

TiAlSiN/CrAlSiN 纳米多层涂层刀具干切削 TC4 钛合金 切削性能

刘杰¹ 华俊芳¹ 段慧珍¹ 易根苗¹ 邓欣²

(1 广州番禺职业技术学院智能制造学院, 广州 511483)

(2 广东工业大学机电工程学院, 广州 510006)

文 摘 钛合金因其化学活性和切削高温引起刀具磨损严重。刀具表面施加涂层是有效地延长刀具服役时间的方法。借助 PVD 阴极电弧蒸发技术, 使用 TiAlSi 靶和 CrAlSi 靶交替叠加制成 TiAlSiN/CrAlSiN 纳米多层涂层刀具, 并使用这种刀具分别切削常规钛合金和 3D 打印钛合金。所制成的 TiAlSiN/CrAlSiN 纳米多层涂层表现了较高的硬度; 切削钛合金时, 刀具的磨损形式表现为涂层剥离, 前刀面月牙洼, 后刀面均匀磨损和刀尖崩刃。引起刀具磨损的主因是粘结, 其次是高温氧化。三个切削用量中, 切削速度对切削力和切削温度的影响要远大于切削深度和进给量对二者的影响。与常规 TC4 相比, 3D 打印 TC4 因伸长率和硬度下降, 弹性模量提高促使切削温度和切削力均低于常规 TC4, 刀具寿命相应的延长。

关键词 纳米多层涂层, TiAlSiN/CrAlSiN, 刀具磨损, 钛合金, 3D 打印钛合金

中图分类号: V261.2

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.015

Cutting Performance of TiAlSiN/CrAlSiN Nano-multilayer Coated Tools During Dry Cutting of TC4 Titanium Alloy

LIU Jie¹ HUA Junfang¹ DUAN Huizhen¹ YI Genmiao¹ DENG Xin²

(1 School of Intelligent Manufacturing, Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou 511483)

(2 School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006)

Abstract Cutting tools of titanium alloys are subject to severe wear due to its chemical activity and high cutting temperatures. Applying coatings to the tool surface is an effective way to extend tool service time. Using PVD cathodic arc evaporation technology, the TiAlSiN/CrAlSiN nano-multilayer coating tool was made by alternately superposing TiAlSi target and CrAlSi target, which are used to cut conventional titanium alloy and 3D printed titanium alloy, respectively. The obtained TiAlSiN/CrAlSiN nanomultilayer coatings exhibit high hardness. When cutting titanium alloys, the tool wear is characterized by coating delamination, craters on the rake face, uniform wear on flank face, and chipping on tool nose. The main cause of tool wear is adhesion, followed by high temperature oxidation. Among the three cutting parameters, the effect of cutting speed on cutting force and cutting temperature is much greater than that of depth of cut and feed. Compared with conventional TC4, the cutting temperature and cutting force of 3D printed TC4 are lower than those of conventional TC4 due to the decrease of elongation and hardness and the increase of elastic modulus, and the tool life is correspondingly prolonged.

Key words Nano-multilayer coating, TiAlSiN/CrAlSiN, Tool wear, Titanium alloy, 3D-printed titanium alloy

0 引言

由于钛合金具有高强度、低密度、高抗腐蚀性、高生物兼容性等一系列优势, 因此在航空航天、海洋工程、生物医疗等领域得到广泛应用。然而, 因其同

时存在着高温强度大、弹性模量低、变形系数小、热导率低、化学活性高等特点, 其在被切削过程中存在应力大、温度高、刀具磨损严重的问题。近年来, 一类新型的钛合金-3D 打印钛合金进入了应用领域, 由

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 2022 年度广东省普通高校特色创新类项目 (2022KTSCX294); 广州市基础与应用基础研究项目 (202201010393, 202201011848); 佛山市科技创新团队项目 (FS0AAKJ919-4402-0023); 季华实验室项目 (X190061UZ190)

第一作者简介: 刘杰, 1974 年出生, 博士, 副教授, 主要从事新型涂层刀具制备及难加工材料切削的研究工作。Email: liujie9118@163.com

于其成材过程与传统钛合金存在巨大差异,这种新型钛合金的切削加工行为值得研究,但针对3D打印钛合金切削方面的研究报道仍然不多且结论不一致。

针对钛合金切削过程中出现的高温和与刀具基体的化学反应,目前在刀具表面施加某种涂层从而阻隔切削时的剧烈化学反应和显著热传递仍然是比较有效的方法。过渡金属氮化物涂层是现在切削刀具涂层的主流策略,在除钛合金外的工件材料范围,获得了诸多成功应用^[1-3]。TiN和CrN是研究比较早而且实际应用比较成功的两类二元氮化物PVD涂层,然后借助合金化手段可以进一步提高涂层的各种性能。Al、Si是迄今为止最常用的、最成功的涂层合金化元素。Al可以提高涂层的硬度和抗氧化性,而Si通过形成纳米复合结构提高涂层的硬度和高温稳定性。在TiN和CrN基本相中添加Al和Si所形成的TiAlSiN和CrAlSiN涂层在各种应用场景中得到了成功的应用^[4-9]。

2010年后,为了获得涂层的综合性能,由厚度在1~100 nm以内的两种不同材料的涂层交替叠加形成的纳米多层涂层被制备出来。比如Cr/CrN^[10]、CrN/ZrN^[11]、TiN/CrAlSiN^[12]、TiAlSiN/CrN^[13]、AlTiCrN/TiSiN^[14],其比单层涂层优良的韧性、热稳定性和抗腐蚀性能引起人们的关注^[15]。

在本文中,借助PVD的阴极电弧蒸发技术,使用TiAlSi靶和CrAlSi靶交替叠加制成TiAlSiN/CrAlSiN

纳米多层涂层刀具,并使用这种刀具分别切削常规钛合金和3D打印钛合金。研究TiAlSiN/CrAlSiN纳米多层涂层刀具切削钛合金时的磨损机理;切削用量对切削过程的影响;3D打印钛合金与常规钛合金切削加工行为的不同。

1 实验

1.1 纳米多层涂层刀具制备

本文使用PVD的阴极电弧蒸发技术,涂层设备为NH-10758型多功能PVD镀膜机。涂层基体安装于炉膛中间的台车转架上,样品获得三个维度的旋转运动,如图1所示。在相对的两侧分别安装Ti₄₅Al₄₅Si₁₀靶和Cr₄₅Al₄₅Si₁₀靶。本文的2 r/min的台车转速决定了涂层调制周期为20 nm。涂层厚度设计为3.5±0.4 μm。涂层的基体分别为Co质量分数为6%的WC硬质合金块体,尺寸为18 mm×18 mm×5 mm,用于力学性能测试和截面形貌观察;Co质量分数为6%的WC硬质合金标准车刀片120408,用于车削实验。各样品抛光清洁后装入炉腔内,炉腔抽真空至5.0×10⁻³ Pa,升温至500 °C,升温 and 保温总时间不低于120 min。开氩气,保持压力0.6 Pa;加偏压800 V,辉光清洗9.5 min;偏压降到300 V,阳极刻蚀清洗20 min,以清洁和活化基体表面;通入氮气,氮气压力按照2-3-3 Pa三段施加;靶电流按照145-160-160 A施加。目的是形成梯度层,降低残余应力,增强膜基结合力。最后,温度降至室温后,取样。

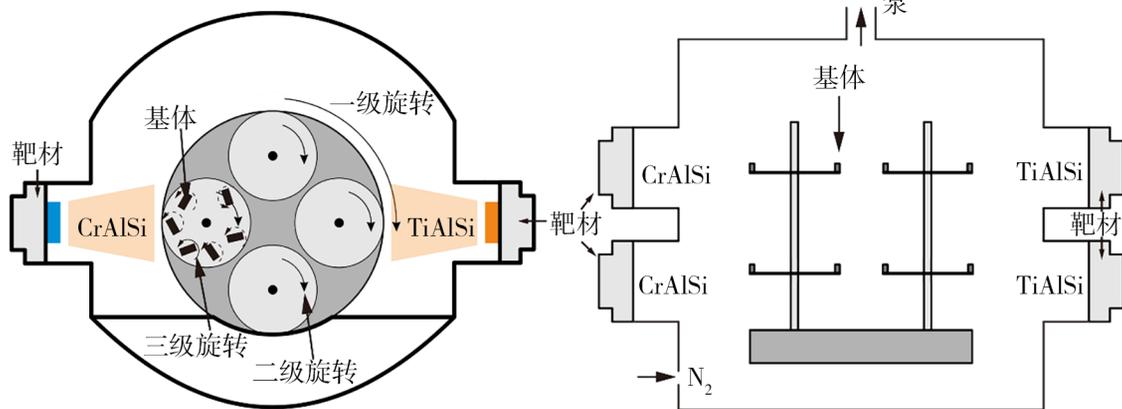


图1 靶材及涂层基体布置图

Fig. 1 Layout of target and substrate for coating

1.2 纳米多层涂层性能表征

涂层表面和截面形貌观察采用Nova NanoSEM 430。涂层的硬度值(H)和弹性模量(E)通过纳米压痕试验(Nano-indentation)得到。使用Anton Paar公司的TTX-NHT2型纳米压痕仪。试验参数为:载荷10 mN,加载速率为15 mN/min,压入深度为120 nm,

即限制在薄膜厚度的10%之内,以消除基体对薄膜硬度的影响。最深处维持载荷时间为5 s。涂层与硬质合金基体的结合强度采用划痕法,使用仪器为Anton Paar RST³,参数为:划痕长度为3 mm,载荷为1~100 N,加载速率为200 N/min,金刚石尖头的直径为200 μm。涂层韧性测试使用MVK-H1, Mitutoyo维

氏硬度计以及附带的相对面夹角为 136° 的正四棱锥体金刚石压头。试验参数: 载荷 200 g, 停留时间 15 s。计算韧性公式采用参考文献式 4.18 方法^[16]。

$$K_{Ic} = \delta \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (1)$$

式中, P 为施加的载荷; E 为弹性模; H 为硬度; c 为径向裂纹长度; δ 为与压头几何相关的常数, 对于标准维氏正四棱锥金刚石压头, 取 0.016 ± 0.004 。

1.3 3D 打印钛合金 TC4 制备

表 1 TC4 钛合金棒材的 3D 打印工艺

Tab. 1 3D printing process of TC4 titanium alloy bar

材料	激光功率/W	扫描速度/(mm/min)	间距/mm	层厚/mm	送粉转速/(r/min)	送粉气量/(L/min)	保护气量/(L/min)
TC4	2 200	720	2	0.7	1.2	6	20



图 2 3D 打印 TC4 钛合金棒材

Fig. 2 Titanium alloy TC4 bars by 3D printing

1.4 切削实验设计

本文验证涂层切削性能使用车削方法。使用的设备包括车床、红外热像仪、标准 MSBNR2020K12 型刀杆、标准 SNMA120408 刀片。切削设备布置如图 3。本文在车削实验的数控编程时设置为恒线速度切削, 即随着工件半径的减小, 主轴转速会自动升高, 从而维持车削速度不变。这种做法的益处是保证所有刀具不管在何种工件直径时, 均有相同的切削速度并可以使用切削时间来衡量切削寿命。本文的切削温度由红外热像仪完成, 热像仪型号 Testo 890-2 SET, 最大量程 1 200 $^\circ\text{C}$, 精度 $\pm 2^\circ\text{C}$, 发射率设定范围 0.01~1, 光谱范围 8~14 μm 。切削力测量使用瑞士 Kister 9129AA 测力系统, 三向最大测量力 10 kN, F_x 和 F_z 灵敏度为 -8 pC/N , F_y 灵敏度为 -4.1 pC/N 。刀具发生磨损时, 后刀面的磨损量比前刀面容易测量, 所以在衡量刀具寿命时, 常常以后刀面平均磨损长度 VB 值作为磨钝标准。加工时每隔一定时长取下刀具使用工具显微镜观测该值。本文 VB 值采用 300 μm 。

在研究切削用量对切削温度、切削力和刀具寿命的影响时, 其中 $V_c = 100 \text{ m/min}$, $a_p = 0.3 \text{ mm}$, $f = 0.1 \text{ mm/r}$ 为切削用量基础参照, 每次只改变其中一个变量来对

本文研究两种 TC4 钛合金, 一种为常规钛合金, 以下简称 TC4, 由陕西宝鸡钛业提供。常规钛合金的生产方式一般是利用海绵钛真空自耗 n 次熔炼, 再经过锻(或挤或轧)、退火等工序后成为供应状态。另外一种钛合金是近年随着增材制造技术出现的 3D 打印钛合金。按照粉体的不同供应方式, 3D 打印可分为两大类: 粉床选区烧结和激光同轴送粉。本文 3D 打印 TC4 采用激光同轴送粉增材制造方法制得, 以下简称 TC4-3D。3D 打印工艺如表 1 所示。完成的 3D 打印 TC4 钛合金棒材如图 2 所示。

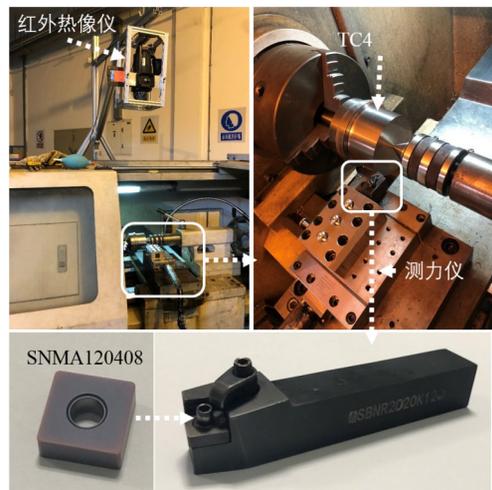


图 3 切削设备布置

Fig. 3 The cutters and the cutting test equipments

比切削结果。本文切削用量如表 2 所示。

表 2 切削用量说明

Tab. 2 Description of cutting parameters

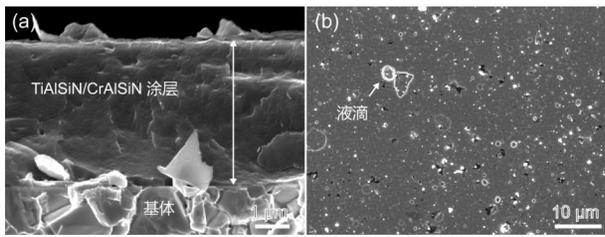
V_c /(m/min)	a_p /mm	f /(mm/r)	代指符号	实验目的
100	0.3	0.1	100-0.3-0.1	基础参照
100	0.3	0.2	100-0.3-0.2	改变进给量
100	0.5	0.1	100-0.5-0.1	改变切削深度
150	0.3	0.1	150-0.3-0.1	改变切削速度

2 实验结果及讨论

2.1 涂层微观结构及力学性能

图 4 为 TiAlSiN/CrAlSiN 纳米多层涂层截面和表面形貌, 涂层致密并与基体结合良好, 涂层未见明显的柱状晶形貌, 符合含 Si 氮化物涂层晶粒被细化后的特征。涂层表面上分布有大小不一的白色“液滴”。

经测试后, 涂层的各项力学性能如表 3 所示。与常见的 Ti 基和 Cr 基氮化物涂层相比较^[16], 本涂层硬



注:(a)涂层截面;(b)涂层表面。

图4 TiAlSiN/CrAlSiN 涂层截面和表面形貌

Fig. 4 Morphology of cross-section and top surface for TiAlSiN/CrAlSiN coatings

度较高,韧性适中。但涂层结合力较低。含Si涂层的结合力普遍偏低,原因为Si与N形成的 Si_3N_4 非晶相与基体在晶格结构上的不匹配以及这种涂层内较大的残余应力所致。

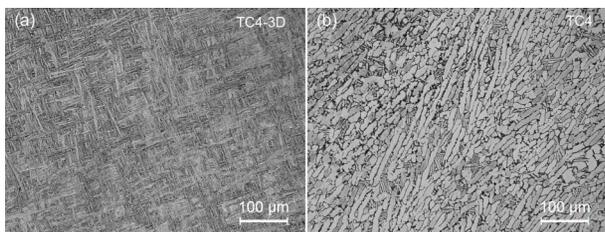
表3 涂层的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of the coatings.

涂层力学性能指标	H/Gpa	E/Gpa	韧性/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	涂层结合力/N
值	32.76	397.28	3.23	48

2.2 3D打印钛合金力学性能

由于常规钛合金与3D打印钛合金的生产方式根本不同,造成其内部金相组织及力学性能出现很大差异,因此在进行切削加工研究前有必要对两类钛合金的组织性能进行综合比较。图5为两种TC4钛合金的金相图谱。图5(a)为TC4-3D典型的 $\alpha+\beta$ 的网篮组织,这与3D打印工艺快速的冷却速度和冷却加热循环历史有关。粉体被激光熔化后,较高的冷却速度形成快速凝固组织,表现为细小的针状或片层状马氏体组织,组织没有完全冷却后,又再次被加热和冷却,组织内部具备了残存的 β 相、初生 α 相、次生 α 相所形成的 $\alpha+\beta$ 两相组织。这些相形态多样,交错变化排列,犹如编织成的网篮。图5(b)是经过熔炼锻造的常规TC4金相组织。其中白色的 α 相除了等轴态外,还有因热处理和锻造共同影响形成的拉长态(条状)。两种钛合金的力学性能经检测后列于表4。从表中数据对比可见,除了伸长率有较大的下降,3D打印钛合金的屈服强度、抗拉强度、弹性模量均大于常规钛合金。这种力学性能上的差异导致了其作为被加工材料时表现出不同的特点。



注:(a)TC4-3D;(b)常规TC4。

图5 两种TC4钛合金的金相图谱显微结构

Fig. 5 Microstructures of two kinds of TC4 alloys

表4 两种TC4的力学性能

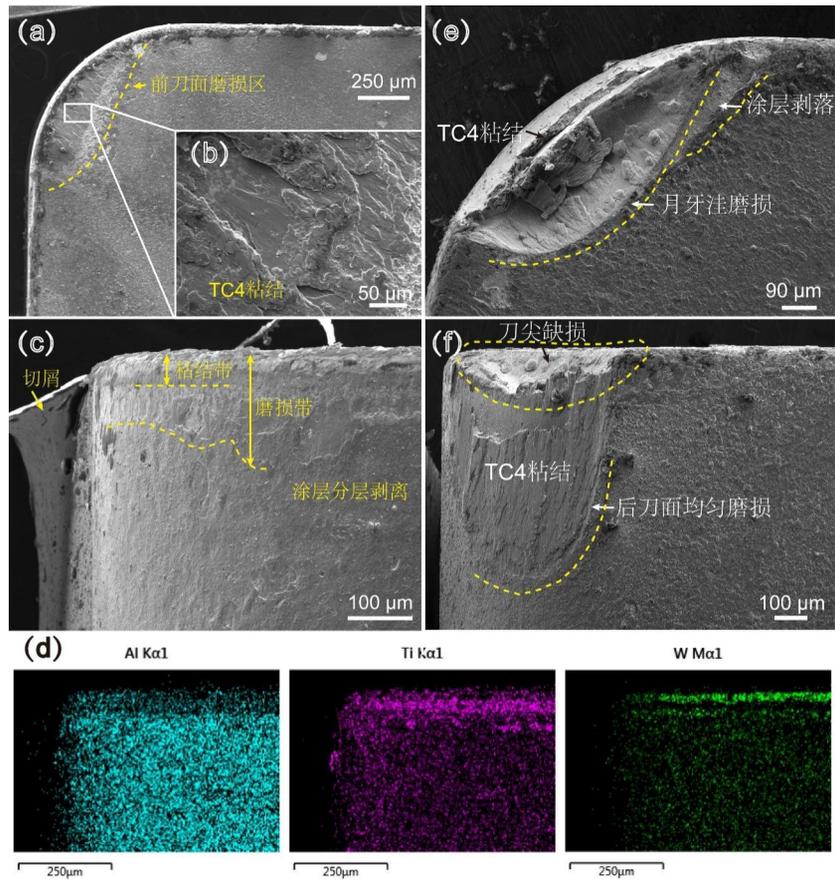
Tab. 4 Mechanical properties of two kinds of TC4

力学性能项目	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	伸长率/%	E/GPa	HRC
TC4	884±18	962±15	12±0.6	121±6	35.6±0.6
TC4-3D	908±19	1 000±13	7.5±0.7	141±8	34.5±0.4
变化趋势	↑	↑	↓	↑	↑

2.3 纳米多层涂层刀具磨损形式及机理

采用如下切削参数车削TC4钛合金实验: $V_c=100\text{ m/min}$, $a_p=0.3\text{ mm}$, $f=0.1\text{ mm/r}$ 。刀具的磨损演变用切削初始和切削终了两个时段来对照研究。观察后刀面涂层是否有剥离需要在短时切削(如1分钟)后进行,如果是切削终了,由于钛合金粘结严重,将很难观察。图6(a)~(d)为刀具切削1分钟后,前后刀面SEM形貌和后刀面的元素面分布。首先观察前刀面,前刀面形成一块集中磨损区,如图6(a)所示。局部放大该区域,可见刀具表面已经有严重的TC4粘结,如图6(b)所示。从后刀面上观察,后刀面的磨损带明显分成上下两个区域,上部粘结TC4较多。下部未粘结区可见涂层的分层剥离现象。为了分辨后刀面上各区域的元素分布情况,对整个后刀面做能谱分析,如图6(d)所示。Ti元素分布图证明粘结带主要集中在靠近刀刃的上部。W分布图显示,刀刃部已出现刀具基体中的W元素,表明此处涂层已出现脱落。切削终了后,再次观察前后刀面的SEM像,如图6(e)~(f)。前刀面已出现明显的月牙洼磨损,月牙洼边缘伴随有涂层剥落区。从后刀面上观察,后刀面表现出均匀磨损状态,磨损区内“涂抹”厚厚的TC4钛合金。从后刀面上还可见刀尖缺损现象,说明刀具到寿命后期,已逐渐丧失切削能力。

对刀具的磨损机理进行分析。首先粘结既是切削钛合金时刀具的典型磨损形式,也是引起刀具磨损的机理之一。由于钛合金本质上较大的化学活性,加上较低的热导率引起的切削高温,钛合金的粘结在切削一开始就变得严重。上一次走刀粘结在刀具表面的钛合金在下次走刀的强大的冲击和摩擦作用下脱落,钛合金脱落时,必然会带走一部分涂层材料,从而引起涂层磨损,即粘结磨损。另外,在切削高温下,涂层表面发生氧化变性,也是涂层脱落的不可忽视的原因。另外,涂层与基体的结合力也是涂层能否持续存在的基本保障。在钛合金切削时,很难观察到磨粒磨损,这是因为相对涂层硬度,钛合金的硬度较低,不足以在刀具表面形成刻痕。即使涂层脱落露出基体,粘结在刀具表面的钛合金也对刀具起到了保护作用。



注:(a)~(d)切削一分钟; (e)~(f)切削终了。

图6 刀具前刀面和后刀面磨损形貌

Fig. 6 Wear morphology of rake and flank

2.4 切削用量对切削温度、切削力和刀具寿命的影响

使用TiAlSiN/CrAlSiN纳米涂层刀具分别以不同的切削速度、切削深度和进给量切削钛合金。图7为四种切削用量下切削温度的线性拟合趋势线。其中150 m/min的切削速度获得最高的切削温度815 °C,说明切削速度提高对切削温度升高影响最大。这一方面是因为刀具与工件之间的摩擦速度加剧;另一方面,第一变形区的材料剪切断裂速率加剧(即应变率加剧),材料断裂生热的速率加快。增大切削深度和进给量有降温作用,因为切屑变厚变宽,改善了散热条件,抑制了温度快速上升。

图8为不同切削用量对切削力和刀具寿命的影响。首先对比图中(a)线和(b)线,当切削速度由100 m/min提高到150 m/min时,切削力由最大131 N下降到86 N,刀具切削寿命由25 min下降到8.4 min。体现出了高速切削可以有效降低切削力。虽然,切削力降低有助于延长刀具寿命,但切削温度升高所造成的破坏作用更大,综合起来看,实际刀具寿命降低。

M. E. MERCHANT曾经在低速下依据最小能量原理推导出剪切角和摩擦角的关系式为^[17]:

$$\varphi = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma_0}{2} \quad (2)$$

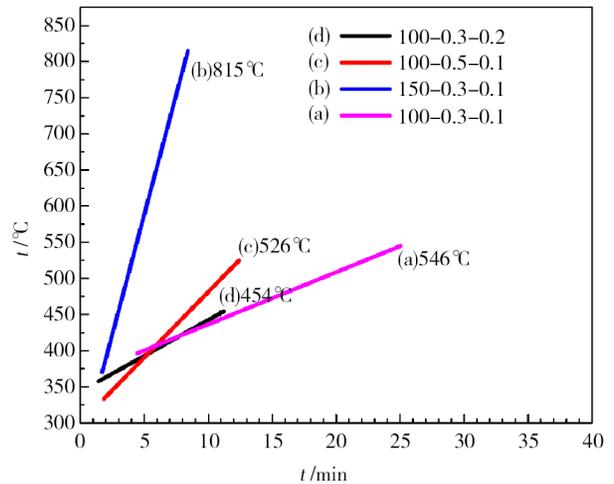


图7 切削用量对切削温度的影响

Fig. 7 The influence of cutting parameters on cutting temperature

当代学者^[18-19]考虑了高切削速度的影响,按照功率平衡原理验证了该公式同样适用于高速场合。首先,在本文中,切削速度升高导致切削温度升高,那么摩擦副间的微凸体软化,摩擦系数将减少(即摩擦角 β 减少)。根据上述公式,可知剪切角增大。另外,当切削速度提高时,金属流动速度大于其塑性变形速度,导致第一变形区后移,实际剪切角增大^[20],如图9。以上两个共同因素都导致剪切角变大,从而切削力降低。

其次,对比图8中(a)线和(c)线,增加切削深度后,切削力增加很明显。且刀具寿命也由25 min下降到12 min。这里刀具寿命的降低由较大切削力和较高温度共同导致。

最后,对比图8中(a)线和(d)线,进给量增加一倍后,刀具切削力和寿命的变化规律同切削深度的变化。即切削力变大,刀具寿命降低。只是切削力增加幅度更大,寿命降低更多。

所以,综合以上分析,如果为了追求加工效率,不考虑刀具成本,建议使用高的进给量和切削深度;如果是切削薄壁钛合金零件,为了防止工件变形,推荐高速切削。

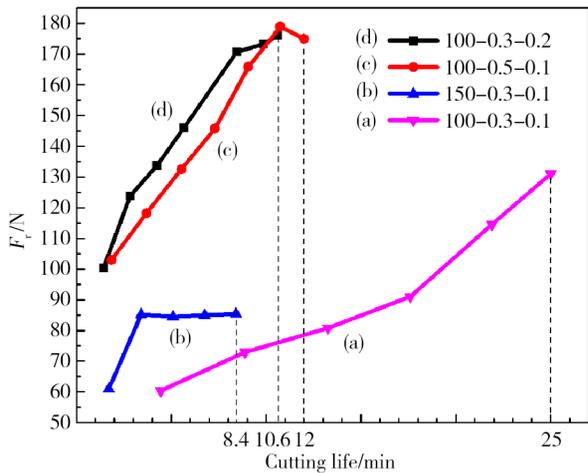


图8 切削用量对切削力和刀具寿命的影响

Fig. 8 The influence of cutting parameters on cutting force and tool life

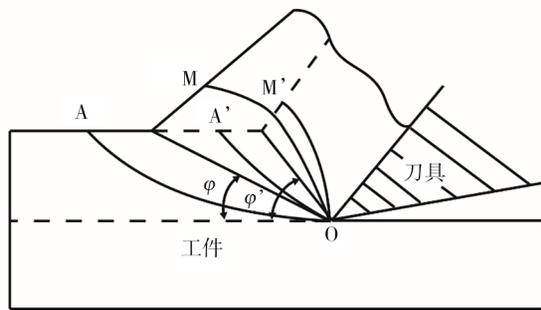
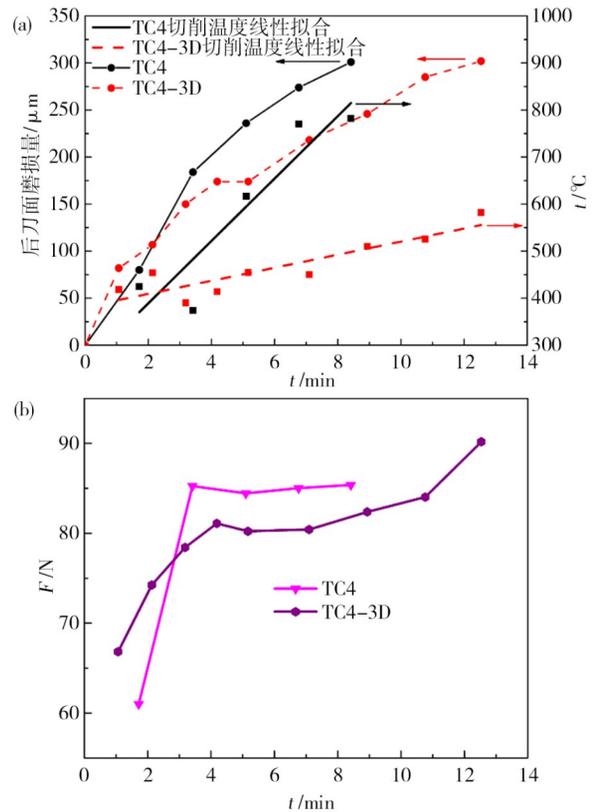


图9 切削速度对第一变形区的影响^[20]

Fig. 9 The influence of cutting speed on the first deformation zone^[20]

2.5 3D打印钛合金对涂层刀具切削加工行为的影响

因为制备工艺不同,3D打印钛合金和常规钛合金在组织结构以及由此带来的力学性能的差异,导致在切削时也有不同的表现。图10为使用TiAlSiN/CrAlSiN涂层刀具切削常规钛合金与3D打印钛合金的磨损、温度及切削力对比。为节约3D打印材料,本节的切削参数取为:切削速度 V_c 为150 m/min,切削深度 a_p 为0.3 mm,进给量 f 为0.1 mm/r。



注:(a)磨损与温度,(b)切削合力。

图10 TiAlSiN/CrAlSiN 切削常规TC4与3D打印TC4的磨损、温度及切削合力

Fig. 10 Wear, temperature, and cutting force of TiAlSiN/CrAlSiN cutting conventional TC4 and 3D printed TC4

可以明显看出,3D打印钛合金的切削温度和切削力均较低,由此刀具寿命也长。以 $300\ \mu\text{m}$ 的后刀面磨损标准来衡量刀具寿命,TC4-3D切削寿命为12.5 min,TC4为8.4 min,寿命提高49%。从上一节关于TC4和TC4-3D之间组织及力学性能的研究可知,虽然TC4-3D在抗拉强度、屈服强度有提高,但是其伸长率和硬度的下降,弹性模量的提高导致切削过程变得容易进行。TC4-3D的伸长率下降了37.5%,弹性模量上升了16.5%,硬度下降3%。上述三个力学性能参数的影响机制是,工件材料硬度降低有利于延长刀具寿命;伸长率降低导致切屑易于断裂,从而减少材料与刀具的接触时间,减少了刀具磨损;弹性模量上升,导致钛合金在刀具施加的载荷作用下,产生的弹性变形减少。工件回弹是钛合金加工中的一个挑战性因素,是径向切削力大于常规材料的主因。工件回弹减少可以降低刀具与工件之间的密切接触,从而大大降低刀具与工件之间的摩擦和切削温度,从图10(a)中看到,常规TC4的切削温度可以达到 $800\ ^\circ\text{C}$,TC4-3D最高 $550\ ^\circ\text{C}$ 。综上所述,TC4-3D的切削加工性易于常规TC4。由于工件表面质量与刀具的磨损程度直接相关,在相同切削参数和相同切削时长条件下比较,由于切削常规TC4的刀具更快地失去切削能力并伴有更高的切削温度,导

致常规TC4的表面粗糙度,受热影响的程度都大于TC4-3D。

3 结论

借助PVD的阴极电弧蒸发技术,制备了TiAlSiN/CrAlSiN纳米多层涂层刀具,分别对常规钛合金和3D打印钛合金进行切削实验。结论如下:

(1) 所制备的TiAlSiN/CrAlSiN纳米多层表现了较高的硬度,适中的韧性,但涂层结合力较低,这是涂层在服役过程中从基体上剥离的内因。

(2) 钛合金切削时,刀具的前刀面出现月牙洼,后刀面表现为均匀磨损,刀尖部位出现崩刃。从切削早期即可观察到涂层剥落现象,切削终了时可见涂层完全剥离。引起磨损的主因是粘结,其次是高温氧化。

(3) 三个切削用量中,切削速度对切削力和切削温度的影响要远大于切削深度和进给量对二者的影响。当切削速度增加时,切削温度显著升高,切削力显著降低。当切削深度和进给量增加时,切削温度有所降低,但切削力显著升高。

(4) 与常规TC4相比,3D打印TC4尽管在抗拉强度、屈服强度上有提高,但因伸长率和硬度下降,弹性模量提高促使切削过程变得容易进行。因此3D打印TC4的切削温度和切削力均低于常规TC4,刀具寿命相应的延长。

参考文献

[1] SOUSA V F, SILVA F J, ALEXANDRE R, et al. Experimental study on the wear evolution of different PVD coated tools under milling operations of LDX2101 duplex stainless steel [J]. *Advances in Manufacturing*, 2022, 11(1): 1–22.

[2] AZIM S, GANGOPADHYAY S, MAHAPATRA S S, et al. Performance evaluation of CrAlN and TiAlN coatings deposited by HiPIMS in micro drilling of a Ni-based superalloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 449(15): 128980.

[3] DAS A, KAMAL M, DAS S R, et al. Comparative assessment between AlTiN and AlTiSiN coated carbide tools towards machinability improvement of AISI D6 steel in dry hard turning [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(6): 3174–3197.

[4] SRIRAM C, ARIHARAN N, RADHIKA N. Comparative study on machining performance of TiAlSiN, AlTiN/TiAlSiN-coated cutting tools [J]. *Transactions of the IMF*, 2022, 101(2): 1–8.

[5] RAJGURU R R, VASUDEVAN H. A study of micro hardness in the machining of Inconel 625 using TiAlSiN coated tools under dry cutting conditions [J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022(10): 1–11.

[6] SILVA F J, SOUSA V F, CAMPILHO R D, et al. Wear behavior of coated tools when milling S32101 duplex stainless steel [J]. *Materials Proceedings*, 2022, 8(1): 45.

[7] DRNOVŠEK A, DE FIGUEIREDO M R, VO H, et al. Correlating high temperature mechanical and tribological

properties of CrAlN and CrAlSiN hard coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 372: 361–368.

[8] ŠVEC P, BOŠANSKÝ M, GONDÁR E, et al. Wear of AlCrN and CrAlSiN coatings applied to nonstandard involute gears [J]. *Lubricants*, 2021, 9(5): 54.

[9] DRNOVŠEK A, VO H T, DE FIGUEIREDO M R, et al. High temperature fracture toughness of single-layer CrAlN and CrAlSiN hard coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 409: 126909.

[10] WIECIŃSKI P, SMOLIK J, GARBACZ H, et al. Failure and deformation mechanisms during indentation in nanostructured Cr/CrN multilayer coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 240: 23–31.

[11] VORONTSOV A, FILIPPOV A, SHAMARIN N, et al. High-temperature oxidation of CrN/ZrN multilayer coatings [J]. *Metals*, 2022, 12(10): 1746.

[12] LI W, LIU P, ZHU X, et al. Effect of Si content on microstructural evolution and superhardness effect of TiN/CrAlSiN nanomultilayered films [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 650: 592–597.

[13] LIU H, YANG F C, TSAI Y J, et al. Effect of modulation structure on the microstructural and mechanical properties of TiAlSiN/CrN thin films prepared by high power impulse magnetron sputtering [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 358: 577–585.

[14] CHANG Y Y, YANG Y J, WENG S Y. Effect of interlayer design on the mechanical properties of AlTiCrN and multilayered AlTiCrN/TiSiN hard coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 389: 125637.

[15] KAMENEVA A, KICHIGIN V. Corrosion, wear, and friction behavior of a number of multilayer two-, three- and multicomponent nitride coatings on different substrates, depending on the phase and elemental composition gradient [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 489: 165–174.

[16] ZHANG S. 纳米结构的薄膜和涂层:力学性能[M]. 北京:科学出版社, 2012.

ZHANG S. *Nanostructured Thin Films and Coatings: Mechanical Properties* [M]. Beijing: CRC press, 2012.

[17] Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in orthogonal cutting [J]. *Journal of applied physics*, 1945, 16(6): 318–324

[18] RECHT R F. A Dynamic Analysis of High-Speed Machining [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1985, 107(4): 309–315.

[19] 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京:高速切削加工技术, 2003.

AI X. *High Speed Machining Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.

[20] 刘战强, 万熠, 艾兴. 高速铣削中切削力的研究 [J]. *中国机械工程*, 2003, 14(9): 734–737.

LIU Z Q, WAN Y, AI X. Cutting forces in high-speed milling [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(9): 734–737.