

文章编号: 1004-0609(2005)03-0471-07

钛合金表面离子束增强沉积的 Cr 和 CrMo 合金膜层及其性能^①

唐长斌¹, 刘道新¹, 朱晓东², 田林海², 文胜平², 宗瑞磊²

(1. 西北工业大学 腐蚀与防护研究室, 西安 710072;

2. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 利用多功能离子束增强沉积 (IBED) 设备, 在 Ti6Al4V 钛合金表面制备 Cr 和 CrMo 合金膜层, 以提高钛合金表面的耐磨性能。利用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、辉光放电光谱仪和显微硬度计分析和测试了 IBED 膜层的结构、形态、成分分布、硬度和膜基结合强度的大小。利用球-盘磨损试验机和电化学综合测试仪研究了 IBED 膜层的摩擦学性能和电化学腐蚀特性。结果表明, 利用 IBED 方法可以在难镀材料钛合金表面制备膜基结合强度高、结晶致密和晶粒尺寸达纳米级的高硬度 Cr 膜和 CrMo 合金膜层, 显著提高了钛合金表面的抗磨性能, 且膜层本身有很好的耐 Cl⁻ 介质环境电化学腐蚀性能, 与钛合金基体之间有很好的接触腐蚀相容性。

关键词: 钛合金; 离子束增强沉积; Cr 膜; CrMo 合金膜; 磨损; 腐蚀

中图分类号: TG 115

文献标识码: A

Cr and Cr-Mo coatings on titanium alloy surface prepared by ion-beam enhanced deposition

TANG Chang-bin¹, LIU Dao-xin¹, ZHU Xiao-dong²,

TIAN Lin-hai², WEN Sheng-ping², ZONG Rui-lei²

(1. Corrosion and Protection Research Laboratory,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Cr and Cr-Mo coatings were prepared on the substrate of Ti6Al4V alloy with multi-function ion-beam enhanced deposition (IBED) equipment in order to improve the wear resistance of the alloy. The microstructures, morphologies, component distributions, hardness and bonding strength of coatings were studied by X-ray diffractometer, scanning electron microscope, glow-discharge photo-electron spectroscopy and micro-hardness tester, respectively. The wear resistance and electrochemical corrosion properties of IBED coatings were investigated with ball-on-disk wear tester and electrochemical equipment, respectively. The results show that the denser, harder and nanometer crystalline Cr and Cr-Mo coatings with higher bonding strength can be prepared on titanium alloy surface by IBED method. The IBED Cr and Cr-Mo coatings significantly improve the wear resistance of Ti alloy surface, and the coatings have good corrosion resistance, low galvanic corrosion sensitivity and contact compatibility with titanium alloy in solution containing Cl⁻.

Key words: titanium alloy; ion-beam-enhanced deposition; Cr coating; CrMo coating; wear; corrosion

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好、高温稳定性优异等特点, 已成为重要的航空与航天用结构材

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50171054); 航空科学基金资助项目(01H53066)

收稿日期: 2004-08-30; 修订日期: 2005-01-06

作者简介: 唐长斌(1973-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 刘道新, 教授, 博士; 电话: 029-88491479; E-mail: liudaox@nwpu.edu.cn

料。但钛合金的导热性能差和不耐磨的特性影响了钛合金零、构件的安全性和可靠性,开发先进的表面技术以改善钛合金的耐磨损性能成为发展新一代高可靠性、长寿命航空发动机的重要研究课题^[1, 2]。为了获得具有一定耐久性的膜层以提高钛合金的耐磨性能,人们进行了大量的实验研究,并发现,由于钛合金表面极易生成氧化膜层,因此传统的电镀、化学镀等方法不仅会导致钛合金的氢脆隐患,而且难以获得结合强度高的防护镀层^[3]。表面等离子喷涂 CuNi^[4]或 CuNiIn^[5]和化学气相沉积 TiN^[6]处理虽然提高了钛合金表面的耐磨性,但却使基材常规疲劳强度降低。离子束增强沉积(ion beam-enhanced deposition, IBED)技术是综合了物理气相沉积和离子注入两项技术的优点而发展起来的一项较新技术,在以溅射镀和蒸发镀等方式制备膜层的同时,通过辅助离子束源轰击清洗工件,实现膜基界面共混,以促进膜层结晶致密与晶粒细化,从而可在钛合金等难镀材料表面获得膜基结合强度高,耐磨性能好的防护层^[7, 8]。目前,已有研究利用 IBED 技术制备了 TiN^[9]、TiCN^[10]、CrN^[11]硬质膜和 CuNiIn^[11]、MoS₂^[7, 12]软质膜等,但由于这类硬质膜与基体钛硬度差异大,膜基力学性能的协调性差,而软质膜减摩耐久性较低,因此,需要考虑硬度居中的合金膜层以获得综合性能好的钛合金表面耐磨改性层。电镀硬铬层目前已被广泛用作耐磨、耐蚀防护层,研究表明含 1% Mo(质量分数)的 CrMo 合金电镀层,其耐磨性比纯铬镀层还好,同时铬钼镀层具有较好的抗电化学腐蚀性和优异的抗高温氧化性能^[13]。由此推知,IBED Cr 或 CrMo 膜层在不降低钛合金基材耐蚀性能的情况下可实现显著提高钛合金耐磨性能的目的。本文作者采用改进的 IBED 设备研究了制备 IBED Cr 和 CrMo 膜的工艺,分析了膜层的结构与成分分布特点,评价了膜层的摩擦学性能和电化学腐蚀特性,为钛合金实际工程结构的耐磨性能改进提供了参考。

1 实验

1.1 IBED 法制备 Cr 和 CrMo 膜层

所用镀膜设备是利用早期离子束溅射和增强沉积设备^[4]改进的,其结构原理图如图 1 所示。图中的 6 为直径 10 cm 聚集型 Kaufman 溅射离子源,用于产生 Ar⁺ 离子束流,溅射 Cr 或 Mo 靶沉积薄膜;7 为直径 8 cm 宽束中能 Kaufman 离子源,用于膜基界面共混,增强膜基结合强度;8 为发散型低能

Kaufman 离子源,用于清洗基材和辅助膜层沉积;9 为磁控溅射靶,用于以较高速率制备 Cr 或 CrMo 膜层。

工作气体为高纯度 Ar 气,磁控溅射气压为 $1 \times 10^{-1} \sim 2.0 \times 10^{-1}$ Pa,离子束溅射气压为 $1.0 \times 10^{-2} \sim 2.5 \times 10^{-2}$ Pa,低能辅助离子源的能量范围 0~4 kV,束流范围为 0~1 A。实验中所用的离子束溅射和磁控溅射 Cr 靶与文献[11]所用的相同,尺寸分别为 110 mm × 100 mm × 12 mm 和 $\phi 120$ mm × 20 mm。Mo 靶由热轧的纯度为 99.95% 的 Mo 板加工而成,尺寸分别为 110 mm × 100 mm × 8 mm 和 60 mm × 10 mm × 0.4 mm。

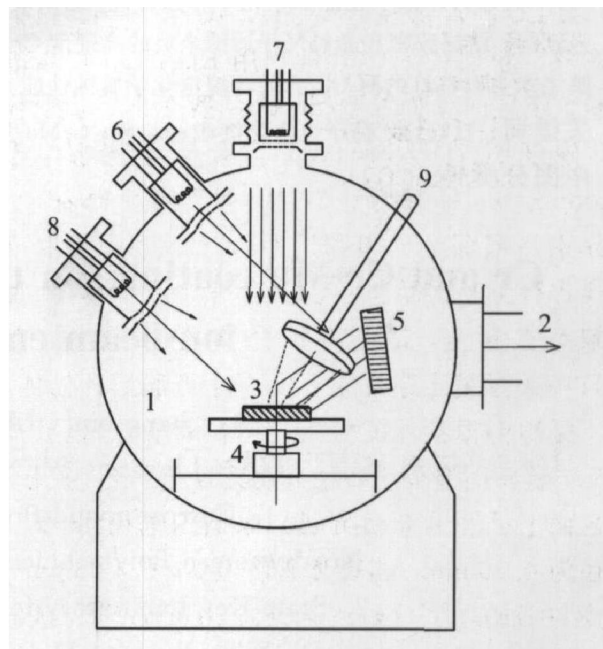


图 1 IBED 装置示意图

Fig. 1 Sketch of IBED equipment

1—Vacuum chamber; 2—Vacuum pump;

3—Specimen; 4—Sample holder;

5—Water cooled target; 6—Sputtering ion source;

7—Mid-energy bombarding ion source;

8—Low-energy ion source; 9—Magnetron sputtering target

实验用基材为 Ti6Al4V(TC4)合金,经过退火处理,硬度为 36HRC。试样经水砂纸打磨,机械抛光,表面粗糙度 $Ra \leq 0.1 \mu\text{m}$,在镀膜前用丙酮超声波清洗。膜层沉积之前,通过低能辅助源,采用轰击能量 1 kV 和束流 200 mA 的 Ar⁺ 束轰击清洗试样表面约 25 min,同时溅射清洗靶材。膜层界面的制备采用动反冲工艺进行,即在溅射沉积膜层的同时,用中能宽束辅助离子源轰击沉积膜,膜层溅射沉积能量为 2.4 kV,束流为 150 mA,而中能辅助轰击离子源的能量由 25 kV 逐渐降低到 4 kV。动反冲法制备界面后,膜层进一步增厚的方法主要

有: (1) 低能离子束增强磁控溅射纯 Cr 靶, 获得 Cr 膜; (2) 以低能束源辅助, 磁控溅射 Cr 靶和离子束溅射 Mo 靶联合, 制备低 Mo 含量的 Cr-Mo 合金膜; (3) 低能离子束增强磁控溅射 Cr-Mo 组合靶 1 制备中等含 Mo 量的 Cr-Mo 合金膜; (4) 低能离子束增强磁控溅射 Cr-Mo 组合靶 2 制备含 Mo 量高的 Cr-Mo 合金膜。用于膜层制备的低能辅助离子源能量为 400 V, 束流为 40 mA。膜层沉积过程中以流动水冷却试样台, 使试样整体温度控制在 150 °C 以下。

1.2 膜层结构分析与性能评价方法

IBED 膜层形貌采用 HITACHI S-570 扫描电镜观察。膜层中钼的含量利用 EDAX9900 能谱仪分析。膜层的物相用 D/max-3C 型 X 射线衍射仪分析。硬度用 HV-1000 型显微硬度计测量, 选用 Knoop 压头, 载荷为 0.25 N, 保载时间为 20 s。膜层元素沿层深的分布利用 GDA750 型辉光放电光谱仪进行分析。膜基结合强度采用 WS-2000 型自动划痕仪测量, 以临界载荷 P_c 值表征。用自制 TCY-A 型镀层连续压入仪评价^[14]膜层的韧性。

摩擦磨损性能的测试使用自制的球-盘磨损试验机。实验时盘固定不动, 而让球(固定于夹具上)在盘面上沿圆形轨迹滑动。摩擦副选用 Si_3N_4 球, 直径为 4.75 mm, 粗糙度平均值 $Ra \leq 0.05 \mu\text{m}$, 硬度为 80HRC。磨痕轨迹直径为 20 mm, 球与盘的相对转速为 110 r/min。实验温度为室温(25 ± 2) °C, 相对湿度为 65%。

电化学腐蚀特性用微机辅助 PS-168 型电化学测量系统测定。试样暴露面积为 0.25 cm^2 , 腐蚀介质为 3.5% NaCl, 温度为(30 ± 1) °C。辅助电极为铂电极, 参比电极为饱和甘汞电极。使用 ZRA-1 型电偶腐蚀计测量膜层与基材所组成电偶对的腐蚀电流, 钛合金试样与沉积膜层试样的面积比为 6.5, 用以模拟实际工件局部防护处理的情况, 连续测试时间为 24 h。

2 结果与讨论

2.1 膜层形态与结构

能谱分析表明, 上述方法(2)所制备的膜层为 CrMo 1.2 膜(Mo 含量为 1.2% (质量分数)); 方法(3)制备的膜层为 CrMo 8.5 膜(Mo 含量为 8.5%); 方法(4)获得的膜层为 CrMo 25 膜(Mo 含量为 25%), 各膜层表面成分分布均匀。图 2 所示为

IBED 纯 Cr 膜和 CrMo 25 合金膜层的 SEM 微观形貌。由图可看出, 在 IBED 过程中, 由于离子束的轰击作用, 所制备的膜层结晶均匀致密, 晶粒细小。

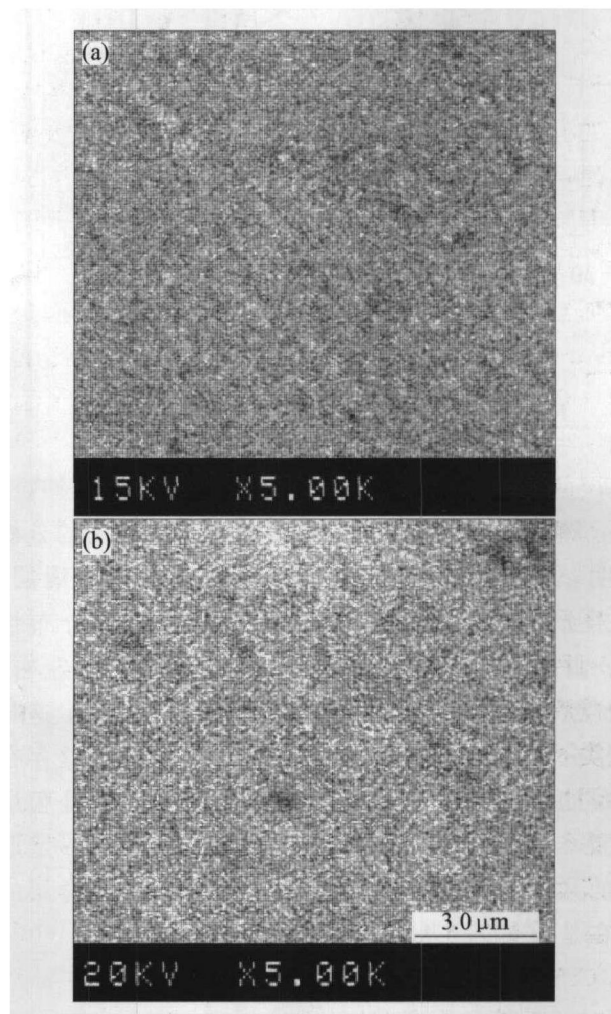


图 2 IBED 膜层的 SEM 微观形貌

Fig. 2 SEM micrographs of IBED coatings

(a) —Cr coating; (b) —CrMo 25 coating

图 3 所示为各 IBED 膜层的 X 射线衍射谱。除 CrMo 1.2 膜以(110)晶面择优取向, 其它各膜层均以(200)晶面择优取向, 膜层的衍射峰呈宽化现象。膜层衍射峰宽化的原因主要是膜层的晶粒细化和存在的残余压应力。若不考虑膜层中残余应力的影响, 则可根据 Scherrer 公式估算出 Cr 膜、CrMo 1.2 膜、CrMo 8.5 膜和 CrMo 25 膜的平均晶粒尺寸分别为 8.5、34.2、26.5 和 27.9 nm, 由此可见, IBED 膜层晶粒尺寸为纳米级。IBED 膜层的择优取向是由于辅助离子源轰击所致, 而 CrMo 1.2 膜层与其他膜层的择优取向不同, 则是由于所采用的 IBED 工艺方法不同所致。此外, (200)晶面与其他晶面衍射峰的合成导致了峰形复杂化, 且随 Mo 含量的不同而有所改变。

2.2 膜层元素沿深度分布及膜基结合强度

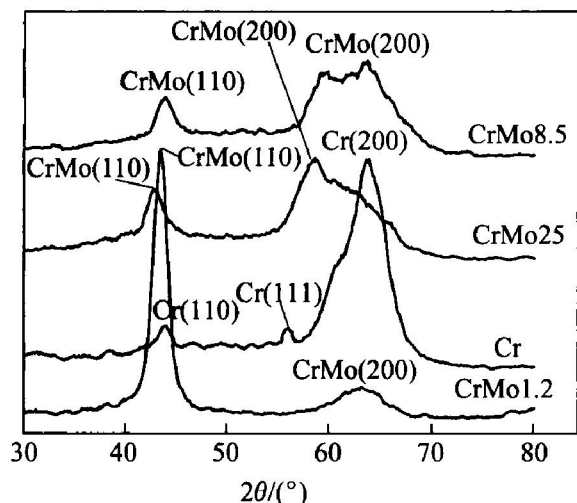


图3 IBED膜层的X射线衍射谱

Fig. 3 XRD patterns of IBED coatings

辉光放电光谱仪对膜层成分沿膜层层深的分析表明, IBED膜层的膜基界面存在一定的共混层。图4所示为CrMo 8.5膜层元素沿深度的分布情况。由图可看出, 膜层中Cr含量约占88%左右, Mo含量约为8%~9%, 膜层厚度约为4 μm, 这与能谱分析及金相剖面测量结果一致。在界面处存在微量的污染元素C和N的富集, 膜基界面处膜层元素Cr、Mo与基体元素Ti、Al、V呈现出一定厚度的共混层(图中的Al放大了10倍), 该混合层的存在是IBED膜基结合强度的提高所致。

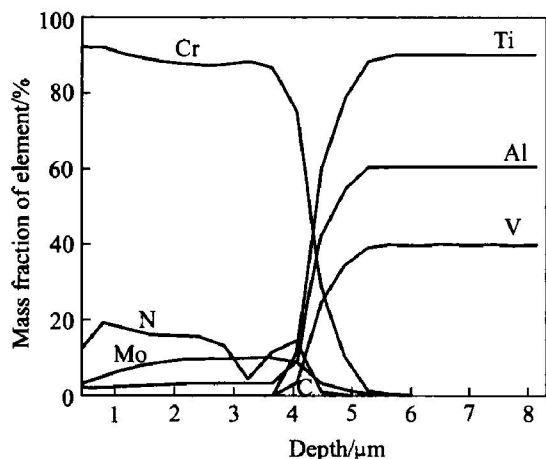


图4 CrMo 8.5膜层元素沿深度的分布

Fig. 4 Element distribution curves of CrMo 8.5 coating along depth direction

自动划痕仪对膜层临界破坏载荷 L_c 值的测试表明, 纯Cr膜为26 N, CrMo 1.2膜为18 N, CrMo 8.5膜为18 N, CrMo 25膜为39 N。由于 L_c 值受膜基硬度、膜层厚度和膜层失效形式等多因素的影响, 同时与实验参数有关, 因此它仅反映了

膜、基体系的综合承载能力。

2.3 膜层的硬度和韧性

硬度是抗磨性膜层的重要力学参量。图5所示为各膜层的Knoop显微硬度对比(包括退火前后的数值)。由图可见, 以IBED方法制备的CrMo系膜层的硬度较高, 均在 $HK_{0.25} N 20 GPa$ 以上, 这比用直流溅射法在GCr15上沉积的钼膜^[15]和电镀Cr膜或电镀Cr膜后离子注入后处理^[16]的硬度高。膜层的硬度除与膜层成分和组织结构有关外, 还受残余应力的影响, 为消除残余应力的影响, 对膜层进行了退火处理。退火前后Cr膜的硬度均为最大, 这主要可能是由于IBED Cr膜的晶粒度明显小于其它膜层。退火前后CrMo 1.2膜的硬度值变化最大, 这表明CrMo 1.2膜采用离子溅射和磁控溅射相结合的工艺, 造成膜层晶格较大的畸变, 因而存在较大的残余应力值。CrMo合金膜层的晶粒尺寸较为接近, 退火后CrMo合金膜层的硬度随Mo含量的增加略呈增大的趋势, 可能与Cr、Mo合金膜层的固溶强化作用(或晶格畸变程度)增加有关。

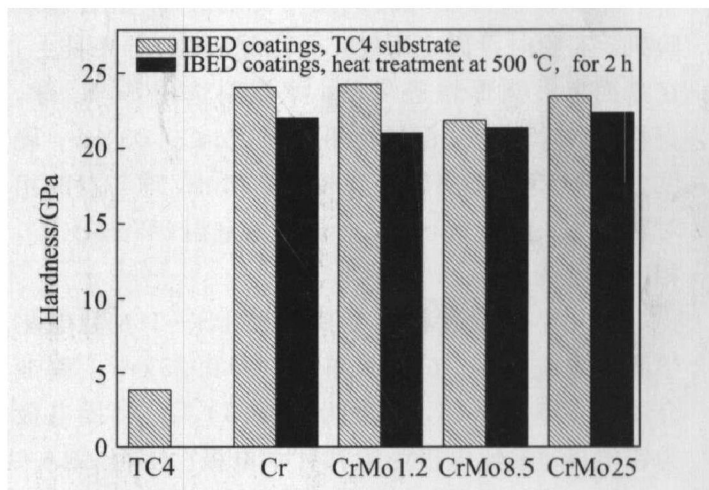


图5 膜层硬度对比

Fig. 5 Hardness contrast of different coatings

韧性是硬质膜层的重要性能指标。结果表明, CrMo 8.5合金膜层在压入载荷为60 N时, 膜层压痕中心出现网格状裂纹; Cr膜在压入载荷为50 N时出现网格状裂纹; CrMo 1.2膜在压入载荷为50 N时出现网格状裂纹和掉块; 而CrMo 25膜则在压入载荷为30 N时就出现了网格状裂纹, 这说明无论IBED纯Cr膜还是CrMo合金膜, 由于其硬度较高, 因而韧性相对较低, 并且在其它条件相同的情况下, 通常硬度愈高, 其韧性往往愈低。

2.4 膜层摩擦学性能

图 6 所示为 TC4 钛合金及其 IBED 膜层处理后的摩擦系数随磨损进程的变化情况。TC4 钛合金的摩擦系数呈现出先增后降的变化趋势。IBED Cr 膜的摩擦系数较为稳定, 且对 TC4 钛合金基材有明显的减摩作用。IBED CrMo 合金膜层经过早期磨合阶段后, 摩擦系数均高于 TC4 钛合金基材, 即 CrMo 合金膜层无减摩作用。Cr 膜层与 CrMo 膜层摩擦系数的差异与膜层成分、组织结构的不同有关, 而 CrMo 1.2 较 CrMo 8.5 和 CrMo 25 摩擦系数稍高的原因主要是由于膜层晶体学结构和残余应力状态的差异所致。图 7 所示为各试样摩擦学行为的不同在磨损形态上的反映。TC4 钛合金以犁削和

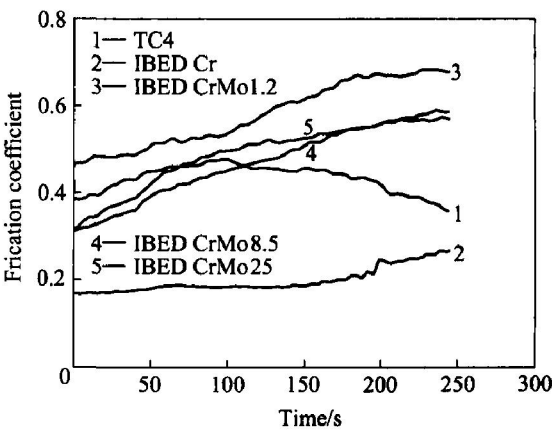


图 6 CrMo 系膜层和 TC4 钛合金摩擦系数的变化
Fig. 6 Variations of frication coefficients for CrMo coatings and TC4 alloy

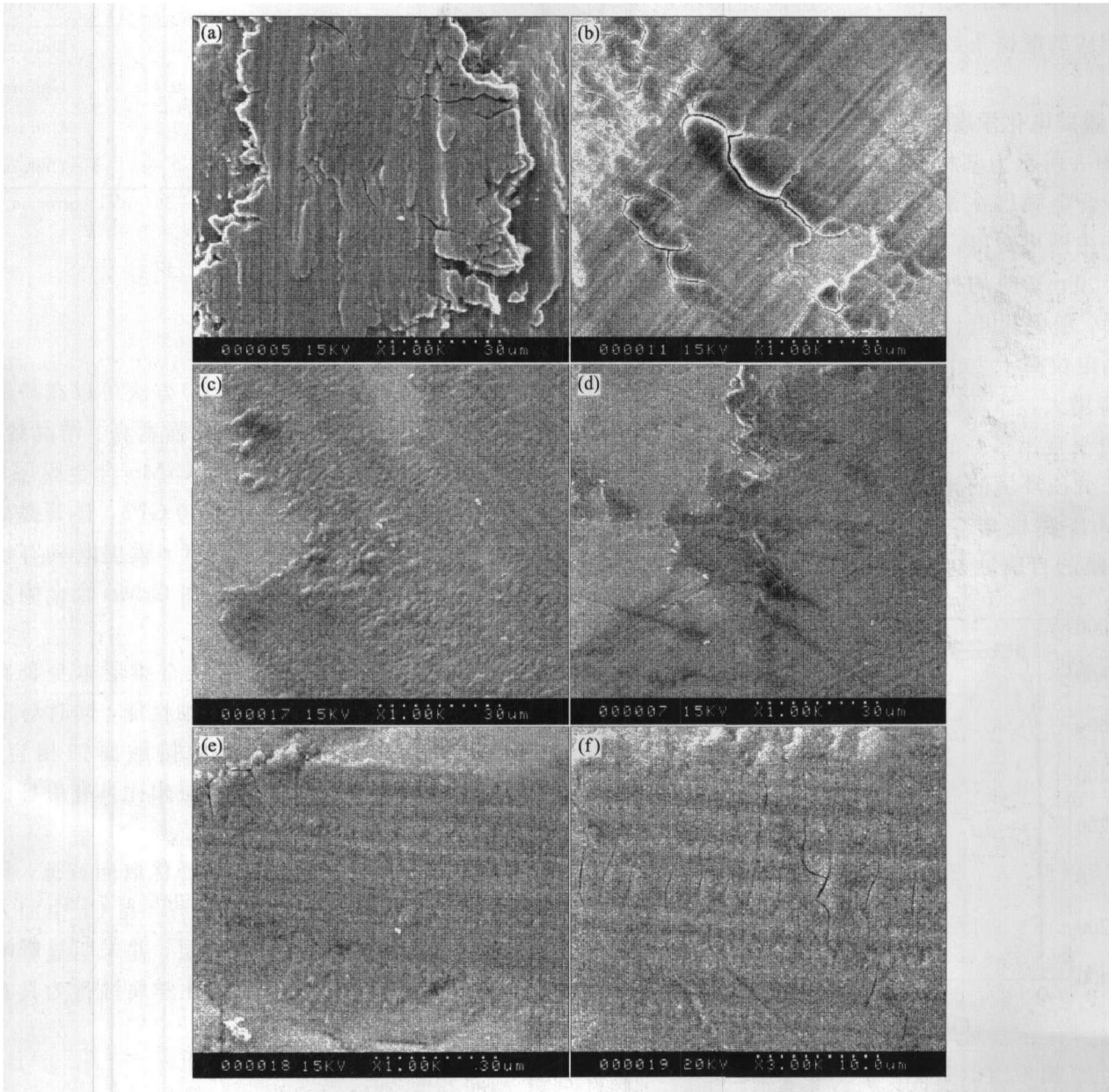


图 7 基体 TC4 钛合金和膜层磨痕形貌
Fig. 7 Wear morphologies of TC4 alloy and coatings
(a) —Ti6Al4V; (b) —Cr coating; (c) —CrMo 1.2 coating;
(d) —CrMo 8.5 coating; (e) —CrMo 25 coating; (f) —CrMo 25 coating

疲劳脱层为主要磨损失效形式, 而 IBED Cr 和 CrMo 膜层由于硬度高, 抗犁削磨损能力强, 因而表面犁沟特征轻微, 但由于 IBED 膜层的韧性较低, 因此疲劳开裂和脱层为主要失效形式。

由于 IBED Cr 膜和 CrMo 合金膜层硬度较高, 改善了 TC4 钛合金基材的表面抗粘着、抗磨粒磨损能力, 显著地提高了钛合金的耐磨性能。实验表明, 磨损 30 min 后, TC4 钛合金试样表面沿磨痕轨迹出现较深的沟槽, 而 IBED 膜层试样表面用轮廓仪仍然难以测出磨损量的大小, 此时与之接触的 Si₃N₄ 球摩擦副表面磨出明显的平台。IBED 膜层磨损后期的摩擦系数呈增加趋势变化的主要原因是由于表面膜层的磨损疲劳开裂及脱层造成的表面粗糙化, 其中 IBED CrMo1.2 膜层表面的粗糙度较高, 相应的摩擦系数也高。

2.5 膜层电化学腐蚀特性

图 8 所示为基材 TC4 钛合金与 IBED Cr 膜和 CrMo 合金膜层在 3.5% NaCl 溶液中的阳极极化曲线。由图可看出, CrMo 膜及 Cr 膜在自腐蚀电位小于 500 mV 时均处于钝化状态; 当电位超过 500 mV 后, 随电极电位升高, Cr 膜最先呈现活性特征; 当电位高于 700 mV 后, CrMo 膜层的电化学活性逐步增大, 而 TC4 钛合金在所测试的电位范围内一直呈现出很好的钝化特征, 即钛合金有很好的耐 Cl⁻ 介质环境的腐蚀性能。

从自腐蚀电位看, TC4 钛合金较 Cr 膜和 CrMo 膜的自腐蚀电位低, 即膜层与基材构成电偶

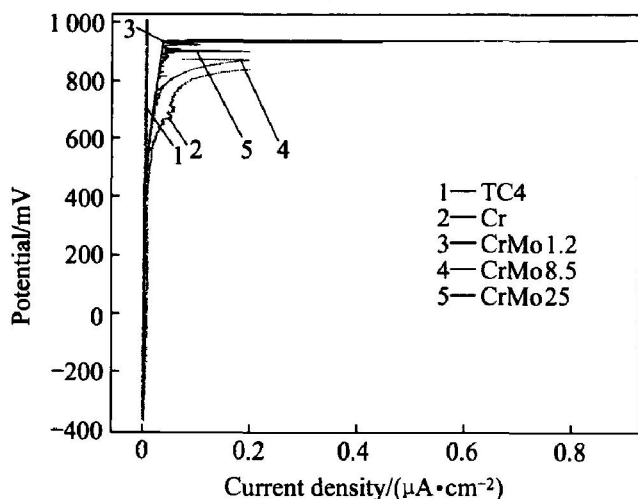


图 8 TC4 钛合金与 CrMo 系膜层在 3.5% NaCl 溶液中的阳极极化曲线

Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves of TC4 alloy, Cr and CrMo coatings in 3.5% NaCl solution

对时均为阴极, 而 TC4 态基材为阳极。表 1 所示为 TC4 态与 CrMo 膜及 Cr 膜电偶对的腐蚀实验结果。电偶腐蚀电流的测试表明, CrMo 膜及 Cr 膜与基材 TC4 态合金间的电偶腐蚀敏感性均较低, 即 CrMo 膜及 Cr 膜与钛合金在 Cl⁻ 介质环境中是电化学接触相容的, 同时膜层材料本身也具有较好的腐蚀抗力。

表 1 TC4 态合金与 CrMo 膜及 Cr 膜电偶对的腐蚀实验结果

Table 1 Corrosion results of galvanic couple for TC4 alloy and Cr, CrMo coatings

Galvanic couple	Free corrosion potential of anodic electrode/mV	Average galvanic current density/($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Corrosion pattern on anodic electrode
Cr coating-TC4	-359	0.16	Uniform
CrMo 1.2 coating-TC4	-169	0.44	Uniform
CrMo 8.5 coating-TC4	-121	0.53	Uniform
CrMo 25 coating-TC4	-329	0.22	Uniform

Free corrosion potential of TC4 alloy is -397 mV, corrosion environment is 3.5% NaCl solution.

3 结论

1) 离子束增强沉积 (IBED) 方法可以在易钝化材料钛合金表面制备膜基结合强度高、结晶致密、晶粒尺寸达纳米级的 Cr 膜和 CrMo 合金膜层, 这类膜层硬度约为 HK_{0.25}N 20~30 GPa, 显著提高了 TC4 钛合金表面的耐磨性能。Cr 膜层既具有抗磨作用, 同时也具有减摩作用, 而 CrMo 合金膜层仅具有抗磨作用。

2) IBED Cr 膜和 CrMo 合金膜层本身具有很好的耐 Cl⁻ 介质环境电化学腐蚀性能, 同时与 TC4 态钛合金基体之间有很好的接触腐蚀相容性。CrMo 合金膜层与 IBED Cr 膜层相比具有更好的钝化能力。

3) IBED 膜层具有一定的择优取向特征, 择优取向晶面依赖于 IBED 工艺过程。在 Cr 中加入一定量的 Mo 形成 CrMo 合金膜层, 并未明显影响其硬度, 但对其摩擦学行为和电化学腐蚀行为具有一定的影响作用。

REFERENCES

- [1] WU L L, Holloway B C, Beesabathina D P, et al. Analysis of diamond-like carbon and Ti/MoS₂ coating on

- Ti6Al4V substrates for applicability to turbine engine application [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 130(2): 207 - 213.
- [2] Rai A K, Ahmed J. Development of advanced coatings as palliatives for avoidance of fretting and galling in titanium alloy[R]. AD - A387446, San Diego: United-states Air Force Research Laboratory, 2001.
- [3] 张 轲, 刘道新. 钛合金湿法镀前活化预处理工艺的研究[J]. *材料保护*, 2001, 34(10): 42 - 43.
- ZHANG Ke, LIU Dao-xin. Investigation of surface pretreatment for titanium alloys[J]. *Materials Protection*, 2001, 34(10): 42 - 43.
- [4] Huston A L, Niinomi M, Nicholas T. Effect of various surface conditions on fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24: 1223 - 1234.
- [5] Xue L, Koul A K, Bibby M. A survey of surface treatments to improve the fretting fatigue resistance of Ti6Al4V [A]. *Proceeding Conference on Computer Methods and Experimental Measurement for Surface Treatment Effect (II)* [C]. Milan: Computational Mechanics Public, 1995. 265 - 272.
- [6] Kolkman H J. Effect of TiN/Ti gas turbine compressor coatings on the fatigue strength of Ti6Al4V base metal[J]. *Surface and Coating Technology*, 1995, 72: 30 - 36.
- [7] 刘道新, 唐 宾, 陈 华. 钛合金表面离子束增强沉积 MoS₂ 基膜层及其性能[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(3): 454 - 460.
- LIU Dao-xin, TANG Bin, CHEN Hua. MoS₂ composite films on Ti alloy prepared by ion-beam-enhanced deposition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(3): 454 - 460.
- [8] Kligenberg M, Arps J, Wei R. Practical application of ion beam and plasma processing for improving corrosion and wear protection[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 158 - 159: 164 - 169.
- [9] 蔡 洵, 顾剑锋, 周平南, 等. 离子束辅助增强沉积 TiN 薄膜界面结合强度的研究[J]. *金属热处理学报*, 1997, 18(2): 30 - 35.
- CAI Xun, GU Jian-feng, ZHOU Ping-nan, et al. The interfacial bonding strength of TiN films prepared by IBED[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1997, 18(2): 30 - 35.
- [10] 王培录, 刘仲阳, 孙官清, 等. TC4 钛合金上离子束辅助沉积 TiC_xN_y 膜的微结构与机械性质研究[J]. *真空科学与技术*, 1998, 18(6): 454 - 458.
- WANG Pei-lu, LIU Zhong-yang, SUN Guan-qing, et al. Studies of the microstructures and mechanical properties of the TiC_xN_y films on TC4 titanium alloys by ion beam assisted deposition[J]. *Vacuum Science and Technology*, 1998, 18(6): 454 - 458.
- [11] 刘道新, 张必强, 唐 宾. 钛合金表面离子束辅助沉积 CuNiIn 固体润滑膜和 Cr-N 硬质膜[J]. *材料工程*, 1998, 6: 38 - 41.
- LIU Dao-xin, ZHANG Bi-qiang, TANG Bin. CuNiIn solid lubricating films and Cr-N hard coating on Ti alloy prepared by ion-beam-enhanced deposition[J]. *Materials Engineering*, 1998, 6: 38 - 41.
- [12] Reneier N M, Hampshire J, Fox V C, et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 142 - 144: 67 - 77.
- [13] Goward G W. Progress in coatings for gas turbine airfoil[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1998, 108 - 109(1): 73 - 79.
- [14] 胡奈赛, 徐可为, 何家文. 涂、镀层的结合强度评定[J]. *中国表面工程*, 1998, 38(1): 31 - 35.
- HU Nai-sai, XU Ke-wei, HE Jia-wen. Evaluation of bonding strength on coating layers[J]. *China Surface Engineering*, 1998, 38(1): 31 - 35.
- [15] 许世红, 王金清, 刘维民, 等. 钼薄膜的制备、力学性能和磨损性能[J]. *材料保护*, 2003, 36(12): 12 - 14.
- XU Shi-hong, WANG Jin-qing, LIU Wei-min, et al. Preparation, mechanical and tribological properties of molybdenum thin films [J]. *Materials Protection*, 2003, 36(12): 12 - 14.
- [16] Walter K C, Schener J T, McIntyre P C. Increased wear resistance of electrodeposited chromium through applications of plasma source ion implantation techniques[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 85(1-2): 1 - 6.

(编辑 李艳红)