

# 微观组织特征对模拟海水中搅拌摩擦加工 Ti-6Al-4V 合金腐蚀磨损性能的影响

蒋璐瑶<sup>1</sup>, 郭勇义<sup>1</sup>, 黄伟九<sup>1a,2</sup>, 刘成龙<sup>1</sup>, 陈琛辉<sup>1</sup>

(1.重庆理工大学 a.材料科学与工程学院, b.模具技术重庆市重点实验室, 重庆 400054;  
2.重庆文理学院 新材料技术研究院, 重庆 402160)

**摘 要:** **目的** 研究搅拌摩擦加工细晶 Ti-6Al-4V 合金在模拟海水中微观组织特征与腐蚀磨损性能的关系。**方法** 通过控制搅拌摩擦加工工艺 (200 r/min-25 mm/min 和 200 r/min-50 mm/min) 获得具有等轴细晶组织和片层状  $\alpha$  相组织的 Ti-6Al-4V 合金。使用往复磨损试验机和电化学工作站, 在模拟海水中对 Ti-6Al-4V 合金进行腐蚀磨损实验, 获得摩擦系数-时间曲线、动电位极化曲线等一系列摩擦磨损和电化学曲线。使用激光共聚焦显微镜和扫描电子显微镜对磨痕进行观察, 计算磨损率, 并分析磨损机制。通过计算腐蚀磨损分量研究材料损耗的主要影响因素。**结果** 在腐蚀磨损中, 因表面氧化膜被破坏, 具有细晶结构的 Ti-6Al-4V 合金晶界面积大, 腐蚀电位降低, 但腐蚀电流密度小于原始试样。搅拌摩擦加工试样在腐蚀磨损实验中的摩擦系数更稳定, OCP 条件下, 具有细小等轴晶组织的搅拌摩擦加工 Ti-6Al-4V 合金的摩擦系数最低, 磨损率较原始试样低 20%。片层组织特征 Ti-6Al-4V 合金因微观力学性能各向异性而影响对磨球的行进路线, 犁沟较混乱。原始样品的磨损机制主要为磨粒磨损和腐蚀磨损, 搅拌摩擦加工后, 样品在模拟海水中的磨损机制为磨粒磨损、分层磨损和腐蚀磨损。**结论** 等轴细晶组织 Ti-6Al-4V 合金在模拟海水中表现出低的磨损率和低的摩擦系数, 该组织特征具有最优的耐腐蚀磨损性能。

**关键词:** Ti-6Al-4V 合金; 搅拌摩擦加工; 微观组织; 摩擦磨损; 腐蚀

**中图分类号:** TH117; TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0209-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.031

## Effect of Microstructure on Tribocorrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloy by Friction Stir in Synthetic Seawater

JIANG Lu-yao<sup>1</sup>, GUO Yong-yi<sup>1</sup>, HUANG Wei-jiu<sup>1a,2</sup>, LIU Cheng-long<sup>1</sup>, CHEN Chen-hui<sup>1</sup>

(1.a.School of Materials Science and Engineering, b. Chongqing Key Laboratory of Mold Technology,  
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2.Research Institute for New Materials Technology,  
Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

收稿日期: 2019-01-10; 修订日期: 2019-02-19

Received: 2019-01-10; Revised: 2019-02-19

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目 (cstc2015jcyjBX0048); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项 (cstc2017shmsA130047); 国家“万人计划”科技创新领军人才项目

**Fund:** Basic and Frontier Research Project in Chongqing of China (cstc2015jcyjBX0048); Social Undertakings and People's Livelihood Guarantee Scientific and Technological Innovation Program of Chongqing (cstc2017shmsA130047); National "Ten Thousand Plan" Scientific and Technological Innovation Leading Talent Project

作者简介: 蒋璐瑶 (1990—), 女, 博士后, 主要研究方向为金属材料表面工程。

**Biography:** JIANG Lu-yao (1990—), Female, Post-doctor, Research focus: materials surface engineering for metals and alloys.

通讯作者: 黄伟九 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面工程。邮箱: huangweijiu@cqwu.edu.cn

**Corresponding author:** HUANG Wei-jiu (1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: materials surface engineering. E-mail: huangweijiu@cqwu.edu.cn

**ABSTRACT:** The work aims to study the relationship between microstructure and tribocorrosion resistance of fine grain Ti-6Al-4V alloy by friction stir in synthetic seawater. Ti-6Al-4V alloy with equiaxed grains and fine lamellar sub-structure  $\alpha$  phase was obtained by controlling the stir friction processes (200 r/min-25 mm/min and 200 r/min-50 mm/min). Tribocorrosion tests were conducted to Ti-6Al-4V alloy with reciprocating tribometer and electrochemical workstation in the synthetic seawater to obtain the coefficient of friction-time curves, potentiodynamic polarization curves, etc. Laser confocal microscope and field emission scanning electron microscope were used to observe the wear scar, calculate the wear rate and analyze the wear mechanism. The factors mainly including the material wear was investigated by calculating the corrosion components. During corrosion, the oxide layers of samples were destroyed and the Ti-6Al-4V alloy with fine grains occupied larger boundaries, the corrosion potentials decreased and corrosion current densities were smaller than that of original samples. Coefficient of friction curves of FSPed samples were stable. The FSPed sample with fine equiaxed grains showed the lowest COF and the wear rate after tribocorrosion test decreased by 20% compared with that of original samples. The FSPed Ti-6Al-4V alloy with fine lamellar sub-structure had chaotic furrows due to the influence of anisotropy of micromechanical properties on the travel route of grinding balls. The wear mechanisms of original samples were abrasive wear and corrosion wear, while those of FSPed samples in synthetic seawater were abrasive wear, delamination and corrosion wear. The FSPed Ti-6Al-4V alloy with fine equiaxed grains shows lower wear rate and low friction coefficient during tribocorrosion tests, so the structure characteristics have the best corrosion and wear resistance.

**KEY WORDS:** Ti-6Al-4V alloy; friction stir processing; microstructure; wear and tribology; corrosion

Ti-6Al-4V 钛合金具有高比强度、良好的机械性能和耐腐蚀性能,作为结构材料被广泛运用于海洋环境及极端条件服役的零部件中<sup>[1-2]</sup>。钛合金良好的耐腐蚀性能来源于表面形成的致密  $\text{TiO}_2$  钝化膜。但是,由于钛合金的加工硬化率低、塑性剪切抗力低、表面氧化膜较薄、抗划擦性能差等缺点,导致钛合金零部件在服役过程中易因腐蚀和磨损交互作用而失效。钛合金的腐蚀磨损行为降低了部件的整体寿命并限制了其应用范围,因此关注并改善钛合金的腐蚀磨损性能对钛合金结构件在极端条件下的使用具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

与粗晶合金相比,细晶钛合金通常具有更高的力学性能和更好的耐磨性能<sup>[5]</sup>。Stolyarov 等人<sup>[6]</sup>通过等通道转角挤压(ECAP)制备出细晶纯钛,并测试了其摩擦学性能,结果表明,剧烈塑性变形获得的细晶纯钛具有良好的耐磨性能,细晶组织可有效抑制粘着磨损发生。搅拌摩擦加工(FSP)是一种剧烈塑性变形(SPD)方式,加工中利用搅拌头旋转行进对材料进行强剪切变形,实现金属材料组织细化。研究证明,FSP表面改性可改善钛合金表面结构,提高其耐磨性<sup>[7-8]</sup>。通过搅拌摩擦加工细化钛合金组织,调控合金中变形储存能,可有效降低粘着磨损,抑制磨粒磨损,提高钛合金耐磨性能<sup>[9]</sup>。Davoren 等人<sup>[10]</sup>的研究表明,对于搅拌摩擦焊 Ti-6Al-4V 钛合金焊接接头,搅拌区具有最优的耐腐蚀磨损性能。

搅拌摩擦加工中,通过控制搅拌头旋转速度和行进速度,可以在较大范围内控制材料的加工温度。Ti-6Al-4V 钛合金作为  $\alpha+\beta$  型钛合金,当材料温度达到 975~995  $^{\circ}\text{C}$  时将发生相变<sup>[11]</sup>。搅拌摩擦加工中,

Ti-6Al-4V 钛合金固态相变影响变形后 Ti-6Al-4V 合金的微观组织结构<sup>[12-13]</sup>。金属的腐蚀磨损受材料物理、化学、机械性能综合作用,材料的微观组织特征应是影响腐蚀磨损性能的重要因素之一。

因此,本研究将钛合金的腐蚀磨损性能与其微观组织特征相联系,以 Ti-6Al-4V 钛合金为研究对象,通过搅拌摩擦加工工艺的控制,获得具有不同微观组织特征的 Ti-6Al-4V 钛合金,并研究其摩擦磨损性能。建立 Ti-6Al-4V 钛合金微观组织结构与摩擦磨损性能之间的联系,并评价搅拌摩擦加工 Ti-6Al-4V 钛合金在模拟海水中的腐蚀磨损性能。

## 1 实验材料加工及研究方法

### 1.1 搅拌摩擦加工处理

实验采用 6 mm 厚度 Ti-6Al-4V 热轧钛合金板材为原始材料,钛合金中合金元素含量(质量分数)为: 5.54% Al、4.51% V、0.10% Fe、0.23% Si。加工前进行 600  $^{\circ}\text{C}$  退火,保温时间 120 min,以释放内应力,消除加工硬化。搅拌摩擦加工处理选用 W-25%Re 合金搅拌头。搅拌头轴肩直径为 15 mm,圆锥形搅拌针底部和顶部直径分别为 8 mm 和 3 mm,搅拌针长度为 2 mm。搅拌摩擦加工中倾斜角为 2.5 $^{\circ}$ 。搅拌头转速为 200 r/min,行进速度为 25 mm/min 和 50 mm/min。钛合金高温易氧化,因此搅拌摩擦加工处理过程中全程使用氩气进行保护。

### 1.2 腐蚀磨损实验

腐蚀磨损实验样品尺寸为 20 mm×8 mm×6 mm,

表面依次使用 400#—1200# 水磨砂纸进行打磨。摩擦磨损实验在往复磨损试验机（兰州化学物理研究所，MFT-4000）上进行，选取直径 6 mm 的 AISI-52100 钢球（硬度 HRC60-62）作为对偶。往复磨损频率为 2 Hz，行程长度为 10 mm，载荷为 10 N，加载时间为 60 min。试样固定于实验池中央进行测试，溶液为模拟海水（ASTM D1141-98），实验温度为 25 ℃。将样品接入三电极体系，使用电化学工作站（科思特，CS1500）采集样品在模拟海水中腐蚀磨损交互作用下的电化学数据，使用饱和甘汞电极（SCE）为参比电极，铂丝为辅助电极。腐蚀磨损实验的平行试样个数为 3 个。

### 1.3 微观组织表征

合金样品显微组织使用场发射扫描电镜（Zeiss Sigma HD）观察并进行 EBSD 标定，样品通过电解抛光方式制备：使用 200#—2000# 砂纸依次研磨待测样品，在体积比为 1:9 的高氯酸甲醇溶液中对样品表面进行电解抛光，抛光参数为电压 20 V、电流 1 A、时间 100 s、温度 -30 ℃。EBSD 标定原始数据结果使用 Channel 5 进行处理。样品磨痕截面面积使用激光共聚焦显微镜（OLYMPUS, LEXT OLS4000）测量。材料的磨损体积由磨痕截面面积乘以磨痕长度计算得出。磨痕形貌使用场发射扫描电镜进行观察表征并测量 EDS（Oxford X-max）。搅拌摩擦加工前后样品 XRD 物相测试使用 Panalytical Empyrean，测试角度

为 20°~80°。

## 2 结果与讨论

### 2.1 搅拌摩擦加工前后 Ti-6Al-4V 合金微观组织结构

图 1 为搅拌摩擦加工前后样品 SEM 背散射图像。原始轧制退火态 Ti-6Al-4V 合金，晶粒沿轧制方向排列，合金组织主要为等轴  $\alpha$  相， $\beta$  相位于  $\alpha$  相晶界处。经过搅拌摩擦加工处理后，材料明显细化。经过 200 r/min-25 mm/min 搅拌摩擦加工得到的 Ti-6Al-4V 合金，晶粒特征为等轴晶晶粒，平均晶粒尺寸为 1.0  $\mu\text{m}$ 。搅拌头行进速度提高至 50 mm/min，搅拌摩擦加工样品的组织特征为片层状  $\alpha$  相结构，研究表明互相平行的片层为亚晶粒结构<sup>[12]</sup>。片层状  $\alpha$  亚晶粒的长度为 1~10  $\mu\text{m}$ ，宽度为 0.3~0.5  $\mu\text{m}$ 。分别将原始试样、200 r/min-25 mm/min 加工试样、200 r/min-50 mm/min 加工试样命名为 PM、FSP-1、FSP-2。搅拌摩擦加工中，通过搅拌头转速和行进速度控制可调控金属样品变形及冷却时的热力耦合条件，从而影响最终加工后微观组织特征。FSP-1 样品变形区在冷却过程中持续受到搅拌头尾流区剪切力作用，再结晶形成细小等轴晶粒。FSP-2 样品因加工时行进速度快，搅拌头的快速远离使变形后样品处于静态冷却状态，发生  $\beta \rightarrow \alpha$  相变，形成层状组织。

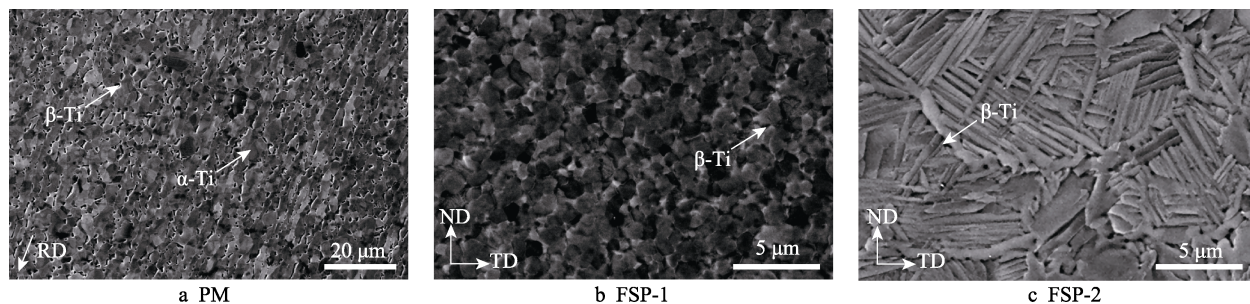


图 1 搅拌摩擦加工前后样品 SEM 照片  
Fig.1 SEM images of the samples before and after FSP

图 2 为搅拌摩擦加工前后样品的 XRD 图谱。经过标定，Ti-6Al-4V 合金搅拌摩擦加工前后的物相组成均为  $\alpha$ -Ti 和少量  $\beta$ -Ti。对比原始试样，搅拌摩擦加工后，样品  $\beta$ -Ti 的峰值强度有所增加。加工中，因温度升高相变形成的  $\beta$  相，在冷却速度较快的条件下未完全转变为  $\alpha$  相，使组织中保留有残余  $\beta$  相，但总量仍较低。根据图 1b、c 中的 SEM 组织，发现纳米尺寸  $\beta$ -Ti 分布在  $\alpha$  相晶界处。

图 3 为两种搅拌摩擦加工工艺处理后 Ti-6Al-4V 合金  $\alpha$  相 EBSD 结果。IPF 图中小角度晶界范围为 3°~15°（白色晶界），大于 15° 的晶界被认定为大角度晶界（黑色晶界）。IPF 图显示 FSP-1 晶粒为细小

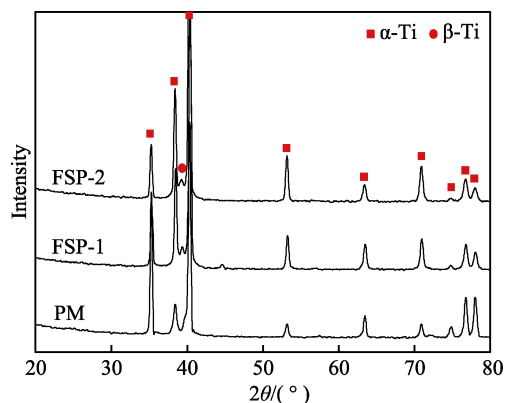


图 2 搅拌摩擦加工前后样品 XRD 结果  
Fig.2 XRD patterns of the samples before and after FSP

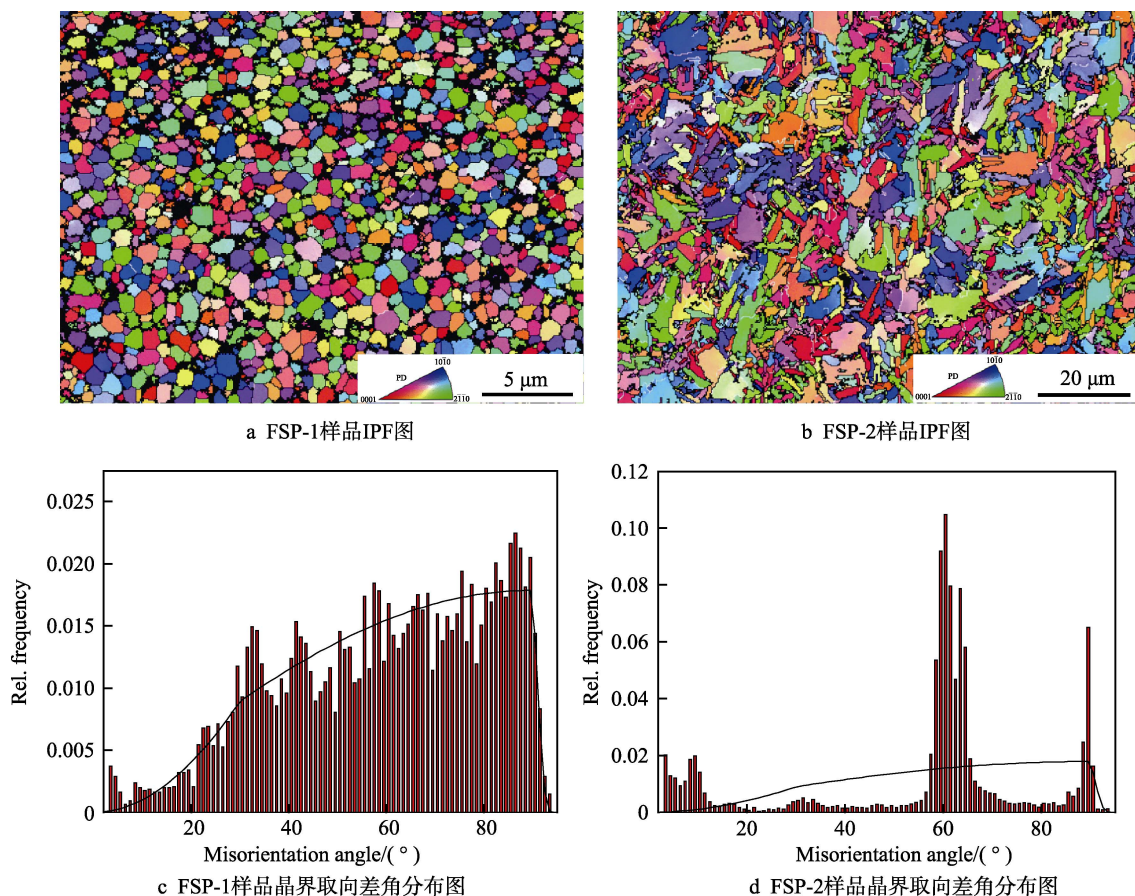
图3 搅拌摩擦加工 Ti-6Al-4V 合金 EBSD 结果<sup>[16]</sup>

Fig.3 EBSD results of FSPed Ti-6Al-4V alloys: (a) IPF map of FSP-1; (b) IPF map of FSP-2; (c) Misorientation angle distributions of FSP-1; (d) Misorientation angle distributions of FSP-2<sup>[16]</sup>

等轴晶,无明显织构形成(如图 3a)。图 3b 表明 FSP-2 样品在  $\beta \rightarrow \alpha$  相变后,晶粒呈不规则形状,未观察到明显片层状结构,结合 SEM 结果可以确定,相变晶粒中互相平行的层状  $\alpha$  相应为亚晶组织,这在相关研究中已被证明<sup>[14]</sup>。搅拌摩擦加工样品 IPF 图中,晶界取向差角如图 3c、d 所示。对比随机分布晶界取向差分布线(图 3c、d 实线),FSP-1 样品中等轴晶粒为随机分布,FSP-2 样品的取向差角在  $10^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  处存在明显的峰。 $\beta \rightarrow \alpha$  相变后,因为两相存在严格的 Burgers 取向关系,同一  $\beta$  晶粒内会存在多个  $\alpha$  相变体,这些不同取向的  $\alpha$  相变体之间存在五种取向关系,即  $10.5^\circ \langle 0001 \rangle$ 、 $60^\circ \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 、 $60.8^\circ \sim \langle 12\bar{3}1 \rangle$ 、 $63.3^\circ \sim \langle 44\bar{8}3 \rangle$  和  $90^\circ \sim \langle 12\bar{3}0 \rangle$ <sup>[15]</sup>。 $\alpha$  相变体角度与 FSP-2 样品取向差角分布峰一致,因此 FSP-2 样品中存在大量  $\beta \rightarrow \alpha$  相变后产生的特殊晶界。

## 2.2 模拟海水中动静态极化曲线测量

图 4 为不同组织特征的搅拌摩擦加工 Ti-6Al-4V 合金静态和动态动电位极化曲线。不同测试条件下样品的腐蚀电位及腐蚀电流密度如表 1 所示。静置条件下,搅拌摩擦加工样品表现出较好的耐腐蚀性能,腐蚀电位提高,腐蚀电流密度降低,说明搅拌摩擦加工

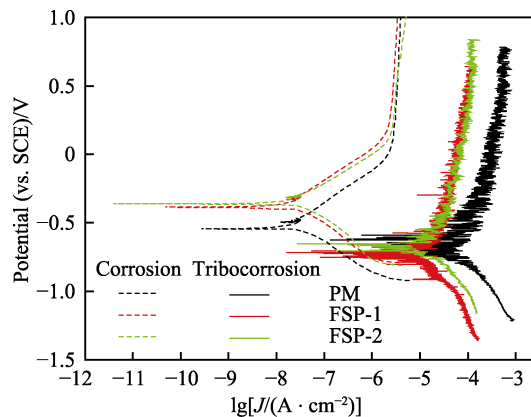


图4 模拟海水溶液中 Ti-6Al-4V 合金动、静态下动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of samples with and without a condition of sliding wear in synthetic seawater

表 1 滑动摩擦加载前后样品电化学参数  
Tab.1 Electrochemical parameters of samples with and without sliding wear test

Samples	Corrosion potential $E_c/V$	Corrosion current density $J_c/(\times 10^{-8} A \cdot cm^{-2})$	Tribocorrosion potential $E_t/V$	Tribocorrosion current density $J_t/(\times 10^{-5} A \cdot cm^{-2})$
PM	-0.53	4.07	-0.67	8.41
FSP-1	-0.38	3.15	-0.72	2.00
FSP-2	-0.35	2.85	-0.63	2.45

细晶结构有利于形成性能优良的氧化膜,提高钛合金的耐腐蚀性能。在往复摩擦力加载下,材料表面处于不稳定状态,动电位极化曲线产生波动。钛合金的优良耐腐蚀性主要来源于表面形成的致密  $\text{TiO}_2$  氧化膜,当材料表面受摩擦力作用后,氧化膜被破坏,热力学腐蚀倾向增大,样品腐蚀电位负移,腐蚀电流密度值升高约 2 个数量级,在摩擦力作用下合金的耐腐蚀性能降低。晶界处原子排列紊乱,原子间距较大,更易腐蚀,因此具有随机取向等轴细晶组织特征的 FSP-1 样品在摩擦力作用下的腐蚀电位最低。FSP-2 中细小亚晶结构对钛合金基体的腐蚀倾向影响较小。搅拌摩擦加工样品的动态腐蚀电流密度小于原始钛合金,说明搅拌摩擦加工细晶结构 Ti-6Al-4V 合金在摩擦力作用下仍具有耐腐蚀性能,并且比粗晶钛合金在动态条件下的耐蚀性能高。

### 2.3 腐蚀磨损中开路电位及摩擦系数变化

图 5 显示了 TC4 钛合金磨损时开路电位 (OCP) 和摩擦系数随时间变化的曲线。开路电位在未加载摩

擦力时保持稳定,摩擦启动后,开路电位迅速下降,摩擦过程中开路电位随摩擦时间的延长而缓慢降低,并存在一定范围波动。摩擦结束后,开路电位值迅速上升至稳定状态。开路电位在摩擦过程中的变化规律与动、静态极化曲线分析相一致。摩擦力作用下钛合金表面氧化膜出现破损,使基体暴露于腐蚀液中,促进钛合金表面的腐蚀,导致电位下降,摩擦结束后,磨痕快速钝化,再次形成致密氧化膜抵抗腐蚀行为,开路电位迅速上升。摩擦系数曲线显示,PM 样品在摩擦力作用初期存在跑合阶段,摩擦系数快速上升,随着摩擦时间的延长,摩擦系数逐渐降低,最后趋于稳定,跑合阶段的摩擦系数大幅变化通常因为材料磨损机制在该阶段转变所致。研究表明,粗晶钛合金易发生粘着磨损,随着表面晶粒细化和机械混合层的形成,磨损机制逐渐转变为磨粒磨损和温和氧化磨损等<sup>[17]</sup>。搅拌摩擦加工样品的摩擦系数曲线无明显跑合阶段,摩擦系数更加稳定。PM、FSP-1、FSP-2 样品在摩擦磨损稳定阶段的摩擦系数分别为 0.30、0.26、0.29。FSP-1 在模拟海水中具有最低的摩擦系数。

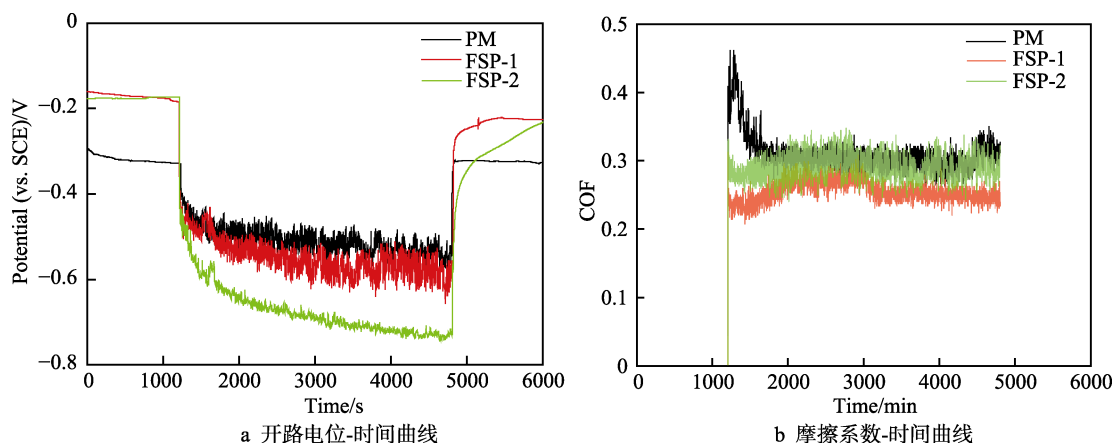


图 5 模拟海水溶液中 Ti-6Al-4V 合金开路电位-时间及摩擦系数-时间曲线  
Fig.5 Evolution of OCP (a) together with COF (b) of Ti-6Al-4V alloy in synthetic seawater

### 2.4 模拟海水中耐腐蚀磨损性能及磨损机制

图 6 为模拟海水中不同微观组织特征 Ti-6Al-4V 样品在 OCP 条件下的磨损率,对比可知,搅拌摩擦加工后的细晶样品的磨损率低于原始组织。具有等轴晶结构的 FSP-1 样品的磨损率最低。经过搅拌摩擦加工后, FSP-1 样品在模拟海水中的磨损率比原始 Ti-6Al-4V 合金降低了 20%左右。

图 7 显示了 Ti-6Al-4V 合金磨痕表面(上部)和未磨损表面(下部)的 SEM 图片和 EDS 结果。OCP 条件下样品磨痕显示出大量与滑动方向平行的凹槽,该特征为典型的磨粒磨损机制下产生的犁沟<sup>[17]</sup>。原始样品的犁沟深度较搅拌摩擦加工样品更深。值得注意的是, FSP-2 样品中的犁沟与滑动方向存在一定角度且连续性较差,该现象可能与 Ti-6Al-4V 合金片层亚晶结构微观组织特征有关, FSP-2  $\beta \rightarrow \alpha$  相变晶粒中具

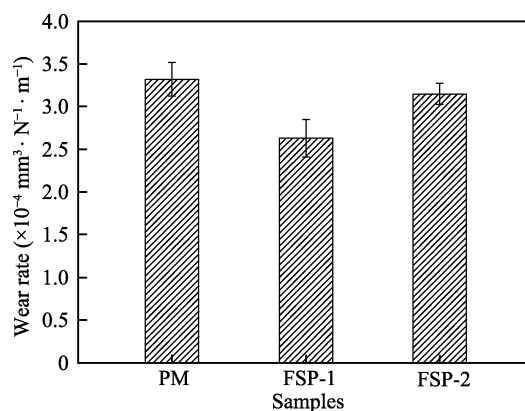


图 6 OCP 条件下 Ti-6Al-4V 合金在模拟海水中的磨损率  
Fig.6 Wear rate of the Ti-6Al-4V alloy at OCP in synthetic seawater

有互相平行的片层亚晶结构,不同晶粒之间片层分布方向不一致,使该样品在微观尺度存在力学性能各向

异性, 滑动时, 对偶球在样品表面所受阻力不均匀, 导致磨痕轨迹产生偏移。O 元素在整个样品表面均有分布, 但磨痕表面的氧含量低于未磨损表面, 因为在摩擦作用下, 样品表面致密氧化层被移除, 裸露的新鲜表面将会被持续氧化。对比发现 FSP-1 磨痕表面和未磨损表面的 O 含量差异较小。对样品中特征区域进行 EDS 点扫描测试, 测试结果如表 2 所示。点 1、3、5 显示了未磨损区域 O 元素含量, FSP-1 样品中

未磨损区域 O 元素含量小于其他样品, 说明该样品生成的氧化膜较薄。在磨痕表面凹坑 (点 2) 和分层区域 (点 4 和点 6) 处检测到 Cl 和 S 元素, 说明该处发生点蚀。Ti-6Al-4V 合金经过摩擦力作用, 表面失去氧化层保护, 产生分层和材料剥离的区域存在大量微裂纹, 表面积增加, 腐蚀倾向增大。磨痕形貌显示, 搅拌摩擦加工样品表面分层情况更严重, 这也是导致摩擦磨损时腐蚀电位和开路电位较低的原因之一。

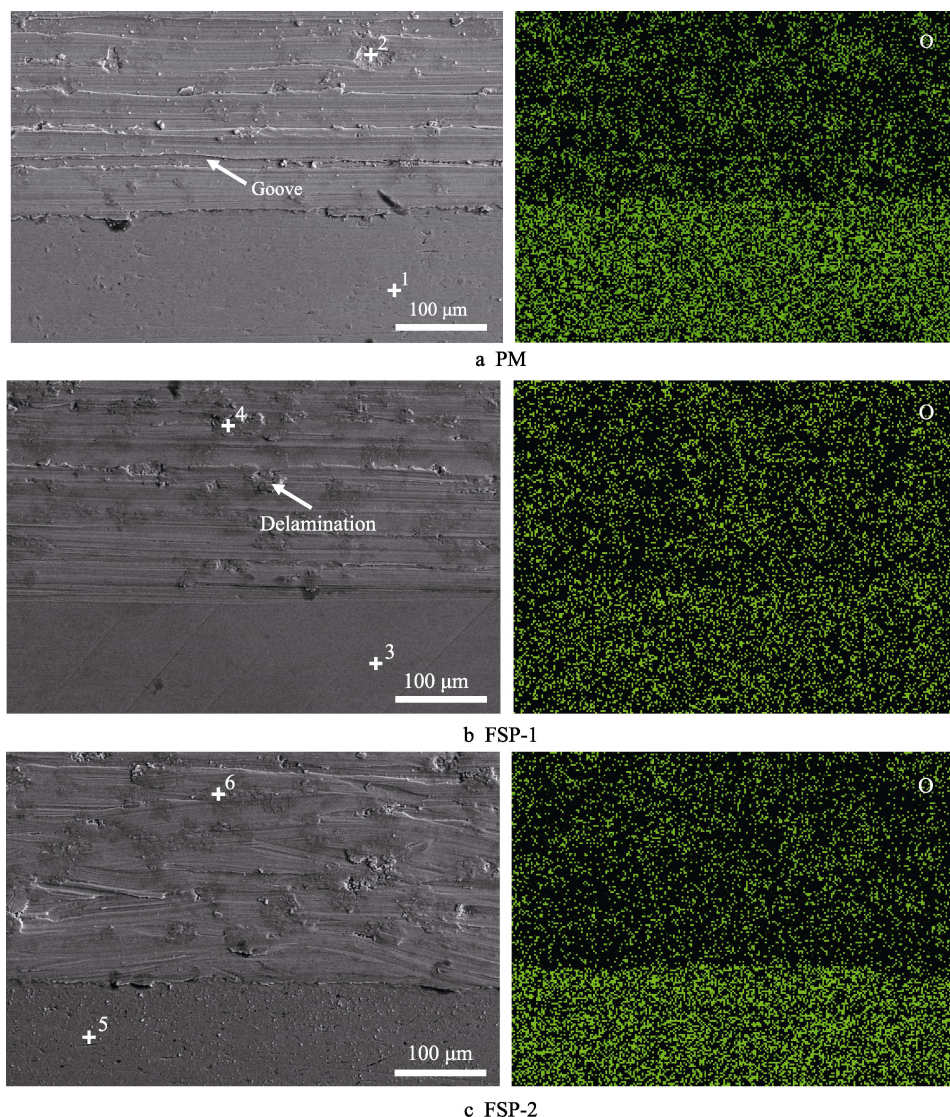


图 7 OCP 条件下 Ti-6Al-4V 合金磨痕 SEM 图片及 O 元素分布图

Fig.7 SEM images and O element mapping results of wear traces on Ti-6Al-4V alloy at OCP

表 2 图 7 中 EDS 点扫描结果  
Tab.2 EDS results in Fig.7

No.	wt. %				
	Ti	Al	O	Cl	S
1	72.74	5.56	21.71	0	0
2	80.50	5.91	12.48	0.96	0.15
3	79.86	6.21	13.86	0	0.06
4	79.83	6.25	12.38	1.07	0.47
5	70.63	4.69	24.59	0.09	0.01
6	79.75	6.45	12.64	0.88	0.29

## 2.5 腐蚀磨损交互作用

当腐蚀和摩擦共同作用于金属时, 在机械和电化学因素的共同作用下, 会产生复杂的反应并促进其失效, 因此腐蚀磨损是力学因素、化学因素、电化学因素及其交互作用的结果<sup>[18]</sup>。为了定量评价搅拌摩擦加工前后 Ti-6Al-4V 合金样品腐蚀磨损交互作用, 需对腐蚀磨损分量进行计算, 计算公式如下<sup>[19-20]</sup>:

$$V_t = V_c + V_m + \Delta V \quad (1)$$

其中,  $V_t$  为总磨损量,  $V_c$  为纯腐蚀量,  $V_m$  为纯磨损量,  $\Delta V$  为腐蚀磨损交互作用产生的磨损量。而腐蚀磨损交互作用磨损量  $\Delta V$  又可分为两个部分——腐蚀对磨损的促进量  $V_{cm}$  以及磨损对腐蚀的促进量  $V_{mc}$ , 即:

$$\Delta V = V_{cm} + V_{mc} \tag{2}$$

式中,  $V_m$  采用阴极保护法测定纯磨损量, 阴极保护电位为  $-1\text{ V}$ 。腐蚀作用产生的体积损失量  $V_{corr}$  可通过 Faraday 定理计算:

$$V_{corr} = \frac{J_{corr} t M}{n F \rho} \tag{3}$$

其中,  $t$  为腐蚀磨损持续时间,  $F$  为 Faraday 常数 ( $96\,500\text{ C/mol}$ ),  $\rho$  是 Ti-6Al-4V 合金密度,  $M$  为钛合金相对原子质量,  $n$  为钛元素化合价。

因为钛合金的耐腐蚀性极好, 浸泡  $1\text{ h}$  后, 合金的纯腐蚀量近似于  $0$ , 通过公式(3)—(4)计算可得  $V_{mc}$ , 根据公式(1)—(2)可计算出  $V_{cm}$ 。表 3 列出了搅拌摩擦加工前后 Ti-6Al-4V 合金在开路电位 (OCP) 和阳极钝化 ( $0.3\text{ V}$ ) 条件下的磨损分量。

$$V_{corr} = V_c + V_{mc} \tag{4}$$

表 3 搅拌摩擦加工前后 Ti-6Al-4V 合金腐蚀磨损分量及比例  
Tab.3 Components and the proportions of material loss in the Ti-6Al-4V alloy before and after FSP

Samples	Potential/V	$V_t/(\times 10^{-2}\text{ mm}^3)$	$V_m/(\times 10^{-2}\text{ mm}^3)$	$V_{mc}/(\times 10^{-2}\text{ mm}^3)$	$V_{cm}/(\times 10^{-2}\text{ mm}^3)$	$\Delta V/(\times 10^{-2}\text{ mm}^3)$	$\frac{\Delta V}{V_t}/\%$	$\frac{V_m}{V_t}/\%$
PM	OCP	23.9	16.1	0.5	7.3	7.9	32.8	67.4
	0.3	27.2	16.1	1.3	9.8	11.1	36.0	59.2
FSP-1	OCP	18.9	13.2	0.5	5.2	5.7	30.3	69.8
	0.3	21.2	13.2	0.8	7.2	8.0	37.8	62.3
FSP-2	OCP	22.7	19.0	0.2	3.5	3.7	16.3	83.7
	0.3	23.8	19.0	1.1	3.7	4.8	20.3	79.8

通过对腐蚀磨损过程中各分量的计算可以看到, 腐蚀磨损交互作用造成的材料损耗比例 ( $\Delta V/V_t$ ) 大于  $15\%$ 。Ti-6Al-4V 合金的纯磨损量占材料损耗比例 ( $V_m/V_t$ ) 高于  $50\%$ , 相对腐蚀耗损, 磨损是 Ti-6Al-4V 合金在模拟海水中的主要耗损方式。对比阴极保护条件下材料纯磨损量  $V_m$  值, FSP-1 试样的纯磨损量最低, 说明等轴细晶结构的 Ti-6Al-4V 合金具有较好的耐磨损性能。在由腐蚀磨损交互作用导致的材料损耗中, 样品的腐蚀分量 ( $V_{mc}$ ) 均较低, 虽然钛合金因氧化膜磨损等原因促进了腐蚀, 但腐蚀情况并不严重, 说明钛合金在磨损过程中持续快速形成氧化膜并阻碍腐蚀发生, 而因腐蚀引起的磨损量 ( $V_{cm}$ ) 占比较大。FSP-2 样品因  $V_{cm}$  较低, 腐蚀磨损交互作用占比最低。

具有等轴细晶结构的 FSP-1 耐磨性能最佳, 在摩擦力作用下发生轻微磨粒磨损和分层。FSP-2 样品的腐蚀磨损交互作用影响最小, 但因磨粒磨损作用较强, 在模拟海水中的磨损率高于 FSP-1 样品。综合考虑腐蚀、磨损和腐蚀磨损交互作用对 Ti-6Al-4V 合金在模拟海水中材料流失的影响, 磨损作用是主要因素。

### 3 结论

1) 模拟海水中 Ti-6Al-4V 合金在摩擦力作用下表面氧化膜破损, 腐蚀倾向升高。搅拌摩擦加工等轴细晶结构 Ti-6Al-4V 合金因具有高比例大角度晶界, 且钛基体活性大, 所以其腐蚀磨损电位降低, 腐蚀磨

损电流密度低于原始试样。

2) 搅拌摩擦加工 Ti-6Al-4V 合金在腐蚀磨损中以磨粒磨损为主要磨损机制, 摩擦力作用前期无明显跑合阶段, 在模拟海水中的摩擦系数较为稳定。细小等轴晶 Ti-6Al-4V 合金表现出最低的摩擦系数和磨损率。

3) 对于材料耗损, 细小等轴晶 Ti-6Al-4V 合金具有最低的纯磨损分量, 片层亚晶结构 Ti-6Al-4V 合金具有最低的腐蚀磨损交互分量。综合考虑腐蚀、磨损和腐蚀磨损交互作用对钛合金在模拟海水中材料流失的影响, 磨损作用为主要因素, 因此具有细小等轴晶 Ti-6Al-4V 合金具有最佳的耐腐蚀磨损性能。

### 参考文献:

[1] CHEN G, ZHANG G, YIN Q, et al. Microstructure evolution of electron beam welded joints of Ti-43Al-9V-0.3Y and Ti-6Al-4V alloys[J]. Materials letters, 2018, 233: 336-339.

[2] LOPEZ-ORTEGA A, ARANA J L, RODRIGUEZ E, et al. Corrosion, wear and tribocorrosion performance of a thermally sprayed aluminum coating modified by plasma electrolytic oxidation technique for offshore submerged components protection[J]. Corrosion science, 2018, 143: 258-280.

[3] TOTOLIN V, PEJAKOVIC V, CSANYI T, et al. Surface engineering of Ti6Al4V surfaces for enhanced tribocorrosion performance in artificial seawater[J]. Materials & design, 2016, 104: 10-18.

[4] 路富刚, 魏世忠. 腐蚀磨损的研究现状与发展趋势[J].

- 铸造技术, 2018(8): 1857-1860.
- LU Fu-gang, WEI Shi-zhong. Research status and development trend of corrosion and wear[J]. Foundry technology, 2018(8): 1857-1860.
- [5] JIANG L, HUANG W, LIU C, et al. Microstructure, texture evolution and mechanical properties of pure Ti by friction stir processing with slow rotation speed[J]. Materials characterization, 2019, 148: 1-8.
- [6] STOLYAROV V V, SHUSTER L S, MIGRANOV M S, et al. Reduction of friction coefficient of ultrafine-grained CP titanium[J]. Materials science and engineering: A, 2004, 371(1-2): 313-317.
- [7] FARNOUSH H, ABDI BASTAMI A, SADEGHI A, et al. Tribological and corrosion behavior of friction stir processed Ti-CaP nanocomposites in simulated body fluid solution[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2013, 20: 90-97.
- [8] LI B, SHEN Y, HU W, et al. Surface modification of Ti-6Al-4V alloy via friction-stir processing: microstructure evolution and dry sliding wear performance[J]. Surface and coatings technology, 2014, 239: 160-170.
- [9] JIANG L, HUANG W, LIU C, et al. The effects of stored energy on wear resistance of friction stir processed pure Ti[J]. Results in physics, 2019, 12: 1276-1284.
- [10] DAVOREN B, FERG E E, HATTINGH D. Tribocorrosion of friction-stir-welded Ti6AL4V in 3.5% NaCl aqueous solution[J]. Wear, 2017, 390-391: 246-252.
- [11] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, MORGAN J T, et al. Hot deformation and microstructural damage mechanisms in extra-low interstitial (ELI) grade Ti-6Al-4V[J]. Materials science & engineering a, 2000, 279(1): 289-299.
- [12] PILCHAK A L, WILLIAMS J C. Microstructure and texture evolution during friction stir processing of fully lamellar Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and materials transactions A: Physical metallurgy and materials science, 2011, 42(3): 773-794.
- [13] YOON S, UEJI R, FUJII H. Microstructure and texture distribution of Ti-6Al-4V alloy joints friction stir welded below  $\beta$ -transus temperature[J]. Journal of materials processing technology, 2016, 229: 390-397.
- [14] ZHAO Z B, WANG Q J, HU Q M, et al. Effect of  $\beta(110)$  texture intensity on  $\alpha$ -variant selection and microstructure morphology during  $\beta \rightarrow \alpha$  phase transformation in near  $\alpha$  titanium alloy[J]. Acta materialia, 2017, 126: 372-382.
- [15] GEY N, HUMBERT M. Characterization of the variant selection occurring during the  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  phase transformations of a cold rolled titanium sheet[J]. Acta materialia, 2002, 50(2): 277-287.
- [16] HUANG W J, JIANG L Y, LIU C L, et al. The microstructure morphology and texture evolution of  $\alpha$ -Ti in Ti-6Al-4V alloy during friction stir processing with low rotation speed and traverse speed[J]. Advanced engineering materials, 2019, 1900250: 1-11.
- [17] ZHANG Q Y, WANG S Q, ZHOU Y, et al. Artificial oxide-containing tribo-layers and their effect on wear performance of Ti-6Al-4V alloy[J]. Tribology international, 2017, 105: 334-344.
- [18] WANG Z, ZHOU Y, WANG H, et al. Tribocorrosion behavior of Ti-30Zr alloy for dental implants[J]. Materials letters, 2018, 218: 190-192.
- [19] WATSON S W, FRIEDERSDORF F J, MADSEN B W, et al. Methods of measuring wear-corrosion synergism[J]. Wear, 1995, 181-183: 476-484.
- [20] 陈君, 阎逢元, 王建章. 海水环境下 TC4 钛合金腐蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2012(1): 1-6.
- CHEN Jun, YAN Feng-yuan, WANG Jian-zhang. Corrosion wear properties of TC4 titanium alloy in artificial seawater[J]. Tribology, 2012(1): 1-6.