doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20210512002

纳米 Al_2O_3 / TiO_2 多层涂层的低温制备及其性能^{*}

卞 凯¹ 唐思文¹ 王 睿¹ 杨植富¹ 张 浩¹ 刘 骞² 刘德顺³
(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学高温耐磨材料及制备技术湖南省国防科技重点实验室 湘潭 411201;
3. 湖南科技大学深海深地矿产资源开发技术与装备教育部工程研究中心 湘潭 411201)

摘要:采用原子层沉积技术 (ALD) 在 200 ℃低温条件下将纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层沉积在硬质合金刀具表面。利用扫描 电镜 SEM、划痕测试仪和三向测力仪以及数控机床等设备,对不同形式的纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层刀具的涂层-基体结合力 和切削性能等进行研究。结果表明,基于原子层沉积技术低温制备的纳米多层涂层刀具的涂层-基体结合强度高;涂层层数、 涂层沉积顺序及涂层层厚比对纳米多层涂层刀具的切削力有不同程度的影响;纳米多层涂层刀具更适合高速切削,当切削速 度大于 2.33 m/s 时,纳米多层涂层刀具的切削力和摩擦因数呈下降趋势,表现出良好的切削性能,其中双层纳米涂层刀具 的切削性能更好;在高速切削时,纳米多层涂层刀具表面摩擦因数比普通未涂层硬质合金刀具低,纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂 层能够有效改善刀具的黏结磨损,减少刀-屑粘黏现象和烫伤现象,能够改善刀具表面的耐磨损性能。 关键词:原子层沉积;低温制备;纳米多层涂层;涂层-基体结合力;切削性能

Low-temperature Preparation and Performance Research of Nano-Al₂O₃ / TiO₂ Multilayer Coating

BIAN Kai¹ TANG Siwen¹ WANG Rui¹ YANG Zhifu¹ ZHANG Hao¹ LIU Qian² LIU Deshun³

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Defense Laboratory of High Temperature Wear Resisting Materials and

Preparation Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Engineering Research Center of Mineral Resources Development Technology and Equipment for Deep Sea and Deep Earth, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Nano-Al₂O₃ / TiO₂ multilayer coatings are deposited on the surface of cemented carbide tools at a low temperature of 200 °C by atomic layer deposition (ALD). The adhesion of coating-substrate and the cutting performance of different nano-Al₂O₃ / TiO₂ multilayer coating tools are studied by SEM, and three-scratch tester dynamometer and CNC machine tools. The results show that the adhesion of coating-substrate of the nano-multilayer coating tool prepared at low temperature based on atomic layer deposition technology is high. The number of coating layers, coating deposition sequence and coating layer thickness ratio have varying degrees of influence on the cutting force of the nano-multilayer coating tool. The nano-multilayer coating tool is more suitable for high-speed cutting. When the cutting speed is more than 2.33 m / s, the cutting force and friction factor of the nano-multilayer coating tool is lower than that of the ordinary uncoated cemented carbide tool, the nano-Al₂O₃ / TiO₂ multilayer coating coating can effectively reduce the bonding wear of the tool and the phenomenon of tool-chip sticking and "scalding", which can improve the wear resistance of the tool surface.

^{*} 湖南省自然科学基金面上(2020JJ4308)和湖南省教育厅科研(18B230)资助项目。

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ4308) and Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (18B230).

²⁰²¹⁰⁵¹² 收到初稿, 20220318 收到修改稿

Keywords: atomic layer deposition; low-temperature preparation; nano-multilayer coating; adhesion of coating-substrate; cutting performance

0 前言

刀具表面涂层技术是众多学者公认能够提高刀 具切削性能的有效手段之一^[1-2]。近年来,高速干式 切削技术的快速发展,对刀具涂层的耐磨性、热稳 定性和抗氧化性等性能提出更高的要求^[3]。相比传 统涂层,纳米涂层拥有更高的致密度、更好的力学 性能和更长的使用寿命^[4-6]。而在纳米涂层中,纳米 多层涂层的性能一般要比纳米单层涂层的性能更 好^[7]。KOEHLER^[8]最先提出多层设计的概念,即利 用具有不同弹性模量的材料实现相互交替沉积,提高 涂层的性能。这种多层结构可以综合组分层优点,使 得涂层的韧性、硬度、抗高温氧化性等性能优于单层 涂层^[9]。SOTOVA等^[10]通过无涂层刀具、TiAIN涂层 刀具和纳米Ti-TiN-(TiCrAI)N / Zr-ZrN-(ZrCrNbAI)N多 层涂层刀具车削 45#钢试验发现,在高切削速度下, 纳米多层涂层刀具的切削性能优势尤为明显。

目前,制备纳米多层涂层的方法主要有物理气 相沉积(Physical vapor deposition, PVD)、化学气 相沉积(Chemical vapor deposition, CVD)等,但 是 PVD 技术主要存在涂层-基体的结合强度不够高 的问题,CVD 技术普遍存在由于制备温度过高而影 响刀具基体性能的问题^[11]。原子层沉积技术(Atomic layer deposition, ALD)是化学气相沉积技术的一支, 其制备原理是将气相前驱体交替脉冲引入反应器 中,并以单原子层薄膜的形式逐层沉积到基体表面。 ALD 薄膜涂层生长的基础是交替饱和的气相-固相 表面反应,涂层和基体间没有明显的过渡层,涂层 制备过程中会发生化学吸附反应从而达到沉积效 果,因此每个循环周期生长的薄膜都只有一个单原 子层^[12]。ALD 沉积温度一般 在 300 ℃以下,比普

通 CVD 技术的更低且涂层厚度的控制精度可达到 纳米级,制备出的纳米涂层有更好的均匀性、保形 性、阶梯覆盖率^[13]。原子层沉积技术中应用最为广 泛的材料是 Al₂O₃ 和 TiO₂^[14]。SHAN 等^[15]采用原子 层沉积技术在不锈钢基体上沉积 TiO2涂层,结果发 现 TiO2 涂层完全覆盖基体, TiO2 涂层对不锈钢具有 良好的保护作用。WADULLAH 等^[16]利用原子层沉 积技术在钴铬合金和硅晶片基体上制备了 25 nm 和 50 nm 的 Al₂O₃、TiO₂和 Al₂O₃ / TiO₂ 涂层并对涂层 形貌进行了表征。结果表明,在250 ℃时采用 ALD 能够均匀沉积涂层且涂层质量好,无缺陷和微裂纹。 FUSCO 等^[17]研究了原子层沉积技术(ALD)制备 的纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层对铜的保护作用,发现 每层 5 nm 的 Al₂O₃和 TiO₂交替层组成的涂层是最 佳的耐蚀性涂层。以上研究表明,利用 ALD 可以在 基体表面低温沉积出质量和性能良好的纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层。

本文通过原子层沉积技术在 200 ℃条件下制 备了 9 种纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层刀具涂层,并开展划 痕 和 直 角 干 切 削 等 试 验,以探 究 不 同 的 纳 米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层的性能及其对刀具切削性能 的影响机理,为纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层在刀具领 域的应用提供理论支撑。

1 试验

1.1 纳米多层涂层的制备

为了系统研究纳米多层涂层的力学性能和切削 性能,一共制备了9种不同类别的涂层形式,详见 表1。表中涂层命名方式如下:NT代表纳米涂层, A6T1中A代表Al₂O₃涂层,T代表TiO₂涂层,数 字6和1分别代表所占比例。

表1 纳米多层涂层的形式

Name	Form	Times of repetition	Materials	Thickness ratio	Thickness / nm	Vickers hardness HV / MPa
NTA0T1	T-type	1	TiO ₂	A:T=0:1	12.8	1 599.3
NTA6T1	AT-type	1	$Al_2O_3 \ / \ TiO_2$	A:T=6:1	37.1	1 656.4
NTA10T1	AT-type	1	$Al_2O_3 \ / \ TiO_2$	A:T=10:1	59.1	1 616.8
NTT1A10T1	TAT-type	1	$TiO_2 \ / \ Al_2O_3 \ / \ TiO_2$	T:A:T=1:10:1	60.1	1 709.5
NTA10T1A10	ATA-type	1	$Al_2O_3 \ / \ TiO_2 \ / \ Al_2O_3$	A:T:A=10:1:10	100.2	1 709.2
NTA1T1A1	ATA-type	4	$Al_2O_3 \ / \ TiO_2 \ / \ Al_2O_3$	A:T:A=1:1:1	30.3	1 600.9
NTT1A1	TA-type	6	TiO_2 / Al_2O_3	T:A=1:1	24.9	1 682.3
NTA4T3A4	ATA-type	3	$Al_2O_3 \ / \ TiO_2 \ / \ Al_2O_3$	A:T:A=10:1:10	29.9	1 583.4
NTA1T1	AT-type	4	$Al_2O_3 \ / \ TiO_2$	A:T=1:1	20.7	1 636.2

采用 ALD 技术在硬质合金刀具表面低温沉积 纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层,刀具为山特维克 9.62 mm×9.62 mm×3.18 mm 方形车刀片,前角 0°、后角 11°、刃倾角 0°。制备纳米 Al₂O₃和纳米 TiO₂ 涂层的气相-固相表面反应方程见式(1)和式(2):

 $2Al(CH_3)_3 + 3H_2O \xrightarrow{200^{\circ}C} Al_2O_3 + 6CH_4 \qquad (1)$ $Ti \{OCH(CH_3)_2\}_{4+2H_2O} \xrightarrow{200^{\circ}C} TiO_2 + 4(CH_3)_2CHOH \qquad (2)$

制备纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 涂层的具体流程如下。

(1)前处理过程。首先,在超声波清洗器中用 丙酮溶液将刀具清洗 600 s,除去有机杂质。之后, 利用无水乙醇洗去丙酮残留物;然后,在去离子水 中利用超声波将刀具表面的静电荷清洗干净,最后 用氮气将刀具表面吹干。

(2)纳米涂层的制备。①将ALD反应腔抽真 空至 50 Pa 以下,恒温 200 ℃约 30 min,将前处理 后的刀具放入腔室;②利用载气将前驱体(Al₂O₃ 的前驱体三甲基铝(Trimethylaluminum,TMA), TiO₂的前驱体为钛酸四异丙酯(Tetraisopropyl titanate,TTIP)送入反应腔,使其在刀具表面发生自 吸附反应,充分反应后抽出反应副产物 CH4气体, 清扫腔室。③ 再利用载气通入去离子水至反应腔, 使其与表面的 TMA 或 TTIP 基团产生化学反应形成 单层纳米 Al₂O₃ 或 TiO₂涂层,清扫腔室。④ 记连 续的步骤②和③为第一预设次数,重复第一预设次 数,即可获得理想厚度的纳米 Al₂O₃/TiO₂涂层。

1.2 微观表征及力学性能测试

采用美国 J. A. Woollam 公司生产的光谱椭偏仪 (J. A. Woollam Alpha-SE)测量纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层 涂层的厚度,激光的波长为 390~890 nm,入射角 为 70°,涂层厚度见表 1。采用莱州华银试验仪器有限 公司生产的维氏硬度计测量不同涂层刀具的硬度,纳 米涂层刀具的硬度见表 1。采用美国 Bruker 公司生产 的原子力显微镜,表征纳米涂层的形貌。采用日本日 立公司生产的 SU3500 扫描电子显微镜,观察测量刀 具表面以及切屑表面。采用瑞士 CSM 仪器公司生产的 MCT 划痕测试仪,测试涂层-基体的结合力,划针材质为金刚石,划针圆角半径为 50 µm,移动速度为 3 mm/min,声发信号采集频率为 20 Hz。

1.3 切削试验

通过直角干车削试验研究 NT 和 PT 的切削性 能。从切削力、切屑形态、刀具表面磨损形态等方 面,综合分析纳米多层涂层对刀具切削性能的影响 机理。通过查阅切削加工手册确定直角干切削半精 加工的切削参数^[18],切削速度 v 分别取 60、100、 140、180、220 m / min,进给量 f 取 0.1 mm / r,背 吃刀量 a_p 取 0.5 mm。

2 结果分析与讨论

2.1 纳米多层涂层刀具的表面形貌

制备的 9 种纳米多层涂层刀具如图 1 所示。 图 1 中从左到右的刀具排列顺序对应表 1 从上至下 的涂层设计顺序。从宏观来看,不同纳米复合涂层刀 具的颜色差异很大,表现为不同深浅的银灰、棕褐、 藏蓝、蓝绿、暗黄等颜色,这主要是由不同厚度的纳 米涂层的折射率不同引起的颜色减反现象^[19]。



图 1 基于 ALD 技术制备的纳米涂层刀具

Fig. 1 Nano-coated tool prepared based on ALD technology

图 2 为原子力显微镜拍摄的 NTA0T1、 NTA10T1、NTA10T1A10纳米涂层刀具的涂层形貌。 从图中可以看出,涂层已经均匀覆盖刀具表面,涂 层表面无破损点与滴状气泡。这说明涂层制备过程 中,涂层内部产生的应力较小,涂层质量良好,基 于 ALD 的纳米涂层低温沉积的效果良好。



图 2 纳木 Al₂O₃ / HO₂ 赤层限规形统 Fig. 2 Micro morphology of nano- Al₂O₃ / TiO₂ coating

2.2 涂层-基体结合力

涂层基体结合力由划痕试验获得,图3为声发信 号、载荷力与涂层破裂位置关系图,通过对比三者关 系可得出涂层-基体的结合力。图3中a、b、c三点分 别对应涂层脱落的三个阶段的起点,a 点为塑性变形 阶段起点,b点为开始脱落阶段起点,c点为严重脱落 阶段起点,记点b对应的载荷为涂层-基体脱落的临界 载荷力。由图 3 可知各刀具对应的临界载荷分别为 12.32 N (NTA0T1)、8.41 N (NTA10T1)和 10.87 N (NTA10T1A10)。与 ZHA 等^[20]利用 PVD 技术制备的结 合强度良好的纳米 TiSiN / TiAIN 多层涂层相比,纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层的结合强度与之相当。由此可见, 基于 ALD 低温制备的纳米多层涂层能够沉积在硬质 合金刀具表面,且涂层-基体结合强度较高。







2.3 纳米多层涂层刀具的切削性能 2.3.1 纳米多层涂层刀具的切削力

选取不同层数的纳米多层涂层刀具,研究涂层 层数对刀具切削力的影响。不同切削速度下 PT(普 通刀具)、NTA0T1(单层)、NTA1T1(双层)、 NTA1T1A1(三层)的切削力如图4所示。





从图 4 中可以看出,当切削速度 $v \leq 140 \text{ m/min}$ 时, PT 的切削力小于 NT。NTA1T1A1 在不同切削速度下的切削力均大于 NTA0T1 和 NTA1T1 的切削力,其原因是 NTA1T1A1 最外层为纳米 Al₂O₃,其减摩性能不如纳米 TiO₂,导致切削力较大。当切削速度 $v \geq 100 \text{ m/min}$ 时,PT 的切削力不断上升。当切削速度 $v \geq 140 \text{ m/min}$ 时,NT 的切削力呈下降趋

势。当切削速度 v≥180 m/min 时,NT 的切削力小 于 PT。在切削速度 v=220 m/min 时,NT 的切削 力达到最小值,其中 NTA1T1(双层)的切削力最 小,这是因为纳米 Al₂O₃ 起到耐磨的效果,且与纳 米 TiO₂产生协同效应,提高涂层的致密性。可见, NT 在高速切削状态下对刀具切削力的降低效果最 为明显;在高速切削时,外层为纳米 TiO₂、内层为 纳米 Al₂O₃的涂层的切削性能比单层纳米 TiO₂涂层 的切削性能好。

在涂层层数和涂层层厚比一致的条件下,不同 涂层沉积顺序的刀具切削力如图 5 所示。由图 5 可 知,NTA1T1 的切削力要明显小于 NTT1A1,在 220 m / min 的切削速度下,最外层为 TiO2 的纳米 涂层刀具切削阻力比最外层为 Al₂O₃ 的纳米涂层刀 具低 14%以上。这是由于 TiO2 减摩层和 Al2O3 耐磨 层具有一定的协同性,并且沉积顺序对协同性会产 生较大影响,当 TiO₂ 在最外层时才会产生最佳的 协同效果。DAROONPARVAR 等^[21]在制备纳米 TiO₂ / Al₂O₃ 多层涂层时发现了这一现象,当外层 为纳米 TiO2 涂层、内层为纳米 Al2O3 涂层时会产生 协同效应,这是因为 TiO2 粒子填补了内部的 Al2O3 耐磨层的空隙,提高了涂层的致密性。由此可见, 外层为纳米 TiO2 涂层、内层为纳米 Al2O3 涂层时, 有利于降低纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层刀具的切 削力。







在涂层沉积顺序、涂层层数一致的条件下,不 同涂层层厚比的刀具切削力如图 6 所示。当 v≥ 140 m/min时, NTA6T1和NTA10T1的切削力明显 小于 NTA1T1 的切削力。在 v=180 m/min 时, NTA6T1 比 NTA1T1 的切削力降低 5.8%。在 v= 220 m / min 时 NTA10T1 比 NTA1T1 的切削力降低 9.2 %。同时发现当 v≥140 m/min 时, NTA10T1 的切削力迅速下降,降幅明显高于 NTA6T1,到 v=220 m/min 时, NTA10T1 的切削力已经比 NTA6T1降低8.9%。这说明在高速切削时,当内层 为纳米 Al₂O₃、外层为纳米 TiO₂ 时, Al₂O₃ 和 TiO₂ 的层厚比比较大有利于降低纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层 涂层刀具的切削力。产生这种现象的原因可能是当 外层为纳米 TiO2 时,内层的纳米 Al2O3 越厚,在高 速切削时纳米涂层能够产生的纳米磨损颗粒越多, 将滑动摩擦转化为滚动摩擦的效果越好,降低了刀 屑间摩擦因数^[22]。







2.3.2 纳米多层涂层刀具的摩擦因数

刀具的摩擦因数是评价刀具切削性能的一个重

要的指标。不同切削速度下NT和PT的摩擦因数如 图7所示。PT的摩擦因数随着切削速度的增加而增 加,当 $v \leq 140 \text{ m/min}$ 时,随着切削速度的增加, 摩擦因数的增幅明显,当 v > 140 m/min时摩擦 因数增幅较小。而 NT 的摩擦因数变化是先增后 减,在 $v \geq 100 \text{ m/min}$ 时摩擦因数大幅度降低,到 v > 140 m/min时摩擦因数开始普遍小于 PT,与 NT 在 $v \geq 140 \text{ m/min}$ 时,切削力呈下降趋势这一结 论相符合,验证了 NT 更适合用于高速切削。当 $v \geq 140 \text{ m/min}$ 时,纳米双层涂层的摩擦因数小于纳 米单层涂层的摩擦因数。在 $v \geq 180 \text{ m/min}$ 时 NT 的摩擦因数全部小于 PT,在v = 220 m/min时各 NT 取得最低摩擦因数。最外层为 TiO₂ 减摩层的刀 具摩擦因数在v > 140 m/min时的降幅明显大于最 外层为 Al₂O₃ 耐磨层的刀具。



2.4 涂层减摩抗磨机理分析

使用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)分别观察了 PT、NTA10T1 在不同切削速度下的刀具磨损形貌,结果如图 8、9 所示。

从图 8、9 中可以看出,随着切削速度 v 的增加, PT 的磨损现象越来越严重。低速切削过程中, PT 表面的粘黏物很少。高速切削时, PT 基体硬度较低、耐磨性不足,导致切削热不断增加,高温粘黏物开始黏附在刀具表面,加剧了刀具的黏结磨损。随着切削速度的增加, NT 的黏结磨损现象却呈现先变多后变少的趋势。在 v=220 m/min 的切削速度下,NT 的磨损最小,NT 的减摩耐磨性能得到了明显的提高。一方面是因为纳米涂层中的Al₂O₃ 耐磨层提高了刀具表面的耐磨性,TiO₂ 减摩层降低了切削时的摩擦因数。另一方面,可能是由

于纳米多层涂层表面产生纳米磨损颗粒将滑动摩擦转变成滚动-滑动摩擦,降低了摩擦因数。 MUTHUKUMAR等^[23]也发现了这一现象,通过研



(a) 60 m / min





究纳米复合镀层的摩擦磨损行为发现,摩擦表面会

产生磨损颗粒保护摩擦层,降低摩擦因数,并延长

(c) 220 m / min

图 8 不同切削速度下 PT 的磨损形貌

(b) 140 m / min





(a) 60 m /min

(b) 140 m / min

(c) 220 m / min

图 9 不同切削速度下 NTA10T1 的磨损形貌



切屑形态被不少研究者认为是一种记录诸 多切削加工信息的最直观载体^[24]。不同切削速 度(从上往下依次为 220、180、140、100、 60 m / min)下 PT 和 NTA10T1 切屑的宏观形貌 如图 10所示。从图中可以看出,NTA10T1比PT 切屑的规律更加明显。NTA10T1 切屑为连续周 期性的弯曲带状切屑,说明稳定的切削过程更 利于断屑。而 PT 切屑在高速切削条件下,翘曲 周期不稳定,说明高速切削状态下 PT 没有 NT 稳定。

刀具在高温高压的连续干切削条件下,不仅前 刀面会产生严重的黏结磨损现象,高温氧化物及细 小颗粒同样也会黏附在切屑接触表面。因此,切屑 也是揭示和反映刀具摩擦磨损现象的重点研究对 象。图 11 和图 12 分别是不同状态下 PT 的切屑表 面和 NTA10T1 的切屑表面。



250

从图 11 中可以看出,随着切削速度增加,PT 切屑表面的黑色烫伤纹逐渐减少,表面黏结物却越 来越多。NTA10T1 所产生的切屑没有明显的黑色 "烫伤"现象,切屑表面的黏附现象也有明显改善。 从图 12 可以发现,高速切削过程中,NTA10T1 切 屑表面粗糙度高,没有明显瑕疵。首先,这可能是 由于 NT 表面的摩擦因数小,减少了摩擦生热。纳

米多层涂层较低的热传导率也改善了切屑-刀具间 的热分布,使得刀-屑接触表面的温度得到有效释 放,从而减少刀-屑粘黏现象。其次,脱落的纳米 颗粒在刀具表面可能还形成光滑的纳米保护膜,刀-屑间的摩擦、挤压效应进一步减弱,减小切削过程 中切屑表面的压强, 使得切屑表面的氧化物不易粘 附在切屑表面,极大地减少了粘黏现象。



(a) 60 m / min

(b) 220 m / min

(c) 220 m / min





(c) 220 m / min

图 12 不同状态的 NTA10T1 切屑表面

Fig. 12 Chip surface of the NTA10T1 at different states

3 结论

(1)利用原子层沉积技术能够在刀具表面低温 制备出力学性能良好的纳米 Al₂O₃/TiO₂ 多层涂 层,其涂层-基体结合强度较高。

(2)纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 多层涂层刀具适合高速切 削,当切削速度v > 140 m/min时,纳米涂层刀具 的切削力和摩擦因数呈下降趋势。

(3) 在高速切削条件下,外层为纳米 TiO₂、内 层为纳米 Al₂O₃ 的涂层的切削性能优于单层纳米 TiO₂ 涂层的切削性能; 当内层为纳米 Al₂O₃、外层 为纳米TiO2且Al2O3与TiO2的层厚比比较大时,纳 米 Al₂O₃/TiO₂ 多层涂层刀具的切削性能更好。

(4) 在高速切削时, 纳米多层涂层刀具比普通 无涂层刀具更稳定,涂层表面的纳米颗粒能够将 刀-屑接触界面间的滑动摩擦转化为滚动-滑动摩 擦,有效降低了刀具黏结磨损,减少刀-屑粘黏现 象和"烫伤"现象。

老 文 献

- [1] HERNANDEZ M T, AGUILERA L D, PONCE A, et al. Tribological performance of TiN and TiCN coatings on a working tool steel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(8): 3659-3666.
- [2] MARINA V, ALEXEY V, NIKOLAY A, et al. Improvement of the performance properties of cutting tools using the multilayer composite wear-resistant

coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 38(4): 1421-1427.

- [3] 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 Peng, XU Changqing, CAI Fei, et al. Preparation and machining properties of tialsin gradient coating by multi-arc ion plating[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 34-43. (in Chinese)
- [4] SHARMA V, KUMAR M, SHUKLA V N. Tribobehaviour of nano-structured coatings deposited by various techniques: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44(6): 4097-4101.
- [5] SKORDARIS G, BOUZAKIS K D, CHARALAMPOUS P, et al. Brittleness and fatigue effect of mono- and multilayer PVD films on the cutting performance of coated cemented carbide inserts[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 93-96.
- [6] 张云乾, 丁彰雄, 范毅. HVOF 喷涂纳米 WC-12Co 涂 层的性能研究[J]. 中国表面工程, 2005, 18(6): 25-29. ZHANG Yunqian, DING Zhangxiong, FAN Yi. Study on the performance of HVOF sprayed nano-WC-12Co coating[J]. China Surface Engineering, 2005, 18(6): 25-29. (in Chinese)
- [7] RABINOVICH G S, YAMAMOTO K, KOVALEV A I, et al. Wear behavior of adaptive nano-multilayered TiAlCrN/NbN coatings under dry high performance machining conditions[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(10): 2015-2022.
- [8] KOEHELER J S. Attempt to design a strong solid[J]. Physical Review B, 1970, 2(2): 547-551.
- [9] 吴雁, 王冰, 肖礼军, 等. Ti-Al-Si-N 多层梯度涂层的 微观结构及力学性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 232-237.

WU Yan, WANG Bin, XIAO Lijun, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of Ti-Al-Si-N multilayer gradient coatings[J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 232-237. (in Chinese)

- [10] SOTOVA C, SITNIKOV N, BUBLIKOV J, et al. Influence of thickness of multilayer composite nano-structured coatings on tool life of metal-cutting tool[J]. The European Physical Journal Conferences, 2019, 224(2): 11-15.
- [11] 孙磊,熊计,杨天恩.金属陶瓷及硬质合金表面 CVD / PVD 涂层的摩擦与切削性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 45-55. SUN Lei, XIONG Ji, YANG Tianen. Friction and cutting

performance of CVD/PVD coating on cermet and cemented carbide surface[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(6): 45-55. (in Chinese)

- [12] PARSONS G N, GEORGE S M, KNEZ M. Progress and future directions for atomic layer deposition and ALD-based chemistry[J]. Mrs Bulletin, 2011, 36(11): 865-871.
- [13] SONG G, TAN D Q. Atomic layer deposition for polypropylene film engineering-A review[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2020, 305(6): 68-92.
- [14] HU Y, LU J, FENG H. Surface modification and functionalization of powder materials by atomic layer deposition: A review[J]. RSC Advances, 2021, 11(20): 11918-11942.
- [15] SHAN C X, HOU X, Choy K L. Corrosion resistance of TiO₂ films grown on stainless steel by atomic layer deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(11): 2399-2402.
- [16] WADULLAH H M, AJEEL S A, ABBASS M K. Synthesis and characterization of nanocoatings thin films by atomic layer deposition for medical applications[J]. Conference Series: IOP Materials Science and Engineering, 2019, 518(3): 2057-2064.
- [17] FUSCO M, OLDHAM C, PARSONS G. Investigation of the corrosion behavior of atomic layer deposited Al₂O₃/TiO₂ nanolaminate thin films on copper in 0.1 m NaCl[J]. Materials, 2019, 12(4): 672-696.
- [18] 上海市金属切削技术协会. 金属切削手册[M]. 2 版. 上 海:上海科学技术出版社,1982. Shanghai Metal Cutting Technology Association. Metal cutting manual[M]. 2ed. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982. (in Chinese)
- [19] 瞿鑫. 光学涂层对磁性金属的颜色和磁光效应的影 响[D]. 北京: 首都师范大学, 2014. QU Xin. The influence of optical coating on the color and magneto-optical effect of magnetic metals[D]. Beijing: Capital Normal University, 2014. (in Chinese)
- [20] ZHA X, CHEN F, JIANG F, et al. Correlation of the fatigue impact resistance of bilayer and nanolayered PVD coatings with their cutting performance in machining $Ti_6Al_4V[J]$. Ceramics International, 2019, 45(12): 14704-14717.
- [21] DAROONPARVAR M, YAJID M A, YUSOF N M, et al. Fabrication and properties of triplex NiCrAlY/nano Al₂O₃-13%TiO₂ / nano TiO₂ coatings on a magnesium

alloy by atmospheric plasma spraying method[J]. Journal of Alloys and Compounds. 2015, 645(10): 450-466.

[22] 李佩真,唐思文,孙林,等.基于原子沉积法的纳米 Al₂O₃ 涂层微织构刀具刀-屑界面间摩擦因数研究[J]. 现代制造工程,2020,(10): 26-32.

LI Peizhen, TANG Siwen, SUN Lin, et al. Research on the friction coefficient between the tool-chip interface of nano-Al₂O₃ coating micro-textured tool based on atomic deposition method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (10): 26-32. (in Chinese)

[23] MUTHUKUMAR M, YADAV A, BOBJI M S. Wear characteristics of nanoporous alumina and copper filled

nanocomposite coatings[J]. Wear, 2020, 462(20): 96-105.

[24] 庞俊忠,牛苜森,黄晓斌,等.高速铣削淬硬钢时的切 屑形态试验研究[J]. 机械设计与制造,2021(1):152-155. PANG Junzhong, NIU Musen, HUANG Xiaobin, et al. Experimental study on chip morphology during high-speed milling of hardened steel[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(1): 152-155. (in Chinese)

E-mail: kaibian123@foxmail.com 唐思文(通信作者),男,1980年出生,博士,教授,博士研究生导师。 主要研究方向为绿色高效精密加工与智能制造、刀具技术。

E-mail: siw_tang@hnust.edu.cn

作者简介: 卞凯, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为绿 色高效精密加工与智能制造。