

高温合金刀具 AlTiN 涂层结构研究

于忠光, 吕显豹, 张继波

国宏工具系统(无锡)股份有限公司

摘要: 随着我国航空航天行业的迅速发展,以镍基合金为代表的高温合金加工制造增多。高温合金具有优异的高温强度,良好的抗氧化和抗热腐蚀性能,良好的疲劳性能、断裂韧性等综合性能,在切削加工中存在切削温度高、导热性差、加工硬化等特性,因此,要实现高效、高质量的加工,必须重视刀具寿命。刀具寿命与刀具涂层有密切关系,本文通过研究刀具涂层性能来改善刀具寿命。采用电弧离子镀法进行涂层,通过研究不同偏压和沉积温度,在钨钢(硬质合金)基体上完成 AlTiN 涂层的制备;用扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)观察涂层的表面和截面形貌,并分析涂层的成分,用 X 衍射仪(XRD)分析涂层的物相结构,用纳米硬度计测量涂层的纳米硬度 H 、杨氏模量 E 和抗塑性变形因子 H^3/E^2 ,利用微米划痕仪分析涂层与基体的结合力;对所制备的不同涂层刀具进行 GH4169 高温合金切削加工试验,通过涂层刀具后刀面磨损值 VB 判断涂层切削性能。

关键词: GH4169 高温合金;AlTiN 涂层;刀具磨损;切削性能

中图分类号: TG711;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.04.006

Research on AlTiN Coating Structure of Cutting Tool for High-temperature Alloy

Yu Zhongguang, Lv Xianbao, Zhang Jibo

Abstract: With the rapid advances in aerospace industry, the processing of high-temperature alloys represented by nickel-base alloys has increased. Although high-temperature alloys have excellent high temperature strength, good oxidation resistance, thermal corrosion resistance, good anti-fatigue, fracture toughness and other comprehensive properties, there exist high cutting temperature, poor thermal conductivity and work hardening in the cutting process. In order to achieve the high efficiency and high quality processing, there are many technical problems to be solved. In this paper, the AlTiN coating is applied to the cemented carbide substrate by arc ion plating with different bias voltage and deposition temperature, then, the coating surface and cross section morphology are observed by scanning electron microscope (SEM) and energy spectrometer (EDS) and the coating composition is analyzed, the phase structure of the coating is also analyzed by XRD, the Nano hardness H , Young's modulus E and anti-plastic deformation factor H^3/E^2 of the coating are measured by nano-hardness meter. The cutting test on GH4169 high-temperature alloy is carried out with cutting tools of different coatings, and the cutting performance of the coating is judged by the wear value VB on the tool's flank face.

Keywords: GH4169 high-temperature alloy; AlTiN coating; tool wear; cutting performance

1 引言

高温合金切削加工的主要难点有:①切削力大,一般为钢材的 1.5~2 倍;②高温合金强度高,切削载荷大,消耗功率多,产生热量大,而导热系数小,仅为 45 钢的 1/4~1/3,故切削区的温度最高可达 1000℃左右,刀具易产生磨损;③材料中金属化合物和硬质点较多,刀具易崩刃;④加工硬化现象严重,已加工表面硬化程度可达基体的 1.5~2 倍^[1]。因此,要实现高效高质量加工,可以通过改善刀具基体、结构以及涂层来提高切削性能。本文通过研究涂层制备工艺,以期改善刀具的切削性能。

诸多学者针对高效切削 GH4169 高温合金进行

了大量研究。P. C. Jindal 等^[2]用三种不同的涂层切削 Inconel 718 合金,发现 TiAlN 涂层刀具的切削效果优于 TiCN 涂层和 TiN 涂层。TiAlN 的铝含量越高,抗氧化性越好,但也存在饱和性,所以研究 TiAlN 涂层可以提高刀具的高温红韧性和耐磨性^[3]。在电弧离子镀中,对基体施加一定的偏压,可以影响涂层的沉积速率、组织结构、残余应力及力学性能^[4];温度是影响涂层力学性能的另一个关键参数,基体沉积温度不仅可以影响薄膜组织结构,其高低还影响基体对气体杂质的吸附、基体的硬度、渗透层的深度、薄膜的硬度以及附着力等。根据吉布斯的吸附原理可知,温度越高,基体对气体杂质的吸附越少^[5]。Van Vinh Le 等^[6]研究了基体温度对电弧离子镀的影响,发现随着沉积温度的升高,薄膜晶粒尺寸逐渐增加,薄膜硬度和弹性模量先增加而后

略有降低。

以往的研究往往只是对不同涂层之间的对比,并未明确指出对 TiAlN 涂层温度和偏压的影响,也没有对比实际切削效果。基于此,本文通过仪器分析 TiAlN 涂层影响因素之间的关系,利用试切刀具实际效果验证涂层工艺的可行性。

2 试验条件

(1) 试验样品制备

选用 BALAZERS 的电弧离子镀设备 INGENIA 制备 TiAlN 涂层,采用 6 个圆形靶材 $Ti_{0.33}Al_{0.67}$,为了保证磨制刀具品质的一致性,使用国宏工具公司同一批次 D6R3 锥度球头刀具。刀具钝化处理后进行超声波清洗,将清洗后的刀具放在涂层设备的旋转平台上,保证刀具的公转和自转,使其均匀涂层。抽真空至 5×10^{-4} MPa,在离子室通入 50sccm 的氩气,电离出离子对工具表面进行刻蚀,为涂层做准备;通入氮气保持炉内真空度 3.5×10^{-2} MPa,电弧电流采用 130A,沉积涂层时间 90min,沉积温度选用 480℃,550℃,600℃ 三种方案,偏压设置为 -80V 和 -120V。

(2) 涂层性能检测

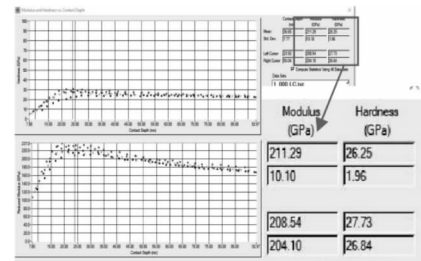
借助蔡司扫描电镜 EVO18 拍摄涂层形貌,采用 Bruker XFLASH 6130 分析涂层成分,采用荷兰帕纳科 EMPYREAN 分析涂层的物相结构,涂层的结合力采用瑞士 CSM 大载荷划痕测试仪器 RST,使用 Bruker TI Premier 纳米力学材料检测系统可以获得材料微区的硬度、弹性模量等力学数据,精确控制测试过程,以实现最大精度、可信度和重复性的真正定量纳米力学。

涂层后的刀具用 DMG NV5000 加工中心试切,被加工材料 GH4169(厚 2.0mm),切削参数为 $n = 2500\text{r/min}$, $a_p = 0.5\text{mm}$, $a_e = 0.3\text{mm}$,使用乳化液冷却方式。切削 21min 后,测量涂层刀具后刀面磨损值 VB ,通过 VB 的大小衡量涂层的耐磨性与抗氧化性,从而确认研究方案。

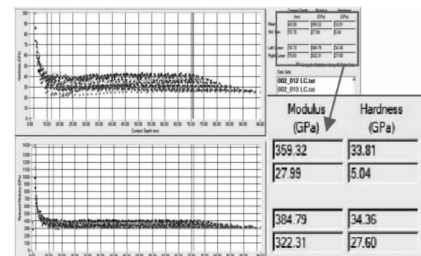
3 试验结果与分析

3.1 沉积温度对涂层的影响

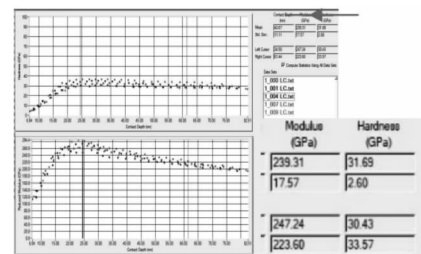
电弧离子镀涂层的沉积温度与涂层的硬度和弹性模量有密切关系。图 1 为沉积温度分别为 480℃,550℃,600℃ 条件下涂层的硬度和弹性模量。图 2 为沉积温度与涂层硬度的关系。



(a) 480℃



(b) 550℃



(c) 600℃

图 1 不同沉积温度下的硬度和弹性模量

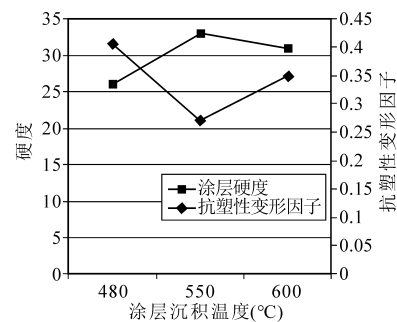


图 2 沉积温度与涂层的硬度、 H^3/E^2 关系

由图 2 可见,沉积温度对 TiAlN 涂层的硬度和抗塑性变形因子 H^3/E^2 存在明显影响。沉积温度较低时,因为轰击能量较低,沉积离子的流动性和扩散能力较低,涂层表面粗糙,致密性欠佳,涂层硬度较低;温度升高时扩散加剧,不仅薄膜的内部组织会发生温度变化,薄膜表面形貌也会随温度发生变化^[7]。从能量来说,适当提高粒子的能量,可以改善涂层的致密性,提高涂层的硬度和耐磨性。要使制备的涂层具有致密性,晶粒细化,孔隙小,需要将温度控制在合理范围内。硬度是电弧涂层指标中的重要参数之一,但是在刀具实际切削加工中,涂层的优劣不仅取决于硬度,还取决于许多其它指标,比如

抗塑性变形因子 H^3/E^2 。涂层在冲击磨损中由塑性变形变为脆性失效^[8], H^3/E^2 越大, 其抗塑性变形能力则越强。由图 2 可见, 当沉积温度为 480℃ 和 600℃ 时, 涂层都具有较好的抗塑性变形能力, 在 600℃ 时, 涂层具有更高的硬度 (26.25 ~ 31.69 GPa), 这种温度下的涂层兼顾了塑性变形能力和耐磨性。

3.2 偏压对涂层微结构和性能的影响

涂层偏压对涂层的微结构及性能有明显影响, 偏压的高低直接影响涂层离子的能量变化。由图 3 的 XRD 图谱可知, AlTiN 在 -80V、Al 含量相对较低时, TiAlN 呈现单相 NaCl 结构, 衍射峰介于 TiN 和 AlN 之间, 显示弱柱状结构, 晶粒尺寸约 20nm; 当继续增加偏压至 -120V 时, TiAlN 表现出细致的柱状结构, 晶粒尺寸大约为 10nm, 存在立方相的 AlN 相; Al 含量继续增加, Al 原子尺寸小于 Ti, Al 原子置换 Ti 原子, 使晶格产生不规则畸变, Al 原子一部分溶于 TiN 的晶格, 一部分以 AlN 的形式存在, 这些因素促进了晶粒的细化。

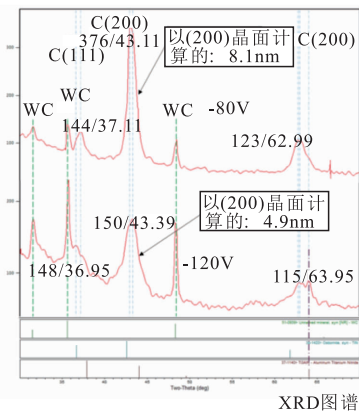


图 3 不同偏压下的 XRD 图谱

由图 4 可见, -80V 的断面形貌比 -120V 的形貌要粗一些, 在 (111) 面上, -80V 和 -120V 差异不大; 在 C(200) 面上差异明显, -80V 的衍射峰强于 -120V 的衍射峰, 按衍射强度半高峰宽计算的晶粒尺寸分别为 8.1 nm 和 4.9 nm。

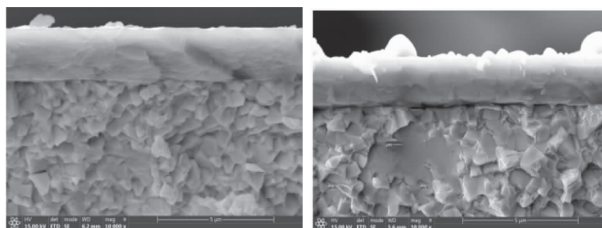


图 4 不同偏压下的涂层 EDS 截面形貌

对两种不同偏压的 AlTiN 涂层进行 EDS 成分分析 (见表 1), 偏压的增加对于涂层的成分有一定

影响, 但影响不大, Al 原子比例提高有利于涂层的硬度和抗氧化性。

表 1 不同偏压下 AlTiN 涂层的 EDS 成分分析结果

偏压	N (%)	Al (%)	Ti (%)
-80V	47.92	29.12	22.96
-120V	48.42	31.02	20.57

由图 5 所示的偏压与涂层的结合力关系可以看出, 涂层与基体的结合力随着偏压的升高反而下降。这是由于在低偏压情况下, 离子在炉腔内运动以及碰撞慢, 产生的能量较低, 此时炉腔的温度保持输入温度, 从靶材蒸发出来的离子自由沉积到基体上, 并通过凝聚形成核, 生长成涂层, 此时涂层与基体的结合力较好。随着偏压的增加, 离子受电势的加速, 离子的轰击效果明显, 炉腔的温度明显升高, 涂层的内应力也相应增加, 涂层的内应力会积聚在涂层与基体的结合界面, 导致涂层与基体的结合力变差。

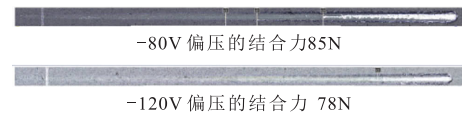
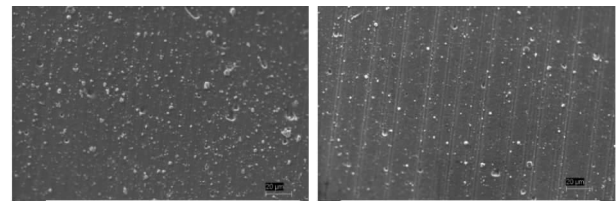


图 5 不同偏压下的涂层结合力

图 6 为不同偏压条件下 AlTiN 涂层表面 SEM 形貌。在 -80V 时, 涂层表面存在许多不均匀的白色颗粒, 表面粗糙; 在 -120V 时, 大颗粒数目相对减少, 这是由于增加偏压, 涂层离子动能增加, 离子对涂层表面进行反溅射现象增加, 使得涂层表面的大颗粒被溅射掉, 表面相对光滑。



(a) -80V (b) -120V

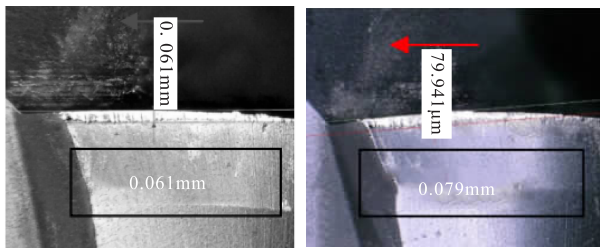
图 6 不同偏压条件下 AlTiN 涂层表面 SEM 形貌

3.3 涂层刀具铣削高温合金

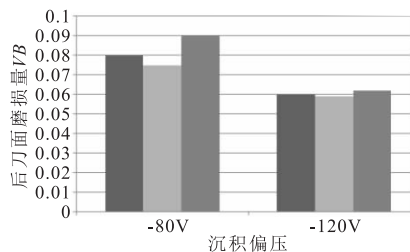
基于之前的分析, 采用沉积温度 600℃ 的条件, 选择 2 种偏压 (-80V, -120V) 分别制备两种涂层, 采用 D6R3 锥度球头硬质合金刀具, 被加工材料 GH4169 高温合金 (厚 2.0mm), 测试时间 21min。试切结果如图 7 所示, -120V 的磨损明显小于 -80V。

图 8 为后刀面磨损形貌及取样位置, 表 2 为试切后刀面取样位置的 EDS 成分分析。可见, 刀具后刀面 15 处的 O 含量明显高于 16 处, 表明涂层已经完全被氧化。从图 8 中的 16 处来看, Ni 和 Cr 的含

量比例很高,说明镍基合金的导热性差,在切削时产生极高温,使涂层表面与镍基高温合金发生粘结,粘结的工件材料会逐渐被切屑粘结带走,从而撕裂涂层,导致涂层失效。从图 8 可以看出,涂层在切削高温合金的失效形式主要是化学磨损和粘结磨损,Al 含量的增加有利于提高涂层的抗氧化性,-80V 的涂层硬度低于 -120V,-120V 的晶粒小,涂层的致密性高,从而提高了涂层的耐磨性,所以在 -120V 时,AlTiN 的铣削性能表现更优异。



(a) 偏压 -80V 的磨损 (b) 偏压 -120V 的磨损



(c) 沉积偏压与后刀面磨损量

图 7 不同偏压下涂层刀具试切磨损数据(沉积温度 600℃)



图 8 后刀面磨损形貌及取样位置

表 2 试切后刀面取样位置的 EDS 成分分析

取样位置	元素 (%)								
	N	O	Al	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	W
15	-	18.87	-	-	5.22	2.49	14.34	7.04	52.04
16	8.40	4.50	4.48	3.96	16.88	14.97	-	46.80	-

4 结语

通过改变涂层沉积温度和涂层偏压,研究了涂层的硬度、弹性模量、结合力、物相等方面的规律,并

通过试切来验证涂层的可行性,得出如下结论:

(1) AlTiN 涂层在 480℃ 和 600℃ 的 H^3/E^2 值较高,证明 AlTiN 涂层在此温度下具有较好的抗塑性变形能力,由于在 600℃ 的情况下涂层具有更高的硬度,因此其耐磨性更好;

(2) AlTiN 涂层在 -80V 和 -120V 时的(200)面存在差异,-120V 的衍射峰强度高于 80V;

(3) AlTiN 涂层在 -120V 的成分 Al 含量高于 -80V,从制备的涂层物相来看,-120V 的晶粒小,涂层的致密性高,提高了涂层的耐磨性,所以在 -120V 下的 AlTiN 的铣削性能表现更优。

参考文献

[1] 薄鑫涛. 高温合金的切削加工刀具材料与 PVD 涂层[J]. 热处理,2017,32(2):23.

[2] P C Jindal, A T Santhanam, U Schleinkofer, et al. Performance of PVD TiN, TiCN and TiAlN coated cemented carbide tools in turning [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1999, 17(1-3):163-170.

[3] Li Chen, Martin Moser, Yong Du, et al. Compositional and structural evolution of sputtered TiAlN [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(24):6635-6641.

[4] Yirong Yao, Jinlong Li, Yongxin Wang, et al. Influence of the negative bias in ion plating on the microstructural and tribological performances of TiSiN coatings in seawater [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 280:154-162.

[5] 徐新乐. 多弧离子镀用于制备高质量的 TiN 膜[J]. 材料保护, 2000, 33(8):28-30.

[6] Van Vinh Le, Thi Trang Nguyen, Sun Kyu Kim. The influence of nitrogen pressure and substrate temperature on the structure and mechanical properties of CrAlBN thin films [J]. Thin Solid Films, 2013, 548:377-384.

[7] 赵彦辉, 史文博, 刘忠海, 等. 电弧离子镀沉积工艺参数的影响[J]. 真空, 2018, 55(6):49-59.

[8] Soon Young Yoon, Seog Young Yoon, Won Sub Chung, et al. Impact-wear behaviors of TiN and TiAlN coatings on AISI D2 steel and WC-Co substrates [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177-178(4):645-650.

第一作者:于忠光,工程师,国宏工具系统(无锡)股份有限公司,214000 江苏省无锡市

First Author: Yu Zhongguang, Engineer, Guo Hong Tools System (Wuxi) Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China