

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181107003

# 多弧离子镀 TiAlSiN 梯度涂层制备及切削性能

汪鹏<sup>1,2</sup>, 许昌庆<sup>3</sup>, 蔡飞<sup>1</sup>, 斯松华<sup>1,2</sup>, 张世宏<sup>1,2</sup>, 梁加刚<sup>3</sup>

(1. 安徽工业大学 现代表面工程研究中心, 马鞍山 243000; 2. 安徽工业大学 材料科学与工程学院, 马鞍山 243000; 3. 安徽华菱汽车有限公司 重型专用车发动机安徽省重点实验室, 马鞍山 243000)

**摘要:** 针对含 Si 超硬涂层与基体结合强度不足, 切削过程中涂层易发生剥落从而导致涂层刀具切削性能低的问题, 采用离子源增强的多弧离子镀技术在硬质合金刀具上制备了不同含 Si 层梯度结构的 TiAlSiN 梯度涂层。利用 XRD、SEM、OM 以及切削试验探讨不同含 Si 层梯度结构对涂层物相、表面形貌、膜基结合强度、摩擦磨损以及切削性能的影响。结果显示: 不同含 Si 层梯度结构的 TiAlSiN 涂层主要由固溶的 (Ti, Al)N 和 (Al, Ti)N 相组成。其中, 低 Si 直接过渡的 TiAlSiN 涂层 (S3) 呈现出较高的硬度、良好的膜基结合力、较低的涂层残余应力和摩擦因数。铣削结果显示, 涂层刀具的切削磨损机理主要表现为粘着磨损。当切削速度为 80 m/min 时, 低 Si 过渡涂层 (S3 涂层) 表现出更高的切削长度 (925 m), 显著高于 S1 涂层的 525 m; 当切削速度由 80 m/min 增加至 110 m/min 时, S3 涂层切削长度增加到 1650 m。对含 Si 刀具涂层进行梯度设计, 可有效提高涂层的膜-基结合强度和涂层刀具的切削性能。

**关键词:** 多弧离子镀; TiAlSiN 涂层; 梯度涂层; 切削性能

中图分类号: TG174.444

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)02-0034-10

## Preparation and Cutting Performance of TiAlSiN Gradient Coating by Multi-arc Ion Plating

WANG Peng<sup>1,2</sup>, XU Changqing<sup>3</sup>, CAI Fei<sup>1</sup>, SI Songhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Shihong<sup>1,2</sup>, LIANG Jiagang<sup>3</sup>

(1. Reserch Center of Modern Surface and Interface Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China; 2. School of Material Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China; 3. AnHui Province Key Laboratory of Heavy Duty Special Vehicle Engine, Anhui Hualing Automobile Co., Ltd, Ma'anshan 243000, China)

**Abstract:** TiAlSiN gradient coatings with different Si containing layer structures were deposited on cemented carbide tools using ion source-enhanced multi-arc ion plating technique. XRD, SEM and cutting experiments were used to examine the effects of different gradient structures on the phases, surface morphology, adhesive strength, residual stress, wear and cutting performance of the deposited TiAlSiN coatings. The results show that the TiAlSiN coatings with different Si containing layer structures are composed mainly of solid solution (Ti, Al)N and (Al, Ti)N phases. Among all the three coatings, the S3 coating with low Si content gradient structure exhibits high hardness, good adhesion, low residual stress and low friction coefficient. The cutting results show that the typical wear mechanism of the coated tool is mainly represented by adhesive wear. When the cutting speed is 80 m/min, the S3 coating coated tools exhibits the higher cutting length (925 m), which is much higher than that of the S1 coated tools (525 m). With further increasing the cutting speed to 110 m/min, the cutting length of the S3 coating coated tools increases to 1650 m. It is demenstrated that the improved adhesive strength and cutting performance of the coated tools can be obtained by designing the gradient structure for the Si containing coating.

**Keywords:** multi-arc ion plating; TiAlSiN coating; gradient coating; cutting performance

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-02-04

通信作者: 张世宏 (1981—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 表面工程; E-mail: tougaoyouxiang206@163.com

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1808085QE131); 安徽省重点研究和开发计划专项 (1804b06020370); 国家自然科学基金 (51305002, 51522502)

**Fund:** Supported by Natural Science Foundation of Anhui Province (1808085QE131), Key Research and Development Plan of Anhui Province (1804b06020370) and National Natural Science Foundation of China (51305002, 51522502)

引用格式: 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.

## 0 引言

TiAlN 涂层因其具有较高的硬度、耐磨性和抗氧化性,以及可以有效提高刀具的使用寿命,从而成为早期常用的刀具涂层之一。近年来,高速切削和干式切削技术的快速发展,对刀具涂层的耐磨性、热稳定性和抗氧化性等提出了更高的要求。例如,在高速铣削难加工材料时,刀具在受到切削力和切削热的共同作用下,切削刀具刃口处的温度高达 1000 ℃,导致刀具涂层的微观组织结构发生变化,涂层发生软化,其硬度急剧下降。而涂层刀具失去涂层的保护作用,快速发生失效<sup>[1]</sup>。

TiAlSiN 硬质涂层是在 TiAlN 涂层的基础上,通过添加 Si 元素所形成的新一代高性能刀具涂层。李伟等<sup>[2-4]</sup> 研究报道, TiAlSiN 硬质涂层中 Si 元素具有细化晶粒、增加涂层硬度的作用。此外,随着 Si 元素的加入,高温氧化时 TiAlN 涂层表面易形成含 Si 的氧化物,抑制了涂层内金属元素向外扩散,同时阻挡了外界氧气向涂层内部扩散,涂层的热稳定性与抗高温氧化性能得到显著提高,其抗热稳定性能高达 1100 ℃<sup>[5]</sup>。曾俊杰等<sup>[6]</sup> 比较了 TiAlN 和 TiAlSiN 涂层氮化硅刀具干式切削加工灰铸铁性能,结果显示 TiAlSiN 涂层表现出比 TiAlN 涂层具有更长的切削寿命。与 TiAlN 硬质涂层相比, TiAlSiN 硬质涂层具有更高的硬度,更好的耐磨损性能、抗高温氧化性和高温热稳定性。因此,其在汽车零部件、精密模具以及精密机械加工等方面均具有广泛的应用前景。

汽车发动机作为汽车核心部件,其表面加工质量的好坏决定了汽车整体性能的高低。TiAlSiN 硬质涂层刀具由于其良好的综合力学性能和切削性能,被应用于切削加工发动机。但是, TiAlSiN 硬质涂层中存在较高的残余应力和脆性 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 相,导致涂层的结合力降低,在切削过程中涂层易发生剥落<sup>[7-8]</sup>。确保 TiAlSiN 涂层在具有高硬度的同时,还具有良好的膜基结合强度,许多学者展开了详细的研究。如谭超等<sup>[9-10]</sup> 研究了多层结构对 TiAlSiN 涂层影响,结果表明与单层涂层相比, TiAlSiN 多层梯度涂层具有较好的结合力和韧性,以及更低的磨损率。周军等<sup>[11]</sup> 通过改变过渡层成分,发现过渡层成分对 TiAlSiN 涂层的性能

具有重要的影响。

文中通过设计不同含 Si 层梯度过渡结构的 TiAlSiN 涂层,以期望提高超硬涂层与基体的结合力,从而提高其切削加工灰铸铁 (HT250) 的切削性能。

## 1 试验过程

### 1.1 涂层制备

试验所采用镀膜设备为自主研发的多弧离子镀装置 (图 1)。试验所用基体材料为硬质合金 (YG8) (16 mm×16 mm×4.5 mm) 和直径为 6 mm 的硬质合金 (YG8) 直径立铣刀。所有试样均先用金刚石磨盘对进行研磨和抛光,抛光后基体材料表面粗糙度为 21 nm,随后依次放入酒精、去离子水中超声清洗并烘干,最后将试样放置于镀膜设备中。试验采用靶材为 AlTi (原子比 67:33) 合金靶材和 AlTiSi (原子比 60:30:10) 合金靶材,且分别安装于 1、4 号位置和 2、3 号位置 (图 1)。镀膜之前先将镀膜设备抽真空至  $2.0 \times 10^{-2}$  Pa,并加热至 450 ℃。随后通入纯度为 99.999% 的氩气,气压为  $4.0 \times 10^{-2}$  Pa,同时开启圆柱形 Ti 靶,电流为 90 A,产生 Ti 离子,并激发产生大量具有高能量的 Ar 离子。随后开启基体负偏压 200 V,以吸引氩离子对基材表面进行轰击刻蚀清洗处理,时间为 30 min。

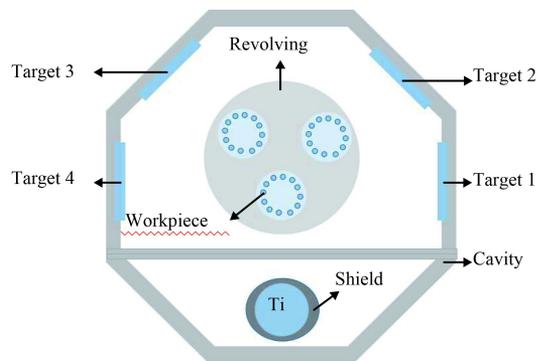


图 1 多弧离子镀设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-arc ion plating equipment

通过控制 AlTi 和 AlTiSi 合金靶材的先后开启顺序和数目,来制备不同 Si 含量梯度变化的 TiAlSiN 涂层,涂层结构设计示意如图 2 所示,分别标记为 S1、S2 和 S3 涂层,各涂层具体沉积参数如表 1 所示。

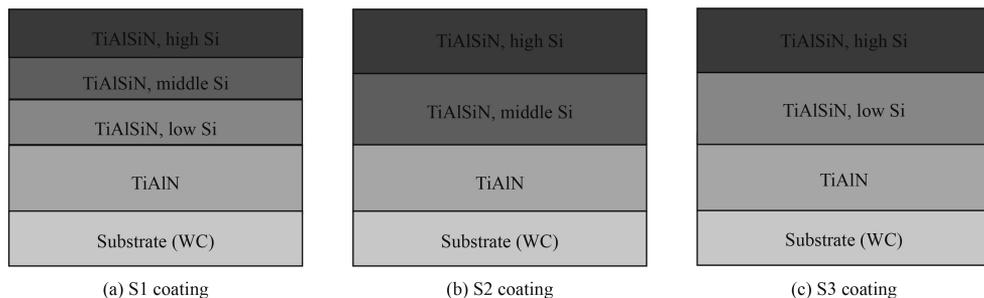


图2 不同含 Si 层梯度变化 TiAlSiN 涂层结构设计示意图

Fig.2 Schematic diagram of structural design of TiAlSiN coating with different Si gradient layers

表 1 涂层制备工艺

Table 1 Parameters of coating depositing

Parameter	S1				S2			S3		
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3
Step	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3
Time / min	110	40	30	40	110	30	40	110	40	40
Pressure / Pa	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
N <sub>2</sub> /	400	420	450	360	400	420	360	400	450	360
Temperature / °C	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Voltage / V	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60
Current / A	120 / -	120 / 120	120 / 120	- / 120	120 / -	120 / 120	- / 120	120 / -	120 / 120	- / 120
Target 1	AlTi	AlTi	AlTi		AlTi	AlTi		AlTi	AlTi	
Target 2		AlTiSi	AlTiSi	AlTiSi		AlTiSi	AlTiSi		AlTiSi	AlTiSi
Target 3			AlTiSi	AlTiSi		AlTiSi	AlTiSi			AlTiSi
Target 4	AlTi	AlTi	AlTi		AlTi	AlTi		AlTi	AlTi	

## 1.2 涂层表征

通过 Phenom Pro 型扫描电子显微镜 (SEM) 对涂层表面形貌和截面形貌分析并使用其附带能谱仪 (EDS) 对涂层成分进行分析; 利用 P-7 型台阶测试仪对沉积态涂层表面进行三维形貌分析; 利用 Bruker-D8 Advance 型 X 射线衍射仪测定涂层物相组成; 利用曲率法测量薄膜中的残余应力<sup>[12-13]</sup>; 采用洛氏硬度计以 60 kg 的载荷加载于涂层表面, 并结合 AxioCam ERc 5s 型金相显微镜对卸载后的涂层表面剥落情况进行涂层结合力定性分析; 采用 MH-5LD 维氏硬度计对涂层硬度进行测试, 载荷分别为 0.25、0.5 和 1 N, 每个样品测试 10 次, 取平均值。采用 THT 型球盘式摩擦磨损设备对涂层磨损性能进行测试。试验选用对磨材料是直径为 6 mm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 球, 转速 336 r/min, 磨损时间 60 min, 磨痕半径 2 mm, 温度 25 °C, 湿度 60%, 并结合 P-7 轮廓膜厚示廓仪和扫描电镜对磨痕形貌和磨损机理进行分析。

通过在 MCV850 立式铣床上对上述 3 种不同 Si

含量梯度变化结构的 TiAlSiN 涂层刀具进行切削试验。被切削材料为 HT250, 硬度为 190 HB。切削参数: 刀具悬伸量 23 mm, 每转进给量为 0.2 mm/r, 径向切深为 0.3 mm, 轴向切深为 2 mm, 切削速度分别为 80 m/min 和 110 m/min。每切削 50 m, 即采用 ISM 型便携式工具显微镜观察刀具后刀面磨损情况。当后刀面磨损达到磨钝标准 VB 为 0.2 mm<sup>[14]</sup>, 停止切削, 并采用扫描电镜对磨损后的涂层刀具后刀面进行分析。

## 2 结果及分析

### 2.1 涂层 SEM 表面形貌

图 3 为不同 Si 含量梯度结构 TiAlSiN 涂层的表面形貌。可以看出, 3 种结构涂层表面均存在微小颗粒和浅坑, 这为典型的利用多弧离子镀技术所制备的涂层表面形貌特征<sup>[15]</sup>。颗粒生成主要原因是由于熔融态的金属液滴在涂层表面固化所致。而在负偏压作用下, 高能离子轰击涂层表面, 涂层表面结合力较差的颗粒被轰击发生剥离, 从

而形成浅坑。此外, 涂层在沉积过程中, 由于收缩作用也可在涂层表面形成浅坑。对涂层表面粗糙

度测试, 结果见表 2。S3 涂层表面粗糙度最小, 为 255 nm, S1 涂层表面粗糙度最大, 为 275 nm。

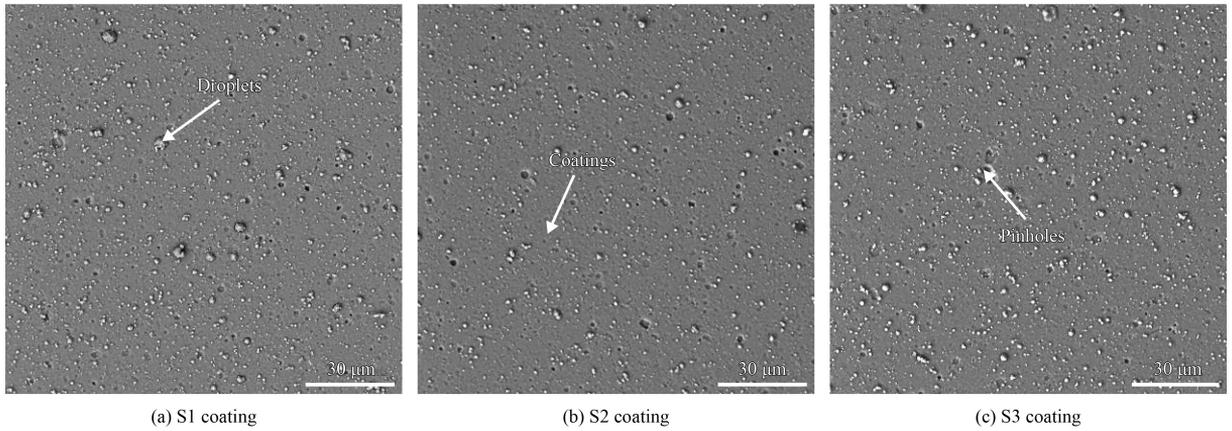


图 3 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of TiAlSiN coatings with different Si gradient layer structures

表 2 不同梯度结构 TiAlSiN 涂层表面粗糙度

Table 2 Roughness of TiAlSiN coatings with different gradient structures (nm)

Coating	S1	S2	S3
Roughness	275	263	255

## 2.2 涂层 SEM 截面形貌

图 4 为不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的

球坑形貌。由图 4 可看出, 涂层分层明显, 且通过球坑法计算各涂层厚度如表 3 所示。结合表 1 涂层制备工艺参数可知, S1 涂层球坑形貌中(图 4(a)), 由内到外依次为硬质合金基体、TiAlN 层、低 Si 的 TiAlSiN 涂层、中 Si 的 TiAlSiN 涂层和高 Si 的 TiAlSiN 涂层。S2 和 S3 涂层也分别表现出类似的分层涂层结构。不同梯度结构的 TiAlSiN 涂层中

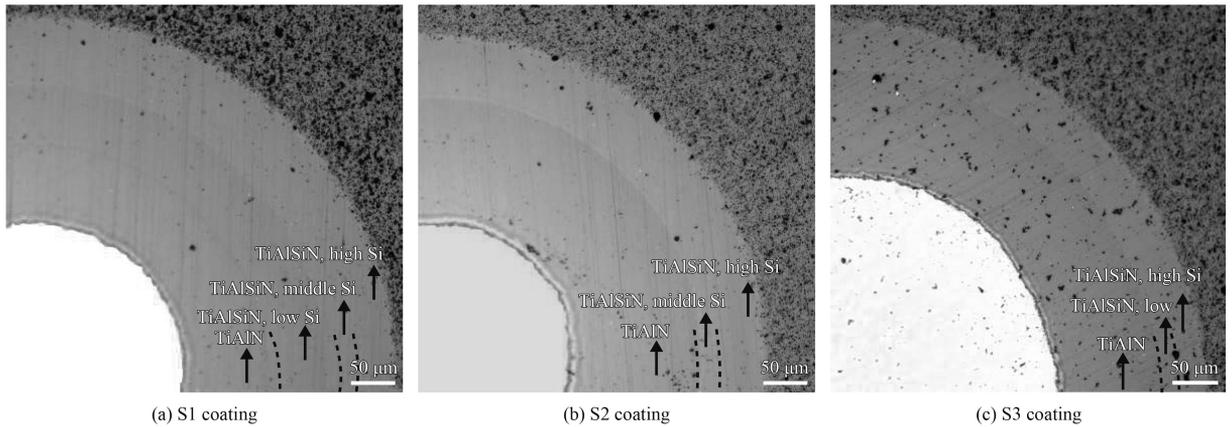


图 4 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层球坑形貌

Fig.4 Ball crater morphologies of TiAlSiN coated with different Si gradient layer structures

表 3 不同梯度结构 TiAlSiN 涂层厚度

Table 3 Thickness of TiAlSiN coatings with different gradient structures (nm)

Coating	S1	S2	S3
TiAlN	1.51	2.27	2.31
TiAlSiN, low Si	0.98		0.63
TiAlSiN, middle Si	0.53	0.61	
TiAlSiN, high Si	0.87	0.89	0.84

的相同涂层厚度存在一定区别, 其主要原因由于靶材热蒸发损耗导致沉积效率变化所致。

图 5 为不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的横截面形貌。由图可以看出, 最外层工作层与内层 TiAlN 打底层之间出现明显的分界面。胡明媚等人<sup>[3]</sup>研究了 Si 对涂层微观结构和性能影响。结果表明, TiAlN 涂层在沉积过程中以柱状

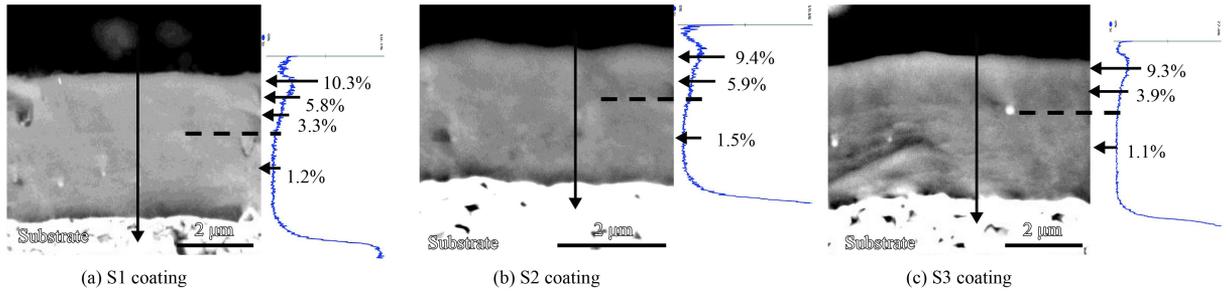


图5 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层横截面形貌

Fig.5 Cross section morphologies of TiAlSiN coatings with different Si gradient layer structures

方式生长,形成粗大的柱状晶组织。最外层为 TiAlSiN 涂层,其中 Si 和 Al 原子均能溶解于 TiN 晶格中,导致晶格发生畸变,晶格常数减小;同时 Si 元素在涂层中可形成非晶的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  相,形成的非晶  $\text{Si}_3\text{N}_4$  可包裹纳米晶 TiAlN 形成纳米复合结构,抑制 TiAlN 晶粒长大,从而涂层晶粒发生细化<sup>[16-17]</sup>。S1 结构含 Si 涂层中, Si 质量分数由 10.3% 降低为 5.8%,之后又降低至 3.3%, Si 质量分数变化主要与涂层制备过程中,开启 AlTiSi 靶材和 AlTi 靶材数量有关。S2 和 S3 涂层 Si 含量变化也均与涂层制备工艺密切相关。

### 2.3 涂层 XRD 物相

图 6 为不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的 XRD 衍射图谱。由图可以看出,不同 Si 含量梯度变化的结构对涂层相结构未产生明显区别,涂层物相结构均是由固溶的 (Al, Ti)N 和 hcp-AlN 物相组成。这与文献<sup>[16-17]</sup>中报道的 TiAlSiN 涂层中

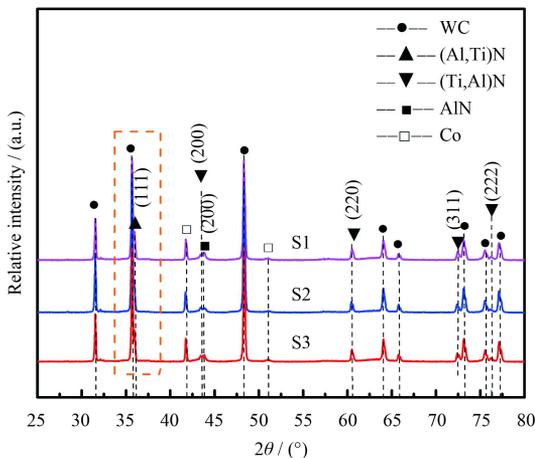


图6 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of TiAlSiN coatings with different Si gradient layer structures

主要存在 AlN、(Ti, Al)N 和非晶的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  相比较符合。S1、S2 和 S3 涂层的 XRD 图谱均出现了 (Ti, Al)N 的 (200)、(220) 和 (311) 的特征衍射峰。大量的 Al 原子取代 Ti 原子,形成 Ti 溶入 AlN 的 (Al, Ti)N 物相结构,同时也存在部分 Al 原子结合 N 原子,以 hcp-AlN 相结构存在于涂层中。

### 2.4 涂层残余应力与硬度

图 7 为不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的残余应力。由图 7 可知,3 种涂层均显示出压应力状态, S1、S2 和 S3 涂层的残余应力分别为 -4.3、-4.6 和 -3.7 GPa。S3 涂层残余应力数值最小, S2 残余应力数值最大。

图 8 为不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的显微硬度曲线。可以发现,涂层在 0.25 N 载荷力下的显微硬度值没有明显的区别,这主要是由于较小的载荷作用下,压头主要作用在最上层的 TiAlSiN 工作层上。当增加载荷到 0.5 N 时, S2 涂层表现出较高的显微硬度,这主要是由于随着载荷的增加,压痕变深,过渡层对硬度也逐步产生

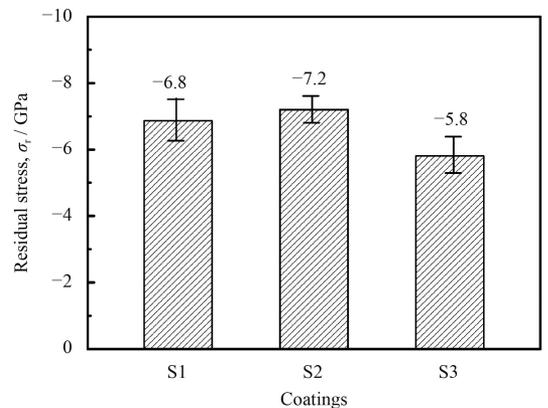


图7 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层残余应力

Fig.7 Residual stresses of TiAlSiN coatings with different Si gradient layer structures

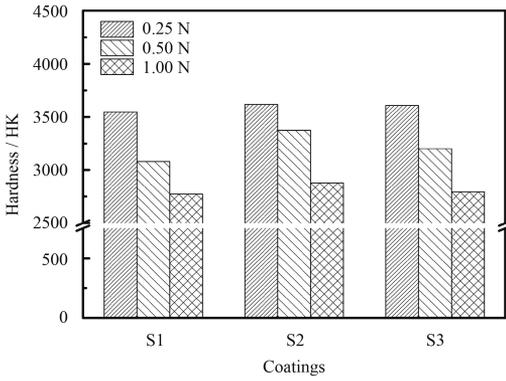


图 8 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的显微硬度

Fig.8 Microhardness of TiAlSiN coating with different Si gradient layer structure

影响。其中, S2 涂层的过渡层中 Si 含量最高, 其对涂层硬度贡献较大, 导致 S2 涂层硬度增加。随着载荷进一步增加至 1 N 时, 由于受到较软基材的影响, 3 种结构涂层硬度趋于一致。

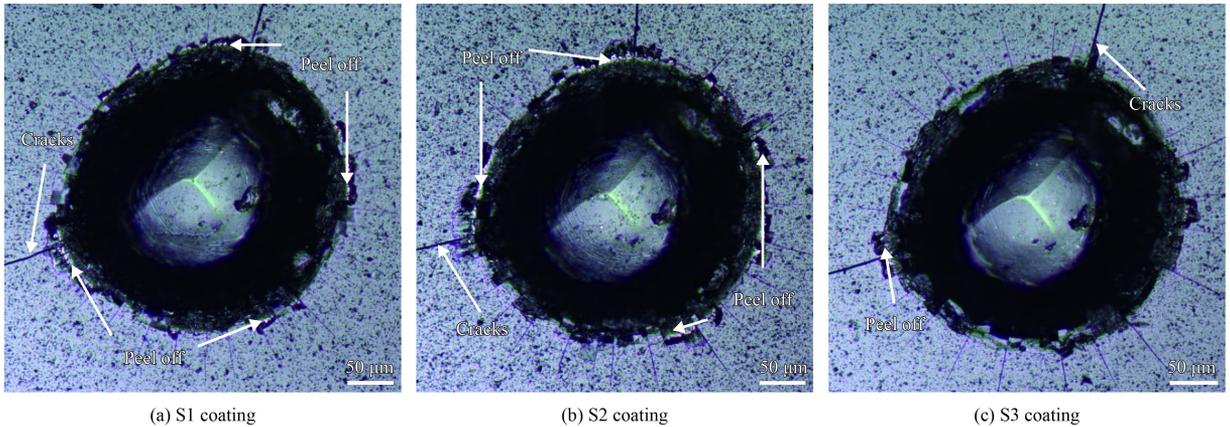


图 9 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的压痕形貌

Fig.9 Indentation morphologies of TiAlSiN coatings with different Si gradient layer structures

### 2.6 摩擦磨损性能

图 10 为不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层摩擦因数。可以发现, 摩擦因数在磨损前期 (0~600 s) 快速增加。当磨损时间超过 600 s 后, 摩擦因数平缓, 进入稳定磨损阶段。由图可知, S1、S2 和 S3 涂层的平均摩擦因数分别为 0.86、0.76 和 0.7。S3 涂层显示出较低的摩擦因数, 这可能是其具有最低的表面粗糙度。涂层摩擦磨损性能由组织结构、化学成分、硬度、表面粗糙度等因素综合的结果。S3 涂层由于应力小、膜基结合力强、表面粗糙度低, 在摩擦磨损过程中表现出较长的稳定磨损阶段和较低的摩擦因数。

3 个涂层的磨损形貌类似, 因此选取了 S1 涂

### 2.5 涂层膜基结合力

图 9 为不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的压痕形貌。由图 9 可以看出, 3 种结构 TiAlSiN 涂层压痕边缘均存在放射状裂纹。其中 S1 涂层压痕周围出现大量的涂层剥落, 而 S3 涂层压痕边缘则无明显涂层剥落发生。结合涂层膜-基结合强度评判标准<sup>[18]</sup>可知, S1、S2 和 S3 涂层结合强度等级分别为 HF-3、HF-3 和 HF-2。多层涂层中, 当层与层之间的成分、组织结构、硬度以及热膨胀系数差异较小时, 涂层通常呈现出具有较低的残余应力和较高的膜-基结合强度。文中 S1 和 S2 涂层由于层与层之间差异大, 且显示出较高的残余压应力, 膜-基体系处于不稳定的高能态。当涂层受到外加载荷力的作用时, 极易以薄膜开裂或剥落等方式释放能量, 表现出较低的膜-基结合强度。

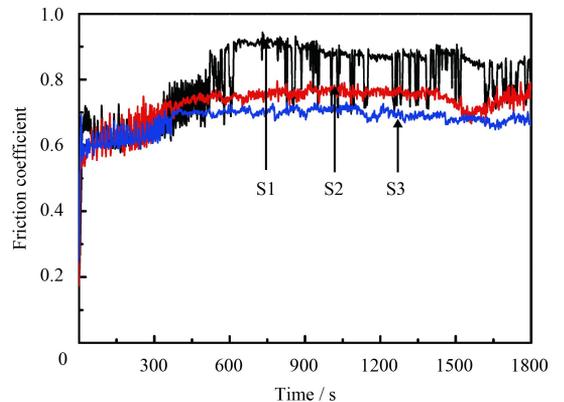


图 10 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层的摩擦因数

Fig.10 Friction coefficient curves of TiAlSiN coatings with different Si gradient layer structures

层磨痕边缘形貌,如图11所示。从图中可以看出犁沟状磨痕以及右侧有磨屑堆积,由此可以推断出涂层的磨损形式主要为磨粒磨损。

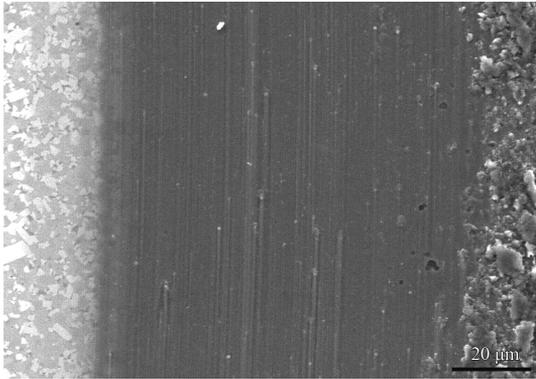


图11 典型S1涂层的磨痕形貌

Fig.11 Typical wear morphology of S1 coatings

## 2.7 涂层切削性能

图12为不同切削条件下不同含Si层梯度结构TiAlSiN的切削寿命曲线。以后刀面磨损宽度达到0.2 mm为磨钝标准<sup>[14]</sup>,由图12(a)可知,当切削速度为80 m/min时,S3涂层刀具切削长度最长,达到925 m;S2涂层刀具切削长度最短,仅有525 m。S3涂层刀具在3种结构涂层中表现出最好的切削性能,切削长度比S2涂层刀具提高了约2倍。当切削速度增加到110 m/min时,如图12(b)所示,3种结构涂层刀具切削寿命均有所增加。特别地,S3涂层刀具稳定磨损阶段时间延长,表现出良好的切削性能,其切削寿命高达1650 m,接近于S2涂层切削长度(650 m)的3倍。

图13为TiAlSiN涂层刀具在切削长度为400 m的后刀面形貌。由图13可看出,S1和S2涂层刀具在加工400 m后,后刀面磨损严重,表面存在大片的涂层剥落区域。尤其是S2涂层刀具,在切削刃处裸露出亮白色的基体材料,在后期的切削过程中,刀具失去涂层的保护作用,导致提前失效。由图13(c)可以发现,S3刀具在加工400 m后,后刀面出现轻微磨损,涂层保持完整,涂层刀具处于稳定磨损阶段,在后续切削过程中依然能表现出优异的切削性能。

由切削曲线结果还可以发现,S3结构涂层刀具在切削速度为80 m/min时,加工长度为925 m,而当切削速度增加至110 m/min时,加工长度为1650 m,即随着切削速度增加,刀具切削寿命显

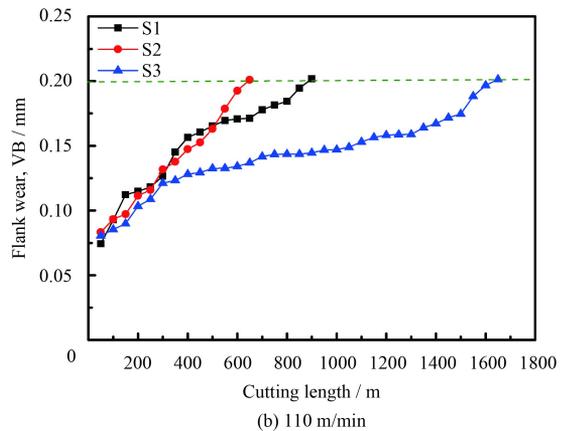
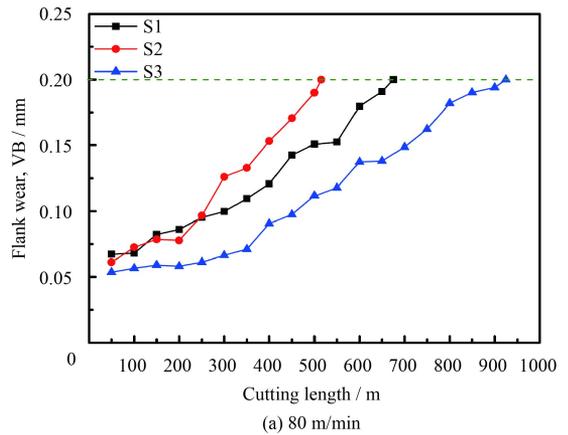
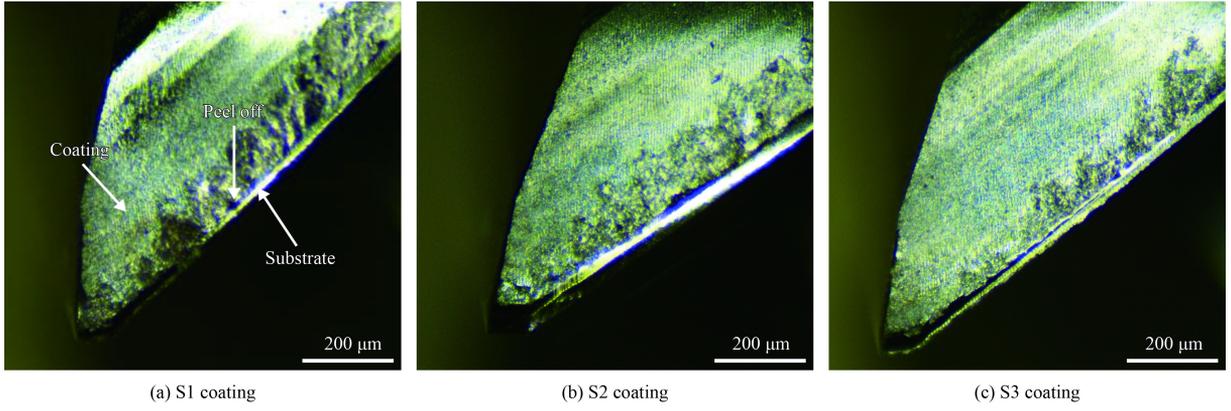


图12 不同切削速度条件下不同含Si层梯度结构TiAlSiN涂层刀具切削寿命曲线

Fig.12 Cutting life curves of TiAlSiN coated tools with different Si gradient layer structure under different cutting speeds

著提高。切削速度越快,刀具所受切削力减小,而切削温度增加<sup>[19]</sup>。当S3结构涂层刀具切削速度由80 m/min增加至110 m/min时,涂层刀具所受切削力减小,涂层发生剥落的几率降低,涂层刀具的切削寿命增加。此外,由于含Si涂层具有较高的硬度和高温稳定性,且切削又是在湿切条件下进行,因此切削热对TiAlSiN涂层刀具影响较小。因此,S3涂层刀具在110 m/min切削速度下表现出出色的切削性能。

图14为不同含Si层梯度结构TiAlSiN涂层刀具在达到磨钝标准(0.2 mm)后,后刀面的SEM磨损形貌以及相应的EDS能谱分析。由图14(a)刀具涂层表面区域放大图并结合表4中EDS结果可知,涂层表面白亮色区域为切屑,灰色区域为涂层。涂层刀具表面表现出不同程度的撕裂剥落现象,这主要是切屑在切削过程中会与涂层表面发生粘着现象,且在剪切应力作用下,会使涂层



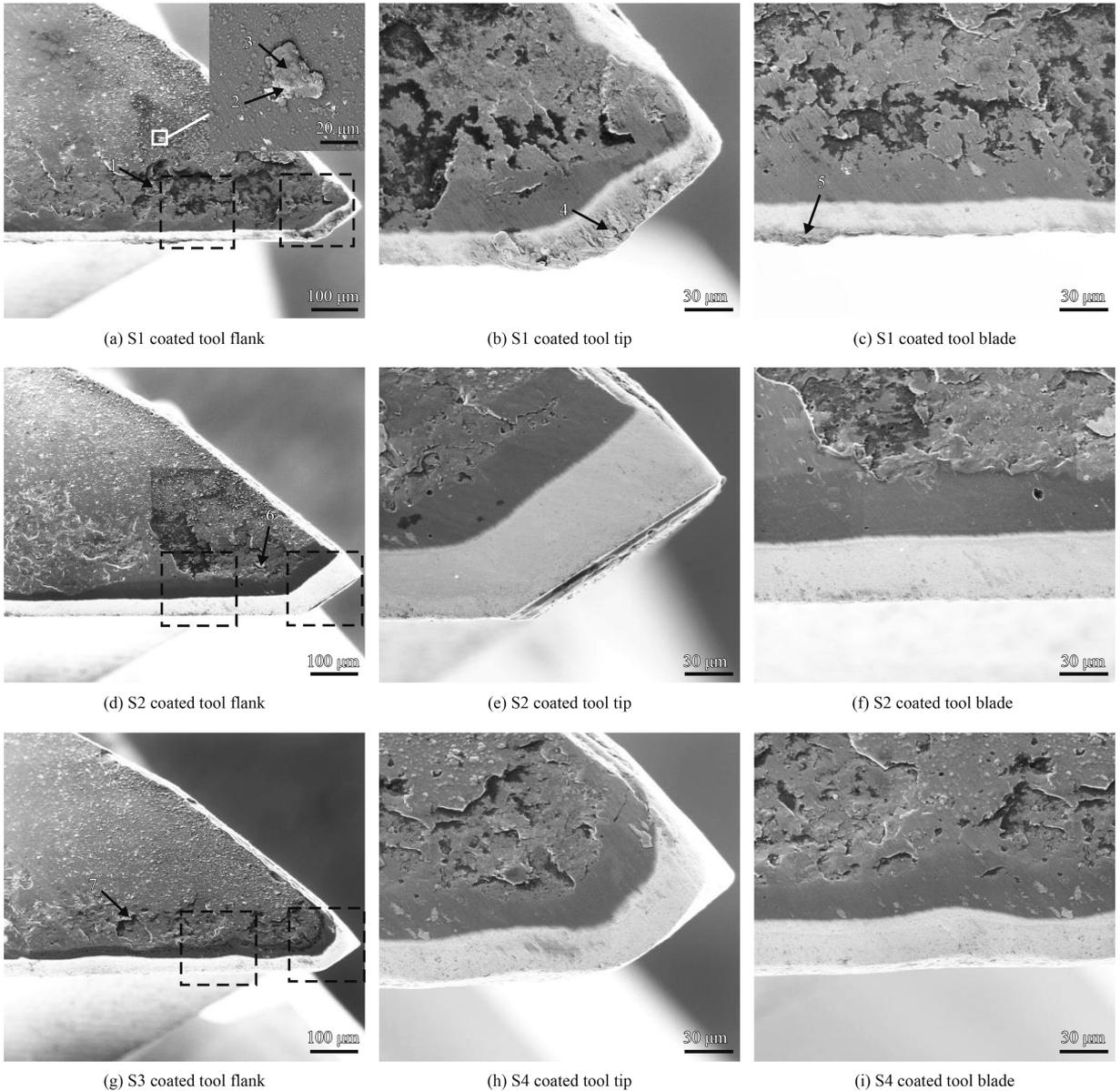
(a) S1 coating

(b) S2 coating

(c) S3 coating

图 13 不同含 Si 层梯度结构 TiAlSiN 涂层刀具在切削长度为 400 m 后的后刀面形貌

Fig.13 Flank morphologies of different Si gradient layer structure TiAlSiN coated tool after a cutting length of 400 m



(a) S1 coated tool flank

(b) S1 coated tool tip

(c) S1 coated tool blade

(d) S2 coated tool flank

(e) S2 coated tool tip

(f) S2 coated tool blade

(g) S3 coated tool flank

(h) S4 coated tool tip

(i) S4 coated tool blade

图 14 不同含 Si 层梯度 TiAlSiN 涂层刀具在失效后刀面磨损形貌

Fig.14 Flank wear morphologies of TiAlSiN coated tools with different Si gradient layer structure after failure

脱离刀具表面。涂层在切削力和热的共同作用下,切屑及硬质点与涂层表面发生粘结作用,出现大面积粘结片状剥落,产生粘结磨损,粘着力大于涂层膜基结合强度时,涂层被撕裂随切削排出<sup>[20]</sup>。文中由于S3结构涂层具有良好的膜基结合强度以及具有较好的抗粘结磨损性,涂层剥落深度浅且剥落面积较小。EDS结果显示有O元素,其主要来源于切屑。随着切削的进行,在切削力和切削热共同作用下,切屑易发生氧化。

表4 涂层刀具失效后EDS分析

Table 4 EDS analysis of coated tool after failure (a/%)

Location	Fe	O	Si	Al	Ti
1	65.8	24.7	4.5	2.5	2.4
2	71.6	18.7	4.0	2.5	3.3
3	65.4	20.4	5.5	3.9	4.8
4	67.7	31.9	0.3	0.7	0.4
5	0.3	5.7	9.7	53.9	30.4
6	87.6	8.3	2.2	1.1	0.8
7	70.7	19.9	7.0	1.5	0.9

对涂层刀具刀尖区域和刀刃磨损区域形貌进行分析,结果见图14。在切削过程中,当切屑不易排出时,极易在刀具的前刀面和切削刃处形成积屑瘤,增加了刀具所受的切削力,加剧了刀具的磨损<sup>[21-22]</sup>。对图14局部区域成分分析可知,S1涂层由于排屑不畅,在切削力和切削热共同作用下,易在刀尖处形成积屑瘤,且在加工过程中破裂成碎片粘附在刀具涂层表面,加剧了刀具磨损。此外,破碎的积屑瘤也易粘结在切削刃处,极易造成刀刃在切削过程中发生崩裂情况,加快刀具失效。S2涂层由于表面涂层剥落,对刀具失去保护作用,导致涂层刀具提前失效。S3涂层在刀尖处有少量的积屑瘤生成。由上述切削结果及形貌分析可以发现,S1涂层刀具失效形式主要以积屑瘤、涂层剥落和微崩刃形式为主;S2涂层刀具主要以涂层剥落形式为主;S3刀具涂层在刀尖处有少量的积屑瘤存在,涂层刀具失效主要以积屑瘤和涂层剥落形式失效。综合来看,S3涂层表现出较好的切削性能和对刀具基体的保护作用,能够显著提高刀具的使用寿命。

### 3 结论

(1) 制备的不同含Si层梯度结构的TiAlSiN涂

层主要由固溶的(Ti, Al)N和AlN相组成,涂层呈现明显的梯度分层结构。

(2) 与S1和S2涂层相比,S3涂层具有更高的膜基结合强度和更高的残余压应力。S3涂层具有较低的摩擦因数,在不同切削速度条件下,S3涂层均表现出具有较长的使用寿命。且当切削速度从80 m/min增加至110 m/min时,所有涂层的切削寿命均显著增加。

(3) 3种结构涂层切削过程中均存在粘着磨损和氧化磨损。其中S1结构涂层失效主要以积屑瘤、涂层剥落和微崩刃形式为主,S2结构涂层为涂层剥落失效为主,S3结构涂层的失效模式为少量积屑瘤和涂层剥落。

### 参考文献

- [1] 龙震海,王西彬,刘志兵. 高速铣削难加工材料时硬质合金刀具前刀面磨损机理及切削性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 83-87.  
LONG Z H, WANG X B, LIU Z B. Research on the wear mechanism and cutting performance of cemented carbide tool rake face during high-speed milling of difficult-to-machine materials[J]. Journal of Tribology, 2005, 25(1): 83-87 (in China).
- [2] 李伟,赵永生,刘平,等. Si含量对TiAlSiN纳米复合涂层的微观结构和力学性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2014, 35(2): 52-56.  
LI W, ZHAO Y S, LIU P, et al. Influence of Si content on microstructure and mechanical properties of TiAlSiN nanocomposite coatings[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2014, 35(2): 52-56 (in China).
- [3] 胡明娟,朱丽慧,王川,等. Si对Ti-Al-Si-N涂层微观结构及性能的影响[J]. 硬质合金, 2011, 28(5): 332-336.  
HU M M, Zhu L H, WANG C, et al. Effect of Si on microstructure and properties of Ti-Al-Si-N Coating[J]. Cemented Carbide, 2011, 28(5): 332-336 (in China).
- [4] MUSIL J. Hard and superhard nanocomposite coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 125(1): 322-330.
- [5] VENNEMANN A, STOCK H R, KOHLSCHEEN J, et al. Oxidation resistance of titanium-aluminium-silicon-nitride coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 174(174): 408-415.
- [6] 曾俊杰,龙莹,伍尚华. PVD-TiAlN和PVD-TiAlSiN涂层氮化硅刀具的切削性能研究[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(9): 2450-2455.  
ZENG J J, LONG Y, WU S H. Study on cutting performance of PVD-TiAlN and PVD-TiAlSiN coated Si3N4 cut-

- ting tool[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(9): 2450-2455 (in China).
- [7] 时婧, 裴志亮, 宫骏, 等. Si含量对电弧离子镀Ti-Al-Si-N薄膜组织结构和力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2012(11): 1349-1356.
- SHI J, PEI Z L, GONG J, et al. Effect of Si content on the microstructure and mechanical properties of Ti-Al-Si-N films deposited by cathodic vacuum arc ion plating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012(11): 1349-1356 (in China).
- [8] CHEN L, WANG S Q, DU Y, et al. Machining performance of Ti-Al-Si-N coated inserts[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205(2): 582-586.
- [9] 谭超, 何卫锋, 曹鑫, 等. 多层梯度结构对TiAlSiN涂层摩擦磨损性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(3): 68-76.
- TAN C, HE W F, CAO X, et al. Effects of gradient multilayer-structure on tribological property of TiAlSiN coating[J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(3): 68-76 (in China).
- [10] 邹伶俐. 多弧离子镀制备纳米多层TiAlSiN涂层的性能研究[J]. *机械工程师*, 2018(8): 98-100.
- ZOU L L. Study on Properties of nano-multilayer TiAlSiN coating prepared by multi-arc ion plating[J]. *Mechanical Engineers*, 2018(8): 98-100 (in China).
- [11] 周军, 樊湘芳, 丰振东, 等. 过渡层对TiAlSiN涂层性能的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2017(37): 983.
- ZHOU J, FAN X F, FENG Z D, et al. Enhanced oxidation resistance of TiAlSiN coatings grown on Zr4 alloy covered with Cr-Transition layer[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2017(37): 983 (in China).
- [12] STONEY G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1909, 82(309): 40-43.
- [13] ZHAO S S, YANG Y, LI J B, et al. Effect of deposition processes on residual stress profiles along the thickness in (Ti, Al)N films[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(21): 5185-5189.
- [14] 徐鸿本. *机械加工工艺手册*[M]. 辽宁科学技术出版社, 2015.
- XU H B. *Machining process manual*[M]. Liaoning Science and Technology Press, 2015 (in Chinese).
- [15] LI J, ZHANG S, LI M. Influence of the C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> flow rate on gradient TiCN films deposited by multi-arc ion plating[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 283(14): 134-144.
- [16] WANG S Q, CHEN L, YANG B, et al. Effect of Si addition on microstructure and mechanical properties of Ti-Al-N coating[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2010, 28(5): 593-596.
- [17] DERFLINGER V H, SCHUTZE A, ANTE M. Mechanical and structural properties of various alloyed TiAlN-based hard coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200(16-17): 4693-4700.
- [18] 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 China).
- [19] 王豪. 复合涂层铣刀高速铣削淬硬钢的切削性能研究[D]. 广西大学, 2010.
- WANG H. High speed milling cutters composite corating hardened steel cutting performance study[D]. Guangxi University, 2010 (in China).
- [20] 周泽华. *金属切削原理-2版*[M]. 上海科学技术出版社, 1993.
- ZHOU Z H. *Metal Cutting Principles-2*[M]. Shanghai Science and Technology Press, 1993 (in Chinese).
- [21] 赵轸. *材料表面工程导论*[M]. 西安交通大学出版社, 1998.
- ZHAO Z. *Introduction to Surface Engineering of Materials*[M]. Xi'an Jiaotong University Press, 1998 (in Chinese).
- [22] 张幼楨. *金属切削理论*[M]. 航空工业出版社, 1988.
- ZHANG Y Z. *Metal cutting theory*[M]. Aviation Industry Press, 1988 (in Chinese).