

引文格式: 张跃敏, 夏在祥, 郝晓茹, 等. 扭转超声振动辅助铣削钛合金的试验研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(8): 25010124.

ZHANG Yuemin, XIA Zaixiang, HAO Xiaoru, et al. Experimental study on torsional ultrasonic vibration-assisted milling of titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 25010124.

扭转超声振动辅助铣削钛合金的试验研究

张跃敏¹, 夏在祥¹, 郝晓茹¹, 唐 军², 尹 跃¹

(1. 河南理工大学, 焦作 454000;

2. 海南经贸职业技术学院机电与汽车工程学院, 海口 571127)

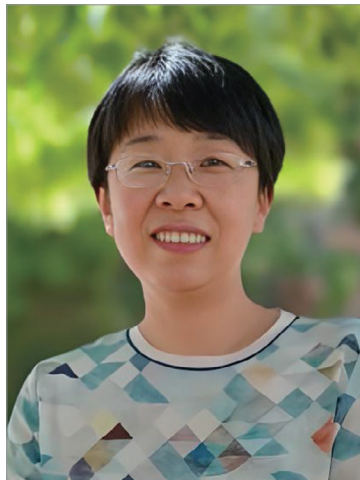
[摘要] 针对钛合金材料难加工的问题, 提出采用扭转超声振动辅助铣削加工的技术加工。建立了扭转超声振动辅助铣削的刀尖轨迹方程, 仿真得出了分离型和不分离型刀尖的轨迹曲线。应用坐标法提出了切厚的判断函数, 从而建立了系统的动力学模型。运用全离散法和非线性函数的线性化理论求解动力学模型, 得出扭转超声振动辅助铣削系统的稳定性预测规律。在此基础上, 探讨加工参数对铣削稳定性的影响, 开展颤振试验进行验证。试验表明, 同样加工参数下, 扭转超声振动辅助铣削系统与普通铣削相比, 无颤振铣削加工参数的选择范围更大, 稳定性更优, 能够改善工件的表面质量。随着每齿进给量和径向浸入率的增大, 系统性的稳定性曲线下降。每齿进给量的变化, 对系统的轴向切深极限值影响较小; 径向浸入率的增大, 导致系统的轴向切深极限值下降最大幅度达 28.37%。系统稳定性区域的面积大小与超声振幅的增大、刀齿数的减小成反比。试验验证了仿真曲线的有效性, 为现场的加工提供了数据支持。

关键词: 扭转超声振动; 钛合金; 稳定性; 颤振; 动力学模型

中图分类号: V261

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010124



张跃敏

教授, 研究方向为精密超精密加工。

钛和钛合金具有耐高温、强度高、耐腐蚀等优良的物理属性, 在航空航天、兵器工业、医疗、汽车模具等领域得到了广泛应用^[1-3]。但是由于钛合金具有强度硬度高、弹性模量小、导热性差等材料性能, 增加了其加工的难度^[4-5]。

扭转超声振动是一种高频、小角度位移的扭转振动形式, 通过扭转振动模态的激发, 实现能量在旋转中高效传递, 以期达到良好的加工效果。近年来学者们将这种技术分别与切削加工、表面滚压、电火花、电解等相结合, 展开了相关的研究。

郑侃等^[6]研究了机器人纵扭超声振动辅助铣削大型航天器舱体支

架的稳定性问题, 并通过铣削力和铣削平面接刀痕试验发现, 纵扭超声振动铣削平面比单纯的纵振稳定性更好, 铣削力降低了 24.7%。韩凤起等^[7]利用纵扭超声振动复合低频扭转方法在钛合金材料上攻丝, 对比不同切削液和加工参数下的攻丝试验, 得出加工参数和工艺效果之间的关联规律, 结果表明, 纵扭和低频扭转的复合振动能减低约 30% 的攻丝扭矩。姜燕等^[8]利用纵扭复合超声振动对齿轮表面实施强化处理, 通过试验证实, 纵扭超声振动辅助滚压技术能够提高齿轮表面的应力状态, 改善齿轮表面的质量。李孝阳等^[9]针对电火花微孔加工中存在废屑排除困难和

收稿日期: 2025-07-18; 退修日期: 2025-08-07; 录用日期: 2025-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(52565049); 河南省科技攻关项目(242102230053); 海南省科研启动项目(hnjmk2024305); 河南省自然科学基金面上项目(262300420017); 河南理工大学大学生创新创业训练计划项目(202510460035)

加工效率较低等问题,提出纵扭超声振动辅助电火花技术,通过试验验证了脉冲宽度和峰值电流对加工效率的影响比较明显。

以上扭转超声振动的文献表明,扭转超声振动与传统的铣削、钻削等切削技术、表面滚压等强化技术及电火花等特种加工技术相结合,在航空航天、工业机器人等多领域的高端装备制造中获得了广泛的应用。扭转超声振动利用其高频振动,实现了工件和刀具的切削分离特性,有效地降低了切削力,使得这种技术在难加工材料、高端装备关键零部件等加工中,具有独特的优势。从目前研究来看,扭转超声振动与传统切削加工技术结合的研究较多,在传统的车削、磨削、铣削、钻削中,扭转超声振动辅助铣削研究较为深入。

由于铣削加工零件的结构范围宽广,能够在加工中心开展,针对钛合金这种难加工材料,学者们在扭转超声振动辅助铣削钛合金方面,从加工系统设备、铣削力以及工艺参数、力热特性及表面完整性开展了大量的研究。赵宇等^[10]研制出适用于难加工材料的纵扭超声振子,探讨螺旋槽槽宽等参数对振动效果的影响规律,优选出最佳的参数组合。通过试验测试获得谐振频率,该频率与仿真结果误差较小,证实了设计方案合理性。王明海等^[11]探讨了超声参数和加工参数等与扭转超声振动铣削钛合金材料表面质量的关系规律,得出这种加工技术能降低切削力,显著改善工件表面质量的结论。Yan等^[12]通过建立纵扭超声振动辅助铣削钛合金的刀具尖端的综合轨迹模型和加工表面残余材料高度的概率模型,探索了TC4钛合金在纵扭超声振动辅助铣削下的表面形成机制,开展了加工参数对表面形貌影响的研究,仿真和试验结果表明,仿真结果与试验结果一致,验证了理论模型的准确性和可靠性。张存鹰等^[13]通过MATLAB软

件建立了纵扭复合超声铣削钛合金的表面微结构模型,利用钛合金工件进行试验验证,结果发现,超声频率、超声振幅、切削速度等加工参数会影响表面微结构的生成,试验所得结果与理论模型变化趋势基本吻合。Xie等^[14]研究了工艺参数对纵扭超声辅助端面铣削过程中加工表面形态、粗糙度、表面残余应力和亚表面微观结构的影响,结果表明,在大振幅、小进给率和高切削速度下,纵扭超声振动辅助端面铣削可以帮助形成更明显的表面微观结构,具有更清晰的表面纹理规律。

超声振动辅助铣削是目前加工钛合金材料时应用最为广泛的技术之一。这种技术通过超声振动效应降低了铣削力、铣削温度,提高了表面质量。上述文献大多是通过试验或者仿真技术与试验结合的手段得出加工参数与表面质量相关的影响规律,围绕的核心问题仍是关于钛合金铣削表面质量的控制问题。无论宏观还是微观控制,这将是扭转超声振动辅助铣削钛合金需要解决的技术难题。但是,大多数文献都是从试验入手,讨论工艺参数对铣削力以及材料表面质量的影响,并未考虑系统的稳定性,机理分析不够深入。

事实上加工系统的稳定性是从系统的模态出发,开展加工参数对颤振的影响机理研究,探寻影响加工质量和效率的主要因素。学者们为了更好地提高加工质量和加工效率,对超声振动辅助铣削的稳定性进行了一定的研究。唐军等^[15-16]开展了单激励纵扭复合超声铣削加工碳纤维材料的稳定性研究,得出频域内的稳定性仿真曲线,并通过试验验证了仿真曲线的有效性。Zhang等^[17-20]探究了进给超声振动、垂直进给超声振动、椭圆超声振动辅助钛合金的稳定性,通过求解系统的动力学模型,获得了系统的稳定性预测曲线,讨论了加工参数对系统稳定性的影响规律,

并通过试验验证了系统稳定性预测的有效性。秦飞跃等^[21]使用全离散法求解纵扭超声微铣削钛合金薄壁件的动力学模型,通过MATLAB软件仿真了稳定性曲线,经过试验验证,纵扭超声振动在一定程度上提高了钛合金薄壁件加工的稳定性。

综合以上系统稳定性的研究可以看出,大多数学者主要是给出系统的稳定性曲线,并未系统地探讨加工参数、超声参数甚至刀具参数对系统稳定性的影响。本文利用扭转超声振动技术加工钛合金材料,通过分析刀尖运动轨迹,提出依据切削点的位置坐标建立系统瞬时切厚模型,从而得出系统的动力学方程。应用非线性方程的线性化理论确定铣削力,采用全离散法编程求解系统的状态转移矩阵,得出系统稳定性曲线,进一步研究加工参数、超声参数、刀具参数等对系统稳定性的影响,以工件表面粗糙度作为稳定性性能的指标,分析加工参数对工件表面粗糙度的影响图谱,得出相互之间的影响规律。

1 扭转超声振动辅助铣削的动力学模型

1.1 运动学分析

扭转超声振动是在刀齿切削方向上施加超声振动,因此刀尖的运动主要包括刀具沿系统进给方向的平动和绕自身轴线的转动。如图1所示,假设超声振动的初始相位角为 ψ ,扭转超声振动铣刀在扭转振动作用下

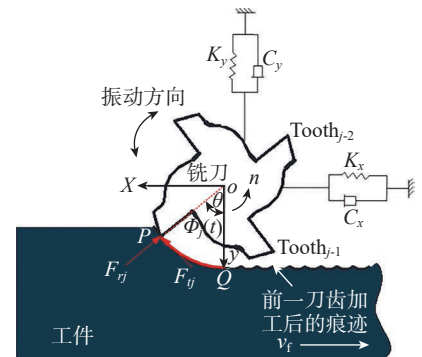


图1 铣削模型
Fig.1 Milling model

在时间 t 内, 刀尖从位置 P 运动到位置 Q , 圆周方向旋转角度为 θ , 则在任一时刻, 第 j 刀齿刀尖的轨迹方程可以表示为

$$\begin{cases} x_j = v_f t + r \sin(\theta - (j-1)2\pi/Z) \\ y_j = r \cos(\theta - (j-1)2\pi/Z) \end{cases} \quad (1)$$

即

$$\begin{cases} x_j = v_f t + r \sin(\omega t + A \sin(2\pi f t + \psi) / r - (j-1)2\pi/Z) \\ y_j = r \cos(\omega t + A \sin(2\pi f t + \psi) / r - (j-1)2\pi/Z) \end{cases} \quad (2)$$

式中, v_f 为铣刀的进给速度; r 为铣刀半径; ω 为铣刀旋转的角速度; A 为超声振幅; f 为超声频率; Z 为刀齿数。

铣刀刀尖相对于工件的速度 \vec{v}_r 是普通铣削时的旋转的线速度 \vec{v}_c 、超声振动速度 \vec{v}_t 和系统的进给速度 \vec{v}_f 之和, 即

$$\vec{v}_r = \vec{v}_c + \vec{v}_t + \vec{v}_f \quad (3)$$

考虑刀具与工件的切削分离特性主要与 X 方向速度相关, 化简到 X 方向, 得

$$v_{rx} = (\omega r + 2\pi f A \cos(2\pi f t + \psi)) \cos\theta + v_f \quad (4)$$

由于 θ 较小, 可以近似认为 $\cos\theta \approx 1$,

$$v_{rx} \approx \omega r + 2\pi f A \cos(2\pi f t + \psi) + v_f \quad (5)$$

式中, n 为扭转超声铣削时的主轴转速; d 为铣刀直径。从式 (5) 可以看出, 刀齿速度是周期函数, 而 $\omega r + v_f$ 与超声振动的最大速度 $2\pi f A$ 之间的大小关系会影响切削是否分离。前者大, 切削加工就处于不分离状态, 否则正相反。选择一定的加工参数, 利用 MATLAB 软件仿真得出相邻两刀齿的运动轨迹, 包括分离型和不分离型, 如图 2 所示。

从图 2 (a) 中的局部放大图可以看出, 分离型系统中刀尖轨迹并非光滑的曲线, 是周期性的折线, 说明刀尖受超声振动的影响, 运动方向

有变化, 刀齿有规律地与工件切削分离; 而不分离型扭转超声铣削系统的轨迹是光滑的曲线, 说明在切削过程中, 刀齿与工件没有分离。考虑到切削分离特性, 当刀齿与工件处于不分离状态时, 刀齿就会去除加工材料, 存在瞬时切厚; 而对于分离型, 当刀齿的运动与主切削方向相反时, 刀齿不接触工件材料, 不存在瞬时切厚。

1.2 铣削力模型

在扭转超声振动辅助铣削系统中, 如图 1 所示, 作用在 X 、 Y 方向的铣削力可以表示为

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\phi_j(t)) & -\sin(\phi_j(t)) \\ \sin(\phi_j(t)) & \cos(\phi_j(t)) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{tj} \\ F_{rj} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, F_{tj} 和 F_{rj} 分别为第 j 刀齿所受的切向力和径向力; $\phi_j(t)$ 为第 j 刀齿 t 时刻的角移, $\phi_j(t) = \frac{2\pi n(t)}{60} - (j-1)\frac{2\pi}{Z}$, ($j=1, 2, \dots, Z$); $n(t)$ 为刀尖转速, 表示时间的函数, $n(t) = n_0 + A_f \cos(2\pi f t + \psi)$; n_0 为普通铣削时主轴转速, 求解 $\phi_j(t)$ 得

$$\phi_j(t) = \frac{2\pi}{60} n_0 t + \frac{A}{60r} \sin(2\pi f t + \psi) + (j-1)\frac{2\pi}{Z} \quad (7)$$

铣削力采用指数模型, 作用在

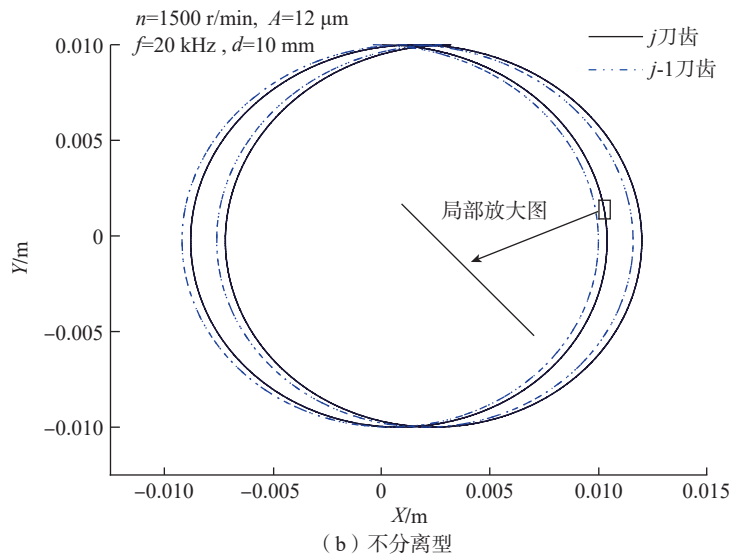
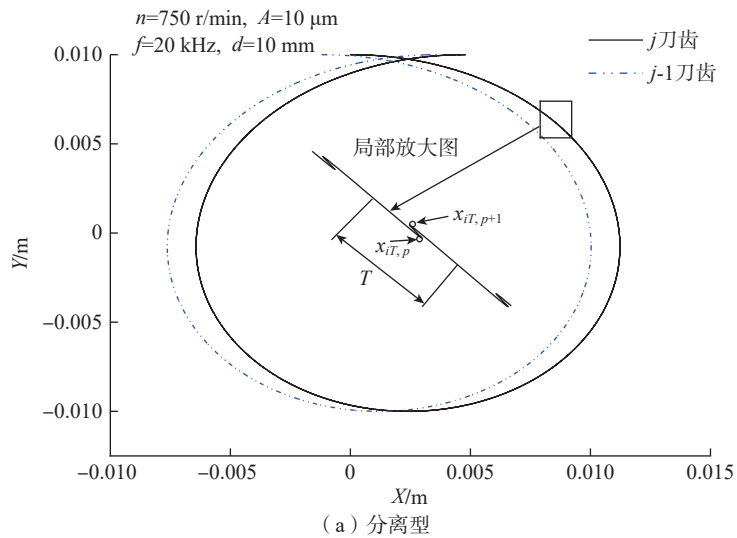


图 2 相邻刀齿轨迹仿真

Fig.2 Simulation of adjacent tool teeth trajectories in TUVAM

第 j 刀齿上的动态切向力和径向力分别为

$$\begin{bmatrix} F_{tj} \\ F_{rj} \end{bmatrix} = a_p \left(\begin{bmatrix} K_t \\ K_r \end{bmatrix} h_j(t)^q + \begin{bmatrix} K_{te} \\ K_{re} \end{bmatrix} \right) g(\phi_j(t)) \quad (8)$$

式中, K_t 和 K_{te} 分别为切向切削力系数和刃边系数; K_r 和 K_{re} 为径向切削力系数和刃边系数; a_p 为轴向切深; q 为切削常数; $h_j(t)$ 为瞬时切削厚度; $g(\phi_j(t))$ 为窗口函数, 用来判断刀齿是否参与切削。

$$g(\phi_j(t)) = \begin{cases} 1, \phi_{st} \leq \phi_j(t) \leq \phi_{ex} \\ 2, \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中, ϕ_{st} 、 ϕ_{ex} 为刀齿切入、切出角。当逆铣时, $\phi_{st}=0$, $\phi_{ex}=\arccos(1-2a_d)$; 当顺铣时, $\phi_{st}=\arccos(1-2a_d)$ 。其中, $\phi_{ex}=\pi$, $a_d=a_d/d$ 为径向浸入率。

在扭转超声振动辅助铣削系统中, 考虑再生效应瞬态切厚为

$$h_j(t) = Q(t) \times (h_{jst}(t) + h_{jdn}(t)) \quad (10)$$

$$h_{jst}(t) = fz \sin(\phi_j(t)) \quad (11)$$

$$h_{jdn}(t) = (x(t) - x(t - \tau_j(t)) \sin(\phi_j(t)) + (y(t) - y(t - \tau_j(t)) \cos(\phi_j(t))) \quad (12)$$

式中, $\tau_j(t)$ 为相邻刀齿切削的间隔时间; $Q(t)$ 为判断函数, 判断系统加工中切削分离状态, 表示为

$$Q_n(t) = \begin{cases} 1, X_{iT, p+1} \geq X_{iT, p} \text{ or } X_{iT, l+n} \geq X_{iT, l}, p=1, \dots, l-1, \\ n=l+2 \dots k \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

式中, k 为超声某一周期离散点个数。

根据刀齿轨迹的横向坐标对函数的取值进行判断。如图 2 (a) 所示, 在任一超声周期 iT 内, 相邻两刀齿切削工件时, 如果刀齿与工件处于切削不分离状态, 总有后一刀齿的横坐标 $X_{iT, p+1}$ 大于前一刀齿的横坐标 $X_{iT, p}$, 此时瞬时切厚存在, 判断函数值为 1; 如果处于切削分离状态, 刀齿运动的横坐标不满足上述情况, 瞬时切厚不存在, 判断函数值为 0。接下来, 以前一刀齿的横向坐标作为基

准值时, 继续比较, 赋予判断函数取值, 得出瞬时切削厚度。

1.3 动力学模型

在扭转超声振动辅助铣削系统中, 以刀齿为研究对象, 根据铣刀在 x 和 y 两坐标方向的运动, 建立系统的动力学模型, 如图 3 所示, 动力学方程可以表示为

$$\begin{cases} m_{ix} x''(t) + c_{ix} x'(t) + k_{ix} x(t) = F_{ix}(t) \\ m_{iy} y''(t) + c_{iy} y'(t) + k_{iy} y(t) = F_{iy}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, m_{ii} 、 c_{ii} 、 k_{ii} ($i=x, y$) 分别为系统在 x, y 方向上的质量、阻尼和刚度; $F_{ii}(t)$ 则为系统 t 时刻作用于刀具的切削力在 x, y 方向上的分力; $x(t)$ 、 $y(t)$ 为刀具在 x, y 方向上的位移对式 (8) 线性处理 [22], 瞬时切厚经简化后, 扭转超声振动辅助铣削的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x''(t) \\ y''(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2m_x \omega_{nx} \zeta_x & 0 \\ 0 & 2m_y \omega_{ny} \zeta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'(t) \\ y'(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_x \omega_{nx}^2 & 0 \\ 0 & m_y \omega_{ny}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} h_{nxx} & h_{nxy} \\ h_{nyx} & h_{nyy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x(t - \tau_j) \\ y(t - \tau_j) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,

$$\begin{aligned} h_{nxx} &= Q(t) \sum_{j=1}^z g(\phi_j(t)) q(f_z)^{q-1} \times \\ &\quad \sin(\phi_j(t)) \times (K_t \cos(\phi_j(t)) + K_r \sin(\phi_j(t))) \\ h_{nxy} &= Q(t) \sum_{j=1}^z g(\phi_j(t)) q(f_z)^{q-1} \times \\ &\quad \cos(\phi_j(t)) \times (K_t \cos(\phi_j(t)) + K_r \sin(\phi_j(t))) \\ h_{nyx} &= Q(t) \sum_{j=1}^z g(\phi_j(t)) q(f_z)^{q-1} \times \\ &\quad \sin(\phi_j(t)) \times (-K_t \sin(\phi_j(t)) + K_r \cos(\phi_j(t))) \\ h_{nyy} &= Q(t) \sum_{j=1}^z g(\phi_j(t)) q(f_z)^{q-1} \times \\ &\quad \cos(\phi_j(t)) \times (-K_t \sin(\phi_j(t)) + K_r \cos(\phi_j(t))) \end{aligned} \quad (16)$$

2 扭转超声振动辅助铣削的稳定性预测

试验得到扭转超声振动辅助铣削系统的模态参数, 超声参数 $f=20$ kHz, $A=8 \mu\text{m}$, 加工时的每齿进给量 $f_z=0.02 \text{ mm}$, 径向浸入率 0.05 代入式 (15), 求解方程并应用 Floquet 理论判断系统的稳定性, 仿真得出普通铣削系统和扭转超声振动辅助铣削的稳定性临界曲线, 如图 4 所示。红色线及其下方对应的是扭转超声振动辅助铣削系统的稳定性区域; 灰色

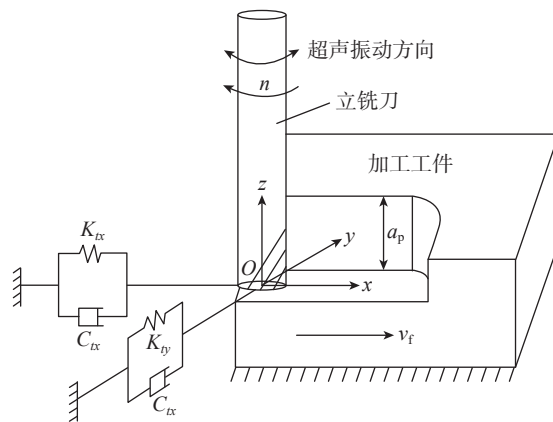


图 3 立铣模型
Fig.3 Vertical milling model

曲线及其下方表示的是普通铣削系统的稳定性区域,分别用蓝色区域填充普通铣削的稳定性区域,透明青色显示的是扭转超声振动辅助铣削的稳定性区域。通过图4可以看出,扭转超声振动辅助铣削系统的稳定性曲线在普通铣削之上,说明扭转超声振动辅助铣削系统稳定性加工参数选择的范围比普通铣削大。在低速段,扭转超声振动辅助铣削系统的叶瓣有变尖现象,减小了稳定性区域,普通铣削形成了较大范围的加工区域;但随着转速的增大,普通铣削叶瓣现象弱化,轴向切深极限值逐渐减小,这主要是由于随着转速的增大,扭转超声振动辅助铣削的刀齿与工件的不分离效应产生,超声振动并未改变主轴的速度方向,整个系统的速度有所增幅,这一阶段对主轴带来了高速的效应,稳定性更好。由此,我们可以得出,扭转超声振动辅助铣削系统中的刀齿与工件不分离时,系统速度在一定的增幅区间也能提高稳定性。

3 工艺参数对系统稳定性的影响预测

工艺参数包括切削参数、超声参数和刀具参数,决定着刀齿与工件的接触状态,与系统的稳定性相关联,探明它们对系统稳定性的影响有助于参数的优化设计。为了和试验装置设计的系统参数相照应,仿真曲线加工参数选择超声频率为20 kHz,超声振幅为10 μm,铣刀直径为10 mm,径向浸入率为0.05,刀齿数为4。得出不同每齿进给量对扭转超声振动辅助铣削系统稳定性影响的仿真曲线,如图5所示,其中青色区域显示的是每齿进给量为0.02 mm时所对应的稳定性区域,也是5条稳定性曲线中位置处于最下方的曲线。对应不同的每齿进给量,稳定性曲线的走势大致相同,轴向切深的极限值随着主轴转速的变化有起伏,但是增幅程

度不同。从2200 r/min到3100 r/min,轴向切深先增大6%,又下降5%;从3100 r/min到3880 r/min,再到5108 r/min,分别增幅13.54%和19.69%。可见系统在4000~5000 r/min转速范围内,轴向切深增幅最大。随着每齿进给量的增大,叶瓣越来越窄,系统的稳定性区域在减小。这主要是由于随着主轴的旋转,每齿进给量越大,它沿径向的分量越大,刀齿与工件越容易脱离,系统的动态特性发生变化,系统的加速度增大,系统会受到冲击,导致系统的稳定性降低。扭转超声振动辅助铣削系统在实际加工生产时,每齿进给量越小,系统的

稳定性越好。

径向浸入率反映了刀具沿径向切入工件的程度,不同的径向浸入率对切削分离特性有影响,系统受到的切削阻力会发生变化,进而影响系统的稳定性。选择超声频率为20 kHz,超声振幅为8 μm,每齿进给量为0.004 mm,刀具直径仍为10 mm,刀具齿数为4,进行仿真得到不同径向浸入率下的扭转超声振动辅助铣削系统稳定性曲线,如图6所示。可以得出,系统的稳定性区域在随着径向浸入率的增大而减小,径向浸入率为0.01~0.05,在5000 r/min附近的轴向切深极限值降低约5.5倍,下降

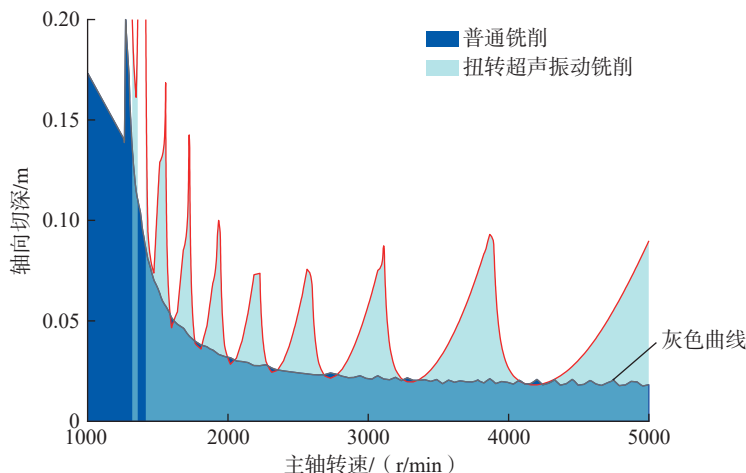


图4 扭转超声振动辅助铣削系统的稳定性仿真曲线

Fig.4 Stability lobe simulation curves of TUVAM system

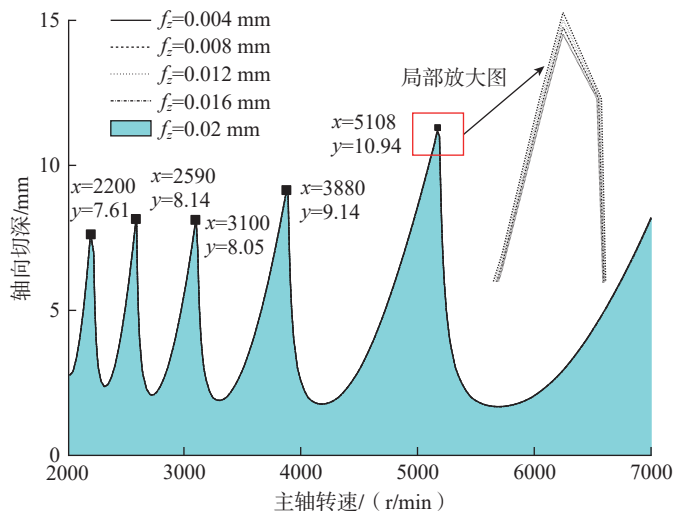


图5 不同每齿进给量下的扭转超声振动辅助铣削系统稳定性仿真曲线

Fig.5 Stability prediction lobes of TUVAM system under different feed per tooth

幅度较大。同一径向浸入率下,稳定性曲线变化有所不同,径向浸入率为0.01时,轴向切深的极限值随着主轴转速的增大,先降低又缓慢增加,在2000~3000 r/min时,降幅最大达28.37%;在5000 r/min时对应的稳定性曲线叶瓣下方出现了面积较大的不稳定性孤岛,说明系统的不稳定因素增加。可见,当铣刀较多浸入工件时,系统的不稳定性因素会增加,稳定性面积会减小。

选择超声频率20 kHz,每齿进给量 $f_z=0.004$ mm,铣刀直径为10 mm,径向浸入率为0.05,试验得出4种不同超声振幅下扭转超声振动辅助铣削系统的稳定性仿真曲线,如图7所示。可以看出,系统的稳定性区域大小与超声振幅变化成反比,系统的稳定性曲线变化幅度不明显。轴向切深随着主轴转速的增大,呈现先下降又增大的趋势,超声振幅为20 μm 时,先下降55.43%后又增大了33.24%。另外,随着超声振幅的增大,系统切削分离所需要的主轴转速越高,主要原因在于,超声振幅越大,超声振动的线速度越大,系统沿主切削方向的线速度变化率增大,平均线速度降低,切削分离特性对应的临界点的转速就高。从图7中可以看出,刀齿分离时,稳定性叶瓣比较尖,表明对应一定的轴向切深稳定状态下加工主轴可选范围变小。综合以上分析,选择较小的超声振幅,有利于系统的稳定性。

刀齿数影响铣削的刀通频率,刀通频率与超声振动的频率相互作用,也会对系统的稳定性造成影响。选择同上述一致的超声参数以及切削参数,通过MATLAB软件仿真得出刀具齿数2、3、4时系统稳定性曲线,如图8所示。可以看出,刀齿数越少,系统的稳定性区域越大。当刀齿数为2时,系统主轴转速在3000 r/min以下时,并未形成有效的稳定性叶瓣,说明此时的叶瓣过于尖窄。而当刀齿数为3和4时,系统的稳定性曲线在

整个转速范围内比较正常,随着主轴转速的增大,叶瓣变宽,系统的轴向切深极限值没有明显的变化。当主轴转速为5000 r/min时,对应不同齿数的稳定性花瓣和轴向切深分别降幅59.57%和18.09%。由此可以看出,刀齿数量越少,系统在中高速区无颤振切削参数选择范围更宽广。

4 试验验证及结果分析

4.1 试验设备

为了验证系统稳定性预测图谱,

开展了相关的验证试验。主要包括系统模态试验、切削力系数辨识试验以及颤振试验。模态试验采用获取刀尖频响函数的方法,通过冲击力锤锤击,固定在刀尖的加速器传感器获取刀尖的加速度信号,通过信号的放大进一步传递给数据采集分析仪,利用模态分析软件得出刀尖的频响函数,计算求出系统的模态参数,具体工装见图9左侧图所示。切削力系数辨识试验是根据具体的加工条件,采用快速标定方法,保持其他参数

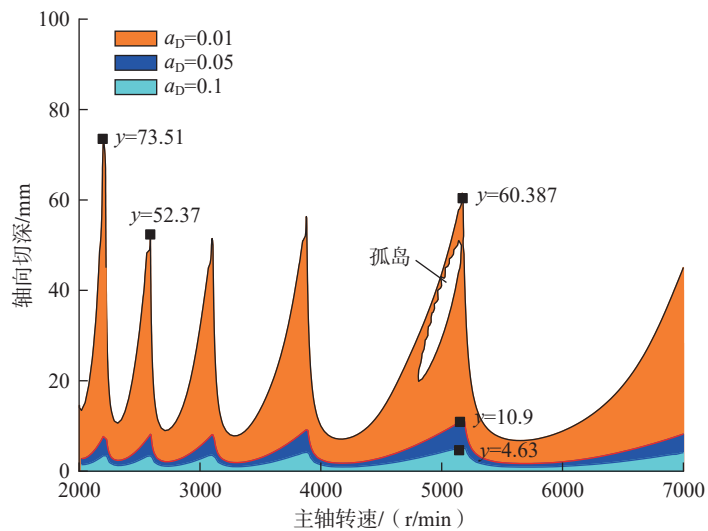


图6 不同径向浸入率下的扭转超声振动辅助铣削系统稳定性仿真曲线

Fig.6 Stability lobe simulation curves of TUVAM system under different the ratio of radial depth and tool diameter

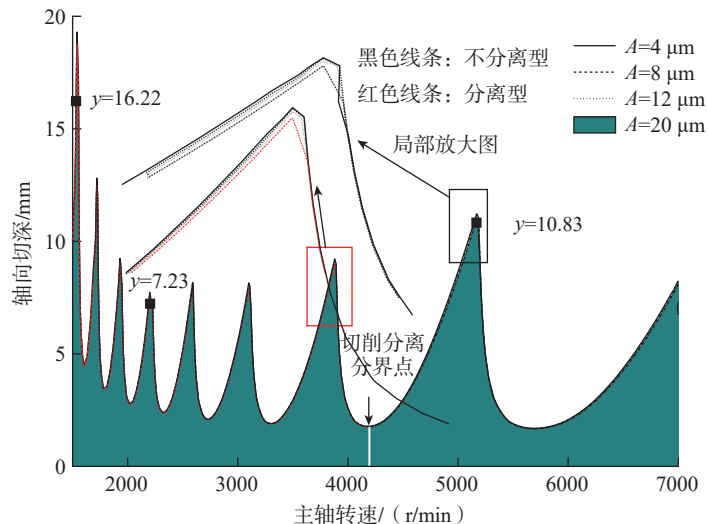


图7 不同超声振幅下的扭转超声振动辅助铣削系统稳定性仿真曲线

Fig.7 Stability lobe simulation curves of TUVAM system under different ultrasonic amplitude

不变,让每齿进给量线性递增,测量铣削过程中的X和Y方向的切削力,得出平均切削力数值,确定切削力表

达式中的相关系数。系统试验开展所需要试验仪器与设备、刀具材料参数以及材质参数分别列于表1、2和3

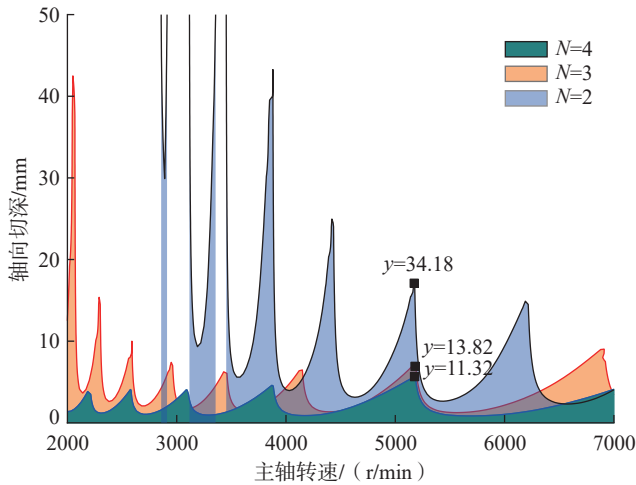


图8 不同刀具齿数下的扭转超声振动辅助铣削系统稳定性仿真曲线

Fig.8 Stability lobe simulation curves of TUVAM system under different tool teeth



图9 扭转超声振动辅助铣削试验设备

Fig.9 Experimental equipment for TUVAM

表1 试验仪器与设备参数

Table 1 Test instrument and the parameters of equipments

名称	具体参数或型号
VMC850E 数控中心	加工中心行程: X850 mm、Y510 mm、Z540 mm; 刀柄: MAS403BT40; 最大扭矩: 35.8 N·m; 主轴最高转速: 8000 r/min; 电机功率: 11 kW
三向测力仪	Kistler9257B
数据采集分析仪	NIPCI9205
多通道电荷放大器	Kistler5070
冲击力锤	C200713151
声音传感器	INV9206 (20 Hz~20 kHz)
加速度传感器	1A803E
超景深三维显微镜	日本基恩士公司生产的 VHX-2000
表面粗糙度仪	杜蒙仪器制造有限公司生产的 TR200

表2 刀具的性能参数

Table 2 Parameters of tool performance

刀具材料	涂层	刃径/mm	柄径/mm	刃长/mm	总长/mm	螺旋角/(°)	齿数
硬质合金	TiAlN	10	10	30	75	35度	4

中。试验现场装置如图9所示。测得的模态参数结果列于表4中。切削力系数按照文献[22]方法求得,求出的切削力系数为 $K_t=8.03 \times 10^8$ N/m²; $K_r=2.95 \times 10^8$ N/m²; $K_{te}=9.57$ N/m; $K_{re}=5.16$ N/m。

4.2 加工参数对系统稳定性影响的试验设计与结果分析

铣削试验采用四因素三水平正交试验,选定四因素为: 主轴转速、径向切深、轴向切深、每齿进给量,每个因素设定3个水平,如表5所示,共81组试验,试验采用逆铣方式,无切削液,通过切削力时频信号及工件的表面加工质量(即是否出现振纹)来判断是否发生颤振。

通过对81组试验的时频信号与表面质量分析,共观察到23组试验工况发生颤振,如表6所示。从中选取参数组合 $A_1B_3C_3D_2$ 、 $A_2B_3C_1D_2$ 、 $A_2B_3C_3D_2$ 、 $A_3B_2C_1D_2$ 作为分析对象,分别标记为A、B、C、D4点,并获得这4点参数下的切削力时域图和频谱,如图10所示。通过图10可以

表3 试验材料的性能参数

Table 3 Performance parameters of experimental materials

参数	参数值
工件材料	Ti-6Al-4V
工件尺寸/mm ³	15×10×8
密度/(kg·m ⁻³)	4505
抗拉强度/MPa	≥895
弹性模量/GPa	110
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	7.955
比热/(cal·g ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0.612
线膨胀系数/°C ⁻¹	7.89×10 ⁻⁶

表4 模态参数

Table 4 Modal parameters

方向	M/kg	C/(N·s·m ⁻¹)	K/(N·s·m ⁻¹)
x	0.06724	1.966	1.042×10 ⁵
y	0.06326	2.265	1.088×10 ⁵

表5 铣削试验方案及颤振试验结果

Table 5 Milling experimental scheme and chatter test findings

水平	因素			
	A切削速度/(m/min)	B径向向切深/mm	C轴向切深/mm	D每齿进给量/(mm/z)
1	30	0.1	0.5	0.01
2	95	0.3	1	0.02
3	160	0.5	1.5	0.03

表6 铣削试验颤振试验结果

Table 6 Chatter test findings of milling experimental

试验号	组合标记	试验号	组合标记	试验号	组合标记
1	A ₁ B ₁ C ₃ D ₃	9	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	17	A ₂ B ₃ C ₃ D ₃
2	A ₁ B ₂ C ₁ D ₃	10	A ₂ B ₁ C ₃ D ₃	18	A ₃ B ₂ C ₃ D ₃
3	A ₁ B ₂ C ₂ D ₃	11	A ₂ B ₂ C ₃ D ₂	19	A ₃ B ₃ C ₁ D ₃
4	A ₁ B ₂ C ₃ D ₃	12	A ₂ B ₂ C ₃ D ₃	20	A ₃ B ₃ C ₂ D ₂
5	A ₁ B ₃ C ₁ D ₃	13	A ₂ B ₃ C ₂ D ₂	21	A ₃ B ₃ C ₂ D ₃
6	A ₁ B ₃ C ₂ D ₂	14	A ₂ B ₃ C ₂ D ₃	22	A ₃ B ₃ C ₃ D ₂
7	A ₁ B ₃ C ₂ D ₃	15	A ₂ B ₃ C ₃ D ₁	23	A ₃ B ₃ C ₃ D ₃
8	A ₁ B ₃ C ₃ D ₂	16	A ₂ B ₃ C ₃ D ₂	—	—

看出,参数点A的切削力时域幅值起伏较大,切削力在频率779.68 Hz、884.52 Hz时显示出巨大能量,其余频率为刀通频率或其谐频,说明系统在这两处处于不稳定加工状态,参数点A是不稳定点,切削加工会存在颤振。参数点B的 F_{rx} 和 F_{ry} 变化幅度较小,所对应的频谱能量较大点均为刀通频率及其整数倍或者主轴转速的倍频,说明B点在所对应参数下加工是稳定的;参数点C的切削力时域的幅值变化很大,在153.67 Hz、746.75 Hz、854.21 Hz处,频域里力的幅值较大,说明切削力在这几处能量较大,参数点C是不稳定点,此时的加工系统不稳定。参数点D的切削力时域幅值变化较小,频域里能量较大的均是刀通频率或者主轴频率的倍频,所以参数点D是稳定点,此时加工系统也处于稳定状态。

第2种判断颤振的方法为通过观测加工后工件的表面质量识别,如

图11所示,经过白光干涉仪和表面粗糙度仪测得参数点A、B、C、D4点的表面形貌和粗糙度值。由图11可以明显看出,A点和C点的粗糙度分别为0.09938 μm 和0.08319 μm ,比D点的粗糙度值增大了55.24%和46.53%,可见不稳定状态下切削加工表面质量下降,表面存在颤振波纹,而稳定状态下,工件表面粗糙度较小,表面较光滑。

4.3 超声振幅对系统稳定性影响的试验设计与结果分析

考虑4.2节中的仿真结果的分析,根据系统颤振会使得工件表面质量下降这一事实,试验采取单因素分析方法,考察不同超声振幅且其他加工参数相同下,加工工件表面粗糙度的变化。试验的超声频率为35 kHz和刀具直径为10 mm,其他参数见表7。

从图12可以看出,扭转超声振动辅助铣削相比较于普通铣削,在同

样的参数情况下,工件表面粗糙度要小,说明扭转超声振动能够改善工件的表面质量。随着超声振幅的增加,表面粗糙度也在增加,说明系统的稳定性变差,这主要是由于随着超声振幅的增大,系统的动态切削性能发生变化,产生一定的振动。可以看出,试验结果与仿真结果较吻合,也验证了仿真曲线的有效性。

4.4 刀齿参数对系统稳定性影响的试验设计与结果分析

忽略刀齿数对系统模态的影响,选择3节中仿真图7相同的参数。刀齿数对系统稳定性影响的试验点标于图13中,以○和□分别表示稳定点和不稳定点,试验点颜色与刀齿数稳定性曲线相匹配(例如蓝色的○和□表示刀齿数为4的试验点)。考察图13中的E、F两点,测量得出两试验参数点的X和Y方向的切削力时域信号如图14所示。

从图13中可以看出,刀齿数越少,同一转速下,稳定性加工所允许的轴向切深越大,这说明刀齿数越少,它的稳定性区域越大,稳定性加工可选择参数范围越宽广。刀齿数越多,同一轴向切深下,随着主轴转速的增大,系统的稳定性下降。由图14可以看出,证明E点的切削力存在较大的变化起伏,说明在加工过程中,系统的动态特性发生了变化,稳定性下降,E点是不稳定点;而F点的切削力时域信号较稳定,说明系统加工过程中稳定性较好,F点的稳定点仿真曲线与试验结果基本吻合,个别点存在误差,主要原因在于:(1)忽略刀齿数对系统模态的影响,系统模态变化会引起加工中系统动态特性的变化;(2)数控机床误差的随机性也会影响数据之间的一致性和相关性。

5 结论

本文开展了对扭转超声振动辅助铣削钛合金稳定性的系统研究,从

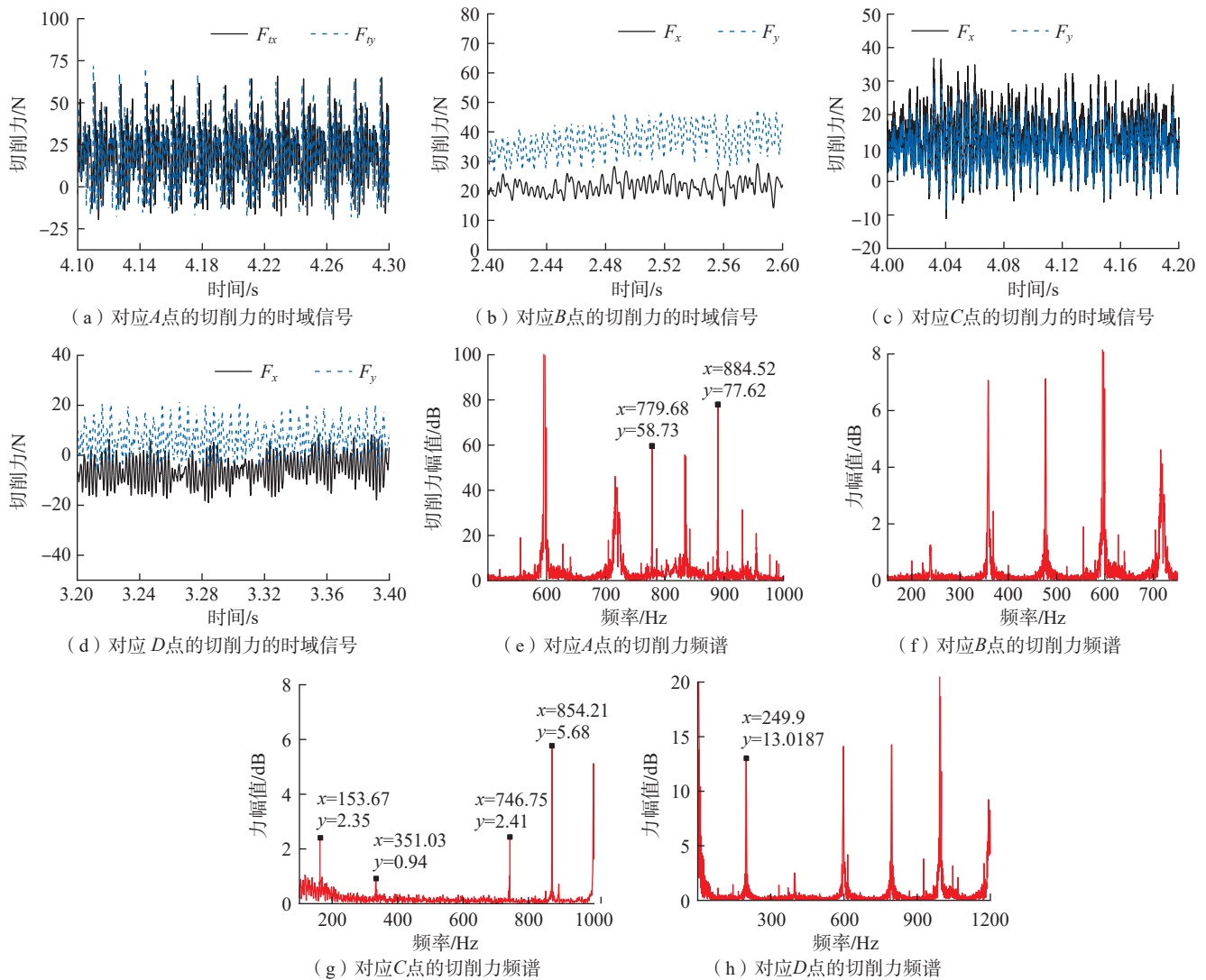


图 10 扭转超声振动辅助铣削时域信号和频谱

Fig.10 Time-domain signals and frequency spectrum of cutting forces under TUVAM

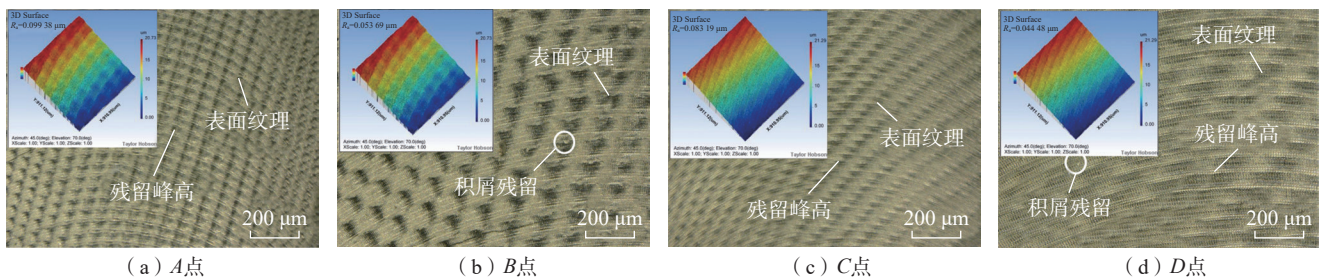


图 11 A~D 点的表面质量

Fig.11 Surface quality of points A to D

表 7 超声振幅影响稳定性的试验方案

Table 7 Experimental scheme of the effect of ultrasonic amplitude on system stability

序号	切削速度/(m/min)	轴向切深/mm	径向切深/mm	每齿进给量/(mm/z)	超声振幅/ μm
1	40	5	0.5	0.02	0/4/12/20
2	80	5	0.5	0.02	0/4/12/20
3	120	5	0.5	0.02	0/4/12/20

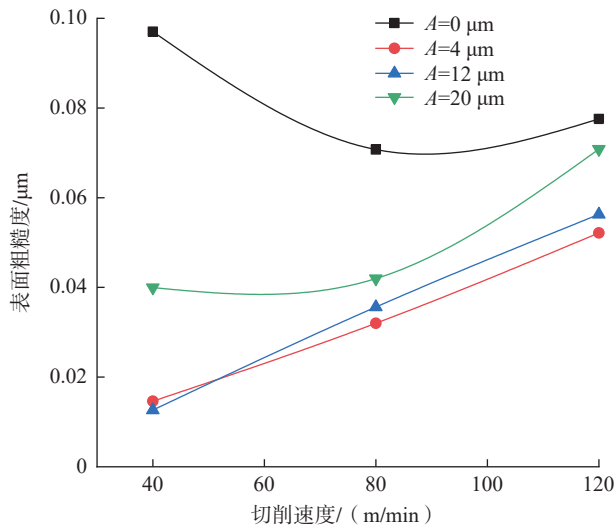


图 12 不同超声振幅下工件表面粗糙度

Fig.12 Surface roughness of the workpiece under different ultrasonic amplitudes

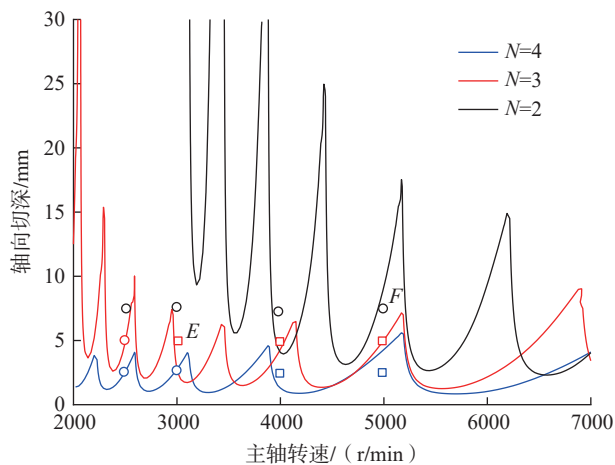


图 13 刀齿数对系统稳定影响的试验验证

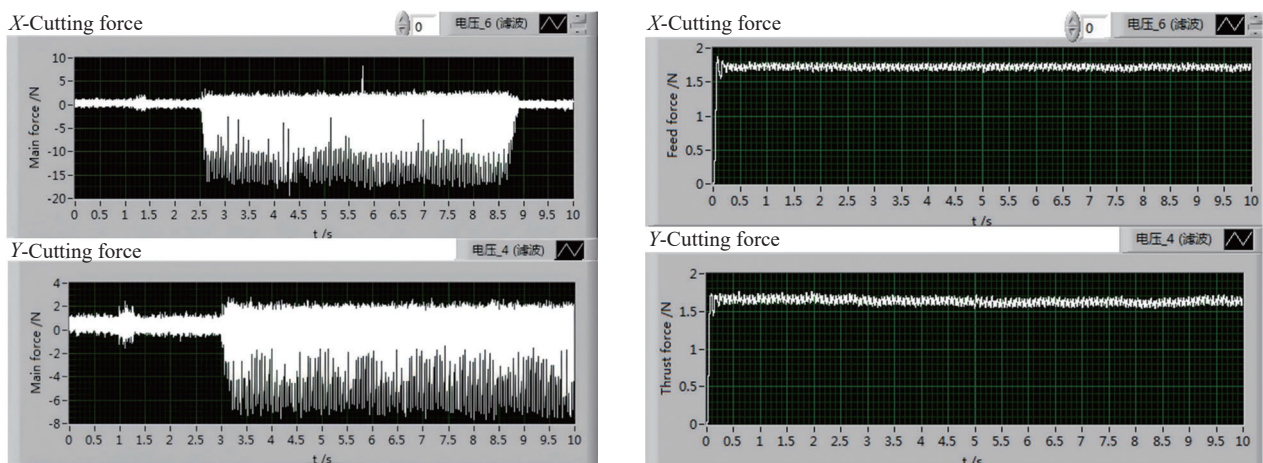
Fig.13 Experiment results of the effect of cutting teeth on system stability

系统动力学方程出发,得出扭转超声振动辅助铣削系统的稳定性仿真图谱,探明了铣削参数、超声参数和刀具参数对系统稳定性的影响趋势,通过铣削钛合金工件验证了仿真曲线的有效性,得出以下结论。

(1) 扭转超声振动铣削无论是分离型还是非分离型,系统的稳定性随着转速的增大,轴向切深极限值呈现先减小后增大的趋势。与普通铣削相比,同样加工参数下,扭转超声振动能够改善工件的表面质量。随着转速的增大,稳定性区域明显大于普通铣削,稳定状态下允许的加工参数的范围比普通铣削更广泛。

(2) 切削参数中每齿进给量对扭转超声振动铣削系统稳定性影响较小,随着每齿进给量的增大,引起系统加速度和切削力发生变化,两者共同作用下系统的稳定性区域在减小,但下降幅度较小;径向浸入率对系统稳定性影响较大,随着径向浸入率的增大,系统受到的切削阻力增大,系统的稳定性区域在减小,最大降幅 28.37%。

(3) 超声参数中,随着超声振幅的增大,无论是分离型还是非分离型,刀具沿主切削方向的加速度增大,系统受到一定的冲击,系统的稳



(a) E点的切削力时域信号

(b) F点的切削力时域信号

图 14 E 和 F 试验点的切削力时域信号

Fig.14 Time-domain signals of cutting forces on E and F test points

定性下降；随着主轴转速的增大，保持了切削速度方向的一致性，系统的切削效率提升，轴向切深的极限值呈现先减小后增大。

(4) 刀具齿数越少，单刀齿切削时间较长，减小了刀齿切换对系统的冲击，系统的稳定性区域越大，系统获得稳定性加工的切削参数范围越宽广。

参考文献

[1] 姜增辉, 王琳琳, 石莉, 等. 硬质合金刀具切削Ti6Al4V的磨损机理及特征[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 178-184.

JIANG Zenghui, WANG Linlin, SHI Li, et al. Study on tool wear mechanism and characteristics of carbide tools in cutting Ti6Al4V[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 178-184.

[2] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 280-282.

LI Yi, ZHAO Yongqing, ZENG Weidong. Application and development of aerial titanium alloys[J]. Materials Reports, 2020, 34(S1): 280-282.

[3] MALÝ M, HÖLLER C, SKALON M, et al. Effect of process parameters and high-temperature preheating on residual stress and relative density of Ti6Al4V processed by selective laser melting[J]. Materials, 2019, 12(6): 930.

[4] 孙杰, 国凯, 杨斌. 钛合金航空结构件加工刀具与工艺技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2021, 64(16): 74-86.

SUN Jie, GUO Kai, YANG Bin. Review on cutting tool and processing technology for titanium alloy aviation components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(16): 74-86.

[5] SŁODKI B, ZĘBALA W, STRUZIKIEWICZ G. Turning titanium alloy, grade 5 ELI, with the implementation of high pressure coolant[J]. Materials, 2019, 12(5): 768.

[6] 郑侃, 廖文和, 孙连军, 等. 机器人纵振与纵扭超声铣削稳定性对比研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(7): 10-17.

ZHENG Kan, LIAO Wenhe, SUN Lianjun, et al. Comparative study on stability of robotic longitudinal vibration and longitudinal-torsional ultrasonic milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(7): 10-17.

[7] 韩凤起, 张德远. 超声纵扭-低频扭转复合振动攻丝实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(4): 1077-1084.

HAN Fengqi, ZHANG Deyuan. Ultrasonic

longitudinal torsional and low frequency torsional compound vibration tapping experiment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1077-1084.

[8] 姜燕, 赵波. 纵-扭复合超声对滚齿面强化机理及表面特性研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 289-300.

JIANG Yan, ZHAO Bo. Mechanism of longitudinal-torsional ultrasonic rolling strengthening gear tooth surface and surface characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(7): 289-300.

[9] 李孝阳, 于大国, 杜怡洁, 等. 基于灰色关联分析的纵扭超声辅助对电火花微孔加工影响评价[J]. 机床与液压, 2024, 52(7): 49-59.

LI Xiaoyang, YU Daguo, DU Yijie, et al. Evaluation of the influence of longitudinal and torsional ultrasonic vibration assistance on micro-hole in electric discharge machining based on grey relational analysis[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(7): 49-59.

[10] 赵宇, 李学伟, 舒盛荣, 等. 纵扭超声铣削刀柄设计及测试[J]. 应用声学, 2025, 44(5): 1222-1231.

ZHAO Yu, LI Xuewei, SHU Shengrong, et al. Design and test of longitudinal torsional ultrasonic milling tool holder[J]. Journal of Applied Acoustics, 2025, 44(5): 1222-1231.

[11] 王明海, 李世永, 郑耀辉. 超声铣削钛合金材料表面粗糙度研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 340, 341-346.

WANG Minghai, LI Shiyong, ZHENG Yaohui. Surface roughness of titanium alloy under ultrasonic vibration milling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 340, 341-346.

[12] YAN Y Y, JIANG C X, YAN H Z. Probabilistic model of the surface residual height under longitudinal-torsional ultrasonic vibration assisted micro-milling TC4[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(5-6): 2837-2855.

[13] 张存鹰, 赵波, 王晓博. 纵扭复合超声端面铣削表面微结构建模与试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 52-63, 79.

ZHANG Cunying, ZHAO Bo, WANG Xiaobo. Modeling and experiment of surface microstructure by longitudinal-torsional compound ultrasonic end milling[J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 52-63, 79.

[14] XIE W B, WANG X K, ZHAO B, et al. Surface and subsurface analysis of TC18 titanium alloy subject to longitudinal-torsional ultrasonic vibration-assisted end milling[J]. Journal

of Alloys and Compounds, 2022, 929: 167259.

[15] 唐军, 赵波. 单激励纵扭复合超声铣削系统研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6): 57-61, 71.

TANG Jun, ZHAO Bo. A new longitudinal-torsional composite ultrasonic milling system with a single excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(6): 57-61, 71.

[16] 唐军, 赵波. 分离型纵-扭复合超声铣削的稳定性分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1318-1325.

TANG Jun, ZHAO Bo. Stability analysis of the separated longitudinal-torsional composite ultrasonic milling[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(7): 1318-1325.

[17] ZHANG Y M, ZHAO B, WANG Y Q, et al. The stability analysis of separated feed ultrasonic milling[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(2): 1062-1073.

[18] ZHANG Y M, ZHAO B, WANG Y Q, et al. Effect of machining parameters on the stability of separated and unseparated ultrasonic vibration of feed direction assisted milling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(2): 851-858.

[19] ZHANG Y M, WANG X B, WU X F, et al. Stability analysis and chatter suppression of ultrasonic elliptical vibration milling of Ti-6Al-4V alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(3-4): 1301-1314.

[20] 张跃敏, 王晓博, 尹新斌, 等. 加工参数对垂直进给方向超声铣削钛合金稳定性的影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 103-110.

ZHANG Yuemin, WANG Xiaobo, YIN Xinbin, et al. Influence of machining parameters on the stability of vertical feed direction ultrasonic titanium alloy milling[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42(4): 103-110.

[21] 秦飞跃. 钛合金薄壁件纵扭超声微铣削系统稳定性及其表面质量试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.

QIN Feiyue. Experimental study on system stability and surface quality of longitudinal-torsional ultrasonic micro-milling of titanium alloy thin-walled parts[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.

[22] FAASSEN R P H, VAN DE WOUW N, OOSTERLING J A J, et al. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(14): 1437-1446.

Experimental Study on Torsional Ultrasonic Vibration-Assisted Milling of Titanium Alloys

ZHANG Yuemin¹, XIA Zaixiang¹, HAO Xiaoru¹, TANG Jun², YIN Yue¹

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hainan College of Economics and Business, Haikou 571127, China)

[ABSTRACT] To address the challenges in machining titanium alloys, a technique employing torsional ultrasonic vibration-assisted milling (TUVAM) is proposed. Tool-tip trajectory equations for TUVAM were established. Simulations generated the trajectory curves for both separated and non-separated tool-tip motion types. A chip thickness determination function was formulated using the coordinate method, enabling the development of the system's dynamic model. The dynamic model was solved using the full-discretization method and the linearization theory of nonlinear functions, yielding the stability prediction laws for the TUVAM system. Building on this foundation, the influence of machining parameters on milling stability was investigated, and chatter experiments were conducted for validation. Experimental verification reveals that TUVAM significantly extends the chatter-free operational domain, elevates stability lobe boundaries relative and improves the surface quality of machined workpieces to conventional milling when operating at identical machining parameters. Increases in feed per tooth and radial immersion ratio lead to a decrease in the system's stability lobe curves. Variations in feed per tooth have a minor impact on the system's limiting axial depth of cut. In contrast, an increase in the radial immersion ratio causes a more significant reduction in the limiting axial depth of cut, with a maximum decrease of 28.37%. The envelope area of the stability lobe diagram exhibits an inverse scaling relationship with both increased ultrasonic vibration amplitude and reduced number of cutter teeth. Experiments validated the effectiveness of the simulated stability curves, providing data support for shop-floor machining.

Keywords: Torsional ultrasonic vibration; Titanium alloy; Stability; Vibration; Dynamic model

(责编 晓月)