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 2 Friction coefficient of each sample versus time

图 3 所示为三个试样的磨损量对比图。可以看出, 织构试样无论是在室温磨损条件下还是在高温磨损条件下, 磨损量均低于基体, 进一步对比可以发现, 在相同的磨损条件下, 微织构试样经高温磨损后, S3 的磨损量 (1.25 mg) 为微织构常温磨损试样 S2 的磨损量 (1.68 mg) 的 3/4 左右, 表现出更好的抗磨性能, 这与摩擦系数的变化趋势是一致的。

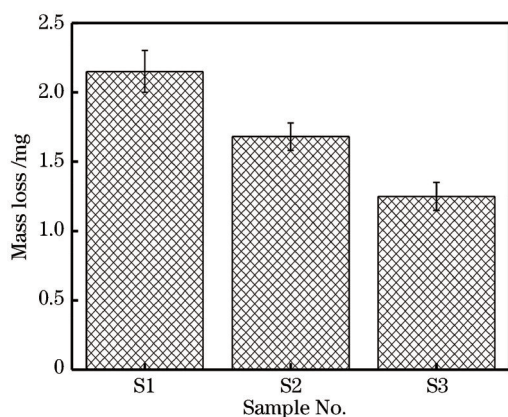


图3 不同试样的磨损量

Fig. 3 Mass loss of each sample

3.2 磨损形貌与磨损机制

图4显示了不同试样的磨痕三维形貌及其对应的宽度和深度。可以看出,钛合金基体经微织构处理后,无论是在常温磨损条件下还是在高温磨损条件下,磨痕深度和宽度均小于基体。由图4可知,微织构试样在常温磨损条件下的磨痕深度和宽度可从基体的 $10.76\ \mu\text{m}$ 和 $623.1\ \mu\text{m}$ 分别降至 $6.89\ \mu\text{m}$ 和 $554.2\ \mu\text{m}$,分别降低了35.97%和11.06%,而微织构试样在高温磨损条件下的磨痕深度和宽度相较于常温下的微织构磨损可进一步下降15.67%和10.75%,可见钛合金表面微织构在高温磨损条件下可进一步提高钛合金的耐磨性能。

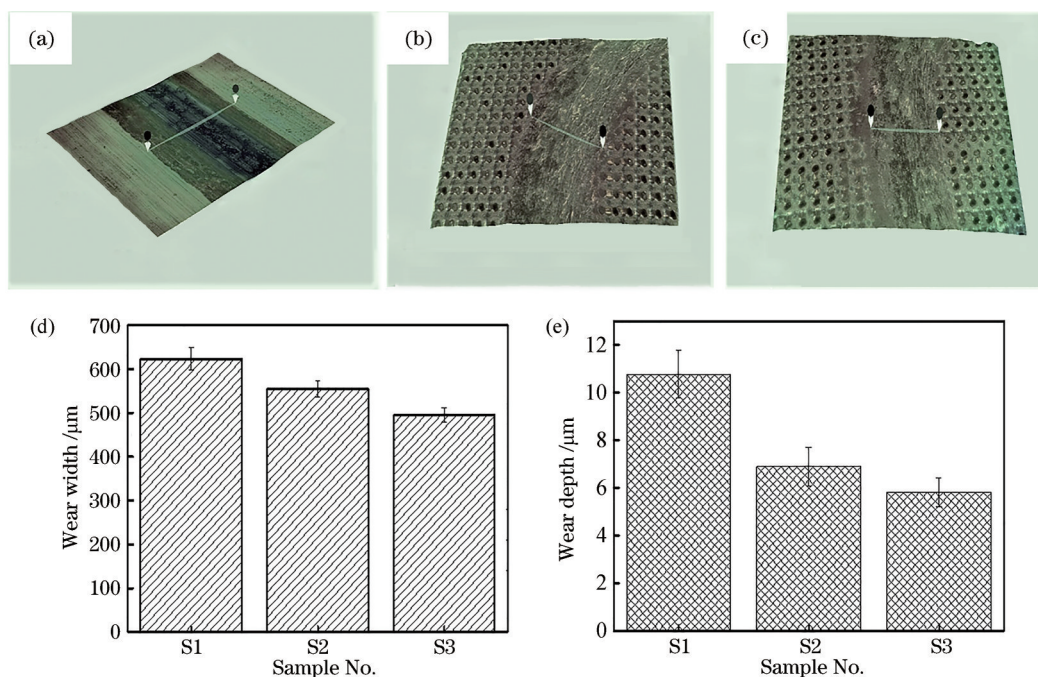


图4 不同试样的磨痕三维形貌及其对应的宽度和深度。(a) S1的磨痕三维形貌;(b) S2的磨痕三维形貌;(c) S3的磨痕三维形貌;(d)磨痕宽度;(e)磨痕深度

Fig. 4 3D morphology of wear scar and corresponding width and depth for each sample. (a) 3D morphology of wear scar for S1; (b) 3D morphology of wear scar for S2; (c) 3D morphology of wear scar for S3; (d) wear width; (e) wear depth

图5所示为基体与微织构试样的磨损表面的低倍与高倍扫描电镜(SEM)图。可以发现,在基体表面上存在严重的磨粒磨损和黏着磨损,如图5(a)、(d)所示。这主要是 Si_3N_4 陶瓷球表面硬的微凸体会对硬度较低的钛合金表面进行犁削,产生强大的塑性变形,同时在对磨球犁削基体表面时会产生瞬时高温,易形成黏结点,在循环对磨过程中发生撕裂,产生剥落坑,如图5箭头所示,而剥落的材料不易被排除,在摩擦载荷的作用下会粘附在磨损表面,在对磨副之间形成三体磨粒磨损,进一步加剧了钛合金

基体表面的磨损。对磨损面进行能谱仪(EDS)检测,发现存在少量的O元素,如图6(a)所示,可知摩擦产生的瞬时高温诱发了轻微的氧化磨损。然而,具有微凹坑的试样磨损表面的黏着磨损程度相对较轻,没有出现大量的材料剥落现象,特别是高温磨损条件下的微织构试样,如图5(b)、(c)所示。对磨球 Si_3N_4 的硬度远高于钛合金基体,导致大部分的微凹坑被磨损掉,但是在磨痕边缘处依然存在少量的未被完全磨损掉的微凹坑,单个微凹坑的SEM形貌如图5(e)、(f)所示,可以看出,在常温磨损条件下,微

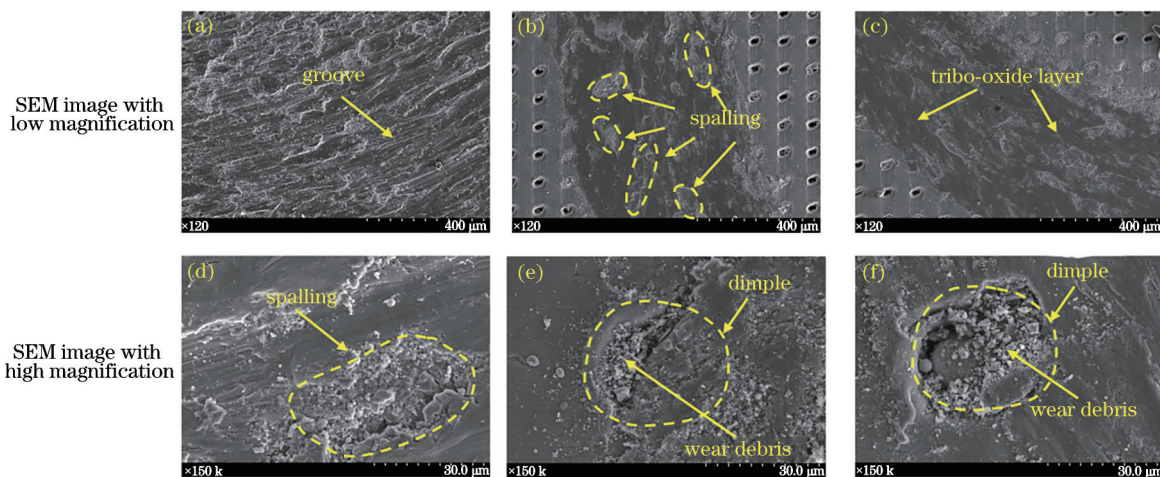


图 5 基体与微织构试样的磨损表面形貌图。(a)(d) S1; (b)(e) S2; (c)(f) S3

Fig. 5 Surface morphologies of wear scars of matrix and micro-textured sample. (a)(d) S1; (b)(e) S2; (c)(f) S3

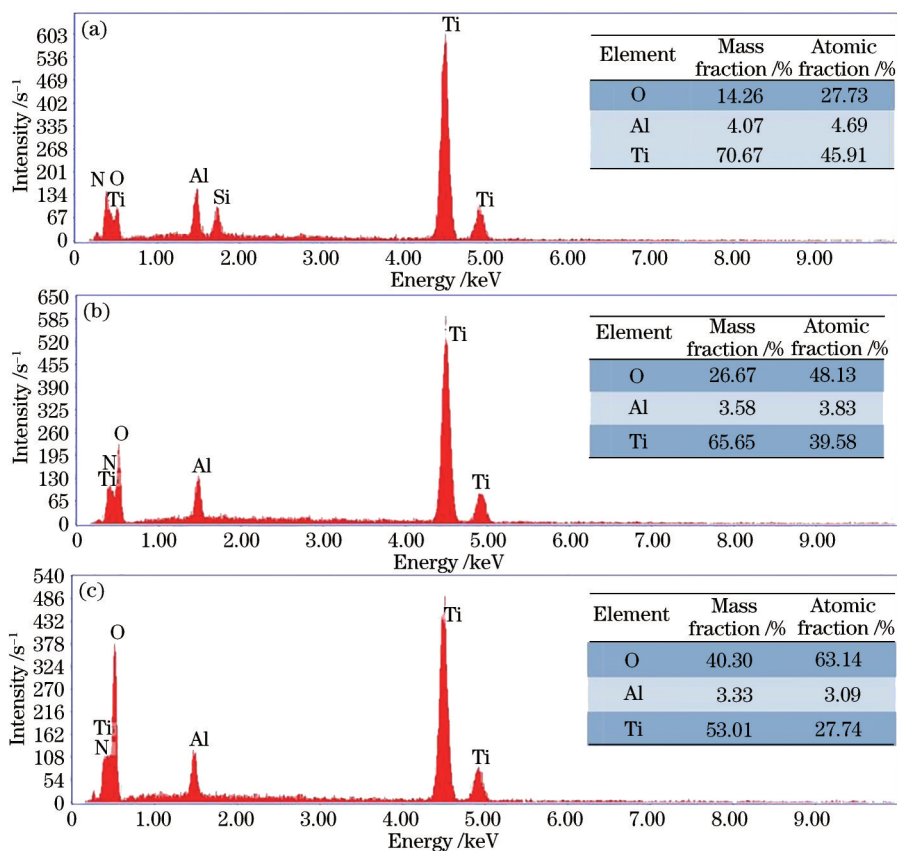


图 6 不同试样磨损表面的 EDS 分析。(a) S1; (b) S2; (c) S3

Fig. 6 EDS analysis of wear surface for each sample. (a) S1; (b) S2; (c) S3

凹坑几乎都被磨屑填满,表明对磨过程中产生的磨屑得到很好的收集,但是也发现有大量被压实的磨屑覆盖住微凹坑,且与微凹坑黏着在一起。由图 1 可知原始单个微凹坑深度大约为 $7.777 \mu\text{m}$,由图 4 可知常温下的微凹坑磨痕深度为 $6.8 \mu\text{m}$,表明微凹坑并未被全部磨损掉,只是被大量的压实磨屑填充,随着磨损的持续进行,微凹坑逐步失去捕获、收集磨

屑的作用。对磨损微凹坑进行 EDS 检测,发现存在一定量的 O 元素,如图 6(b) 所示,表明钛合金表面可以形成少量的氧化物。此时的摩擦氧化物较脆,对基体的附着力差,在摩擦时易于剥落,故没有保护作用;而在高温磨损条件下,由于钛和氧的亲合力较强,故在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 下会形成大量高硬度的氧化产物 TiO_2 和少量的 Al_2O_3 。由 EDS 检测可知,磨屑的 O

元素含量最高,如图 6(c)所示,在载荷切向力的作用下会有部分的氧化物剥落,表面有微凹坑存在,因此可以对脱落的氧化物进行捕获和收集,避免了三体磨粒磨损。同时在摩擦载荷的作用下,未脱落的氧化物和重新生成的氧化物以及发生塑性变形的钛合金基材混合在一起,形成了较为致密且连续的光滑摩擦氧化物层,如图 5(c)箭头所示,并且与磨损面结合较为紧密,不易剥落,有效提高了承载能力,从而起到保护磨损面的作用。微凹坑对脱落氧化物的捕获作用和较为致密且连续的光滑摩擦氧化物层的协同作用,有效提高了钛合金的高温耐磨性能。由图 5(c)可以看出,虽然微凹坑也被产生的磨屑填充,但由高温下的微凹坑试样磨痕深度可知,此时的磨痕深度为 $5.8\ \mu\text{m}$ 左右,相较于常温下微织构试样的磨痕深度要浅,表现出更好的承载能力。

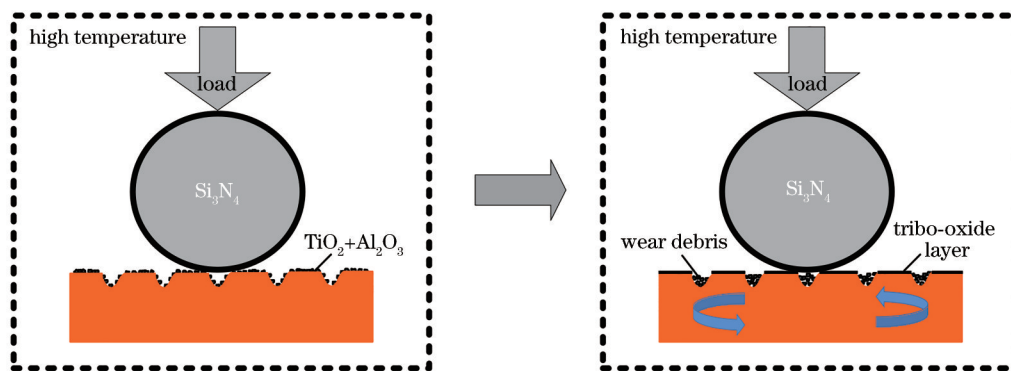


图 7 钛合金微织构试样在 $600\ ^\circ\text{C}$ 高温磨损条件下的磨损示意图

Fig. 7 Schematic of wear mechanism of micro-textured titanium alloy at $600\ ^\circ\text{C}$ high temperature wear condition

4 结 论

在 TC4 钛合金表面采用激光微织构技术制备的圆形凹坑具有明显的抗磨减摩作用,在 $600\ ^\circ\text{C}$ 高温和室温磨损环境下的摩擦系数较基体分别降低了 28.9% 和 21.1%,磨损量较基体分别减小了 41.4% 和 21.9%,磨痕的宽度较基体分别减小了 20.6% 和 11.1%,磨痕的深度较基体分别减小了 46% 和 36%。

通过对比分析不同试样的磨痕微观形貌,发现钛合金基体的磨损形式主要为磨粒磨损和黏着磨损。微凹坑在摩擦过程中可以捕获产生的磨屑,有效避免了三体磨粒磨损,所以常温磨损环境下的磨损机制为轻微的磨粒磨损和黏着磨损,而在高温磨损环境下,除了微凹坑自身收集磨屑的特性外,表面织构可以提高氧的吸附量,促进大量高硬度氧化物的生成,在摩擦载荷的作用下易形成保护性的、

由上述试验结果可知,激光微织构能够明显提高钛合金表面的摩擦学性能,且在高温磨损条件下表现出更好的耐磨性能。图 7 所示为钛合金微织构试样在高温磨损条件下的磨损示意图。首先,由磨损试样表面成分分析可知,在高温磨损环境下,表面织构可以显著提高氧的吸附量,促进滑动表面的氧化反应,快速生成大量高硬度 TiO_2 和少量 Al_2O_3 氧化物;其次,微凹坑本身具有磨屑收集特性,可以有效捕获产生的磨屑以及高温磨损条件下剥落的氧化物;最后,在摩擦载荷的作用下,未剥落的氧化物会被压入发生塑性变形的钛合金基材里面,形成保护性的光滑摩擦氧化物层,该摩擦氧化物层具有较高的硬度^[13]。上述多种特性的协同作用极大提高了钛合金表面的承载能力,降低了摩擦系数,减小了磨损量,提高了整体的高温耐磨性能。

连续致密的、高硬度的光滑摩擦氧化物层,极大地提高了钛合金表面的耐磨性能。

参 考 文 献

- [1] Liu R Y, Yuan S, Lin N M, et al. Tailoring tribological performance of pure titanium by a duplex treatment of laser surface texturing-thermal oxidation [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(6): 4047-4062.
- [2] 郭庆丰, 张政, 黄李杰, 等. 脉冲激光对选区激光熔融 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 钛合金表面质量及变形量的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211404.
Guo Q F, Zhang Z, Huang L J, et al. Effects of pulsed laser on surface quality and deformation of selective laser melted $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ titanium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211404.
- [3] 龚燕琪, 傅戈雁, 石拓, 等. 开放环境下钛合金激光

- 熔覆的局部气氛保护模型[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1102006.
- Gong Y Q, Fu G Y, Shi T, et al. Local shielding gas model for laser cladding of titanium alloy in open environment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1102006.
- [4] 钦兰云, 吴佳宝, 王伟, 等. 激光增材制造 Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V 钛合金组织与疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002008.
- Qin L Y, Wu J B, Wang W, et al. Microstructures and fatigue properties of Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V titanium alloy fabricated using laser deposition manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002008.
- [5] Liu Y N, Yang L J, Yang X J, et al. Optimization of microstructure and properties of composite coatings by laser cladding on titanium alloy[J]. Ceramics International, 2021, 47(2): 2230-2243.
- [6] Wu S, Wu X Q, Wang S Q, et al. Fretting wear behaviors of APS AT40 coating and Al₂O₃/AT40 composite coating on TC6 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 290: 116983.
- [7] Zhu Y H, Wang W, Jia X Y, et al. Deposition of TiC film on titanium for abrasion resistant implant material by ion-enhanced triode plasma CVD[J]. Applied Surface Science, 2012, 262: 156-158.
- [8] 李亚军, 逢显娟, 孙乐民, 等. 激光表面织构化对 45 钢摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 147-154.
- Li Y J, Pang X J, Sun L M, et al. Effects of laser surface texturing on friction and wear properties of 45 steel[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 147-154.
- [9] Lin N M, Li D L, Zou J J, et al. Surface texture-based surface treatments on Ti₆Al₄V titanium alloys for tribological and biological applications: a mini review[J]. Materials, 2018, 11(4): 487.
- [10] 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 M Z, Wang C B, Kang J J, 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.
- [11] Wu Z, Xing Y Q, Huang P, et al. Tribological properties of dimple-textured titanium alloys under dry sliding contact[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309: 21-28.
- [12] Mao Y S, Wang L, Chen K M, et al. Tribo-layer and its role in dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy[J]. Wear, 2013, 297(1/2): 1032-1039.
- [13] Sun Q C, Hu T C, Fan H Z, et al. Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500 °C: influence of laser surface texturing[J]. Tribology International, 2015, 92: 136-145.
- [14] 段海峰, 罗开玉, 鲁金忠. 激光冲击强化 H62 黄铜摩擦磨损性能研究[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1014002.
- Duan H F, Luo K Y, Lu J Z. Friction and wear properties of H62 brass subjected to laser shock peening[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1014002.