

Ag/Ni 多层膜对钛合金微动磨损和微动疲劳抗力的影响

刘道新^{1*}, 王振亚¹, 张晓化¹, 刘国华¹, 唐 宾²

(1. 西北工业大学 腐蚀与防护研究室, 陕西 西安 710072;

2. 太原理工大学 表面工程研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 为了有效提高钛合金耐微动磨损和抗微动疲劳性能,且避免银脆隐患,在 Ti811 钛合金表面利用离子辅助磁控溅射沉积技术制备了不同调制周期的 Ag/Ni 金属多层膜,测试了多层膜的结构、结合强度、显微硬度和韧性,研究了不同调制周期的 Ag/Ni 多层膜对钛合金基材微动磨损和微动疲劳抗力的影响,并与纯 Ag 膜和纯 Ni 膜进行了对比.结果表明:离子辅助磁控溅射技术可以制备出致密度高、晶粒细致、结合强度高的 Ag/Ni 多层膜,多层膜的硬度随多层膜调制周期的减小而提高,调制周期小于 100 nm 时呈现明显的超硬度现象. Ag/Ni 多层膜具有良好的减摩润滑作用和抗疲劳性能,能够显著改善 Ti811 钛合金耐微动磨损和抗微动疲劳性能,改善效果随多层膜调制周期降低而增大.

关键词: 微动疲劳;微动磨损;多层膜;磁控溅射;钛合金

中图分类号: TG115

文献标志码: A

文章编号: 1004 - 0595(2010)05 - 0498 - 07

The Effect of Ag/Ni Multilayer Film on Fretting Wear and Fretting Fatigue Resistance of Titanium Alloy

LIU Dao - xin^{1*}, WANG Zhen - ya¹, ZHANG Xiao - hua¹, LIU Guo - hua¹, TANG Bin²

(1. Corrosion and Protection Research Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Research Institute of Surface Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To significantly improve the fretting wear (FW) and fretting fatigue (FF) resistance of titanium alloys and avoid the silver - induced embrittlement damage, the Ag/Ni multilayer films with different modulation period thickness was prepared on a Ti811 titanium alloy surface by an ion assisted magnetron sputtering deposition (IAD) technique. The structure, bonding strength, micro - hardness and ductility of the multilayer films were measured. The effects of the Ag/Ni multilayer films with different modulation periods on the FW and FF resistance of the titanium alloy substrate were studied, and compared with pure Ag film and Ni film. The results indicated that the IAD technique can prepare Ag/Ni multilayer films with high density, small grain size, high bonding strength. The micro - hardness of the Ag/Ni multilayer films increased with decreasing the modulation period thickness. The superhardness phenomenon occurred when the modulation period thickness of the multilayer films was less than 100 nm. The Ag/Ni multilayer films could improve the FW and FF resistance of the Ti811 alloy due to its excellent lubricating and anti - fatigue properties. The FW and FF resistances of the Ti811 alloy increased with decreasing the modulation period thickness of the Ag/Ni multilayer films.

Key words: fretting fatigue, fretting wear, multilayer film, magnetron sputtering, titanium alloy

钛合金是重要的航空、航天结构材料^[1-2]。然而,钛合金耐磨性能差,对微动疲劳(Fretting Fatigue, FF)损伤十分敏感,由此影响钛合金航空、航天结构零、构件的使用安全性和可靠性^[3-4]。因此,提高钛合金FF抗力的表面工程技术研究成为钛合金在航空、航天领域可靠应用的重要课题^[5-8]。由于电镀银硬度低,固体润滑效果好,因而曾被国内外广泛用于控制航空发动机压气机钛合金叶片榫头的FF损伤。但是,电镀Ag存在银脆和氢脆隐患^[9],故美国等航空发达国家已采用MoS₂干膜润滑剂取代电镀Ag保护钛合金叶片榫头。然而,MoS₂干膜润滑剂结合强度低,使用寿命短,故寻求新的技术途径来控制钛合金FF损伤成为国内外航空领域研究的热点。

多层膜与单层膜相比,不同调制层之间的界面可以起到阻止位错运动和抑制原子扩散的作用,使硬度、断裂韧性、耐磨、抗氧化等性能明显提高,尤其是在调制周期达纳米量级时膜层硬度会出现超硬效应^[10-11]。研究表明Cu/Ni多层膜有良好的抗微动磨损性能^[12]。本文作者的研究表明TiN/Ti多层膜能够明显提高钛合金的微动疲劳抗力^[13]。然而,关于金属多层膜微动疲劳行为的研究尚未见报道。银在镍中的固溶度极低,室温下原子百分比小于0.1%,800℃时也仅为1.0%,而且Ni在500℃以下不会引起钛合金脆化^[9],因此,以Ni作过渡层的Ag/Ni多层膜不仅能利用镍底层控制钛合金基材的银脆,而且可以利用银层良好的减摩润滑性能及多层膜的止裂和抗疲劳性能,由此预测Ag/Ni多层膜可以有效改善钛合金的抗FF性能。离子辅助沉积技术(Ion Assisted Deposition,缩写为IAD)是将离子注入与物理气相沉积技术有机结合的新型表面工程技术,在保持较低的工艺温度条件下,能够显著地提高膜基结合强度和膜层性能,且不会明显影响基材的力学性能^[14-15]。磁控溅射膜层结晶细致、致密性好,是制备多层膜的优势方法。将上述2种方法联合,即通过离子辅助磁控溅射技术制备Ag/Ni多层膜可望达到提高钛合金微动疲劳抗力的目的。为此本文研究离子辅助磁控溅射Ag/Ni多层膜对钛合金FF抗力的影响规律和作用机制,探讨提高钛合金FF抗力的新途径。

1 实验部分

1.1 试验材料

钛合金选用近 α 型Ti811(Ti8Al1Mo1V)合金,

该材料弹性模量高、振动阻尼性能优良、热稳定性高、焊接性能和成型性能好^[16],是制造航空发动机压气机部件的重要材料。微动疲劳试样和微动桥均由 $\phi 16$ mm的Ti811合金棒材制备,化学成分质量分数分别为7.900% Al、1.000% Mo、0.990% V、0.050% Fe、0.100% C、0.010% N、0.001% H、0.060% O,余量为Ti。采用双重退火处理,即910℃保温1 h,空冷+580℃保温8 h,空冷。合金组织为等轴 α +晶间 β 。常温下的力学性能为: $\sigma_b = 931$ MPa, $\sigma_{0.2} = 890$ MPa, $\delta = 23\%$, $\psi = 46\%$ 。

1.2 膜层制备

膜层制备采用离子辅助磁控溅射沉积设备,靶材为纯度99.99%的Ag和Ni靶。试样镀膜前经水砂纸打磨,机械抛光,丙酮超声清洗。沉积膜层之前,首先通入氩气,采用轰击能量1200 V、束流300 mA的氩离子轰击清洗试样表面约10 min。Ag/Ni多层膜的制备过程为先沉积1 μm 的Ni底层,以提高膜层结合强度和控制Ag向钛合金基体的扩散。然后交替单独开启Ag靶、Ni靶电源,沉积Ag/Ni多层膜,不同调制周期的Ag/Ni多层膜通过磁控电源的开启时间进行控制。为防止靶材相互溅射污染,用挡板对停止溅射的靶材进行保护。Ag/Ni多层膜的总厚度为10 μm ,表层为Ag层。同时制备了10 μm 的纯Ag和纯Ni膜层作性能对比。磁控溅射制备工艺参数:电流1 A,偏压-200 V,氩分压0.5 Pa。试样加热温度为200℃。

1.3 膜层性能评价

利用HITACHI S-570型扫描电子显微镜(SEM)观察分析膜层形貌。利用D/max 2500型X射线衍射仪(XRD)分析薄膜的相结构。用HV-1000型显微硬度计测量膜层的Knoop硬度,载荷0.245 N,保载时间20 s。膜基结合强度采用划痕法评价,选择0~100 N档位,来确定薄膜脱落的临界载荷 L_c 值。膜层韧性评价采用自行研制的小能量多冲疲劳试验方法,试验条件为冲击次数10000次,冲程0.5 mm,以膜层开裂的最大冲击载荷为膜层韧性指标。

利用微动磨损试验机测试膜层摩擦学性能,采用球-面接触。试验时试样固定,球由激振器带动产生微小位移,位移幅度控制在36 μm ,频率为120 Hz,试验压力为200 N,室温下进行。球摩擦副为Ti811合金制备,直径5 mm,表面粗糙度 R_a 为0.05 μm ,硬度HK₂₅346。Ti811合金试样直径30 mm,厚度10 mm,表面粗糙度 R_a 为0.05 μm 。摩擦力利用

微机辅助系统实时跟踪测定.

1.4 微动疲劳试验

微动疲劳试验采用自行研制的专用装置,在 PLG - 100C 高频疲劳试验机上进行,选择拉 - 拉疲劳加载方式,试验装置和试样尺寸见文献 [17]. 微动桥足和微动疲劳试样表面之间采用平面 - 平面接触方式,接触区面积为 $2\text{ mm} \times 6\text{ mm}$. 微动区位移依靠拉 - 拉疲劳过程中试样相对于微动桥足弹性变形来实现,调整微动桥的跨距,即可改变位移幅度. 接触区正压力采用应力环法施加. 疲劳循环载荷波形为正弦波,频率 110 Hz ,应力比 R 为 0.1 . 试验温度为室温,最大循环应力为 700 MPa ,接触区压应力

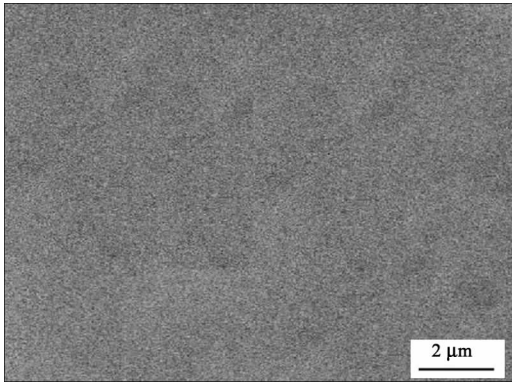
为 85 MPa ,以试样断裂寿命大小评定 FF 抗力,微动疲劳寿命取 3 个平行试样的平均值.

2 结果与讨论

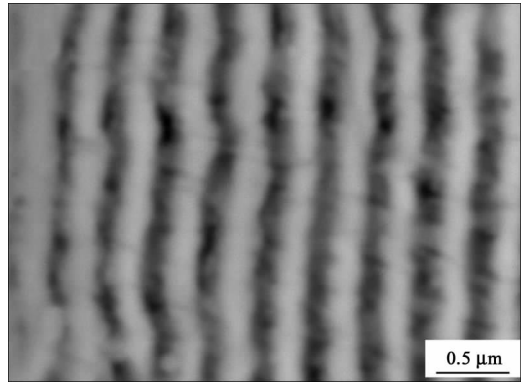
2.1 膜层的基本性能

离子辅助磁控溅射制备的 Ag/Ni 多层膜表面与剖面的扫描电镜形貌如图 1 所示. 可以看到,离子辅助磁控溅射制备的 Ag/Ni 多层膜结晶细致,表面致密性高. 剖面呈现出明暗相间的多层膜特征,在电镜下浅色的为 Ag 层,深色的为经过腐蚀的 Ni 层.

图 2 为 Ag 膜、Ni 膜和 Ag/Ni 多层膜的 XRD 分析图谱. 分析结果表明: $1\ 200$ 、 600 nm 多层膜 XRD



(a) Surface micrograph



(b) Section micrograph

Fig. 1 Surface and section micrographs of Ag/Ni multilayers

图 1 Ag/Ni 多层膜表面和剖面微观形貌

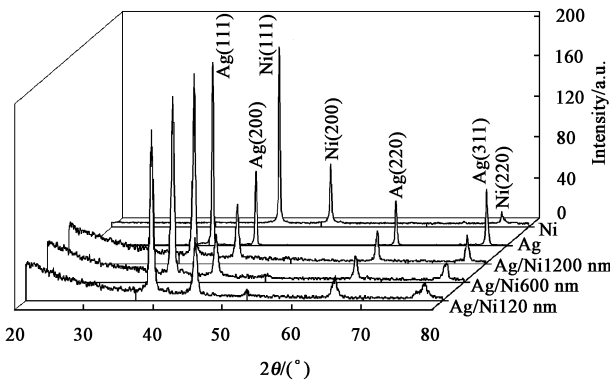


Fig. 2 XRD patterns of Ag film, Ni film and Ag/Ni multilayers

图 2 Ag 膜、Ni 膜和 Ag/Ni 多层膜的 XRD 谱

谱均为纯 Ag 膜层特征, 120 nm 多层膜表面 XRD 谱出现弱的 Ni 峰,即 X 射线已经穿透了表面的 Ag 膜. Ag、Ni 具有各自的衍射峰表明 Ag、Ni 没有互溶. Ag 膜层以 (111) 择优取向,同时还出现了 (200)、(220)、(311) 峰. Ni 膜层以 (111) 择优取向,同时有

(200)、(220) 微峰出现. 即 Ag/Ni 多层膜界面中存在 Ag(111)/Ni(111) 择优取向关系,同时还有其他高指数晶体取向出现. (111) 晶面具有高原子密度和低表面能,与基体表面平行生长的 (111) 晶面可使膜层获得良好的减摩润滑性能. 分析表明 Ag、Ni 单层膜的晶粒度在 30 nm 以下. Ag/Ni 多层膜的衍射峰明显比 Ag、Ni 单层膜的衍射峰宽化,即多层膜的晶粒更为细致,且随多层膜调制周期的减小晶粒尺寸进一步降低.

图 3 为不同调制周期的 Ag/Ni 多层膜与纯 Ag 和纯 Ni 膜层的显微硬度测试结果. 可以看出:随着多层膜调制周期的减小,多层膜的硬度呈现出增大趋势,特别是调制周期为 40 nm 的多层膜显微硬度是调制周期 $1\ 200\text{ nm}$ 膜层硬度的 2.4 倍,不仅显著高于 Ag 膜的硬度,而且明显高于 Ni 膜的硬度,即出现了纳米多层膜的超硬度现象. 多层膜硬化现象产生的原因可归于多层膜中存在的大量膜层界面对位错的钉扎作用(类似多晶材料中晶粒边界的硬化

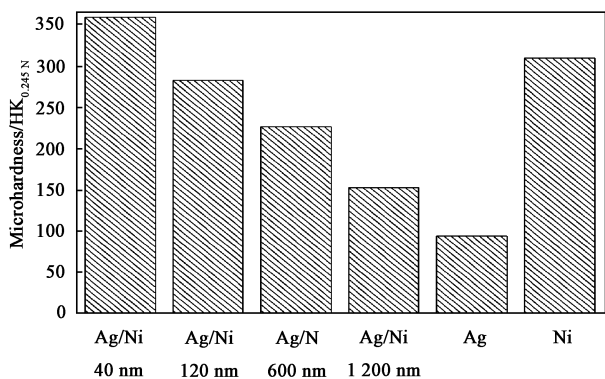


Fig. 3 Microhardness of the Ag film, Ni film and Ag/Ni multilayers with different modulation periods

图 3 Ag 膜、Ni 膜与

不同调制周期的 Ag/Ni 多层膜的显微硬度

作用,符合 Hall - petch 经验规律),多层膜调制周期愈小,这种作用愈为强烈,因而硬化作用更为显著.

划痕试验结果表明:不同调制周期的 Ag/Ni 多层膜的膜基结合强度 L_c 值均大于 100 N,膜层在划痕过程中未发生脱落和开裂现象(图 4),划痕边界有隆起现象是因为压头在滑动过程中,膜层由于保持了良好的韧性而发生严重塑性变形,一部分被压头碾压,一部分则从压头两边挤出,堆积在划痕边缘.多冲疲劳试验表明:离子辅助磁控溅射 Ag/Ni 多层膜有很好的韧性和高的膜基结合强度,即使将基体材料冲出塌陷坑,膜层仍未发生脱落和明显开裂现象(图 5 所示).

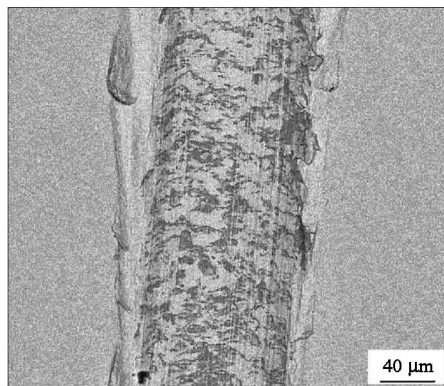


Fig. 4 Morphology of scratched scar on Ag/Ni multilayer

图 4 Ag/Ni 多层膜的划痕形貌

2.2 微动磨损性能

图 6 对比了钛合金表面沉积 Ag/Ni 多层膜,以及钛合金基材在微动磨损过程中动态摩擦力随摩擦行程的变化特征.图中的 1 个正弦变化周期对应 1 次微

动磨损的往复循环.可以看到:Ag 膜具有最好的减摩润滑性能,而不同调制周期 Ag/Ni 多层膜对钛合金基体也有明显的减摩润滑作用,且面膜效果随膜层调制周期减小而提高.试验期间多层膜均未发生脱落,这是由多层膜中软 Ag 层的减摩和增韧作用以及膜层结合强度高决定的.另外,随着调制周期的减小,Ag/Ni 多层膜的动态摩擦力逐渐降低,此归因于 Ag/Ni 多层膜的硬度随着调制周期的减小而增加,从而提高了膜层的承载能力和韧性的缘故.文献[18]研究结果表明,Ag/Ni 多层膜随着调制周期的减小硬度(H)增加,弹性模量(E)减小, H/E 比值增大,抗磨损性能提高,这与本文的结果是一致的.

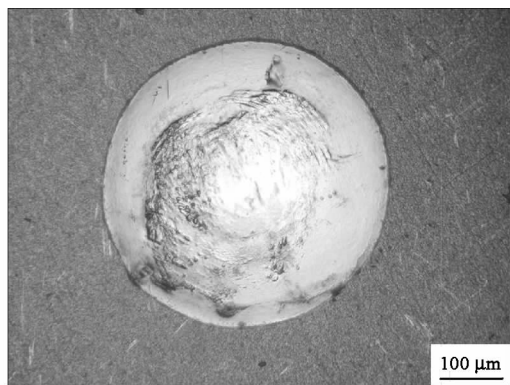


Fig. 5 Morphology of Ag/Ni multilayer after impact

图 5 Ag/Ni 多层膜多冲试验后的形貌

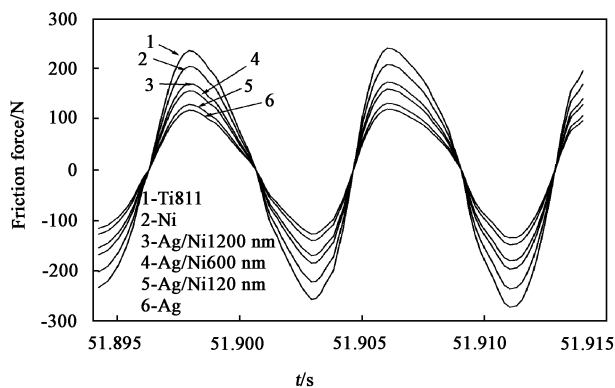
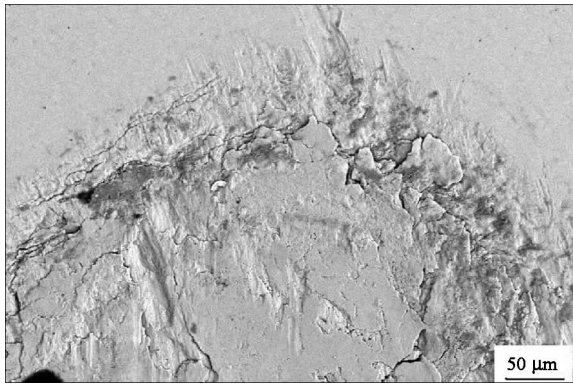


Fig. 6 Friction force of Ti811 coated with different films versus time

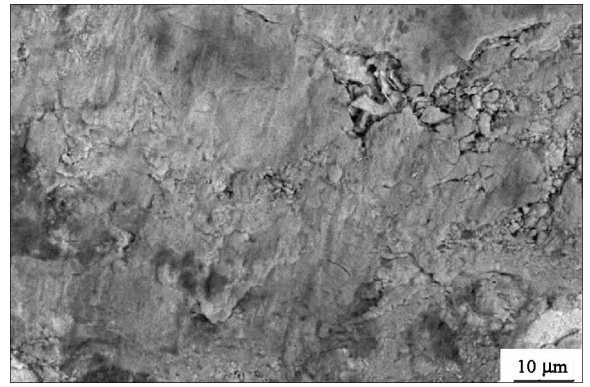
图 6 不同表面状态

钛合金在微动磨损过程中的动态摩擦力变化

图 7 对比了 Ti811 合金和调制周期 600 nm 的 Ag/Ni 多层膜微动磨损形态,可以看到, Ti811 合金沿着微动方向出现了犁沟和塑性流变痕迹,磨痕区内有大范围的片状脱层,接触区边缘与非接触区边界出现微裂纹. Ag/Ni 多层膜的微动磨损表面损伤



(a) Ti811



(b) Ag/Ni 600nm

Fig. 7 Morphologies of the worn surfaces of Ti811 alloy and Ag/Ni multilayers

图7 Ti811 钛合金和 Ag/Ni 多层膜的微动磨损磨痕形貌

特征为膜层自身的片状脱层,损伤较轻,有效保护了钛合金基体.

2.3 微动疲劳性能

图8对比了不同表面处理状态的 Ti811 合金微动疲劳寿命.可以看到 Ag/Ni 多层膜、Ag 膜、Ni 膜均使钛合金基材的 FF 寿命提高.其中 Ag 膜使钛合金的 FF 寿命提高了 2.45 倍,效果最为显著. Ni 膜仅使钛合金的 FF 寿命提高了 22%. Ag/Ni 多层膜提高钛合金 FF 寿命的程度随膜层调制周期的减小而增大,其中调制周期为 120 nm 的 Ag/Ni 多层膜使钛合金的 FF 寿命提高了 1.9 倍,是对比研究的多层膜中效果最为显著的.

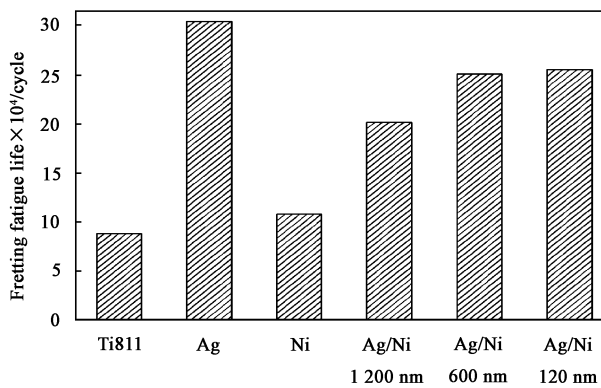


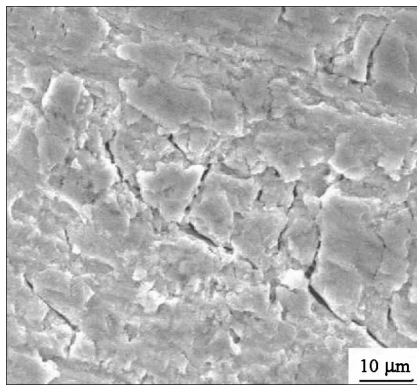
Fig. 8 Fretting fatigue lifetime of Ti811 with different surface treatments

图8 不同表面状态 Ti811 试样的微动疲劳寿命

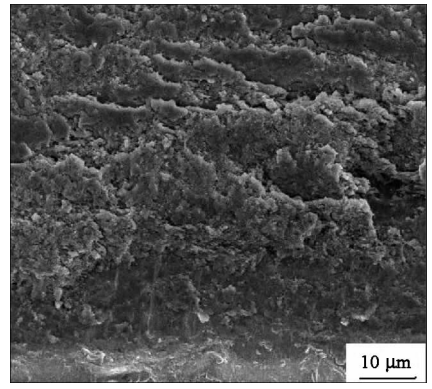
纯 Ag 膜对钛合金抗微动疲劳性能的显著改善作用归因于 Ag 膜的良好固体润滑特性,使微动接触区的摩擦力明显减小,有效降低了接触区的交变剪应力,从而缓解了微动的作用,阻止了 FF 裂纹的萌生和早期扩展,从而使钛合金的抗

FF 能力显著提高.纯 Ni 层在微动过程中的摩擦力较高(见图6),因而改善钛合金抗 FF 性能的作用不显著. Ag/Ni 多层膜提高钛合金 FF 抗力的主要原因在于以下 2 个方面的协同作用:① Ag/Ni 多层膜中较软的 Ag 层通过剪切变形有效消耗了微动作用过程中的能量,缓解表面应力集中,降低裂纹萌生几率;② 由于 Ag 和 Ni 的弹性模量相差大,而且 2 种元素固溶度低,在低剪切模量的 Ag 层中产生的位错遇到 Ag 层和 Ni 层相邻的界面时发生塞积,位错运动受阻,裂纹在界面被阻止和反射,从而使能量在层间消耗,膜层表现出较高的断裂韧性.不同调制周期的 Ag/Ni 多层膜对钛合金 FF 抗力提高的程度不同则与 Ag/Ni 多层膜的强韧综合性能和固体润滑特性的差异有关.随着 Ag/Ni 多层膜调制周期的减小,膜层的减摩润滑作用增强,承载能力逐步提高,抗 FF 性能得到改善.大调制周期的 Ag/Ni 多层膜(1200 nm)膜层硬度相对较低,承载能力亦较低,在微动接触条件下易于破坏,同时其摩擦系数较大,因而提高钛合金 FF 抗力的作用相对较低;调质周期为 120 nm 的 Ag/Ni 多层膜的硬度较高,承载能力和强韧综合性能好,同时具有较好的减摩润滑性能,因而 FF 抗力高.

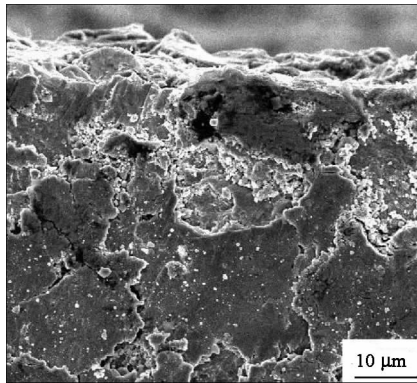
图9对比了 Ti811 合金及表面沉积 Ag/Ni 多层膜 FF 试样的表面损伤形态特征,可以看到 Ti811 合金表面呈疲劳多裂纹和脱层损伤特征[图9(a)],原因是微动作用下 Ti811 合金表面出现明显加工硬化,导致塑性枯竭,亚表层内产生微裂纹,并逐渐向表面扩展,和表面连通形成片状的脱层或网状开裂. Ag/Ni 多层膜的表面损伤特征为多层膜之间的疲劳脱层破坏[图9(b)~(d)],多层膜界面则有效阻止



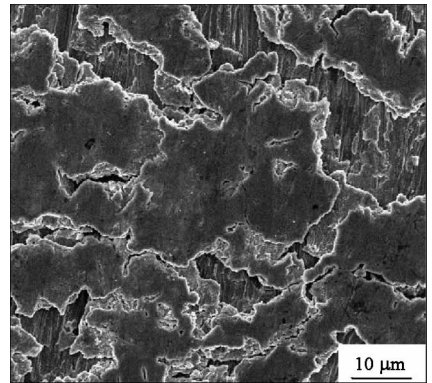
(a) Ti811



(b) 120 nm



(c) 600 nm



(d) 1 200 nm

Fig. 9 Morphologies of the worn surfaces of Ti811 alloy with and without Ag/Ni multilayers

图9 Ti811合金及表面沉积Ag/Ni多层膜试样微动疲劳损伤表面形貌

了疲劳裂纹向钛合金基材的扩展,因而提高了钛合金的FF抗力.3种调制周期的Ag/Ni多层膜中以调制周期为120 nm者损伤最轻,FF抗力亦最高.

3 结论

a. 利用离子辅助磁控溅射技术在Ti811钛合金表面制备了Ag膜、Ni膜和调制周期40~1200 nm的Ag/Ni多层膜,膜层的致密度高,晶粒细致,晶粒尺寸低于30 nm,膜基结合强度 L_c 值大于100 N. Ag/Ni多层膜的硬度随调制周期的减小而增大,当调制周期降至40 nm时,呈现出明显的超硬度现象.

b. Ag膜层具有良好的固体润滑性能,因而其耐微动磨损和抗微动疲劳性能优异.随调制周期的减小,Ag/Ni多层膜的减摩润滑性能和承载能力逐步提高,强韧综合性能改善,微动磨损和疲劳抗力增大,因而有效提高钛合金基材微动疲劳抗力的作用逐步增强.

4 致谢

本研究得到国家自然科学基金项目(50671085,

50771070)和国家863高技术研究发展计划项目(2007AA03Z521)的资助,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] James C W, Edgar A S. Progress in structural materials for aerospace systems [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51: 5 775 - 5 799.
- [2] Zhou Y G, Zeng W D, Yu H Q. An investigation of a new near - beta forging process for Titanium alloys and its application in aviation components [J]. *Materials Science and Engineering (A)*, 2005, 393: 204 - 212.
- [3] Ray A K, Das G, Ranganath V R. Failure of connecting pins of a compressor disc in an aero engine [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2004, 11: 613 - 617.
- [4] Bhaumik S K, Rangaraju R, Venkataswamy M A. Fatigue fracture of crank shaft of an aircraft engine [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9(3): 255 - 263.
- [5] Hutson A L, Niinomi M, Nicholas T, *et al.* Effect of various surface conditions on fretting fatigue behavior of Ti - 6Al - 4V [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(12): 1 223 - 1 234.
- [6] Wei R, Shankar M, Jeffrey H. Evaluation of coatings on Ti - 6Al - 4V substrate under fretting fatigue [J]. *Surface and*

- Coatings Technology, 2004, 192(2): 177 - 188.
- [7] Jin O, Mall S, Sanders J H, *et al.* Durability of Cu - Al coating on Ti - 6Al - 4V substrate under fretting fatigue [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(10): 1 704 - 1 710.
- [8] Liu D X, He J W. Comparative study on the fretting fatigue and fretting wear behaviors of Titanium alloy subject to various surface modifications [J]. Tribology, 2005, 25(1): 13 - 17 (in Chinese) [刘道新, 何家文. 经不同表面改性处理的钛合金的微动疲劳和微动磨损行为对比研究 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 13 - 17].
- [9] Liu D X, He J W. Metal - induced embrittlement of Titanium alloys by silver and Cadmium and its protection [J]. Journal of Materials Engineering, 1998, 8: 20 - 27 (in Chinese) [刘道新, 何家文. 钛合金的银脆、镉脆敏感性及其控制 [J]. 材料工程, 1998, 8: 20 - 27].
- [10] Yang W M C, Tsakalagos T, Hilliard J E. Enhanced elastic modulus in composition - modulated gold - nickel and copper - palladium foils [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48: 876 - 879.
- [11] Chu X, Barnett S A, Wong M S. Reactive balanced magnetron sputter deposition of polycrystalline TiN/NiN superlattice [J]. Surface and Coating Technology, 1993, 57: 13 - 18.
- [12] Zhang W, Xue Q J. Fretting wear characteristics of Ni/Cu multilayers electrodeposited on beryllium bronze substrate [J]. Wear, 1998, 214: 23 - 29.
- [13] Zhang X H, Liu D X, Wang X F, *et al.* The effect of TiN/Ti composite film and multilayer on fretting fatigue resistance of Ti811 alloy at elevated temperature [J]. Tribology, 2009, 29(4): 311 - 318 (in Chinese) [张晓化, 刘道新, 王小锋, 等. TiN/Ti 复合膜与多层膜对 Ti811 合金高温摩擦性能及微动疲劳抗力的影响 [J]. 摩擦学学报, 2009, 29(4): 311 - 388].
- [14] Ahmed N A G. An improved ion assisted deposition technology for the 21st century [J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 71: 82 - 87.
- [15] Ruset C, Grigore E, Collins G A, *et al.* Characteristics of the Ti₂N layer produced by an ion assisted deposition method [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174 - 175: 698 - 703.
- [16] Zhao Y Q, Liu B N. Effect of alloying composition on the mechanical properties of Ti811 alloy rods [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1994, 23(3): 59 - 65 (in Chinese) [赵永庆, 刘炳南. 合金成分对 Ti811 棒材性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 1994, 23(3): 59 - 65].
- [17] Zhang X H, Liu D X, Gao G R, *et al.* The effect of unbalanced magnetron sputtering MoS₂/Ti composite films on the tribological properties and fretting fatigue behaviors of Ti811 alloy at elevated temperature [J]. Tribology, 2008, 28(3): 219 - 224 (in Chinese) [张晓化, 刘道新, 高广睿, 等. 非平衡磁控溅射 MoS₂/Ti 复合薄膜对 Ti811 合金高温摩擦磨损性能及其微动疲劳行为的影响 [J]. 摩擦学学报, 2008, 28(3): 219 - 224].
- [18] Wen S P, Zong R L, Zeng F, *et al.* Nanoindentation and nanoscratch behaviors of AgNi multilayers [J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 4 558 - 4 562.

《摩擦学学报》被收录情况

本刊为《中国科学引文数据库》首批收录的期刊之一,已列入中国科学院文献评价中心《中国科学引文数据库统计源期刊》和科技部中国科学技术信息研究所《中国科技论文统计源期刊》,已连续四版列入《中文核心期刊要目总览》,已被美国《工程索引(EI)》、《金属文摘》、《化学文摘》和《剑桥科学文摘(CSA)》以及《日本科技文献速报(JST)》等国际知名检索系统收录;已入编《中国学术期刊(光盘版)》、中国知网和万方数据系统期刊网。