

# 大变形纯钛微弧氧化膜层的生物摩擦学性能

徐琳<sup>1</sup>, 丁建宁<sup>1,2</sup>, 许晓静<sup>1</sup>, 李伯全<sup>1</sup>, 杜明星<sup>2</sup>

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212013)

(2. 常州大学, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 采用微弧氧化法在纯钛及大变形纯钛表面制备多孔氧化膜层, 研究微弧氧化膜层在干摩擦、模拟体液和小牛血清不同润滑介质条件下的生物摩擦学性能, 探讨钛基材组织细化对其膜层表面摩擦磨损性能的影响。结果表明: 与纯钛微弧氧化膜层相比, 大变形纯钛微弧氧化膜层耐磨性能更优的原因在于钛基材晶粒的细化使得晶体缺陷增多, 为微弧氧化膜层的形核提供了更多的能量, 反应生成的 TiO<sub>2</sub> 膜层硬度更高, 膜层表面更致密、均匀、光滑, 提高了其摩擦磨损性能。大变形纯钛微弧氧化膜层在小牛血清润滑时的摩擦系数和磨损程度都低于干摩擦和模拟体液润滑条件下的摩擦系数与磨损程度。这归因于小牛血清在摩擦表面形成的化学反应膜及物理吸附膜, 起到了更有效的润滑、冷却与承载作用。

**关键词:** 大变形纯钛; 微弧氧化; 小牛血清; 生物摩擦学性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>3; TH117

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)01-0127-08

钛及钛合金作为人工关节、人工骨、牙种植体等在医用植入物领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。当钛及钛合金作为植入体在人体内服役后, 无可避免地将其周围的组织发生摩擦磨损行为, 其耐磨性将直接影响着植入体的使用质量与临床寿命。由摩擦磨损产生的磨屑会诱发植入体与骨界面间炎性界膜的形成<sup>[2]</sup>, 激活破骨细胞, 导致骨溶解<sup>[3]</sup>, 造成植入体的无菌松动。因此, 对于植入体, 不仅要有优良的生物相容性与耐蚀性, 在生理环境下的耐磨性能尤为重要, 应尽量减少有害磨屑的产生。如何改善钛及钛合金的摩擦磨损性能是其在临床应用中亟待解决的技术关键。为此, 对钛及钛合金进行改性十分必要。研究发现, 钛及钛合金经微弧氧化处理后, 能够在其表面形成陶瓷膜层, 可有效地提高钛材的耐磨性<sup>[4,5]</sup>。

通过等通道转角挤压大应变技术制备的“神奇金属”大变形纯钛具有奇特的表界面特性。其强度、塑性、疲劳性能已经达到甚至超过钛合金(Ti-6Al-4V)的水平, 且不含对人体有毒性的化学元素(Al, V, Ni 等), 以及具有比纯钛更优良的摩擦学性能、耐腐蚀性及生物相容性。使它比生物医用纯钛及钛合金(Ti-6Al-4V)更适合在医用植入物领域中应用<sup>[6-9]</sup>。

迄今为止, 有关不同润滑介质对经等通道转角挤

压大应变技术制备的大变形纯钛改性后的微弧氧化膜层的生物摩擦学性能影响的研究还未见报道。本实验对比研究纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在干摩擦、模拟体液和小牛血清不同润滑介质下的生物摩擦学性能, 考察纯钛材组织超细化对其微弧氧化膜层表面的摩擦磨损性能的影响, 并探讨摩擦磨损机制, 以为生物医用钛植入材料的发展提供实验依据。

## 1 实验

实验以纯钛(titanium, Ti)(GB/T3620.1-2007), 大变形纯钛材(large plastic deformed titanium, LPD Ti)为基材, 经线切割加工成尺寸为 $\Phi 18$  mm $\times$ 2 mm的圆板状, 经砂纸逐级打磨, 机械抛光处理后依次分别在丙酮、乙醇和去离子水中超声清洗 15 min, 干燥后采用微弧氧化装置在 C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>CaO<sub>4</sub>-NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 电解液中对其进行微弧氧化, 采用的电参数为: 频率 600 Hz, 占空比 10%, 氧化时间 10 min, 电流密度 8 A/dm<sup>2</sup>。

其中, 实验所用的大变形纯钛 (LPD Ti)为常规纯钛 (Ti)经 4 道次等通道转角挤压大应变加工技术在挤压温度为 550 °C, 加工方式为 BC 的条件下制得<sup>[10]</sup>。

通过 UMT 型多功能微摩擦磨损试验机评价微弧氧化膜层的摩擦磨损性能, 采用往复式滑动摩擦, 环

收稿日期: 2015-12-18

基金项目: 江苏省高校自然科学基金重大项目(11KJA430004); 江苏省高校自然科学基金(12KJD460002); 江苏大学研究生科研创新计划项目(1291110038)

作者简介: 徐琳, 女, 1982 年生, 博士生, 讲师, 江苏大学微纳米科学技术研究中心, 江苏 镇江 212013, 电话: 0511-88780173, E-mail: xulin1982@ujs.edu.cn

境温度为室温,摩擦对偶件选用直径为 3 mm 的 GCr15 钢球,给定载荷 1 N,时间 30 min,频率 1 Hz,位移幅值 5 mm。

采用 JEOL JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜 (SEM)观测微弧氧化膜层磨损前后的表面形貌,并用 X 射线能谱仪分析其表面元素成分。通过 ContourGT 非接触式三维轮廓仪测定膜层表面粗糙度。采用瑞士 CSM 公司生产的纳米压痕仪测量抛光后的微弧氧化膜层的硬度和弹性模量,加载力为 4 mN,加载速度为 8 mN/min,保载时间为 10 s,每个样品测试 5 个点,取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 膜层表面形貌及性能表征

图 1 为纯钛微弧氧化膜层(Ti-M)及大变形纯钛微弧氧化膜层(LPD Ti-M)的 SEM 形貌。与纯钛微弧氧化膜层相比,大变形纯钛微弧氧化膜层孔洞分布更均匀致密,孔洞孔径更小,微米级小孔数量更多<sup>[11]</sup>,并具有更低的粗糙度 1.42 μm ( vs. 2.47 μm),更高的硬度 10.7 GPa (vs. 6.1 GPa),更大的弹性模量 162.0 GPa (vs. 102.7 GPa)。

### 2.2 干摩擦的摩擦性能

图 2 为纯钛微弧氧化膜层(Ti-M)及大变形纯钛微弧氧化膜层(LPD Ti-M)在干摩擦条件下的摩擦系数随

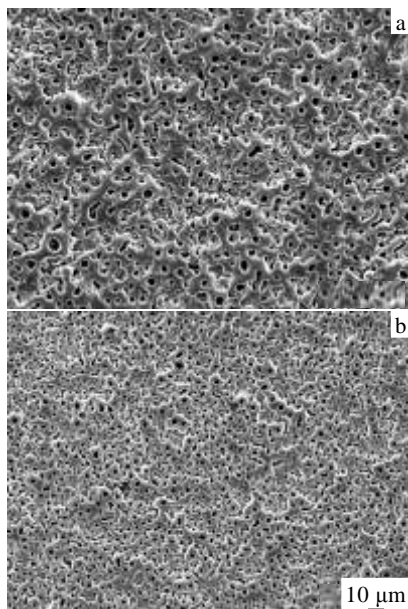


图 1 纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层的 SEM 形貌

Fig.1 SEM images of MAO coatings on conventional titanium (a) and large plastic deformed titanium (b)

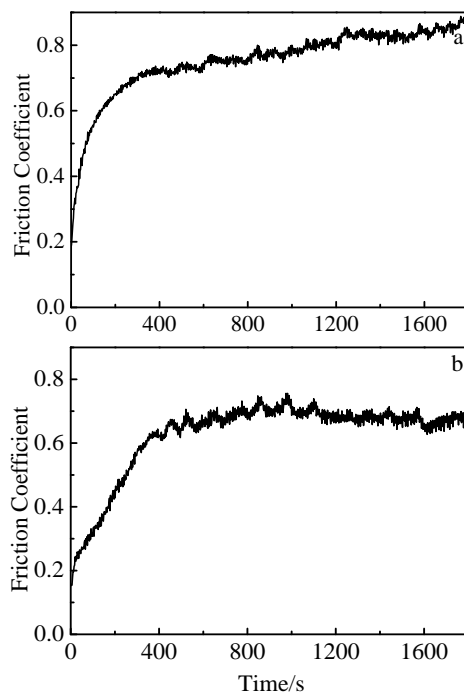


图 2 干摩擦条件下,纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层摩擦系数随时间的变化关系

Fig.2 Variations of friction coefficient with time for MAO coatings on conventional titanium (a) and large plastic deformed titanium (b) under dry sliding condition

时间变化的关系曲线。

由图可观察到,在干摩擦条件下,纯钛微弧氧化膜层与 GCr15 钢球滑动摩擦试验开始到 400 s 时,摩擦系数迅速增加至 0.8 左右,但是在 400 s 之后的摩擦过程中,摩擦系数出现较小的跳动,并微有升高的趋势,平均摩擦系数为 0.750。这是由于纯钛经微弧氧化处理后,膜层表面粗糙多孔,摩擦试验过程中,对偶件 GCr15 钢球在高低起伏的纯钛微弧氧化膜层表面滑动,膜层表面疏松的凸峰与 GCr15 钢球接触实际面积较小,在反复机械碰撞被磨平后产生细小的磨屑,膜层粗糙度降低,实际接触面积增大,提高了摩擦力,摩擦系数也随之迅速增大。又由于微弧氧化膜层的硬度较高,且分布在多孔膜层表面的细小磨屑起到了一定的固体润滑作用,因此,微弧氧化膜层与 GCr15 钢球对磨后呈现出摩擦系数维持在一个较大的数值但变化较平稳的规律。大变形纯钛微弧氧化膜层的摩擦系数也在磨损初期迅速上升,400 s 之后的摩擦过程中浮动很小,摩擦系数较平稳地维持在 0.6 左右,平均摩擦系数为 0.626,比纯钛微弧氧化膜层的摩擦系数低,下降了 16.53%。

图 3 所示为纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧

氧化膜层在干摩擦条件下的磨损表面形貌。

可以发现,纯钛微弧氧化膜层表面磨损区域磨斑凹凸不平,呈现出山丘状起伏形貌,并伴有大量微裂纹及剥落现象,磨痕较宽。这主要是由于随着摩擦的进行,在外加载荷的作用下,膜层表面的粗糙不平增加了与 GCr15 钢球机械啮合作用, GCr15 钢球在摩擦中形成的磨屑转移到膜层表面,使得部分磨损区域转变为钢对钢的摩擦,发生粘着磨损,同时膜层又不断受到钢球的机械碰撞,产生脆性断裂,导致膜层表面局部出现脱落现象而粗化,磨损区域高低起伏不平。大变形纯钛微弧氧化膜层由于其表面粗糙度相对较小、孔洞结构致密、硬度较高等性能,耐磨损性能较纯钛微弧氧化膜层要强,因此,其磨损相对较轻微,存在着轻微剥落现象,磨损区域较窄,且磨斑更加光滑平整。

图 4 所示为纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在干摩擦条件下磨损区域的 EDS 能谱。

比较 EDS 能谱可以看出,纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层磨损区分布的 Ca、P、O 和 Ti 这 4 种元素成分的相对含量与摩擦前相比<sup>[11]</sup>,没有出现异常的变化情况。这就表明,微弧氧化层磨损表面没有磨穿,同时检测到磨损区存在部分 Fe 和 Cr 元素,但是钛基材及微弧氧化膜层均不含 Fe 和 Cr 元素<sup>[11]</sup>,可判断是在摩擦磨损过程中从较软的对偶件 GCr15 钢球转移到硬度更高的微弧氧化膜层表面的。GCr15 钢球向膜层表面转移磨损物质,磨损区域转变为钢对钢

的摩擦,粘着磨损加剧,摩擦力继续增大,这与图 2 中的摩擦系数变化情况相吻合。因此,干摩擦条件下,纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层呈现出较轻微的以粘着磨损为主的特征。

### 2.3 模拟体液润滑的摩擦性能

图 5 示出了纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在模拟体液润滑介质条件下的摩擦系数随时间的变化关系。

由图可见,以模拟体液作为润滑介质时,纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层的摩擦行为与干摩擦下明显不同,摩擦系数均有不同程度的降低,纯钛微弧氧化膜层的摩擦系数浮动较小,没有明显的跳动,变化较平稳并略有升高的趋势,平均摩擦系数为 0.295。与前者相比,大变形纯钛微弧氧化膜层摩擦系数更低,平均摩擦系数仅为 0.241。在模拟体液润滑条件下,纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层的摩擦系数均波动幅度较小。微弧氧化层具有的多孔表面能够储存模拟体液,在摩擦过程中起到有效的润滑缓冲作用,减少了粘着磨损倾向,从而使得摩擦系数相应降低,改善摩擦学性能。而大变形纯钛微弧氧化膜层存在更多的孔洞,孔隙率略高,容易渗入更多的模拟体液润滑液与摩擦过程中产生的磨屑,起到更好的润滑减摩作用,所以摩擦系数更低。

图 6 给出了纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在模拟体液润滑条件下的磨痕表面形貌。

由图可以观察到,由于模拟体液的润滑作用,纯

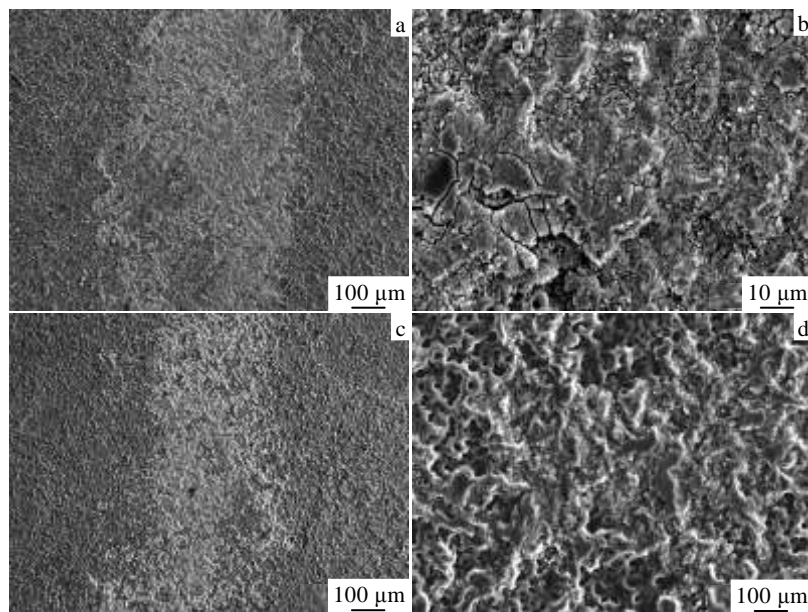


图 3 干摩擦条件下,纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层的磨痕表面形貌

Fig.3 Wear track images of MAO coatings on conventional titanium (a, b) and large plastic deformed titanium (c, d) under dry sliding condition

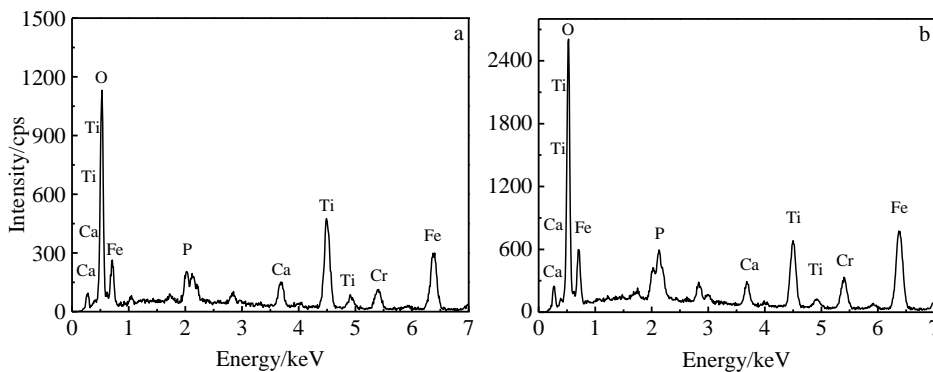


图 4 干摩擦条件下，纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层磨痕的 EDS 能谱

Fig.4 EDS spectra of wear track of MAO coatings on conventional titanium (a) and large plastic deformed titanium (b) under dry sliding condition

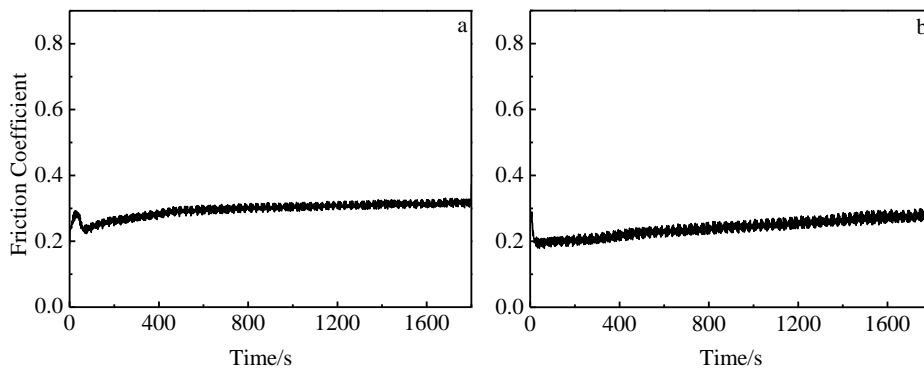


图 5 模拟体液润滑条件下，纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层摩擦系数随时间的变化关系

Fig.5 Variations of friction coefficient with time for MAO coatings on conventional titanium (a) and large plastic deformed titanium (b) under simulated body fluid sliding condition

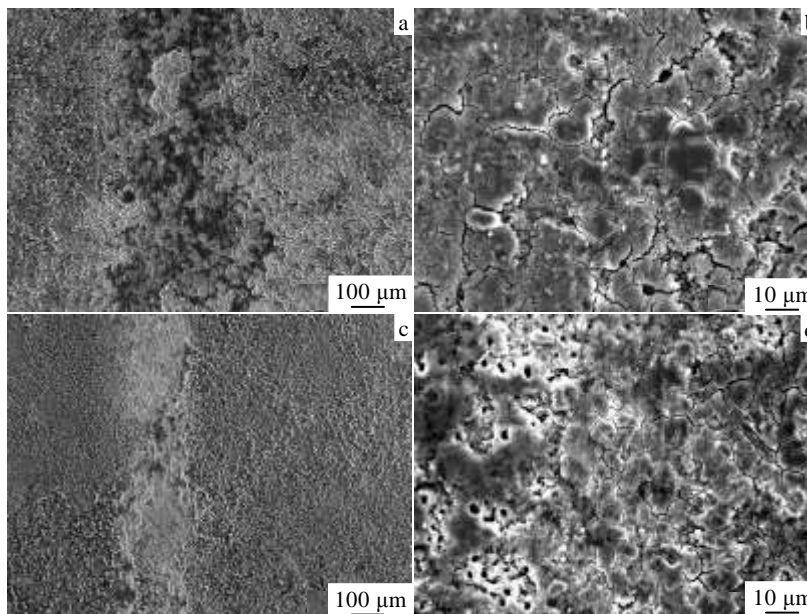


图 6 模拟体液润滑条件下，纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层的磨痕形貌

Fig.6 Wear track images of MAO coatings on conventional titanium (a, b) and large plastic deformed titanium (c, d) under simulated body fluid sliding condition

钛微弧氧化膜层表面磨损磨痕区域较干摩擦条件下显著变窄，部分磨斑呈现龟裂状且凹凸不平，未见大面积剥落现象仅见少量剥落坑，磨损较轻，部分磨损区域仍保有多孔形貌。大变形纯钛微弧氧化膜层磨痕宽度较窄且表面结构较光滑平坦均匀，部分区域膜层的放电孔洞仍清晰可见，仅发生轻微磨损，磨斑表面未见剥落坑。纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在模拟体液润滑下同 GCr15 钢球对磨时均表现出良好的抗磨性能。微弧氧化处理后，钛基材原位生成结合强度高、硬度高的以  $\text{TiO}_2$  为主体的粗糙多孔陶瓷层。在摩擦过程中，微弧氧化膜层表面的大量孔洞会渗入及储存模拟体液润滑液与磨屑，形成润滑减磨层，可有效地将微弧氧化膜层与 GCr15 钢球两摩擦表面隔开，降低摩擦热量，避免了磨粒磨损，减少摩擦阻力，起到了良好的润滑保护作用，耐磨损性能显著提高。由摩擦系数以及磨痕的 SEM 照片可知，大变形纯钛微弧氧化膜层及纯钛微弧氧化膜层在模拟体液润滑时的摩擦系数和磨损情况都低于相同实验参数下干摩擦的摩擦系数和磨损情况，表明模拟体液的润滑与冷却作用确实有效地改善了微弧氧化膜层的摩擦条件，减少了膜层表面的磨损。

图 7 为纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在模拟体液润滑条件下的磨痕区域的 EDS 能谱。

由 EDS 能谱可以看出，除了 Ca、P、O 和 Ti 元素外，也同样检测到了摩擦磨损过程中从对偶件 GCr15 钢球转移到微弧氧化膜层表面的 Fe 以及 Cr 元素的存在。表明模拟体液润滑条件下纯钛微弧氧化膜层和大变形纯钛微弧氧化膜层也呈现出轻微的粘着磨损的特征。

#### 2.4 小牛血清润滑的摩擦性能

为更真实地研究纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层作为人工关节、人工骨、牙种植体等应用中面临的摩擦损伤等关键性能，考察了以更接近人体关节滑液的小牛血清作为润滑介质时二者的生物摩擦学性能。图 8 所示为纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在小牛血清润滑条件下摩擦系数随时间的变化关系。当小牛血清为润滑介质时，在整个摩擦磨损过程中微弧氧化膜层的摩擦系数变化平稳，纯钛微弧氧化膜层磨损 0.5 h 后的摩擦系数仍然保持在 0.25 左右，平均摩擦系数为 0.266。大变形纯钛微弧氧化膜层的摩擦系数更低、更平稳，平均摩擦系数为 0.246。小牛血清润滑条件下的大变形纯钛微弧氧化膜层具有更低的摩擦系数的原因在于：与模拟体液润滑液相比，小牛血清由于蛋白质等大分子的大量存在，血清粘度大<sup>[12]</sup>，形成的润滑膜比模拟体液形成的润滑

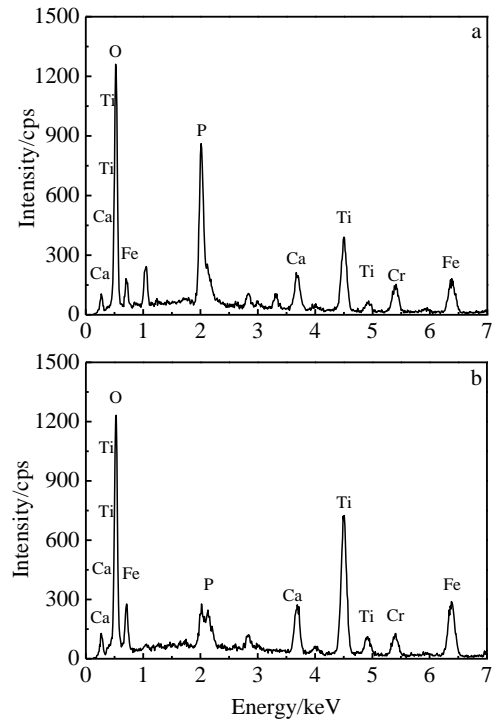


图 7 模拟体液润滑条件下，纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层磨痕的 EDS 能谱

Fig.7 EDS spectra of wear track of MAO coatings on conventional titanium (a) and large plastic deformed titanium (b) under simulated body fluid sliding condition

膜承载能力更高，小牛血清起到了更有效的润滑减磨效果，并且大变形纯钛微弧氧化膜层的硬度更高且表面孔洞更多，孔隙率略高，为存储更多的小牛血清润滑液及磨损过程中产生的磨屑提供了更有利的条件。随着摩擦的进行，微弧氧化处理后表面形成的微孔储存的小牛血清有助于减少摩擦力，降低摩擦系数。

图 9 所示为纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在小牛血清润滑条件下的磨痕表面形貌。

由图可以观察到，小牛血清润滑条件下微弧氧化膜层的摩擦磨损性能得到更显著的提高。这是因为小牛血清起到了更有效的缓冲作用，膜层的磨损程度随着润滑条件的改善而降低。纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛氧化膜层与模拟体液润滑条件下的膜层磨损表面相比要轻微，更平整、更光滑，尤其是大变形纯钛微弧氧化层磨损表面磨损更少，仅见零星散落分布的几处较小磨斑，放大图可见磨斑处仍明显保留有微弧氧化膜层的多孔特征，表明小牛血清润滑条件下的大变形纯钛微弧氧化膜层具有最优的耐磨性能。这主要是因为：①大变形纯钛基材组织的超细化，晶体缺陷增多，自由能增强<sup>[13]</sup>，为微弧氧化膜层的形核提供了更多的能量与扩散通道，反应生成的  $\text{TiO}_2$  膜层硬度更

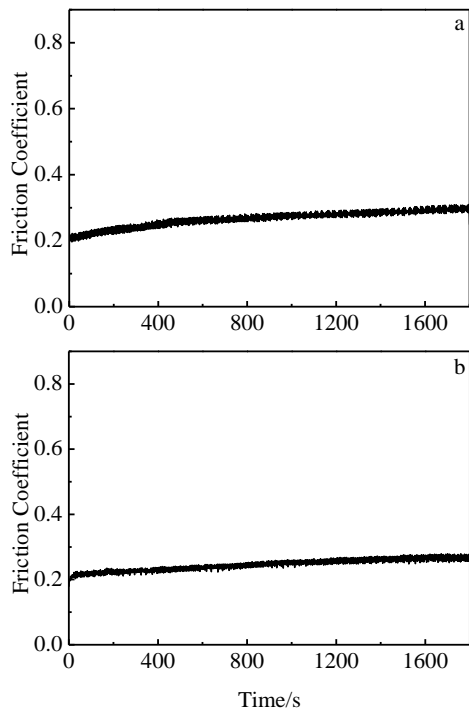


图 8 小牛血清润滑条件下，纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层摩擦系数随时间的变化关系

Fig.8 Variations of friction coefficient with time for MAO coatings on conventional titanium (a) and large plastic deformed titanium (b) under calf serum sliding condition

高，大变形纯钛经微弧氧化处理后原位生成了比纯钛

微弧氧化膜层表面粗糙度更小、更均匀致密、硬度更高、弹性模量更大的多孔陶瓷膜层，其耐磨损性能显著提高；②膜层表面的孔洞可存储磨屑，减小了摩擦过程中由于磨粒引起的三体摩擦；③小牛血清作为润滑介质时，可以降低摩擦过程中产生的高温，减少氧化磨损，起到了有效的冷却作用；④粘稠状的小牛血清含有球蛋白、白蛋白、黏蛋白等多种血浆蛋白、多肽、脂肪及无机盐等复杂成分。在摩擦磨损过程中，血清中的  $Ca^{2+}$ 、 $HCO_3^-$  和  $HPO_4^{2-}$  等无机盐离子则因发生摩擦化学反应生成化学反应膜<sup>[14]</sup>，小牛血清中分子链较长的蛋白质大分子化合物的分子间容易互相缠结成网状结构，于摩擦表面形成物理吸附膜<sup>[15]</sup>，减少了与摩擦副之间的直接接触，降低两摩擦表面的剪切与粘着应力，降低摩擦阻力，起到了有效的润滑作用；⑤由流体润滑 Reynolds 方程可知，润滑液的粘度会影响润滑液的承载能力。由于具有高度粘弹性球蛋白等蛋白质大分子的大量存在<sup>[12]</sup>，使得粘度较大的小牛血清形成的润滑膜具有比模拟体液润滑膜更好的承载能力，与模拟体液润滑液相比，小牛血清起到了更有效的减震与缓冲作用，改善了润滑性能。这与图 8 中的摩擦系数变化情况相吻合，微弧氧化膜层的磨损程度和摩擦系数随着润滑条件的改善而降低。

图 10 所示为纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层在小牛血清润滑条件下磨痕区域的 EDS 能谱。

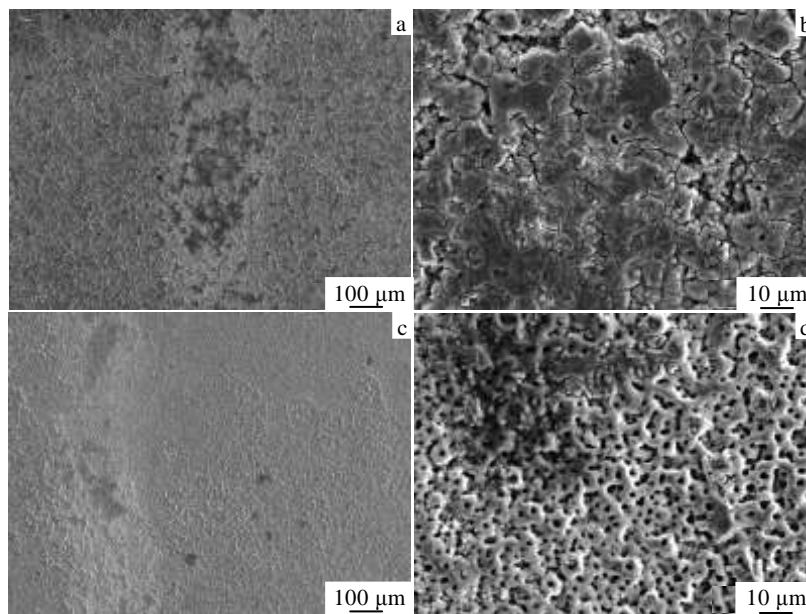


图 9 小牛血清润滑条件下，纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层的磨痕形貌

Fig.9 Wear track images of MAO coatings on conventional titanium (a, b) and large plastic deformed titanium (c, d) under calf serum sliding condition

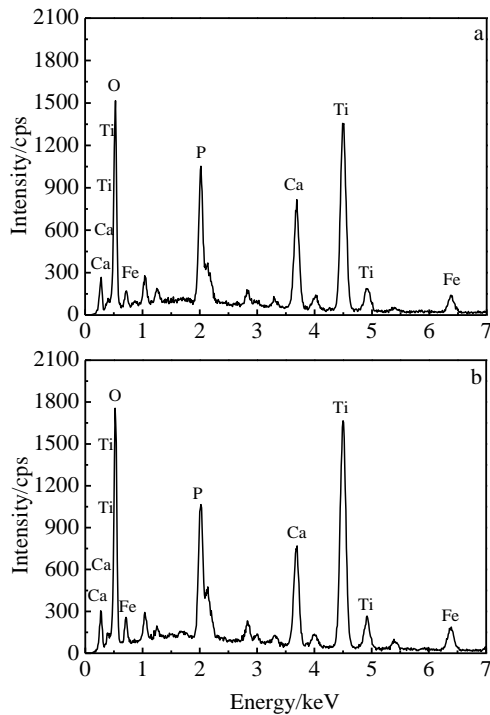


图10 小牛血清润滑条件下, 纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层磨痕的EDS能谱

Fig.10 EDS spectra of wear track of MAO coatings on conventional titanium (a) and large plastic deformed titanium (b) under calf serum sliding condition

由EDS能谱可以看出,除了Ca、P、O和Ti元素外,也同样存在来自对偶件GCr15钢球转移到微弧氧化膜层表面的Fe元素。因此,小牛血清润滑条件下,纯钛微弧氧化膜层及大变形纯钛微弧氧化膜层同样呈现出轻微的粘着磨损的特征。

综合对比干摩擦、模拟体液和小牛血清不同润滑条件对微弧氧化膜层的摩擦学性能影响,纯钛及大变形纯钛微弧氧化膜层在小牛血清润滑时的磨损机制为轻微的粘着磨损,且摩擦系数和磨损程度都低于相同试验参数下干摩擦和模拟体液润滑条件下的摩擦系数与磨损程度。小牛血清具有更好的润滑减摩作用,更有效地改善了微弧氧化膜层的摩擦条件,降低了膜层表面的磨损程度。同时从以上的结果及分析还可以得出,与纯钛微弧氧化膜层相比,大变形纯钛微弧氧化膜层由于其表面粗糙度相对较小、孔洞结构致密、硬度较高等性能,具有更好的摩擦学特点。

### 3 结论

1) 相同试验参数下,纯钛和大变形纯钛微弧氧化膜层在小牛血清润滑时的摩擦系数和磨损程度都低于干摩擦和模拟体液润滑条件下的摩擦系数与磨损程度。

这归因于小牛血清在摩擦表面形成的化学反应膜及物理吸附膜,起到了更有效的润滑、冷却与承载作用。

2) 与纯钛微弧氧化膜层相比,大变形纯钛微弧氧化膜层耐磨性能更优。这是因为,大变形纯钛基材组织的超细化,晶体缺陷增多,为微弧氧化膜层的形核提供了更多的能量,反应生成的TiO<sub>2</sub>膜层硬度更高,膜层表面更致密、均匀、光滑,使得大变形纯钛微弧氧化膜层摩擦学性能更优良。

### 参考文献 References

- [1] Geetha M, Singh A K, Asokamani R *et al. Prog Mater Sci*[J], 2009, 54(3): 397
- [2] Charnley J, Cupic Z. *Clin Orthop Relat Res* [J], 1973, 95: 9
- [3] Hou M H, Betts F, Bogumill G P *et al. Orthopedics*[J], 1993, 16(11): 1277
- [4] Vangolu Y, Arslan E, Totik Y *et al. Surf Coat Tech*[J], 2010, 205(6): 1764
- [5] Balyanov A, Kutnyakova J, Amirkhanova N A *et al. Scripta Mater*[J], 2004, 51(3): 225
- [6] Park J W, Kim Y J, Park C H *et al. Acta Biomater*[J], 2009, 5(8): 3272
- [7] Xu Xiaojing(许晓静), Sheng Xinlan(盛新兰), Zhang Tifeng(张体峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(10): 2053
- [8] Yao Z Q, Ivanisenko Y, Diemant T *et al. Acta Biomater*[J], 2010, 6(7): 2816
- [9] Yang X R, Zhao X C, Fu W J. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2009, 38(6): 955
- [10] Valiev R Z, Langdon T G. *Prog Mater Sci*[J], 2006, 51(7): 881
- [11] Xu Lin(徐琳), Ding Jianning(丁建宁), Xu Xiaojing(许晓静) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(12): 3100
- [12] Yu Luqing(虞路清), Li Jiuqing(李久青), Lu Yiqiang(鲁毅强) *et al. Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2001, 23(4): 332
- [13] Yu Chunhang(于春杭), Shao Honghong(邵红红), Xu Xiaojing(许晓静). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 320
- [14] Jiang Song(蒋松), Wang Chengtao(王成焘), Cheng Xiyun(程西云) *et al. Tribology*(摩擦学学报)[J], 2004, 24(6): 527
- [15] Long Dongping(龙东平), Tan Jianping(谭建平), Wu Shixu(吴士旭). *Lubrication Engineering*(润滑与密封)[J], 2007, 32(3): 125

## Bio-tribological Properties of Micro-arc Oxidation Coating on Large Plastic Deformed Titanium

Xu Lin<sup>1</sup>, Ding Jianning<sup>1,2</sup>, Xu Xiaojing<sup>1</sup>, Li Boquan<sup>1</sup>, Du Mingxing<sup>2</sup>

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The porous oxide coatings on the surface of titanium and large plastic deformed titanium were prepared by micro-arc oxidation (MAO). The bio-tribological properties of the MAO coatings were evaluated under different lubrication medium conditions, namely dry friction, stimulated body liquid, and calf serum. The effect of structure refinement of the titanium substrate on the friction wear properties of the coating surface was also investigated. Results show that the MAO coating obtained from the large plastic deformed titanium exhibits higher abrasion resistance than the MAO coating on titanium because of improved friction wear properties. To be more specific, the structure refinement of the titanium substrate results in more crystal defects and provides more energy for nucleation of the MAO coating, which makes the TiO<sub>2</sub> coating formed through the reaction harder, and the coating surface more compact, more uniform, and smoother. The friction coefficient and degree of wear of the MAO coating formed from large plastic deformed titanium under calf serum lubrication are better than those under dry friction and stimulated body liquid. This finding could be attributed to more effective lubrication and cooling, as well as the loading roles of the coatings formed on the friction surface through chemical reaction and physical adsorption under calf serum lubrication.

**Key words:** large plastic deformed titanium; micro-arc oxidation (MAO); calf serum; bio-tribological properties

---

Corresponding author: Ding Jianning, Ph. D., Professor, Center of Micro/Nano Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, Tel: 0086-511-88780173, E-mail: dingjn@ujs.edu.cn