

基于 ALD 低温制备的纳米涂层刀具性能研究

王睿^a, 唐思文^a, 刘德顺^b, 刘骞^b, 卞凯^a, 李佩真^a

(湖南科技大学 a. 机械设备健康维护湖南省重点实验室

b. 深海深地矿产资源开发技术与装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411201)

摘要: **目的** 探索基于原子层沉积法 (Atomic Layer Deposition, ALD) 的纳米涂层低温制备技术, 并重点研究涂层沉积过程及纳米氧化铝涂层对刀具力学性能的影响。**方法** 利用原子层沉积法, 在 200 °C 的环境下制备不同涂层厚度的纳米 Al₂O₃ 涂层刀具, 对涂层的微观组织、厚度、硬度、断裂韧性、断口形貌、弯曲强度、结合力及摩擦系数进行检测。**结果** ALD 沉积技术能将纳米涂层均匀沉积在 YT5 刀具表面, 且涂层光滑, 无滴状气泡, 涂层厚度可以精确控制在纳米级。ALD 涂层与基体结合力的大小与涂层厚度相关, 随着涂层厚度增大, 结合力呈先增后降的趋势, 测得 50、100、200 nm 等 3 种纳米涂层结合力大小分别为 11.07、12.74、7.86 N。纳米涂层能够提高刀具的硬度, 显著降低刀具表面的摩擦系数, 测得刀具摩擦系数分别为 0.56、0.43、0.67, 最高降低摩擦系数达 40% 以上。此外在 200 °C 的沉积温度下, 没有产生金属相变, 因而对刀具基体没有影响, 刀具的断裂韧性和弯曲强度没有降低。**结论** 基于 ALD 的纳米涂层低温沉积技术所制备的纳米涂层刀具, 具有良好的力学性能及涂层-基体界面结合力, 能显著提高刀具性能, 改善切削加工条件。

关键词: 刀具; 纳米涂层; 原子层沉积; 低温制备; 微观组织; 结合力; 力学性能

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0364-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.041

Research on Performance of Nano-coated Tools Prepared by ALD at Low Temperature

WANG Rui^a, TANG Si-wen^a, LIU De-shun^b, LIU Qian^b, BIAN Kai^a, LI Pei-zhen^a

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

b. 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: The work aims to explore the low-temperature preparation technology of nano-coating based on Atomic Layer

收稿日期: 2020-05-25; 修订日期: 2020-07-04

Received: 2020-05-25; **Revised:** 2020-07-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51305134); 湖南省自然科学基金面上项目 (2020JJ4308); 湖南省研究生科研创新项目 (CX20190805); 湖南省教育厅资助科研项目 (18B230)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51305134); General Project of Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ4308); The Hunan Province Postgraduate Innovation Project (CX20190805); A Project Supported by Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (18B230)

作者简介: 王睿 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究刀具及涂层制备与切削加工机理。

Biography: WANG Rui (1994—), Male, Master graduate student, Research focus: preparation of coating tools and cutting mechanism.

通讯作者: 唐思文 (1980—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密与超精密加工。邮箱: siw_tang@hnust.edu.cn

Corresponding author: TANG Si-wen (1980—), Male, Ph. D., Associate professor, Doctoral tutor, Research focus: advanced processing technology and ultra-precision machining. E-mail: siw_tang@hnust.edu.cn

引文格式: 王睿, 唐思文, 刘德顺, 等. 基于 ALD 低温制备的纳米涂层刀具性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 364-371.

WANG Rui, TANG Si-wen, LIU De-shun, et al. Research on performance of nano-coated tools prepared by ALD at low temperature[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 364-371.

Deposition (ALD), and focus on the coating deposition process and the influence of nano-alumina coating on the mechanical properties of nano-alumina coated tools. Nano- Al_2O_3 coatings with different thicknesses were prepared by Atomic Layer Deposition at 200 °C. The microstructure, thickness precision, hardness, fracture toughness, bending strength, bonding force, and friction coefficient of the coating were tested. The ALD deposition technology can uniformly deposit nano-coating on the surface of the YT5 cutter, and the coating is smooth and free of dripping bubbles, and the thickness of the coating can be accurately controlled at nano-thickness. The binding force between ALD coating and substrate is related to the coating thickness. With the increase of coating thickness, the binding force increases first and then decreases. The binding force of 50, 100, and 200 nm nano-coatings is measured to be 11.07, 12.74, and 7.86 N respectively. Nano-coating can improve the hardness of the tool and significantly reduce the friction coefficient of the tool surface. The measured friction coefficients of the tool are 0.56, 0.43, and 0.67 respectively, and the maximum reduction of the friction coefficient is over 40%. In addition, the deposition temperature of 200 °C does not produce metal phase transformation, thus it has no influence on the tool matrix, and the fracture toughness and bending strength of the tool does not reduce. The nano-coating tool prepared by ALD-based nano-coating low-temperature deposition technology has good mechanical properties and coating-substrate interface bonding force, which can significantly improve micro-cutting processing conditions and have broad application prospects in the micro-cutting field.

KEY WORDS: tool; nano-coating; atomic layer deposition (ALD); low temperature preparation; microstructure; binding force; mechanical properties

随着产品制造精度的要求不断提高, 零部件的小微化已成提高产品精度的必然选择, 微细加工技术已迎来技术革新的热潮, 对微刀具的力学性能提出了更高要求^[1]。对于金属连续微切削加工, 高负载环境下的切屑流与前刀面的相互摩擦, 以及刀具刃圆半径-吃刀深度间的尺寸效应, 是导致微刀具磨损、失效的主要原因^[2-3]。大量研究表明, 表面涂层技术可以有效提高刀具的力学性能^[4-7], 不同材料的涂层对刀具的强度、硬度、耐磨性等力学性能的提升各不相同^[8-9]。诸多研究学者仅考虑了普通刀具表面的宏观强化处理, 对微细刀具的表面强化却鲜有报道。

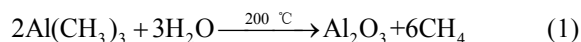
微切削刀具的刃圆半径与切削厚度处于同一数量级, 因此比普通刀具的切削机理更加复杂^[10-11]。其加工载荷形式从以剪切为主(传统切削)变化到以摩擦、挤压或耕犁为主^[12]。同时, 刀具的几何结构也降低了刀具的刚性, 导致切削过程中损耗、折断现象严重^[13-14]。现阶段, 传统的物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)表面涂层技术已不再适用于微细切削领域。D. NEVES 等人^[15]制备了 CVD 涂层刀具, 发现 CVD 涂层缺陷表现为涂层内部含有 3 μm 的气泡, 其尺寸大小已与微切削用量的数量级相当。J. GERTH 等人^[16]对干切削下的 PVD 涂层滚刀磨损状况进行了系列研究, 结果表明, 随着涂层厚度的增加, 内部应力会迅速增大, 导致刀具钝圆半径磨损剧烈。石绪忠等人^[17]用等离子喷涂方法制备了纳米氧化铝钛涂层, 并研究了其力学性能, 发现纳米涂层比微米涂层拥有更好的耐磨性和韧性。K. ASLANTAS 等人^[18]在 700 °C 的条件下, 通过热丝气相沉积技术制备了纳米金刚石涂层微铣刀, 并进行了切削试验研究, 结果发现, 700 °C 的高温对微铣刀产生了负面影响, 其力学性能比普通刀具更差。

上述学者在刀具表面涂层强化方面做了较多研究工作, 但其研究还主要集中在传统的涂层制备技术上。此类涂层制备技术均采用高温沉积^[19-20], 并且这种高温条件下制备的涂层附带一定的残余应力, 会对刚性较低的微切削刀具基底产生负面影响。此外, 所制备出的硬质涂层厚度均在微米级^[21], 增加了微刀具的刃圆半径, 钝化了刃口, 从而增加了切削比能, 严重降低了刀具的切削性能, 同时也是带来尺寸效应的根源^[22]。本文采用原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)技术, 在低温条件下制备了纳米 Al_2O_3 涂层刀具, 并对其进行了系列力学性能表征, 研究了不同厚度纳米涂层刀具的硬度、强度、断裂韧性及摩擦磨损性能, 为新型微刀具的强化设计及表面强化技术提供了一种有效手段。

1 试验

1.1 纳米涂层的低温制备

市购 YT5 方形硬质合金车刀片, 试验刀片尺寸为 16 mm×16 mm×4.5 mm, 前角为 0°, 后角为 11°, 主偏角为 75°, 刃倾角为 -6°, 刀具刃圆半径为 0.2 mm。将刀具依次用丙酮、无水乙醇各进行 720 s 的超声清洗, 去除刀具表面杂质, 保证涂层与基体的结合力。以制备纳米 Al_2O_3 涂层为例, 其自限制化学吸附反应为:



试验所选前驱体分别为三甲基铝(TMA)和去离子水(H_2O), 反应温度为 200~300 °C, 真空度 ≤ 50 Pa。具体制备步骤为: (1) 反应腔抽真空至 50 Pa 以下, 加热至 200 °C, 恒温 30 min。恒温的主要目的是为了预热基体, 使之达到化学吸附反应条件, 还可以显著降低涂层内部的残余应力^[23]。(2) 利用载

气将 TMA 前驱体送入反应腔, 载气气体流量为 200 mL/min, 脉冲时间为 0.2~0.4 s, 基体表面自吸附反应时间为 0.03 s, 充分反应后, 抽出反应副产物气体 CH_4 , 清扫腔室 5 s。(3) 利用载气通入去离子水至反应腔, 使其与表面的 TMA 基团反应 0.1~0.2 s, 形成单层 Al_2O_3 涂层, 清扫腔室 5 s。(4) 分别循环上述步骤 455、903、1818 次, 制备出不同厚度的纳米 Al_2O_3 涂层刀具。(5) 将所制备的纳米涂层刀具随炉冷却至室温, 以抑制涂层内应力的产生^[24]。所制备的刀具如图 1 所示, 每种纳米涂层厚度各制备 4 组, 普通无涂层刀具 1 组。

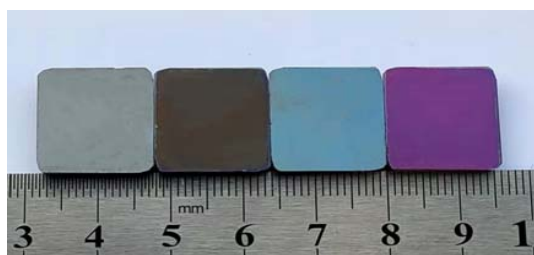


图 1 不同颜色的纳米 Al_2O_3 涂层

Fig.1 Nano-alumina coatings with different colors

采用 ALD 方法可以在低温条件下制备出理想厚度的纳米涂层。不同厚度的纳米 Al_2O_3 涂层刀具与非涂层刀具所呈现的颜色为: 灰色(无涂层)、褐色(50 nm)、蓝色(100 nm)、紫色(200 nm)。这是由于不同纳米厚度薄膜的不同折射率引起的颜色减反定理^[25]。

1.2 微观组织分析及性能测试方法

使用原子力显微镜观察刀面纳米涂层的显微组织, 分析评估刀具表面质量。采用光谱椭偏仪(J.A.Woollam Alpha-SE)测量 ALD 纳米 Al_2O_3 涂层的厚度, 激光波长为 390~890 nm, 激光入射角为 70°。

对纳米涂层刀具进行压痕、三点弯曲实验, 检测目标刀具的硬度、弯曲强度和断裂韧性。压痕实验仪器采用 HV-30 型维氏硬度计, 压痕载荷为 294 N, 保压时间为 10 s。三点弯曲实验仪器为济南试金集团的万能材料力学试验机, 将刀具试样置于跨距为 12.5 mm 的 V 型支架上, 对其施加速度为 0.3 mm/min 的匀速载荷, 直至刀具试样断裂。

采用瑞士 CSM 划痕试验仪(MCT3)测试纳米涂层与基体材料的结合力大小, 检测参数见表 1。采

表 1 划痕实验参数

Tab.1 Parameters of the Scratch test

Item	Value
Scratch mode/Type	Linear scratch/Progressive
Pointer material	Diamond
Load range	0.03~20 N
Loading rate	19.97 N/min
Speed	3 mm/min
AE Sensitivity	9
Acquisition rate	20 Hz

用高速往复摩擦磨损试验机测试不同刀具的摩擦系数, 实验条件见表 2。

表 2 摩擦磨损实验条件

Tab.2 Test load of friction and wear

Item	Value
Coupling material used	GCr15
Spin velocity	600 r/min
Test load	10 N
Turing radius (R)	5 mm
Test time	15 min
Amplitude/Frequency	5 mm/1 Hz

2 结果与分析

2.1 微观组织

纳米 Al_2O_3 涂层的原子力显微形貌如图 2 所示。可以看出, 涂层已覆盖至整个刀具表面, 呈明显的层状形式, 无滴状气泡和破损点。这说明低温沉积过程中, 涂层内部产生的应力较小, 不会影响涂层的质量。

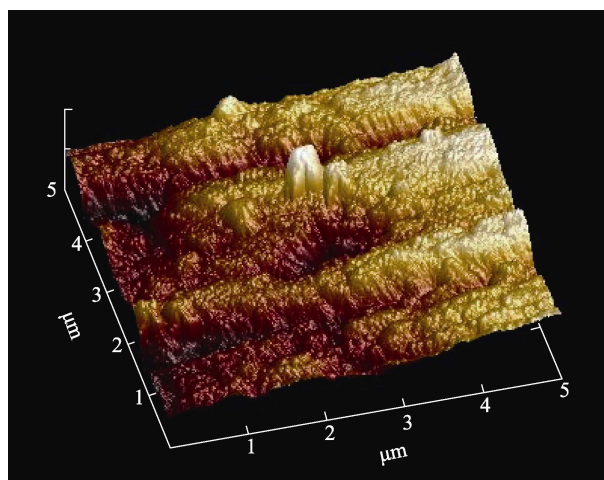


图 2 纳米 Al_2O_3 涂层微观形貌

Fig.2 Microstructure of nano-alumina coating

2.2 涂层厚度

使用椭偏仪测出各样本刀具的涂层厚度, 如图 3 所示。涂层厚度误差范围均在纳米级, 控制精度在纳米级。这主要是由于 ALD 涂层的生长机制为交替饱和的气-固相表面反应, 当刀具表面的化学吸附饱和后, 表面反应的前驱体数量不再随着时间增加, 因此涂层厚度仅与 ALD 循环次数有关^[26]。对刀具刃口涂层的精确控制有利于获得更加理想的刃线和切削角, 在抑制微切削刃口尺寸效应方面具有广阔的前景^[27]。

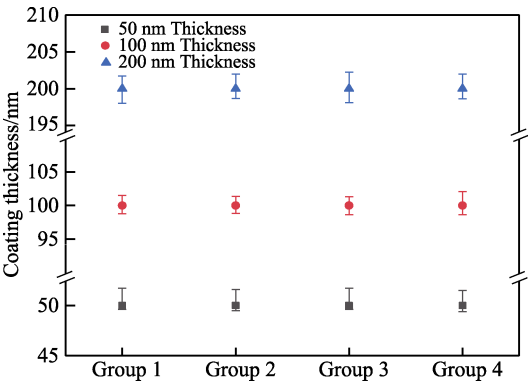


图 3 纳米 Al₂O₃ 涂层厚度
Fig.3 The coating thickness of nano-alumina coating

2.3 力学性能

不同刀具的压痕形貌如图 4 所示。根据压痕断裂力学原理，压痕对角线线长是反应材料抵抗硬物进入材料能力大小的关键指标，而裂纹长度则是反应断裂韧性的具体体现。计算出不同厚度涂层刀具的硬度、

弯曲强度及断裂韧性结果，见表 3。

在 50~200 nm 涂层厚度内，随着厚度的增加，刀具硬度呈先增后减的变化趋势。其中 100 nm 涂层厚度刀具的硬度最高，相对于无涂层刀具，提升 3%左右。纳米涂层同时也提高了刀具的断裂韧性，但提升效果并不明显，而刀具的弯曲强度并无改变。对微切削刀具而言，即便是提升少许的力学性能，仍然可以显著提高刀具的使用寿命。凌平等^[28]通过控制碳含量，改变了微铣刀的力学性能，结果发现，硬度只增加 56 N/mm² 的微铣刀，其平均使用寿命却可以延长 0.1 倍左右。

不同刀具的断口形貌如图 5 所示。可以看出，纳米涂层刀具与无涂层刀具的断裂特征一致，均是以穿晶断裂为主、局部区域的沿晶断裂为辅的脆性断裂，含有撕裂棱以及少量韧窝，说明材料整体的脆硬性较高。200 ℃ 的沉积温度并未达到刀具基体晶相组织的相变温度，因此没有影响基体材料的形态分布，不会对刀具的力学性能产生负面影响。

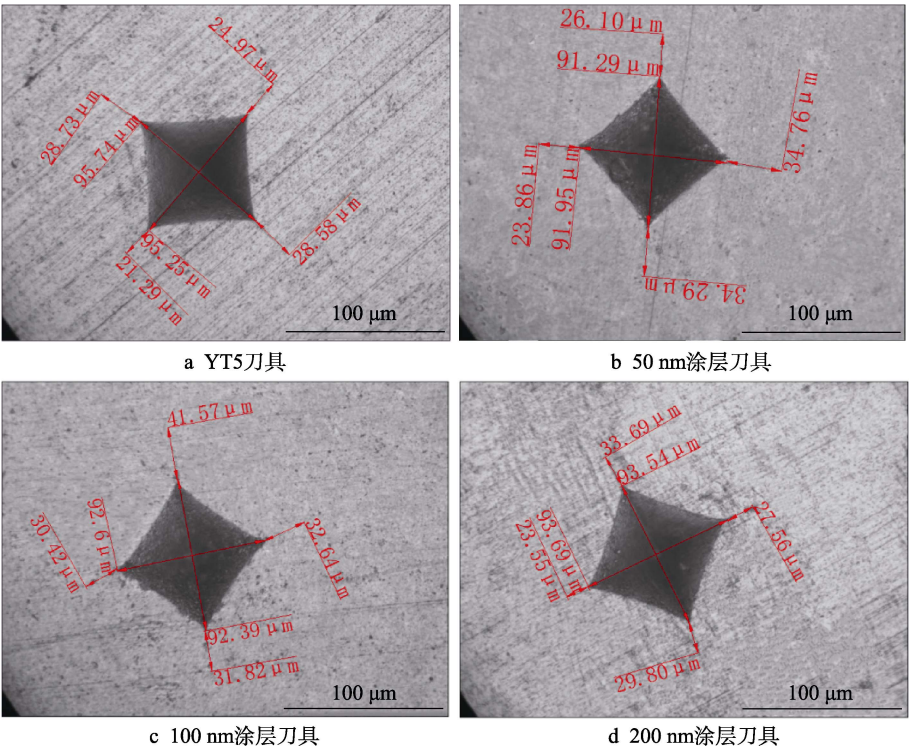


图 4 不同刀具的压痕形貌
Fig.4 Indentation morphology of different tools: a) YT5 tool; b) 50 nm coated tool; c) 100 nm coated tool; d) 200 nm coated tool

表 3 维氏硬度、弯曲强度及断裂韧性
Tab.3 Vickers hardness, bending strength and fracture toughness

Coating thickness/ nm	Average hardness/ (N·mm ⁻²)	Average value of bending strength/MPa	Average value of fracture toughness/(MPa·m ^{1/2})
None coating	1637.4	1456.18	13.97
50	1675.2	1459.23	14.18
100	1681.4	1465.2	14.27
200	1650.3	1468.07	14.25

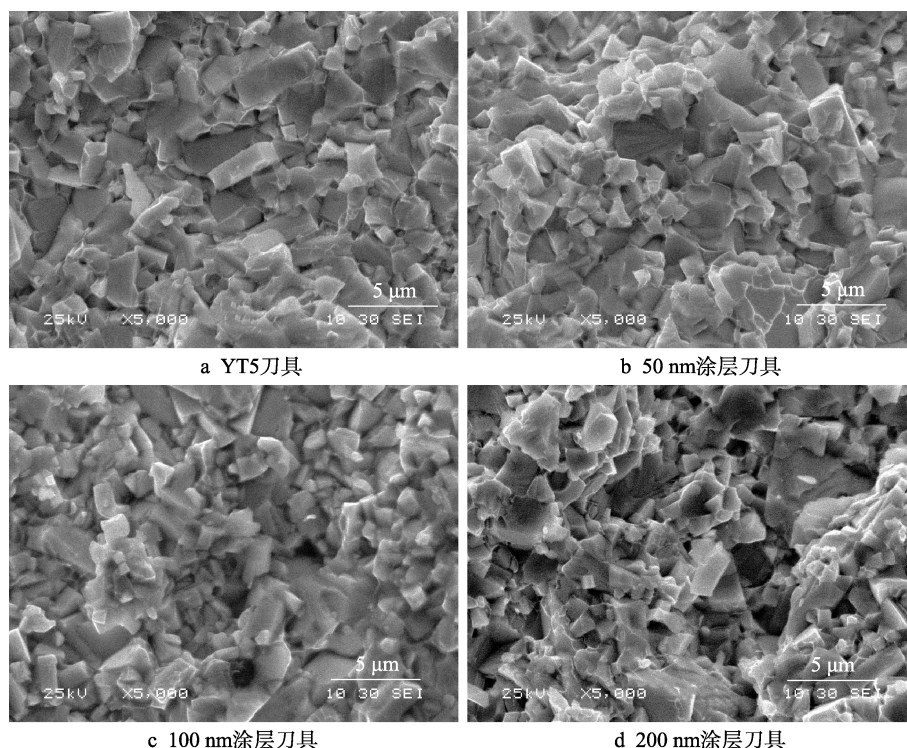


图5 不同刀具的断口形貌

Fig.5 Fracture morphology of different tools: a) YT5 tool; b) 50 nm coated tool; c) 100 nm coated tool; d) 200 nm coated tool

2.4 涂层结合力

不同厚度涂层刀具的声发信号结果如图6所示。当划痕仪划破纳米涂层时,会发生微弱的声信号,但是当划针划过刀具表面微坑时,也会产生声信号,导致声发信号不纯。因此不能仅通过声发信号与划痕载荷大小判断涂层-基体结合力,应当对比涂层破损位置、声发信号及划痕载荷三者关系得出涂层的真实结合力。

图6中a、b、c三点分别对应涂层脱落的三个阶段。点b以后,涂层开始产生微裂纹和破裂斑点,表明涂层与基体开始破碎、分离。因此,点b所对应载荷记为涂层-基体脱落的临界载荷,即涂层结合力。其对应的载荷力分别为11.07 N(50 nm)、12.74 N(100 nm)和7.86 N(200 nm)。在50~200 nm涂层厚度内,随着涂层厚度的增加,涂层-基体结合

力的呈先增后降的趋势,均大于3 N(微切削载荷范围)^[29-30]。因此,ALD纳米涂层在微切削过程中,仍会与基体表现出良好的结合状态。

涂层脱落的三个阶段(图7):(1)开始脱落阶段,涂层开始收缩,产生塑性变形,覆盖面积开始减小,划痕周围出现少许白色金属色泽,但涂层还未开始脱落,仅存在局部的塑性变形。(2)脱落阶段,涂层塑性变形急剧加大,划痕周围出现黑色微裂纹,涂层表面也开始破裂,形成黑色斑点,涂层脱离基体表面。(3)严重脱落阶段,划痕裂纹加深,变成深黑色裂痕,涂层表面开始形成黑色破裂带,涂层开始完全破碎、失效。

2.5 摩擦磨损性能

在室温干式环境下,不同厚度纳米 Al_2O_3 涂层摩擦系数的变化曲线如图8所示。涂层摩擦过程主要分

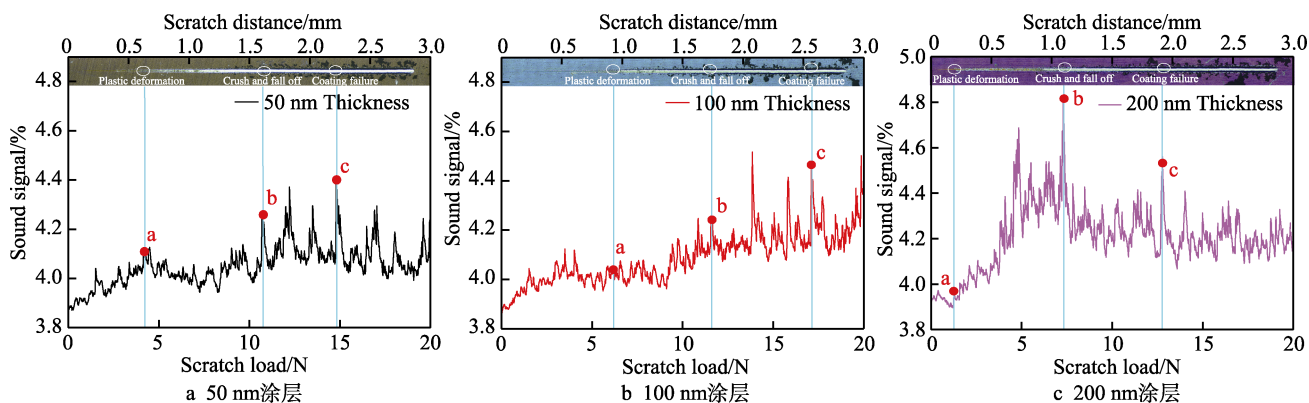


图6 声发信号、载荷力与涂层破裂位置的关系

Fig.6 Relation diagram of acoustic signal, load force and coating rupture position: a) 50 nm coating; b) 100 nm coating; c) 200 nm coating

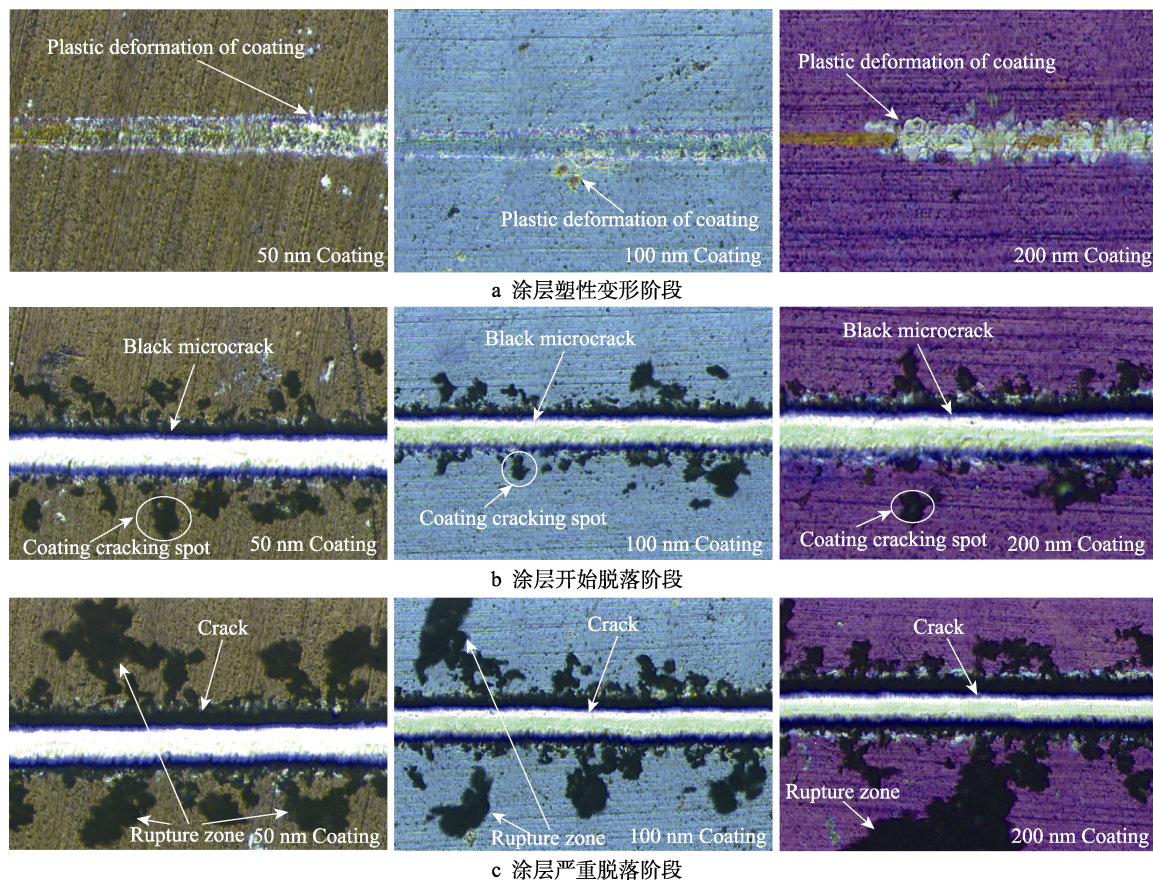


图 7 不同厚度涂层脱落过程

Fig.7 Dropping process of coatings with different thickness: a) coating plastic deformation stage; b) the coating begins to fall off; c) severe peeling off stage of coating

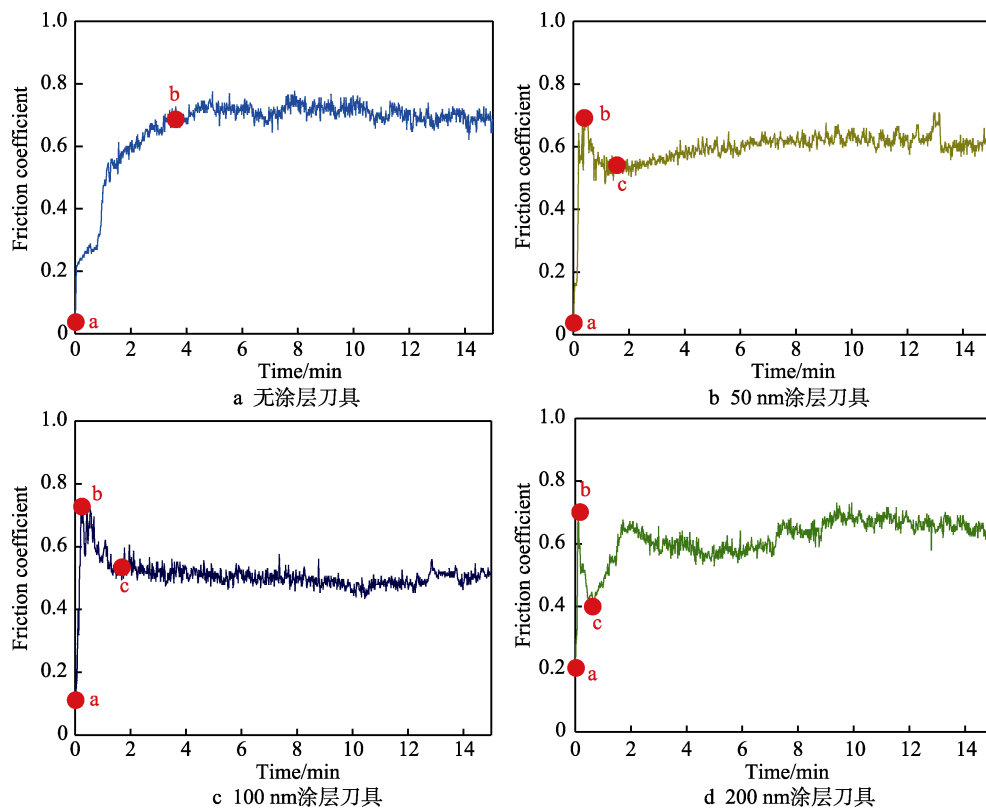


图 8 不同刀具的摩擦系数

Fig.8 Friction coefficient of different tools: a) YT5 tool; b) 50 nm coated tool; c) 100 nm coated tool; d) 200 nm coated tool

为三个阶段,在图 8 中用 a、b、c 三点表示。本实验取 c 点以后(未涂层刀具取 b 点以后)稳定摩擦阶段的摩擦系数平均值为最终摩擦系数,各刀具的摩擦系数分别为: 0.78 (YT5)、0.56 (50 nm 涂层)、0.43 (100 nm 涂层)、0.67 (200 nm 涂层)。结果表明,100 nm 涂层刀具的摩擦系数最低,比未涂层刀具降低 40% 以上,而 200 nm 涂层刀具因为涂层过早失效,因此对摩擦系数的降低效果并不理想。

具体的摩擦阶段形式如图 9 所示。结合图 8 所示的各点, a—b 段为摩擦抵抗阶段,随着刀具表面摩擦抗力 F_r 不断增加,摩擦系数显著增大,此外表面涂层产生塑性变形时,也会产生与摩擦抗力方向相同的阻力 F_c 。因此,在 a—b 段,涂层刀具的摩擦系数变化比未涂层刀具更剧烈。b—c 段为涂层刀具特有

的滚动-滑动摩擦阶段(未涂层刀具没有此过程),此过程中,部分涂层在外力作用下破损,产生的纳米颗粒开始润滑摩擦副表面,将表面的滑动摩擦形式变成滚动-滑动摩擦,摩擦系数也因此迅速减小,并且摩擦系数的减小程度与涂层破碎形成的纳米颗粒数量有关。c 点以后为稳定摩擦阶段,此时刀具表面纳米颗粒被消耗殆尽,涂层表面逐渐形成稳定的保护膜,摩擦系数渐趋于稳定,不再剧烈变化。对于普通刀具, b 点以后即为稳定摩擦阶段,摩擦抗力 F_r 逐渐被摩擦力 F_f 代替,摩擦系数也趋于稳定。图 8d 中, c 点后出现摩擦系数陡升现象,是因为 200 nm 厚度的涂层-基体结合力较低,在 c 点以后,涂层已经完全破损失效,因此不能形成稳定的保护膜,待纳米颗粒消耗殆尽后,摩擦系数急剧增加。

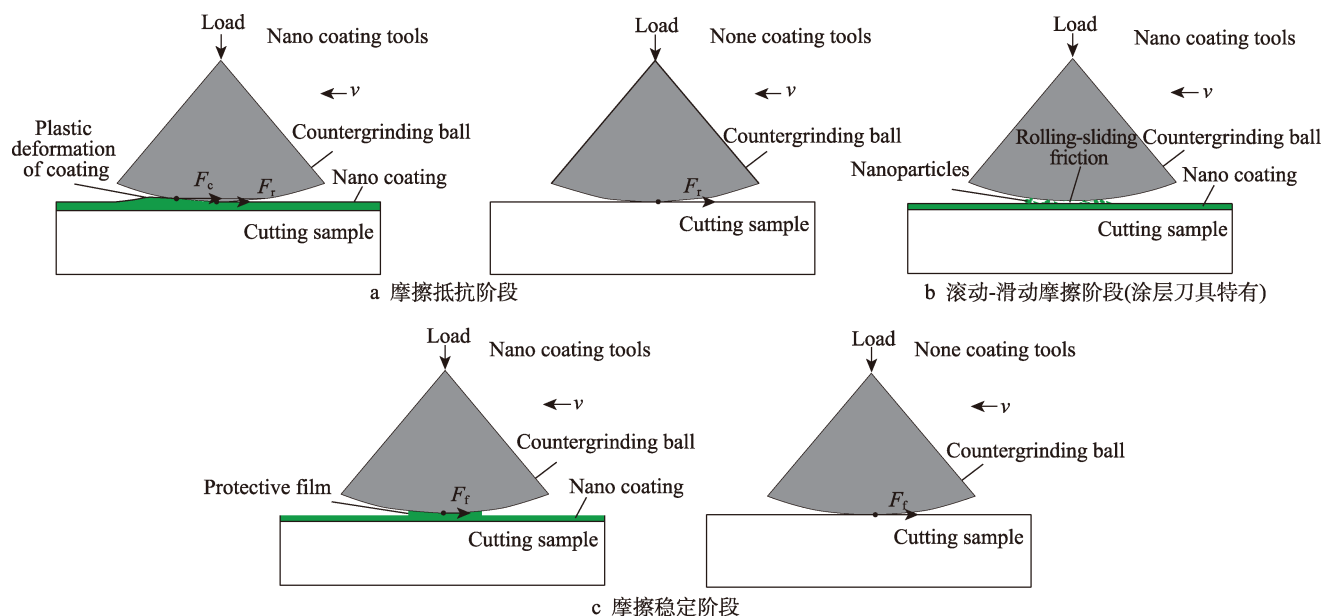


图 9 不同材料摩擦阶段

Fig.9 Friction stage of different materials: a) friction resistance stage; b) rolling sliding friction stage (special for coated tools); c) friction stability stage

3 结论

1) 基于 ALD 低温沉积技术,可以在 YT5 刀具表面制备出表面光滑、质量均匀的纳米氧化铝涂层。

2) 基于 ALD 低温制备的 Al_2O_3 涂层,可以提高刀具的硬度,并且 200 °C 的沉积温度不会降低刀具的断裂韧性和抗弯强度,对微刀具的力学性能不会产生负面影响。

3) 通过循环沉积次数,可以控制 ALD 纳米涂层的总厚度达纳米级。控制涂层的厚度有利于获得更理想的刀具刃线和切削剪切角,在消除微切削领域的尺寸效应上有广阔的应用前景。

4) 在 50~200 nm 涂层厚度内,基于 ALD 的 Al_2O_3 涂层与基体的结合力随着涂层厚度增加,呈先增后减的趋势,且结合力均大于微切削载荷,表明涂层在微

切削过程中依然能保持良好的附着状态。

5) 基于 ALD 的 Al_2O_3 涂层能够显著降低刀具的摩擦系数达 40% 以上,最小摩擦系数为 0.43。

参考文献:

- [1] 田璐,韩旭,高峰,等.微细铣削技术研究综述[J].机械强度,2019,41(3):618-624.
TIAN Lu, HAN Xu-zhao, GAO Feng, et al. Review of micro-milling technology[J]. Journal of mechanical strength, 2019, 41(3): 618-624.
- [2] YANG X M, CHENG X, WANG F, et al. Experimental study on tool wear of side cutting edge in micro-milling[J]. IOP Conference series: Materials science and engineering, 2019, 504(1): 012102.
- [3] LI Wei-jian, LIU Tong-shun. Time varying and condition adaptive hidden Markov model for tool wear state estimation and remaining useful life prediction in micro-mill-

- ing[J]. Mechanical systems and signal processing, 2019, 131: 689-702.
- [4] 陈强, 张而耕, 张锁怀. TiAlN, TiAlSiN 涂层的制备及其切削性能[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 118-124.
CHEN Qiang, ZHANG Er-geng, ZHANG Suo-huai. Preparation and cutting performance of TiAlN and TiAlSiN coating[J]. Surface technology, 2017, 46(1): 118-124.
- [5] HERNÁNDEZ-SIERRA M T, AGUILERA-CAMACHO 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.
- [6] 张而耕, 黄彪, 何澄, 等. 新型 Ta-C 涂层铣刀切削性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 125-130.
ZHANG Er-geng, HUANG Biao, HE Cheng, et al. Machinability of new type Ta-C coating milling cutter[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 125-130.
- [7] 李安海. 基于钛合金高速铣削刀具失效演变的硬质合金涂层刀具设计与制造[D]. 济南: 山东大学, 2013.
LI An-hai. Design and manufacturing of coated carbide tools based on tool failure evolution in high speed milling of titanium alloy[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [8] 张而耕, 王琴雪, 张锁怀. PVD 涂层刀具高速铣削 CoCrMo 合金的性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 262-266.
ZHANG Er-geng, WANG Qin-xue, ZHANG Suo-huai. Performance of PVD-coated tool in high speed milling of CoCrMo alloy[J]. Surface technology, 2017, 46(3): 262-266.
- [9] 康勃, 马瑞新, 吴中亮, 等. 现代刀具涂层备技术的研究现状[J]. 表面技术, 2008, 37(2): 71-74.
KANG Bo, MA Rui-xin, WU Zhong-liang, et al. Research status in preparation of modern cutting tool coatings[J]. Surface technology, 2008, 37(2): 71-74.
- [10] CHAE J, PARK S S, FREIHEIT T. Investigation of micro-cutting operations[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2006, 46(3-4): 313-332.
- [11] 张浩, 刘玉德, 石文天, 等. 微细切削加工表面质量的研究综述[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 219-232.
ZHANG Hao, LIU Yu-de, SHI Wen-tian, et al. Quality of micro machined surface[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 219-232.
- [12] 童利东, 白清顺, 赵岩, 等. 微径铣刀及微细铣削技术的研究进展[J]. 工具技术, 2006(12): 3-7.
TONG Li-dong, BAI Qing-shun, ZHAO Yan, et al. Study on micro-diameter milling tool and micro-milling technology[J]. Tool engineering, 2006(12): 3-7.
- [13] 房建国, 杨志甫, 王泳. 微切削加工与微型刀具技术的现状[C]//中国航空学会工艺专业分会辅机学组2007年度学术会议论文集. 北京: 航空工业出版社, 2007: 122-125.
FANG Jian-guo, YANG Zhi-fu, WANG Yong. The current situation of micro-cutting and micro-tool technology[C]// Proceedings of the 2007 annual academic conference of the auxiliary machinery group of the technology specialty branch of China Aviation Society. Beijing: Aviation Industry Press, 2007: 122-125.
- [14] 曹自洋, 何宁, 李亮. 微铣刀几何结构优化设计研究[J]. 工具技术, 2010, 44(11): 22-26.
CAO Zi-yang, HE Ning, LI Liang. Optimization design of tool geometry of micro-milling cutter[J]. Tool engineering, 2010, 44(11): 22-26.
- [15] NEVES D, DINIZ A E, MILTON S, et al. Microstructural analyses and wear behavior of the cemented carbide tools after laser surface treatment and PVD coating[J]. Applied surface science, 2013, 282(5): 680-688.
- [16] GERTH J, LARSSON M, WIKLUND U, et al. On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting[J]. Wear, 2009, 266(3-4): 444-452.
- [17] 石绪忠, 许康威, 武笑宇. 等离子喷涂纳米氧化铝钛涂层机械性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 96-101.
SHI Xu-zhong, XU Kang-wei, WU Xiao-yu. Mechanical behavior of plasma sprayed nano-Al₂O₃/TiO₂ coatings[J]. Surface technology, 2018, 47(4): 96-101.
- [18] ASLANTAS K, HOPA H E, PERCIN M, et al. Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti₆Al₄V alloy[J]. Precision engineering, 2016, 45: 55-66.
- [19] FRELLE H, GÜNTHER K G, HÄSSLER H, et al. Progress in physical vapour deposited wear resisting coatings on tools and components[J]. CIRP annals, 1988, 37(1): 165-169.
- [20] DENG Yang, CHEN Wang-lin, LI Bing-xin, et al. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 18373-18390.
- [21] AN Qing-long, CHEN Jie, TAO Zhen-rui, et al. Experimental investigation on tool wear characteristics of PVD and CVD coatings during face milling of Ti6242S and Ti-555 titanium alloys[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2020, 86: 105091.
- [22] 赵孟. 微细铣削尺寸效应基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
ZHAO Meng. Research on basis of size effect in micro milling[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [23] 杨定富, 韩树, 袁伟. 基体预热温度对热障涂层热残余应力影响的研究[J]. 表面技术, 2004, 33(2): 22-23.
YANG Ding-fu, HAN Shu, YUAN Wei. Study on the Influences of the substrate preheating temperature on the thermal residual stress of the thermal barrier coating[J]. Surface technology, 2004, 33(2): 22-23.
- [24] 张勇, 袁建辉, 谭礼明, 等. 温度和厚度对纳米金刚石涂层残余应力的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 265-270.
ZHANG Yong, YUAN Jian-hui, TAN Li-ming, et al. Effects of temperature and thickness on residual stresses of nano-diamond coating[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 265-270.
- [25] 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. Color and magneto-optical effect of magnetic metal covered with optical coatings[D]. Beijing: Capital Normal University, 2014.
- [26] GEORGE S M. Atomic layer deposition: An overview[J]. Chemical reviews, 2009, 110(1): 111-131.
- [27] ANAND R S, PATRA K. Modeling and simulation of mechanical micro-machining—A review[J]. Machining science & technology, 2014, 18(3): 323-347.
- [28] 凌平, 马鹏, 刘斌, 等. 碳含量对超细硬质合金钢微铣刀铣削性能的影响[J]. 硬质合金, 2016, 33(6): 404-409.
LING Ping, MA Peng, LIU Bin, et al. Effect of carbon content on milling performance of ultrafine cemented carbide[J]. Cemented carbide, 2016, 33(6): 404-409.
- [29] WANG Shi-ming, CHEN Da-fun, JANG Min-chang, et al. Development of micro milling force model and cutting parameter optimization[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S3): 851-858.
- [30] KANG I S, KIM J S, KIM J H, et al. A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process[J]. Journal of materials processing tech, 2006, 187-188: 250-255.