

并行超声振动切削对钛合金轴表面完整性的影响研究

龙玉朋¹ 蔡维^{1*} 李丽¹ 彭涛² 董国军³

1.西南大学工程技术学院,重庆,400715

2.浙江大学流体动力基础件与机电系统全国重点实验室,杭州,310027

3.哈尔滨工业大学机械工程学院,哈尔滨,150001

摘要:针对钛合金轴类零件加工表面质量保障困难,提出一种基于超声振动的双刀具切削协同的切削方法,即并行超声振动切削。分析了并行超声振动切削原理与切削模式,研究了刀具-工件的运动轨迹和分离切削条件。研究了并行超声振动切削与单刀具普通切削、双刀具普通切削(并行切削)、单刀具超声振动切削等四类切削工艺对其表面完整性(包括表面粗糙度及加工表面形貌、表面残余应力、显微组织与表面硬度)的影响规律。试验结果表明:并行超声振动切削与单刀具超声振动切削显著降低了加工表面粗糙度,增大了变形层厚度和表面硬度,但表面残余应力增大;并行切削和并行超声振动切削的表面残余应力减小,表面粗糙度增大。并行超声振动切削兼具并行切削与振动切削优势,具有较低表面粗糙度的同时减小表面残余应力,提高表面显微硬度及硬化率,进一步增强材料性能。

关键词:并行超声振动切削;表面完整性;钛合金;超声振动

中图分类号:V26

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Effects of Parallel Ultrasonic Vibration-assisted Cutting on Surface Integrity of Titanium Alloy Shafts

LONG Yupeng¹ CAI Wei^{1*} LI Li¹ PENG Tao² DONG Guojun³

1.School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing, 400715

2.State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic system, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

3.School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001

Abstract: Considering the difficulties in machining surface quality assurance of titanium alloy shaft parts, a parallel ultrasonic vibration cutting method was proposed based on ultrasonic vibration with two tools cutting synergy. The parallel ultrasonic vibration cutting principles and cutting modes were analyzed, and the tool-workpiece trajectory and separation cutting conditions were studied. The effects of four types of cutting processes including the parallel ultrasonic vibration cutting and the single-tool conventional cutting, the conventional cutting with two tools (parallel cutting), and the single-tool ultrasonic vibration cutting, on their surface integrity (i. e., surface roughness and machined surface morphology, surface residual stress, microstructure and surface hardness) were studied. The experimental results indicate that the parallel ultrasonic vibration cutting and the single-tool ultrasonic vibration cutting significantly benefit to reduce the surface roughness of the machined surfaces, to increase the thickness of the deformed layers and the surface hardness, resulting in high surface residual stress. The parallel cutting and parallel ultrasonic vibration cutting may reduce the surface residual stress but increase the surface roughness. Therefore, parallel ultrasonic vibration cutting combines the advantages of parallel cutting and ultrasonic vibration cutting, achieving a lower surface roughness while reducing surface residual stress, increasing surface microhardness and hardening rate, and further enhancing material properties.

Key words: parallel ultrasonic vibration-assisted cutting; surface integrity; titanium alloy; ultrasonic vibration

0 引言

钛合金轴类零件因具有比强度高、耐热性好、

耐腐蚀强等优良性能被广泛应用于航空领域,特别是航空发动机传动杆、航空舱门转轴以及用来支撑或固定飞机发动机和引擎机舱的各种钛合金拉杆、连杆和转轴等核心基础零部件^[1-3]。由于钛合金的热导率低、加工回弹大及其化学活性高,其加工过程散热差、刀具磨损大并常发生粘刀现象,

收稿日期:2025-03-24

基金项目:国家自然科学基金(52305508);重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX0294)

导致零件加工质量不稳定、加工效率低^[4-6]。因此,寻找更加绿色高效的钛合金切削技术已成为切削加工领域的一项重要任务。

为提高航空钛合金轴类零件的加工质量与效率,在工艺创新方面,谭荣凯^[7]研发出基于对称、夹心式结构的新型超声椭圆振动切削装置,为钛合金轴类零件的高质量加工提供技术支撑。DING等^[8]构建了考虑切削参数随机性和可靠性的参数优化模型,为轴类零件直径误差分析提供有效方法。在能场结合应用领域,超声振动辅助切削(ultrasonic vibration-assisted cutting, UVC)技术因具备减小切削力、增强加工稳定性、提高表面质量等优势^[9-10],被广泛应用于难加工材料加工^[11-13]。郑金滔等^[14]将超声振动辅助切削与纳米流体微量润滑(minimum quantity lubrication, MQL)技术结合,优化了钛合金轴类零件车削效果。DOMINGUEZ-CABALLERO等^[15]提出混合激光和超声波辅助加工技术,改进了Ti-6Al-4V合金车削可加工性。LU等^[16]通过高速超声振动切削(high-speed ultrasonic vibration cutting, HUVVC)降低了切削温度并提高表面质量。张硕等^[17]将微织构刀具应用于椭圆超声振动辅助切削,改善了切削性能。ZHANG等^[18]提出一种新的正反多向切削方法,有效降低切削加工能耗。该研究团队使用仿真与试验结合的手段探索不同加工方案下的最佳车削性能^[19]。

YAMATO等^[20]提出的双刀具并行车削(parallel cutting, PC)方法,在提高材料去除率和加工表面质量方面展现出显著优势。CAI等^[21]基于并行多向切削进行细长轴加工分析建模,显著提高了加工精度和效率。大量研究证明该方法在提高材料去除率(material removal rate, MRR)和提高加工表面质量方面有巨大优势^[22-24]。

上述研究仍存在局限性。例如,UVC技术在涉及大量材料去除的场景中的应用受到限制;PC车削两把刀具的切削参数若匹配不当,易引发切削颤振。这意味着现有加工方法在特定工况下无法充分平衡加工效率与质量,亟需新的技术突破。为提高航空钛合金轴类零件加工质量,本文提出一种基于超声振动的双刀具切削协同的切削方法——并行超声振动切削(parallel ultrasonic vibration cutting, PUVC),并开展试验研究,以验证该新型加工方法的加工性能。本研究以钛合金轴类零件为加工对象,在并行超声振动切削、普通切削(conventional cutting, CC)、并行切削以及超

声振动切削等工艺下开展试验,从表面粗糙度及加工表面形貌、表面残余应力、显微组织及表面硬度等维度,对比分析PUVC工艺在提升钛合金加工表面质量方面的优势。

1 并行超声振动切削原理及特性

1.1 并行超声振动切削原理与模式

如图1a所示,并行超声振动切削采用两把切削刀具同步对工件进行加工,每把刀具均施加超声振动,实现刀具的断续分离式切削。在一个振动周期内,刀具实际参与切削的时间大幅缩短,大大减小了切削力,既能提高加工表面质量,又能有效延长刀具使用寿命。此外,两把刀具同时加工可以相互抵消一部分径向力,尤其是对细长轴类零件,可以提高切削过程的稳定性^[21]。

可配置性是PUVC切削的特点,针对切削加工中不同的需求,可通过灵活调整两把刀具在空间的位置分布,得到具有不同特点的切削模式^[25]。PUVC切削中主要的切削模式包括共享表面切削模式和非共享表面切削模式。如图1所示,两把刀具之间的夹角为 180° ,分布在工件两侧,定义过刀尖与工件轴线垂直的平面为 P_{v1} 和 P_{v2} ,两平面之间的距离为 l_s 。图1b所示是共享表

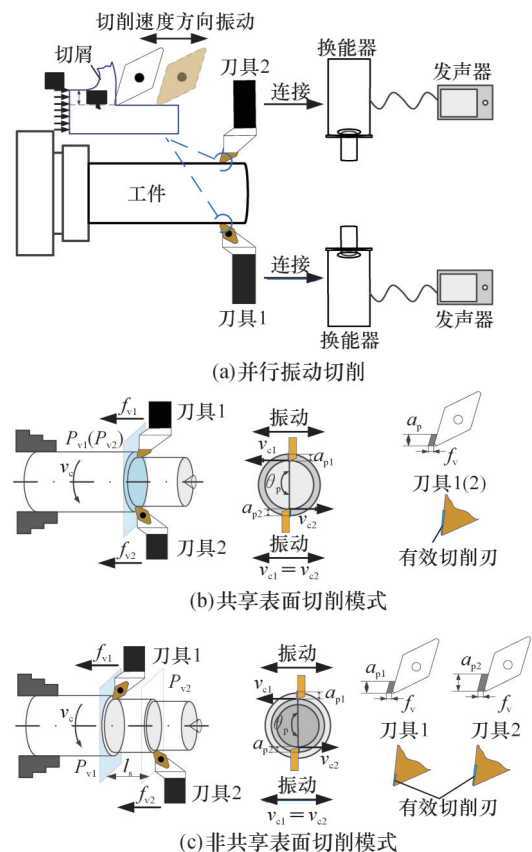


图1 并行超声振动切削原理及模式

Fig.1 Principle and modes of PUVC

面切削模式,刀具1与刀具2的加工平面 P_{v1} 和 P_{v2} 重合, $l_s=0$ 。在该模式下,两把刀具的参数和进给量 f_v 必须相同,刀具1的切削深度 a_{p1} 和刀具2的切削深度 a_{p2} 可以相同也可以不同。图1c所示是非共享表面切削模式,刀具1与刀具2的加工平面 P_{v1} 和 P_{v2} 不重合, $l_s>0$ 。在这种加工模式下,两把刀具的进给量始终保持一致,而它们的切削深度则具有一定的灵活性,可以根据具体的加工需求设置。由于两把刀具各自独立工作,无需共享切削面,因此能够选用参数各不相同的刀具进行加工。这种灵活性不仅有助于根据不同的加工部位和材料特性,精准匹配刀具的几何参数、材料属性以及涂层特性,充分发挥每把刀具的性能优势,而且能有效提高加工效率和加工质量。然而在实际加工过程中,需要特别注意控制两把刀具之间的轴向偏移量。该偏移量不宜设置过大,否则极易引起径向力的不平衡,可能引发颤振现象,导致加工表面出现振纹,严重影响表面加工质量;同时,过大的径向力还会产生让刀问题,致使加工尺寸精度难以保证,增加废品率。

若两种切削模式的工件材料去除量相同,非共享表面切削模式因各刀具独立承担不同区域的切削任务,避免了对同一平面的重复加工。这一特性使得该模式下刀具有效切削刃长度显著短于共享表面切削模式,会影响刀具的散热^[19],导致刀具单位切削刃温度升高,加剧切削刃磨损。由于共享表面切削模式的刀具对称布置,工件受到的径向力可以抵消一部分,加工稳定性更高。非共享表面切削两把刀具加工不同的表面,该模式的材料去除率以及加工效率大大提高。因此,在高精度表面完整性控制场景中,共享切削模式通过双切削刃协同作用实现切削力动态平衡与热负荷分散,可有效抑制颤振诱导的表面形貌畸变,减小微观几何误差,从而显著提高加工精度与表面质量稳定性。而在大材料去除率(MRR)需求或复杂几何特征轴类零件加工中,非共享切削模式凭借单刃独立切削特性,通过强化单刃切削参数优化,在保障轮廓精度的前提下提高加工效率^[26],尤其适用于航空航天及能源装备领域中高附加值回转体零件的高效精密制造。

1.2 切削分离条件

1.2.1 刀尖运动轨迹

在并行超声振动切削过程中,通过对换能器施加正弦激励,由换能器驱动的刀具会产生一定频率的振动(沿工件切削速度方向)。为探究刀尖

运动轨迹,本节以正交切削原理为理论依据展开研究。施加在两把刀具上的超声振幅和频率保持相同,但考虑到实际中两把刀具的超声振动难以实现同步,所以假设刀具2落后刀具1一个相位差 φ 。

在一维振动切削加工中,刀具的振动位移表达式如下^[27]:

$$x = a \sin \omega t = a \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

式中: x 为刀具的振动位移; a 为振幅; ω 为角速度; f 为振动频率; t 为切削时间。

刀具的切向位移包括刀具振动位移与刀尖切削速度产生的位移:

$$X = \pi D n t + a \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

式中: X 为刀具的切向位移; n 为工件转速; D 为工件直径。

假设刀具进给速度保持恒定,则两把刀具在进给方向的位移为

$$Y = n f_v t / 60 \quad (3)$$

式中: f_v 为刀具沿进给方向的进给量。

将刀具振动位移和进给位移合成得到两把刀具刀尖的运动轨迹方程:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= a \sin \omega t = \pi D n t + a \sin(2\pi f t) \\ Y_1 &= n f_v t / 60 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= a \sin(\omega t + \varphi) = \pi D n t + a \sin(2\pi f t + \varphi) \\ Y_2 &= n f_v t / 60 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, X_1 、 Y_1 分别为刀具1在振动方向和进给方向的位移, X_2 、 Y_2 分别为刀具2在振动方向和进给方向的位移。

利用MATLAB软件仿真计算可得到并行超声振动切削的刀尖运动轨迹,以共享表面切削相等切削深度模式为例,假设刀具1和刀具2之间的相位差 $\varphi = \pi/4$ 。其对应的主轴转速 $n = 600$ r/min,工件直径 $D = 20$ mm,超声振动振幅 $a = 10$ μ m,超声振动频率 $f = 20$ kHz,刀具进给量 $f_v = 0.01$ mm/r。刀尖运动轨迹如图2所示,选择合理的切削参数能够使并行超声振动切削中的刀具与工件实现分离切削。

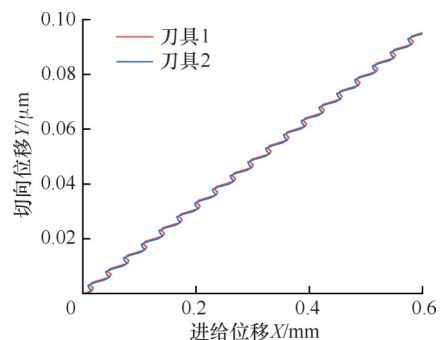


图2 共享切削模式刀尖轨迹图

Fig.2 Shared cutting mode tip trajectory diagram

1.2.2 分离特性

通过选择合适的振动参数和切削速度,能够实现刀具与工件的分离切削。对刀具的振动位移式(3)和式(4)求一阶导,得到两把刀具的振动速度表达式:

$$v_{11} = \dot{x}_1 = 2\pi f a \cos(2\pi f t) \quad (6)$$

$$v_{12} = \dot{x}_2 = 2\pi f a \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (7)$$

对于确定的工件转速,刀具刀尖处的切削速度表达式^[28]为

$$v = 2\pi n R \quad (8)$$

式中: R 为刀尖到工件轴线的垂直距离。

共享表面切削相等切削深度模式下,两刀具的刀尖至工件轴线的距离 R 相等,由于刀具的空间位置不同,因此两刀具刀尖处的切削速度方向相反,即

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= 2\pi n R \\ v_2 &= -2\pi n R \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

两把刀具相对于工件在切削速度方向的相对速度分别为

$$v_{r1} = v_{11} - (-v_1) = 2\pi f a \cos(2\pi f t) + 2\pi n R \quad (10)$$

$$v_{r2} = v_{12} - (-v_2) = 2\pi f a \cos(2\pi f t + \varphi) - 2\pi n R \quad (11)$$

当相对速度为零时,刀具的振动速度与切削速度大小相等且方向相同。若刀具与工件发生分离,此时切削速度小于刀具的最大后退速度。由式(5)、式(6)得到两刀具振动的最大速度 $v_{\max} = 2\pi f a$,因此要实现刀具与工件分离切削,工件在刀尖处的切削速度必须小于临界速度,否则刀具与工件不发生分离^[29],即

$$v < v_c = v_{\max} = 2\pi f a \quad (12)$$

式中: v_c 为满足分离切削的临界速度,即刀具最大后退速度刚好超过工件前进速度。

当刀具与工件发生分离时,相对速度 $v_r = 0$,此时两刀具振动速度达到最大^[22],假设此时刻为 t_a ,将 t_b 代入式(9)和式(10),两刀具与工件分离时刻由下式求得:

$$\left. \begin{aligned} t_{a1} &= \frac{1}{2\pi f} \arccos\left(\frac{-v_1}{2\pi f a}\right) \\ t_{a2} &= \frac{1}{2\pi f} \left(\arccos\left(\frac{-v_2}{2\pi f a}\right) - \varphi\right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

刀具与工件在 t_a 时刻分离之后在 t_b 时刻再次接触,刀具与工件的相对位移为0,由几何意义知图3中阴影部分面积总和为零:

$$\int_{t_{a1}}^{t_{b1}} (2\pi f a \cos(2\pi f t) + 2\pi n R) dt = 0 \quad (14)$$

$$\int_{t_{a2}}^{t_{b2}} (2\pi f a \cos(2\pi f t + \varphi) - 2\pi n R) dt = 0 \quad (15)$$

定义两把刀具同时与工件分离为PUV C切

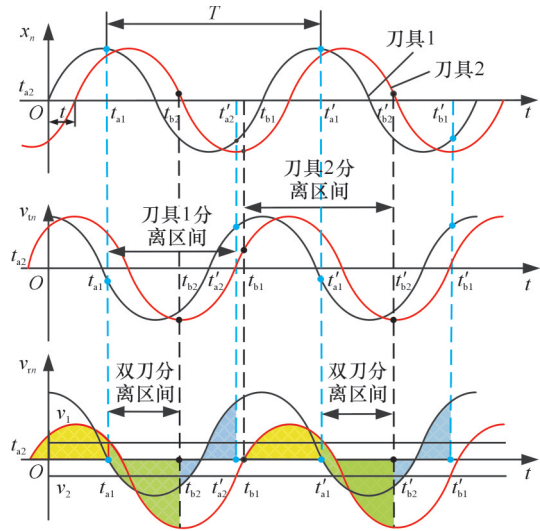


图3 并行超声振动切削双刀分离区间

Fig.3 Two tools separation interval for PUV C^[26]

削分离状态,至少有一把刀具与工件接触为切削状态。如图3所示,两把刀具的分离时间 T_s 与切削时间 T_c 可以由刀具与工件的接触时刻和分离时刻表示:

$$\left. \begin{aligned} T_{s1} &= t_{b1} - t_{a1} \\ T_{c1} &= T + t_{a1} - t_{b1} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{s2} &= t_{b2} - t_{a2} \\ T_{c2} &= T + t_{a2} - t_{b2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

一个周期内的刀具与工件的接触时间越少,振动切削效果越好,通过接触比(净切削时间)来描述振动切削的这一重要特性:

$$r_c = \frac{T_c}{T} \quad (18)$$

同时,可以得到振动切削的分离比:

$$r_s = \frac{T_s}{T} = 1 - \frac{T_c}{T} \quad (19)$$

接触比是振动切削加工的重要参数,接触比 $r_c < 1$ 为分离切削,接触比越小,在一个振动周期内刀具切削工件的时间越少;接触比 $r_c = 1$ 为连续切削(即普通切削),刀具与工件不发生分离。

1.2.3 切屑厚度

PUVC切削加工过程中,材料去除效果并非由单一刀具作用决定,而是依赖于当前刀具与前一刀具在工件表面留下的加工轮廓共同影响。研究考虑两把刀具之间的相互作用,以及刀尖半径对切削厚度的影响。为更好地描述刀尖半径处切屑的几何形状,采用离散化的方法对切削层区域进行分析。如图4所示,将刀尖半径处切削层划分为梯形单元,各单元的切削深度为 a_{pe} ,各单元侧边切割角度为 φ_i 。由于共享表面切削模式下两把刀具的切削深度可能不同,因此将工件切削区分为两个不同的区域描述切削过程。在第一个区

域(图4a),两把刀具同时去除 a_{p1} 切削深度;在第二个区域(图4b), $a_{p2}-a_{p1}$ 的切削深度仅由刀具2去除($a_{p2}>a_{p1}$)。在切削深度为 a_{p1} 的区域,刀具2会对刀具1在前半个旋转周期所形成的切削表面进行加工,在这个区域内,刀具上的动态切屑厚度受刀具当前时刻的位移和之前半旋转周期时另一刀具的位移的影响,该区域存在延迟 $\tau/2$ 。在切削深度为 $a_{p2}-a_{p1}$ 的区域,只有刀具2进行切削,动态切屑厚度取决于当前和之前一个旋转周期的刀具2的动态位移,该区域存在延迟 τ 。

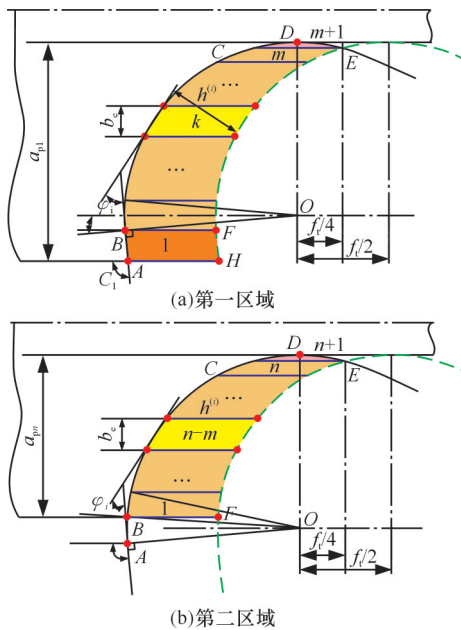


图4 并行超声振动切削的切屑载荷
Fig.4 Chip load for PUVC

刀具1的动态切削厚度并非单一因素决定,而是由刀具1自身的位移以及前半个旋转周期内刀具2的位移共同作用形成。此外,共享表面切削模式下静态切削厚度由两把刀具共享。将离散化的切削厚度投影到数控机床的全局坐标,则刀具1和刀具2在 x 方向和 y 方向的动态切削厚度位移分量分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_1 &= -y_{c1}(t) + y_{c2}(t - \tau/2) \\ \Delta x_1 &= -x_{c1}(t) + x_{c2}(t - \tau/2) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_2 &= -y_{c2}(t) + y_{c1}(t - \tau/2) \\ \Delta x_2 &= -x_{c2}(t) + x_{c1}(t - \tau/2) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $\tau/2$ 为延迟时间。

在第一区域,切屑厚度可以写成静态部分和动态部分之和:

$$h_1(t) = \frac{f_v}{2} \cos C_1 + \Delta y_1 \sin \varphi_{i,c1} + \Delta x_1 \cos \varphi_{i,c1} \quad (22)$$

$$h_2(t) = \frac{f_v}{2} \cos C_2 + \Delta y_2 \sin \varphi_{i,c2} + \Delta x_2 \cos \varphi_{i,c2} \quad (23)$$

在第二区域,仅只有刀具2对材料去除,刀具

2在 x 方向和 y 方向的动态切削厚度位移分量分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{22} &= -y_{c2}(t) + y_{c2}(t - \tau) \\ \Delta x_{22} &= -x_{c2}(t) + x_{c2}(t - \tau) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

第二区域的切削厚度为

$$h_{22}(t) = f_v \cos C_2 + \Delta y_{22} \sin \varphi_{i,c2} + \Delta x_{22} \cos \varphi_{i,c2} \quad (25)$$

在共享表面切削模式相等切削深度下,两把刀具切削深度 a_p 相等,切削厚度受到当前刀具与前半转的另一刀具共同影响,因此在该模式存在唯一延迟 $\tau/2$ 。在这种情况下,每个刀具上的切屑厚度可用式(22)、式(23)表示。

值得注意的是,在共享表面切削模式相等切削深度下,刀具1和2的刀具参数相同时, $h_1(t) = h_2(t)$ 。

对于非共享表面切削模式,两把刀具不分配进给。由于刀具间的切削过程相互独立,切削厚度不会受到另一把刀具的影响,因此,每把刀具的切削厚度仅取决于自身在当前时刻的位移以及前一个旋转周期内同一刀具的位移情况,这种情况下的切削厚度可以表示为

$$h_{10}(t) = f_v \cos C_1 + \Delta y_{10} \sin \varphi_{i,c1} + \Delta x_{10} \cos \varphi_{i,c1} \quad (26)$$

$$h_{20}(t) = f_v \cos C_2 + \Delta y_{20} \sin \varphi_{i,c2} + \Delta x_{20} \cos \varphi_{i,c2} \quad (27)$$

$$\Delta y_{10} = -y_{c1}(t) + y_{c1}(t - \tau)$$

$$\Delta x_{10} = -x_{c1}(t) + x_{c1}(t - \tau)$$

$$\Delta y_{20} = -y_{c2}(t) + y_{c2}(t - \tau)$$

$$\Delta x_{20} = -x_{c2}(t) + x_{c2}(t - \tau)$$

利用MATLAB软件仿真可得到并行超声振动切削、普通切削(使用一把刀具进行加工)、并行切削(使用两把刀具进行加工)和超声振动切削(使用施加了超声振动的一把刀具进行加工)的切屑厚度随加工时间的动态变化,见图5。对应的主轴转速 $n=600$ r/min,刀具进给量 $f_v=0.01$ mm/r,超声振动频率 $f=20$ kHz,轴向切削深度 $a_p=0.1$ mm。

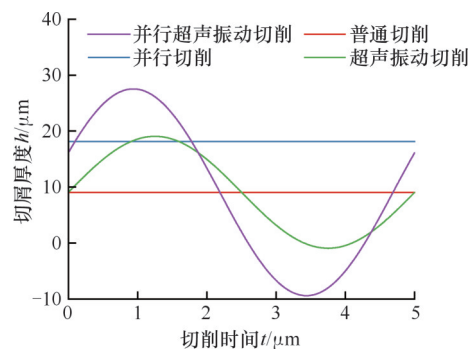


图5 不同切削工艺的动态切屑厚度
Fig.5 Dynamic chip thickness of different cutting processes

2 试验设计与方案

在自研的并行超声振动切削机床CKG7512/2V上进行钛合金切削试验,机床技术规格及参数如表1所示。

表1 CKG7512/2V 机床的技术参数

Tab.1 Technical parameters of CKG7512/2V machines

参数	数值
主轴电机额定功率/(kW)	7.5
伺服电机扭矩/(N·m)	6
最大加工长度/mm	500
最大加工直径/mm	120
托板最大回转直径/mm	160
床身最大回转直径/mm	300
主轴转速/(r·min ⁻¹)	50~3000
X轴快速进速度/(mm·min ⁻¹)	8000
Z轴快速进速度/(mm·min ⁻¹)	8000
X轴最小设定单位/mm	0.001
Z轴最小设定单位/mm	0.001

试验平台如图6所示,换能与刀具之间通过螺栓连接,并将沿竖直方向振动传递到刀具,超声振动频率为20 kHz,刀尖振幅为10 μm。

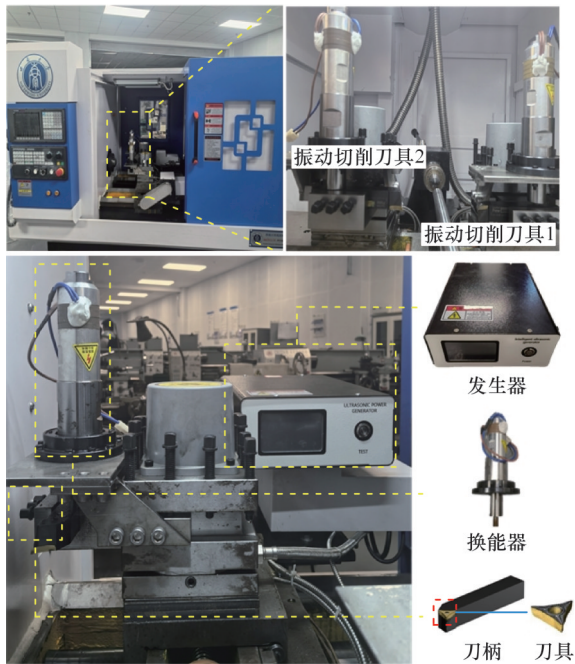


图6 试验加工装置

Fig.6 Experimental processing device

试验分析并行超声振动切削、普通切削、并行切削以及超声振动切削等切削工艺对钛合金表面质量的影响,其中并行切削和并行超声振动切削以共享表面切削模式相等切削深度为例进行试验。为保证刀具能与工件发生分离,需对切削速度进行验算,由式(12)可知,切削速度 $v < 75.36$ m/min,试验的切削速度为37.68 m/min。具体试验条件和主要加工参数如表2所示。

表2 试验条件和主要加工参数

Tab.2 Experimental conditions and main processing parameters

项目	参数	设置
工件	材料	Ti6Al4V
	直径/mm	20
刀具	材料	CVD涂层硬质合金
	前角/(°)	8
	后角/(°)	6
	刀尖圆弧半径/mm	0.4
切削参数	切削速度/(m·min ⁻¹)	37.68
	进给量/(mm·r ⁻¹)	0.01
	切削深度/mm	0.1
振动参数	频率/kHz	20
	振幅/μm	10
切削液		湿切削

切削加工结束后使用Axio Observer3光学显微镜观察加工表面的宏观形貌,以分析切削工艺对表面微观纹理的影响。利用JB-6C轮廓粗糙度仪获取加工表面粗糙度指标 R_a (算术平均表面粗糙度)和 R_z (最大峰谷高度),以对加工表面的粗糙度进行定量分析。切削加工结束后,使用日本XRD-6100型X射线衍射仪沿切削速度方向测试加工表面的残余应力分布,以分析切削工艺对表面残余应力的影响规律。对试验加工表面采用全自动显微维氏硬度计TIME6610AT进行硬度测试,以分析切削工艺对表面硬化层深度及硬度值的影响。在每组试验参数获得的加工表面上测试3次取平均值作为加工表面的硬度值,硬度测试的加载载荷为10 N,保荷时间设定为10 s。试验后将工件已加工表面以及侧剖面嵌入样本,并对样本的横截面进行机械研磨和抛光后,使用HF:HNO₃:H₂O=1:2:47配比的腐蚀液蚀刻约60 s。用扫描电镜(Phenom Pro)观察样本沿进给方向垂直于加工表面的横截面微观结构,以表征切削工艺对晶粒结构的影响。

3 结果与讨论

3.1 表面粗糙度及加工表面形貌

采用JB-6C轮廓粗糙度仪测量不同切削工艺加工的工件表面上沿进给方向的粗糙度,每个工件表面测量6次,取平均值,结果如图7所示。从图中可知,切削工艺的改变对已加工工件的表面粗糙度有明显影响。相较于无振动切削,刀具施加超声振动后粗糙度有明显减小,振动切削的 R_a 都小于0.2 μm,无振动切削表面的 R_a 都大于0.3 μm,并行切削表面的 R_a 甚至超过了0.4 μm。

超声振动切削相较于普通切削展现出更小的表面粗糙度。这是因为从微观上看,由于刀具与工件之间的摩擦和磨损,以及切削过程中可能产生的振动,普通切削下刀具对工件材料的挤压、撕裂过程具有连续性特征。这种非间断的材料去除方式易引发切削区域的塑性变形失稳,进而在工件表面遗留宏观可见的加工痕迹,导致工件的表面粗糙度增大。

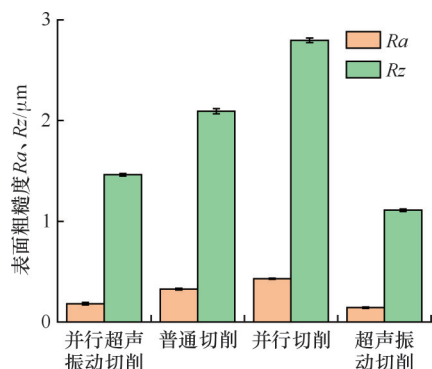


图7 不同加工工艺的表面粗糙度和轮廓

Fig.7 Surface roughness and contour for different processing techniques

超声振动切削下,刀具与工件的接触状态呈现出周期性的分离-接触特征,每次接触过程中刀具在工件表面形成的加工痕迹为尺度极小的平面单元。随着工件的转动和刀具的高频振动,这些小平面就会一起铺满工件表面,减小工件的表面粗糙度。而在并行超声振动切削中,虽然刀具施加超声振动能够有效减小表面粗糙度,但是双刀具加工时,由于刀具的摆动,刀具间的交接区域未平滑过渡,可能留下阶梯状的残留高度,显著增大表面粗糙度^[18]。值得指出的是,在所研究的切削参数条件下获得的表面粗糙度值均符合航空工业对加工表面质量的要求。

图8所示为使用Axio Observer3光学显微镜观察到的不同切削工艺加工后的工件表面微观形貌。图中可以清晰地看到,当使用两把切削刀具同时进行加工时,工件表面的刀痕显得更为密集,加工痕迹也因此变得更为明显。两把刀具的加工方式增加了表面纹理的复杂性和密集度。采用普通切削加工出的工件表面形貌呈现出一种规律且平行的车削痕迹,这些痕迹均匀地分布在工件表面上。从粗糙度可以看出,未施加超声振动的工件表面上的振动痕迹高度差 Rz 更大,这是导致普通切削和并行切削加工的工件表面的粗糙度大于超声振动切削和并行超声振动切削的主要原因(图7)。

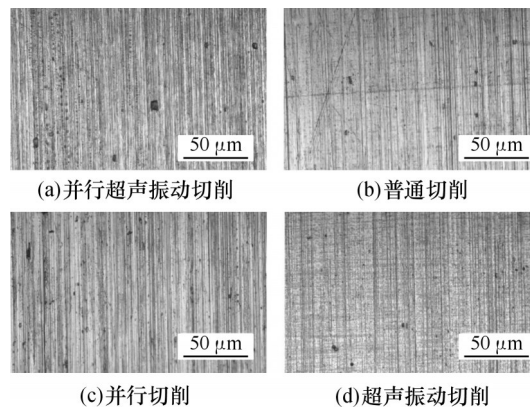


图8 不同切削工艺的加工表面形貌

Fig.8 Machined surface topography for different cutting processes

3.2 表面残余应力

在工件表面圆周上等距选取4个测量点,每个点测量残余应力4次,每个工件总共16个残余应力值,并取其平均值作为最终结果。图9所示为不同切削工艺下工件沿切削速度方向的表面残余应力。值得注意的是,在所研究的切削参数条件下,已加工表面上的残余应力均为压应力。

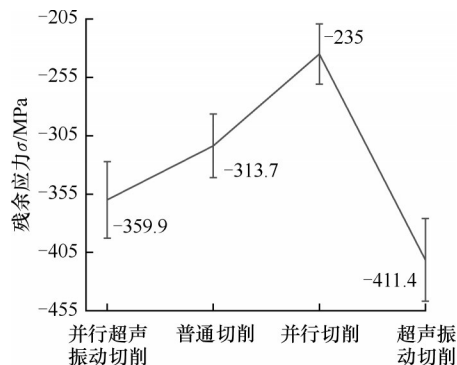


图9 不同切削工艺的表面残余应力

Fig.9 Surface residual stresses for different cutting processes

施加超声振动与未施加超声振动的情况存在明显差异。施加了超声振动的切削工艺所加工出的工件,其表面残余应力值要大于未施加超声振动的切削工艺加工的工件。这是因为在超声辅助加工中,刀具与工件的分离切削导致切削过程中出现负后角加工的可能性增大,使得刀具在切削进行的过程中后刀面熨压加工表面,刀具对工件表面的冲击作用可以增大表层材料的塑性变形,产生更大的机械应力。而并行超声振动切削加工的工件,其表面残余应力值却低于的超声振动辅助切削,由于并行超声振动切削采用两把刀具同时对工件进行加工,在这一过程中,工件与刀具之间产生的热量积累相对更多。这些额外积累的热量会对工件表面的应力状态产生影响,最终导致

加工表面的残余应力值减小。

3.3 显微组织及表面硬度

表面和亚表面材料受到切削力表现出严重的塑性变形,产生剪切滑移和晶粒拉长。图10显示了不同切削工艺对应的已加工表面表层微观结构的断面显微组织。已加工表面下方均出现明显的塑性变形层,并且其晶粒沿切削方向趋向于被拉长。普通切削施加超声振动后,变形层从约14.7 μm增至18 μm。并行切削施加超声振动后,变形层从约12 μm增至13.8 μm。施加了超声振动的切削工艺与未施加超声振动的切削工艺相比,塑性变形层(晶粒变形程度)更加明显,这是由于刀具的振动作用,在切削过程中刀具后刀面会熨压已加工表面,产生大量切削热,从而导致塑性变形层厚度增加。

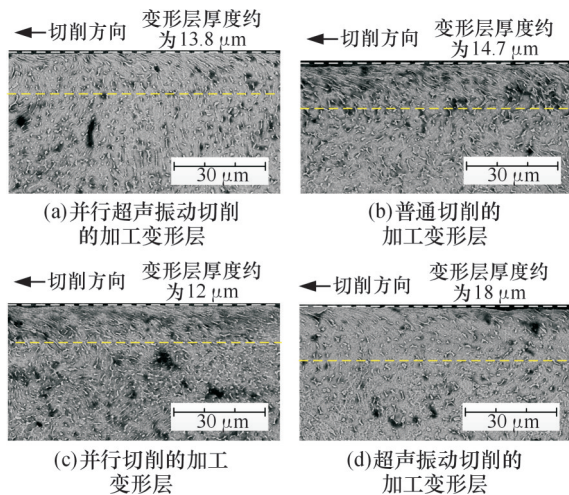


图10 不同切削工艺的加工表面变形层

Fig.10 Machined surface deformation layers for different cutting processes

本研究采用维氏硬度试验测定显微硬度,用表面显微硬度 H 和硬化率 R_h 描述加工硬化程度:

$$R_h = \frac{H - H_0}{H_0}$$

式中: H_0 为 Ti6Al4V 的基体维氏硬度值,约为 340 HV。

在同一工件表面选取 10 个不同测量点进行显微硬度测量,并取其平均值作为最终结果以消除偶然误差。图 11 显示了在给定其他参数条件下不同切削工艺对表面显微硬度及硬化率的影响。从试验结果可以看出,并行超声振动切削使工件硬度值减小。普通切削加工的工件显微硬度值和硬化率分别是 355.4 HV 和 5.41%,施加超声振动后增大为 362 HV 和 6.5%。这表明振动切削工艺可以增大工件表面硬度。从并行切削和并行超声振动切削加工的工件显微硬度和硬化率的变化也可以证实这种现象。这是因为超声振动以高

频(20 kHz)、低幅(10 μm)形式向工件传递能量,使等效应变速率提高至传统切削的 10~100 倍,位错来不及通过交滑移或攀移释放,位错密度急剧增加,导致加工硬化层硬度提高。因此,超声振动的应用可以提高难加工材料的表面显微硬度。与单刀具切削工艺相比,双刀具切削工艺因为两把刀具同时加工,两切削刃的热源在工件表面叠加,导致单位面积热输入较单刀具增加。同时,两热源间距小于热扩散长度,导致热影响区重叠,形成局部高温区。热源叠加及局部高温造成热堆积会使加工表面软化,从而降低加工表面的显微硬度。

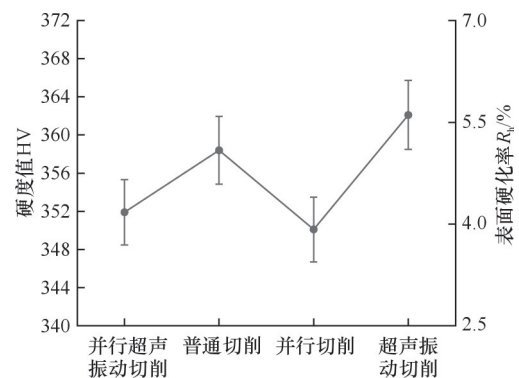


图11 不同切削工艺的加工表面显微硬度

Fig.11 Microhardness of the machined surface for different cutting processes

4 结论

1) 本研究提出一种将超声振动切削和双刀具并行切削相结合的并行超声振动切削方法。在其他加工条件参数相同的情况下,采用并行超声振动切削与普通切削、并行切削以及超声振动切削进行切削试验。结果表明,振动切削相较于无振动切削,表面粗糙度更低,而双刀具切削的表面粗糙度高,并且加工痕迹明显。并行超声振动切削虽未达到超声单刀切削的最优粗糙度,但相较于普通切削和并行切削,仍可有效改善加工表面质量。

2) 在所探讨的切削参数范围内,施加超声振动辅助的切削工艺较传统切削的工件表面残余应力提高 10%~26%,而采用并行超声振动切削方法的工件表面残余应力较超声振动切削减小约 13.4%。

3) 施加超声振动的切削工艺会导致已加工表面下方的塑性变形层增厚,晶粒变形程度加剧,使工件表面显微硬度提高。相较于并行切削,并行超声振动切削在试验范围内使工件表面显微硬度

更优,同时保持较高的硬化层深度。

参考文献:

- [1] AHMAD A, AKRAM S, JAFFERY S H I, et al. Evaluation of Specific Cutting Energy, Tool Wear, and Surface Roughness in Dry Turning of Titanium Grade 3 Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(3):1263-1274.
- [2] 张翔宇,路正惠,彭振龙,等. 钛合金的高质高效超声振动切削加工[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(5):133-147.
ZHANG Xiangyu, LU Zhenghui, PENG Zhenlong, et al. High Quality and Efficient Ultrasonic Vibration Cutting of Titanium Alloys [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(5):133-147.
- [3] 丁文锋,奚欣欣,占京华,等. 航空发动机钛材料磨削技术研究现状及展望[J]. *航空学报*, 2019, 40(6):6-41.
DING Wenfeng, XI Xinxin, ZHAN Jinghua, et al. Research Status and Future Development of Grinding Technology of Titanium Materials for Aero-engines[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(6):6-41.
- [4] PATIL A S, SUNNAPWAR V K, BHOLE K S, et al. Effective Cooling Methods for Ti6Al4V CNC Milling: a Review [J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2023, 9(2):457-506.
- [5] CUI Xin, LI Changhe, DING Wenfeng, et al. Minimum Quantity Lubrication Machining of Aeronautical Materials Using Carbon Group Nanolubricant: from Mechanisms to Application[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(11):85-112.
- [6] 陈科嘉,阿达依·谢尔亚孜旦. 基于田口法的TC4钛合金电化学车削试验研究[J]. *现代制造工程*, 2023(7):1-8.
CHEN Kejia, ADAYI Xieeryazidan. Experimental Study on Electrochemical Turning of TC4 Titanium Alloy Based on Taguchi Method[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(7):1-8.
- [7] 谭荣凯. 基于超声椭圆振动辅助的钛合金超精密切削技术基础研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
TAN Rongkai. Fundamental Research on Ultrasonic Elliptical Vibration Assisted Ultra-precision Cutting of Titanium Alloy[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2020.
- [8] DING Pengfei, HUANG Xianzhen, LI Yuxiong, et al. Reliability Optimization of Cutting Parameters Considering the Diameter Error of Slender Shaft[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(10):4673-4683.
- [9] DUAN Jingwei, ZOU Ping, WEI Shiyu, et al. Research on the Formation Mechanism of Surface Morphology in Three-excitation Ultrasonic Spatial Vibration-assisted Turning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(9): 6851-6876.
- [10] 陈守峰,王成勇,李伟秋,等. 超声振动铣削加工石墨材料去除机理与加工表面质量评价[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(9):86-96.
CHEN Shoufeng, WANG Chengyong, LI Weiqiu, et al. Material Removal Mechanism and Surface Quality Evaluation of Graphite Ultrasonic Vibration Milling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(9): 86-96.
- [11] MUHAMMAD R, MUHAMMAD R. A Fuzzy Logic Model for the Analysis of Ultrasonic Vibration Assisted Turning and Conventional Turning of Ti-based Alloy[J]. *Materials*, 2021, 14(21): 6572.
- [12] 袁盛旺,周何情. GH4169高温合金超声辅助切削试验研究[J]. *工具技术*, 2024, 58(6): 55-60.
YUAN Shengwang, ZHOU Heqing. Experimental Study on Optimization of Ultrasonic Assisted Process Parameters for GH4169 Alloy[J]. *Tool Engineering*, 2024, 58(6): 55-60.
- [13] YU Fuhang, ZHANG Chen, ZHU Qinsong, et al. Investigation of Ultrasonic Mechanism and Development of Tool Wear Model in Ultrasonic Elliptic Vibration Assisted Cutting of Stainless Steel[J]. *Tribology International*, 2023, 189: 108962.
- [14] 郑金滔,马浩然,王进,等. 超声辅助纳米流体微量润滑车削钛合金实验研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(4): 743-752.
ZHENG Jintao, MA Haoran, WANG Jin, et al. An Experimental Study on Ultrasonic Vibration Assisted Turning Titanium Alloy with Nanofluid Minimum Quantity Lubrication [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(4): 743-752.
- [15] DOMINGUEZ-CABALLERO J, AYVAR-SOBERANIS S, KIM J, et al. Hybrid Simultaneous Laser- and Ultrasonic-assisted Machining of Ti-6Al-4V Alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(3): 1903-1916.
- [16] LU Zhenghui, ZHANG Deyuan, ZHANG Xiangyu, et al. Effects of High-pressure Coolant on Cutting Performance of High-speed Ultrasonic Vibration Cutting Titanium Alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 279:116584.
- [17] 张硕,邹平,方锐,等. 微织构车刀椭圆超声辅助切削加工性能研究[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(3):287-291.
ZHANG Shuo, ZOU Ping, FANG Rui, et al. Study on Elliptical Ultrasonic Assisted Machining Performance of Micro Texture Turning Tools [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(3):287-291.
- [18] ZHANG Yuanhui, CAI Wei, HE Yan, et al. Forward-and-reverse Multidirectional Turning: a Novel Material Removal Approach for Improving Energy Efficiency, Processing Efficiency and Quality[J]. *Energy*, 2022, 260:125162.
- [19] CAI Wei, ZHANG Yuanhui, LI Li, et al. Cutting Mechanics and Efficiency of Forward and Reverse Multidirectional Turning[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 242:108031.
- [20] YAMATO S, OKUMA T, NAKANISHI K, et al. Chatter Suppression in Parallel Turning Assisted with Tool Swing Motion Provided by Feed System[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2019, 13(1):80-91.
- [21] CAI Wei, XIANG Jingyang, DONG Guojun, et al. Analytical Modelling of Parallel Multidirectional Cutting of Slender Shafts[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 288:110024.
- [22] YAMATO S, NAKANISHI K, SUZUKI N, et al. Experimental Verification of Design Methodology for Chatter Suppression in Tool Swing-assisted Parallel Turning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110(7):1759-1771.
- [23] SAKATA S, KADOTA T, YAMADA Y, et al. Chatter Avoidance in Parallel Turning with Unequal Pitch Angle Using Observer-based Cutting Force Estimation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(4):044501.
- [24] AZVAR M, BUDAK E. Multi-dimensional Chatter Stability for Enhanced Productivity in Different Parallel Turning Strategies[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 123: 116-128.

(下转第761页)