

TC4 合金微动磨损颗粒的运动分布

何燕妮¹, 俞树荣¹, 李淑欣², 邵晨¹, 尘强¹

(1. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

(2. 宁波大学, 浙江 宁波 315211)

摘要: 完善钛合金微动摩擦磨损特性数据, 以磨损颗粒在不同位移幅值下于界面间的运动分布为手段, 研究不同运动分布下的微动行为和损伤机制。结果表明: 位移幅值显著影响着磨损颗粒的运动分布。小位移下中心粘着撕裂形成的片状脱层沿垂直于微动的方向堆积成“脊”; 中等位移下磨屑颗粒平铺于接触表面; 较大位移下团簇状磨屑沿平行于微动的方向重新聚集成水平“脊”。磨屑在接触界面不同的运动分布导致磨损机制由粘着磨损, 过渡到磨粒伴随轻微粘着, 最终以磨粒伴随氧化磨损为主。

关键词: TC4 合金; 微动磨损; 磨损颗粒; 位移幅值; 运动分布

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)04-1250-06

工程构件中的压紧配合面, 在机械振动、疲劳载荷、电磁振动和热循环等交变载荷作用下, 常常会发生一种振幅极小的相对运动, 导致接触表面发生以材料剥落为主的磨损或以裂纹萌生扩展为主的疲劳, 此运动即为微动^[1,2]。钛合金 TC4 因其低密度、高比强度和良好耐蚀性等优点被广泛用于航空航天领域, 但低的塑性、剪切抗力以及表面氧化膜的微弱保护作用导致 TC4 合金耐磨性较差, 对微动损伤极其敏感, 研究表明微动作用通常使钛合金疲劳极限降低 20%~50%, 如 TC4 合金微动疲劳极限下降幅度甚至高达 62%^[3-5]。

微动磨损极低的运动幅度和复杂的作用机理长期以来备受国内外研究学者的关注。在微动磨损过程中, 由于两接触表面的相对运动幅度小于其接触半径, 将会产生局部区域的塑性应变集中和接触中心的磨屑滞留^[6,7], 表面损伤和磨屑形成便成为微动磨损过程中不容忽视的疲劳行为^[8]。目前对磨屑的试验研究主要集中在其物理、化学以及力学行为对摩擦磨损特性和损伤机理的影响方面。Hintikka^[9]等提出磨屑是微动的特定产物, 其形成标志着微动的开始。Iwabuchi^[10]等通过在微动接触界面间预制 α -Fe₂O₃ 颗粒, 发现氧化磨屑的行为是控制微动磨损的主因。Varenberg^[11]等对合金的微动磨损研究表明接触界面氧化磨屑的产生和溢出导致摩擦系数曲线的波动, 粘着磨损下磨屑可分离接触界面起保护作用, 磨粒磨损下硬质磨屑可加速磨

损。结合以上对磨屑性质的基础研究, 重点考察 TC4 合金微动磨损过程中磨屑在界面间的运动分布对摩擦系数、磨损量、磨痕轮廓及表面形貌的影响, 分析磨屑行为对损伤机制的作用, 为钛合金微动磨损试验研究提供可靠的摩擦磨损特性数据。

1 实验

微动磨损试验在德国 Optimol 公司生产的 SRV 摩擦磨损试验机上完成, 摩擦副采用经典切向球/平面接触方式。上试样为 GCr15 轴承钢球 (硬度 HV 约 6800 MPa), 尺寸 $\Phi 10$ mm; 下试样为 TC4 合金 (硬度 HV 约 3000 MPa), 尺寸为 $\Phi 24$ mm \times 8.0 mm, 化学成分见表 1 所示, 金相组织如图 1 所示, 为典型 $\alpha+\beta$ 两相合金, 基体暗区均布球状 hcp 结构的 α 相, 晶间亮区为 bcc 结构的 β 相。经磨抛预处理后用腐蚀剂 (氢氟酸: 硝酸: 蒸馏水=1:3:16) 擦拭下试样待测表面, 清水和乙醇冲净试样, 热风吹干备用。

微动磨损试验在室温实验室环境中进行。主要试验参数为: 法向载荷 80 N; 频率 20 Hz; 循环时间 30 min; 位移幅值分别为 20、45、65 和 100 μ m; 相对湿

表 1 TC4 合金的化学元素组成

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy (wt%)

Element	Ti	Al	V	Fe	C	N
Value	Balance	6.5	4.3	0.06	0.01	0.01
EDS	89.89	5.91	4.20			

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51275225)

作者简介: 何燕妮, 女, 1985 年生, 博士生, 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: he_yanni1113@163.com

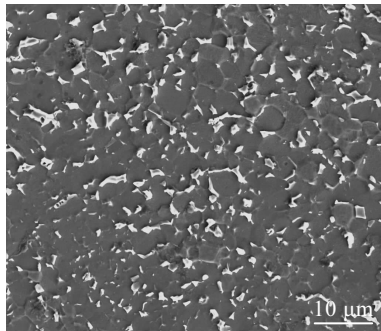


图1 TC4 合金微观组织 SEM 图

Fig.1 SEM morphology of TC4 titanium alloy

度 25%~40%。微动试验过程中, 摩擦力随微动位移幅值、循环时间变化的关系曲线(即摩擦系数曲线)由控制系统自动记录。磨损试验结束后, 试样经丙酮超声清洗, 去除表面松散磨屑颗粒; 用扫描电子显微镜(SEM)、背散射电子(BSE)和激光共聚焦显微镜(LSCM)分析磨痕表面形貌; 用能谱仪(EDS)和电子探针(EPMA)分析磨屑组成; 用非接触式三维表面轮廓仪测量磨痕轮廓和磨损体积量。

2 结果与讨论

2.1 摩擦系数的变化

摩擦系数反应表面损伤程度, 是分析微动接触的重要变量^[12,13]。图2和3为不同位移幅值条件下 TC4 合金微动摩擦系数随循环时间的变化, 所有位移幅值条件下的摩擦系数(COF)曲线具有较为一致的阶段性变化。微动初始跑合期, 由于 TC4 合金表面原生氧化膜和环境污染膜的存在, 摩擦系数均较低^[14]。随着微动的进行, 表面保护膜剪切破裂, 不断裸露的新鲜

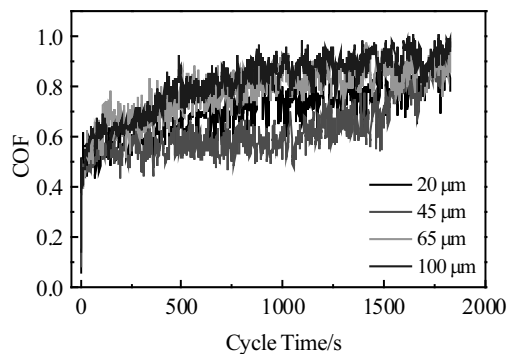


图2 不同位移幅值下 TC4 合金的微动摩擦系数(COF)曲线

Fig.2 Evolution of COF for TC4 alloy at various displacement amplitudes

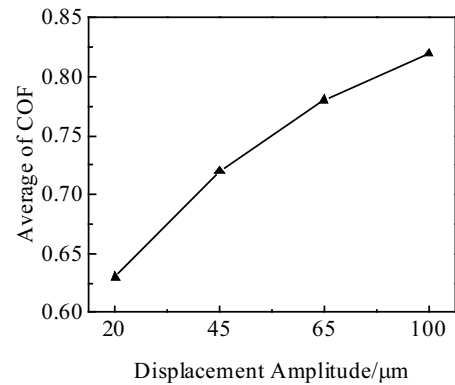


图3 不同位移幅值下 TC4 合金的平均摩擦系数(COF)

Fig.3 Average of COF for TC4 alloy at various displacement amplitudes

表面进入二体接触, 宏观粘着增大, 此时摩擦力和摩擦系数均上升。表面层在微动往复作用下发生严重的塑性变形产生磨屑, 二体转变为三体接触, 随着接触界面间磨屑的产生与溢出达到动态平衡, 摩擦系数趋于稳定。图3为平均摩擦系数随位移幅值的变化。随着位移幅值的增加, 促进了两接触体之间的相对运动, 摩擦系数也逐渐增大。微动位移幅值的不同导致界面间相对运动存在差异, 进而影响磨损颗粒在界面间的运动分布行为。

2.2 磨痕表面形貌

微动磨损过程中磨屑的形成和溢出显著影响着摩擦系数, 摩擦系数曲线的波动又体现表面的损伤程度。利用扫描电子显微镜(SEM)二次电子(SE)、背散射电子(BSE)和激光共聚焦显微镜(LCSM)对不同位移幅值下磨痕表面进行观察所得形貌如图4所示。从第1列 SEM-SE 和第2列 BSE 形貌可知: 随位移幅值增大, 磨痕表面凹凸不平, 粗糙度逐渐增大。小位移下合金表面的微动主要以弹性变形来实现, 易于形成中心粘着、边缘微滑的部分滑移区^[15]。中心表面层粘着撕裂产生的片状脱层^[16,17], 沿垂直于微动的方向堆砌成“脊”。随位移幅值的增大, 接触中心氧化变黑, 大量磨屑沿微动方向分散于合金表面, 如图4b和4c所示。当位移幅值增大到 100 μm 时, 新生和滞留的磨屑在溢出接触区时擦伤合金表面形成大量沿微动方向的犁沟^[18-20], 嵌入犁沟的磨屑最终沿微动方向聚集成“脊”。从图4中第3列的 LCSM 三维表面形貌可知, 位移幅值的增大, 加速了表面磨损和材料损失, 不断增加的表面裸露区为磨屑的形成提供源可能。

2.3 磨痕表面轮廓和磨损量

图5为 TC4 合金磨痕轮廓和磨损量随位移幅值的

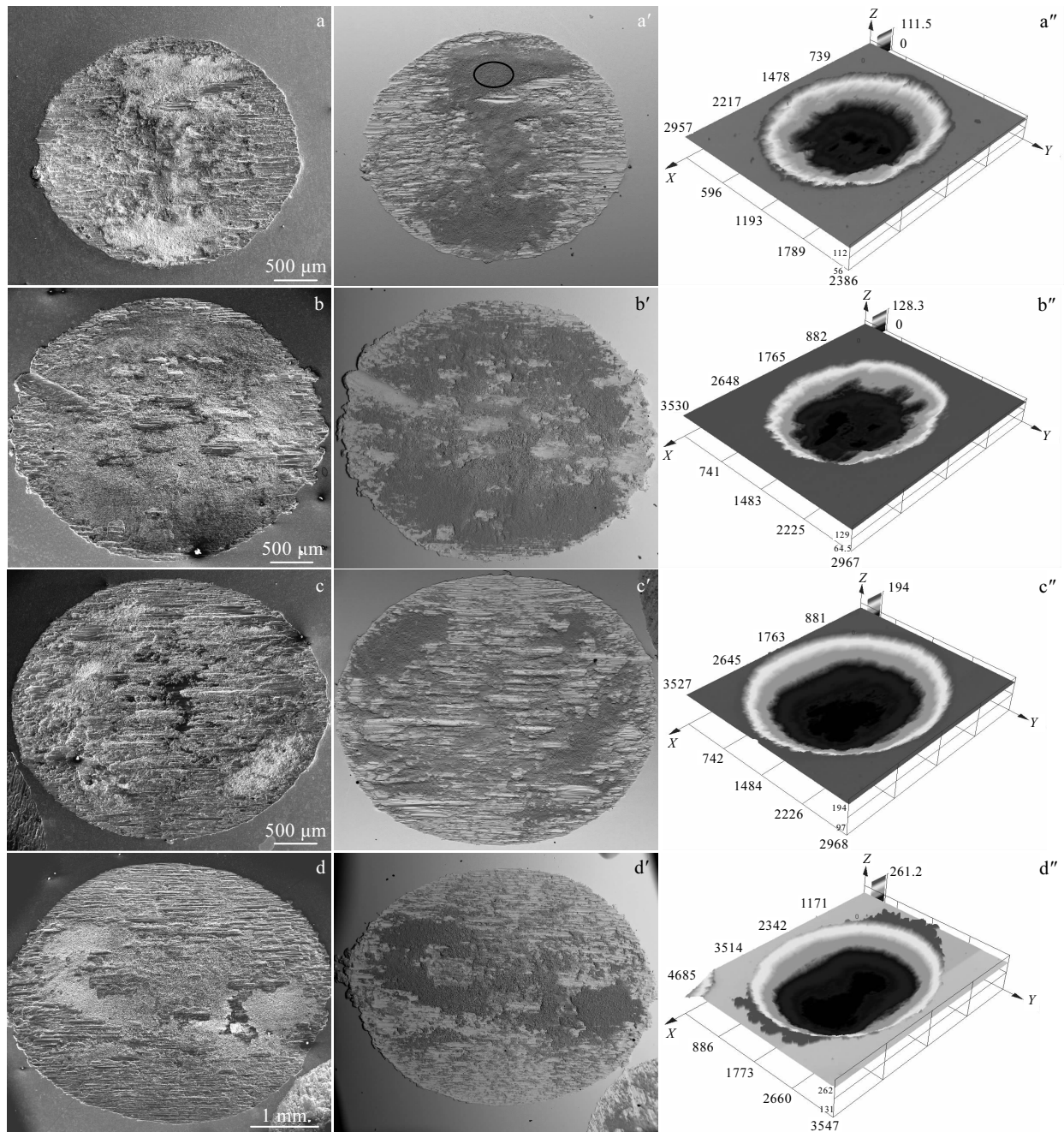


图 4 不同位移幅值下 TC4 合金的微动磨痕形貌

Fig.4 SEM-SE (a~d), SEM-BSE (a'~d') and LCSM (a''~d'') images of the worn scars for TC4 alloy at various displacement amplitudes: (a, a', a'') 20 μm , (b, b', b'') 45 μm , (c, c', c'') 65 μm , and (d, d', d'') 100 μm

变化。从图 5a 中轮廓曲线可知, 随位移幅值的增大, 磨痕开口宽度变化较小, 但深度增加显著。小位移下的接触重叠区较小, 中心粘着撕裂形成较深的凹坑; 随着位移幅值的增大, 表面片状脱层经挤压碾碎形成的磨损颗粒于界面间经历动态的产生和溢出, 此时中心和边缘的粗糙度趋于一致; 当位移幅值增大到 100 μm 时, 材料损失和表面恶化加快, 轮廓曲线深度明显

增大。结合图 5b 所示 TC4 合金微动磨损量变化可知, 磨损体积量随位移幅值而增大。位移幅值小于 65 μm 时, 增速较缓, 体积损失较小; 当位移幅值增大到 100 μm , 一方面扩大了接触重叠区, 使得合金裸露表面增多, 为产生更多的磨屑提供可能, 另一方面增大的相对运动增加了表面塑性变形和形成磨屑的推动力, 两者共同作用下体积损失量最大。

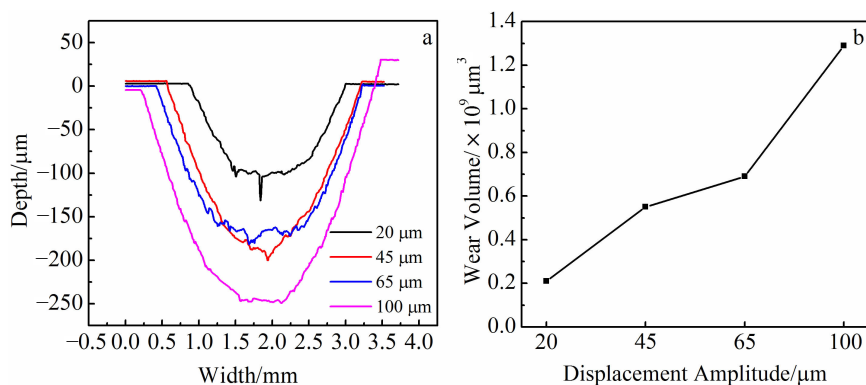


图5 TC4 合金在不同位移幅值下磨痕表面轮廓和磨损体积的变化

Fig.5 Evolution of worn surface profiles (a) and wear volumes (b) for TC4 alloy at various displacement amplitudes

2.4 损伤分析

区别于其他表面运动,微动最显著的特点是可形成不同特性的磨屑和微动斑。图6为TC4合金在4种位移幅值下磨痕表面能谱(EDS)Ti和O元素分析结果。随着位移幅值的增大,磨屑在接触区域的运动分布行为经历了图6a中沿微动的垂直聚集,过渡到图6b和6c中平铺于接触表面,最终形成图6d中沿平行于微动方向的水平聚集,Ti元素富集的暗区分布随位移幅值增大发生了方向性变化;相对运动的增大促进了环境中的氧元素渗入接触区,与已形成的合金化磨损颗粒发生氧化,产生硬度较大的氧化磨屑,表现为O元素富集区随位移幅值增大更加清晰。进一步检测

20 μm下片状脱层区成分,对图4a'中黑色圆圈区进行电子探针(EPMA)检测数据如图7所示,TC4合金与GCr15钢球在此参数条件下微动磨损产生氧化的片状脱层。随着相对运动的增加,氧元素易于被微动夹带进入接触界面,促进合金化磨损颗粒的氧化。对不同位移幅值条件下界面间的磨屑进行微观观察如图8所示,随着位移的增大,磨损颗粒由起初的片状剥落逐渐发展成为尺寸较小的颗粒,在100 μm条件下嵌入表面划伤犁沟。

通过以上对TC4合金与GCr15钢球微动摩擦磨损特性参数和磨损表面形貌分析检测可知,位移幅值对磨屑颗粒在界面间的行为产生显著影响。随着位移幅

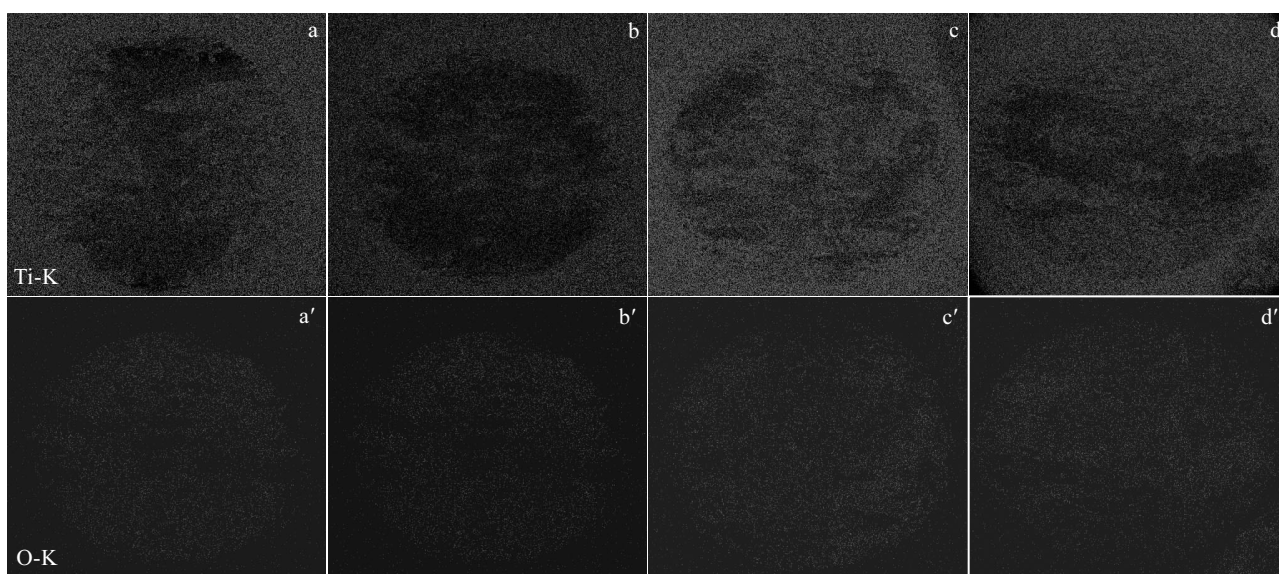


图6 TC4 合金在不同位移幅值下磨痕形貌相应 Ti、O 元素分布

Fig.6 Corresponding titanium and oxygen distributions of worn surface for TC4 alloy at different displacement amplitudes:

(a, a') 20 μm, (b, b') 45 μm, (c, c') 65 μm, and (d, d') 100 μm

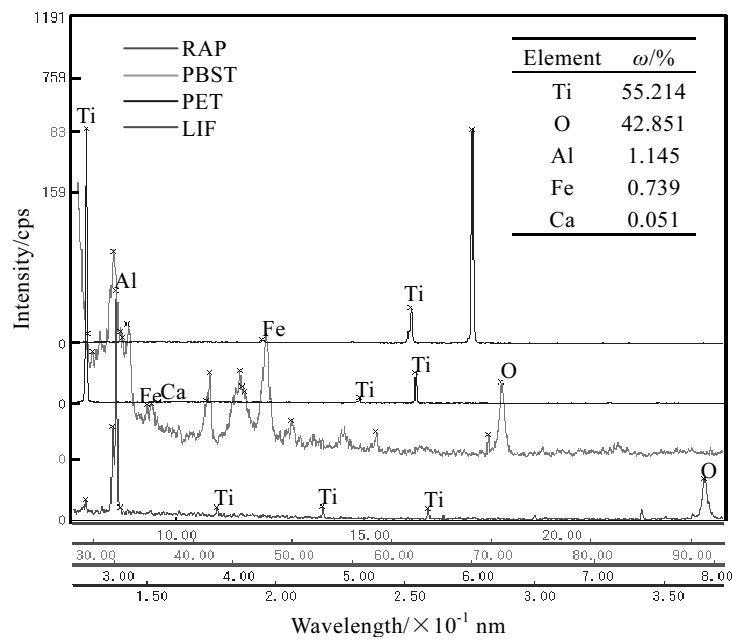


图 7 TC4 合金在位移幅值 20 μm 条件下微动磨痕表面 EPMA 检测

Fig.7 EPMA examination of the fretted surface for TC4 alloy at displacement amplitude of 20 μm

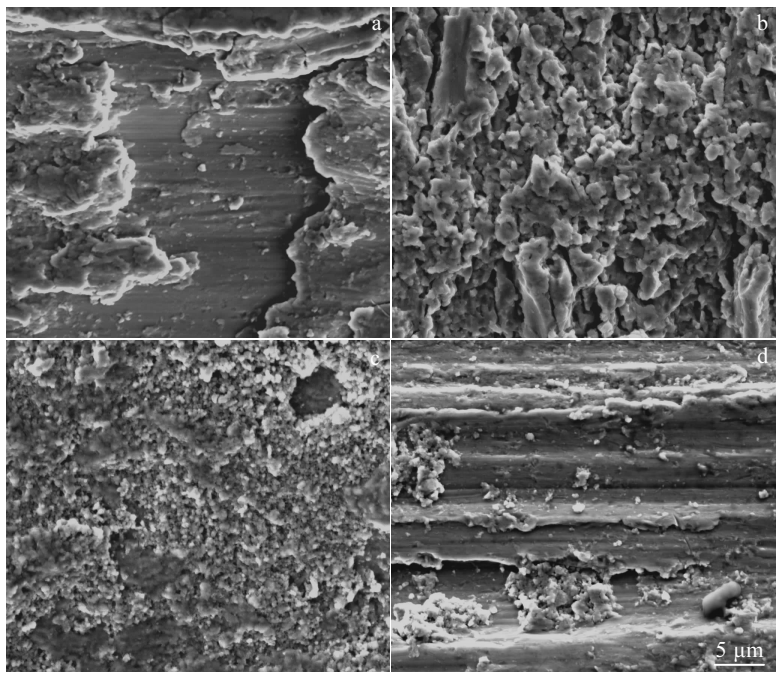


图 8 不同位移幅值条件下磨屑形貌

Fig.8 SEM images of wear debris at various displacement amplitudes: (a) 20 μm , (b) 45 μm , (c) 65 μm , and (d) 100 μm

值的增大,接触界面间形成的磨屑不仅在形状尺寸上发生变化,其运动分布行为也存在差异,进而影响了微动损伤机制。小位移幅值下的微动损伤机制主要是粘着磨损为主,中等位移幅值下是磨粒磨损伴随轻微粘着,较

大位移幅值下磨损机制则是磨粒磨损伴随氧化磨损。

3 结 论

1) 位移幅值显著影响着磨屑在接触界面的运动

分布。小位移下中心粘着撕裂的片状脱层沿垂直于微动的方向聚集成“脊”，中等位移下磨屑颗粒沿平行于微动的方向分散于接触区，较高位移幅值下团簇状磨屑沿平行于微动的方向聚集成“脊”。

2) 磨屑在界面间的运动分布行为影响着摩擦磨损特性参数。小位移下沿垂直于微动方向聚集的薄片状磨屑成为运动阻力，摩擦系数增大；中等位移下形成的大量磨屑颗粒分散于接触区，增大了接触面积，摩擦力和摩擦系数趋于平稳；较高位移下氧化磨屑易于溢出接触中心，沿平行于微动的方向聚集，摩擦系数、磨损量和磨痕轮廓深度等均显著增大。

3) 磨屑在界面间的运动分布行为影响着微动损伤机制。小位移幅值下损伤机制是粘着磨损为主，中等位移幅值下是磨粒磨损伴随轻微粘着，较大位移幅值下则是磨粒磨损伴随氧化磨损。

参考文献 References

- [1] Blanchard P, Colombie P, Pellerin V *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1991, 22(7): 1535
- [2] Hager Jr C H, Sanders J H, Sharma S. *Wear*[J], 2006, 260(4-5): 493
- [3] Budinski K G. *Wear*[J], 1991, 151(2): 203
- [4] Bahadur S, Yang C N. *Wear*[J], 1996, 196(1-2): 156
- [5] Nowell D, Dini D, Hills D A. *Engineering Fracture Mechanics* [J], 2006, 73(2): 207
- [6] Sauger E, Ponnsonnet L, Martin J M *et al. Tribology International*[J], 2000, 33(11): 743
- [7] Long M, Rack H J. *Wear*[J], 2001, 249(1-2): 157
- [8] Rigney D A, Hirth J P. *Wear*[J], 1979, 53(2): 345
- [9] Hintikka J, Mäntylä A, Vaara J. *Tribology International*[J], 2019, 131: 73
- [10] Iwabuchi A. *Wear*[J], 1991, 151(2): 301
- [11] Varenberg M, Halperin G, Etsion I. *Wear*[J], 2002, 252(11-12): 902
- [12] Hintikka J, Lehtovaara A, Mäntylä A. *Tribology International*[J], 2016, 94: 633
- [13] Mulvihill D M, Kartal M E, Olver A V. *Wear*[J], 2011, 271(5-6): 802
- [14] Berthier Y, Vincent L, Godet M *et al. Tribology International* [J], 1989, 22(4): 235
- [15] Zhu M H, Zhou Z R. *Tribology International*[J], 2011, 44(11): 1378
- [16] Suh N P. *Wear*[J], 1973, 25(1): 111
- [17] Sauger E, Fouvry S, Ponnsonnet L *et al. Wear*[J], 2000, 245(1-2): 39
- [18] Iwabuchi A, Hori K, Kubosawa H. *Wear*[J], 1988, 128(2): 123
- [19] Jiang J R, Stott F H, Stack M M. *Tribology International*[J], 1998, 31(5): 245
- [20] Chen G X, Zhou Z R. *Wear*[J], 2001, 250: 665

Distribution of the Wear Particles for TC4 Alloy in Fretting

He Yanni¹, Yu Shurong¹, Li Shuxin², Shao Chen¹, Chen Qiang¹

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To have a better understanding of fretting wear for titanium alloys, the effect of wear particles distribution on coefficient of friction, wear volume, surface topography and damage mechanisms at various displacement amplitudes was investigated. The results show that the displacement amplitude has a significant influence on the distribution of the fretting wear particles. The “flake-like” delamination formed by the central adhesive tear is stacked into a “ridge” in a direction perpendicular to the fretting at a relatively low fretting-amplitude. At a medium amplitude, the debris particles are scattered on the contact surface. When the amplitude is even increased, “cluster-like” debris are accumulated into a “ridge” parallel to the direction of the fretting. The various distribution of the wear particles leads to the change in the wear mechanisms from the adhesion to abrasion with slight adhesion, and finally to the abrasion accompanied with the oxidative wear.

Key words: TC4 alloy; fretting wear; wear particles; displacement amplitudes; distribution

Corresponding author: Yu Shurong, Ph. D., Professor, College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973728, E-mail: yusr@lut.com