

偏压对 AlTiN 涂层的物性及 车削 GH4169 性能的影响

姜涛

(厦门金鹭特种合金有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要: **目的** 研究不同基体偏压对 AlTiN 涂层性能的影响, 以得到车削高温合金性能最佳的 AlTiN 涂层。**方法** 采用多弧离子镀技术, 在不同偏压下在 WC-Co 硬质合金表面沉积 AlTiN 涂层。通过扫描电子显微镜 (SEM) 及其所附能谱仪 (EDS) 观察涂层的表面和截面形貌以及分析涂层的成分, X 射线衍射仪分析涂层的物相结构及内应力, 用 CSM 纳米硬度计测试涂层的纳米硬度 H 、弹性模量 E 、抗塑性变形因子 H^3/E^{*2} 、显微硬度耗散系数 MDP 等性能指标。对比不同偏压制备的 AlTiN 涂层车削高温合金 GH4169 的切削性能表现, 并分析其切削失效形式, 同时探究涂层物性对月牙洼磨损失效的影响。**结果** 不同偏压制备的 AlTiN 涂层结构致密, 物相均为 NaCl 型面心立方结构, -40 V 偏压制备的涂层以 (200) 方向择优, -120 V 制备的涂层以 (111) 方向择优。不同偏压制备的涂层均为压应力, 其内应力随着偏压的增大而增大。与 -80 V 及 -120 V 制备的涂层相比, -40 V 偏压制备的涂层表现出更低的硬度与更优的韧性。在车削高温合金 GH4169 时, -80 V 偏压制备的涂层抗月牙洼磨损能力最好, -40 V 与 -120 V 的切削性能相当。**结论** 对 AlTiN 涂层而言, -80 V 偏压制备的涂层硬度与应力之间达到平衡, 硬度与应力间的平衡有助于提升涂层的抗月牙洼磨损能力。在车削 GH4169 时, -80 V 偏压制备的 AlTiN 切削性能表现最优。

关键词: AlTiN 涂层; 基体偏压; 纳米硬度; 内应力; 月牙洼磨损; 高温合金; 车削

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)12-0330-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.039

Effect of Bias-voltage on Physical Properties and Cutting GH4169 Performance of TiAlN Coatings

JIANG Tao

(Xiamen Golden Egret Special Alloy Co., Ltd, Xiamen 361021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of different substrate bias-voltage on physical properties of TiAlN coatings, to obtain TiAlN coatings of superior cutting high-temperature alloy performance. TiAlN coatings were deposited on WC-Co cemented carbide substrate by multi-arc ion plating technology under different bias-voltage. The microstructure and composition were observed and analyzed by SEM and EDS. The phase structure and the residual stress were analyzed by XRD, and the nano-hardness (H), indentation modulus (E), factor of plastic deformation resistance (H^3/E^{*2}), microhardness dissipation

收稿日期: 2019-11-20; 修订日期: 2020-03-09

Received: 2019-11-20; Revised: 2020-03-09

作者简介: 姜涛 (1976—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为硬质合金及切削工具。邮箱: jiang.tao@cxtc.com

Biography: JIANG Tao (1976—), Male, Master, Engineer, Research focus: cemented carbide and cutting tools. E-mail: jiang.tao@cxtc.com

引文格式: 姜涛. 偏压对 AlTiN 涂层的物性及车削 GH4169 性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 330-335.

JIANG Tao. Effect of bias-voltage on physical properties and cutting GH4169 performance of TiAlN coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 330-335.

parameter (MDP) were tested by CSM nano-hardness tester. The cutting performance of AlTiN coatings of cutting high-temperature alloy as prepared was compared. Their failure modes of cutting were analyzed. The effect of coating properties on the crater wear failure was explored TiAlN coatings prepared under different bias-voltage showed a dense structure with NaCl face-centered cubic. The coating prepared under -40 V bias-voltage was (200) preferred orientation, while -120 V was (111) preferred orientation. The compressive residual stress of the coatings was increased with the increase of bias-voltage. The coating deposited under -40 V had lower hardness and larger MDP compared with coatings prepared under -80 V and -120 V. In cutting high temperature alloy GH4169, coating prepared under -80 V had stronger crater wear resistance, and showed equivalent performance to coatings prepared under -40 V and -120 V. For TiAlN coating, the balance of hardness and residual stress of coating prepared under -80 V can get excellent crater wear resistance. In cutting TiAlN, TiAlN deposited under -80 V exhibits more excellent cutting performance.

KEY WORDS: AlTiN coatings; substrate bias-voltage; nano-hardness; residual stresses; crater wear; high-temperature alloy; cutting

高温合金能承受复杂应力并在苛刻的环境下服役，目前广泛应用于航空、航天、舰船、动力及石油领域，是火箭发动机和航空发动机的关键材料。镍基高温合金（如 GH4169）是产量最大也是我国使用量最大的高温合金，是最难切削加工的材料之一，其相对加工性仅为 45 钢的 5%~15%^[1]。因此，高温合金切削加工对切削工具材料提出了更高的要求。经研究表明，在刀具表面涂覆涂层是提高切削刀具使用性能的一种有效措施。

PVD AlTiN 涂层因其优异的抗氧化性、化学稳定性、热稳定性和耐磨性，被广泛应用于切削工具上^[2-5]，其切削性能很大程度上取决于沉积过程的工艺参数，如多弧离子镀过程中的基体偏压。吴化等^[6]采用离子镀复合镀膜机，于不同脉冲偏压下，在高速钢表面沉积了 AlTiN 涂层，研究发现，随着脉冲偏压的增大，涂层的硬度增大，涂层内应力先减小后增大。G. Skordaris 等^[7]研究发现，在一定范围内提升涂层的内应力，对涂层的结合力及切削性能是有利的，但当内应力超过一定值后，涂层的脆性增大，同时结合力下降，这使得涂层的切削寿命下降。冯光光等^[8]用多弧离子镀技术，于不同偏压下，在 40Cr 基体上制备了 Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层，研究发现，在一定范围内，随着偏压的增大，离子轰击的能量加大，所沉积的涂层组织更加致密，涂层的硬度及结合力升高，但进一步增大偏压，过高的偏压使涂层晶格产生畸变，同时涂层的反溅射作用加强，涂层表面会产生微孔，因而其硬度与结合力会下降。Gonzalo 等^[9]研究发现，内应力将直接影响 ZrCN 和 TiN 涂层对 AISI 1045 与 AISI 4340 的切削性能，而应力可通过偏压的调整来控制。

因此，基体偏压对涂层的结构和性能均有较大的影响，国内外的研究学者也对此进行了大量的研究，但基体偏压引起的涂层硬度和应力的变化对高温合金切削性能的影响却少有报道。

本文采用电弧离子镀设备（Balzers Oerlikon RCS），在硬质合金基体上制备了三种不同偏压的 AlTiN 涂层，分析了偏压对涂层力学性能及内应力的影响，并研究了其力学性能、内应力与车削 GH4169 切削性能之间的关系。

1 试验

1.1 样品制备

采用传统粉末冶金法制备 ISO 标准的 CNMG 120408-EF（12.9 mm×12.9 mm×4.76 mm）型号基体，试验所用 WC 和 Co 粉是厦门金鹭特种合金有限公司生产的，基体的化学成分及主要的力学性能见表 1。

本实验采用 Balazers 的 Oerlicon RCS 电弧离子镀设备制备 AlTiN 涂层，实验所用靶材为 6 个圆型 φ160 mm×12 mm 的 Ti_{0.33}Al_{0.67} 合金靶。基体经过超声清洗和 Al₂O₃ 喷砂之后，后刀面平行于靶材装进涂层炉反应腔，刀片距离靶材表面 220 mm。抽真空至 10⁻² Pa，加热至 480 ℃，通入 Ar 气，在-200 V 脉冲偏压下对基体进行 40 min 的离子轰击，然后在基体上沉积 AlTiN 涂层。沉积时通入高纯氮气至气压 3.5 Pa，靶材弧流为 200 A，沉积温度为 480 ℃，基体以 1.5 r/min 的转速转动。采用的基体偏压分别为-40、-80、-120 V，沉积时间为 120 min。

表 1 基体化学成分及主要力学性能
Tab.1 Chemical composition and main mechanical properties of substrate

ISO Code	w _{WC} /%	w _{Co} /%	WC Grain size/μm	HV30/(kg·mm ⁻²)	H _c /Oe	M _s /(A·m ² ·kg ⁻¹)	TRS/MPa
K20	90	10	1.03	1650	257	8.7	4238

1.2 涂层形貌、物相及内应力

涂层的形貌由日本日立 S-3700N 型扫描电子显微镜观察,其分辨率为 3.5 nm。涂层的成分由美国阿美特克 APOLLO X 型能谱仪分析。涂层的物相组成由 X'pert Pro 型 X 射线衍射仪测试,测试条件:Co 靶 $K\alpha_1$ 辐射 ($\lambda=0.179\ 03\ \text{nm}$),加速电压为 40 kV,工作电流为 40 mA,入射角为 3° ,扫描步长为 0.03° ,扫描范围为 $20^\circ\sim 120^\circ$ 。涂层的内应力由 Bruker 公司 D8 DISCOVER 设备测试,选定 X 射线衍射法中的 $\sin^2\psi$ 法进行涂层内应力检测。测试条件:Cu 靶 $K\alpha_1$ 辐射 ($\lambda=0.228\ 97\ \text{nm}$),加速电压为 40 kV,工作电流为 40 mA,入射角为 1° ,扫描步长为 0.1° ,每步停留时间 5 s,扫描范围为 $28^\circ\sim 138^\circ$ 。

1.3 涂层性能测试

采用纳米硬度计 (CSM Nanoindenter NHT) 测试涂层的纳米硬度和弹性模量,所用压头为四棱锥金刚石维氏压头,面夹角 136° 。通过记录测试过程中压入深度随载荷的变化,得到加载卸载曲线,用 Oliver-Pharr 模型计算出涂层的硬度、弹性模量。测试时,为了消除基体效应,压入深度控制在涂层厚度的 $10\%\sim 15\%$ ^[2],最大加载力为 30 mN,加载速率为 80 mN/min,加载长度为 5 mm,在最大加载力下保持 5 s,每个样品压入 25 个点,取平均值为最终测量结果。

用 CNMG120408-EF 型号的涂层硬质合金刀片进行车削性能测试,工件材料为镍基高温合金 GH4169 (200 mm \times 500 mm, 45HRC)。切削过程所用冷却液为 8% 的马斯特 E805,其切削参数为: $v_c=$

90 m/min, $f=0.3\ \text{mm/r}$, $a_p=0.5\ \text{mm}$ 。车削过程中,每隔 2 min 测量一次刀片后刀面的磨损量,当磨损量超过 0.3 mm 或崩刃时,认为刀片失效。

2 结果与讨论

2.1 涂层物性

三种偏压制备的 AlTiN 涂层的表面形貌如图 1 所示。可以看出, $-40\ \text{V}$ 和 $-80\ \text{V}$ 制备的涂层表面形貌没有明显差异,表面平整,大颗粒很少, $-120\ \text{V}$ 涂层表面的大颗粒更少。偏压越大,荷能粒子的轰击能量越高,高的轰击能量使涂层的反溅射现象增强,涂层表面沉积的吸附力较低的大颗粒在反溅作用下被击碎或者溅射掉,因此涂层表面颗粒较为细小。

不同偏压制备的 AlTiN 涂层的断面形貌如图 2 所示。可以看出,不同偏压下涂层结构致密,且均为细晶。随偏压的增加,涂层的厚度略有减少,计算出的沉积速率见表 2。可见偏压增加导致的反溅射增强使涂层的沉积速率下降。

对不同偏压制备的 AlTiN 涂层的断面进行了 EDS 成分分析,结果见表 3。可以看出,不同偏压制备的 AlTiN 涂层成分差异不大,且涂层与靶材中的 $a_{\text{Al}}:a_{\text{Ti}}$ 偏差较小。随着偏压的增大,涂层中 $a_{\text{Al}}:a_{\text{Ti}}$ 略微降低,反溅射效应增大。由于 Al 元素的反溅射率大于 Ti 元素,因此涂层中 $a_{\text{Al}}:a_{\text{Ti}}$ 降低。

不同偏压下制备的 AlTiN 涂层的 XRD 图谱如图 3 所示,可见涂层的 XRD 衍射结构与 TiN 结构一致,为 NaCl 型面心立方结构。随着偏压的增大, (200) 衍射强度先减小、后基本不变, (111) 衍射强度逐渐增大。

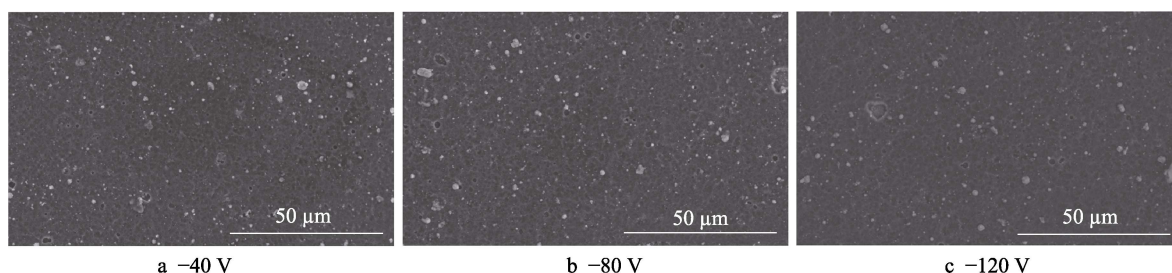


图 1 不同偏压 AlTiN 涂层表面形貌

Fig.1 SEM surface morphology of AlTiN coatings under different bias-voltage

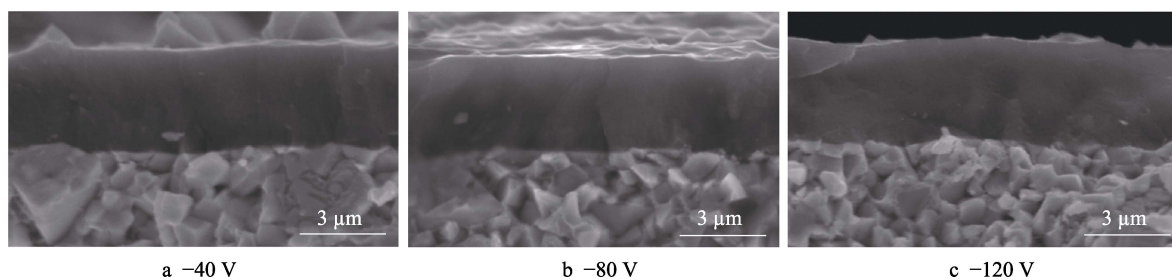


图 2 不同偏压 AlTiN 涂层断面形貌

Fig.2 SEM cross-section morphology of AlTiN coatings under different bias-voltage

表 2 不同偏压 AlTiN 涂层沉积速率
Tab.2 Deposition rate of AlTiN coatings under different bias-voltage

Bias voltage/V	Deposition rate/(nm·min ⁻¹)
-40	26.4
-80	25.0
-120	22.8

表 3 不同偏压 AlTiN 涂层断面的 EDS 成分分析结果
Tab.3 EDS analysis result of TiAlN coatings cross-section under different bias-voltage

Bias voltage/V	a _N /%	a _{Al} /%	a _{Ti} /%	a _{Al} : a _{Ti}
-40	39.87	39.7	20.43	1 : 1.94
-80	37.85	40.79	21.35	1 : 1.91
-120	34.57	42.37	23.06	1 : 1.84

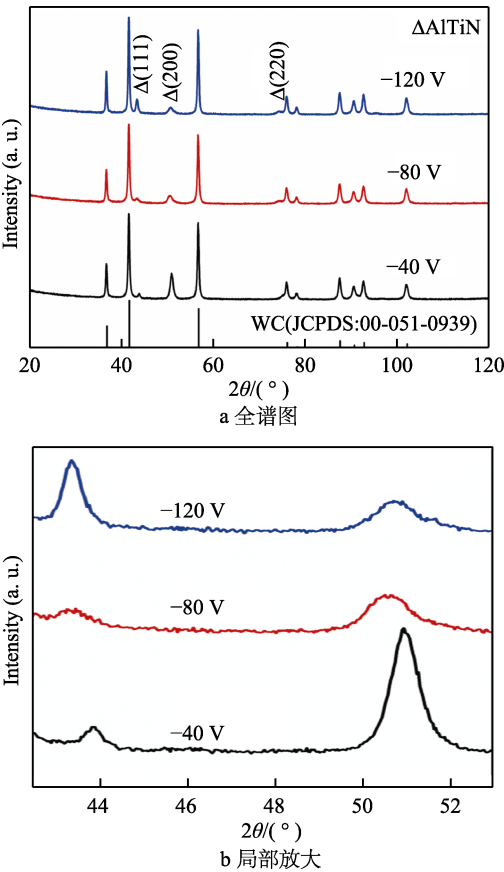


图 3 不同偏压 AlTiN 的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of AlTiN coatings under different bias-voltage: a) full spectrum; b) enlarged view

随着偏压的增大,核能粒子对沉积涂层的轰击能量增大,使得沉积涂层获得更大的扩散能,从而使涂层向低能面(111)生长。此外,随着偏压的增大,从图 3b 及表 4 可以看出,衍射峰位置及峰宽发生一定的变化。受涂层应力的影响,相比于-40 V 的涂层,-80 V 与-120 V 的涂层衍射峰向低角度偏移,且衍射峰变宽,但-120 V 比-80 V 涂层偏移的角度稍小,衍射峰

表 4 不同偏压下 AlTiN 涂层的 XRD 分析
Tab.4 XRD analysis of TiAlN coatings under different bias-voltage

Bias voltage/V	Position (2θ)	
	(111)	(200)
-40	43.9123°	50.9609°
-80	43.4174°	50.6673°
-120	43.4044°	50.6329°

稍宽。因为偏压增大,涂层具有更大的扩散能,使得晶格的畸变程度增大,衍射峰向低角度偏移程度更小。

不同偏压下涂层的残余应力(基于 $\sin^2\psi$ 法测试)如图 4 所示。可以看出,随着基体负偏压的增大,涂层的残余应力增大。随着偏压的增大,荷能粒子的轰击能量增大,使得涂层产生更大的畸变,从而使涂层的内应力增加^[8,10]。另一方面,随着偏压的增大,应力增加的幅度减小。这是因为随着偏压的增大,轰击能量增大,使反溅射现象增强,已沉积表面的 Al 原子被 Ti 原子置换,而 Ti 的原子半径大于 Al 的原子半径,导致晶格扩展,晶格常数增大,引起了应力和应变的松弛。同时高能离子的轰击提高了基体的温度,降低了沉积速率,沉积原子获得更高的扩散能和更长的扩散时间,使得应力和应变增加的幅度减小^[10-11]。

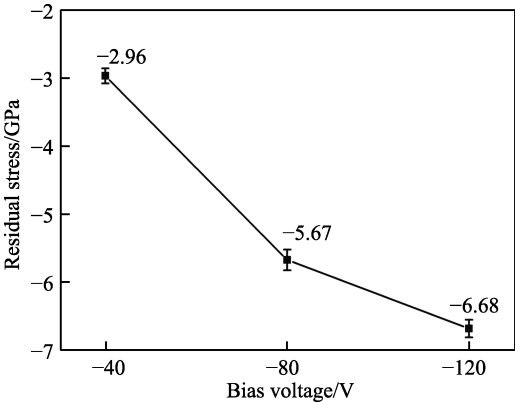


图 4 不同偏压 AlTiN 的残余应力
Fig.4 Residual stress of AlTiN coatings under different bias-voltage

不同偏压 AlTiN 涂层的基本力学性能见表 5。从表 5 中可以看出,随着偏压的增大,涂层的硬度 H 增大。这与荷能粒子的轰击效应有关,高的轰击能量使得涂层更为致密精细。另外,XRD 图谱表明,-120 V 偏压下所制备涂层的(111)晶面衍射强度最大,涂层硬度最高,与文献报道相符^[12]。同时,弹性模量 E 、抗塑性变形因子 H^3/E^2 (弹性折合模量 $E^*=E/(1-\nu^2)$, $\nu=0.18$, ν 为 AlTiN 涂层的泊松比)也随着偏压的增大而增大, H^3/E^2 越大,涂层的抗塑性变形能力越好。不同偏压下,弹性应变失效能力 H/E 相当。弹性回复系数 h_p/h_m (涂层在卸载和加载过程中卸载后残余深度 h_p 与最大压入深度 h_m 的比值)在-40 V 时最大,

表5 不同偏压下 AlTiN 的基本力学性能
Tab.5 Mechanical properties of AlTiN coatings under different bias-voltage

Bias voltage/V	H/GPa	E/GPa	H/E	H^3/E^2	MDP	h_p/h_m
-40	26.4 ± 1.4	436.9 ± 14.2	0.061	0.090	0.455	0.527
-80	29.8 ± 1.2	456.8 ± 13.6	0.065	0.119	0.423	0.494
-120	31.3 ± 1.1	481.2 ± 10.6	0.065	0.124	0.425	0.495

说明该偏压下涂层具有更好的塑形变形能力。显微硬度耗散系数 MDP (Microhardness Dissipation Parameter) 可评估涂层的韧性^[13-14], 它表示涂层在加载和卸载过程中塑性变形功 W_p 与总功 W_t 的比值。从表 2 中 MDP 的数值可以看出, -40 V 偏压下涂层的韧性优于-80 V 和-120 V 的涂层, -80 V 与-120 V 涂层的 MDP 值相当。这与 XRD 图谱中(200)晶面衍射强度结果一致, (200)衍射强度越强, 涂层的韧性越高^[15]。

2.2 高温合金车削性能

不同偏压下制备的 AlTiN 涂层的高温合金车削性能如图 5 所示。从图 5 中可以看出, -80 V 偏压涂层的切削性能优于-40 和-120 V 涂层。车削 12 min 时, 涂层刀片刀尖处的磨损形貌如图 6 所示。可以看出, -80 V 涂层刀片的磨损明显小于-40 V 和-120 V 的涂层刀片, 且三者的磨损形式均为月牙洼磨损。在前刀面上离切削刃约 0.1~0.3 mm 处温度最高, 该处的扩散作用最强烈, 同时由于交变应力、粘结磨损和磨料磨损等的共同作用, 在前刀面形成月牙洼。对于-40 V 的刀片来说, 其硬度较低 (26.4 GPa), 因此其

抗磨料磨损的能力不佳, 磨损较快; -120 V 偏压涂层的硬度虽高 (31.3 GPa), 但其应力较大 (-6.68 MPa), 高应力使得涂层结合力下降^[7,8,16], 导致切削过程中涂层出现不均匀的局部剥落 (如图 6c 所示); -80 V 涂层的硬度及应力值适中, 两者间达到了平衡 (如图 7 所示), 其抗磨损能力及涂层结合力均表现优异, 因此抗月牙洼磨损的性能最优。

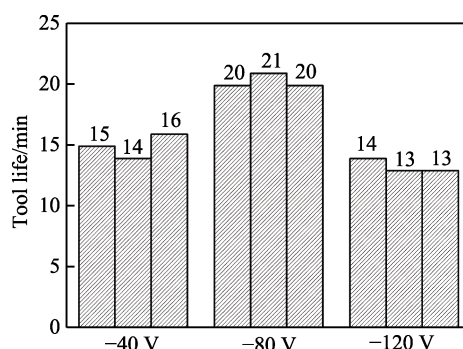


图5 不同偏压下 AlTiN 对 GH4169 的车削性能
Fig.5 Cutting performance of AlTiN coatings under different bias-voltage in cutting GH4169

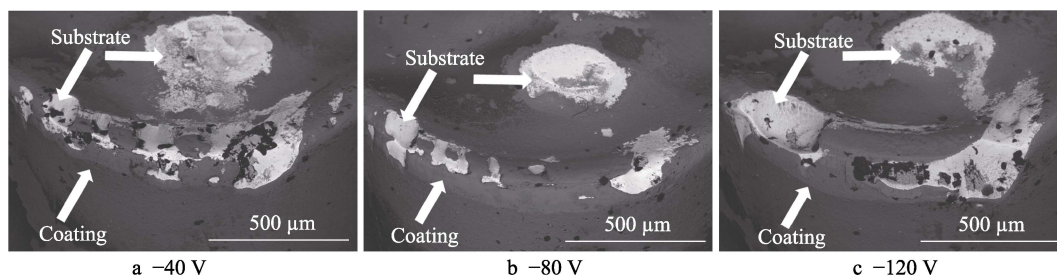


图6 车削 GH4169 12 min 时涂层的磨损形貌

Fig.6 Wear morphology of AlTiN coatings under different bias-voltage in cutting GH4169 for 12 min

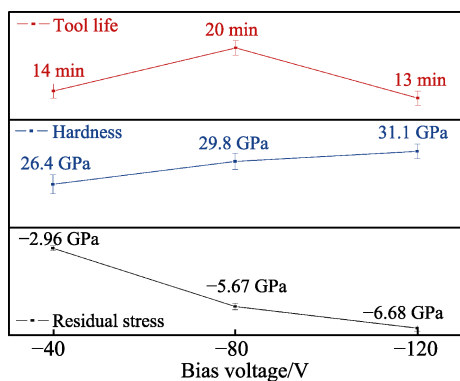


图7 不同偏压下 AlTiN 涂层的车削寿命与硬度及应力的关系

Fig.7 Relationship of tool life, hardness and residual stress of AlTiN coatings under different bias-voltage

3 结论

采用电弧离子镀, 于三种不同偏压下, 在 WC 硬质合金表面沉积了 TiAlN 涂层, 研究了偏压对涂层组织结构、内应力、力学性能及高温合金车削性能的影响, 得出以下结论:

1) 在-40、-80、-120 V 偏压下所制备的 TiAlN 涂层表面平整, 结构致密, 且均为细晶。

2) TiAlN 涂层物相结构均为 NaCl 型面心立方 TiN, 随着偏压的增大, (200)衍射强度逐渐减小, (111)衍射强度逐渐增大。

3) 涂层硬度从-40 V 的 26.4 GPa 增加到-120 V 的 31.3 GPa, 涂层残余应力随偏压的增大而增大。

4) -80 V 偏压下的 AlTiN 涂层由于硬度与应力之间达到平衡, 其高温合金切削性能表现最优, 而 -40 V 的 AlTiN 涂层由于硬度低, -120 V 的 AlTiN 涂层由于应力大, 在高温合金抗月牙洼磨损方面的表现均不佳。AlTiN 涂层硬度与应力的平衡可提高其抗月牙洼磨损能力。

参考文献:

- [1] 芦福桢. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
LU Fu-zhen. Metal-cutting principles and cutters[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [2] 林亮亮. Al 含量对 $Ti_{1-x}Al_xN$ 涂层组织结构、力学性能和切削性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 189-195.
LIN Liang-liang. Effect of aluminum content on microstructure, mechanical properties and milling performance of $Ti_{1-x}Al_xN$ coatings[J]. Surface technology, 2019, 48(4): 189-195.
- [3] 左伟峰. 磁控溅射离子镀 AlTiN 涂层工艺及其性能研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
ZUO Wei-feng. Dissertation study on technology and properties of AlTiN coating by magnetron sputtering ion plating[D]. Chengdu: Xihua University, 2018.
- [4] PALDEY S, DEEVI S C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review[J]. Materials science & engineering A, 2003, 342 (1): 58-79.
- [5] 赵文济, 梅芳华, 董云杉, 等. 射频反应溅射 (Al,Ti)N 涂层的微结构与力学性能[J]. 材料工程, 2005(9): 48-52.
ZHAO Wen-ji, MEI Fang-hua, DONG Yun-shan, et al. Microstructure and mechanical properties of reactively sputtered (Al,Ti)N coatings[J]. Journal of materials engineering, 2005(9): 48-52.
- [6] 吴化, 陈涛, 宋力. PVD 法制备 (Ti,Al)N 涂层中残余应力对其质量的影响[J]. 材料工程, 2013(2): 60-64.
WU Hua, CHEN Tao, SONG Li. Effects of residual stress on quality of (Ti,Al)N coatings deposited by PVD method[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(2): 60-64.
- [7] SKORDARIS G, BOUZAKIS K D, KOTSANIS T, et al. Effect of PVD film's residual stresses on their mechanical properties, brittleness, adhesion and cutting performance of coated tools[J]. Cirp journal of manufacturing science & technology, 2017, 18: 145-151.
- [8] 冯光光, 刘崇林, 卢龙. 基体负偏压对膜层形貌与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(14): 103-105.
FENG Guang-guang, LIU Chong-lin, LU Long. Effects of substrate negative bias voltage on morphology and properties of film[J]. Hot working technology, 2013, 42(14): 103-105.
- [9] GONZALO O, GONZALO O, NAVAS V G, et al. Influence of the coating residual stresses on the tool wear [J]. Procedia engineering, 2011, 19(1): 106-111.
- [10] SATO K, ICHIMIYA N, KONDO A, et al. Microstructure and mechanical properties of cathodic arc ion-plated (Al, Ti)N coatings[J]. Surface & coatings technology, 2003, 163(2): 135-143.
- [11] TILLMANN W, SPRUTE T, HOFFMANN F, et al. Influence of bias voltage on residual stresses and tribological properties of TiAlVN-coatings at elevated temperatures [J]. Surface & coatings technology, 2013, 231(9): 122-125.
- [12] 王海洋, 曹传亮, 张祥林, 等. 不同厚度 TiN 和 TiAlN 涂层残留应力分析[J]. 模具工业, 2011, 37(11): 64-69.
WANG Hai-yang, CAO Chuan-liang, ZHANG Xiang-lin, et al. Analysis on residual stress of various thickness of TiAlN and TiN coatings[J]. Die & mould industry, 2011, 37(11): 64-69.
- [13] FOX-RABINOVICH G S, VELDHUIS S C, SCVORTSOV V N, et al. Elastic and plastic work of indentation as a characteristic of wear behavior for cutting tools with nitride PVD coatings[J]. Thin solid films, 2004, 469(50): 505-512.
- [14] FOX-RABINOVICH G S, BEAKE B D, ENDRINO J L, et al. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings[J]. Surface & coatings technology, 2006, 200(20): 5738-5742.
- [15] AHLGREN M, AND BLOMQUIST H. Influence of bias variation on residual stress and texture in TiAlN PVD coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200(1-4): 157-160.
- [16] SOROKA O B, KLYMENKO S A, KOPEIKINA M Y. Evaluation of residual stresses in PVD-coatings. Part 2[J]. Strength of materials, 2010, 42(4): 450-458.