

# 脉冲偏压对矩形平面大弧源离子镀 TiN 膜层性能的影响 \*

林永清<sup>1</sup> 巩春志<sup>1</sup> 魏永强<sup>1</sup> 田修波<sup>1</sup> 杨士勤<sup>1</sup> 关秉羽<sup>2</sup> 于传跃<sup>3</sup>

1. 哈尔滨工业大学材料学院 现代焊接生产技术国家重点实验室 哈尔滨 150001
2. 沈阳北宇真空设备厂 沈阳 110045
3. 哈尔滨第一工具有限公司 哈尔滨 150020

**摘要** 采用矩形平面大弧源离子镀技术在 201 奥氏体不锈钢基体表面制备 TiN 硬质薄膜, 研究了脉冲偏压对 TiN 膜层的表面形貌、相结构、硬度和耐磨性能的影响. 结果表明, 随着脉冲偏压的增大, 薄膜中大颗粒的数目先增加后减少, 这是大颗粒受到离子拖曳力和电场力双重作用的结果. 存在一个最佳的脉冲偏压, 使得制备出的 TiN 膜层具有较高的  $I_{(111)}/I_{(200)}$  比例和较高的耐磨性. 脉冲偏压为 -300 V 时制备的 TiN 膜层具有最好的综合性能.

**关键词** 无机非金属材料, 离子镀, 矩形靶, 脉冲偏压, 氮化钛, 耐磨性

**分类号** TB321

**文章编号** 1005-3093(2008)04-0399-06

## Influence of pulse bias on surface properties of TiN films fabricated by arc ion plating with large rectangle targets

LIN Yongqing<sup>1</sup> GONG Chunzhi<sup>1</sup> WEI Yongqiang<sup>1</sup> TIAN Xiubo<sup>1\*\*</sup>  
YANG Shiqin<sup>1</sup> GUAN Bingyu<sup>2</sup> YU Chuanyue<sup>3</sup>

1.State Key Lab of Advanced Welding Production Technology,  
School of Materials Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

2.Shenyang Beiyu Vacuum Ltd., Co., Shenyang 110045

3.Harbin No.1 Tool Corporation, Harbin 150020

\* Supported by National Science Foundation of China No.10575025

Manuscript received April 20, 2007; in revised form April 17, 2008.

\*\* To whom correspondence should be addressed, Tel:(0451)86418784, E-mail:xiubotian@hit.edu.cn

**ABSTRACT** TiN films were fabricated on 201 austenitic stainless steel by vacuum arc ion plating with large rectangular planar target. The effect of pulse bias on the surface morphology, micro-structure, surface hardness and wear resistance, etc has been investigated. The number of macro particles demonstrates an increase with sample bias, followed by a decrease with bias. This may be attributed to the competition between the force resulted from ion drag and force induced by electrical filed. The results also show that there exists an optimal bias to achieve a larger ration of  $I_{(111)}$  to  $I_{(200)}$  and higher wear-resistance. The 300 V bias leads to better surface properties.

**KEY WORDS** inorganic non-metallic materials, ion plating, rectangular planar target, pulse bias, TiN, wear resistance

TiN 薄膜具有优异的耐蚀和耐磨性能, 在表面精饰和刀具的表面改性等方面得到了广泛的应用. 制备 TiN 膜的方法很多, 有反应磁控溅射<sup>[1]</sup>、空心阴极离子镀<sup>[2]</sup>和离子注入<sup>[3]</sup>等. 磁控溅射和空心阴极离子

镀的离化率低和离子注入改性层较薄, 不利于提高生产效率和满足使用的要求. 多弧离子镀技术具有离化率高、沉积速率快等优点, 但是也有大颗粒污染、靶材利用率低等不足. Olbrich 和 Fessmann<sup>[4,5]</sup>在 1991 年提出了脉冲偏压电弧离子镀技术, 降低了膜层表面的大颗粒污染, 改善薄膜的组织结构和性能<sup>[6]</sup>. 大连理工大学将脉冲偏压模式引入到圆形小弧源离子镀技术, 开展了大量的研究工作<sup>[7-9]</sup>. 虽然

\* 国家自然科学基金 10575025 资助项目.

2007 年 4 月 20 日收到初稿; 2008 年 4 月 17 日收到修改稿.

本文联系人: 田修波, 教授

表 1 TiN 薄膜的制备工艺参数

Table 1 Parameters for deposition of TiN films

Step	Process	Parameters
1	Target cleaning	Pulse bias voltage=-1000 V, Duty ratio=30%, Working pressure= $4.8 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^{-2}$ Pa, Working temperature= $110 \pm 5$ °C, up to 360 °C, $I_{Ti}$ =120 A, Processing time=5 min
2	TiN	Pulse bias voltage=-100~-400 V, Duty ratio=50%, Working pressure= $1.0 \pm 0.1$ Pa, Working temperature= $360 \pm 5$ °C, $I_{Ti}$ =120 A, Processing time=60 min

新型的矩形平面大弧源离子镀技术由于靶面积大,涂层的均匀性好、靶材率用率高<sup>[10]</sup>,但是在消除大颗粒污染方面不理想<sup>[10]</sup>.为了减少大颗粒,本文针对矩形大平面靶引入脉冲偏压,系统研究脉冲偏压对矩形平面大弧源离子镀 TiN 膜层表面性能的影响.

## 1 实验方法

使用 MIP800 多功能离子镀膜机(沈阳北宇真空设备厂生产)制备 TiN 膜层,在真空室壁均布 3 对矩形平面大弧源(实验中只开启 1 对弧源),靶材为 99.99%Ti,靶面尺寸为 95 mm×740 mm. TiN 膜层的基体为 50 mm×30 mm×0.7 mm 的 201 奥氏体不锈钢(C≤0.15%,Cr 16%~18%,Ni 3.5%~5.5%,Mn 5.5%~7.5%,P≤0.06%,S≤0.03%,Si≤1%,质量分数).将基体试样挂在转架上,表面正对靶面,与靶的间距大约 10 cm,转速为 1 r/min,本底真空为  $5 \times 10^{-3}$  Pa.镀膜前先用铠装电阻丝将真空室预热至  $110 \pm 5$  °C,电弧离子镀膜时基体的温度保持在  $360 \pm 5$  °C.

制备 TiN 膜层时,先用钛离子轰击清洗试样表面,以提高膜基结合力<sup>[8]</sup>.然后调整脉冲偏压参数,通入 N<sub>2</sub> 至  $1.0 \pm 0.1$  Pa.分别在脉冲偏压幅值为 -100 V, -200 V, -300 V, -400 V 条件下沉积 TiN 膜层,工艺参数列于表 1.

用日本 Hitachi S-3400N 扫描电镜(SEM)观察膜层的表面形貌;用日本理学电机公司生产的 D/max-rB 旋转阳极 X 射线衍射仪分析了膜层的相结构,工作条件为:CuK<sub>α</sub>,管压 45 kV,管流 40 mA,扫描步长为 0.05°,扫描范围 20°~100°;用自制球痕测厚仪(Ball Crater)测量膜层的厚度;用扫描电镜观察了膜层的截面形貌;用日本岛津公司产的 DUH-W201S-E 型微小压痕仪测试了膜层的显微硬度,测试条件为:载荷为 150 mN,加载速度为 2.6 mN/s,载荷保持时间为 10 s;用自制球盘式(ball-on-disk)摩擦磨损试验机测试膜层的摩擦磨损性能,摩擦副采

用 Φ6.35 mm 的 GCr15 磨球,测试参数为载荷 50 g,转速为 50 r/min,转动半径为 6.0 mm,测试时间为 1500 s;然后用奥林巴斯 GX71 光学显微镜观察磨痕形貌,并测量磨痕宽度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 脉冲偏压对 TiN 薄膜厚度和表面形貌的影响

随着脉冲偏压数值的增大,在较高的负偏压电场作用下,大量离子沉积到基体,薄膜生长得较快,膜的厚度比较大.但是当负偏压的数值过大时,离子强烈地轰击基体引起溅射,使膜的厚度减小(图 1).江宁<sup>[11]</sup>用非平衡磁控溅射技术沉积 TiN 薄膜,偏压从 0 V 变化到 -500 V 膜层的沉积速率先增大后减小,偏压为 -50 V 时沉积的膜层最厚.

从图 2 可见,随着脉冲偏压幅值的提高,膜层表面大颗粒的尺寸和密度先增大后减小,在沉积的 TiN 膜层表面出现许多微坑.本文制备的 TiN 膜层表面颗粒细小,均在 3.75 μm 以下,尤其是 -400 V 下制备的 TiN 膜层表面最大颗粒尺寸仅 3.0 μm,比文献[8]和[12]报道的 TiN 膜层最大颗粒尺寸(15 μm 和 9 μm)有大幅度的减小.由此可见,用脉冲偏压和矩

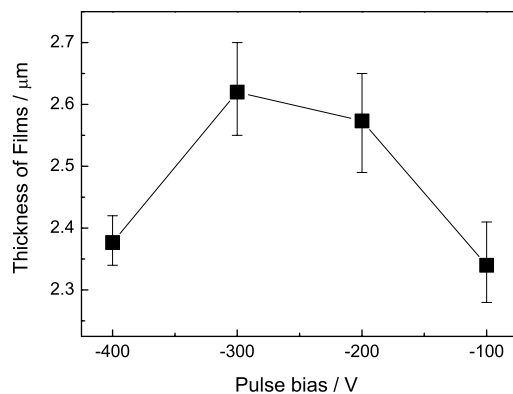


图 1 膜厚与脉冲偏压的关系

Fig.1 Thickness of films as a function of pulse bias

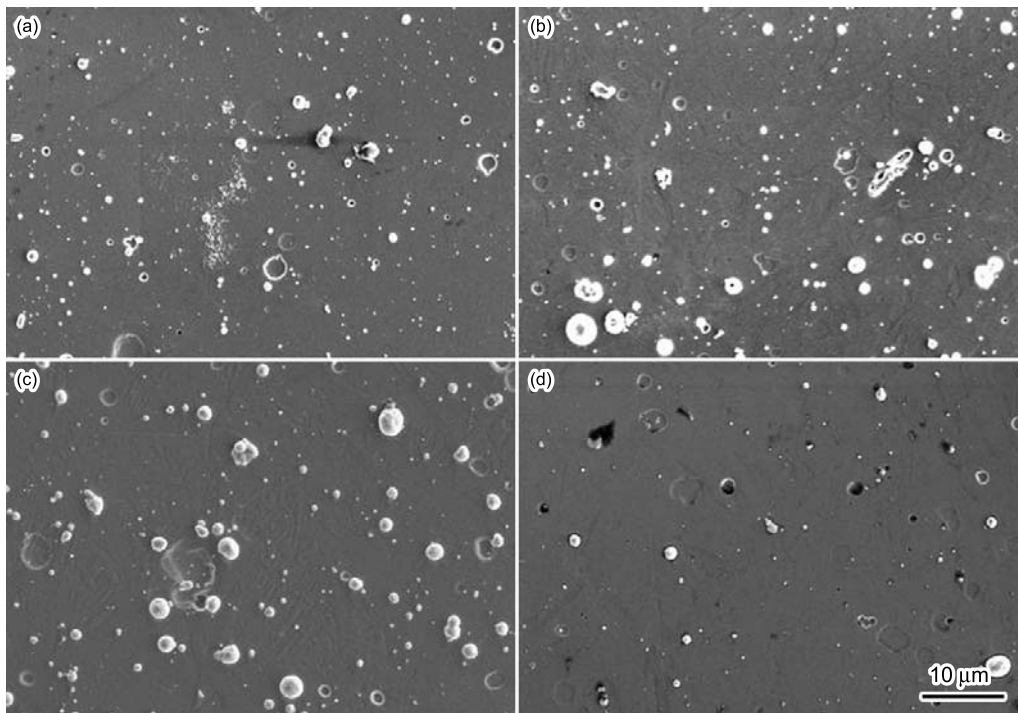


图 2 不同脉冲偏压下制备的 TiN 膜层的表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of TiN films produced under different pulse bias (a) -100 V; (b) -200 V; (c) -300 V; (d) -400 V

形平面大弧源离子镀技术制备的 TiN 薄膜具有较好的表面形貌。

增大偏压可以降低电弧离子镀 TiN 膜层表面的颗粒尺寸和颗粒密度,随着负偏压的增大,膜层表面的大颗粒密度和尺寸均下降<sup>[8,13]</sup>。大颗粒的减少,一般可归结于大颗粒所带负电荷的作用<sup>[8]</sup>。大颗粒在向基材飞行的过程中,电子的热运动大大强于离子,这使得颗粒带上一定量的负电荷,而基材加有一定的负偏压,排斥作用阻碍大颗粒的沉积。偏压越高,阻力越大,薄膜表面的大颗粒越少<sup>[5]</sup>。大颗粒受到重力、离子拖曳力以及鞘层电场力的共同作用<sup>[9]</sup>。由于工件是立放的,重力趋向于去掉大颗粒;离子拖曳力使大颗粒飞向工件;而电场力使大颗粒远离工件。在负偏压较小时,随着电压的增大,离子流和速度增加,拖曳力增加有助于大颗粒粘附,使大颗粒的数目增多;随着偏压的增加,电场排斥力也增加。当偏压增加到一定程度时,根据 Child 定律 ( $I \propto \sqrt{V}$ ),排斥力效应渐渐大于离子拖曳力,使大颗粒得数目反而减小。

## 2.2 脉冲偏压对 TiN 薄膜择优取向和硬度的影响

从图 3 可见,膜层为 TiN 单相结构,没有出现 Ti 和 Ti<sub>2</sub>N 的衍射峰,并且在不同脉冲偏压下制备的 TiN 膜层衍射图谱的峰位和形状没有明显的差别,所有膜层的相结构均以 (111)、(222) 晶面择优取向为主。这表明,膜层的化学成分随着脉冲偏压的变化不

大。V.N.Zhitomirsky<sup>[14]</sup>利用过滤电弧离子镀技术在 WC-Co 基体上沉积 TiN 膜层,发现在 -40 V~600 V 偏压范围内所制备的膜层均以 (111) 择优取向为主;G.Q.Yu<sup>[15]</sup>利用离子束辅助过滤阴极弧技术沉积 TiN 膜层也具有类似的相结构。

用 PVD 沉积技术制备的 TiN 涂层最常见的两种择优取向是 TiN(111)、TiN(200),并且晶面衍射强度的比值是影响膜层质量的重要因素,较大的  $I_{(111)}/I_{(200)}$  对应着较高的薄膜硬度<sup>[16,17]</sup>。图 4 给出

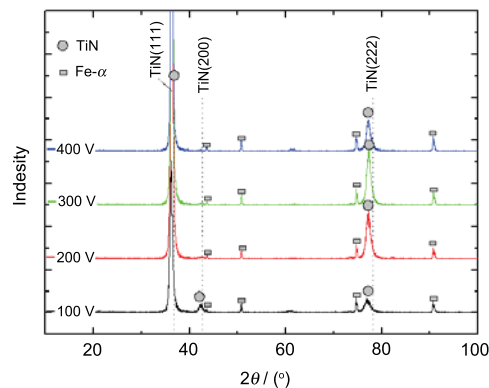


图 3 不同脉冲偏压下制备的 TiN 膜层的 X 射线衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of TiN films fabricated at different pulse bias

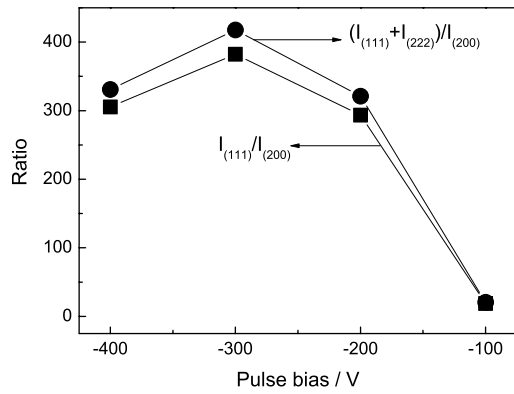


图4 不同晶面衍射强度比与脉冲偏压的关系

Fig.4 Relationship between ratios of intensities of different planes and pulse bias

了不同晶面衍射强度比  $I_{(111)}/I_{(200)}$ ,  $[I_{(111)}+I_{(222)}]/I_{(200)}$  与脉冲偏压的关系曲线. 从图 4 可以看出, 随着脉冲偏压的增大,  $I_{(111)}/I_{(200)}$ ,  $(I_{(111)}+I_{(222)})/I_{(200)}$  均先增大后减小, 即 (111)、(222) 晶面择优取向先增强后减弱, 且 (111)、(222) 晶面始终保持着较强的择优取向.

脉冲偏压越高, 离子的能量越大, 内应力  $\sigma$  与  $[Y/(1-\nu)]E^{1/2}/(R/j+kE^{5/3})$  成正比<sup>[18]</sup> (其中  $Y$  为薄膜材料的杨氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $R$  为净沉积离子流量,  $j$  为轰击离子流量,  $k$  为与材料相关的系数,  $E$  为离子能量). 当轰击离子流量 ( $j$ ) 与净沉积离子流量 ( $R$ ) 的比值  $j/R$  较大 (电弧离子镀就属于这种情况) 时, 随着离子能量  $E$  的增大, 内应力  $\sigma$  先增大后减小. 因而膜层的内应力也先增大后减小. 膜层总能量的降低是膜层生长的动力<sup>[19-21]</sup>, 而薄膜总能量由界面能、表面能和弹性应变能组成, 体系一旦选定, 界面能受沉积条件的影响较小. 在低应力情况下, 弹性应变能较小, 表面能决定薄膜的总能量, 此时表面能较小的晶面择优生长. 当薄膜有较大的应力时, 弹性应变能就成为薄膜总能量的决定因素, 应变能最小的晶面就会择优生长. 而对于 NaCl B1 型面心立方结构的 TiN, 其 (100) 面的表面能最小, (111) 面的应变能最小<sup>[21,22]</sup>, 因此随着脉冲偏压的增大, (111)、(222) 晶面相对于 (200) 晶面的择优取向程度先提高后降低, 在本文的试验条件下 -300 V 时达到最大值.

在图 5 中, 硬度最初随着脉冲偏压的增大而增大, 在 -300 V 时达到最大, 之后再增大脉冲偏压硬度大幅下降. 脉冲偏压影响着膜层的组织结构, 而组织结构又决定着膜层的性能, 例如具有强烈 TiN(111) 择优取向的膜层表面光亮、硬度高、耐磨性好、与基体有较高的结合强度<sup>[17,23]</sup>, 因而脉冲偏压的改变也会影响膜层的硬度. 在 -200 V、-300 V 下制备的膜层

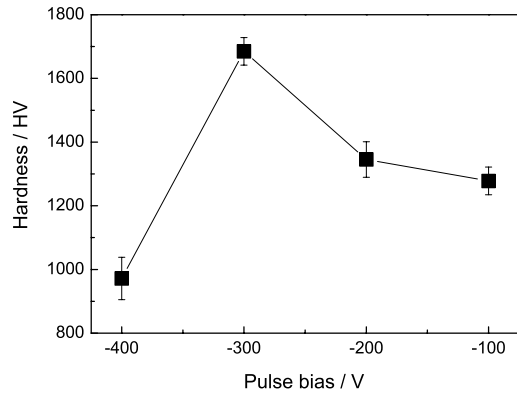


图5 膜层硬度与脉冲偏压的关系

Fig.5 Hardness of films as a function of pulse bias

的  $I_{(111)}/I_{(200)}$ 、 $(I_{(111)}+I_{(222)})/I_{(200)}$  较大, 即该膜层具有很强的 (111)、(222) 面择优取向, 所以其硬度值较高<sup>[17,23,24]</sup>. 尤其在脉冲偏压为 -300 V 条件下制备的膜层, 其  $I_{(111)}/I_{(200)}$ 、 $(I_{(111)}+I_{(222)})/I_{(200)}$  最大, (111)、(222) 面择优取向最强, 因而膜层的硬度最大. 但是, 再增大脉冲偏压,  $I_{(111)}/I_{(200)}$ 、 $(I_{(111)}+I_{(222)})/I_{(200)}$  减小, (111)、(222) 面择优取向减弱, (200) 面衍射峰值增大, 因此膜层的硬度下降. 黄佳木<sup>[25]</sup> 利用直流磁控溅射技术在室温下沉积 TiN 膜层, 发现随着偏压从 0 V 增大到 -160 V, 膜层的硬度先增大后减小, 并且与之对应的是其膜层的 TiN(111) 择优取向先增强后减弱.

TiN(111) 晶面择优取向程度的提高有利于膜层硬度的提高, 但实际上组织结构、成分、缺陷、残余应力等对硬度均有影响. 其中厚度也是一个较大的影响因素, 对比图 4 与图 5 可以发现, 偏压从 -300 V 增大到 -400 V 时, 硬度下降的幅度远大于  $I_{(111)}/I_{(200)}$ 、 $(I_{(111)}+I_{(222)})/I_{(200)}$  下降的幅度. 硬度的这种变化可能与膜层厚度变化有关. A.J.Perry<sup>[26]</sup> 研究了膜厚对薄膜硬度的影响, 发现当膜层厚度小于 4  $\mu\text{m}$ , 基体对薄膜硬度的影响占优. 本文制备的膜层厚度均在 4  $\mu\text{m}$  以下, 且采用的 201 奥氏体不锈钢基体较 TiN 膜层软得多, 因此薄膜硬度随着膜厚的减小而降低.

### 2.3 脉冲偏压对 TiN 薄膜摩擦磨损性能的影响

图 6 表明, 在各种工作偏压下制备的膜层, 其摩擦系数刚开始均线性地上升至大约 1.1, 之后保持稳定.

由于电弧离子镀沉积技术缺少大颗粒滤过装置, 制备出的膜层表面有大量的钛熔滴的凝固颗粒, 镶嵌或半埋在膜层中, 有些膜层表面还有许多微坑 (图 3). 这导致试样表面有较高的粗糙度, 摩擦系数较大.

从图 7 可以看出, 脉冲偏压对 TiN 膜层的摩擦

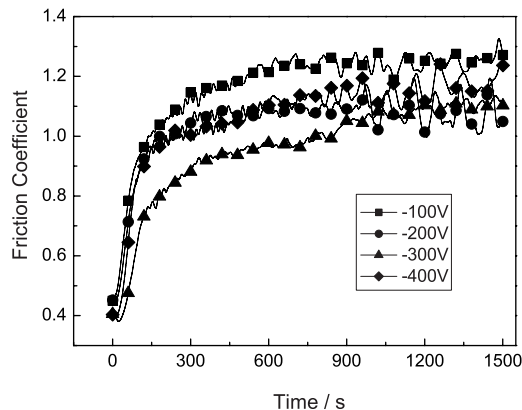


图 6 不同脉冲偏压下制备的 TiN 膜层的摩擦系数

Fig.6 Friction coefficient of TiN films fabricated at different pulse bias

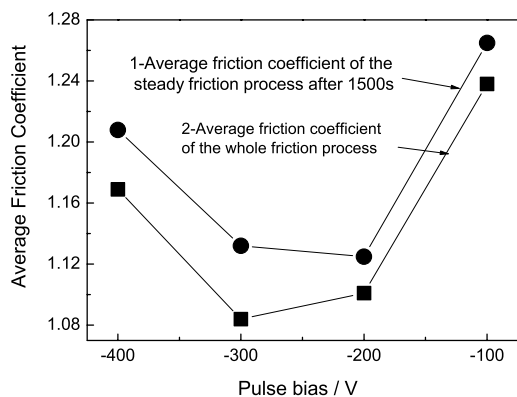


图 7 平均摩擦系数与脉冲偏压的关系

Fig.7 Relationship between average friction coefficients and pulse bias

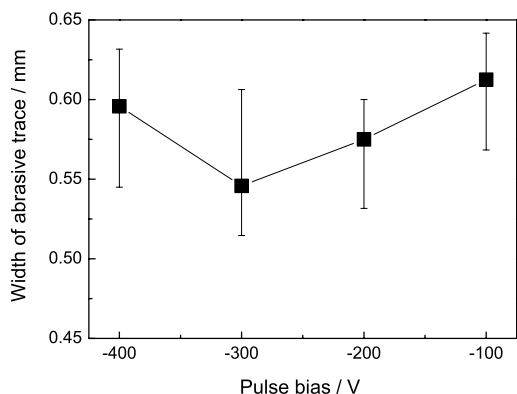


图 8 磨痕宽度与脉冲偏压的关系

Fig.8 Relationship between width of abrasive trace and pulse bias

磨损性能有很大的影响。无论是整个摩擦磨损过程的摩擦系数的平均值还是稳定摩擦阶段的摩擦系数的平均值,均随着脉冲偏压的增大,先降后升。脉冲偏压为  $-200\text{ V}$  和  $-300\text{ V}$  时,平均摩擦系数较小。这与磨痕宽度与脉冲偏压的关系曲线(图 8)所表现出

来的趋势基本一致,只是偏压为  $-200\text{ V}$  时沉积的膜层的磨痕宽度并没有图 7 曲线中表现的低值那么小。

脉冲偏压影响膜层的表面粗糙度、膜层厚度、硬度等膜层性能,进而影响膜层的摩擦磨损性能。对于偏压为  $-100\text{ V}$  时制备的膜层,其硬度较小,膜厚最小,而表面粗糙度较大,所以其平均摩擦系数和磨痕宽度最大,耐磨性最差;随着脉冲偏压的提高,离子轰击效应的增强引起薄膜的致密度提高,膜层厚度和硬度均增大,偏压为  $-200\text{ V}$ 、 $-300\text{ V}$  时制备的膜层表面具有较低的摩擦系数和较高的耐磨性(图 7 和 8),但是再增大脉冲偏压,由于硬度较低且膜层最薄,结果其耐磨性能大大降低。

### 3 结 论

采用脉冲偏压和矩形平面大弧源离子镀技术,能有效地降低大颗粒在 TiN 薄膜表面沉积的几率。由于受到离子拖曳力和电场力的竞争作用,大颗粒在工件上的沉积量随着偏压先增加后减少。脉冲偏压的变化引起薄膜相结构择优取向的改变,偏压为  $-300\text{ V}$  时制备的 TiN 薄膜 (111) 晶面的择优取向最突出,使其硬度达到最大值 (1649 HV); 脉冲偏压影响薄膜的表面形貌和组织结构,使薄膜的平均摩擦系数和磨痕宽度呈现先增加后减小的变化过程,脉冲偏压为  $-300\text{ V}$  时沉积的 TiN 薄膜具有最佳的综合性能。

### 参 考 文 献

- BAI Xiuqin, LI Jian, Study of low temperature deposition of magnetic sputtering TiN films and their tribological properties, *Lubrication Engineering*, **5**, 15(2006) (白秀琴, 李 健, 磁控溅射 TiN 薄膜低温沉积技术及其摩擦学性能研究, *润滑与密封*, **5**, 15(2006))
- WANG Shidong, HUI Wenhua, QI Shan, XU Aiqun, Friction-wear behaviour of TiN ion-plated coating by hollow cathode deposition, *Materials Science and Technology*, **1**(3), 24(1993) (王世栋, 惠文华, 祁 珊, 徐爱群, 空心阴极 TiN 镀层的摩擦磨损行为, *材料科学与工艺*, **1**(3), 24(1993))
- LI Jinlong, SUN Mingren, MA Xinxin, TANG Guangze, JIN Yinyu, Composition and structure of TiN film prepared by plasma-based ion implantation, *Materials Science and Technology*, **15**(1), 40(2007) (李金龙, 孙明仁, 马欣新, 唐光泽, 金银玉, 等离子体基离子注入制备 TiN 膜的成分结构, *材料科学与工艺*, **15**(1), 40(2007))
- W.Olbrich, J.Fessmann, G.Kampschulte, J.Ebberink, Improved control of TiN coating properties using cathodic arc evaporation with a pulsed bias, *Surf. Coat. Tech.*, **49**, 258(1991)
- J.Fessmann, W.Olbrich, G.Kampschulte, et al, Cathodic arc deposition of TiN and Zr(CN) at low substrate temperatures using a pulsed bias voltage, *Mat. Sci. Eng. A*, **140**, 830(1991)

- 6 A.J.Perry, J.R.Treglio, A.F.Tian, Low temperature deposition of titanium nitride, *Surf. Coat. Tech.*, **76-77**, 815(1995)
- 7 HUANG Meidong, DONG Chuang, GONG Jun, LU Chunyan, SUN Chao, HUANG Rongfang, WEN Lishi, Effect of bias on AlN thin films by cathodic arc ion plating, *Chinese Journal of Material Research*, **15**(6), 675(2001)  
(黄美东, 董闯, 宫骏, 卢春燕, 孙超, 黄荣芳, 闻立时, 偏压对阴极电弧离子镀 AlN 薄膜的影响, *材料研究学报*, **15**(6), 675(2001))
- 8 HUANG Meidong, DONG Chuang, SUN Chao, WEN Lishi, Mechanism of effect of bias on morphologies of films prepared by arc ion plating, *Acta Metallurgica Sinica*, **39**(5), 510(2003)  
(黄美东, 林国强, 董闯, 孙超, 闻立时, 偏压对电弧离子镀薄膜表面形貌的影响机理, *金属学报*, **39**(5), 510(2003))
- 9 GUO Huimei, LIN Gouqiang, SHENG Mingyu, WANG Dezhen, DONG Chuang, WEN Lishi, Analysis and calculation of force on macro-particles in plasma sheath, *Acta Metallurgica Sinica*, **40**(10), 1064(2004)  
(郭慧梅, 林国强, 盛明裕, 王德真, 董闯, 闻立时, 大颗粒在等离子体鞘层中的受力分析与计算, *金属学报*, **40**(10), 1064(2004))
- 10 WANG Fuzhen, MA Wencun, *Applications of Vapor Deposition Technology*, 1st Edition, Beijing, China Machine Press, 143-153(2006)  
(王福贞, 马文存, *气相沉积应用技术*, 第一版, 北京, 机械工业出版社, 143-153(2006))
- 11 JIANG Ning, SHEN Yaogen, ZHANG Hanjie, BAO Shining, Influence of substrate bias on properties of TiN films with X-ray photoelectron spectroscopy and atomic force microscopy studies, *Vacuum Science and Technology*, **24**(6), 459(2004)  
(江宁, 沈耀根, 张寒洁, 鲍世宁, 用 XPS 和 AFM 等方法研究氮化钛薄膜的物理化学特性, *真空科学与技术学报*, **24**(6), 459(2004))
- 12 LI Chengming, ZHANG Yong, CAO Erya, SEM analysis of the macro particles in TiN and (TiZrCr) N films deposited by multi-arc ion plating, *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, **19**(4), 565(2000)  
(李成明, 张勇, 曹尔妍, 多弧离子镀 TiN 和 (TiZrCr)N 膜中宏观颗粒的 SEM 分析, *电子显微学报*, **19**(4), 565(2000))
- 13 T.Matsue, T.Hanabusa, Y.Ikeuchi, Dependence to processing conditions of structure in TiN films deposited by arc ion plating, *Vacuum*, **74**(3-4), 647(2004)
- 14 V.N.Zhitomirsky, U.Kinrot, B.Alterkop, R.L.Boxman, S.Goldsmith, Influence of gas pressure on the ion current and its distribution in a filtered vacuum arc deposition system, *Surf. Coat. Tech.*, **86/87**(1-3), 263(1996)
- 15 G.Q.Yu, B.K.Tay, S.P.Lau, K.Prasad, L.K.Pan, J.W.Chai, D.Lai, Effects of N ion energy on titanium nitride films deposited by ion assisted filtered cathodic vacuum arc, *Chem. Phys. Lett.*, **374**(3), 264(2003)
- 16 HUANG Meidong, SUN Chao, LIN Gouqiang, DONG Chuang, WEN Lishi, Mechanical property of low temperature deposited tin film by pulsed biased arc ion plating, *Acta Metallurgica Sinica*, **39**(5), 516(2003)  
(黄美东, 孙超, 林国强, 董闯, 闻立时, 脉冲偏压电弧离子低温沉积 TiN 硬质薄膜的力学性能, *金属学报*, **39**(5), 516(2003))
- 17 GONG Xiumin, YE Weiping, SUN Wei, XU Daqing, ZHU Xiaoqing, The effect of preferential orientation in TiN coatings on the quality of the coatings, *Materials For Mechanical Engineering*, **24**(1), 20(2000)  
(宫秀敏, 叶卫平, 孙伟, 许大庆, 朱小清, TiN 涂层中的择优取向及其对涂层性能的影响, *机械工程材料*, **24**(1), 20(2000))
- 18 C.A.Davis, A simple model for the formation of compressive stress in thin films by ion bombardment, *Thin Solid Films*, **226**(1), 30(1993)
- 19 D.R.Mckenzie, Y.Yin, W.D.Mcfall, N.H.Hoang, The orientation dependence of elastic strain energy in cubic crystals and its application to preferred orientation in titanium nitrides thin films, *J. Phys.: Condens. Matter*, **8**(32), 5883(1996)
- 20 U.C.Oh, J.H.Je, Effects of strain energy on the preferred orientation of TiN thin films, *J. Appl. Phys.*, **74**(3), 1692(1993)
- 21 J.Pelleg, L.Z.Zevin, S.Lungo, Reactive sputter deposited TiN films on glass substrates, *Thin Solid Films*, **197**(12), 117(1991)
- 22 ZHANG Ming and HE Jiawen, Calculation of elastic matrix and X-ray elastic constant of anisotropic films using Kroner method, *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **11**(2), 198(2001)  
(张铭, 何家文, 用 Kroner 模型计算取向薄膜的弹性矩阵与 X 射线弹性常数, *中国有色金属学报*, **11**(2), 198(2001))
- 23 S.Veprek, Plasma induced and plasma assisted chemical vapor deposition, *Thin Solid Films*, **130**(12), 135(1985)
- 24 H.Ljungcrantz, M.Oden, L.Hultman, JE Greene, J-E Sundgren, Nanoindentation studies of single-crystal (001)-, (011)-, and (111)-oriented TiN layers on MgO, *J. Appl. Phys.*, **80**(12), 6725(1996)
- 25 HUANG Jiamu, XU Chengjun, ZHANG Xingyuan, WANG Yaping, Morphology and physical properties of titanium nitride films deposited by magnetron sputtering at room temperature, *Vacuum Science and Technology*, **25**(4), 297(2005)  
(黄佳木, 徐成俊, 张兴元, 王亚平, 室温直流磁控溅射氮化钛薄膜研究, *真空科学与技术学报*, **25**(4), 297(2005))
- 26 A.J.Perry, Adhesion studies of Ion-Plated TiN on steel. *Thin Solid Films*, **81**(4), 357(1981)