

直流和高功率磁控溅射制备 氮化铬薄膜及其结构性能比较

李倩¹, 李花², 王正铎¹, 张海宝¹, 杨丽珍¹, 刘忠伟¹, 陈强¹

(1.北京印刷学院, 北京 102600; 2.北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要: **目的** 比较直流磁控溅射 (DCMS) 和高功率磁控溅射 (HiPIMS) 两种沉积技术制备的氮化铬 (CrN) 薄膜的结构和性能。**方法** 采用 DCMS 和 HiPIMS 沉积技术, 在金属镍 (Ni) 基底上沉积 CrN 薄膜, 采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和显微硬度计等仪器, 分析 CrN 薄膜的晶相结构、表面以及截面形貌、基底与薄膜复合硬度、摩擦性能等。**结果** XRD 晶体测量显示 DCMS 制备的 CrN 薄膜在(111)晶面择优生长, 内应力大; 而 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜为(200)晶面择优生长, 内应力小。SEM 显示两种方法制备的 CrN 薄膜都呈柱状晶体结构生长, 但 HiPIMS 沉积的 CrN 薄膜颗粒尺寸较小, 柱状晶体结构和晶粒更致密。硬度测量得到 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜显微硬度为 855.9HV, 而 DCMS 制备的 CrN 薄膜显微硬度为 501.5HV。此外, DCMS 制备的 CrN 薄膜平均摩擦系数为 0.640, 而 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜摩擦系数为 0.545, 耐磨性也好。HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的腐蚀电流比 DCMS 制备的 CrN 薄膜低 1 个数量级。**结论** HiPIMS 沉积技术制备的 CrN 薄膜颗粒尺寸小, 结构更致密, 且缺陷少、硬度高、防腐蚀性好, 薄膜各项指标都优于 DCMS 沉积的 CrN 薄膜。

关键词: 氮化铬; 直流磁控溅射; 高功率磁控溅射; 结构; 性能; 耐磨性; 耐腐蚀性

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)09-0064-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.005

Comparison of Chromium Nitride Thin Films Deposited by Reactive Direct Current Magnetron Sputtering and High Power Pulsed Magnetron Sputtering

LI Qian¹, LI Hua², WANG Zheng-duo¹, ZHANG Hai-bao¹,
YANG Li-zhen¹, LIU Zhong-wei¹, CHEN Qiang¹

(1.Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China; 2.Beihang University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the structure and performance of chromium nitride (CrN) thin films deposited by

收稿日期: 2018-12-23; 修订日期: 2019-02-02

Received: 2018-12-23; **Revised:** 2019-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11775028, 11505013, 11605012, 11875090); 北京市自然科学基金项目 (4162024); 北京市自然科学基金重点项目 (KM201510015009); 绿色印刷出版技术协同创新项目 (20160113)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11775028, 11505013, 11605012, 11875090), Beijing Municipal National Science Foundation (4162024), Beijing Natural Resources Fund Key Projects (KM201510015009), the Collaborative Innovation Center of Green Printing & Publishing Technology (20160113)

作者简介: 李倩 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高脉冲磁控溅射。

Biography: LI Qian (1995—), Female, Master, Research focus: high power pulsed magnetron sputtering.

通讯作者: 陈强 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为等离子体物理、等离子体诊断、等离子体工程、等离子体化学等研究。

邮箱: chenqiang@bigc.edu.cn

Corresponding author: CHEN Qiang (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: plasma physics, plasma diagnostics, plasma engineering, plasma chemistry. E-mail: chenqiang@bigc.edu.cn

reactive direct current magnetron sputtering (DCMS) and reactive high power pulsed magnetron sputtering (HiPIMS). CrN thin films were deposited on nickel (Ni) substrate by reactive DCMS and HiPIMS. The crystal structure, surface and cross-section morphology, composite hardness and friction properties of CrN thin films were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and microhardness tester. From XRD of crystal measurement, CrN films deposited by DCMS grew preferentially in (111) facet and had larger inner stress, while is the films deposited by HiPIMS grew preferentially in (200) facet and had smaller inner stress. The SEM revealed that CrN films prepared by both methods were in columnar crystal structure, but the particle size of films by HiPIMS was smaller and the columnar crystal structure and particle size were denser. The microhardness of CrN films deposited by HiPIMS and DCMS was respectively 855.9HV and 501.5HV. Additionally, the average friction coefficient of CrN films deposited by DCMS and HiPIMS was respectively 0.640 and 0.545, so the wear resistance was good. The corrosion current of the films deposited by HiPIMS was one order of magnitude lower than that of CrN films deposited by DCMS. CrN thin films prepared by HiPIMS have smaller particles, denser structure, less defects, higher hardness and better corrosion, so the performance indicators are superior to that of CrN films prepared by DCMS.

KEY WORDS: CrN films; DCMS; HiPIMS; microstructure; properties; wear resistance; corrosion resistance

氮化铬 (CrN) 涂层具有优异的硬度、韧性、耐磨性和耐腐蚀性^[1-2], 在模具、刀具等领域具有广阔的市场前景^[3-4]。目前, CrN 薄膜的制备方法有多种, 如多弧离子镀、反应离子镀、空心阴极法以及磁控溅射等, 其中磁控溅射制备法作为一种低温、高速率的沉积手段受到人们的重视^[5-11]。例如, 直流磁控溅射 (DCMS) 被广泛应用于制备 CrN 薄膜, 且制备的薄膜具有相对光滑的表面。但是 DCMS 电离率低, 使得沉积的 CrN 涂层硬度低, 结构疏松, 附着力较低^[12], 因此 DCMS 制备的 CrN 薄膜应用范围受到一定的限制。

高功率磁控溅射 (HiPIMS) 具有较高的等离子体密度和金属原子的电离度, 峰值功率密度比 DCMS 高 2~3 个数量级, 电子密度的峰值可达到 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ^[13-14], 电子碰撞电离的平均自由程大概在 1 cm 或以下^[15-16], 在硬质薄膜的制备中受到广泛关注。此外, HiPIMS 具有各向异性沉积通量, 可以在复杂形状的基底上制备均匀的镀层^[17]。与其他技术相比, HiPIMS 可以有效地沉积非常致密的涂层^[18-21]。Erik Lewin 等^[22]比较了 DCMS 和 HiPIMS 沉积 Al-Si-N 涂层的性能, 发现在 HiPIMS 产生的等离子体中含有大量的金属离子和氮离子, 导致涂层致密, 硬度较高。Grzegorz Greczynski 等^[23]比较了 O_2/Ar 比对 DCMS 和 HiPIMS 制备 CrN 薄膜沉积速率和晶型的影响, 发现 HiPIMS 沉积速率低, 但制备的薄膜具有更好的晶型结构。目前, CrN 薄膜的研究主要集中在薄膜的晶向结构和表面形貌的关系上, 对采用不同沉积技术制备的 CrN 薄膜的晶向结构、耐腐蚀性能和耐磨性的对比^[24], 还没有相关的报道。

基于此, 本文对比了 DCMS 与 HiPIMS 两种沉积技术制备的 CrN 薄膜的性能, 研究两种方法制备的 CrN 薄膜晶向结构、形貌与薄膜性能之间的关系, 重点研究不同制备方法对薄膜耐腐蚀性、耐磨性等应用性能的影响。

1 实验方法

本实验使用自行设计加工的高功率脉冲磁控溅射与直流磁控溅射镀膜机。靶材为铬 (Cr, 99.5%), 溅射气体为氩气 (Ar, 99.99%), 反应气体为氮气 (N_2 , 99.9999%), 基底为镍片 (Ni), 尺寸为 $25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。Ni 片在使用前先用砂纸进行打磨, 以去除表面氧化物, 再依次放入丙酮、酒精、去离子水中分别超声清洗 15 min, 以去除油脂, 之后用氮气吹干, 置入真空腔室内。当沉积室本底气压达到 $3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 、基底温度为 200°C 时, 通入 50 mL/min Ar, 调节气压到 0.5 Pa, 轰击靶面清洗 5 min。然后, 在 Ni 基底上沉积 500 nm Cr 过渡层, 增加薄膜与基底之间的结合力。当溅射沉积 CrN 时, 通入 23 mL/min N_2 、 53 mL/min Ar, 工作气压为 0.5 Pa, 靶材与基底间距为 60 mm。

采用 Hitachi SU8020 型扫描电镜测量样品表面与断面的形貌。采用显微硬度计 (HVS-1000) 测量基底和薄膜复合显微硬度。薄膜的结晶质量和晶体结构采用 XRD (Bruker-D8 Advance) 进行测定, 其中 X 射线源为 $\text{CuK}\alpha$ 射线, 波长为 0.15418 nm , 射线管的电压和电流分别为 40 kV 与 40 mA, 扫描范围为 $30^\circ \sim 80^\circ$ 。利用瑞士万通 AUT86832 型电化学工作站测试薄膜的耐腐蚀性能。室温下采用饱和甘汞参比电极、工作电极以及辅助电极铂电极, 在 3.5%NaCl 溶液中进行动态电位扫描, 扫描范围为 $-0.8 \sim 1.0 \text{ V}$, 扫描速率为 0.01 V/s 。薄膜的摩擦磨损性能采用中国科学院兰州化学物理研究所生产的 MS-T3000 型摩擦磨损试验机检测, 载荷为 5 N, 圆盘转速为 500 r/min , 磨损时间为 30 min。薄膜磨损形貌由日本 Keyence 公司生产的 VK-X200 型激光共聚焦扫描显微镜测量。HiPIMS 平均功率由公式(1)得出, 其中 P 为平均功率, T 为周期, U 为工作电压, I 为工作电流。氮化铬薄膜沉积工艺参数如表 1 所示。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt \quad (1)$$

表 1 氮化铬薄膜沉积工艺参数
Tab.1 Deposition parameters of CrNfilms

| Parameters | N ₂ flow /(mL·min ⁻¹) | Ar flow /(mL·min ⁻¹) | Substrate temperature/℃ | Working pressure/Pa | Back pressure/Pa | Voltage/V | Power/kW | Average power/W |
|-------------|---|-------------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|-----------|----------|--------------------|
| CrN(HiPIMS) | 23 | 53 | 200 | 0.5 | 3×10 ⁻³ | 1300 | 53 | 309 |
| CrN(DCMS) | 23 | 53 | 200 | 0.5 | 3×10 ⁻³ | 488 | 0.309 | 309 |

2 结果与讨论

2.1 薄膜结构和形貌

2.1.1 薄膜晶相结构

图 1 为不同方法制备的 CrN 薄膜的 XRD 谱图。对比 CrN 标准谱图 (pdf-#11-0065) 得到 HiPIMS 与 DCMS 两种方法制备的薄膜为面心立方结构 (fcc) 的 CrN 相, 并伴随 (111)、(200)、(220)、(311) 等 4 个特征晶面峰。可以看到, HiPIMS 制备的薄膜峰的半峰宽明显较小, 由 Scherrer 方程计算 (200) 峰的晶粒尺寸 L , 得到 DCMS 制备的 CrN 薄膜晶粒尺寸为 10.11 nm, 而 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜晶粒尺寸为 17.43 nm, 即 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜晶粒尺寸大, 结晶度高。对 CrN 晶体的两个晶面(111)和(200)进行比值计算, 进一步说明其晶体结构。HiPIMS 制备的

CrN 薄膜峰的相对比 $I(111)/I(200)=0.75$, 在 (200) 晶面择优生长, 而 DCMS 制备的 CrN 薄膜峰的相对比 $I(200)/I(111)=0.85$, 在 (111) 晶面择优生长。

已知薄膜晶体结构取向和沉积薄膜整体能量的驱动力有关^[25], 这些能量主要由表面能和应变能组成。当表面能占主导地位时, 生长薄膜具有最低表面能的取向为(100)晶面; 而当应变能占主导地位时, 具有最小应变能的取向为(111)晶面。DCMS 制备的 CrN 薄膜为 (111) 晶面取向生长, 可能是由于薄膜中残余应力增加, 应变能占主导地位, 薄膜向应变能最小的方向 (111) 面生长。相比之下, 采用 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜应力较小, 向表面能最小的 (200) 晶面择优生长, 且平行于表面。此外, 由图 1 中注意到 HiPIMS 与 DCMS 两种方法制备的 CrN 薄膜, 其峰值都朝较低角度偏移, 这可能归因于残余应力增加的影响。

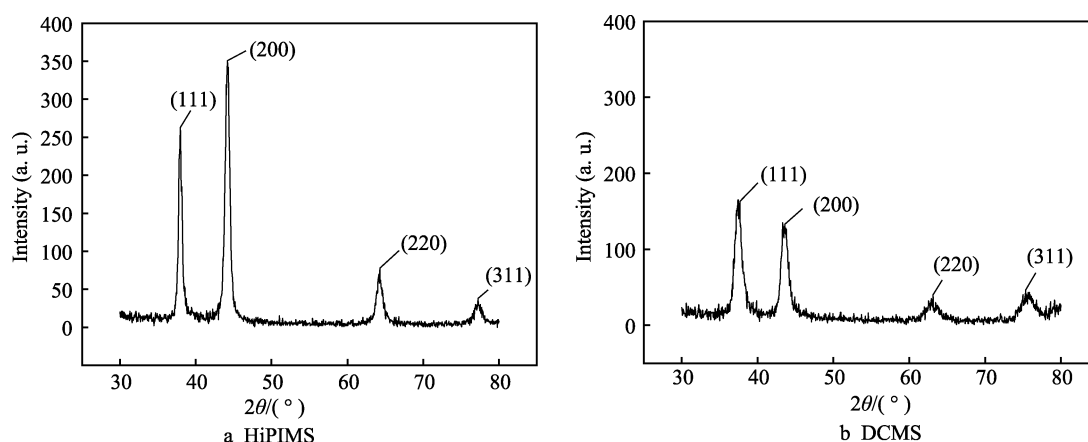


图 1 不同方法制备的 CrN 薄膜 XRD 图
Fig.1 XRD pattern of CrN prepared by different methods

2.1.2 薄膜微观形貌

DCMS 和 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的 SEM 表面和截面形貌如图 2 所示。对比图 2a 和图 2b 可以看出, 采用 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的颗粒尺寸明显小于 DCMS 制备的 CrN 薄膜, 且颗粒大小一致, 结构均匀致密。而 DCMS 制备的薄膜的颗粒大, 结构疏松多孔。分析认为这是由于 HiPIMS 沉积过程中的靶材离化率高, 能量高, 有利于表面离子和原子的迁移和扩散, 抵消了薄膜的内部缺陷, 使颗粒尺寸减小, 薄膜均匀致密。而在 DCMS 沉积过程中离化率低, 到达基底的粒子平均能量较低, 离子数量较少, 粒子在基底表面扩散能力差, 成膜粒子更倾向于和自身粒子

结合来降低能量。

从薄膜的截面 (图 2c 和图 2d) 可以看出, 由两种方法制备的 CrN 薄膜有明显的柱状结构, 呈柱状生长模式。但是 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜柱状结构致密, 不存在孔洞等其他缺陷, 而 DCMS 沉积的 CrN 柱状晶相互独立, 大小不一, 结晶性明显较低。其原因也是 HiPIMS 沉积过程中 Cr 被高度电离, 存在着高能量的金属离子, 和反应气体 N 更易进行化学反应形成较好的晶体结构。高通量的成膜离子有利于薄膜的结晶生长, 总轰击通量的增加使得表面粗糙度的下降和膜的致密^[26]。相比之下, DCMS 沉积过程中未电离的中性原子较多, 较低活化能的中性原子和反应

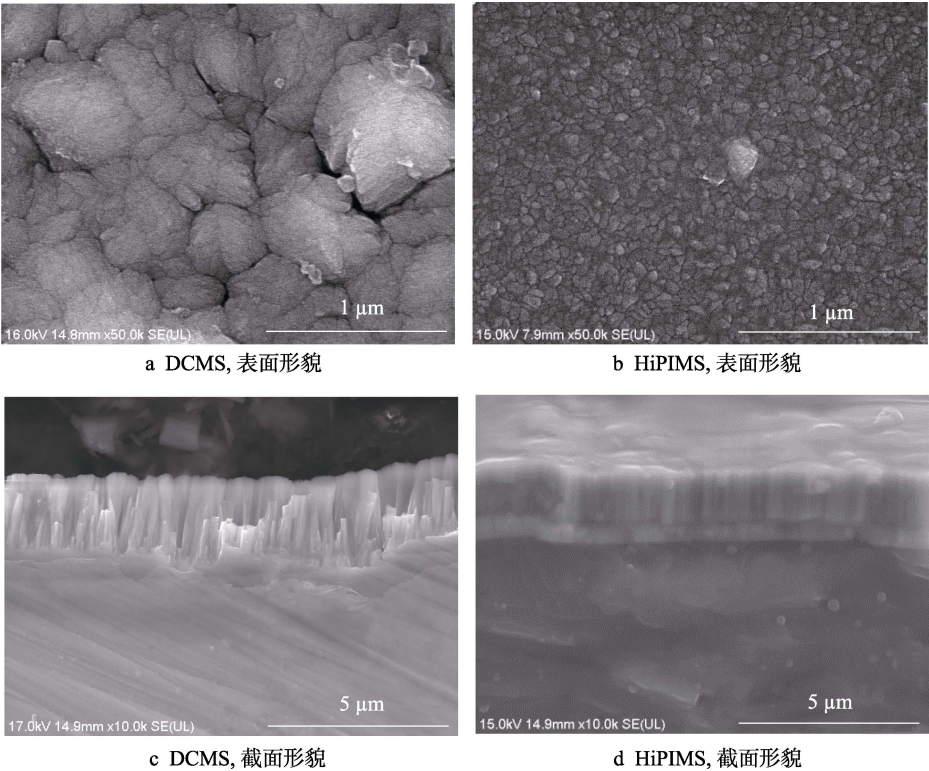


图 2 CrN 薄膜的表面形貌与截面形貌
Fig.2 Surface morphology ((a) DCMS, (b) HiPIMS) and cross section morphology ((c) DCMS, (d) HiPIMS) of CrN films and cross section

基团 N 反应，不能完全克服反应势垒，影响粒子在基片表面的迁移，降低沉积薄膜的结晶性能。因此，这些颗粒没有足够的能量移动到低能级状态，聚积严重，导致较多的缺陷，形成大的颗粒。

2.1.3 薄膜成分

对两种方法制备的 CrN 薄膜进行 EDS 成分扫描，薄膜成分如表 2 所示。除了大部分的 Cr 元素和 N 元素外，还有部分 C、O 元素，这可能与薄膜的表面吸附有关^[27]。特别是采用 HiPIMS 沉积的 CrN 薄膜的 N 元素含量比 DCMS 制备 CrN 薄膜高。N 含量的增加源于等离子体中参加反应的 N⁺含量高，这为形成更均匀、更致密且硬度高的 CrN 膜提供了合适的条件。

表 2 不同方法制备的 CrN 的薄膜成分
Tab.2 Composition of CrN thin films prepared by different methods

| Samples | at% | | | |
|-------------|-------|-------|------|-------|
| | Cr | N | C | O |
| CrN(HiPIMS) | 46.47 | 41.08 | 0 | 12.05 |
| CrN(DCMS) | 43.25 | 38.78 | 7.54 | 10.34 |

2.2 薄膜的性能

2.2.1 显微硬度

通过显微硬度计测量薄膜的显微硬度，DCMS 制备的 CrN 薄膜显微硬度为 501.5HV，而 HiPIMS 制备

的 CrN 薄膜的显微硬度为 855.9HV，增加了约 71%。这说明高电离率的 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜因(200)取向、结晶性好且结构致密，表现出更高的显微硬度。一般来讲，晶粒细化和界面效应有利于显微硬度的提高，但从 Shererr 公式计算的 CrN 薄膜晶粒尺寸来看，HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的晶粒尺寸为 17.43 nm，比 DCMS 制备的 CrN 薄膜晶粒尺寸（10.11 nm）大，而实验显示 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜硬度高，这说明影响薄膜硬度的主要因素不是晶粒尺寸大小，而是与高能粒子轰击对薄膜组织结构的改善有关^[28]。

虽然 HiPIMS 的平均功率较低，但是 HiPIMS 瞬时脉冲功率远高于 DCMS（见表 1），在瞬时脉冲高功率作用下产生的溅射金属粒子电离，高电离率使得参加薄膜沉积的粒子为离子状态，薄膜表面晶粒细化，薄膜致密度增加，进而薄膜的硬度提高。此外，在 HiPIMS 沉积过程中，高能离子对基底表面的轰击会使基底表面的温度上升，进而导致原子迁移率的增加，粒子有足够的能量迁移到合适的晶格位置，使得缺陷浓度减少，从而生成致密、高硬度的薄膜。

2.2.2 耐腐蚀性

HiPIMS 制备的 CrN 薄膜缺陷少、致密，可通过测量薄膜的耐腐蚀性进行证明。由图 3 和表 3 可见，HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的腐蚀电位为-0.34 V，而 DCMS 制备的 CrN 薄膜腐蚀电位为-0.37 V，即 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜比 DCMS 制备的 CrN 薄膜

电位大,说明 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜抗腐蚀效果好。腐蚀电流 (I_{corr}) 的测量结果也表明, HiPIMS 制备的 CrN 薄膜具有更好的抗腐蚀性能。DCMS 制备的 CrN 薄膜腐蚀电流密度为 $2.75 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 而采用 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的腐蚀电流密度为 $2.80 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, 比 DCMS 薄膜腐蚀电流密度低 1 个数量级, 即采用 HiPIMS 方法制备的 CrN 薄膜耐腐蚀性能更好。

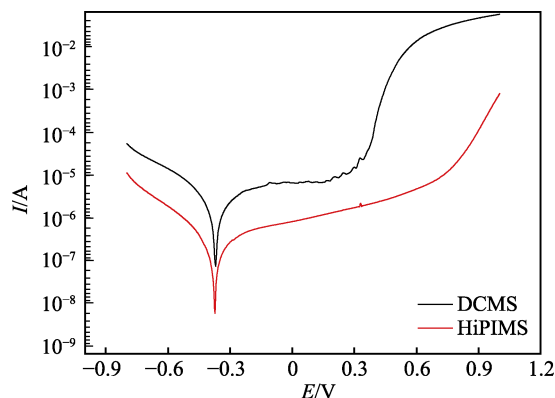


图3 CrN 薄膜的动态极化曲线

Fig.3 Dynamic polarization curve of CrN films

表3 动态极化曲线数据

Tab.3 Data of dynamic polarization curve

| Samples | $I_{\text{corr}}/(\times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$ | E_{corr}/V |
|-------------|---|----------------------------|
| CrN(HiPIMS) | 0.28 | -0.34 |
| CrN(DCMS) | 2.75 | -0.37 |

此外, 观察两条曲线发现, HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的动态极化曲线相对平滑, 说明薄膜缺陷少, 质量好。分析认为, HiPIMS 沉积的 CrN 薄膜具有较高的腐蚀电位和较低的腐蚀电流, 是由于这种方法制备的薄膜结构致密、结晶性能高。图 2c 中 DCMS 制备的 CrN 薄膜结构疏松, 以柱状晶的生长方式贯穿薄膜表面与基片, 腐蚀液 NaCl 会渗入晶粒之间的晶界面, 甚至腐蚀基片。由于薄膜的腐蚀电位高, 基片的腐蚀电位低, 两者之间形成原电池, 进而腐蚀基片的速度加快。相反, HiPIMS 制备的 CrN 薄膜结构致密、晶粒尺寸小、粗糙度低、均匀性好、缺陷少, 可以避免此现象的发生, 腐蚀被抑制。

2.2.3 耐摩擦磨损性

图 4 比较了不同方法制备的 CrN 薄膜的摩擦系数随时间的变化曲线, 图 5 为 DCMS 和 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的磨痕形貌。由图 4 可知, DCMS 制备的 CrN 薄膜平均摩擦系数为 0.640, 而 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜摩擦系数为 0.545, 摩擦系数明显降低。众所周知, 结晶取向影响涂层的摩擦学行为^[29]。由图 1 和图 5 发现, HiPIMS 制备的 CrN 薄膜为(200)取向生长, 磨损量小, 磨痕宽度大约为 $146.44 \mu\text{m}$, 而 DCMS 制备的 CrN 薄膜为(111)取向生长, 磨损量大, 磨痕宽度大约为 $205.12 \mu\text{m}$ 。这些性能和 HiPIMS 制

备的薄膜具有较好的晶体结构、较高的硬度有关。HiPIMS 沉积的 CrN 薄膜晶粒小、粗糙度低、硬度大、表面缺陷少, 有助于降低其摩擦系数和磨损量。

此外, DCMS 制备的 CrN 薄膜摩擦磨损测量曲线的噪声较大。这是由于 DCMS 制备的 CrN 薄膜缺陷较多、粗糙度大, 氧化铝球与薄膜表面的摩擦可以消除松散粘结的缺陷, 这些缺陷会增加摩擦试验中磨损碎片的形成。因此, 对于缺陷较多的涂层, 噪声更明显。

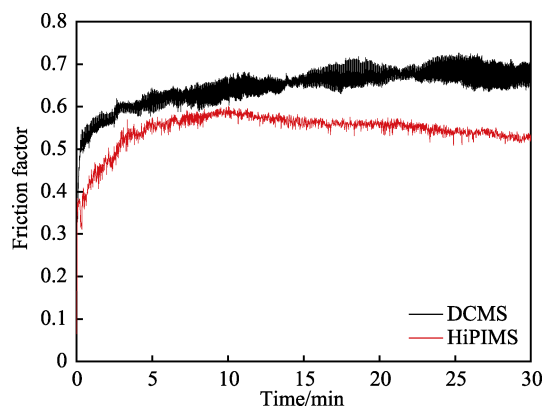
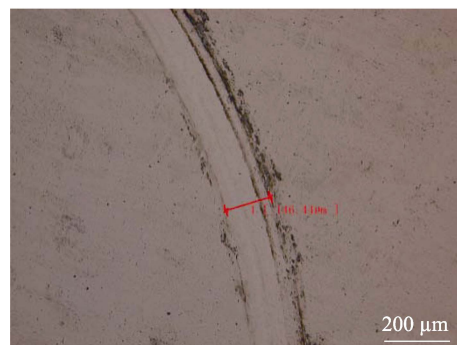


图4 CrN 薄膜的摩擦系数随时间的变化曲线

Fig.4 Change curve of friction coefficient of CrN films with time



a DCMS



b HiPIMS

图5 CrN 薄膜摩擦实验后的磨痕形貌

Fig.5 Abrasion morphology of CrN film after friction experiment

3 结论

1) DCMS 和 HiPIMS 方法对制备的 CrN 薄膜晶体结构影响很大。采用 DCMS 制备的 CrN 薄膜为

(111) 晶面择优生长, 而 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜为 (200) 晶面择优生长。HiPIMS 制备的 CrN 薄膜内应力较小, 薄膜的总能量较小。两种制备方法所制得的 CrN 薄膜都呈柱状生长, 但是 HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的颗粒尺寸小, 结构致密; DCMS 制备的 CrN 薄膜的颗粒尺寸大, 且疏松多孔。

2) HiPIMS 方法制备的 CrN 薄膜具有更好的性能。DCMS 制备的 CrN 薄膜的显微硬度为 501.5HV, HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的显微硬度为 855.9HV, 增加约 71%。HiPIMS 制备的 CrN 薄膜的腐蚀电流密度比 DCMS 薄膜低 1 个数量级。薄膜表现出耐腐蚀性好、耐磨性能高的特点。

参考文献:

- [1] 杨娟. 脉冲偏压电弧离子镀氮化铬涂层的制备技术及性能[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
YANG Juan. The preparation technology and properties of CrN coating deposited by superimposed pulsed bias cathodic arc ion plating[D]. Chongqing: Southwestern University, 2009.
- [2] 王愉. 峰值功率对高功率脉冲磁控溅射氮化铬薄膜力学性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 15-22.
WANG Yu. Influence of peak power on mechanical property of CrN films deposited by high power impulse magnetron sputtering[J]. Surface technology, 2017, 46(1): 15-22.
- [3] HUANG P K, JIEN W Y. Effects of nitrogen content on structure and mechanical properties of multi-element (AlCr-NbSiTiV)N coating[J]. Surface and coatings technology, 2009, 203(13): 1891-1896.
- [4] TUNG H M, HUANG J H, TSAI D G, et al. Hardness and residual stress in nanocrystalline ZrN films: Effect of bias voltage and heat treatment[J]. Materials science and engineering A, 2009, 500(1): 104-108.
- [5] OVCHARENKO V D, KUPRIN A S, TOLMACHOVA G N, et al. Deposition of chromium nitride coatings using vacuum arc plasma in increased negative substrate bias voltage[J]. Vacuum, 2015, 117: 27-34.
- [6] 袁燕, 李花, 张海宝, 等. 氮流量对李生靶磁控溅射沉积氮化铬薄膜性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(12): 1381-1386.
YUAN Yan, LI Hua, ZHANG Haibao, et al. Effect of N₂ flow rate on properties of CrN_x coatings deposited by dual-target magnetron sputtering[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2016, 36(12): 1381-1386.
- [7] TRICOTEAUX A, JOUAN P Y, GUERIN J D, et al. Fretting wear properties of CrN and Cr₂N coatings[J]. Surface and coatings technology, 2003, 174-175: 440-443.
- [8] 田民波, 刘德令. 薄膜科学与技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
TIAN Minbo, LIU Deling. Manual of thin film science and technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1991.
- [9] HUANG R F, CHAN C Y, LEE C H, et al. Wear-resistant multilayered diamond-like carbon coating prepared by pulse biased arc ion plating[J]. Diamond and related materials, 2001, 10(9): 1850-1854.
- [10] 莫继良. 物理气相沉积(PVD)涂层的摩擦学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
MO Jiliang. Study on the tribological behaviors of physical vapor deposition (PVD) coatings[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [11] BARÁNKOVÁ H, BÁRDOS L. Comparison of pulsed DC and RF hollow cathode depositions of Cr and CrN films[J]. Surface and coatings technology, 2011, 205(17): 4169-4176.
- [12] 王振玉. TiSiN 纳米复合硬质涂层的制备与物性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
WANG Zhenyu. Preparation and properties of TiSiN nanocomposite hard coatings[D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.
- [13] GUDMUNDSSON J, ALAMI J, HELMERSSON U. Spatial and temporal behavior of the plasma parameters in a pulsed magnetron discharge[J]. Surface and coatings technology, 2002, 161(2): 249-256.
- [14] BOHLMARK J, GUDMUNDSSON J T, ALAMI J, et al. Spatial electron density distribution in a high-power pulsed magnetron discharge[J]. IEEE transactions on plasma science, 2006, 33(2): 346-347.
- [15] GUDMUNDSSON J T. The high power impulse magnetron sputtering discharge as an ionized physical vapor deposition tool[J]. Vacuum, 2010, 84(12): 1360-1364.
- [16] 袁燕. 关于高功率脉冲磁控溅射制备 ZnO 薄膜的研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2017.
YUAN Yan. Study on the preparation of ZnO films by high power impulse magnetron sputtering[J]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2017.
- [17] 李春伟, 田修波, 冯春志, 等. 不同靶基距下凹槽表面 HiPIMS 法制备钒膜的微观结构及膜厚均匀性[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 122-127.
LI Chun-wei, TIAN Xiubo, GONG Chunzhi, et al. Microstructure and thickness uniformity of vanadium films on concave object at different target substrate distance by HiPIMS[J]. Surface technology, 2016, 45(7): 122-127.
- [18] KONSTANTINIDI S, DAUCHOT J P, HECQ M. Titanium oxide thin films deposited by high-power impulse magnetron sputtering[J]. Thin solid films, 2006, 515(3): 1182-1186.
- [19] EHIASARIAN A P, HOVSEPIAN P E, HULTMAN L, et al. Comparison of microstructure and mechanical properties of chromium nitride-based coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering and by the combined steered cathodic arc/unbalanced magnetron technique[J]. Thin solid films, 2004, 457(2): 270-277.

- teristics after shot peening[J]. Journal of material processing technology, 2009, 209(8): 4093-4102.
- [18] KIM T, LEE H, JUNG S, et al. A 3D FE model with plastic shot for evaluation of equiaxial peening residual stress due to multi-impacts[J]. Surface and coatings technology, 2012, 206(13): 3125-3136.
- [19] KIM T, LEE H, HYUN H C, et al. Effects of rayleigh damping, friction and rate-dependency on 3D residual stress simulation of angled shot peening[J]. Materials and design, 2013, 46(4): 26-37.
- [20] ROUSSEAU T, HOC T, GILLES P, et al. Effect of bead quantity in ultrasonic shot peening: Surface analysis and numerical simulations[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 225(9): 413-420.
- [21] BADREDDINE J, REMY S, MICOULAUT M, et al. CAD based model of ultrasonic shot peening for complex industrial parts[J]. Advances in engineering software, 2014, 76(3): 31-42.
- [22] BADREDDINE J, ROUHAUD E, MICOULAUT M, et al. Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: Effects of process parameters[J]. International journal of mechanical sciences, 2014, 82(7): 179-190.
- [23] BADREDDINE J, REMY S, MICOULAUT M, et al. CAD based simulation of ultrasonic shot peening process[C]// 12th International design conference. Croatia: Dubrovnik, 2012: 373-380.
- [24] BADREDDINE J, MICOULAUT M, ROUHAUD E, et al. Effect of the confinement on the properties of ultrasonic vibrated granular gases[J]. Granular matter, 2013, 15(3): 367-376.

(上接第 69 页)

- [20] ALAMI J, SARAOKINOS K, USLU F, et al. On the relationship between the peak target current and the morphology of chromium nitride thin films deposited by reactive high power pulsed magnetron sputtering[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(1): 015304.
- [21] BOBZIN K, BAGCIVAN N, IMMICH P, et al. Mechanical properties and oxidation behaviour of (Al,Cr)N and (Al,Cr,Si)N coatings for cutting tools deposited by HPP-MS[J]. Thin solid films, 2008, 517(3): 1251-1256.
- [22] LEWIN E, LOCH D, MONTAGNE A, et al. Comparison of Al-Si-N nanocomposite coatings deposited by HIPIMS and DC magnetron sputtering[J]. Surface and coatings technology, 2013, 232(10): 680-689.
- [23] GRECZYNSKI G, JENSEN J, HULTMAN L. Films prepared by DC magnetron sputtering and high-power pulsed magnetron sputtering: A comparative study[J]. IEEE transactions on plasma science, 2010, 38(11): 3046-3056.
- [24] EHIASARIAN A P, MUNZ W D, HULTMAN L, et al. High power pulsed magnetron sputtered CrN_x films[J]. Surface and coatings technology, 2003, 163(6): 267-272.
- [25] BAGCIVAN N, BOBZIN K, LUDWIG A, et al. CrN/AlN nanolaminate coatings deposited via high power pulsed and middle frequency pulsed magnetron sputtering[J]. Thin solid films, 2014, 572: 153-160.
- [26] 夏飞. HiPIMS 技术制备 CrN 涂层及其结构与力学性能的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- XIA Fei. Study the structure and mechanical properties of CrN coatings prepared by HiPIMS technology[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [27] 吴忠振, 田修波, 巩春志, 等. 基片偏压模式对高功率脉冲磁控溅射 CrN 薄膜结构及成分影响研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(2): 405-409.
- WU Zhongzhen, TIAN Xiubo, GONG Chunzhi, et al. Effect of bias modes on structures and composition of CrN films prepared by high power pulsed magnetron sputtering[J]. Rare metal materials and engineering, 2013, 42(2): 405-409.
- [28] 李谋, 李晓娜, 林国强, 等. 脉冲偏压电弧离子镀 Ti/TiN 纳米多层薄膜的结构与硬度[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(6): 49-52.
- LI Mou, LI Xiaona, LIN Guoqiang, et al. Structure and hardness of pulsed bias arc ion plating Ti/TiN nano-multilayer film[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2005, 26(6): 49-52.
- [29] BISWAS B, PURANDARE Y, ARUNACHALAMSUGUMARAN A, et al. Effect of chamber pressure on defect generation and their influence on corrosion and tribological properties of HiPIMS deposited CrN/NbN coatings[J]. Surface and coatings technology, 2018, 336: 84-91.