

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20220115001

电-磁场协同增强 HiPIMS 技术的 CrAl 靶放电行为及 CrAlN 薄膜制备*

李春伟^{1,2} 田修波²

(1. 东北林业大学工程技术学院 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 基于常规高功率脉冲磁控溅射 (HiPIMS) 存在的问题, 发展了新型 HiPIMS 放电模式: 电-磁场协同增强高功率脉冲磁控溅射 ((E-MF) HiPIMS)。研究新型放电模式下 CrAl 靶的放电行为及 CrAlN 薄膜的沉积特性。结果表明, 不同工作压力下, CrAl 靶放电电流波形随靶脉冲电压的变化规律相似。随脉冲电压的增大, CrAl 靶脉冲峰值电流线性增加, 随着氮气流量的增大, CrAl 靶脉冲峰值电流线性增加, 随着复合直流的增大, CrAl 靶电流上升速度不变但靶脉冲峰值电流出现明显降低。与常规 HiPIMS 相比, (E-MF) HiPIMS 技术制备的 CrAlN 薄膜表面更加光滑、平整, 且表面粗糙度仅为 4.123 nm。CrAlN 薄膜的生长结构更加致密而紧凑, 晶粒也更加细小、均匀。此外, (E-MF) HiPIMS 技术制备的 CrAlN 薄膜样品的摩擦因数显著降低, 且磨损后的磨痕宽度小、磨损处仅出现间断型的表面磨损, 摩擦磨损性能更加优异。同时样品的腐蚀电位较大提高、腐蚀电流大幅减小, 表现出更优异的耐腐蚀性能。

关键词: 高功率脉冲磁控溅射; CrAl 靶; 放电特性; CrAlN 薄膜; 生长形貌

中图分类号: TG174

CrAl Target Discharge Behavior of Electric and Magnetic Fields Synergistically Enhancing HiPIMS and Preparation of CrAlN Film

LI Chunwei^{1,2} TIAN Xiubo²

(1. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the existing problems of conventional high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS), a new HiPIMS discharge mode is developed: electro-magnetic field enhanced high power impulse magnetron sputtering (E-MF) hiPIMS. The discharge behavior of CrAl target and deposition characteristics of CrAlN films in the new discharge mode are studied. The results show that the discharge current waveform of CrAl target varies with the pulse voltage at different working pressures. The peak current of CrAl target pulse increases linearly with the increase of pulse voltage. The peak current of CrAl target pulse increases linearly with the increase of nitrogen flow rate. With the increase of composite DC, the rate of rise of CrAl target current remains unchanged but the peak current of target pulse decreases obviously. Compared with conventional HiPIMS, the surface of CrAlN film prepared by (E-MF) HiPIMS is more smoother and flat, and the surface roughness is only 4.123 nm. The growth structure of CrAlN films is more dense and compact, and the grains are smaller and more uniform. In addition, the friction coefficient of (E-MF) CrAlN thin film samples prepared by HiPIMS technology is significantly reduced, and the wear width is small, only intermittent surface wear occurs at the wear area, and the friction and wear performance is better. At the same time, the corrosion potential and corrosion current of the samples increased greatly, and the corrosion resistance is better.

Keywords: high power pulse magnetron sputtering; CrAl target; discharge characteristics; CrAlN films; growth morphology

* 中央高校基本科研业务费专项 (2572018BL09)、黑龙江省自然科学基金(LH2019E001) 和中国博士后科学基金 (2016M590273) 资助项目。

Fund: Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (2572018BL09), Heilongjiang Provincial Natural Science Foundation Project (LH2019E001), and China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2016M590273).

20220115 收到初稿, 20220926 收到修改稿

0 前言

CrAlN 薄膜是在 CrN 薄膜基础上发展起来的一种多元超硬薄膜材料, 由于 Al 元素的加入, CrAlN 薄膜不仅在耐磨性、硬度方面优于 CrN 薄膜, 还能够显著改善 CrN 薄膜的高温抗氧化性能, 在许多领域特别是高速钢、硬质合金刀具上具有极其广阔的应用前景^[1,2]。直流磁控溅射技术作为制备 CrAlN 薄膜的主流技术之一, 具有溅射率高、基片温升低、膜基结合力好等优点^[3]。但直流磁控溅射技术放电时的溅射金属大多以原子状态存在, 金属离子化率较低, 薄膜的性能较难优化^[4]。近年来迅速发展的高功率脉冲磁控溅射技术 (High power impulse magnetron sputtering, HiPIMS) 作为一门新兴的磁控溅射技术, 具有峰值功率高、等离子体密度高和溅射靶材金属离子化率高等优势^[5], 并已成为国内外的研究热点。HiPIMS 的峰值功率是传统磁控溅射的 100 倍, 等离子体密度可达到 10^{19} m^{-3} , 溅射靶材的离子化率能达到 90% 以上^[6-8]。HiPIMS 的瞬时功率虽然很高, 但其平均功率并不高, 故薄膜沉积速率较低。

为了获得 HiPIMS 技术的高离子化率-高沉积速率技术特征, 我们在前期研究中^[9-12]提出一种新型的 HiPIMS 放电模式, 即电-磁场协同增强 HiPIMS 技术 (Electric and magnetic fields synergistically enhancing HiPIMS, (E-MF) HiPIMS), 该技术以外置电场和磁场双场协同增强常规 HiPIMS 放电, 进一步增加溅射粒子离子化率, 并在一定程度上改善薄膜的沉积速率, 制备的膜层性能优异。然而, 前期我们主要以单质靶 (钨靶和铜靶) 为研究对象, 为了更深刻理解该新技术, 本文以 CrAl 合金靶为溅射靶材, 研究电-磁场协同增强 HiPIMS 技术的 CrAl 靶放电行为及 CrAlN 薄膜的沉积特性, 可为 HiPIMS 技术的进一步推广应用提供理论依据。

1 试验准备

1.1 样品制备

本文所用试验设备为哈尔滨工业大学先进涂层技术课题组研制的高功率复合脉冲磁控溅射系统^[13], 如图 1 所示。真空室 (尺寸: $\phi 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$) 为不锈钢双层圆筒且层间有循环水冷结构。阴极靶为 CrAl 合金靶 (尺寸: $\phi 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$; Cr、Al 原子比为 67:33), 其供电电源为高功率

复合脉冲磁控溅射电源, 其输出脉冲电流 0~200 A, 脉冲电压为 0~1 000 V, 并连续可调; 输出直流电流 0~15 A, 电压为 0~1 000 V, 并连续可调。试验时基体采用脉冲偏压电源供电, 真空室内置辅助阳极 (尺寸: $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$) 安放于真空室内与阴极靶左侧 45° 位置处并由兆鑫直流电源 (0~110 V) 供电, 外置电磁场 (由 300 匝线圈的螺线管线圈构成) 安放于阴极靶外侧并由兆鑫直流电源 (0~6 A) 供电。试验时的本底真空度为 5 mPa, 试验所用的气体为纯度 99.99% 的高纯氩气和氮气。所用基体材料为硅片和不锈钢, 样品经预处理后放入真空室中距阴极靶 10 cm 处。

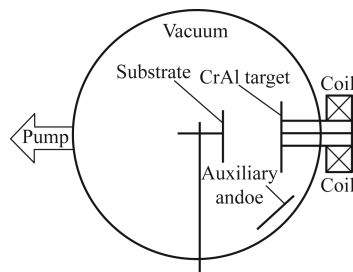


图 1 试验设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1.2 测试

CrAl 靶的放电特性测试: 在 HiPIMS 电源的阳极端输出线上套一个电流传感器, 采用示波器 (Tektronix TDS1012B-SC) 检测 CrAl 靶脉冲电流。

CrAlN 薄膜的结构性能测试: 利用原子力显微镜 (AFM, Bruker, AXS Dimension Icon) 进行薄膜表面形貌及表面粗糙度测试。利用扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi, S4800) 对薄膜的截面形貌进行观察。利用摩擦磨损试验机 (MS-T3000) 测试薄膜摩擦磨损性能, 对磨件为直径 3 mm 的 GCr15 钢球, 转速为 50 r/min, 磨损时间为 800 s。利用光学显微镜 (OM, VHX-1000e) 观察样品的磨痕形貌。利用电化学综合测试系统 (CHI604C) 测试薄膜耐腐蚀性能, 采用三电极系统, 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为铂电极, 腐蚀溶液为 3.5 wt. % NaCl, 工作时试样为阳极。

2 结果与讨论

2.1 不同工作气压下 CrAl 靶的放电特性

当 CrAl 靶脉冲频率为 50 Hz、脉宽为 100 μs , 复合直流为 0.3 A, 氩气流量为 30 mL/min, 辅助

阳极电压为 50 V, 辅助电磁线圈电流为 4 A 时, 不同工作气压下的 CrAl 靶脉冲电流波形随脉冲电压的演化规律如图 2 所示。

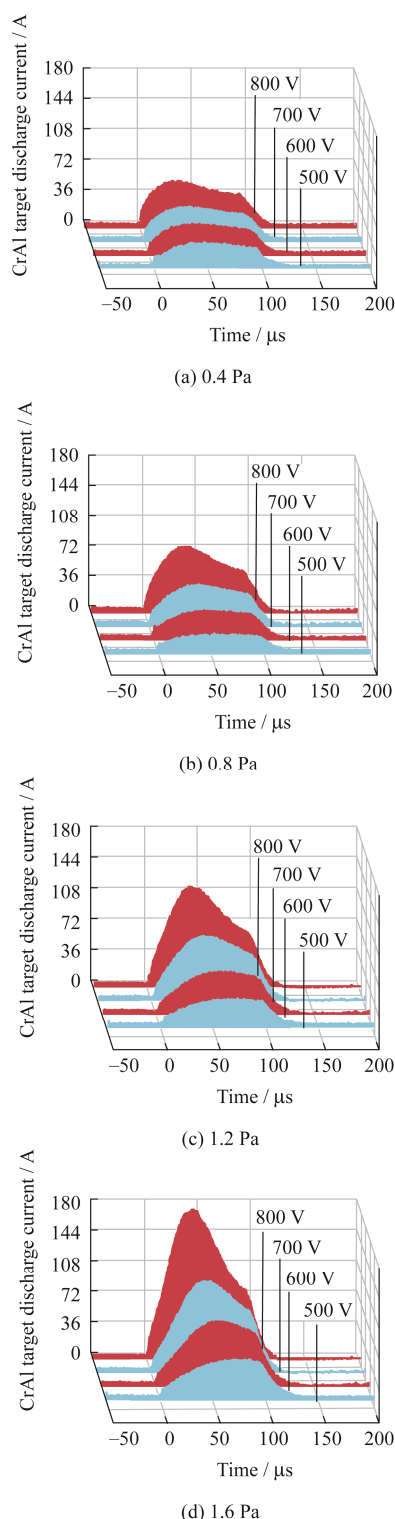


图 2 不同工作气压下 CrAl 靶电流波形随脉冲电压的演变
Fig. 2 Evolution of CrAl target discharge current waveforms with the increase of pulse voltage for different pressures

由图 2 可见, 不同工作气压下 CrAl 靶电流波形随靶脉冲电压的变化规律保持一致。其中, 低

气压下, 当脉冲电压较低 (500 V) 时, 靶脉冲电流较小, 表明 HiPIMS 放电程度较弱, 此时的放电系统为“低离化”状态, 不利于制备高质量膜层; 随着靶脉冲电压的逐渐增大 (600、700、800 V), 靶脉冲电流逐渐增大。当工作气压为 1.6 Pa, 靶脉冲电压为 800 V 时, 靶脉冲峰值电流可达 170 A, 表现为剧烈的放电过程, 此时无论是金属靶 CrAl 粒子, 还是中性气体 Ar 粒子, 均为“高离化”状态。然而, 此时的真空系统放电状态对于镀膜工艺而言, 却是一种不稳定的状态, 亦不能获得优质膜层。

传统磁控溅射的靶脉冲峰值电流和脉冲电压之间服从幂次法则, 即 $I=KU^n$, 其中 n 在 5~15 之间。图 3 为不同工作气压下 CrAl 靶脉冲峰值电流随脉冲电压的变化关系曲线, 由图 3 可见, 不同工作气压下, 随脉冲电压的增加, 靶脉冲峰值电流基本上呈线性增加的趋势, 即 $n=1$ 。SARAKINOS 等^[14]研究发现, 靶脉冲电压较低时的 HiPIMS 类似于传统磁控溅射, 具有较高的 n 值, 此时 $n=7$ 。然而, 当靶脉冲电压高于 650 V 时, HiPIMS 的 n 值将会转变为 1。EHIASARIAN 等^[15]认为随着脉冲电压的增大, 二次电子的能量增加, 磁场强度不足以约束二次电子, 降低了气体的离化率, 从而导致靶脉冲峰值电流与脉冲电压之间的线性关系。

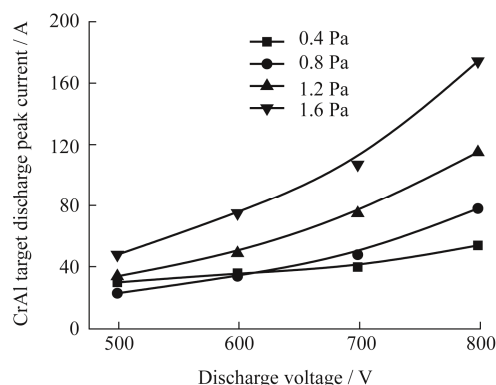


图 3 不同工作气压下 CrAl 靶脉冲峰值电流随脉冲电压的变化

Fig. 3 Evolution of CrAl target discharge peak current with the increase of pulse voltage for different pressures

图 4 为不同脉冲电压下 CrAl 靶脉冲电流平均值随工作气压的变化关系。由图 4 可见, 当脉冲电压较低 (<700 V) 时, 随着工作气压的增大, 靶脉冲峰值电流先降低然后逐渐增加; 而当脉冲电压较高 (≥ 700 V) 时, 靶脉冲峰值电流随工作气压的增加而单调增加。分析认为, (E-MF)

HiPIMS 放电过程中,随着工作气压的增加将产生两方面的效应:一方面随着工作气压的增加,系统中的粒子碰撞几率增大,导致溅射粒子的能量在碰撞过程中大量损失,系统放电减弱;另一方面是降低气体分子的平均自由程,增大气体分子和溅射粒子的碰撞次数,增加二次电子数目,从而增加系统等离子体密度,促进放电的进行。上述两方面的共同作用决定 CrAl 靶脉冲电流平均值与工作气压的关系曲线由“先降低再增加”向“单调增加”转变。

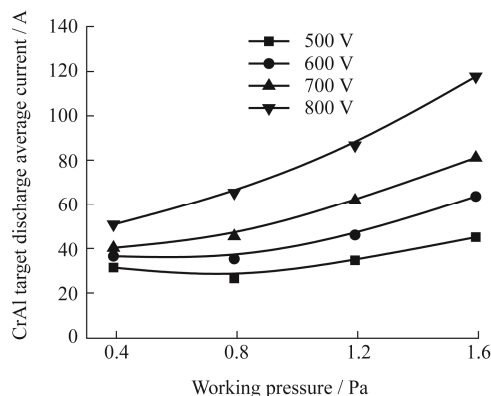


图4 不同脉冲靶电压下 CrAl 靶脉冲电流平均值随工作气压的变化

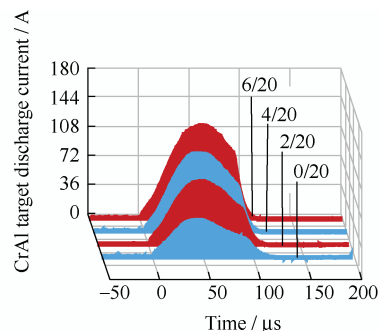
Fig. 4 Evolution of CrAl target discharge average current with the increase of pressure for different pulse voltages

2.2 不同氮氩流量比下 CrAl 靶的放电特性

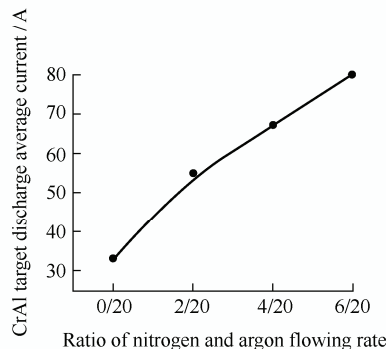
当脉冲电压幅值为 700 V、脉冲频率为 50 Hz、脉宽为 100 μs , 复合直流为 0.3 A, 工作气压为 0.8 Pa, 辅助阳极电压为 50 V, 辅助电磁线圈电流为 4 A 时, 保持氩气流量恒为 30 mL/min, 通过调节氮气流量来改变氮氩流量比率, 继而考察不同氮氩流量比率下 CrAl 靶的放电规律。

图 5 为 CrAl 靶脉冲电流随氮氩流量比率下的变化规律。由图 5 可见, 随着氮气流量的增大, CrAl 靶脉冲峰值电流基本上线性增加。分析认为, 在反应磁控溅射过程中, 溅射靶表面存在三种状态: 金属态、过渡态和化合物态。氮气引入后, 首先在靶材表面生成 CrN 和 AlN, 从而使 CrAl 靶材由金属态向过渡态转变, 由于化合物的二次电子发射系数远大于金属的二次电子发射系数^[16], 从而提高了气体和金属的离化率, 因此, 随着氮气流量在一定的范围内增加, 靶脉冲峰值电流逐渐增加。然后, 随着氮气流量继续增加, 溅射靶由过渡态向化合物态转变, CrAl 靶表面处于“靶中毒”状态, 但是气体

总流量在逐渐增大, 进而使靶脉冲峰值电流仍然在逐渐增加。



(a) Discharge current waveform at different N_2 / Ar flux ratios



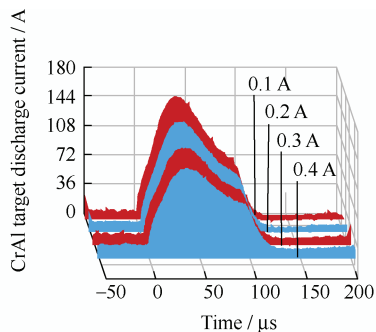
(b) Evolution of average discharge current with the increase of N_2 / Ar flux ratio for different target voltages

图5 不同氮氩流量比下 CrAl 靶的放电规律

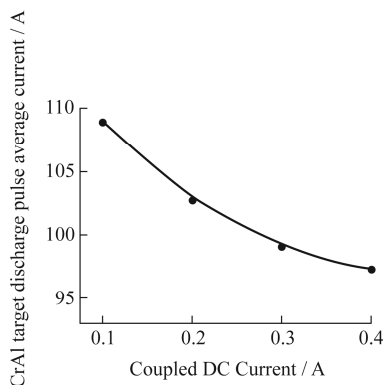
Fig. 5 Influence of N_2 / Ar flux ratio on CrAl target pulse current

2.3 不同复合直流下 CrAl 靶的放电特性

对于 HiPIMS 技术而言, 增加复合直流可以对高功率脉冲放电起到预离化的作用, 有利于消除放电延迟, 减少“打弧”现象, 增加放电的稳定性。当脉冲电压幅值为 700 V、脉冲频率为 50 Hz、脉宽为 100 μs 时, 氩气流量为 30 mL/min, 工作气压为 0.8 Pa, 辅助阳极电压为 50 V, 辅助电磁线圈电流为 4 A 时, CrAl 靶电流随复合直流的变化关系如图 6 所示。



(a) Discharge current waveform at different hybrid DC current



(b) Evolution of average discharge current with the increase of hybrid DC current for different pulse voltages

图6 不同复合直流下 CrAl 靶的放电规律

Fig. 6 Influence of hybrid DC current on CrAl target pulse current

由图6可见,随着复合直流的增加,CrAl靶电流上升的速度不变,但是靶脉冲峰值电流出现明显的降低。分析认为,这是由于靶电流的上升速度主要取决于靶电压和工作气压,靶电压和工作气压一定时,靶电流上升速度保持不变;而增大复合直流,会减小放电发生的电子密度阈值,降低电子密度,而这部分电子主要用来离化气体离子,故增大复合直流直接导致气体放电减少,因此靶脉冲峰值电流出现明显降低。

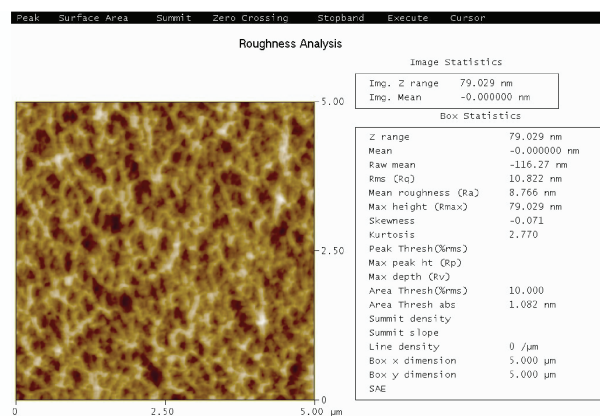
2.4 CrAlN 薄膜的生长形貌

通过前面 CrAl 靶放电行为的分析,得出 (E-MF) HiPIMS 技术 CrAl 靶在能够维持稳定放电时的最优工艺参数: CrAl 靶脉冲电压幅值为 700 V、脉冲频率为 50 Hz、脉宽为 100 μ s,工作气压 0.8 Pa,氮氩流量比为 4/20,复合直流为 0.3 A,辅助阳极电压为 50 V,辅助电磁线圈电流为 4 A。

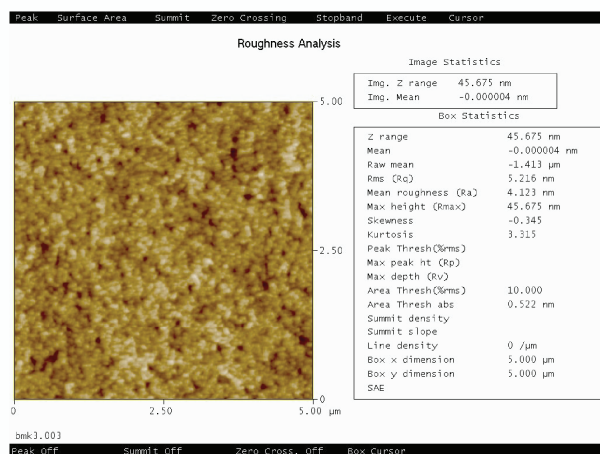
为了研究 (E-MF) HiPIMS 技术的薄膜沉积特性,在保持相同的放电平均功率为 400 W 时,分别采用常规 HiPIMS 和 (E-MF) HiPIMS 两种方法制备 CrAlN 薄膜,并研究薄膜的生长结构及性能。

图7为 CrAlN 薄膜的表面形貌及表面粗糙度。由图7可见,相比 HiPIMS 制备的 CrAlN 薄膜,采用 (E-MF) HiPIMS 技术获得的 CrAlN 薄膜表面更加光滑、平整、致密,并且膜层表面无明显凹坑与凸起等缺陷。此外,由 AFM 二维形貌图导出的薄膜表面粗糙度仅为 4.123 nm(图7b),远小于常规 HiPIMS 条件下的薄膜表面粗糙度 (8.766 nm,图7a),表现为高质量优质膜层。该结果与文献[11]中的结果保持一致,相比于常规 HiPIMS 技术,(E-MF) HiPIMS 技术具有更高的系统粒子离化率和等离子体密度,在薄膜沉积过程中产生高于常规 HiPIMS 的离子束流密度,极大促进成膜粒子的扩散性和流动度,非常利

于制备出光滑平整的 CrAlN 薄膜。



(a) AFM surface morphology and roughness of CrAlN films by HiPIMS

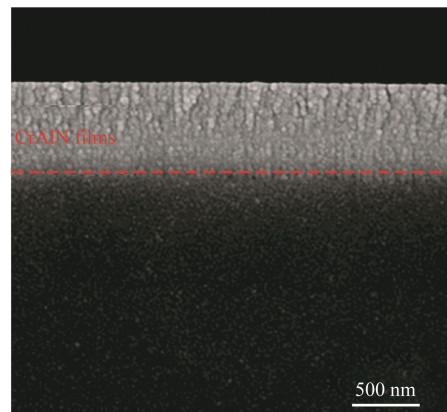


(b) AFM surface morphology and roughness of CrAlN films by (E-MF) HiPIMS

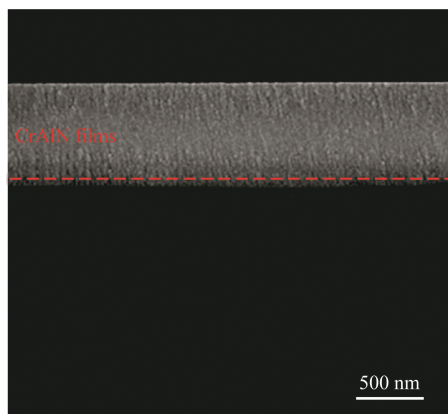
图7 CrAlN 薄膜的表面形貌及表面粗糙度

Fig. 7 Surface morphology and roughness of CrAlN films

图8为 CrAlN 薄膜的 SEM 截面形貌。由图8可见,HiPIMS 和 (E-MF) HiPIMS 两种技术所获得的 CrAlN 薄膜均呈现出无柱状晶生长形貌特征。然而,与 HiPIMS 制备的 CrAlN 薄膜相比,(E-MF) HiPIMS 制备的 CrAlN 薄膜生长结构更加致密、紧凑,晶粒也更加细小、均匀,并且在膜层内部无明显



(a) HiPIMS



(b) (E-MF)HiPIMS

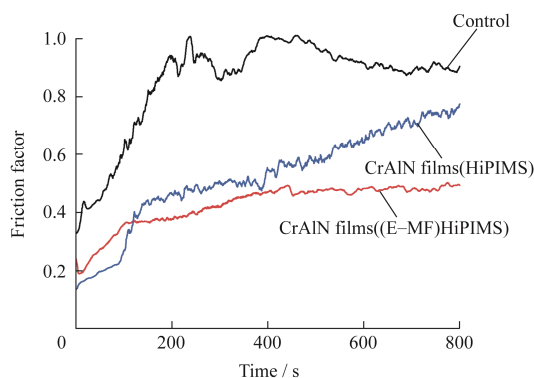
图 8 CrAlN 薄膜的 SEM 截面形貌

Fig. 8 Cross-section morphology of CrAlN films

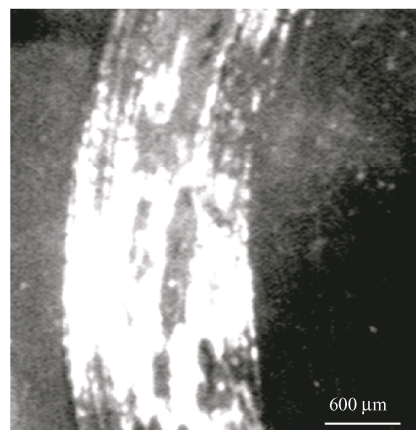
显分层以及孔洞等缺陷。分析认为, CrAlN 薄膜的生长结构形态与基体离子束流中粒子的种类和粒子能量有关。(E-MF)HiPIMS 技术更容易获得高能量密度的靶材粒子, 因此所制备的 CrAlN 薄膜更加密实。此外, (E-MF) HiPIMS 技术在一定程度上改善了常规 HiPIMS 技术沉积速率较低的问题。

2.5 CrAlN 薄膜的摩擦磨损性能

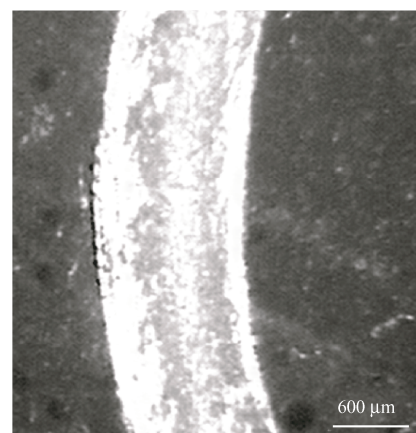
图 9 为 CrAlN 薄膜的摩擦磨损曲线及磨痕形貌。由图 9a 可见, 与基体相比, 镀 CrAlN 薄膜的样品的摩擦因数显著降低。此外, 基体经摩擦磨损后, 呈现出亮白色图像特征 (图 9b), 并且磨痕宽度较宽, 这表明不锈钢基体表面已发生严重的剥离及破损, 耐磨性能较差; 镀 CrAlN 薄膜的样品 (HiPIMS 技术, 图 9c) 经磨损后的磨痕宽度较小; 而 (E-MF) HiPIMS 技术制备的 CrAlN 薄膜的样品 (图 9d) 不仅磨痕宽度较窄而且磨损处仅为间断型的表面破坏, 表现为最为优异的抗摩擦磨损性能。分析认为, 由于 (E-MF) HiPIMS 技术的 CrAl 靶放电脉冲电流较大, 基体离子束流能量密度更高, 所制备的 CrAlN 薄膜更加光滑、平整、致密, 这有利于获得高硬耐磨硬质薄膜 / 涂层^[17]。



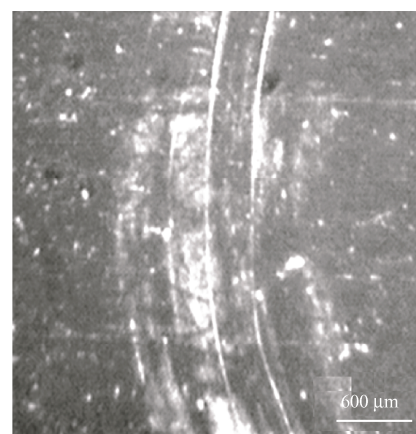
(a) Tribological curve of different samples



(b) Wear track micrographs of substrate



(c) Wear track micrographs of CrAlN films by HiPIMS



(d) Wear track micrographs of CrAlN films by (E-MF) HiPIMS

图 9 样品的摩擦因数及磨痕形貌

Fig. 9 Tribological curve of different samples and Wear track micrographs of different samples

2.6 CrAlN 薄膜的耐腐蚀性能

图 10 给出 CrAlN 薄膜样品的极化曲线, 由图 10 可见, 与基体相比, 镀 CrAlN 薄膜后的样品腐蚀电位有较大提高, 腐蚀电流大幅减小, 表现出良好的耐腐蚀性能。分析认为, 样品耐腐蚀性能的提高与 CrAlN 薄膜的致密度有关^[18], 该结果与图 8

的结果一致。相比常规 HiPIMS 技术, (E-MF)HiPIMS 技术制备的 CrAlN 薄膜具有更加致密紧实的内部结构组织, 有利于获得更加优异的耐腐蚀性能。

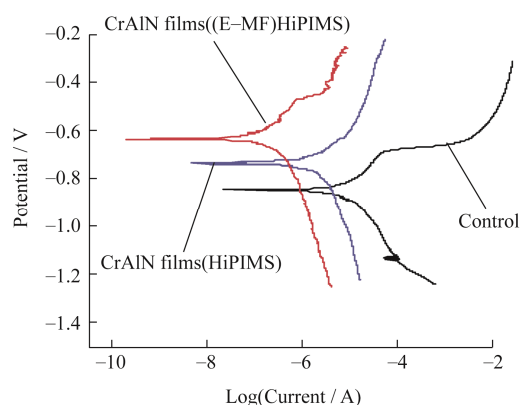


图 10 样品的极化曲线

Fig. 10 Polarization curves of different samples

3 结论

以 CrAl 靶作为电-磁场协同增强 HiPIMS 放电技术的阴极靶, 考察不同工作气压、不同氮氩流量比以及不同复合直流下的放电特性与规律, 并在最优放电工艺条件下成功制备 CrAlN 薄膜。与常规 HiPIMS 技术对比研究了 CrAlN 薄膜的生长形貌特征、摩擦磨损性能以及耐腐蚀性能。主要结论如下:

(1) 不同工作气压下 CrAl 靶电流波形随脉冲电压的变化规律一致。随脉冲电压的增大, 靶脉冲峰值电流线性增加; 随着氮气流量的增大, 靶脉冲峰值电流线性增加; 随着复合直流的增大, 靶电流上升的速度不变, 但是靶脉冲峰值电流出现明显的降低。

(2) 与常规 HiPIMS 技术相比, (E-MF)HiPIMS 技术制备的 CrAlN 薄膜表面更加光滑、致密、平整, 表面无明显凹坑与突起等缺陷, 其表面粗糙度仅为 4.123 nm。CrAlN 薄膜生长结构更加致密、紧凑, 晶粒也更加细小、均匀。

(3) 与基体相比, 镀 CrAlN 薄膜样品的摩擦因数显著降低, (E-MF) HiPIMS 技术制备的 CrAlN 薄膜样品磨损后的磨痕宽度小、磨损处仅出现间断型的表面磨损, 抗摩擦磨损性能最为优异。同时, 样品的腐蚀电位较大提高同时腐蚀电流大幅减小, 表现出了良好的耐腐蚀性能。

参 考 文 献

- [1] 宋肖肖, 李柯, 赵婕宇, 等. 磁控溅射 Cr / CrN 和 Cr / CrN / CrAlN 涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国表面工程, 2020, 33(1): 63-72.
- [2] SONG Xiaoxiao, LI Ke, ZHAO Jieyu, et al. High temperature oxidation resistance of magnetron sputtered Cr / CrN and Cr / CrN / CrAlN coating[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(1): 63-72. (in Chinese)
- [3] BARSHILIA H C, SELVAKUMAR N, DEEPTHI B, et al. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2193-2201.
- [4] 陈亚军, 黄彦, 胡隆伟, 等. 中频-直流磁控溅射铝涂层微米压入特性及低温循环性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 83-92.
- [5] CHEN Yajun, HUANG Yan, HU Longwei, et al. Micro-indentation and low-temperature cyclic properties of aluminum coating prepared by MF-DC magnetron sputtering[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 83-92. (in Chinese)
- [6] 石永敬, 龙思远, 王杰, 等. 直流磁控溅射研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(1): 65-69.
- [7] SHI Yongjing, LONG Siyuan, WANG Jie, et al. Research advance of direct current magnetron sputtering[J]. China Materials Reports, 2008, 22(1): 65-69. (in Chinese)
- [8] KOUZNETSOV V, MACAK K, SCHNEIDER J M, et al. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 122(2-3): 290-293.
- [9] DING J C, ZOU C W, WANG Q M, et al. Effect of bias voltage on the microstructure and hardness of Ti-Si-N Films deposited by using high-power impulse magnetron sputtering[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2016, 68(2): 351-356.
- [10] CLAUDIO B, SILVIA M D, ELISA P, et al. Thermal shock and oxidation behavior of HiPIMS TiAlN coatings grown on Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic alloy[J]. Materials, 2016, 9: 961-1-961-20.
- [11] ANTONIN O, TIRON V, COSTIN C, POPA G, MINEA T M. On the HiPIMS benefits of multi-pulse operating mode[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48: 015202
- [12] LI C W, TIAN X B, GONG C Z, et al. Synergistic enhancement effect between external electric and magnetic fields during high power impulse magnetron sputtering discharge[J]. Vacuum, 2017, 143: 119-128.
- [13] LI C W, TIAN X B, GONG C Z, et al. Electric and magnetic fields synergistically enhancing high power impulse magnetron sputtering deposition of vanadium coatings[J]. Vacuum, 2017, 144: 83-87.
- [14] 李春伟, 田修波, 姜雪松, 等. 高离化率电-磁场协同增强 HiPIMS 高速沉积特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,

- 2021, 53(2): 84-92.
- LI Chunwei, TIAN Xiubo, JIANG Xuesong, et al. High deposition characteristic of (E-MF) HiPIMS at high ionization rate[J]. China Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(2): 84-92.(in Chinese)
- [12] 李春伟, 田修波, 姜雪松, 等. 外部磁场对电-磁场协同增强 HiPIMS 放电及 V 膜沉积与性能的调制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(8): 144-152.
- LI Chunwei, TIAN Xiubo, JIANG Xuesong, et al. Modulation of external magnetic field on (E-MF)HiPIMS discharge, deposition, and properties of vanadium films[J]. China Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(8): 144-152.(in Chinese)
- [13] 田修波, 吴忠振, 石经纬, 等. 高脉冲功率密度复合磁控溅射电源研制及放电特性研究[J]. 真空, 2010, 47(3): 44-47.
- TIAN Xiubo, WU Zhongzhen, SHI Jingwei, et al. Development and discharge behavior of high power density pulse magnetron sputtering system[J]. China Vacuum, 2010, 47(3): 44-47. (in Chinese)
- [14] SARAOKINOS K, ALAMI J, KONSTANTINIDIS S. High power pulsed magnetron sputtering: a review on scientific and engineering state of the art[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(11): 1661-1684.
- [15] EHIASARIAN A P, NEW R, MÜNZ W D, et al. Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas[J]. Vacuum, 2002, 65(2): 147-154.
- [16] 李侃, 董树荣, 王德苗, 等. 射频反应溅射制备 AlN 薄膜的研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1459-1461.
- LI Kan, DONG Shurong, WANG Demiao, et al. Study of preparation of AlN thin films for FBAR application by RF sputtering[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1459-1461. (in Chinese)
- [17] 李春伟, 田修波, 孙百会, 等. 电-磁场协同增强高功率脉冲磁控放电特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(10): 861-868.
- LI Chunwei, TIAN Xiubo, SUN Baihui, et al. Synergistic effect of electric and magnetic fields on ion-current enhancement in high power impulse magnetron sputtering: An experiment study[J]. China Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(10): 861-868. (in Chinese)
- [18] 钟彬, 徐小连, 陈义庆, 等. Cr / CrN 多层膜的结构及腐蚀性能研究[J]. 真空, 2009, 46(5): 22-25.
- ZHONG Bin, XU Xiaolian, CHEN Yiqing, et al. Study on the mirostructure and corrosion behavior of Cr / CrN multilayer thin films[J]. China Vacuum, 2009, 46(5): 22-25. (in Chinese)
-
- 作者简介: 李春伟, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为高功率脉冲磁控溅射技术与功能薄膜。
- E-mail: lcwnefu@126.com