

选区激光熔化成形 Ti6Al4V 合金摩擦 磨损性能的各向异性

宗学文^{1,2}, 张健^{1,2}, 卢秉恒³, 李伟东⁴

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054)

(2. 西安科技大学 增材制造技术研究所, 陕西 西安 710054)

(3. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

(4. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 基于选区激光熔化技术制备了 Ti6Al4V 钛合金, 研究了不同成形表面 (XOY、XOZ) 和不同载荷 (20、40、60、80 N) 对 Ti6Al4V 合金摩擦磨损性能的影响。通过摩擦系数 (COF) 结合磨损体积损失对不同成形面的摩擦磨损性能进行评估, 采用光学显微镜 (OM)、三维轮廓测量仪等设备对磨损轨道的形态和磨损机理进行表征。结果表明: 相比 XOZ 面, XOY 面在法向载荷为 20 N 时其磨损体积减少了 $0.27 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$, 平均摩擦系数更小; 而当载荷大于 20 N 时, XOY 面的磨损体积和平均摩擦系数均大于 XOZ 面。磨损轨道犁槽的深度和宽度随着载荷的增加而增加, 犁槽呈现出明显的剥落行为, 轨道处分布着块状的“粘合剂”, 发生着粘着磨损和氧化磨损。从摩擦系数、磨损体积、微观形态的角度定量反映出 SLM 成形 Ti6Al4V 合金的 XOZ 面比 XOY 面具备更优异的摩擦磨损性能, 只有在低载荷下 XOY 面才表现出更加耐磨的特性。

关键词: Ti6Al4V; 选区激光熔化; 摩擦磨损; 微观结构; 各向异性

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)06-2106-06

选区激光熔化技术 (SLM) 是增材制造技术的一种, 它主要以激光作为热源, 通过逐层熔化粉末并使其堆积层叠形成目标固体零件^[1-3]。三维软件绘制的模型进行切片获得 2D 数据使 SLM 技术具有很高的可操作性。与传统工艺手段相比, SLM 可以成形复杂零件, 性能更加优异, 并且精度高^[4-6]。钛合金由于具有密度低、强度高、耐腐蚀性能和生物相容性好的特点, 在航空航天、医学领域和海洋工程中被广泛应用^[7-9]。

但是钛合金表面的氧化物^[10]对塑性剪切的抵抗能力差、加工硬化程度低, 导致钛合金在摩擦性能方面表现较差^[11,12], 因此限制了其耐磨性方向的应用发展。目前对 Ti6Al4V 合金耐磨性研究主要集中在表面改性上, 通过对零件表面的处理达到耐磨性能。Courant 等^[13]用脉冲 ND-YAG 激光束照射石墨粉使其熔融在钛合金表面, 石墨覆盖后生成的硬质颗粒状碳化钛极大减少了激光熔化区的干摩擦和磨损, 改善了钛合金的摩擦性能。Schmidt 等^[14]研究了不同剂量组合下不同元素离子 (C、N、O、Y、Hf、Pt、Au) 注入 Ti6Al4V 合金对其摩擦行为的影响, 发现当注入原子在钛合金表面氧化膜下方直

接开始富集时, 磨损减少最明显, 随后随着深度的增加, 注入原子的浓度不断降低。这些表面改性手段证实了可以改善钛合金的摩擦磨损性能, 但是对于使用增材制造技术制备钛合金的研究相对较少。Zhu 等^[15]使用 SLM 工艺制备了 Ti6Al4V 合金, 对比常规铸造的试样, 与黄铜接触时的 SLM 试样和经过热处理的 SLM 试样表现出轻微磨损, 摩擦层较薄且局部化, 仅铸造试样表现为氧化磨损。与 38CrMoAl 进行磨损时, SLM 试样和铸造试样表现出相似的严重磨损和磨损机制, 而经过热处理的 SLM 试样显示出保护性的摩擦氧化层。Zhang 等^[16]通过 SLM、电子束熔化以及锻造制备了 Ti6Al4V 合金, 研究发现 SLM 和电子束熔化的试样具有比锻造更加良好的耐磨性, 表明增材制造工艺可以改善 Ti6Al4V 合金的摩擦磨损性能。然而, SLM 成形的 Ti6Al4V 合金, 对其不同成形面摩擦磨损性能各向异性的研究却鲜有报道。因此, 为了钛合金工程应用的快速发展, 迫切需要对钛合金的滑动摩擦磨损性能进行透彻的研究。

本研究是在 SLM 工艺可以改善 Ti6Al4V 合金摩擦性能的基础上, 研究了 Ti6Al4V 合金的不同成形面在各

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51875452); 国家高技术研究发展计划 (“863”计划)(2015AA042503); 陕西省重点研发计划 (2019GY-102)

作者简介: 宗学文, 男, 1964年生, 博士, 副教授, 西安科技大学增材制造技术研究所, 陕西 西安 710054, E-mail: zj_320@foxmail.com

种载荷下的磨损行为,通过形态学和微观结构表征的方法,探究了不同成形面摩擦磨损性能的各向异性。从而揭示成形工艺与成形面摩擦性能各向异性的内在联系,为 SLM 工艺制备 Ti6Al4V 合金的应用提供了一定的理论基础。

1 实验

本研究采用 SLM 工艺,该设备为中瑞智创三维科技股份有限公司的 ISLM150 型,拥有高能量密度、精细光斑直径的激光,能在极短的周期内,完成用常规方法需要数周甚至数月才能完成的复杂零件的建造。该设备激光类型为光纤激光器,制备 Ti6Al4V 合金的工艺参数为:功率 200 W,扫描速度 1000 mm/s,波长 1064 nm,光斑大小 60 μm 。制备的样品尺寸为 20 mm \times 20 mm \times 10 mm。实验中使用的粉末为 Ti6Al4V 粉末,该粉末粒径在 15~45 μm 之间,粉末的主要元素含量如表 1 所示。

摩擦磨损测试在干接触和室温条件下进行,在试验之前对 Ti6Al4V 合金样块进行研磨、抛光和超声清洗,采用的设备为 MFT-4000 多功能材料表面性能测试仪,摩擦副为 SiC 硬质球,频率为 2 Hz,每个载荷下滑动的时间为 30 min,磨损测试的法向载荷分别为 20、40、60 和 80 N。测试期间记录摩擦系数与时间的关系。

实验采用 NIKON 金相显微镜 ECLIPSE MA200 观察磨损轨道痕迹的形态,使用 Kroll 试剂 (5%HF+10%HNO₃+85%H₂O) 进行蚀刻来观察不同成形面的微观结构。同时,使用 3D 光学轮廓仪 (KLA-Tencor D-120) 对磨损轨迹进行三维形态表征,并且多次测量得出磨损轨道的平均深度和宽度,磨损量损失为磨损轨道的面积与轨道长度的乘积。

2 结果与分析

2.1 摩擦系数

图 1 为 Ti6Al4V 合金的 XOY 面和 XOZ 面在不同法向载荷下瞬时摩擦系数随时间变化曲线。从整体上看, XOY 面在法向载荷为 20 N 时摩擦系数波动幅度较小,趋向稳定状态,而在 40、60、80 N 法向载荷下,随着时间的增加摩擦系数呈现波动增加的趋势,并逐渐恢复稳定; XOZ 面在 20、40、60、80 N 的法向载荷下波动幅

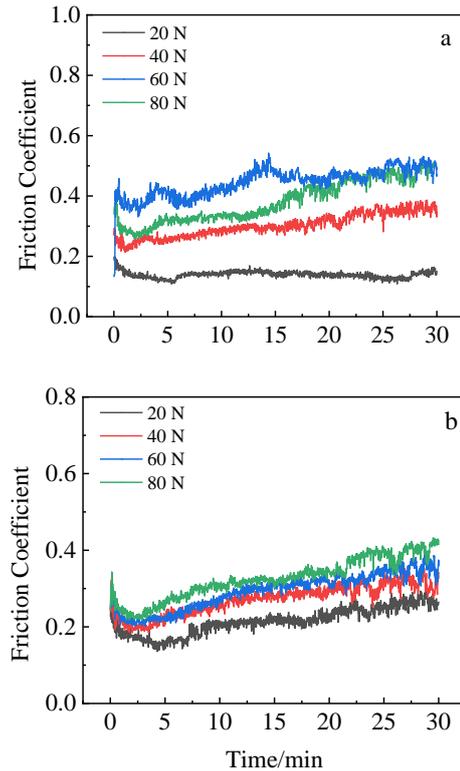


图 1 试样 XOY 和 XOZ 面的摩擦系数随时间变化

Fig.1 Changes of COF with time for XOY surface (a) and XOZ surface (b) of samples

度相比 XOY 面较小,但同样呈波动上升趋势。值得注意的是,不管是 XOY 面还是 XOZ 面,在开始阶段摩擦系数都呈现先短暂下降的趋势,主要是因为摩擦副在“侵入”Ti6Al4V 合金的初始阶段属于点接触,只有少量的真实面积接触,存在不连续干滑动,因此开始阶段摩擦系数呈现降低趋势,随着摩擦时长的增加实际接触面积增加,导致摩擦系数随着时间的增加逐步增大。并且从图 1 可以看出法向载荷越小所维持的下降趋势越长,说明法向载荷越大越利于改善开始阶段摩擦副与试样的真实接触面积。但是摩擦系数曲线的波动程度随着法向载荷的增大而变得更加明显。

图 2 为 XOY 面和 XOZ 面在不同法向载荷下的平均摩擦系数。古典摩擦定律(classical friction law)认为:“摩擦力与法向载荷成正比,摩擦系数与接触面积和滑动速度无关”。而真实摩擦系数的改变是一个综合复杂的过程,受到多重元素的影响,它与材料的特性、变形状态、真实接触面积以及温度调节等都有着密不可分的联系^[17]。本研究中 SLM 成形 Ti6Al4V 合金的平均摩擦系数,在不同成形面时与载荷表现为不同的线性关系, XOY 面的平均摩擦系数表现为先增加后减小,在法向载荷为 60 N

表 1 Ti6Al4V 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V powder ($\omega/\%$)

Ti	Al	V	Fe	C	Si	O	H
Bal.	6.75	4.25	0.059	0.008	0.020	0.179	0.003

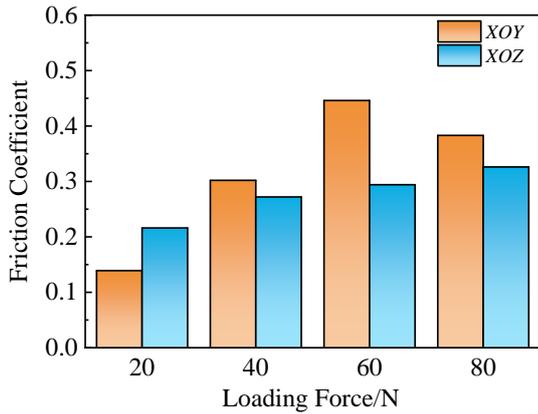


图 2 不同成形面的平均摩擦系数

Fig.2 Average COF of different forming surfaces

时达到最大值 0.446；而 XOZ 面的平均摩擦系数与法向载荷成正比，逐渐增大至 0.326。当法向载荷为 40、60、80 N 时 XOY 面的平均摩擦系数都大于 XOZ 面，只有法向载荷为 20 N 时 XOZ 面的平均摩擦系数才呈现出比 XOY 面大。这其中需要考虑的是摩擦副接触面的温度随着施加载荷的增加而增加带来的表面软化，同时往复滑动过程中摩擦副不断的旋转剪切产生塑性变形带来的加工硬化，这些因素都对摩擦系数产生了影响。所以，从整体上看 XOZ 面呈现出比 XOY 面更好的摩擦性能，

只有在低载荷下 XOY 面才表现出更好的耐磨性。

2.2 磨损量

图 3 为不同载荷下 Ti6Al4V 合金 XOY 面和 XOZ 面摩擦磨损后的三维形貌图，根据图 3 来进一步描述其摩擦磨损性能。可以看出，磨损轨道是沿滑动方向的凹槽组成，由于干摩擦产生的犁耕作用，材料会移位至磨损轨道的两侧，深度从两侧到中心逐渐增加。为了定量比较不同载荷下不同成形面的磨损状况，在表 2 中列出不同载荷下成形面磨损深度和磨损宽度的数值。可以看出载荷为 20 N 时 XOY 面磨损轨道的宽度和高度均小于 XOZ 面，呈现出比 XOZ 面更耐磨的特性，从微观形态角度定量解释了载荷为 20 N 时 XOY 面摩擦系数小于 XOZ 面的原因。

由 3D 光学轮廓仪进行多次测量，得到不同载荷下 XOY 面和 XOZ 面的磨损轨道截面数据，经过 ORIGIN 软件计算积分可得出其准确的截面面积，然后可得不同载荷下 XOY 面和 XOZ 面的磨损体积损失量，如图 4 所示。可以看出随着施加载荷的增加，磨损体积不断增大。当载荷为 20 N 时，XOY 面比 XOZ 面的磨损体积减少了 $0.27 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ ，呈现出更优的摩擦磨损性能；而当载荷大于 20 N 时，XOZ 面的磨损体积都小于 XOY 面，此时 XOZ 面的耐磨性能更好。因此，磨损体积的变化定量论证了从整体上看 XOZ 面呈现出比 XOY 面更好的摩擦磨损性能，只有在低载荷下 XOY 面才表现出更好的耐磨性。

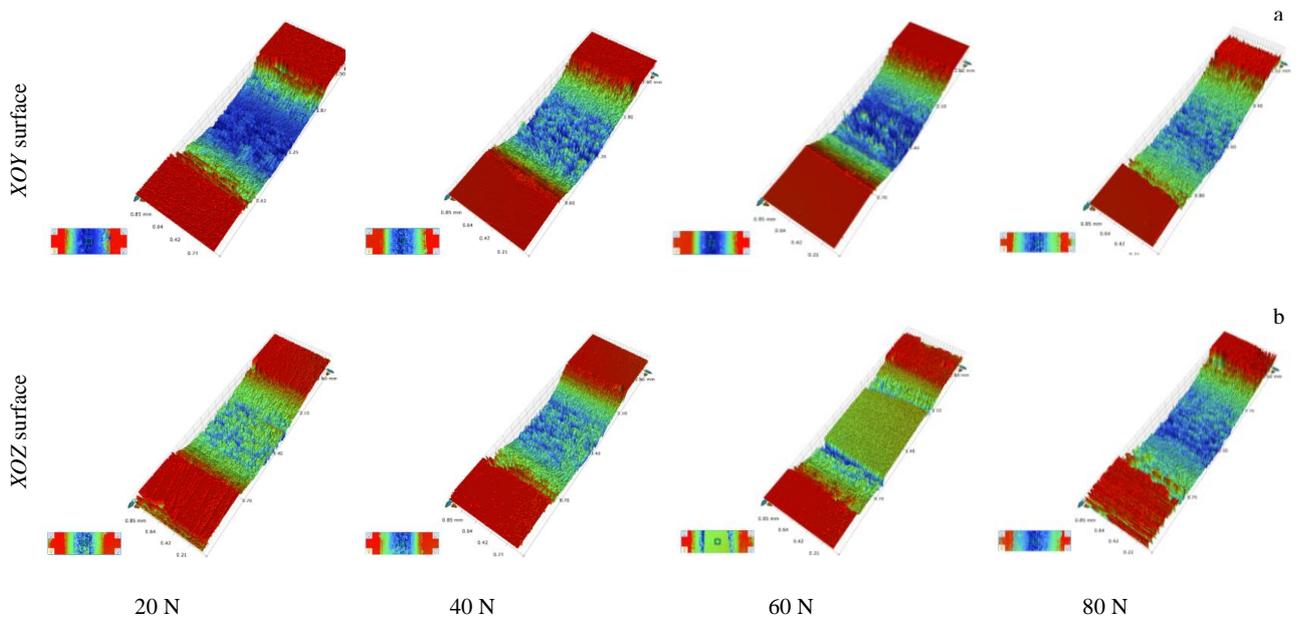


图 3 不同载荷下 Ti6Al4V 合金 XOY 面和 XOZ 面摩擦磨损后三维形貌

Fig.3 Three-dimensional morphologies of XOY (a) surface and XOZ (b) surface of Ti6Al4V alloy after friction and wear under different loads

表 2 不同载荷下 Ti6Al4V 合金 XOY 面和 XOZ 面摩擦磨损后的深度和宽度

Table 2 Depth and width of XOY surface and XOZ surface of Ti6Al4V alloy after friction and wear under different loads

Load/N	XOY surface		XOZ surface	
	Depth/ μm	Width/ μm	Depth/ μm	Width/ μm
20	70.95	1.49	76.38	1.51
40	90.06	1.59	89.06	1.58
60	96.49	1.73	92.25	1.84
80	159.96	2.08	134.00	1.98

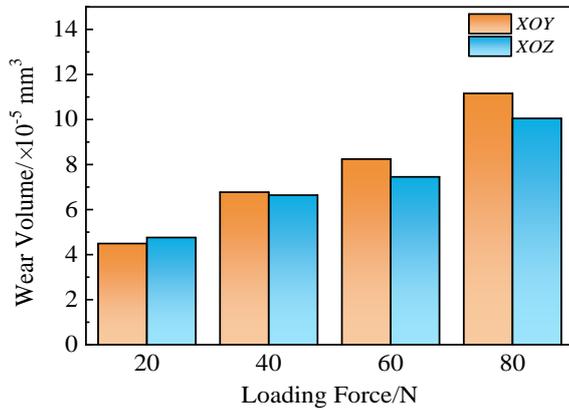


图 4 不同成形面的磨损体积

Fig.4 Wear volume of different forming surfaces

2.3 轨道形态及磨损机制

图 5 和图 6 分别为 XOY 面、XOZ 面的轨道微观形貌。当载荷较低时，磨损轨道表面的犁槽深度浅宽度窄，犁槽的形成是由于摩擦副与金属材料在摩擦过程中，基材从表面脱离发生了材料的转移，在表面留下的为硬颗粒，这些硬颗粒在循环拉、压应力中不断的冲击表面微凸体，最终在剪应力的作用下从基材上脱落形成研磨颗粒，形成基材-研磨颗粒-摩擦副的三体摩擦导致犁槽的形成；随着载荷的增大，犁槽的深度和宽度不断增加，并且可以观察到更加明显的表面剥落行为，如图 5 和图 6 所示，大小不一的分布着块状黑色区域为“粘合剂”^[18]，其形成是由于反复摩擦，特别是在高载荷下更为明显，大量磨屑碎片剥落并被压实焊接在磨损轨道上发生粘着磨损和氧化磨损^[19]。

不管是低载荷还是高载荷都发生着“塑性流动”^[20]和犁耕现象，有大量氧化物和磨损碎片分布在表面。比较载荷为 20 N 时 XOY 面和 XOZ 面轨道微观形态，可以明显发现 XOY 面的磨损轨道形态优于 XOZ 面，其分层现象和粘着磨损弱于 XOZ 面，解释了当载荷为 20 N 时，XOY 面的摩擦系数要低于 XOZ 面的原因。同时，载荷的作用可以加剧分层现象，块状黑色区域和凹坑不断增多，但是值得注意的是，当载荷为 80 N 时，XOY 面明显光亮，犁槽呈现完整并且顺滑状态，导致这种情况的原因是高载荷往复摩擦过程中导致热量集聚，摩擦层温度升高，在高温下磨损碎片形成一层氧化物，起到了润滑作用^[18]，这就论证了 XOY 面的载荷从 60 N 增加到 80 N 时，磨损量增加，但摩擦系数突然降低而不是呈现继续增加的趋势。

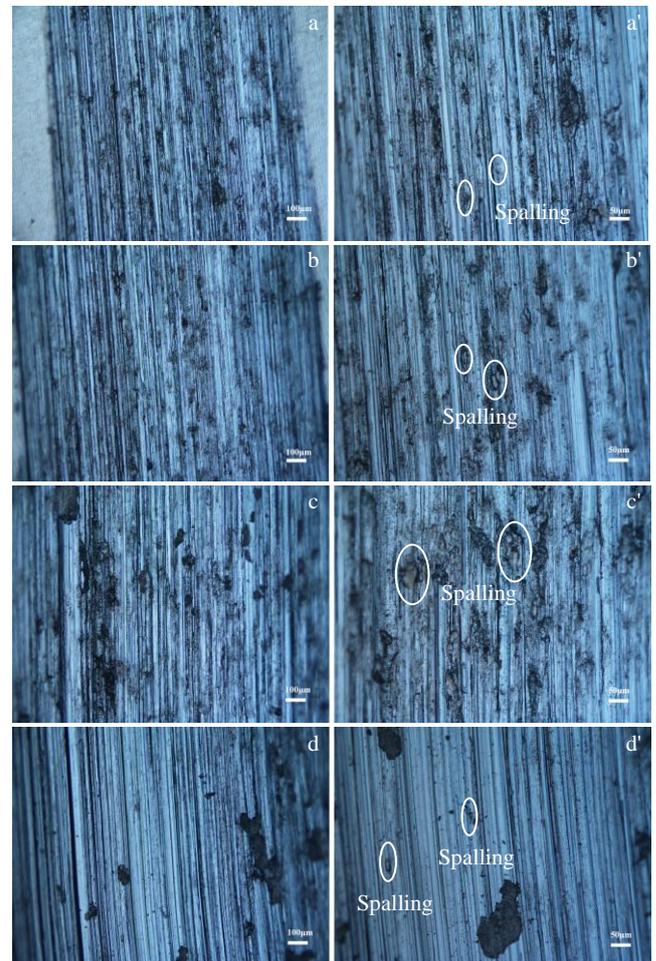


图 5 XOY 面摩擦磨损轨道微观形貌

Fig.5 Microscopic morphologies of the XOY surface wear track under different loads: (a, a') 20 N, (b, b') 40 N, (c, c') 60 N, and (d, d') 80 N

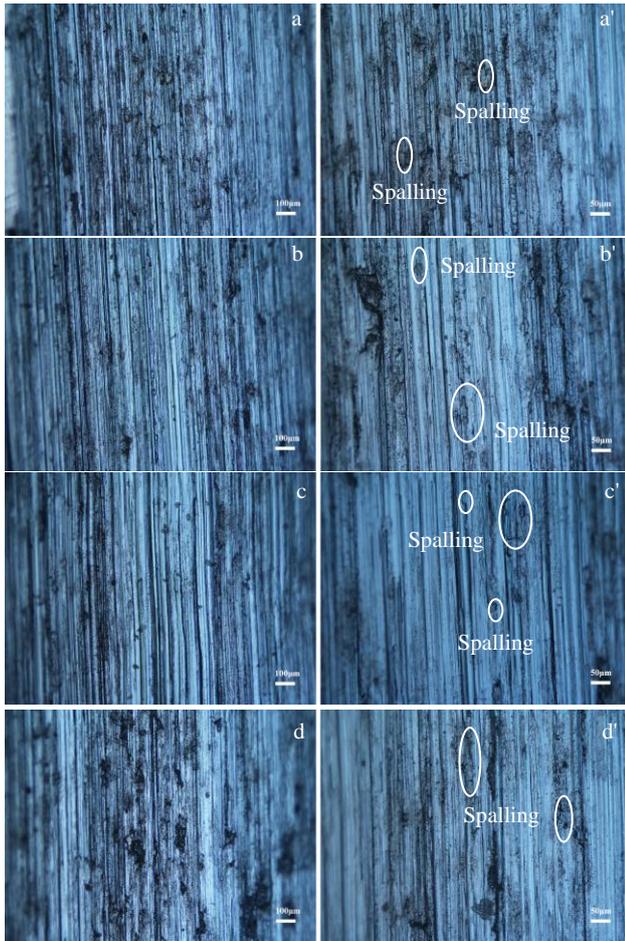


图 6 XOZ 面摩擦磨损轨道微观形貌

Fig.6 Microscopic morphologies of the XOZ surface wear track under different loads: (a, a') 20 N, (b, b') 40 N, (c, c') 60 N, and (d, d') 80 N

3 结 论

1) 在不同法向载荷下, SLM 成形 Ti6Al4V 合金 XOY、XOZ 面的瞬时摩擦系数呈现先短暂下降, 后波动增加的趋势。同时, XOY 面的平均摩擦系数表现为先增加后减小, 在法向载荷为 60 N 时达到最大为 0.446, 而 XOZ 面的平均摩擦系数与法向载荷成正比, 逐渐增大至 0.326。

2) 随着法向载荷的增加, XOY、XOZ 面的磨损体积不断增大。当载荷为 20 N 时, XOY 面比 XOZ 面的磨损体积减少了 $0.27 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$; 而当载荷大于 20 N 时, XOY 面的磨损体积均大于 XOZ 面。

3) 低载荷下, 磨损轨道犁槽的深度浅宽度窄; 随着载荷的增加, 犁槽呈现明显的剥落行为, 分布着块状“粘合剂”, 发生着粘着磨损和氧化磨损。

4) SLM 成形 Ti6Al4V 合金的 XOZ 面比 XOY 面具备更优异的摩擦磨损性能, 只有在低载荷下 XOY 面才表现出更加耐磨的特性。

参考文献 References

- [1] Lu Yichen(卢毅晨), Sun Zhonggang(孙中刚), Guo Yanhua(郭艳华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 2067
- [2] Zhang Shaochi(张少驰), Sun Zhonggang(孙中刚), Liang Zulei(梁祖磊) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(10): 3234
- [3] Wang Wei(王 维), Liu Baoyuan(柳宝元), Li Changfu(李长富) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(1): 279
- [4] Krakhmalev P, Yadroitsava I, Fredriksson G *et al. Materials & Design*[J], 2015, 87(15): 380
- [5] Ma M M, Wang Z M, Zeng X Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 685(8): 265
- [6] Prashanth K G, Damodaram R, Scudino S *et al. Materials & Design*[J], 2014, 57: 632
- [7] Sarao T P S, Singh H, Singh H. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2018, 27: 1388
- [8] Gurrappa I. *Materials Characterization*[J], 2003, 51(2-3): 131
- [9] Song Wei, Jian Qiang, Yu Shurong *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(7): 2393
- [10] Molinari A, Straffelini G, Tesi B *et al. Wear*[J], 1997, 208(1-2): 105
- [11] Qu J, Blau P J, Watkins T R *et al. Wear*[J], 2005, 258(9): 1348
- [12] Chelliah N, Kailas S V. *Wear*[J], 2009, 266(7-8): 704
- [13] Courant B, Hantzpergue J J, Benayoun S. *Wear*[J], 1999, 236(1-2): 39
- [14] Schmidt H, Schminke A, Rück D M. *Wear*[J], 1997, 209(1-2): 49
- [15] Zhu Y, Chen X, Zou J *et al. Wear*[J], 2016, 368-369(15): 485
- [16] Zhang W W, Qin P T, Wang Z *et al. Wear*[J], 2019, 425(5): 782
- [17] Alvi S, Neikter M, Antti M L *et al. Tribology International*[J], 2020, 15: 106 658
- [18] Huang Yubao, Yang Shanglei, Gu Jiaying *et al. Materials Chemistry and Physics*[J], 2020, 254: 123 487
- [19] Li X X, Zhou Y, Ji X L *et al. Tribology International*[J], 2015, 91: 228
- [20] Li J, Lu Y H. *Wear*[J], 2013, 304(1-2): 223

Friction and Wear Performance of Different Forming Surfaces of Ti6Al4V Alloy Formed by Selective Laser Melting

Zong Xuewen^{1,2}, Zhang Jian^{1,2}, Lu Bingheng³, Li Weidong⁴

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. Institute of Additive Manufacturing Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(3. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(4. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: Ti6Al4V titanium alloy was prepared by selective laser melting (SLM) technology. The effects of different forming surfaces (*XOY*, *XOZ*) and different loads (20, 40, 60, 80 N) on the friction and wear properties of Ti6Al4V alloy were studied. The friction and wear properties of different forming surfaces were evaluated by friction coefficient (COF) combined with wear volume loss, and the wear track morphology and wear mechanism were characterized by optical microscope (OM) and three-dimensional profile measuring instrument. The results show that compared with the *XOZ* surface, the wear volume of the *XOY* surface is reduced by $0.27 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ when the normal load is 20 N, and the average friction coefficient is smaller. However, when the load is greater than 20 N, the wear volume and average friction coefficient of *XOY* surface are larger than those of *XOZ* surface. The depth and width of the plough groove of the worn track increase with the increase of the load. The plough groove exhibits obvious peeling behavior, and there is a blocky "adhesive" distributing on the track, causing adhesive wear and oxidative wear. From the aspects of friction coefficient, wear volume and micro-morphology, it is quantitatively reflected that *XOZ* surface of Ti6Al4V alloy formed by SLM has better friction and wear performance than *XOY* surface, and *XOY* surface shows better wear resistance only under low load.

Key words: Ti6Al4V; selective laser melting; friction and wear; microstructure; anisotropy

Corresponding author: Zong Xuewen, Ph. D., Associate Professor, Xi'an Additive Manufacturing Technology Research Institute, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China, E-mail: ZJ_320@foxmail.com