

磁场非平衡度对CrN_x镀层性能的影响*

曹 政 蒋百灵 鲁媛媛 王 涛

(西安理工大学材料科学与工程学院 西安 710048)

摘 要 使用具有不同非平衡度的磁控管直流磁控溅射技术沉积 CrN_x 镀层,并用 Langmuir 探针诊断、高斯仪测量、Ansys 软件模拟等手段进行表征,研究了磁场非平衡度对溅射等离子体的空间分布状态以及 CrN_x 镀层的微观结构、硬度及摩擦性能的影响。结果表明:低非平衡度磁控管(K 为 2.78)将多数离子束缚在靶材表面大约 6 cm 范围内,而对于高非平衡度磁控管(K 为 6.41)则在此区域没有类似的高密度等离子体存在。随着磁场非平衡度的增大,CrN_x 镀层的厚度递增,物相结构也从 Cr+Cr₂N 依次向 Cr+Cr₂N+CrN 和 Cr₂N+CrN 转化,且镀层的平整度和致密性随之明显改善。同时,CrN_x 镀层的硬度随着非平衡度的增大而提高,摩擦系数则随之减小。

关键词 无机非金属材料, CrN_x 镀层, 非平衡度, 离子轰击

分类号 TB43

文章编号 1005-3093(2011)03-0313-08

Influence of Magnetic Field Unbalance Coefficient on Properties of CrN_x Coatings

CAO Zheng** JIANG Bailing LU Yuanyuan WANG Tao

(School of Mineral Science & Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

* Supported by National High-Tech Research and Development Program of China No.2005AA33H010.

Manuscript received January 5, 2011; in revised form March 5, 2011.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(029)82312812, E-mail:boy_zhiyuan1985@sina.com

ABSTRACT CrN_x coatings deposited by using different unbalance coefficient magnetron by DC magnetron sputtering system, were characterized. The influences of the magnetic field unbalance coefficient on the distribution of sputtered plasma and microstructure, hardness and tribological properties of CrN_x coatings were investigated. The results show that multitude ions were tied near the target surface within 6 cm rang when using low unbalance coefficient magnetron (K was 2.78), but similar high density plasma does not existed at this area when using higher unbalance coefficient magnetron (K was 6.41). The thickness of CrN_x coatings increases with unbalance coefficient increases. The phase structure of the CrN_x coatings deposited in three unbalanced magnetic field transformed from Cr+Cr₂N to Cr+Cr₂N+CrN→Cr₂N+CrN with the increase of unbalance coefficient. With unbalance coefficient increasing, the flatness and compactness of the coatings were improved obviously, and the hardness was enhanced and friction coefficients were decreased.

KEY WORDS inorganic non-metallic materials, CrN_x coating, unbalance coefficient, ion bombardment

CrN_x 镀层具有较高的硬度、良好的耐磨性和抗氧化性^[1-3]以及优于 TiN 镀层的耐蚀性,适用于刀具、刀具和模具表面的改性镀层。用磁控溅射技术易于制备梯度镀层且镀层的成分可精确配比,尤其是在镀层沉积过程中工件的升温小,处理后不产生污染性气体。这些突出的特点使磁控溅射法有望替代已广泛应用的电镀铬技术。

在镀膜工艺过程中,合理调节轰击到基片表面的离子能量和通量,可改变镀层的组织、结构与性能。J.Lin 等^[4]使用较高离化率、且多数离子具有较高离子能量(约 10-30 eV)的等离子体环境,制备出致密性好、缺陷密度低、摩擦系数低的 CrN_x 镀层。磁场的分布状态也显著影响等离子体分布、沉积粒子输运路径、溅射工艺参数,从而影响镀层的成膜质量^[5-9]。根据文献[10, 11]的结果可推测,磁场非平衡度的增大可将更多数量的等离子体扩散至基片位置,使 Cr 镀层生长过程中所受的离子轰击效果增强,进而影响镀层的微观结构及性能。本文采用三种不

* 国家高技术研究发展计划 2005AA33H010 资助项目。

2011 年 1 月 5 日收到初稿;2011 年 3 月 5 日收到修改稿。

本文联系人:曹 政

同非平衡度 (2.78、4.46 及 6.41) 的磁控管制备 CrN_x 镀层, 研究非平衡磁场对 CrN_x 镀层微观结构、硬度以及摩擦性能的影响。

1 实验方法

实验用溅射设备为 $425\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的 UDP450 系统, 三种不同非平衡度 (K 分别为 2.78、4.46 和 6.41) 的磁控管分别与三个铝挡板同时安放于真空腔四周。使用 Pinnacle 直流电源对尺寸为 $330\text{ mm} \times 134\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的高纯度 (99.99%)Cr 靶材进行溅射, 设定恒电流工作模式, 溅射靶电流均为 4A (受三种不同非平衡度磁控管伏安特性的影响, 此时三者的溅射功率分别为 1724 W, 1420 W 和 1272 W), N_2 流量为 10 mL/min, 基片偏压 -30 V , 将 M42 高速钢 (硬度 $\text{HRC} \geq 62$) 及 P 型 Si(100) 抛光单晶硅片放置于距离靶材表面 120 mm 处进行沉积, 沉积时间为 3 h。真空腔内起始真空度为 $4 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。

用 XRD-7000X 射线衍射仪分析 CrN_x 镀层的晶体结构。阳极靶为 Cu 靶, 掠射角取 2° , 扫描速度 $10^\circ/\text{min}$, 步长 0.02° , 管压 40 kV, 管流 40 mA。使用 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜观察 CrN_x 镀层的微观形貌。采用 AXIS ULTRAX- 射线光电子能谱仪分析镀层中 Cr、N 的存在状态, AlK_α 能量为 1486.6 eV, 可进行表面层 (深度 1-3 nm) 的大面积 ($0.8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$) 或选区 (最小选区 $15\text{ }\mu\text{m}$) 组分分析, 其成像 XPS 的空间分辨率 $< 3\text{ }\mu\text{m}$ 。分析前对样品表面进行氩离子刻蚀, 以排除镀层表面空气污染的影响。氩离子枪电压为 4 kV, 电流 10 mA, 刻蚀时间 400 s。使用 HVS-1000 型数字显微维氏硬度仪测定镀层的硬度, 载荷为 50 g, 保载时间 10 s, 每个试样均测量三次, 取其平均值。使用球-盘摩擦磨损试验机测试镀层的摩擦系数, 载荷 2 N, 摩擦副为不

锈钢 304, 无润滑, 滑动速率为 200 mm/s, 测试时间 20 min, 环境温度 $20 \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 1 为使用 Langmuir 探针诊断真空腔内等离子体的结构示意图。探针分别在正对靶材中心、刻蚀槽内测边缘 (距靶材中心 15.5 mm)、刻蚀槽最深处 (距靶材中心 21.5 mm) 和刻蚀槽外侧边缘 (距靶材中心 32.5 mm) 四处对沿靶基径向 3.5 cm 至 21.5 cm 范围内的等离子体进行诊断, 获得其 I-V 特性曲线 (各测量点均获取 5 次), 再用 Epsilon 半自动分析方式根据 I-V 曲线计算出离子密度、电子密度和电子温度。圆柱形 W 针尖 (截面直径 0.15 mm, 长 10 mm) 由绝缘陶瓷套保护, 测量过程中主电路向针尖上加载 $-60\text{--}40\text{ V}$ 偏压。

用 6010 型探针式高斯仪测量靶材表面的磁感应强度。利用有限元分析软件 ANSYS 来完成^[12,13] 靶材表面的磁场模拟。使用 ANSYS 软件建模时, 选择二维单元 Plane 13, 然后将单元类型和材料性质赋给几何模型中的各部分, 最后对求解域进行网格划分进行求解。

用 Ball Crater-1 球痕测厚仪测定在高速钢基体上沉积的 CrN_x 镀层的厚度, 在 CrN_x 镀层表面选取 9 个测试点取其厚度的平均值。

2 结果与讨论

2.1 靶材表面磁感应强度的分布

图 2 表明, 当 K 为 4.46 与 6.41 时, 靶材表面磁感应强度的平行分量与垂直分量均十分接近, 而当 K 为 2.78 时的磁感应强度较高。可见, 磁控管非平衡增大的同时其磁感应强度随之降低。这是非平衡磁控管的固有特性造成, 即必须使磁控管内磁极的磁感应强度小于 (或等于) 外磁极磁感应强度方能达到磁控管内外端面磁通量不等的非平衡结构, 且

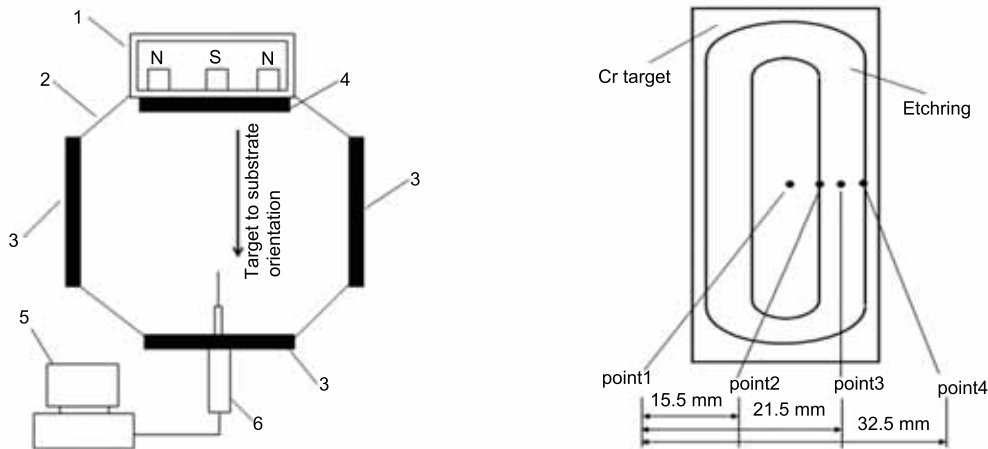


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment system

1-magnetron; 2-wall; 3-Al baffle; 4-Cr target; 5-computer; 6-Langmuir probe

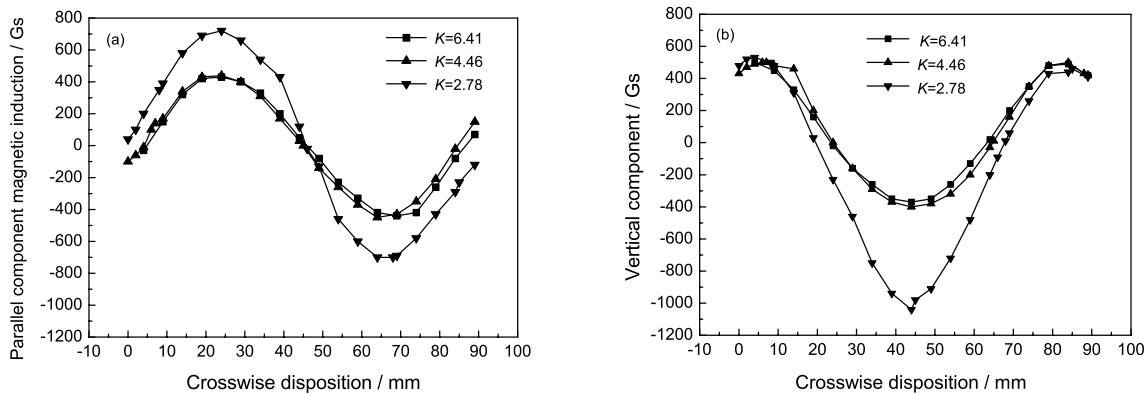


图 2 不同非平衡度磁控管平行分量和垂直分量磁感应强度的分布

Fig.2 Magnetic induction distribution of different unbalance coefficient magnetron (a) parallel component (b) vertical component

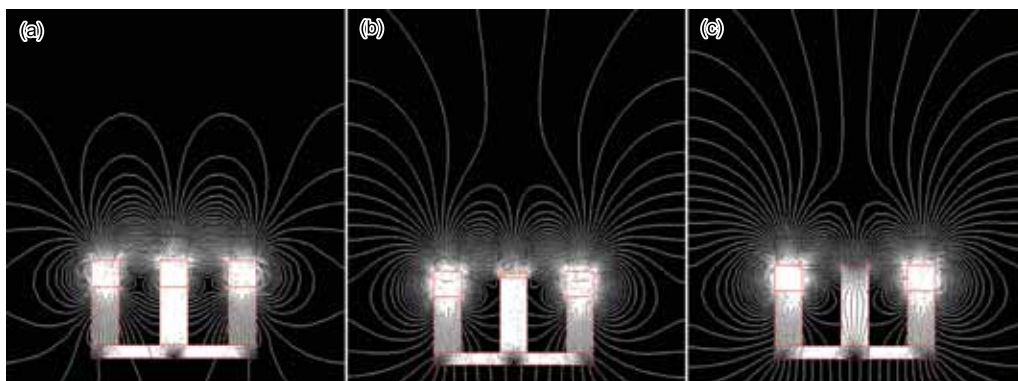


图 3 不同非平衡度 (K) 磁控管条件下靶材表面磁力线的模拟

Fig.3 Magnetic line of force distribution on top of target surface of different unbalance coefficient magnetron (a) $K=2.78$, (b) $K=4.46$, (c) $K=6.41$

K 值与磁控管内磁极磁感应强度值成反比, 故而增大 K 值将以降低靶材表面的磁感应强度为代价。

图 3 为靶材表面磁力线分布的 Ansys 模拟图。从图 3 可以看出, 当磁控管非平衡度为 6.41 时, 其磁力线向外发散比较多, 并与非平衡度为 4.46 时的磁控管磁力线分布形态类似, 与前述磁感应强度的测量结果一致。随着非平衡度的降低, 磁力线分布发散减少, 并在靶材表面形成闭合的“磁笼”分布态。

2.2 磁场非平衡度 (K) 对离子密度分布的影响

图 4 给出了不同非平衡度磁场环境中正离子在真空腔中的分布规律。如图 4 所示, 离子密度具有在靶材表面外侧区域高于内侧的特点, 说明电子的运动遵循“非平衡理论”, 即由磁控管外侧沿垂直于靶材表面的磁力线向远离靶材表面的区域发散, 在运动过程中与气体或靶材原子碰撞并使其发生电离产生正离子。但是, 靶材表面的离子密度大体随着沿靶基距的增大而逐渐降低。这种变化规律主要与磁控管的磁感应强度随靶基距的增大而逐渐减弱有关, 距离靶

材表面距离越远处的磁感应强度越低, 束缚带电粒子的能力也越弱。当 K 为 2.78 时离子在距离靶材表面 6 cm 范围内的富集现象较为明显, 因为非平衡度较小的磁控管磁感应强度较高, 其对带电粒子的束缚能力较强, 可以束缚大量电子于近靶区域与原子碰撞产生电离, 从而使这一区域的离子密度较高。而当非平衡度分别为 4.46 和 6.41 时, 两者因磁感应强度接近造成离子密度的测量值也相近。另外值得注意的是, 三者的离子密度分布状态在远离靶材表面 6 cm 范围以外便趋于相同, 即三种不同非平衡磁场中的离子密度在距离靶材表面 6 cm 范围以外相似。

通过对三种非平衡度磁控管的放电等离子体的诊断可以发现, 等离子体的确因非平衡磁场设计而由磁控管外端面向外扩展, 但是向靶材表面正前方扩展的等离子体密度并不随磁控管非平衡度的增大而提高, 高密度等离子体基本被扩展至磁控管两侧, 而磁控管两侧与真空腔壁(阳极)邻近, 等离子体即使大量向此处扩散也意味着其必将因电子向阳极湮灭而

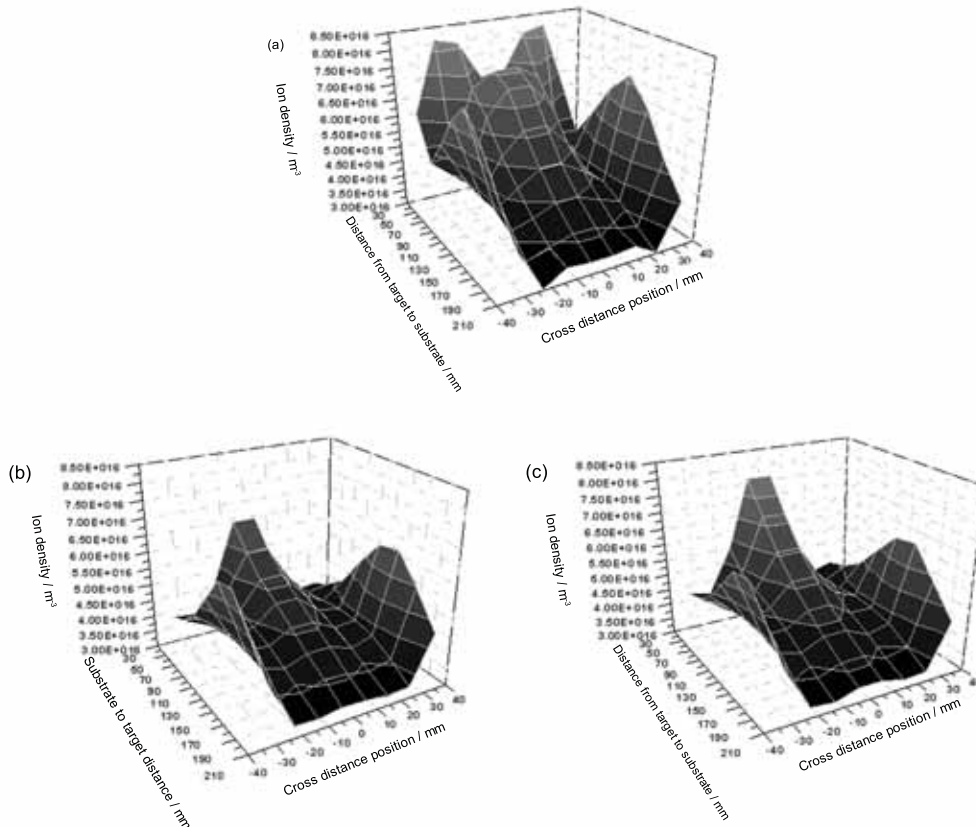


图 4 磁控管磁场非平衡度 (K) 对离子密度分布的影响

Fig.4 Influence of unbalance coefficient magnetron on ion density distribution (a) $K=2.78$, (b) $K=4.46$, (c) $K=6.41$

快速消失。而在使用单一磁控管制备镀层时, 基片往往放置于正对靶材表面的位置且不转动, 因而本文中三种不同非平衡度磁控管对放置于靶基距 120 mm 处的基片的离子轰击效果应当接近相同。

2.3 CrN_x 镀层的微观结构

图 5 给出了三种不同非平衡度磁控管于高速钢基体表面沉积的 CrN_x 镀层厚度差异。由图 5 可见, 镀层厚度随着非平衡度 K 值的增大而递增。这表明, 本文中 CrN_x 镀层的沉积速率随着 K 的增大而提高。图 6 为采用不同非平衡度磁控管制备的 CrN_x 镀层的 SEM 形貌。 K 为 2.78 时, 镀层的颗粒尺寸大小不一, 且伴随有大量的沟道和孔洞, 组织比较疏松; K 为 4.46 时, 孔洞的数量减少, 颗粒尺寸也更为均匀; K 为 6.41 时, 颗粒之间的孔洞基本消失, 组织也最为致密。可见, 随着磁场非平衡度的增大, 镀层表面颗粒之间的孔洞和沟道减少, 颗粒更为细小, 同时也更加致密。从图 6 还可看出, K 为 2.78 和 4.46 时, 镀层均呈细的纤维状组织, 组织颗粒都有剥落和断裂的现象, 表明两种非平衡度下镀层由疏松的结构所组成。随着非平衡度增大至 6.41, 镀层呈现致密的柱状组织结构, 组织颗粒之间的间隙减少, 组织也变得更为致密。

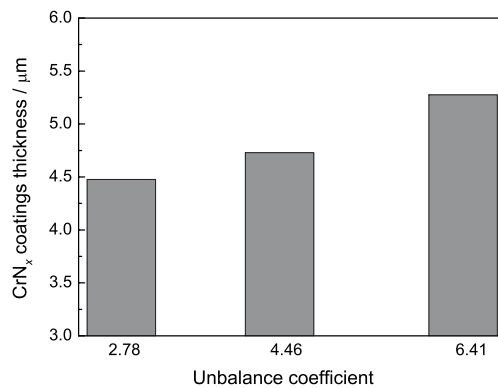


图 5 三种非平衡度磁控管条件下的 CrN_x 镀层厚度

Fig.5 Thickness of CrN_x coatings at three different unbalance coefficient magnetron

但是, 采用非平衡度最高的磁控管制备的镀层表面最为致密, 尤其当 K 值分别为 4.46 和 6.41 时基片位置处的实测等离子体参数均十分接近, 而两者所制备出镀层的表面形貌却有明显差异。这说明采用非平衡磁控管溅射改善镀层质量的原因, 并不只是可将等离子体区扩散至基片周围以便提供离子轰击效果。根据三种非平衡度磁控管的伏安特性 (图 7), 在靶电流

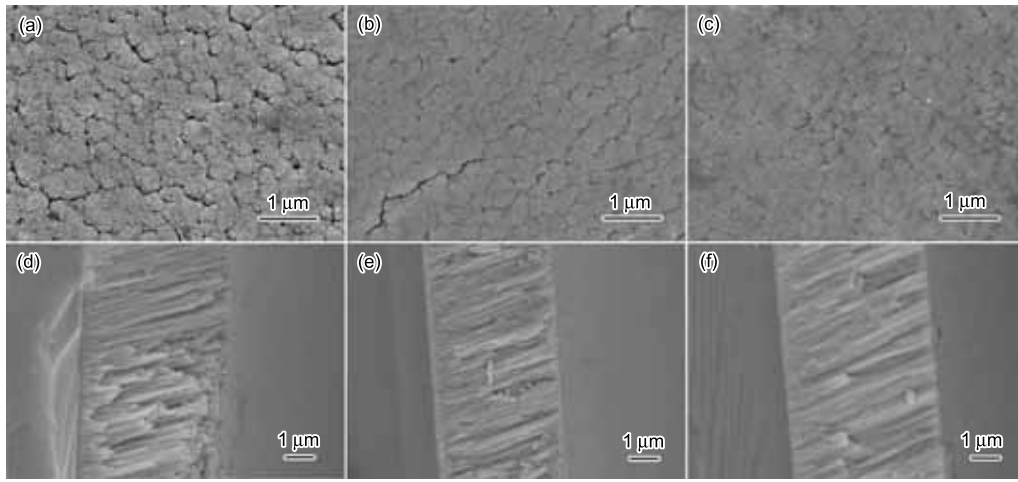


图 6 不同非平衡度 (K) 磁控管条件下 CrN_x 镀层 SEM 形貌

Fig.6 SEM of CrN_x coatings deposited by different unbalance coefficient magnetron (a, e) $K=2.78$, (b, f) $K=4.46$, (c, g) $K=6.41$

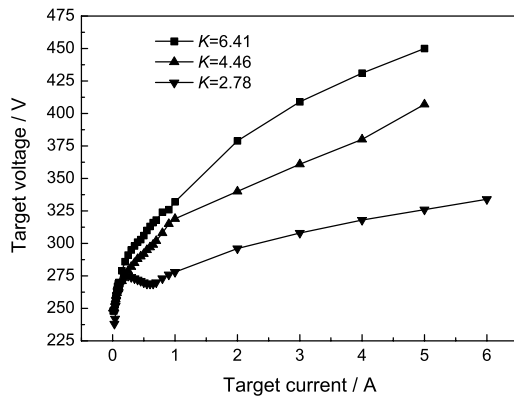


图 7 不同非平衡度磁控管伏安特性

Fig.7 Volt-ampere characteristics of different unbalance coefficient magnetron

相同的条件下靶电压值随着 K 值的增大而提升。磁场参量的改变使电参量相应地产生差异,即在镀层沉积过程中高非平衡度的磁控管溅射功率更大,不但因溅射产额增大而提高了沉积速率,还使溅射出的靶材原子携有更高的能量以弥补其扩散能力的不足,结果是 K 为 6.41 时的镀层最致密。

在不同磁场非平衡度条件下制备镀层的 XRD 图谱的标定结果,如图 8 所示。从图 8 可见,在不同非平衡度磁场中制备的 CrN_x 镀层中均有 Cr、Cr₂N 和 CrN 三相,且均以在 2θ 为 38° 处的 Cr₂N(002) 晶面呈现最强特征衍射峰。当 K 为 2.78 时,在 2θ 为 45° 、 65° 和 82° 处存在 Cr(110)、Cr(200) 和 Cr(211) 三个峰,其中 Cr(110) 所对应的是强峰,其余两者为弱峰。当 K 为 4.46 时, 2θ 为 67° 处出现新的 Cr₂N(300) 衍射峰。而当 K 为 6.41 时在 2θ 为 45° 和 65° 处的 Cr 相的衍射峰消失。在三种非平衡度条件下, 2θ 为 82°

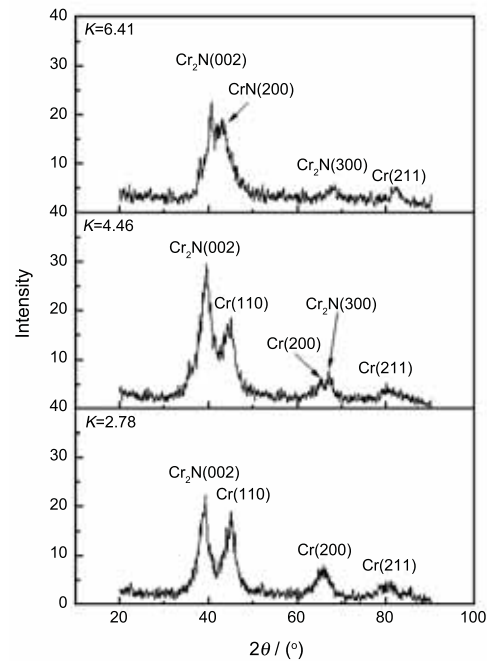


图 8 不同非平衡度磁控管条件下 CrN_x 镀层的 XRD 衍射图谱

Fig.8 XRD patterns of CrN_x coatings deposited by different unbalance coefficient magnetron

处的 Cr(211) 相的衍射峰几乎没有变化。离子轰击作用及产生的级联碰撞、辐照损伤、离位峰等效应^[14]使 CrN 和 Cr₂N 相都不能严格地满足化学配比,而存在一定的 N 原子缺位,使镀层的晶格常数具有一定的不确定性,从而使衍射峰出现宽化现象^[15]。CrN_x 镀层中的 Cr 相随着 K 值的增大而逐渐消失的结果表明,磁场非平衡度越大, Cr 原子的能量也越大,使其更易与 N 原子结合生成 CrN 或 Cr₂N。

在镀层的沉积过程中存在纯 Cr 打底层,故对所

制备的镀层进行 XPS 分析 (XPS 的探测深度仅有几个原子层) 以确定镀层中是否含有 Cr 相。对不同非平衡度下制备镀层的 Cr2p1/2 峰进行 Gauss-Lorentz 拟合分峰结果, 如图 9 所示。根据 XPS 标准手册中

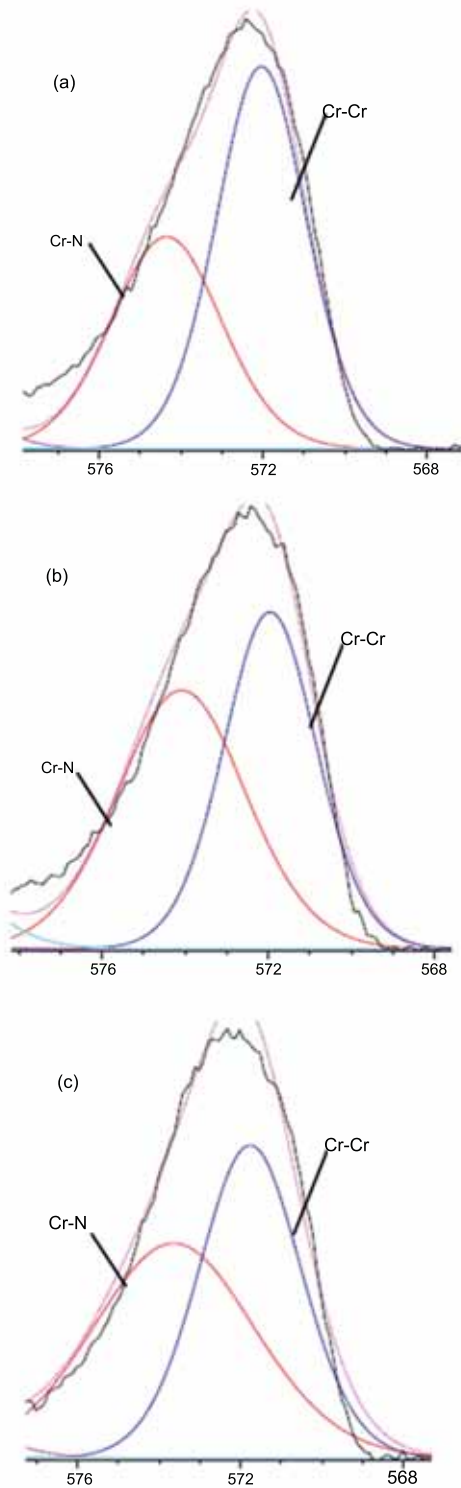


图 9 不同磁场非平衡度 (K) 条件下制备对镀层 Cr2p1/2 峰拟合分峰结果

Fig.9 Cr2p1/2 spectrum analysis of CrN_x coatings at different unbalance coefficient magnetic field (a) $K=2.78$, (b) $K=4.46$, (c) $K=6.41$

Cr2p1/2 峰峰位所对应的标准值对 XPS 的结果进行修正, 可以确定结合能 572.0 eV 附近的峰为 Cr-Cr 键所对应的峰。由于 Cr₂N 中 Cr-N 键所对应峰的结合能为 576.1 eV, CrN 中 Cr-N 键所对应峰的结合能为 575.8 eV, 所用 XPS 设备的最大分辨率为 0.48 eV, 所以对检测结果修正后只能确定结合能 574.0 eV 附近出现的峰是 Cr-N 键所对应的峰。根据对 XPS 的检测结果可以确定, CrN_x 镀层工作层中含有 Cr 相。

2.4 CrN_x 镀层硬度和摩擦学性能

从图 10 可以看出, 镀层的显微硬度随着非平衡度的增大而增大。分析其原因: 一是镀层的物相结构随着非平衡度的增大发生从 Cr+Cr₂N→Cr+Cr₂N+CrN→Cr₂N+CrN 的转变。随着非平衡度的增加, 镀层中 Cr₂N 相的比例增加, 出现 CrN 相, Cr 相的比例减少。Cr₂N 和 CrN 均为硬质相, 在镀层中所占比例的增加导致镀层的硬度增加。二是在非平衡磁控溅射环境中, 随着磁场非平衡度的增大, 由靶材表面溅射出的原子的能量随之增大, 提高靶材原子在堆积成膜过程中的扩散能力, 从而改善镀层的表面质量, 有

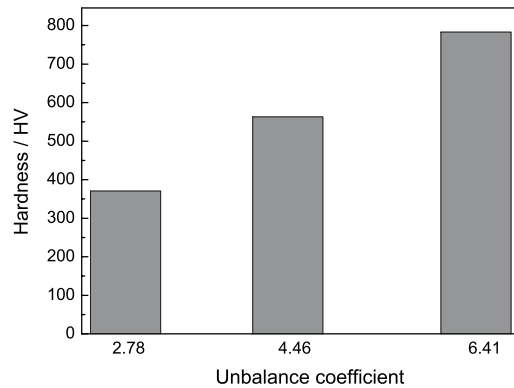


图 10 硬度随非平衡度的变化关系图

Fig.10 Relationship between hardness and the unbalance coefficient

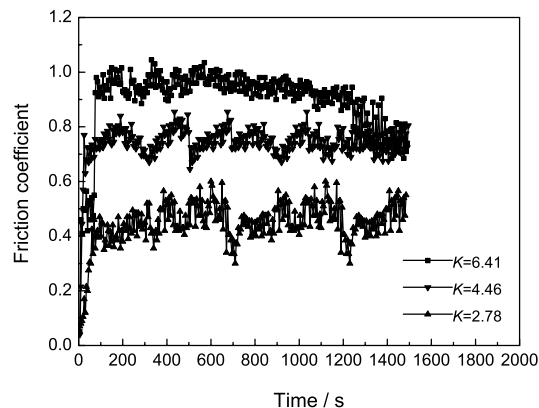


图 11 CrN_x 镀层与不锈钢球对磨时的摩擦系数曲线

Fig.11 Friction coefficient of CrN_x coating with steel counterpart

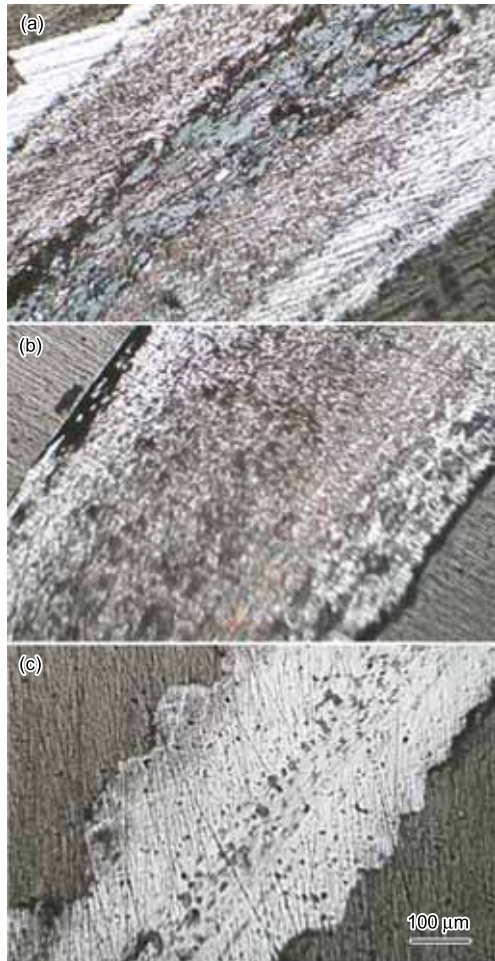


图 12 不同磁场非平衡度 (K) 条件下 CrN_x 镀层与不锈钢球对磨时的磨损形貌

Fig.12 Wear scars for CrN_x coating with steel counterpart (a) $K=2.78$, (b) $K=4.46$, (c) $K=6.41$

助于镀层硬度的提高。

图 11 给出了不同非平衡度下制备 CrN_x 镀层同不锈钢球对磨时的摩擦系数曲线。如图 11 所示, K 为 2.78 时制备镀层其摩擦系数最大为 0.94, 当 K 为 4.46 时摩擦系数为 0.75, 而当 K 为 6.41 时摩擦系数最小, 为 0.42。图 12 给出了 K 为 2.78、4.46 和 6.41 时 CrN_x 镀层与不锈钢球对磨 20 min 后的磨损形貌。可以看出, K 为 2.78 时镀层的磨损形式以粘着磨损为主。由于涂抹现象的存在, 磨损粘着斑面积很大。在 K 为 4.46 时, 磨损粘着斑大量存在但面积变小。而当 K 增大至 6.41 时, 粘着斑数量大量减少且有少量的犁沟出现, 说明在此种状态下镀层的磨损形式以磨料磨损为主。

综上所述, 随着磁控管非平衡度的增大, CrN_x 镀层的摩擦系数逐渐降低, 与 0Cr18Ni9 不锈钢球的磨损形式也由粘着磨损逐渐转变为磨料磨损。非平衡度较低时制备的 CrN_x 镀层中有 Cr 相, 由于 0Cr18Ni9 不锈钢球中的 Fe、Cr、Ni 与 Cr 有良好的相溶性, 镀

层在 0Cr18Ni9 不锈钢球摩擦的过程中发生严重的粘着现象。随着非平衡的增加镀层中的 Cr 相含量逐渐减少, 粘着现象也随之减少。在非平衡度为 6.41 时 Cr 相基本消失, 镀层由 CrN 和 Cr₂N 两硬质相组成, 此时粘着现象也最轻。磁场非平衡度对 CrN_x 镀层的摩擦学特性的影响规律是其对镀层的微观结构和硬度影响的综合体现。

3 结 论

1. 磁控管表面的磁感应强度随着非平衡度的增大而有所减弱, 向外发散的磁力线数量也随之增多。

2. 磁控管的非平衡度对溅射等离子体的分布有显著的影响。当 K 为 2.78 时, 溅射等离子体富集于距离靶材表面仅 6 cm 的区域内, 当 K 增大至 4.46 和 6.41 时离子密度有所降低, 且两者的测量值接近。

3. 随着磁控管非平衡度的增大, 沉积的 CrN_x 镀层的厚度、致密性有明显的提高, 物相依次从 Cr+Cr₂N 转化到 Cr+Cr₂N+CrN 和 Cr₂N+CrN。

4. 镀层的硬度随着磁场非平衡度的增大而增大, 而摩擦系数随之降低。

参 考 文 献

- 1 G.A.Zhang, P.X.Yan, P.Wang, Y.M.Chen, J.Y.Zhang, Influence of nitrogen content on the structural, electrical and mechanical properties of CrN_x thin films, Mater. Sci. Eng. A, **460/461**, 301(2007)
- 2 Z.G.Zhang, O.Rapaud, N.Bonasso, D.Mercs, C.Dong, C.Coddet, Control of microstructures and properties of dc magnetron sputtering deposited chromium nitride films, Vacuum, **82**(5), 501(2008)
- 3 T.Polcar, N.M.G.Parreira, R.Novák, Friction and wear behaviour of CrN coating at temperatures up to 500 °C, Surf. Coat. Technol, **201**(9-11), 5228(2007)
- 4 J.Lin, Z.L.Wu, X.H.Zhang, B.Mishra, J.J.Moore, W.D.Sproul, A comparative study of CrN_x coatings Synthesized by dc and pulsed dc magnetron sputtering, Thin Solid Films, **517**(6), 1887(2009)
- 5 Qiu Qingquan, Li Qingfu, Su Jiangjiang, Simulation to improve the magnetic field in the straight section of rectangular planar DC magnetron, Vacuum, **82**(6), 657(2008)
- 6 QIU Qingquan, LI Qingfu, SU Jingjiang, Simulation to predict target erosion of planar DC magnetron, Plasma Science and Technology, **10**(5), 581(2008)
- 7 I.V.Svadkovski, D.A.Glolsov, S.M.Zavatskiy, Characterization parameters for unbalanced magnetron sputtering system, Vacuum, **68**(4), 283(2003)
- 8 WANG Jun, LIU Zhen, CHEN Changqi, ZHU Wu, CHEN Ming, Simulation and calculation of electromagnetic field distribution and movement of charged particles during magnetron sputtering, Vacuum, **44**(4), 20(2007)
(王 君, 刘 珍, 陈长琦, 朱 武, 陈 明, 磁控溅射中电磁场分布及带电粒子运动的模拟与计算, 真空, **44**(4), 20(2007))

- 9 QIU Qingquan, LI Qingfu, SU Jingjing, JIAO Yu, Finely Jim, Progress in discharge plasma simulation of planar DC magnetron sputtering, *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, **27**(6), 493(2007)
(邱清泉, 励庆孚, 苏静静, JIAO Yu, Finely Jim, 平面直流磁控溅射放电等离子体模拟研究进展, *真空科学与技术学报*, **27**(6), 493(2007))
- 10 JIANG Bailing, WEN Xiaobin, LUAN Ya, DING Xiaoke, LI Xian, Influence of unbalanced coefficient of magnetron and closed-state of magnetic field on plating Cr coating using a sputtering ion plating system, *Transactions of Materials And Heat Treatment*, **30**(2), 115(2009)
(蒋百灵, 文晓斌, 栾亚, 丁小柯, 李显, 非平衡度和闭合状态对磁控溅射离子镀过程的影响, *材料热处理学报*, **30**(2), 115(2009))
- 11 LUAN Ya, DING Xiaoke, JIANG Bailing, LU Yuanyuan, Influence of closed-state on growth of Cr coating by magnetron sputtering, *Journal of Synthetic Crystals*, **38**(4), 924(2009)
(栾亚, 丁小柯, 蒋百灵, 鲁媛媛, 闭合状态对磁控溅射 Cr 镀层生长过程的影响, *人工晶体学报*, **38**(4), 924(2009))
- 12 JIN Jianming, *The Finite Element Method in Electromagnetics* (Xi'an, Xidian University Press, 2001)
(金建铭, *电磁场有限元方法* (西安, 西安电子科技大学出版社, 2001))
- 13 ZHANG Liuchen, XU Song, *Finite Element Method in Electromagnetic Computation* (Beijing, China Railway Publishing House, 1996)
(张榴晨, 徐松, *有限元法在电磁计算中的应用* (北京, 中国铁道出版社, 1996))
- 14 M.Zlatanovic, R.Beloševac, A.Kunosi, Influence of magnetic field configuration on the deposition conditions in an unbalanced magnetron system, *Surface and Coating Technology*, **90**(1-2), 143(1997)
- 15 J.N.Tan, J.H.Hsieh, Deposition and characterization of (Nb, Cr)N thin films by unbalanced magnetron sputtering, *Surf Coat Technol*, **167**(2-3), 154(2003)