DOI : 10.3901/JME.2019.19.186

钛合金高速旋转超声椭圆振动侧铣削切屑特征和 刀具磨损研究*

刘佳佳 姜兴刚 张德远

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘要：难加工材料钛合金在采用传统铣削方式时，随着切削速度的增加，切削力和切削温度都迅速增加，使得切削条件恶化并加速刀具磨损，从而导致刀具过早失效。将超声椭圆振动加工技术引入到高速铣削中，进行了钛合金高速旋转超声椭圆振动侧铣削试验。从切屑特征以及刀具后刀面磨损两个方面研究了高速超声椭圆振动铣削参数匹配对钛合金加工的影响。首先基于高速超声椭圆振动铣削过程中刀具-工件的运动学特点推导出高速超声椭圆振动铣削加工参数与振动参数间的匹配关系，然后利用本实验室自行研制的超声椭圆振动铣削装置进行了不同参数匹配关系下的验证性切削试验。试验结果表明：合理的参数匹配使得超声椭圆振动铣削在高速条件下依然能够实现分离型断续切削加工。相比普通铣削加工，分离型的高速超声椭圆振动铣削能够获得更加微细的切屑，切削热能够被及时地带走；良好的切削条件使得刀具的后刀面磨损均匀而缓慢，从而延长刀具的使用寿命；高速超声椭圆振动铣削能够有效地提高生产效率。

关键词：超声椭圆振动铣削；高速铣削；钛合金；切屑形成；刀具磨损

中图分类号：V261

Research on the Characteristics of Chips and Tool Flank Wear in High-speed Rotary Ultrasonic Elliptical Machining for Side Milling of Ti-6Al-4V

LIU Jiajia JIANG Xinggang ZHANG Deyuan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract : For the difficult-to-cut material titanium alloy, as the cutting speed increases in the traditional milling method, the cutting force and the cutting temperature increase rapidly, which deteriorate cutting conditions and accelerate tool wear resulting in premature tool failure and poor machining quality. The ultrasonic elliptical vibration cutting technology is introduced into high-speed milling, and then the high-speed rotary ultrasonic elliptical machining for side milling (UEVM) of Ti-6Al-4V is carried out. The effects of high-speed ultrasonic elliptical vibration milling parameter matching on titanium alloy machining are studied from two aspects of chip characteristics and tool flank wear. Firstly, based on the kinematics of tool-work in high-speed ultrasonic elliptical vibration milling, the matching relationship between milling parameters and vibration parameters is derived. Then, the verification cutting tests with different parameter matching relationship are carried out by using the ultrasonic elliptical vibration milling device developed by our laboratory. The test results show that high-speed ultrasonic elliptical machining for side Milling can achieve separate-type cutting through reasonable matching of cutting parameters and vibration parameters, making it possible to apply the rotary ultrasonic elliptical vibration milling method in the high-speed range. Compared with common milling, the separate-type high-speed ultrasonic elliptical vibration milling can obtain finer chips and cutting heat is easy to be taken away; in addition, tool flank wear become more even and slowly due to better cutting condition, which can prolong the service life of milling tool and effectively increase production efficiency.

Key words : ultrasonic elliptical vibration-assisted milling ; high-speed milling ; titanium alloy ; chip formation ; tool wear

* 国家自然科学基金资助项目(51475031)。20180911 收到初稿，20190420
收到修改稿

0 前言

钛合金作为一种典型的比强度高材料被广泛用于制造现代航空航天工业结构部件。但在钛合金传统铣削加工中,随着切削速度的提升,切削力会增大,刀具温度急剧升高,产生积屑瘤,导致切削工具的快速磨损,从而降低刀具寿命和影响加工质量^[1]。为了延长刀具寿命并降低加工成本,通常用于钛合金精铣的切削速度约为 80 m/min,这极大地限制了加工效率。相比于单一方向的振动切削技术,椭圆振动切削技术具有更为彻底的“分离特性”以及刀具切出时刀-屑间摩擦力方向反转的特性,在切削过程中体现出了更显著的效果^[2-5]。为了克服这些问题,本文将近年来在难加工材料切削加工中体现出优良工艺特性的超声椭圆振动加工技术应用在了高速铣削钛合金领域,进行了微量润滑条件下的高速超声椭圆振动铣削钛合金切屑特征和刀具磨损研究。

超声椭圆振动车削已被广泛研究。CHANDRA等^[6-8]对 PCD 刀具超声椭圆振动车削硬质合金进行了较为全面的研究,研究结果显示,加工参数(切削深度、进给速度和切削速度)、刀具圆角和速比(切削速度与切削方向上的最大刀具振动速度之比)均对刀具寿命有很大的影响;适当增大刀尖圆角有利于减小再生颤振,从而导致更长的刀具寿命及更好的加工质量,然而过大的刀尖半径会减小切削角度使得切削力增大,刀具磨损加快。速比的增加会导致加工时的切削分离时间变短,切削力增大,进而加快刀具的磨损,降低刀具的使用寿命。路冬等^[9]进行了涂层硬质合金刀具椭圆超声振动车削高温合金 IN718 的刀具磨损试验研究,结果显示,相比普通车削而言超声椭圆振动车削由于具有良好的分离切削特性抑制了积屑瘤的产生,从而减缓刀具磨损,提升刀具寿命。赵海东等^[10]研究了加工参数对 PCD 刀具超声椭圆振动车削高温合金 IN718 的影响,研究指出,在一些特定的参数条件下,超声椭圆振动车削相比普通车削能够有效降低刀具磨损,从而使超声椭圆振动加工成本降低到普通加工的 66%。超声振动加工 PCD 刀具在初期的磨损形式表现为振动冲击磨损,在后期的磨损形式表现后刀面与工件间的磨料磨损。张新全等^[11]首次尝试利用 PCD 刀具代替金刚石刀具进行超声椭圆振动车削模具钢,结果显示,主轴转速相比切削深度和进给量对刀具寿命的影响更为明显,随着主轴转速的升高,刀具磨损加快。

超声椭圆振动技术在钻削领域也得到应用。北京航空航天大学 LIU 等^[12]将超声椭圆振动应用于钻削加工领域。在钻削试验过程中,刀具相对于工件进行旋转运动的同时以一定超声频进行双弯曲椭圆振动,解决了碳纤维增强材料钻削过程中刀具磨损过快和工件层状剥落等问题。北京航空航天大学 GENG 等^[13]进行了碳纤维增强材料/钛合金叠层材料的超声椭圆振动辅助扩孔试验研究,结果发现,超声椭圆振动扩孔相比于普通扩孔更能提升孔的质量,减小碳纤维增强材料孔与钛合金孔的尺寸误差,刀具的寿命也得到了提升。

近年来,椭圆振动铣削(Elliptical vibration milling method, UEVM)领域的研究很少。北京航空航天大学的姜兴刚等^[14-15]进行了低速条件下(即 $v < 2\pi af$)的超声椭圆振动铣削钛合金弱刚性件的试验研究,切削力相比普通切削时切削力降幅达 50%,零件的形位精度得到显著提高。张明亮等^[16]进一步做了高速条件下(即 $v > 2\pi af$)的超声椭圆振动铣削钛合金切削力的试验研究,研究显示,高速加工条件下的超声椭圆振动铣削依然能够有效地降低切削力。但是,高速条件下的超声椭圆振动铣削钛合金切屑特征及刀具磨损机理几未有人研究。本文以典型难加工材料钛合金 Ti-6Al-4V 作为试验材料,首先从理论上推导高速条件下椭圆振动铣削振动参数与切削参数的匹配关系,并建立不同参数匹配条件下的切削轨迹模型和基于断续切削的刀具沿垂直于刀具后刀面而指向工件方向的速度分量模型,然后通过本实验室自行研制的超声椭圆振动铣削刀柄进行高速条件下的钛合金铣削试验进行验证,研究结果表明,不同参数匹配条件下获得的切屑特征证实了推导机理的准确性,分离断续下的高速超声椭圆振动铣削能够获得更好的刀具寿命。

1 高速超声椭圆振动铣削参数匹配机理

1.1 刀尖运动轨迹

本文是将频率为 f 的超声椭圆振动附加在铣刀上并垂直于主轴回转轴线的 xoy 平面内。设定初始时刻椭圆振动的长轴与 Y 轴重合,短轴与 X 轴重合,并且振动的起始点位于长轴最大位置处,椭圆振动的方向沿顺时针方向,即与刀具回转的方向一致,其材料去除过程如图 1 所示。

图1 超声椭圆振动顺侧铣加工过程示意图

普通铣削铣刀中心的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_{OCM} = f_z Z n \\ y_{OCM} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

第 i 个刀齿的刀尖轨迹方程为

$$\begin{cases} x_{iCM} = x_{OCM} + r \cos(\theta - i\delta) \\ y_{iCM} = y_{OCM} + r \sin(\theta - i\delta) \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (2)$$

由于附加在刀具上的椭圆振动方向会随着刀具的旋转一起转动, 因此, 附加超声椭圆振动后铣刀第 i 个刀齿的刀尖运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_{iUEVM} = x_{iCM} + a \cos(2\pi f t - i\delta) \cos \theta + b \sin(2\pi f t - i\delta) \cos(\theta + \pi/2) \\ y_{iUEVM} = y_{iCM} + a \cos(2\pi f t - i\delta) \sin \theta + b \sin(2\pi f t - i\delta) \sin(\theta + \pi/2) \end{cases} \quad (3)$$

式中, a , b 分别为超声椭圆振动沿长轴、短轴方向上振动的振幅; f 为超声椭圆振动的频率; θ 为第 0 号刀齿与 X 轴之间的夹角; $(\theta - i\delta)$ 为第 i 号刀齿与 X 轴之间的夹角; δ 为铣刀两刀齿间的夹角, $\delta = 2\pi/Z$; Z 为铣刀刀齿数; r 为铣刀半径; f_z 为铣刀沿进给方向上的每齿进给量; n 为主轴回转速度。

图 2 所示为通过 Matlab 软件仿真计算得到的高速超声椭圆振动铣削刀尖运动轨迹, 其对应的加工参数为: 超声振动振幅 $a = b = 6 \mu\text{m}$, 超声振动频率 $f = 17\,880 \text{ Hz}$, 刀具进给量 $f_z = 0.015 \text{ mm/z}$, 径向切削厚度 $a_e = 0.2 \text{ mm}$, 轴向切削深度 $a_p = 5 \text{ mm}$, 图 2a 对应的主轴转速为 $n = 3\,276 \text{ r/min}$, 相邻刀齿

切削轨迹能够相交, 实现分离断续加工; 图 2b 对应的主轴转速为 $n = 3\,286 \text{ r/min}$, 相邻刀齿切削轨迹没有交点, 未能实现分离断续加工, 切削过程为连续切削。从图 2 中可以看出, 不同的参数匹配获得的加工形式不同, 只有合理的切削参数匹配关系使得相邻刀齿切削轨迹有交集, 才能够获得高速条件下的分离型超声椭圆振动铣削。

(a) 分离型高速超声椭圆振动铣削

(b) 不分离型高速超声椭圆振动铣削

图2 四刃铣刀高速超声椭圆振动铣削刀尖运动轨迹

1.2 振动周期滞后系数

在任意切削位置处建立如图 3 所示的新的直角坐标系 $X_\theta O_\theta Y_\theta$, 此时相邻两齿刀尖轨迹方程关系可表示为

$$L_p: \begin{cases} x_p = a \cos(2\pi f t_p - \pi) \\ y_p = v t_p + b \sin(2\pi f t_p - \pi) \end{cases} \quad t_p \in \left(0, \frac{1}{f}\right) \quad (4)$$

$$L_c: \begin{cases} x_c = a \cos(2\pi f t_c - \pi) + h(\theta) \\ y_c = v(t_c - K/f) + b \sin(2\pi f t_c - \pi) \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right) \quad t_c \in \left(0, \frac{1}{f}\right)$$

式中, $h(\theta)$ 为顺铣任意切削位置处相邻两振动切削轨迹平衡位置的距离, 其值等同于普通铣削在任意切削位置处的切削厚度。

$$h(\theta) = f_z \cos(\theta) \quad (6)$$

图3 高速超声椭圆振动铣削相邻两齿刀尖轨迹关系

定义 K 为当前刀齿刀尖振动加工轨迹滞后于前一刀齿刀尖振动加工轨迹的振动周期系数。

K 受频转比、进给量以及附加在刀具上的椭圆振动特性的影响。

(1) 频转比的影响 K_1 。附加在铣刀上的椭圆振动在铣刀的每一回转周期内所振动的频次定义为频转比 ω_f

$$\omega_f = 60 f / n \quad (7)$$

铣刀是多齿切削刀具，因此，在铣刀的每一回转周期内相邻两齿间分布着振动周期数 K_1 ，即前一齿因频转比滞后于前一齿的振动周期数为

$$K_1 = \omega_f / Z \quad (8)$$

(2) 进给量的影响 K_2 。超声椭圆振动铣削铣刀刀尖在一个振动周期内沿刀具回转圆周方向行进的路程记为 l_T

$$l_T = v / f = \pi r n / (30 f) \quad (9)$$

式中， v 是普通铣削过程中刀尖切削速度。进给量 f_z 在任意位置 θ 处沿刀具回转切向分量记为 $l_{\theta f_z}$

$$l_{\theta f_z} = f_z \sin \theta \quad (10)$$

因此，后一齿因进给量滞后于前一齿的振动周期数为

$$K_2 = \frac{l_{\theta f_z}}{l_T} = \frac{30 f f_z \sin \theta}{\pi r n} \quad (11)$$

(3) 附加在刀具上的椭圆振动特性影响 K_3 。

附加在铣刀上的超声椭圆振动使得在每个刀尖上的椭圆振动形态一致，而刀齿在铣刀圆周上的分布使得椭圆振动与每一个刀齿相对位置是不同的。对于等齿距的铣刀来说由椭圆振动特性引起的后一齿滞后于前一齿的振动周期数 K_3 只与刀齿数量 Z 有关。

$$K_3 = 1 / Z \quad (12)$$

对附加在垂直于刀具轴线方向平面内的超声椭圆振动铣削机理进行分析可知，后一齿滞后于前一齿的振动周期数 K 是以上三种影响线性累积作用的结果，因此， K 可表示为

$$K = k - \text{int}(k) \quad k = K_1 + K_2 + K_3 \quad (13)$$

式中， $\text{int}()$ 是向下取整运算。

从上式推导分析可以发现，相邻两齿刀尖切削轨迹在任意位置处对应的振动周期滞后系数与振动频率、主轴转速、刀齿数量、每齿进给量相关，不受振动幅值的影响。但是当振动周期滞后系数给定后(振动周期滞后系数不为整数)，振动幅值的大小决定了高速超声椭圆振动铣削能否实现分离断续切削。

K' ， K'' 分别为实现分离断续切削的振动周期延迟系数临界最小值与临界最大值。在顺铣切入位置处，相邻两刀齿切削轨迹存在交点能够保证切削过程实现分离断续加工，即

$$\begin{cases} x_p(t_p) = x_c(t_c) \\ y_p(t_p) = y_c(t_c) \\ \frac{\partial x_p}{\partial y_p} \big|_{t_p} = \frac{\partial x_c}{\partial y_c} \big|_{t_c} \end{cases} \quad t_p, t_c \in \left(0, \frac{1}{f}\right) \quad (14)$$

因此，实现分离型高速椭圆振动切削的临界条件为

$$\begin{cases} f_z \cos \theta \leq 2a \\ \frac{1}{2} - \arcsin \frac{f_z \cos \theta}{2a} \leq K \leq \frac{1}{2} + \arcsin \frac{f_z \cos \theta}{2a} \end{cases} \quad (15)$$

$$\theta = \arcsin \frac{r - a_e}{r}$$

为了验证参数匹配关系推理的准确性，将会通过试验来进行验证。

1.3 垂直于刀具后刀面方向上的动态速度分量

附加超声振动后的铣削其切削速度在切削的过

程中会随着时间的变化而不断变化。如图 4 所示建立超声振动铣削过程中工件与刀具之间的速度关系, $X'O'Y'$ 是建立在刀尖处的坐标系, $O'Y'$ 方向平行于切削刃后刀面, $O'X'$ 方向垂直于刀具后刀面而指向背离刀具后刀面。沿刀尖位置参数对时间进行求导可以得出刀尖沿 X 方向以及 Y 方向的速度分量, 则有

$$\begin{aligned} v_{xUEVM} &= \frac{\partial x_{UEVM}}{\partial t} \\ v_{yUEVM} &= \frac{\partial y_{UEVM}}{\partial t} \end{aligned} \quad (16)$$

将沿 X 方向以及 Y 方向的速度分量在动态坐标系 $X'O'Y'$ 上进行坐标转换, 则有

$$\begin{aligned} v_{x_\theta} &= v_x \cos \theta + v_y \sin \theta \\ v_{y_\theta} &= v_y \cos \theta - v_x \sin \theta \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} v_{x'} &= v_{x_\theta} \cos \alpha_0 - v_{y_\theta} \sin \alpha_0 \\ v_{y'} &= v_{x_\theta} \sin \alpha_0 + v_{y_\theta} \cos \alpha_0 \end{aligned} \quad (18)$$

式中, α_0 为刀具后角。将式(16)和式(17)代入式(18)可得超声椭圆振动铣削在坐标系 $X'O'Y'$ 上的速度分量为

$$\begin{aligned} v_{x'UEVM} &= (v_{xUEVM} \cos \theta + v_{yUEVM} \sin \theta) \cos \alpha_0 - \\ &\quad (v_{yUEVM} \cos \theta - v_{xUEVM} \sin \theta) \sin \alpha_0 \\ v_{y'UEVM} &= (v_{xUEVM} \cos \theta + v_{yUEVM} \sin \theta) \sin \alpha_0 + \\ &\quad (v_{yUEVM} \cos \theta - v_{xUEVM} \sin \theta) \cos \alpha_0 \end{aligned} \quad (19)$$

图 4 振动铣削过程中刀具与工件的相对速度关系

利用 Matlab 仿真计算可以分别得到不同参数匹配条件下的超声椭圆振动铣削刀尖位置处切削速度沿垂直于刀具后刀面方向上的速度分量, 图 5 是考虑刀具-工件有效参与铣削时的参数匹配对超声椭圆振动铣削刀尖位置处切削速度沿垂直于刀具后刀面方向上的速度分量的影响, 切削过程中当刀具与工件分离时, 设定切削速度沿垂直于刀具后刀面方向上的速度分量值为零。刀尖沿 $O'X'$ 方向上的速度分量为正代表刀具后刀面靠近已加工表面, 后刀面会受到冲击作用。其他的参数: 铣刀半径 $r=6$ mm, 每齿进给量 $f_z=0.015$ mm/z, 径向切削深度 $a_e=0.2$ mm, 超声振动的频率为 $f=17\ 880$ Hz, 椭圆超声振动的振幅为 $a=b=6$ μ m。图 5a 中所示是分离型超声椭圆振动铣削过程中切削速度在垂直于刀具后刀面方向上分量, 图 5b 中所示是不分离型超声椭圆振动铣削过程中切削速度在垂直于刀具后刀面方向上分量。对比发现, 不分离型超声椭圆振动铣削垂直于刀具后刀面方向上切削速度分量出现正值的可能性较大, 说明切削过程中刀具后刀面承受的冲击作用较大。合理的参数匹配能够使得刀具后刀面在切削加工过程中出现冲击作用的可能性减小。

图 5 参数匹配对超声椭圆振动铣削垂直于刀具后刀面方向上切削速度分量的影响

2 试验设备和试验条件

利用本实验室自行研制的超声椭圆振动铣削刀柄在四轴立式加工中心 BV100 上进行了顺侧铣试验，试验平台如图 6 所示。超声椭圆振动铣削刀柄装置是由超声椭圆振动换能器、变幅杆和硬质合金铣刀、BT50 刀柄集成。试验条件和主要加工参数列为表 1 及表 2 所示。加工前需要将工件待试验表面进行磨削出基准平面。

图 6 试验平台

表 1 试验条件和加工参数

刀具和工件材料		加工参数	
刀具类型	四刃立铣刀	振动频率/ Hz	17 880
刀具涂层	TiAlN 涂层	振动幅值/ μm	$a=6.2$
			$b=6$
刀具直径/mm	12	轴向切深/ mm	5
刀具螺旋角/($^{\circ}$)	38	径向切深/mm	0.2 mm
刀具前角/($^{\circ}$)	10	切削速度/(m/min)	~ 120
刀具后角/($^{\circ}$)	10	进给速度/(mm/z)	0.015
工件材料	Ti-6Al-4V	冷却液	微量润滑(MQL)
机床	BV100		

表 2 铣削对应主轴转速

振动周期滞后系数 K	0	0.25	1.00
切削形式	普通切削	UEVM(分离型)	UEVM(不分离型)
主轴转速/(r/min)	3 276	3 276	3 286

试验所用的其他测量设备及用途。

(1) 超声振幅设定：采用 KEYENCELK-G5000 非接触式激光测量系统对超声铣削刀柄中的振幅进行测量，然后通过调节输入电压值将振幅设定为理想值，如图 7 所示。

(2) 刀具后刀面磨损测量：通过便携式显微镜 (Dino-lite)观察刀具后刀面磨损情况，如图 6 所示。

(3) 切屑截面形貌：试验后将收集到的切屑进行镶样，然后对镶样中的切屑截面进行机械研磨和抛光，最后通过激光显微镜(VKX200K ,KEYENCE)观察切屑截面形貌以表征铣削参数对切削加工的影响。

图 7 超声振幅测量平台

3 试验结果与讨论

3.1 切屑尺寸及形貌

为了验证高速超声椭圆振动切削参数匹配机理的准确性以及研究高速超声椭圆振动铣削对切削加工的影响，将不同切削参数加工过程中的切屑进行收集，从宏观和微观两个方面进行对比研究。图 8 是普通铣削过程中获得的切屑，从宏观上看普通铣削的切屑一端呈现卷曲(图 8a)。从图 8b 中的普通铣削切屑截面形貌可以看出，普通顺侧铣削中每一刀齿从切入到切出过程得到一条切屑，切屑长度近似等于刀具切削轨迹长度，所对应的切屑厚度由厚变薄。图 9 是分离型高速超声椭圆振动铣削切屑，宏观上看其切屑呈现针状，宽度(图 9a)明显窄于普通铣削切屑(图 8a)。图 9b 中是分离型高速超声椭圆振

动铣削切屑截面形貌,与理论切屑截面形貌一致(图2a中刀齿切削轨迹包络线),其宽度值在几十微米左右,验证了高速超声椭圆振动铣削实现分离断续切削的可行性。理论分析中因附加超声振动后刀齿切削轨迹变长,不分离型椭圆振动铣削的切屑宽度应该大于普通铣削的切屑宽度。然而,图10中的不分离型高速超声椭圆振动铣削切屑从宏观上看其宽度要小于普通铣削切屑宽度。图5b中附加超声椭圆振动后的刀具后刀面相对于已加工表面有周期性的负方向速度分量,也就是说刀具周期性的远离已加工表面而向切屑靠近,周期性的扰动使得切屑断裂,形成相对较短的切屑。图10b对应的不分离型高速超声椭圆振动铣削切屑截面上的锯齿形貌可以解释其断屑机理是受到超声扰动的结果。

(a) 普通铣削切屑

(b) 普通铣削切屑截面形貌

图8 普通铣削切屑及其截面形貌

(a) UEVM 切屑 (分离型)

(b) UEVM 切屑截面形貌 (分离型)

图9 超声椭圆振动铣削(分离型)切屑及其截面形貌

(a) UEVM 切屑 (不分离型)

(b) UEVM 切屑截面形貌 (不分离型)

图10 超声椭圆振动铣削(不分离型)切屑及其截面形貌

3.2 刀具后刀面磨损

为了研究不同加工方式对刀具磨损形态的影响,对应每一组加工参数条件分别采用一把新刀进行切削试验,切削长度选定为10 m,试验后采用显微镜对刀具后刀面磨损情况进行观察。图11所示为对应不同加工条件下的刀具后刀面磨损情况。

从图11a中可以看出刀具后刀面上存在均匀的机械磨损,在靠近刀刃的某个部位存在一处比较严重的机械磨损带,即切削刃的微小崩刃,这是由于普通铣削过程中一方面刀具后刀面与已加工表面处于持续接触状态,冷却液不能及时充分的对刀具进行冷却,导致切削热累积,加快了刀具的磨损;另

一方面则是产生的切屑不能够及时排掉,切屑对刀具切削刃有力的作用,并且随着切削热的累积产生粘结磨损,共同作用导致普通铣削过程中刀具发生微崩刃现象。

(a) 普通铣削刀具后刀面磨损

(b) 高速超声椭圆振动铣削(分离型)刀具后刀面磨损

(c) 高速超声椭圆振动铣削(不分离型)刀具后刀面磨损

图 11 不同加工方式对应的刀具后刀面磨损

图 11b 是分离型超声椭圆振动铣削刀具后刀面磨损情况,可以看出后刀面磨损均匀,这是由于合理的参数匹配使得高速超声椭圆振动铣削在切削的过程中仍然能够实现分离型断续切削,微细的切屑能够及时的被排出并将切削热带走,在刀具与工件在分离的过程中有利于切削液进入切削区对刀具及时冷却润滑,有效地避免了积屑瘤的产生,使刀具磨损变得均匀规整。

图 11c 中显示了明显的粘结磨损以及切削刃崩刃破损是不分离型超声椭圆振动铣削后刀面磨损主要形式。这是由于不分离型超声振动铣削过程中,刀具沿垂直于后刀面方向 $O'X'$ 上有周期性的正向速

度分量(图 5b),使得已加工表面与刀具后刀面间存在周期性的接触冲击,导致刀具后刀面与已加工表面间存在严重的熨压作用。这种熨压作用一方面会导致摩擦作用显著增大,热量累积,后刀面在一定的压力和温度作用下产生塑性变形,形成粘结点,这些粘结点又因为刀具的继续运行而破裂,使得后刀面上的材料被带走,形成粘结磨损;另一方面会使得切削刃上受到一个交变应力,过大的应力超过切削刃强度允许值会使得刀具切削刃崩刃破损。

4 结论

本文通过对高速超声椭圆振动铣削过程中刀尖-工件运动关系的分析推导了超声椭圆振动铣削参数和振动参数间的匹配关系,进而建立了高速超声椭圆振动铣削切削轨迹模型以及考虑刀具-工件有效参与铣削时的刀具沿垂直于刀具后刀面方向上的动态速度分量模型,分析并试验验证了参数匹配对加工过程影响显著。

(1) 通过试验验证高速超声椭圆振动铣削在合理的参数匹配条件下能够实现分离断续切削,获得更为细小的切屑,截面形貌以及尺寸较普通加工发生明显变化。

(2) 分离型高速超声椭圆振动切削刀具后刀面磨损主要以机械磨损为主,磨损均匀且缓慢;不分离型高速超声椭圆振动切削因严重的后刀面冲击、熨压作用导致刀具后刀面磨损为严重的粘结磨损以及刀具崩刃破损。

因此,采用高速超声椭圆振动铣削方式进行加工时必须合理的选择加工参数,使得在切削过程中能够实现分离断续加工,获得良好的断屑及排屑效果,同时能够保证刀具良好的切削能力。

参 考 文 献

- [1] LI A, ZHAO J, LUO H, et al. Progressive tool failure in high-speed dry milling of Ti-6Al-4V alloy with coated carbide tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58: 465-478.
- [2] MORIWAKI T, SHAMOTO E. Ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44: 31-34.
- [3] MA C, MA J, SHAMOTO E, et al. Analysis of regenerative chatter suppression with adding the ultrasonic elliptical vibration on the cutting tool[J]. Precision Engineering, 2011, 35: 329-338.

- [4] 马春翔, 社本英二, 森肋俊道. 超声波椭圆振动切削提高加工系统稳定性的研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 752-756.
- MA Chunxiang, SHAMOTO E, MORIWAKI T. Ultrasonic elliptical vibration cutting improves the stability of the processing system[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(6): 752-756.
- [5] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study on elliptical vibration cutting[J]. Ann. Cirp., 1994, 43: 35-38.
- [6] NATH C, RAHMAN M, NEO K S. A study on ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4459-4464.
- [7] NATH C, RAHMAN M, NEO K S. A study on the effect of tool nose radius in ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 5830-5836.
- [8] NATH C, RAHMAN M, NEO K S. Machinability study of tungsten carbide using PCD tools under ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49: 1089-1095.
- [9] LU D, WANG Q, WU Y, et al. Fundamental turning characteristics of inconel 718 by applying ultrasonic elliptical vibration on the base plane[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2015, 30: 1010-1017.
- [10] ZHAO Haidong, ZOU Ping, MA Wenbin, et al. A Study on ultrasonic elliptical vibration cutting of inconel 718[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016: 1-11.
- [11] ZHANG X, KUMAR A S, RAHMAN M, et al. Experimental study on ultrasonic elliptical vibration cutting of hardened steel using PCD tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 1701-1709.
- [12] LIU J, ZHANG D Y, QIN L G, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 53: 141-150.
- [13] GENG D X, ZHANG D Y, LI Z, et al. Feasibility study of ultrasonic elliptical vibration-assisted reaming of carbon fiber reinforced plastics/titanium alloy stacks[J]. Ultrasonics, 2017, 75: 80-90.
- [14] 姜兴刚, 梁海彤, 卢慧敏, 等. 钛合金薄壁件超声椭圆振动铣削研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1891-1897.
- JIANG Xinggang, LIANG Haitong, LU Huimin, et al. Investigation of ultrasonic elliptical vibration milling of thin-walled titanium alloy parts[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(11): 1891-1897.
- [15] 辛文龙, 刘佳佳, 姜兴刚, 等. 钛合金薄壁件腹板超声椭圆振动铣削精度研究[C]//全国特种加工学术会议 2015.
- XING Wenlong, LIU Jiajia, JIANG Xinggang, et al. Research on ultrasonic elliptical vibration milling precision of titanium alloy thin-wall parts[C]// National Special Processing Academic Conference, 2015.
- [16] 张明亮, 姜兴刚, 刘佳佳, 等. 钛合金超声椭圆振动铣削参数对切削力的影响[J]. 电加工与模具, 2017(6): 39-41.
- ZHANG Mingliang, JIANG Xinggang, LIU Jiajia, et al. Influence of ultrasonic elliptical vibration milling parameters on the cutting force of titanium alloy[J]. Electrical Processing and Molding, 2017(6): 39-41.

作者简介: 刘佳佳, 女, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超声振动铣削。

E-mail: liujiajia_0930@163.com

张德远(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为生物加工、振动切削、MEMS 加工。

E-mail: zhangdy@buaa.edu.cn