

过渡层 TiAlN 的力学性能与微观结构对 AlCrSiN 涂层宏观力学性能的影响^{*}

李加林 赵学书 宋宏甲 钟向丽 王金斌
(湘潭大学材料科学与工程学院 湘潭 411100)

摘要: AlCrSiN 多元硬质涂层具有优异的力学性能,在刀具领域有广泛应用前景。然而,如何在基底上制备出力学性能优异的 AlCrSiN 涂层有待进一步研究。基于电弧离子镀技术,在硬质合金基底上沉积了不同 Ti/Al 原子比的 TiAlN 过渡层,并在其上沉积了 AlCrSiN 涂层,研究了过渡层 TiAlN 的微观结构(晶面取向、晶粒尺寸、致密度等)对功能层 AlCrSiN 力学性能的影响。Ti-Al-N 固溶相的择优取向为(200)。随着 Ti 含量的增加,(200)衍射峰宽化,晶粒细化,致密程度提高,硬度增加。Ti/Al 原子比为 2.75 时,TiAlN 晶粒尺寸为 9.549 nm,其上制备的 AlCrSiN 硬度值达到 3 139.6 HV,并且涂层与基底间的结合力高达 92 N。细化(200)取向的 TiAlN 过渡层晶粒可以有效提高其上 AlCrSiN 涂层的硬度以及涂层与硬质合金基底的结合力。研究成果对提高功能层 AlCrSiN 的力学性能及涂层刀具的寿命有一定的指导意义。

关键词: Ti/Al 原子比; TiAlN/AlCrSiN 涂层; 晶粒尺寸; 过渡层; 结合力

中图分类号: TG156;TB114

Effect of Mechanical Properties and Microstructure of Interlayer TiAlN on Macroscopic Mechanical Properties of AlCrSiN Coating

LI Jialin ZHAO Xueshu SONG Hongjia ZHONG Xiangli WANG Jinbin
(School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China)

Abstract: AlCrSiN multiple hard coating has excellent mechanical properties and has a wide application prospect in the tool field. However, how to prepare AlCrSiN coatings with excellent mechanical properties on the substrate needs to be further studied. The transition layer between the substrate and AlCrSiN coating has an important effect on the mechanical properties of AlCrSiN. The effects of the microstructure (crystal orientation, grain size, relative density, etc) of the interlayer TiAlN on the mechanical properties of the function layer AlCrSiN were studied. TiAlN transition layers with different Ti/Al atomic ratios were deposited on cemented carbide substrates by arc ion plating, and AlCrSiN coating was deposited on TiAlN transition layer. The experiment results show that the preferred orientation of Ti-Al-N solid solution phase is (200). With the increase of Ti content, the (200) diffraction peaks broadens, the grain refines, the density and the hardness increases. When Ti/Al atomic ratio is 2.75, TiAlN grain size is 9.549 nm, and the hardness of AlCrSiN prepared on it reaches 3 139.6 HV, and the adhesion force between coating and substrate is up to 92 N. Refining the grains of the TiAlN interlayer with (200) orientation can effectively improve the hardness of the AlCrSiN function layer and the adhesion strength between the function layer and the cemented carbide substrate. The research result has a guiding significance to improve the mechanical properties of functional layer AlCrSiN and increasing the life of coating tools.

Keywords: Ti/Al atomic ratio; TiAlN/AlCrSiN coating; grain size; interlayer; adhesion force

0 前言

通过物理气相沉积法(PVD)制备的 AlCrSiN 多

元涂层具有高硬度、低摩擦因数以及优异的热稳定性等特点,将其应用于刀具涂层能够有效降低刀具磨损率、延长刀具使用寿命^[1-5]。SUN 等^[6]采用多

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51872251,11875229,51902275)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51872251,11875229, 51902275).

20210121 收到初稿, 20210322 收到修改稿

弧离子镀制备了不同 Si 含量的 AlCrSiN 涂层,试验结果表明硅含量为 5.52% 时涂层的综合力学性能最好,归因于该涂层的特殊结构即纳米晶 Cr(Al)N 镶嵌于 Si_3N_4 非晶中,使得涂层在外力作用下对裂纹的萌生和扩展有较强的抑制作用。物理气相沉积法有真空蒸镀、溅射镀膜、离子镀膜等沉积成膜方式,而多弧离子镀是在硬质合金刀具膜层领域上应用较为广泛的一种 PVD 技术,具有沉积速率高、沉积温度低、绕射性优异等特点^[7]。对于多元涂层,其相结构复杂,直接与基底结合会存在结合性能较差、使用寿命降低等问题^[8-9]。因此,基底与功能层 AlCrSiN 之间需要一种物理性能与基底差异小,能够在两者间起过渡作用的过渡层。

常用的过渡层涂层有 TiN^[10]、TiAlN、AlCrN^[11] 等。其中,二元 TiAlN 涂层与硬质合金等基体和 AlCrSiN 涂层的力学性能差异小,广泛用于 AlCrSiN 涂层的过渡层研究^[12]。在单层 TiAlN 涂层的研究中,发现 TiAlN 涂层的物理性能与其 Ti 或者 Al 含量密切相关。对于 $\text{Ti}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1.0$) 涂层,不同 Ti/Al 原子比会影响到涂层的硬度、结合力、弹性模量等力学性能,在 $x=0.59$ 时, $\text{Ti}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 膜层的压应力最低,膜基附着力最佳^[13-14]。朱丽慧等^[15]研究了不同 Al 含量 ($0.4 \leq x \leq 0.5$) 对 TiAlN 涂层结合强度的影响,试验结果表明,当 Al 含量增加时会使得 fcc-AlN 向软相 hcp-AlN 转变,降低 TiAlN 与基底的结合。在 AlTiN/AlCrSiN 周期结构涂层研究中,ZHANG 等^[16]得出以下结论:当 AlTiN/AlCrSiN 涂层达到某一调制周期值时,AlTiN/AlCrSiN 涂层具有最高的硬度、弹性模量和良好的结合强度。而 CHEN 等^[17]对 WC-Co 基底与 AlCrSiN 涂层之间的过渡层进行了研究,引入过渡层 MoN、NbN,结果表明,MoN/AlCrSiN、NbN/AlCrSiN 纳米复合涂层相比无过渡层涂层,纳米多层涂层具有更高的硬度,膜基附着力良好,耐磨性大幅度提高。

可以推测,TiAlN 作为基底与功能层 AlCrSiN 之间的过渡层,一方面,TiAlN 的元素组成将影响其自身的力学性能,进而会影响过渡层的效果;另一方面,TiAlN 的微观结构将影响其上功能层 AlCrSiN 的微观结构和性能。因此,为优化基底与功能层 AlCrSiN 之间的 TiAlN 过渡层的效果、提高刀具的使用寿命,本文从 TiAlN 涂层成分和微观结构的角度,调控其上生长的 AlCrSiN 涂层的微观结构和宏观力学性能等。首先,通过设置 Ti 靶电流(靶流),制备了 Ti/Al 原子比不同的 TiAlN 涂层,并表征了其晶粒取

向、尺寸、致密度等微观结构特性;其次,在 Ti/Al 原子比不同的 TiAlN 涂层上沉积了 AlCrSiN 涂层,并研究了 TiAlN 过渡层微观结构对 AlCrSiN 功能层的硬度和结合力的影响。

1 涂层制备与试验方法

1.1 涂层的制备

利用电弧离子镀技术在硬质合金基底上进行膜层沉积。试验采用已抛光的 WC-6wt%Co 的硬质合金基片,在镀膜前对其进行超纯水-丙酮-酒精超声清洗,清洗结束后再进行吹干、烘干处理。为保证后期膜层与基片的结合,在开始镀膜前利用较高的负偏压对基片表面进行氩离子刻蚀清洗,时间约 160 min。本文试验中制备了单层和双层涂层,结构如图 1 所示。选用 Ti50Al50 合金靶和纯 Ti 靶沉积不同 Ti 含量的单层 TiAlN 涂层,涂层结构如图 1a 所示;选择 Al60Cr30Si10 合金靶在 TiAlN 涂层上制备 AlCrSiN 涂层,TiAlN/AlCrSiN 双层涂层结构如图 1b 所示。以上两种结构的涂层沉积均在辅助气体 Ar 和 N_2 下进行,纯度为 99.99%,沉积参数为:TiAl 靶电流 120 A,AlCrSi 靶电流 100 A,Ti 靶电流分别设置为 0 A,60 A,90 A,120 A,负偏压 53 V,气压为 7 Pa,镀膜温度 400 °C。

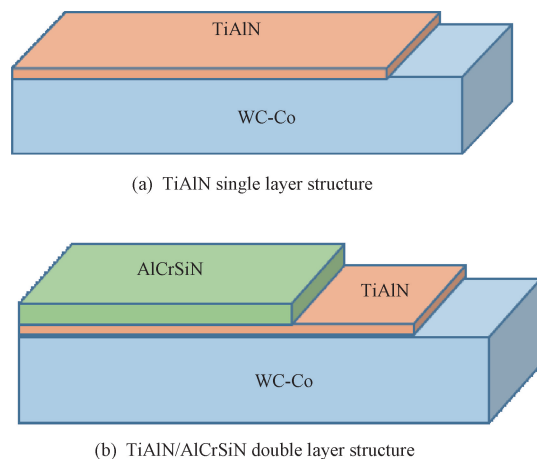


图 1 TiAlN 单层结构和 TiAlN/AlCrSiN 双层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TiAlN single layer structure and TiAlN/AlCrSiN double layer structure

1.2 涂层的表征

用 MIRA3 TESCAN 型场发射扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 对涂层进行形貌分析,利用其附带的能谱仪 (Energy dispersive spectrometer, EDS) 对涂层进行成分分析。采用 Bruker D8 Advance 型掠入射 X 射线衍射仪 (Grazing incident

X-ray powder diffractometer, GIXRD) 确定涂层物相组成。试验条件: Cu 靶 $K\alpha 1$ 辐射 ($\lambda = 0.154\ 01\ \text{nm}$), 加速电压为 40 kV, 电流为 40 mA, 扫描范围为 $25^\circ \sim 65^\circ$ 。通过 EM500-1A 型显微维氏硬度计对涂层进行硬度测量。测试条件: 施加载荷为 10 g, 加载时间为 10 s, 测试 5 个点, 取平均值作为硬度值。利用球坑仪^[18]测量涂层的厚度值, 以及通过型号为 WS-2005 的划痕仪进行膜基结合强度测试。测试参数: 检测所用压头为金刚石压头, 加载力为 0~100 N, 加载速度为 100 N/m, 划痕长度为 5 mm。

2 试验结果与讨论

2.1 单层结构 TiAlN 涂层的微观结构与力学性能分析

表 1 为单层结构 TiAlN 涂层的 EDS 数据结果。当 Ti 靶电流为 0 A 时, 只有 TiAl 靶工作。按照设计要求, 该弧靶中的元素含量比 Ti:Al = 50:50, 但从涂层的元素成分分析可得, Ti 的原子百分比稍高于 Al。可能原因是, Ti 的饱和蒸汽压低且熔点高, 因而其离化率比 Al 高, 生成 TiN 的吉布斯自由能低于 AlN 相, 使得 TiN 优先生长, 并且金属离子在沉积过

程中, Al 离子的丢失概率高于 Ti^[19-20]。随着 Ti 靶电流继续增大, 涂层中 Ti 含量显著提高, 钛铝原子比从 1.06 增加到 2.75。

表 1 不同 Ti 靶电流下 TiAlN 涂层的元素组成

Table 1 Element composition of TiAlN coatings at different Ti target currents

Ti target current/A	Elemental composition/%					
	Ti	Al	N	W	Co	Ti/Al
0	23.1	21.7	52.2	2.3	0.7	1.06
60	30.7	17.0	51.5	0.6	0.2	1.81
90	34.1	14.8	50.6	0.4	0.1	2.30
120	34.9	12.7	52.2	0.1	0.1	2.75

单层 TiAlN 涂层截面形貌 SEM 照片如图 2 所示。从 SEM 照片来看, 不同 Ti 弧靶电流制备的涂层结晶良好, 柱状晶结构无明显疏松, 与基底结合良好。这是因为电弧离子镀过程是一个热力学非平衡过程, 在晶粒生长时倾向于沿垂直于基底表面的方向生长, 离子在偏压等能量的作用下在基体表面扩散, 从而形成致密的涂层^[21]。涂层与基底结合较好, 未出现缝隙及剥落现象。随着 Ti 靶电流增大, 涂层厚度增加。

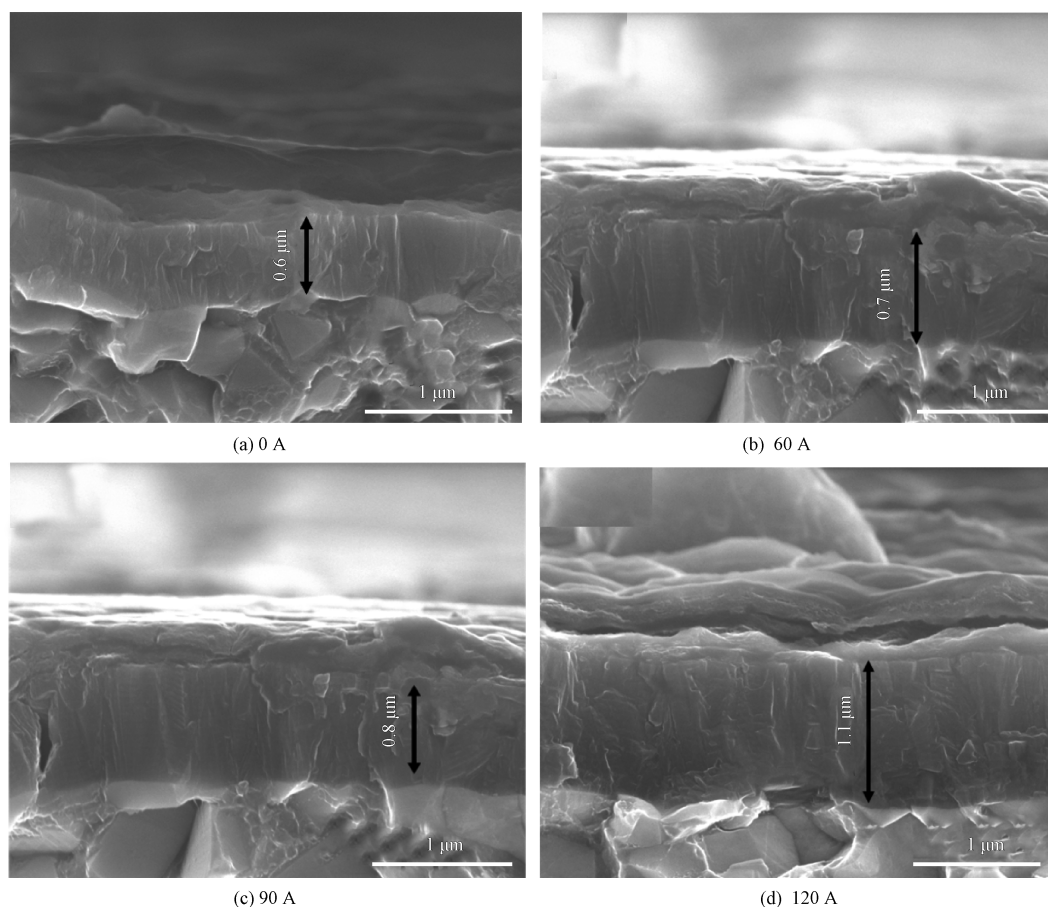


图 2 不同 Ti 靶电流下 TiAlN 涂层的截面形貌 SEM 照片

Fig. 2 SEM photos of cross-sectional images of TiAlN coatings at different Ti target currents

TiAlN 涂层的 GIXRD 结果如图 3 所示。可以看出单层 TiAlN 涂层的衍射峰出现在 (111)、(200)、(220) 晶面, 并且以 (200) 晶面择优。相关研究表明, 择优取向是由表面自由能和应变能这两个热力学参数之间的竞争决定的, 而低厚度涂层通常呈现在表面能最低的取向上^[22-23]。涂层的衍射峰都处于 c-TiN 和 c-AlN 标准峰之间, 这是因为较小半径的 Al 原子 ($r=0.143\text{ nm}$) 挤入面心立方结构 (NaCl 型) 的 TiN 中, 取代了部分 Ti 原子 ($r=0.146\text{ nm}$), 造成晶格畸变, 形成 Ti-Al-N 固溶体。当 Ti 靶电流超过 60 A 时, 相比低电流状态, (200) 面半高宽明显宽化, 涂层衍射峰逐渐向低角度方向偏移。结合原子的置换作用分析, 随着 Ti 含量的增加, Ti 优先与 N 原子结合生成 c-TiN, Al 原子继续在 Ti-N 晶格中固溶, 使得晶格常数减小, 晶粒尺寸细化^[24]。晶格常数减小后衍射峰向小角度方向偏移。晶粒尺寸细化导致 (200) 面半高宽明显宽化。同时, 晶粒尺寸细化后, 非晶相的晶界增多, 导致衍射峰强度下降。

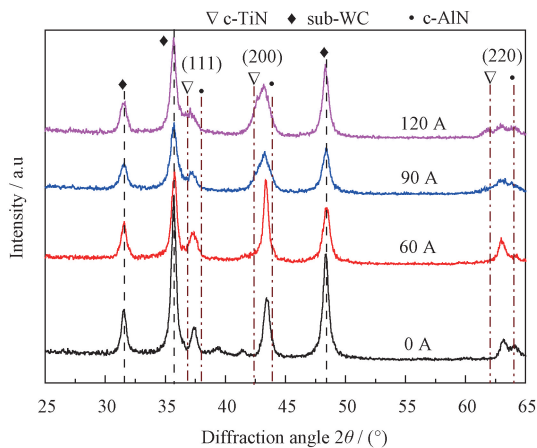


图 3 单层 TiAlN 结构 GIXRD 图谱

Fig. 3 GIXRD spectra of TiAlN coatings

考虑到残余应力对衍射峰角度和半高宽的影响, 选择具有足够大的强度峰和较高角度的 (200) 峰计算平均晶粒尺寸^[25-26]。为排除仪器产生的附加半高宽对涂层衍射峰的影响, 以下衍射峰的半高宽 B 已通过标准 Si 粉末进行修正。谢乐公式^[10] 如式 (1) 所示:

$$D = \frac{0.9\lambda}{B\cos\theta} \quad (1)$$

式中 λ 为 Cu 的 $K\alpha$ 波长 ($\lambda=0.154\text{ nm}$), B 为衍射峰的半高宽 (FWHM), θ 为衍射峰的布拉格角。式 (1) 适用于 $1\sim 100\text{ nm}$ 的晶粒计算。衍射峰的角度及对应晶粒尺寸计算结果如表 2 所示。当 Ti 靶电流超过 60 A 时, 晶粒尺寸逐渐减小。结合晶面取向

和界面能量最小化原理, 涂层在能量较低的 (200) 晶面取向上形核速度快, 生成的晶粒细小^[21,27]。

表 2 不同 Ti 靶电流下的衍射峰角度、半高宽及晶粒尺寸
Table 2 Angle, FWHM and grain size of the diffraction peak at different Ti target currents

Ti target current/A	(200) diffraction peak angle/(°)	FWHM/rad	Grain size/nm
0	43.443	0.600	14.085
60	43.366	0.489	17.277
90	43.211	0.810	10.425
120	43.122	0.884	9.549

使用显微维氏硬度计对不同 Ti 靶电流下沉积的过渡层进行硬度测试, 涂层厚度通过球坑仪测得。从图 4 可看出, 当 Ti 靶电流为 0 A 时, 过渡层 TiAlN 硬度为 1 878.4 HV, 随着 Ti 靶电流逐渐增大至 60 A, 该层厚度值相应提高, 但硬度存在下降趋势, 这是因为 Ti 靶电流为 60 A 时, TiAlN 涂层的晶粒尺寸明显增大。根据 Hall-Petch^[28] 原理, 涂层晶粒尺寸变化与其硬度值大小密切相关。当电流为 90 A 和 120 A 时, 涂层硬度逐渐增大, 结合 TiAlN 涂层的微观结构分析, Ti 含量相对 Al 含量较高时, 在一定程度上提高了 Al 原子在晶格中的固溶程度, 使得涂层晶粒尺寸进一步细化; 高 Ti/Al 比条件下, 涂层中形成力学性能较差的 h-AlN 相的概率大大降低, 因而涂层的硬度得到一定的提高^[21]。但 90 A 和 120 A 电流下, 得到的涂层晶粒尺寸较为接近, 在 $9.5\text{ nm}\sim 10.5\text{ nm}$ 范围内, 所以其硬度值无明显变化, 约为 1 913.0 HV。

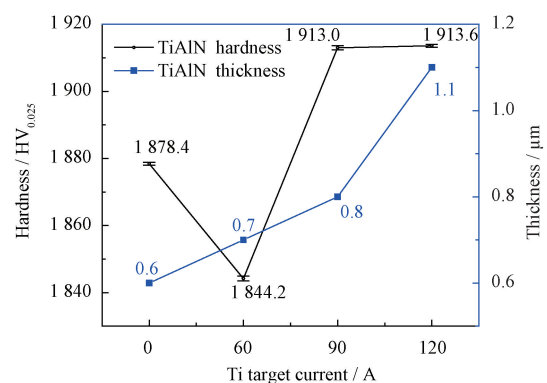


图 4 不同 Ti 靶电流下 TiAlN 层的硬度、厚度值
Fig. 4 Hardness and thickness of TiAlN films with different Ti target currents

2.2 双层结构 TiAlN/AlCrSiN 涂层的微观结构、硬度及结合力

TiAlN/AlCrSiN 涂层的截面形貌如图 5 所示。可见, 在不同 Ti/Al 比 TiAlN 涂层上制备的 AlCrSiN

涂层的厚度值变化不大。过渡层 TiAlN 与基底、过渡层与工作层 AlCrSiN 之间结合紧密。AlCrSiN 层

无明显柱状结构,这是因为 Si 的加入会抑制柱状晶的生长^[29]。

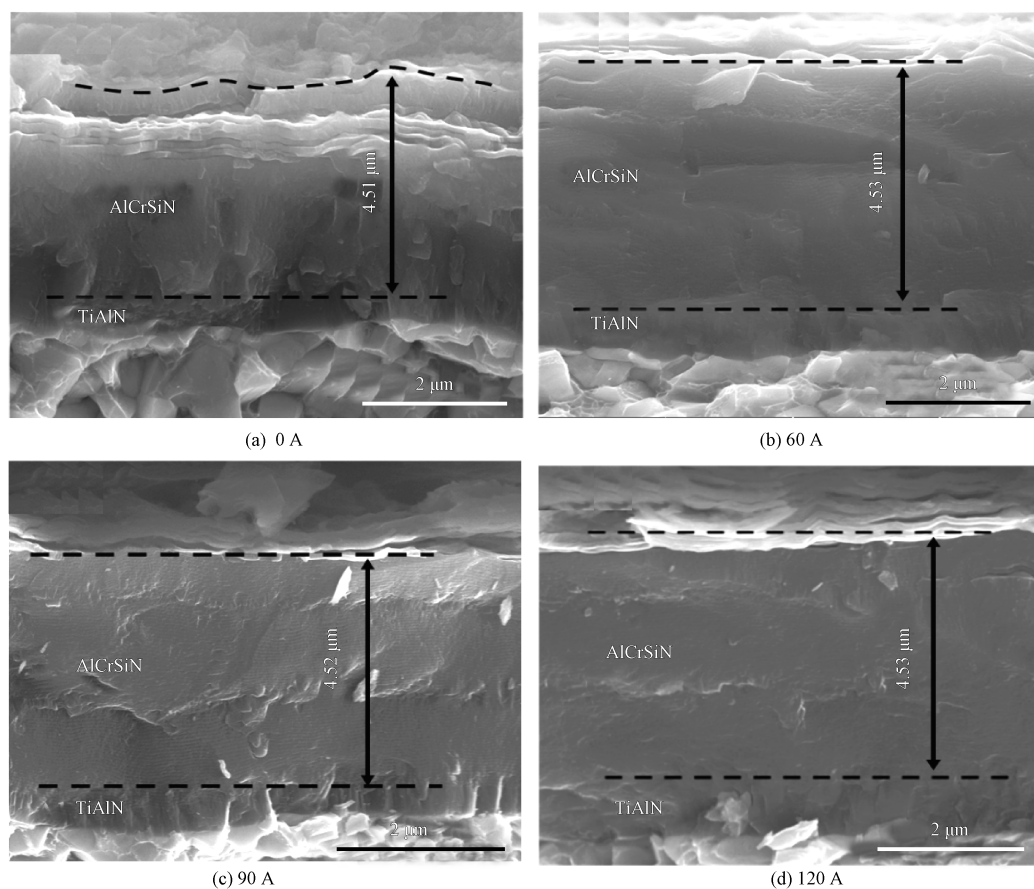


图5 不同靶流下 TiAlN/AlCrSiN 涂层的截面形貌 SEM 照片

Fig. 5 SEM photos of cross-sectional images of TiAlN/AlCrSiN coatings with different target currents

图6为 AlCrSiN 涂层的硬度变化曲线。从图中数据可得,随着 TiAlN 过渡层制备时 Ti 靶电流的增加,AlCrSiN 层硬度从 2 889.6 HV 降低至 2 753.8 HV,随之提高至 3 139.6 HV。结合表2和图4分析可知,当功能层 AlCrSiN 的制备工艺保持不变时,通过提高过渡层 TiAlN 中的 Ti/Al 原子比, Ti 靶电流超过 60 A 时,该层晶粒明显细化,晶粒间结合紧密,硬度增加,这对提高功能层 AlCrSiN 的硬度有一定影响;在多层涂层中外延生长引起的交变应力场,提高了晶界能量,会限制晶体的错位运动,提高了涂层硬度^[30]。并且过渡层中 Ti 含量增加时,过渡层 TiAlN 的厚度逐渐增加, TiAlN/AlCrSiN 界面上的应力分布均匀,这对其上生长的 AlCrSiN 涂层的硬度的提高有一定的影响^[31]。

通过 WS-2005 型划痕试验仪对涂层进行结合力测试。当金刚石压头上的加载力 L 达到临界载荷 L_c 时,膜层开始从基体上剥离,测试过程中通过传感器获取声信号。在声信号-摩擦力-载荷曲线上,

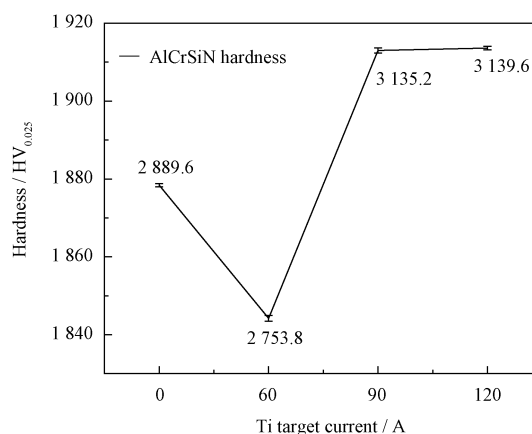


图6 不同 Ti 靶电流下 TiAlN/AlCrSiN 涂层的硬度变化曲线

Fig. 6 Hardness change curve of TiAlN/AlCrSiN films at different Ti target currents

一般根据摩擦力曲线斜率的变化及声信号峰的波动来确定临界载荷 L_c ,再结合涂层划痕的光学形貌图,三者综合评定膜基结合力使测试结果更加准确

可信^[32]。

图 7 为不同 Ti 靶电流下 TiAlN/AlCrSiN 的声信号及摩擦力曲线,图 8 为不同 Ti 靶电流下涂层的划痕形貌,当摩擦力曲线的斜率(图中红色虚线)与声信号开始大幅度波动时,涂层划痕开始剥落,因此可判定此时对应的加载力为膜层的临界载荷 L_c 。可见,随着 Ti 靶电流升高,对应涂层声信号开始波动时的载荷也越来越大,结合涂层的划痕形貌分析,涂

层的失效临界载荷从 82 N 提高到 92 N 左右。由摩擦力曲线可大致计算出膜层的摩擦因数,摩擦因数随着打底层 Ti 含量增加,呈现先增加后减小的变化趋势,这与涂层的失效临界载荷变化趋势吻合。这可解释为:Ti 靶电流增加使得过渡层的 Ti 含量增多,过渡层晶粒得到细化,使得 TiAlN 层与 AlCrSiN 层之间、TiAlN 与基体间的结合紧密;过渡层厚度增加对涂层临界失效载荷的提高有一定影响。

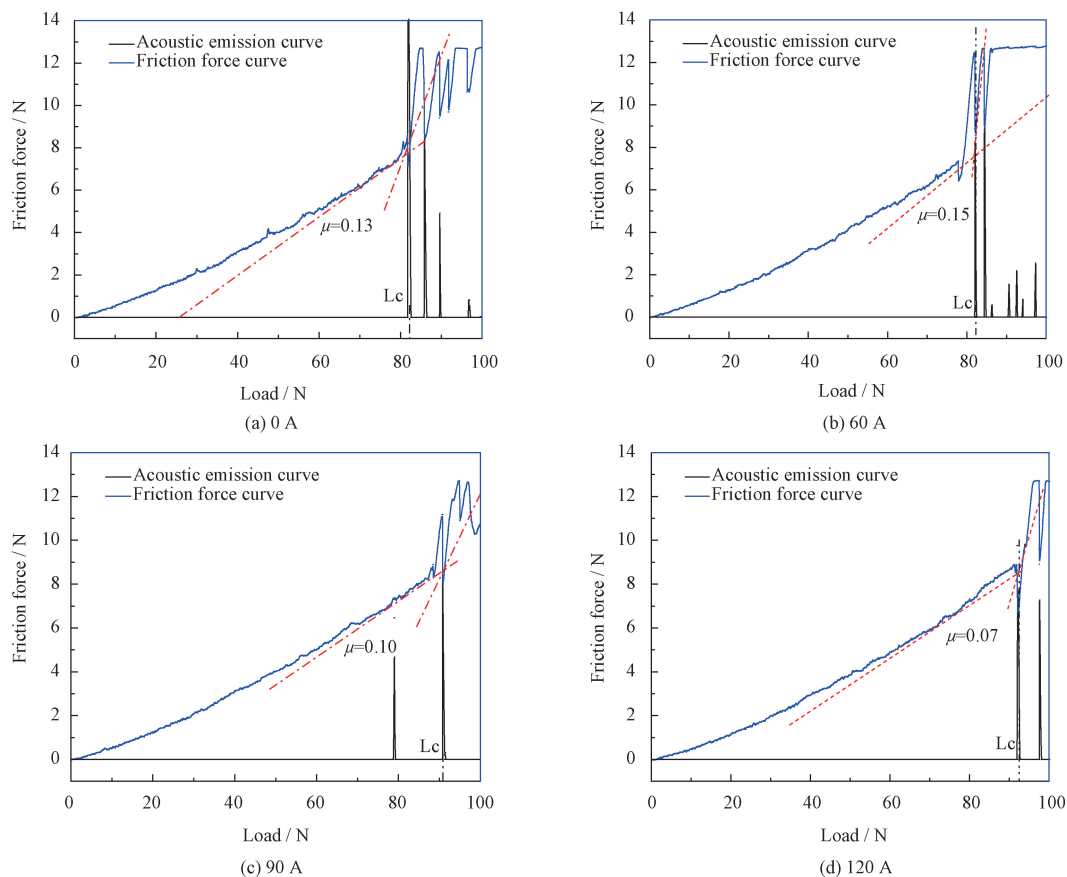


图 7 不同 Ti 靶电流下 TiAlN/AlCrSiN 涂层的声发射及摩擦力曲线

Fig. 7 Acoustic emission and friction force curve of TiAlN/AlCrSiN coatings at different Ti target currents

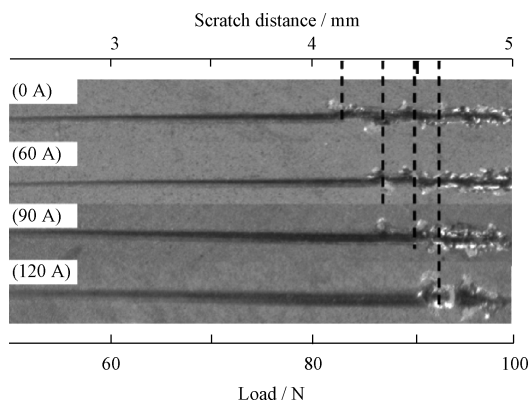


图 8 不同 Ti 靶电流下 TiAlN/AlCrSiN 涂层的划痕形貌

Fig. 8 Scratch track of TiAlN/AlCrSiN coatings at different Ti target currents

3 结论

通过改变 Ti/Al 原子比,调控过渡层 TiAlN 的微观结构和力学性能,并研究过渡层 TiAlN 的微观结构和力学性能对其上生长的功能层 AlCrSiN 涂层微观结构、硬度和结合力的影响。主要结论如下:

(1) 制备的 TiAlN 涂层以(200)晶面取向择优,晶粒为生长紧密的柱状晶。随着 Ti 弧靶电流的升高,TiAlN 层中 Ti/Al 原子比从 1.06 提高到 2.75。随着 Ti 含量的增加,TiAlN 涂层的晶粒尺寸先增大后细小,晶粒间无明显孔洞疏松。当 Ti/Al 原子比为 2.75 时,TiAlN 晶粒尺寸为 9.549 nm。

(2) 随着过渡层 TiAlN 的 Ti/Al 原子比增加,过渡层的晶粒先增大后减小,影响了其上制备的 AlCrSiN 涂层的硬度,并且该层硬度呈现先下降后提高的变化规律。此外,过渡层厚度的增加对 AlCrSiN 涂层的硬度及结合力有一定的影响。当过渡层 TiAlN 的 Ti 靶电流为 120 A 时,AlCrSiN 涂层硬度达到 3 139.6 HV, TiAlN/AlCrSiN 涂层与硬质合金基底的结合力提高至 92 N,此时摩擦因数最低,涂层耐磨性优异。

参 考 文 献

- [1] GAO Y, CAI F, ZHANG L, et al. Structure optimization and cutting performance of gradient multilayer AlCrSiN films with ion source etching pretreatment[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(2): 997-1006.
- [2] WU W W, CHEN W L, YANG S B. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 351: 803-810.
- [3] JÄGER N, MEINDLHUMER M, SPOR S, et al. Microstructural evolution and thermal stability of AlCr(Si)N hard coatings revealed by in-situ high-temperature high-energy grazing incidence transmission X-ray diffraction[J]. *Acta Materialia*, 2020, 186: 545-554.
- [4] LI P, CHEN L, WANG S Q. Microstructure, mechanical and thermal properties of TiAlN/CrAlN multilayer coatings[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, 40: 51-57.
- [5] FAGA M G, GAUTIER G, CARTASEGNA F, et al. AlSiTiN and AlSiCrN multilayer coatings: effects of structure and surface composition on tribological behavior under dry and lubricated conditions[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 365: 218-226.
- [6] SUN S Q, YE Y W, WANG Y X, et al. Structure and tribological performances of CrAlSiN coatings with different Si percentages in seawater[J]. *Tribology International*, 2017, 115: 591-599.
- [7] DENG Y, CHEN W L, LI B X, et al. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: a review[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(11): 18373-18390.
- [8] VERESCHAKA A, OGANYAN M, BUBLIKOV Y, et al. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr, Al)N and Zr-ZrN-(Zr, Cr, Al)N Coatings[J]. *Coatings*, 2018, 8(11): 395.
- [9] LOFAJ F, HVIŠOVÁ P, ZUBKO P, et al. Mechanical and tribological properties of the high target utilization sputtering W-C coatings on different substrates[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 80: 305-314.
- [10] CHAWLA V, JAYAGANTHAN R, CHANADRA R. Structural characterizations of magnetron sputtered nanocrystalline TiN thin films [J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(8): 1015-1020.
- [11] BRIOIS P, MERCS D, BANAKH O. Structural and mechanical properties of (Al, Cr)N and (Al, Cr)SiN coatings reactively sputter deposited[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2007, 4(S1): S677-S680.
- [12] XIAN G, XIONG J, ZHAO H, et al. Evaluation of the structure and properties of the hard TiAlN-(TiAlN/CrAlSiN)-TiAlN multiple coatings deposited on different substrate materials[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 85: 21.
- [13] GROSSMANN B, SCHALK N, CZETTL C, et al. Phase composition and thermal stability of arc evaporated Ti_{1-x}Al_xN hard coatings with 0.4 ≤ x ≤ 0.67[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 309: 687-693.
- [14] SHUM P W, TAM W C, LI K Y, et al. Mechanical and tribological properties of titanium-aluminium-nitride films deposited by reactive close-field unbalanced magnetron sputtering[J]. *Wear*, 2004, 257(9-10): 1030-1040.
- [15] 朱丽慧, 胡涛, 彭笑, 等. Al 含量对 TiAlN 涂层结合强度的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(3): 154-158.
ZHU L H, HU T, PENG X, et al. Effect of Al content on adhesion strength of TiAlN coatings[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(3): 154-158. (in Chinese)
- [16] ZHANG Q, XU Y X, ZHANG T F. Tribological properties, oxidation resistance and turning performance of AlTiN/AlCrSiN multilayer coatings by arc ion plating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 356: 1-10.
- [17] CHEN Y, DU H, CHEN M, et al. Structure and wear behavior of AlCrSiN-based coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 370: 176-183.
- [18] 张建民. 用球坑仪测量固体表面的硬度——球坑直径与磨坑时间的关系[J]. *真空*, 1997, 2(3): 16-17.
ZHANG J M. Hardness measurement of the solid surface with ball cratering—The relation of ball crater diameter and time[J]. *Vacuum*, 1997, 2(3): 16-17. (in Chinese)
- [19] 陈利. Ti-Al-N 基硬质涂层的热稳定性、微结构及其力学、切削性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
CHEN L. Study on thermal stability, microstructure and mechanical and cutting properties of Ti-Al-N-based hard coatings[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [20] 张钧. 多弧离子镀合金涂层/靶材成分分离析现象的初步研究[J]. *真空*, 1994(4): 44-47.
ZHANG J. Initial study on composition demixing effect of alloy coating/cathode material by multi-Arc Ion Plating[J]. *Vacuum*, 1994(4): 44-47. (in Chinese)
- [21] 杨鸿泰, 代明江, 李洪. Al 含量对 TiAlN 涂层组织结构和性能的影响[J]. *材料导报*, 2018, 32(20): 3573-3578.
YANG H T, DAI M J, LI H. Effect of Al content microstructure and properties of TiAlN coating[J]. *Material guide B: Research Paper*, 2018, 32(20): 3573-3578. (in Chinese)
- [22] 黄凯, 李刘合. 基体、过渡层偏压和涂层厚度对氧化铬涂层结晶取向的影响[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(1): 73-83.
HUANG K, LI L H. Effects of substrate, interlayer bias and coating thickness on crystal orientation of chromium oxide coat-

- ings[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(1): 73-83. (in Chinese)
- [23] JIMÉNEZ H, RESTREPO E, DEVIA A. Effect of the substrate temperature in ZrN coatings grown by the pulsed arc technique studied by XRD[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3-4): 1594-1601.
- [24] 梁俊才, 周武平, 张凤戈, 等. TiAlN 涂层制备过程中 Ti, Al 元素存在形式的演变分析[J]. 稀有金属, 2014, 38(4): 561-565.
- LIANG J C, ZHOU W P, ZHANG F G, et al. Evolution analysis of existing forms of Ti and Al elements during preparation of TiAlN coating[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(4): 561-565. (in Chinese)
- [25] PANDEY A, DALAL S, DUTTA S, et al. Structural characterization of polycrystalline thin films by X-ray diffraction techniques[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(2): 1341-1368.
- [26] WANG S Q, CHEN K H, CHEN L, et al. Effect of Al and Si additions on microstructure and mechanical properties of TiN coatings[J]. China Surface Engineering, 2011, 18(2): 310-313.
- [27] THOMPSON C V. Structure evolution during processing of polycrystalline films[J]. Annual Review of Materials Science, 2000, 30: 159-190.
- [28] HAKAMADA M, NAKAMOTO Y, MATSUMOTO H, et al. Relationship between hardness and grain size in electrodeposited copper films[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 457(1-2): 120-126.
- [29] 汪鹏, 许昌庆, 蔡飞, 等. 多弧离子镀 TiAlSiN 梯度涂层制备及切削性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 34-43.
- WANG P, XU C Q, CAI F, et al. Preparation and cutting performance of TiAlSiN gradient coating by multi-arc ion plating[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 34-43. (in Chinese)
- [30] 刘孟奇. 电弧离子镀 CrAlSiN 涂层结构与性能研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017.
- LIU M Q. The structure and properties of CrAlSiN coatings using the cathodic arc ion plating deposition technique[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017. (in Chinese)
- [31] 崔学军, 程平, 张海涛, 等. 涂层与基体界面结合强度测定模型的有限元模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(2): 357-361.
- CUI X J, CHEN P, ZHANG H T, et al. Finite element simulation of a test model for interface bonding strength between coating and substrate[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2): 357-361.
- [32] 朱晓东, 米彦郁, 胡奈赛, 等. 膜基结合强度评定方法的探讨-划痕法、压入法、接触疲劳法测定的比较[J]. 中国表面工程, 2002, 15(4): 28-31.
- ZHU X D, MI Y Y, HU N S, et al. Discussion on evaluation method of film-based bond strength-comparison of scratch method, press-in method and contact fatigue method[J]. China Surface Engineering, 2002, 15(4): 28-31. (in Chinese)
-
- 作者简介: 王金斌(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为铁电薄膜、稀磁半导体、铁电体/稀磁半导体异质结、铁电铁磁复合材料和相关器件的制备与改性、结构表征与性能分析等。
- E-mail: jbwang@xtu.edu.cn