

# 基底偏压对电弧离子镀制备 AlCrVN 涂层微结构及力学性能的影响

田灿鑫<sup>1</sup>, 邹长伟<sup>1</sup>, 王泽松<sup>1</sup>, 项燕雄<sup>1</sup>, 谢伟<sup>1</sup>, 李助军<sup>2</sup>, 刘怡飞<sup>2</sup>

(1. 岭南师范学院, 广东 湛江 524048; 2. 广州铁路职业技术学院, 广州 510430)

**摘要:** **目的** 研究基底偏压对 AlCrVN 涂层微结构及力学性能的影响。**方法** 采用电弧离子镀技术, 使用合金靶 AlCrV, 纯 N<sub>2</sub> 作为引弧介质和氮源, 在不同的基底偏压下制备 AlCrVN 涂层, 对 AlCrVN 涂层的物相结构、微观形貌、硬度、摩擦因数及磨损率进行测试分析, 作为对比制备了 AlCrN 涂层。**结果** AlCrVN 涂层为柱状晶结构, 由面心立方 CrN 为基础的 (CrV)N 置换固溶体相和 Cr<sub>2</sub>N 六方相 2 种晶相组成, 随着基底偏压的增大, 涂层衍射峰强度及位置变化不明显; 涂层表面的大颗粒数量减少, 凹坑增多; 涂层硬度由 50 V 时的 22 GPa 增大到 150 V 时的 24.2 GPa, 200 V 时硬度值减小到 22 GPa; 摩擦因数由 0.42 增大到 0.71; 磨损率由  $6.4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  逐渐增大到  $13.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。**结论** 基底偏压对 AlCrVN 涂层性能影响较大, 低偏压 (50 V) 时, 涂层的摩擦因数、磨损率最低, 耐磨性能最好。含 V 元素的 AlCrVN 涂层的力学和摩擦学性能都优于 AlCrN 涂层。

**关键词:** 阴极电弧离子镀; AlCrVN 涂层; 偏压; 硬度; 耐磨性能

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0181-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.015

## Influence of Substrate Bias Voltage on Structure and Properties of AlCrVN Coatings Deposited by Cathodic Arc Ion Platings

TIAN Can-xin<sup>1</sup>, ZOU Chang-wei<sup>1</sup>, WANG Ze-song<sup>1</sup>, XIANG Yan-xiong<sup>1</sup>,  
XIE Wei<sup>1</sup>, LI Zhu-jun<sup>2</sup>, LIU Yi-fei<sup>2</sup>

(1. Lingnan Normal University, Guangdong Zhanjiang 524048, China;

2. Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 510430, China)

**ABSTRACT:** AlCrN coatings cannot meet the increasing requirements for processing technology. Nano multilayer structure and multiple alloyed methods are effective method to tailor the microstructure and properties of wear resistance coatings. Metal V is easy to oxidize at high temperature to form Magnéli phase V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> with low melting point, which has self-lubrication effect, and reduces the friction coefficient of the coating in the wear. Here, V alloyed AlCrN coatings was deposited to study the

收稿日期: 2022-02-09; 修订日期: 2022-09-05

Received: 2022-02-09; Revised: 2022-09-05

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (2020A1515011451); 岭南师范学院人才项目 (ZL1931); 广东省科技特派员项目 (GDKTP2021007500)

Fund: Natural Science Foundation of Guangdong Province (2020A1515011451); Talent Project of Lingnan Normal University (ZL1931); Guangdong Province Enterprise Science and Technology Commissioner Project (GDKTP2021007500)

作者简介: 田灿鑫 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面涂层技术。

Biography: TIAN Can-xin (1983-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface coatings technology.

引文格式: 田灿鑫, 邹长伟, 王泽松, 等. 基底偏压对电弧离子镀制备 AlCrVN 涂层微结构及力学性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 181-188.

TIAN Can-xin, ZOU Chang-wei, WANG Ze-song, et al. Influence of Substrate Bias Voltage on Structure and Properties of AlCrVN Coatings Deposited by Cathodic Arc Ion Platings[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 181-188.

influence of bias voltage on the properties of AlCrVN.

When V is alloyed with AlCrN, the phase transition could be observed causing a congruent deterioration of the mechanical properties. When the crystal structure of AlCrVN coating remains unchanged, the wear resistance of AlCrVN coating with low V content ( $<7.1\text{at.}\%$ ) is better than that with high V content ( $>7.1\text{at.}\%$ ) while the influence of V content on the hardness of AlCrVN coating is not obvious. The properties of AlCrVN coating are also affected by its own structure which is closely related to the process of the coatings.

Compared with AlCrVN coatings with high V content, the properties of AlCrVN coatings with low V content is more worthy of exploration. Therefore, the AlCrVN coatings were deposited by arc ion plating using low V content alloy target AlCrV in pure  $\text{N}_2$  and under different bias voltage. The influence of bias voltage on structure, hardness, wear was systematically analyzed, and the AlCrN coatings was prepared as a comparison. The composition, structure and morphology of the coating were characterized by X-ray diffractometer, electron energy spectrometer and field emission scanning electron microscope. The mechanical and wear properties of the coatings were tested by hardness tester, friction and wear tester and surface profilometer.

AlCrVN coatings is a columnar crystal structure composed of fcc-CrN based (CrV)N substitutional solid solution phase and hexagonal  $\text{Cr}_2\text{N}$  phase. With the increase of bias voltage, the content of N and Cr in AlCrVN coatings increases slightly, the content of Al decreases slightly, and the content of V does not change significantly. The crystalline phase structure and grain size of AlCrVN coatings do not change obviously, and the intensity and position of diffraction peak do not change obviously. The number of large particles on the surface of AlCrVN coatings decreases while the number of pits increases. The hardness of AlCrVN coatings increases from 22 GPa at 50 V to 24.2 GPa at 150 V, and decreases to 22 GPa at 200 V. The friction coefficient of AlCrVN coating increases from 0.42 to 0.71 for grinding  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball at room temperature with the increase of bias voltage. The wear rate increases from  $6.4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  to  $13.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , and the wear mechanism of AlCrVN coatings gradually changes from adhesion wear with a small amount of abrasive wear to abrasion wear with a small amount of adhesion wear. At low bias voltage (50 V), the friction coefficient and wear rate of AlCrVN coating are the lowest and wear resistance is the best. The friction coefficient and wear rate of AlCrVN coating with low V content (3%) are lower than those of AlCrN coating at room temperature.

**KEY WORDS:** cathodic arc ion plating; AlCrVN coatings; bias voltage; hardness; wear resistance

AlCrN 涂层具有良好的耐温、抗氧化性能,在刀具模具领域得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。近年来,机械切削加工技术不断提升,特别是高速干切削技术的发展,对 AlCrN 涂层提出了更高的要求,常规的 AlCrN 涂层很难满足不断提升的技术需求<sup>[3-5]</sup>。研究表明,采用纳米多层结构、多元合金化等方法,通过涂层材料成分、结构的设计、调控,可有效提高涂层材料的摩擦学性能<sup>[6-7]</sup>。金属 V 在高温下容易氧化生成熔点较低的 Magnéli 相  $\text{V}_2\text{O}_5$  而具有自润滑作用,使得含 V 涂层在摩擦过程中的摩擦因数降低<sup>[8]</sup>。将 V 引入 TiAlN 涂层中<sup>[9]</sup>,通过纳米多层结构如 TiAlN/VN 或多元合金化 TiAlVN 薄膜,使涂层摩擦因数由室温时的 0.6~0.8 降低到 700 °C 时的 0.2~0.3。VN 与 CrN<sup>[10]</sup>、AlN<sup>[11]</sup> 分别形成纳米多层结构,也可有效降低涂层的摩擦因数。相似结论也在含 V 的纳米多层或多元合金化 AlCrVN 涂层中发现<sup>[5,12-16]</sup>,在涂层服役过程中生成的 V 的氧化相起到了降低摩擦的作用<sup>[15]</sup>。

富含 VN 的 VN/AlCrN 多层涂层刀具切削 X30Cr13 不锈钢,通过 VN 的自润滑和 AlCrN 的抗磨特性的协同作用,使涂层刀具切削温度、切削力明显低于 AlCrN 涂层,刀具的侧面磨损轻微<sup>[5]</sup>。随着调制

周期的降低,AlCrN/VN 纳米多层涂层硬度逐渐增大,摩擦因数逐渐降低,当温度超过 600 °C 时,VN 氧化明显增强<sup>[16]</sup>。对于合金化涂层,在 AlCrVN 涂层晶体结构不变的情况下,V 含量(原子数分数 7.1%~30%)与 AlCrVN 涂层的摩擦学性能之间没有明显的线性关联<sup>[14,17]</sup>。在 AlCrVN 涂层晶体结构变化的情况下,AlCrVN 涂层的硬度明显降低,室温下的摩擦因数没有明显变化,700 °C 下涂层摩擦因数明显降低<sup>[18]</sup>。随着偏压的升高,高 V 含量(原子数分数 28%)的 AlCrVN 涂层中 CrN 面心立方相逐渐增多,AlN 六方纤锌矿相逐渐减小,AlCrVN 涂层的摩擦因数逐渐变大,涂层的耐磨性能与其结构致密性密切相关<sup>[12]</sup>。综上所述,AlCrVN 涂层的性能受自身结构的影响更显著,而 AlCrVN 涂层的结构不但和 V 含量有关<sup>[14,19]</sup>,和涂层的制备工艺参数更是密切相关<sup>[12]</sup>。

AlCrVN 涂层多采用纯金属 V 与合金 AlCr<sup>[5,16-17]</sup> 或高 V 含量的合金  $\text{Al}_{0.7}\text{Cr}_{0.05}\text{V}_{0.25}$ <sup>[12,20]</sup> 靶材制备,而 AlCrVN 涂层的性能与高 V 含量之间并没有强相关性<sup>[12,14,17]</sup>,低 V 含量的 AlCrVN 涂层性能与其制备工艺参数之间的规律研究还相对较少,制备低 V 含量的 AlCrVN 涂层,系统研究制备工艺参数,特别是基

底偏压对 AlCrVN 涂层成分、结构及性能的影响规律, 探索低温下含 V 涂层的自润滑特性对 AlCrVN 涂层性能调控及应用具有重要的现实意义。本文使用低 V 含量合金靶  $\text{Al}_{0.6}\text{Cr}_{0.3}\text{V}_{0.1}$ , 采用电弧离子镀技术, 在低沉积  $\text{N}_2$  气压 1 Pa, 不同偏压下制备 AlCrVN 涂层, 系统研究偏压与 AlCrVN 涂层结构、力学和摩擦学性能之间关系, 为 CrAlVN 涂层工业化应用提供科学数据。

## 1 试验

### 1.1 涂层制备

使用阳极层离子源辅助电弧离子镀系统, 在 YT15 硬质合金基底上沉积 AlCrVN 涂层, 靶材选用 AlCrV 合金靶 (原子比 6 : 3 : 1)。为了提高 AlCrVN 涂层在基底上的附着力, 在沉积 AlCrVN 层前, 使用纯 Cr 靶, 先沉积 Cr、CrN 过渡层, 具体的制备工艺参数如表 1 所示。作为对比又沉积了 AlCrN 涂层。

表 1 AlCrVN 纳米多层涂层沉积参数  
Tab.1 Deposition parameters of the AlCrVN coatings

Items	Parameters
Deposition pressure/Pa	1.0
Substrate voltage/V	50, 100, 150, 200
Substrate temperature/℃	350
Target current/A	70
Rotation speed/(rad·min <sup>-1</sup> )	1
Target material	Cr, AlCrV
Reaction gas	N <sub>2</sub>
Deposition time/min	120

### 1.2 结构表征及性能测试

采用 X 射线衍射仪 (Smartlab X), 利用掠入射模式测定涂层晶体结构。采用 Nova Nano 430 场发射扫描电镜分别观察涂层的表面、截面及磨损形貌特征。采用 XSAM800 型电子能谱仪 (XPS, Mg K $\alpha$  1 253.6 eV) 和 EDS (EDAX genesis 7000) 能谱仪测定涂层的化学组分。采用 Csmmtx-NHT2 检测涂层的硬度, 使用 Berkovich 压头进行测试, 压入深度不超过样品厚度的 1/10, 载荷 10 mN, 保压时间 5 s, 每个样品测 5 个点求平均值。室温下使用 UMT-Tribo Lab 球盘旋转摩擦磨损试验机测试涂层的摩擦性能, 为了得到明显的磨痕, 便于测量磨损率, 使用 15 N 的载荷, 采用直径 6 mm 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷球作为对磨材料, 圆形磨痕直径为 4 mm, 转速为 200 r/min, 对磨时间为 30 min。采用 TALYSURF CLI 1000 表面轮廓仪测量磨痕截面深度, 并计算其磨损率, 每个磨损轨道取 4 个截面测量, 求平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层成分和结构分析

图 1 为在不同偏压下沉积的 AlCrVN 涂层中各元素含量的变化曲线。元素含量值是采用 EDS 在样品表面随机选取多个不同点测试, 求平均值得到。由图可见, 随着偏压的增加, AlCrVN 涂层中元素 Al、Cr、N 含量有小幅变化, V 元素原子数分数基本保持在 3%。一方面, 随着偏压的增加, 到达基底表面的膜材粒子越多, 致使涂层中的 N 元素含量增加<sup>[21]</sup>。另一方面, 基底偏压具有反溅射效应, 在一定的入射粒子能量下, 溅射产额相近, 溅射阈值较小的元素 Al 反溅射效应明显, 溅射阈值较大的元素 Cr、V 反溅射效应不明显<sup>[22]</sup>。

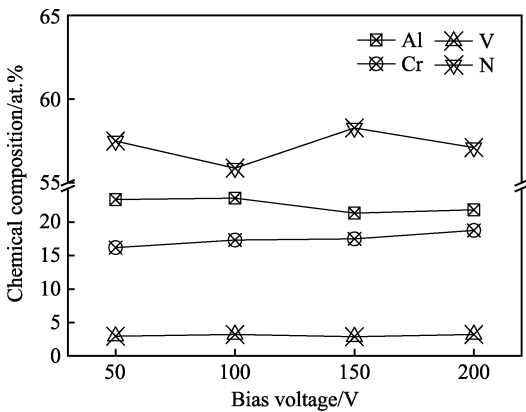


图 1 不同基体偏压下沉积的 AlCrVN 涂层的化学成分

Fig.1 Chemical composition of the AlCrVN coatings deposited at different bias voltages

图 2 为 AlCrN 与不同偏压下制备的 AlCrVN 涂层的 XRD 谱图 and 对应涂层的晶粒尺寸。不同偏压下沉积的 AlCrVN 涂层均具有 4 个衍射峰, 对照衍射卡片 35-0803, 42.6°处为六方相  $\text{Cr}_2\text{N}$  (111) 衍射峰。对照衍射卡片 65-2899 和 65-4307, 并结合 XRD 和 XPS 测试结果分析可知, 37.6°、43.8°、63.6°处的衍射峰是以面心立方 CrN 为基础的 V 置换 Cr 形成的 (CrV)N 置换固溶体的衍射峰。随着偏压的增加, AlCrVN 涂层衍射峰位置和强度变化不明显。采用谢乐公式计算膜层中的晶粒尺寸, AlCrVN 涂层晶粒尺寸明显小于 AlCrN 涂层晶粒尺寸, V 元素的加入使涂层晶粒得到细化。

对不同偏压下制备的 AlCrVN 涂层进行 XPS 检测, 经 XPSPEAK 拟合后的图谱见图 3。图 3a 为 Al 2p 的 XPS 图谱, 73.4 eV 峰值对应于 AlN 相的结合能, 74.3 eV 为 Al-O 相结合能<sup>[13]</sup>。图 3b 为 Cr 2p 的 XPS 图谱, 575.8、577、577.8 eV 分别对应 Cr-N、 $\text{Cr}_2\text{N}$  和 Cr-O 相结合能, 574.5 eV 对应纯金属 Cr<sup>[23]</sup>, 随着偏压的增大, 金属 Cr 的拟合峰强度增强。图 3c 为 V 2p

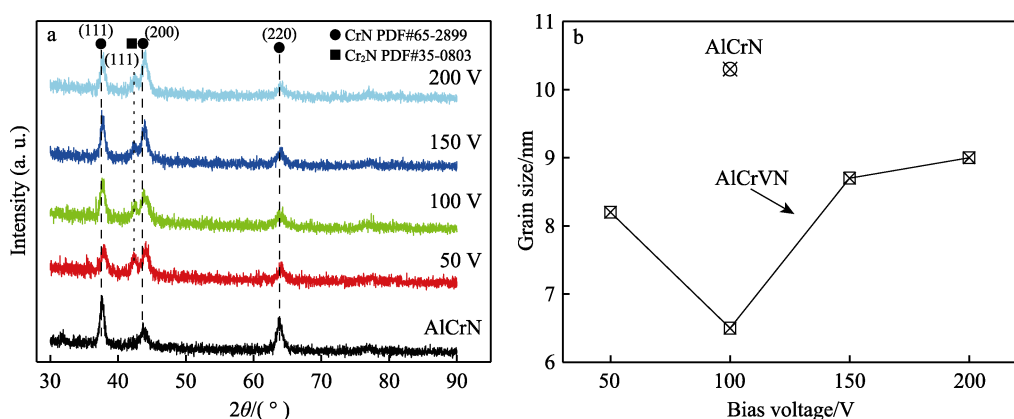


图2 AlCrN与不同偏压下制备的AlCrVN涂层的XRD谱图(a)和晶粒尺寸(b)

Fig.2 The XRD spectra (a) and grain size (b) of AlCrN coatings and AlCrVN coatings deposited at different bias voltage

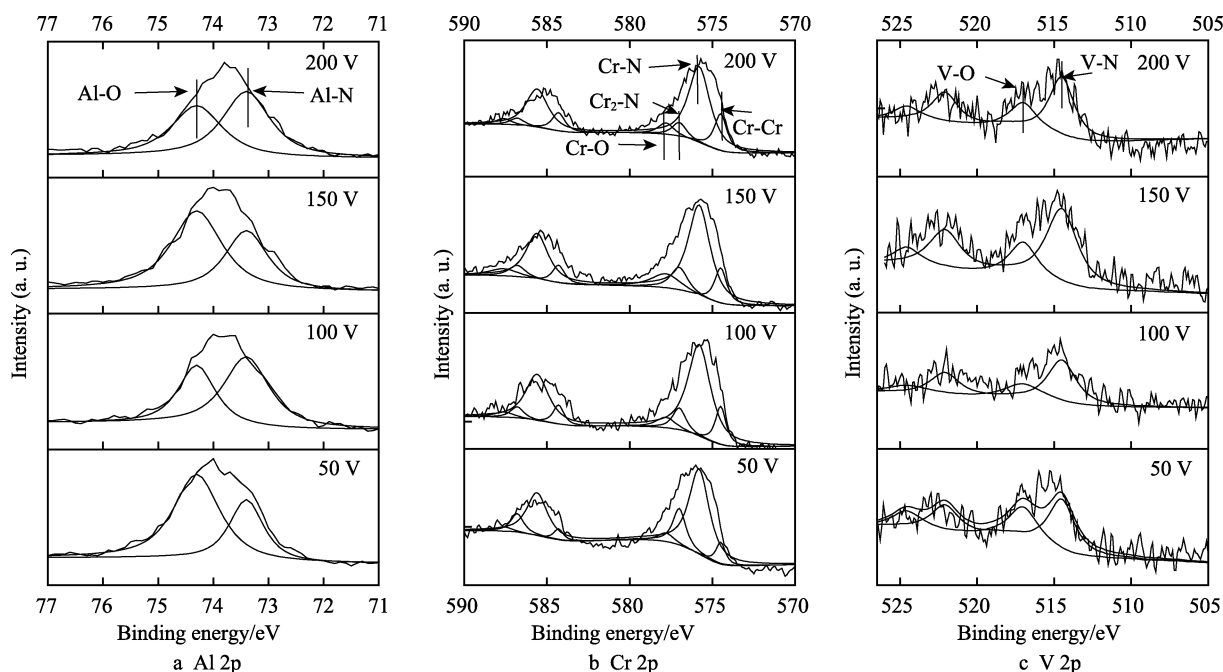


图3 不同偏压下制备的AlCrVN涂层XPS图谱

Fig.3 XPS spectra of (a) Al 2p, (b) Cr 2p and (c) V 2p for AlCrVN coatings deposited at different bias voltage

的XPS图谱,结合能的峰值位于514.5 eV和517 eV,分别对应V-N和V-O相<sup>[24-25]</sup>。结合XRD分析结果可以判定,AlCrVN涂层中的Al、Cr和V以氮化物相的形式存在。氧化物相可能为涂层放置及测试过程中接触空气中氧气而部分被氧化所致。

图4为不同偏压下制备的AlCrVN涂层的表面形貌。随着偏压的增加,涂层表面大颗粒数量减少,凹坑数量及尺寸增大。随着偏压增大,荷能粒子轰击作用增强,对膜层中大颗粒数量有一定的抑制作用。此外,偏压影响基底附近等离子体壳层,等离子体壳层的变化对大颗粒也有一定的影响。凹坑为附着在涂层表面不牢固的大颗粒被刻蚀剥落所致<sup>[26-27]</sup>。

对150 V偏压下制备的AlCrVN涂层截面进行了TEM分析表征。如图5a所示,AlCrVN涂层为柱状晶生长,柱状晶直径为150~300 nm,选区电子衍射图显示该涂层具有明显的(111)、(200)、(200)和(311)衍射环,与XRD测试结果吻合。为了清晰揭示AlCrVN涂层的微观晶体结构,对涂层进行了高分辨率TEM表征,如图6所示。为了证实涂层中的晶体结构,对高分辨图不同区域进行了傅里叶变换和反傅里叶变换,并对晶格间距进行了标定。分析可知,A区域晶面间距为0.237 nm,对应立方晶相的(111)晶面,C区域晶面间距为0.205 nm,对应立方晶相的(200)晶面,B区域为缺陷较多的微晶区。



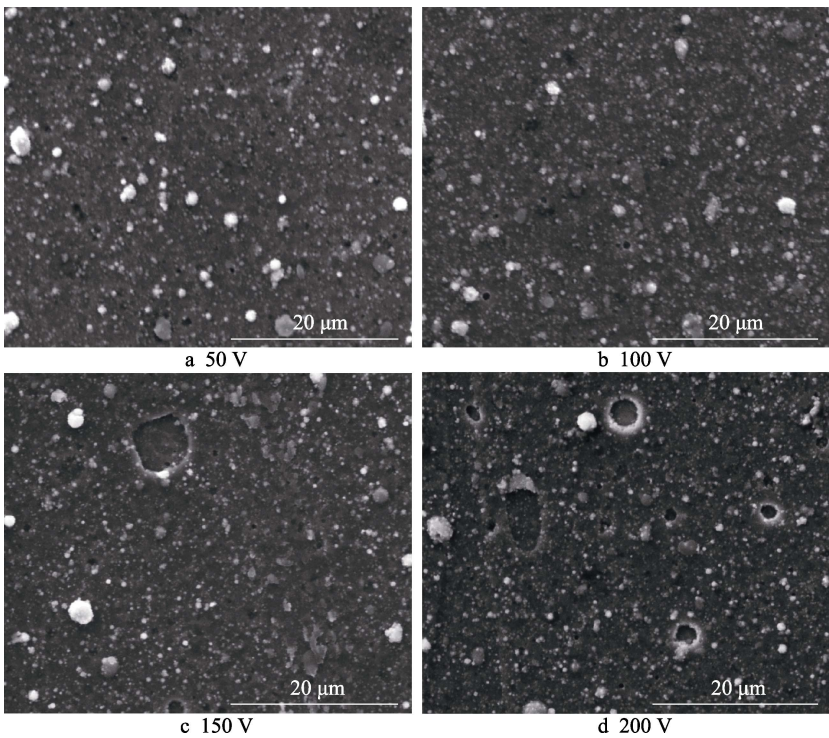


图 4 不同偏压下 CrAlVN 涂层的表面形貌  
Fig.4 Surface morphologies of the AlCrVN coatings deposited at different bias voltage

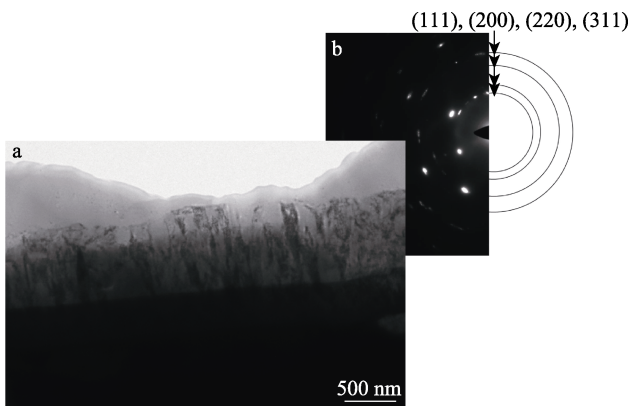


图 5 150 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层截面  
TEM 图 (a) 及选区电子衍射图 (b)  
Fig.5 The cross-sectional TEM images (a) and the  
selected area electron diffraction patterns  
(b) of the AlCrVN coatings deposited at 150 V

2.2 涂层硬度与摩擦磨损性能

图 7 为不同偏压下沉积的 AlCrVN 涂层硬度的变化曲线, 各偏压下制备的 AlCrVN 涂层硬度均大于 AlCrN 涂层硬度 21 GPa。分析图 2、图 3 可知, V 掺杂 AlCrN 制备的 AlCrVN 涂层中生成 (CrV)N 置换固溶体相, 并细化了晶粒, 是 AlCrVN 涂层硬度高于 AlCrN 涂层硬度的主要原因。随着基底偏压由 50 V 增大到 150 V, AlCrVN 涂层硬度由 22 GPa 增大到 24.2 GPa, 随着基底偏压进一步增大到 200 V, AlCrVN 涂层硬度减小到 22 GPa, 涂层硬度呈现先增大后减小的趋势。一方面, 随着偏压的增大, 膜材粒子获得的能量增加, 使得涂层的结构更为致密, 有利于硬度的增大。当偏压增大至 200 V 时, 由于离子能量过大, 轰击作用过强, 使涂层表面出现更多凹坑、

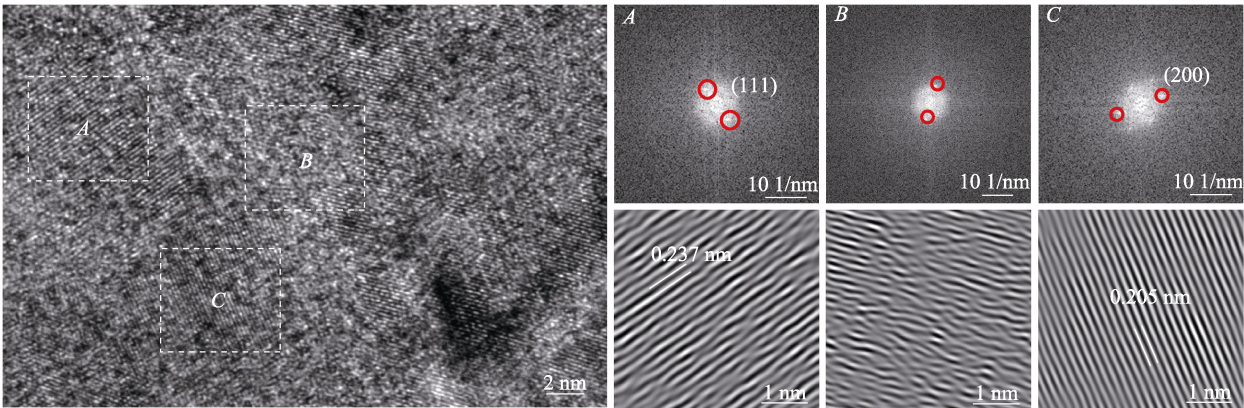


图 6 150 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层的高分辨 TEM 图  
Fig.6 The high-resolution micrographs cross-sectional TEM images of the AlCrVN coatings deposited at 150 V

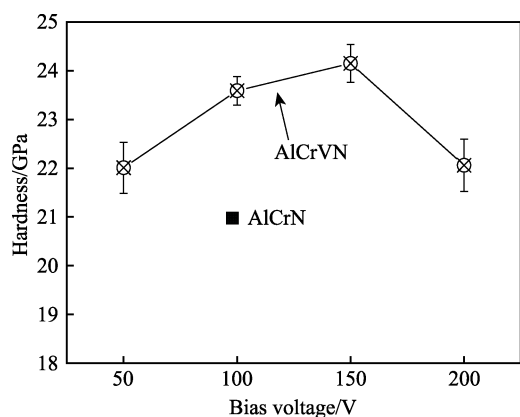


图7 不同偏压下制备的 AlCrVN 涂层硬度  
Fig.7 The hardness of AlCrVN coatings deposited at different bias voltage

缺陷(如图4),涂层致密性降低,导致硬度降低<sup>[28]</sup>。另一方面,过强的轰击作用使基底与涂层升温,可能产生一定程度的再结晶(如图2b所示,200 V偏压制备的 AlCrVN 涂层晶粒尺寸增大),使得涂层硬度降低<sup>[3,29]</sup>。

图8为 AlCrN 涂层和不同偏压下沉积的 AlCrVN 涂层的摩擦因数随磨损时间变化曲线。在低偏压(50~150 V)下制备的 AlCrVN 涂层摩擦因数低于 AlCrN 涂层。随着偏压的增大, AlCrVN 涂层摩擦因数逐渐增大,涂层摩擦因数跟涂层硬度有关,硬度高低影响涂层表面凹凸体变形和断裂所需的力,此力是摩擦力的主要来源<sup>[30]</sup>。50 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层摩擦因数最低,随磨损时间超过 1 000 s,摩擦因数波动减弱,趋于平稳。100、150、200 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层在整个磨损过程中摩擦因数保持较大的波动。插图是磨合期 AlCrN 和 AlCrVN 涂层的摩擦因数, AlCrN 涂层磨合期较长(400 s), AlCrVN 涂层磨合期变短(<200 s)。50 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层磨合时间为 200 s 左右,随沉积偏压增

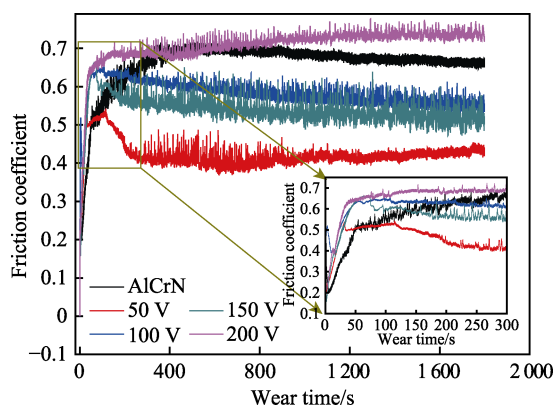


图8 AlCrN 涂层和不同偏压下制备的 AlCrVN 涂层的摩擦因数

Fig.8 Friction coefficient of AlCrN coatings and AlCrVN coatings deposited at different bias voltage

大到 150 V,磨合时间变短,为 100 s 左右,200 V 偏压时为 50 s 左右。图9是 AlCrN 涂层和 AlCrVN 涂层的磨损率,磨损率的变化和涂层摩擦因数变化一致。50 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层的平均摩擦因数和磨损率最低,分别为 0.42 和  $6.4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,与 AlCrN 的摩擦因数(0.66)和磨损率( $11.53 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ )相比, AlCrVN 涂层的减摩耐磨性能明显提升。

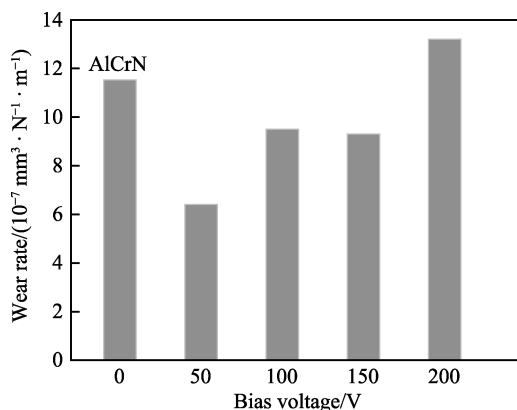


图9 AlCrN 涂层和不同偏压下沉积的 AlCrVN 涂层的磨损率

Fig.9 The wear rate of AlCrN coatings and AlCrVN coatings deposited at different bias voltage

图10为不同偏压下制备的 AlCrVN 涂层磨损形貌。可以看出,低偏压下制备的 AlCrVN 涂层磨损轻微,磨损轨迹边缘没有明显的磨屑堆积,随着偏压的增大,磨损加重,磨损轨迹边缘开始出现磨屑,200 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层磨损轨迹边缘有较多的磨屑堆积,磨屑有利于涂层快速适应摩擦过程,使摩擦的磨合期变短。磨损轨迹上有明显的凹坑和较浅的犁沟,在摩擦过程中大颗粒脱落形成凹坑;大颗粒脱落后混入摩擦副接触面之间被破碎成小的颗粒磨料,在后续摩擦中充当推挤或切削作用,形成犁沟。由图中磨损轨迹区域 O、Si 元素扫描图可以看到,低偏压(50、100 V)下制备的 AlCrVN 涂层磨损区域 O 元素、Si 元素含量较多;150 V 下制备的 AlCrVN 涂层磨损区域 O 元素、Si 元素含量减少;随着偏压增大到 200 V,磨损区域 O 元素、Si 元素含量不明显。O 元素来自磨损过程生成的氧化物, Si 元素是 AlCrVN 涂层与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  球摩擦过程中发生黏附所致。磨损区域较多的 O 元素,意味着 AlCrVN 涂层在磨损过程中生成了较多的氧化相,而 V 元素在涂层磨损中的氧化决定了  $\text{V}_2\text{O}_5$  相的生成,因此也决定了能否形成连续的自润滑减摩层  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,从而起到减摩耐磨的作用<sup>[20,31]</sup>,50 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层磨损轨迹 O 元素最多且分布较分散,意味着  $\text{V}_2\text{O}_5$  相生成较多,所以减摩效果最好,摩擦因数最低。



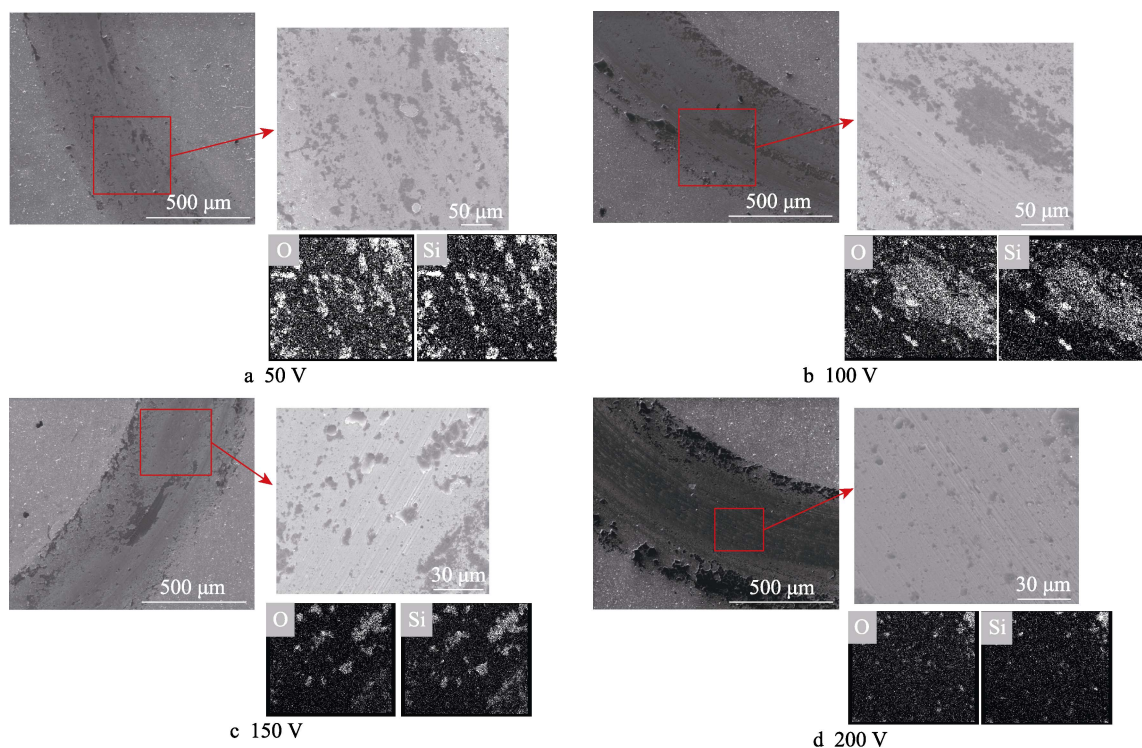


图 10 不同偏压下制备 AlCrVN 涂层磨损形貌及磨损区域 O 和 Si 元素分布

Fig.10 SEM images and element mappings of wear tracks for AlCrVN coatings deposited at different bias voltage

### 3 结论

1) 采用电弧离子镀技术, 以 AlCrV 合金和 Cr 纯金属为靶材, 在不同的基底偏压下制备了 AlCrVN 涂层, 作为对比制备了 AlCrN 涂层。

2) AlCrVN 涂层为柱状晶结构, 包含以面心立方 CrN 为基础的(CrV)N 置换固溶体和 Cr<sub>2</sub>N 六方相 2 种晶相。随着偏压的增大, 涂层表面的大颗粒数量减少, 凹坑、针孔数量增多。

3) 基底偏压 AlCrVN 涂层的硬度和摩擦因数影响显著。50 V 偏压下制备的 AlCrVN 涂层性能最优, 硬度为 22 GPa, 摩擦因数最低 (0.42), 磨损率最低 ( $6.4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ )。相对于 AlCrN 涂层, AlCrVN 涂层有较高的硬度和更好的耐磨性。

#### 参考文献:

- [1] LOMELLO F, SANCHETTE F, SCHUSTER F, et al. Influence of Bias Voltage on Properties of AlCrN Coatings Prepared by Cathodic Arc Deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 224: 77-81.
- [2] LEE S H, KO I H, KIM T Y. Surface Failure Analysis of AlCrN Coating on WC Substrate Subjected to High-Temperature Oxidation in Glass-Molding Machine[J]. Applied Surface Science, 2018, 452: 210-216.
- [3] LAN Rui, WANG Chun-ji, MA Zhi-feng, et al. Effects of Arc Current and Bias Voltage on Properties of AlCrN Coatings by Arc Ion Plating with Large Target[J]. Mate-

rials Research Express, 2019, 6(11): 116457.

- [4] XIAO Bai-jun, ZHANG Teng-fei, GUO Zhu, et al. Mechanical, Oxidation, and Cutting Properties of AlCrN/AlTiSiN Nano-Multilayer Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 433: 128094.
- [5] HOSOKAWA A, SAITO R, UEDA T. Milling Characteristics of VN/AlCrN-Multilayer PVD Coated Tools with Lubricity and Heat Resistance[J]. CIRP Annals, 2020, 69(1): 49-52.
- [6] HARŠÁNI M, GHAFOOR N, CALAMBA K, et al. Adhesive-Deformation Relationships and Mechanical Properties of Nc-AlCrN/a-SiN<sub>x</sub> Hard Coatings Deposited at Different Bias Voltages[J]. Thin Solid Films, 2018, 650: 11-19.
- [7] ZHANG Li, CHEN Yi, FENG Yu-ping, et al. Electrochemical Characterization of AlTiN, AlCrN and AlCrSiWN Coatings[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 53: 68-73.
- [8] REESWINKEL T, MUSIC D, SCHNEIDER J M. Coulomb-Potential-Dependent Decohesion of Magnéli Phases[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 2010, 22(29): 292203.
- [9] MAYRHOFFER P H, HOVSEPIAN P E, MITTERER C, et al. Calorimetric Evidence for Frictional Self-Adaptation of TiAlN/VN Superlattice Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177-178: 341-347.
- [10] QIU Yue-xiu, ZHANG S, LI Bo, et al. Improvement of Tribological Performance of CrN Coating via Multilayering with VN[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 231: 357-363.
- [11] PARK J K, BAIK Y J. Increase of Hardness and Oxi-

- dation Resistance of VN Coating by Nanoscale Multilayered Structurization with AlN[J]. *Materials Letters*, 2008, 62(16): 2528-2530.
- [12] FRANZ R, NEIDHARDT J, KAINDL R, et al. Influence of Phase Transition on the Tribological Performance of Arc-Evaporated AlCrVN Hard Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203(8): 1101-1105.
- [13] FRANZ R, NEIDHARDT J, SARTORY B, et al. Micro- and Bonding Structure of Arc-Evaporated AlCrVN Hard Coatings[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(18): 6151-6157.
- [14] TILLMANN W, KOKALJ D, STANGIER D, et al. Investigation of the Influence of the Vanadium Content on the High Temperature Tribo-Mechanical Properties of DC Magnetron Sputtered AlCrVN Thin Films[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 328: 172-181.
- [15] WANG Rui, LI Hai qing, LI Ren suo, et al. Thermostability, Oxidation, and High-Temperature Tribological Properties of Nano-Multilayered AlCrSiN/VN Coatings[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(9): 11915-11923.
- [16] 万强, 罗畅, 魏民, 等. AlCrN/VN 多层涂层力学性能及其热稳定性[J]. *表面技术*, 2019, 48(4): 130-136.
- WAN Qiang, LUO Chang, WEI Min, et al. Mechanical Properties and Thermal Stability of AlCrN/VN Multilayer Coatings[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(4): 130-136.
- [17] DELGADO A, GARCIA-ZARCO O, RESTREPO J, et al. AlCrVN Coatings Deposited by Cathodic Arc: Friction and Wear Properties Evaluated Using Reciprocating Sliding Test[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 442: 128140.
- [18] FRANZ R, NEIDHARDT J, SARTORY B, et al. High-Temperature Low-Friction Properties of Vanadium-Alloyed AlCrN Coatings[J]. *Tribology Letters*, 2006, 23(2): 101-107.
- [19] 金玉花, 程融, 柴利强, 等. 反应磁控溅射制备 CrN 涂层的热稳定性[J]. *表面技术*, 2022, 51(12): 82-90, 108.
- JIN Yu-hua, CHENG Rong, CHAI Li-qiang, et al. Thermal Stability of CrN Coatings Prepared by Reactive Magnetron Sputtering[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(12): 82-90, 108.
- [20] FRANZ R, SCHNÖLLER J, HUTTER H, et al. Oxidation and Diffusion Study on AlCrVN Hard Coatings Using Oxygen Isotopes  $^{16}\text{O}$  and  $^{18}\text{O}$ [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(12): 3974-3981.
- [21] 张姣姣, 王铁钢, 阎兵, 等. 直流基体偏压对 Al-Cr-Si-N 涂层结构和力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(7): 2232-2239.
- ZHANG Jiao-jiao, WANG Tie-gang, YAN Bing, et al. Influence of DC Bias Voltage on Structure and Performance of the Al-Cr-Si-N Coatings Prepared by Arc Ion Plating Technique[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(7): 2232-2239.
- [22] 张以忱. 真空镀膜技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 91-93.
- ZHANG Yi-chen. *Vacuum Coating Technology*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 91-93.
- [23] LIU Yan-ming, SHI Wen-bo, TIAN Li, et al. Influence of Modulation Period on Structure and Mechanical Properties of  $\text{WB}_2/\text{CrN}$  Films Deposited by Direct-Current Magnetron Sputtering[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788: 729-738.
- [24] IRAM S, CAI Fei, WANG Jian-ming, et al. Effect of Addition of Mo or V on the Structure and Cutting Performance of AlCrN-Based Coatings[J]. *Coatings*, 2020, 10(3): 298.
- [25] LIU Wei, LI An-qiong, WU Hai-dong, et al. Effects of Bias Voltage on Microstructure, Mechanical Properties, and Wear Mechanism of Novel Quaternary  $(\text{Ti}, \text{Al}, \text{Zr})\text{N}$  Coating on the Surface of Silicon Nitride Ceramic Cutting Tool[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(15): 17693-17697.
- [26] 黄美东, 林国强, 董闯, 等. 偏压对电弧离子镀膜表面形貌的影响机理[J]. *金属学报*, 2003, 39(5): 510-515.
- HUANG Mei-dong, LIN Guo-qiang, DONG Chuang, et al. Mechanism of Effect of Bias on Morphologies of Films Prepared by Arc Ion Plating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(5): 510-515.
- [27] 蔺增, 陈彬, 乔宏, 等. 负偏压对电弧离子镀 CrAlN 涂层组织和性能的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(7): 981-984, 989.
- LIN Zeng, CHEN Bin, QIAO Hong, et al. Influence of Negative Bias Voltage on Microstructure and Properties of CrAlN Coatings by Arc Ion Plating[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(7): 981-984, 989.
- [28] 张晓柠, 陈康敏, 郑陈超, 等. 脉冲偏压对电弧离子镀  $\text{CrN}_x$  薄膜组织结构与性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(5): 73-77.
- ZHANG Xiao-ning, CHEN Kang-min, ZHENG Chen-chao, et al. Effect of Pulsed Bias on Microstructure and Mechanical Properties of  $\text{CrN}_x$  Coatings Deposited by Arc Ion Plating[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(5): 73-77.
- [29] 黄儒明, 代明江, 林松盛, 等. 电弧离子镀 CrN 薄膜的制备及性能研究[J]. *金属热处理*, 2017, 42(10): 164-169.
- HUANG Ru-ming, DAI Ming-jiang, LIN Song-sheng, et al. Preparation and Properties of CrN Film by Arc Ion Plating[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(10): 164-169.
- [30] CAI Fei, CHEN Mo-han, LI Ming-xi, et al. Influence of Negative Bias Voltage on Microstructure and Property of Al-Ti-N Films Deposited by Multi-Arc Ion Plating[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(4): 3774-3783.
- [31] FATEH N, FONTALVO G A, GASSNER G, et al. Influence of High-Temperature Oxide Formation on the Tribological Behaviour of TiN and VN Coatings[J]. *Wear*, 2007, 262(9-10): 1152-1158.