

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.005

椭圆振动车削 TC4 的切屑形态和切削力研究

李莹, 张敏良, 董慧婷, 陈佳鑫, 刘晓峰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为探究超声椭圆振动车削钛合金 TC4 过程中振幅、频率和刀尖圆角半径对切屑和切削力的影响,课题组通过建立有限元模型,将常规切削(CC)和椭圆振动切削(EVC)钛合金 TC4 过程进行对比研究。首先对所用超声椭圆振动的运动特性进行推导,确定刀屑接触率;其次通过理论分析,将切屑和切削力相结合,建立切削力模型;最后分别研究不同频率、振幅对超声椭圆振动切削稳定过程时的切屑形态、切削力和切削温度的影响。研究表明:椭圆振动切削过程刀具和切屑间存在周期性地分离,可以用刀屑接触率 t_s 表示;在一定的范围内,增加振动幅值、振动频率以及刀尖圆角半径可以减小切屑厚度,降低切削力;EVC 方式下可以选择合理的参数来降低切削力,并可以通过测量宏观切屑厚度来预测切削力,更好地指导生产加工。

关键词:椭圆振动车削;切削力模型;振动参数;切屑形态;切削力

中图分类号: TG506.5; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2020)05-0024-09

Study on Chip Morphology and Cutting Force in Elliptical Vibration Turning TC4

LI Ying, ZHANG Minliang, DONG Huiting, CHEN Jiaxin, LIU Xiaofeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to explore the influence of amplitude, frequency and fillet radius on chip and cutting force during ultrasonic elliptical vibration cutting (EVC) of titanium alloy TC4, a finite element model was established to compare the conventional cutting (CC) and elliptical vibration cutting (EVC) of titanium alloy TC4. Firstly, the motion characteristics of ultrasonic elliptical vibration in this study were deduced to determine the chip contact rate. Secondly, the cutting force model was established by combining chip and cutting force through theoretical analysis. Finally, the effects of different frequencies, amplitudes and fillet radius on chip morphology, cutting force and cutting temperature during cutting stability were studied respectively. The research shows that there is periodic chip separation in elliptical vibration cutting process, which can be expressed by chip contact ratio t_s ; In a certain range, the chip thickness and cutting force can be reduced by increasing vibration amplitude, vibration frequency and fillet radius. Under EVC mode, reasonable parameters can be selected to reduce cutting force, and cutting force can be predicted by measuring macroscopic chip thickness to guide the production and processing better.

Keywords: EVC (elliptic vibration cutting); cutting force model; vibration parameters; chip morphology; cutting force

钛合金是一种比强度大、热强度高且抗蚀性好的金属材料,在航空航天领域已有广泛的应用。此外,在船舶、化工、能源、汽车及医疗等民用领域的应用量呈现逐年上涨的趋势^[1]。在传统切削加工过程中,钛合金材料的加工效率偏低,工件加工表面质量难以达到加工要求且加工质量缺乏保证,同时切削钛合金过程

中,散热慢,刀具切屑间有粘连易导致刀具磨损,因此如何对钛合金进行高效车削加工一直是要解决的问题^[2]。实践证明,用超声椭圆振动切削在解决钛合金材料切削加工等方面具有独特的优势。

近年来,超声振动加工作为一种新型加工方法已经被许多专家学者应用到钛合金切削加工中并取得了

收稿日期:2020-04-26;修回日期:2020-07-21

第一作者简介:李莹(1996),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为高效精密加工。E-mail:1740493501@qq.com

丰硕的成果。Shamoto 等^[3]提出 EVC (elliptic vibration cutting) 技术,并通过对比常规切削 CC (conventional cutting) 与 EVC 切削的切屑厚度,得到了 EVC 能够减小切屑厚度的结论,但并没有对 EVC 切屑展开进一步深入研究。Dow 等^[4]在对黄铜进行切削实验后发现,利用 EVC 方式加工后的黄铜切屑连续性更好,通过进一步比较,认为连续的切屑能够使工件表面质量更好。Kim 等^[5]切削黄铜试验时发现随着振幅的增大,切屑的曲率增加,切屑越容易断裂。Negishi^[6]在进行 EVC 切屑研究时将连续的切削过程离散化,采用静态方式研究 EVC 过程,定量分析描述了 EVC 切屑的几何特征;研究发现当切削深度大于椭圆振动纵向振幅时将产生连续切屑,反之不连续,从而明确地给出了切屑是否连续的条件。于海鹏^[7]利用有限元法分别对铝、黄铜、镍合金和不锈钢 4 种材料做了仿真实验,研究了在相同加工情况下不同材料所产生的切屑形态,发现不锈钢、铝和黄铜在 EVC 状态下产生的切屑形状相似,并且切削过程中在前刀面上并未产生积屑瘤。赵邵昕^[8]对切屑成形过程进行建模,重点分析了切深比小于 1 时的切屑成形过程,并对硬铝 2A12 和黄铜进行干式 EVC 切削进行验证;切深比小于 1 时,EVC 方式下切屑断续流出,类似于负前角铣削。管亮^[9]按照不同的切深比对 EVC 切削时不同平面内的切屑进行几何特征建模,确定周期内的切屑体积;并进一步探究了横向振幅和纵向振幅对切屑和切削力的影响,发现不同切深比下振幅对切削力和切屑厚度的影响不同。于金有^[10]对单向超声振动下高锰钢的切削进行研究,高锰钢超声波振动切削的切屑为 C 型屑,而高锰钢普通切削的切屑为发条屑,验证了振动切削更容易断屑。

目前,针对 EVC 车削钛合金主要是单方面进行切削力和切屑的研究,将切屑和切削力相结合的研究相对较少。课题组通过探究 EVC 条件下切削 TC4 钛合金时的切屑形态和切削力,将椭圆振动切削和常规切削的切屑和切削力进行比较,验证 EVC 切削难加工材料时更具优越性;进一步利用切屑的几何参数建立 EVC 条件下的切削力模型,利用有限元软件进行仿真,验证切削力模型的正确性,为实际生产加工提供支持。

1 超声椭圆振动车削运动学特性

超声椭圆振动车削加工是在现有的普通车削加工的基础上,通过超声设备在刀具上施加同频率低振幅并且具有一定相位差的周期性超声激励,使切削过程中的刀尖运动轨迹变成椭圆形,实现椭圆振动切削,超

声椭圆振动刀尖运动示意图如图 1 所示。

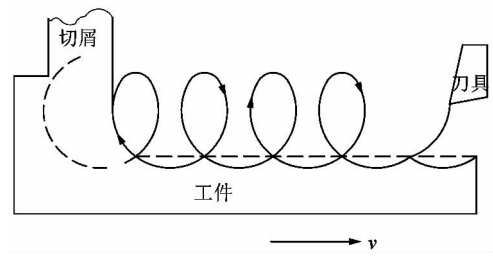


图 1 EVC 下刀尖运动轨迹图

Figure 1 Movement trace diagram of tool tip under EVC

椭圆振动切削过程中振动呈正弦规律,超声振动车削过程中 2 个方向上的振动位移方程为:

$$X = A_x \sin(2\pi f_x t + \frac{\pi\varphi_x}{180}); \quad (1)$$

$$Y = A_y \sin(2\pi f_y t + \frac{\pi\varphi_y}{180}). \quad (2)$$

式中: A_x, A_y 为 X, Y 方向的振幅; f_x, f_y 为 X, Y 方向施加的振动频率; t 为时间, s; φ_x, φ_y 为 X, Y 方向的初相位角, ($^\circ$).

刀具相对工件运动,刀尖的运动方程可表示为:

$$X(t) = A_x \sin(2\pi f_x t + \frac{\pi\varphi_x}{180}) + vt; \quad (3)$$

$$Y(t) = A_y \sin(2\pi f_y t + \frac{\pi\varphi_y}{180}). \quad (4)$$

切削过程中刀尖在 X 方向和 Y 方向的瞬时速度为:

$$V_x(t) = 2\pi f_x A_x \cos(2\pi f_x t + \frac{\pi\varphi_x}{180}) + v; \quad (5)$$

$$V_y(t) = 2\pi f_y A_y \cos(2\pi f_y t + \frac{\pi\varphi_y}{180}). \quad (6)$$

式中: $V_x(t), V_y(t)$ 分别为 X 方向和 Y 方向的瞬时速度。

为了实现切削过程中所加的振动运动轨迹以 x, y 为长短轴的标准椭圆形状,取 φ_x 和 φ_y 分别为 -180° 和 -90° 。因此刀尖的运动方程可简化为:

$$X(t) = A_x \sin(2\pi f_x t) + vt; \quad (7)$$

$$Y(t) = A_y \cos(2\pi f_y t). \quad (8)$$

2 椭圆超声振动切削模型

2.1 刀屑分离模型

超声椭圆振动车削过程中刀屑之间是断续接触的,具有刀屑分离特性。因为在刀具上施加的超声振动具有周期性,因此 EVC 切削过程中刀屑的分离也具

有一定周期性。EVC 切削过程示意图如图 2 所示。

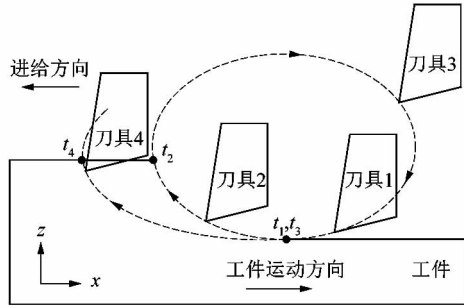


图 2 EVC 切削过程示意图

Figure 2 Schematic diagram of EVC cutting process

图 2 中表示的是切削过程中连续的 2 个周期： $t_1 \sim t_2$ 为前一周期的刀屑接触时间； $t_2 \sim t_3$ 为前一周期刀屑分离时间； $t_3 \sim t_4$ 为当前周期刀屑接触的时间。

$$\left. \begin{aligned} X(t_4) - X(t_2) &= vT; \\ X(t_3) - X(t_1) &= 0; \\ Y(t_4) - Y(t_2) &= 0; \\ Y(t_3) - Y(t_1) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

T 为 EVC 切削的一个周期。通过式(9)可以求出 4 个时间节点,并且可求出刀屑接触时间在一个周期中的占比——刀屑接触率 t_s 。

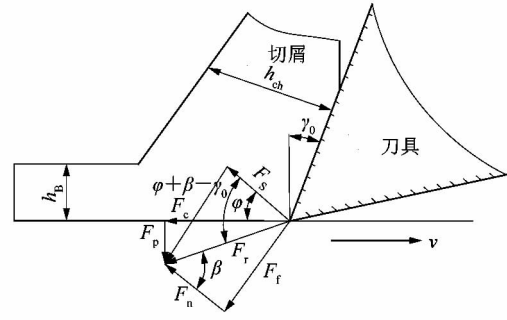
$$t_s = \frac{t_4 - t_3}{T}. \quad (10)$$

超声椭圆振动切削初始阶段,在 y 方向上切削速度较低,小于切屑流出速度,所以刀具前刀面与切屑之间的摩擦力方向与切屑流出的方向相反,与常规切削下摩擦力情况一致,阻碍切屑的流出;随着切削过程的持续进行,当 y 方向的切削速度超过切屑流出速度,此时刀具前刀面与切屑之间的摩擦力方向会发生“反转”,与切屑流出方向相同,促进切屑的流出。

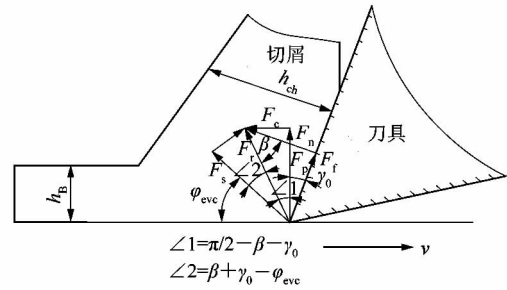
2.2 椭圆超声振动切削力模型

设摩擦反转前剪切角为 φ_c ,摩擦反转后剪切角为 φ_{evc} 。对摩擦力翻转前后的切屑进行受力分析,如图 3 所示。

图 3 中 F_n 为前刀面上的法向力; F_f 为前刀面与切屑之间的摩擦力; F_r 为 F_n 和 F_f 的合力; Φ 是剪切角; γ_0 为刀具前角; F_n 与 F_r 之间的夹角为摩擦角 β ; F_c 是切削运动方向上的切削分力; F_p 是和切削运动方向垂直的切削分力; F_s 为剪切面上的剪应力。



(a) EVC 摩擦力翻转前切削力



(b) EVC 摩擦力翻转后切削力

图 3 EVC 摩擦力翻转前后切削力示意图

Figure 3 Schematic diagram of cutting force before and after EVC friction force overturning

从图 3 的受力分析,可以将摩擦力反转前后的主切削力 F_c, F_c^* 分别表示为^[11]:

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \frac{\tau A_d \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \gamma_0)}, \varphi = \varphi_c; \\ F_c^* &= \frac{\tau A_d \cos(\beta + \gamma_0)}{\sin \varphi \cos(\beta + \gamma_0 + \varphi)}, \varphi = \varphi_{evc}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: A_d 为切削层的剖面积, τ 为剪切面上的剪应力。

根据材料力学平面应力状态理论,主应力方向与最大剪应力方向的夹角应为 45° ,即 F_r 与 F_s 之间的夹角为 45° 。所以:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_c + \beta - \gamma_0 &= \frac{\pi}{4}; \\ \beta + \gamma_0 - \varphi_{evc} &= \frac{\pi}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)中,可以得:

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \tau A_d (\cot \varphi_c + 1); \\ F_c^* &= \tau A_d (\cot \varphi_{evc} - 1). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

切屑的变形系数 δ 可以通过剪切角表示:

$$\delta = \frac{h_{ch}}{h_b} = \frac{\cos(\varphi - \gamma_0)}{\sin \varphi}. \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),整理得:

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \tau A_d \left(\frac{\delta - \sin \gamma_0}{\cos \gamma_0} + 1 \right); \\ F_c^* &= \tau A_d \left(\frac{\delta - \sin \gamma_0}{\cos \gamma_0} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

文献中切屑的应力公式^[12]为

$$\tau = \frac{F_t \cos [\varphi + \tan^{-1}(F_c/F_p)]}{b(h_B/\sin \varphi)} \quad (16)$$

式中 b 为切削层公称宽度。

从式(13)~(16)可知,主切削力受刀具前角、剪切角、摩擦角和切削深度等多个因素的影响。同时我们经过分析可知,刀具的剪切角,切屑的厚度与切削力有着密切的关系。当刀具和工件材料选定后,在无法准确测量剪切角和摩擦角的前提下,我们可以将切屑的厚度作为自变量,其他项作为切削力因子,根据上述理论分析,将切屑厚度与切削力联系起来,通过测量切屑的厚度和测量切削力,确定材料的剪切角等参数,可以在实际生产加工中更好地预测切削力。

3 椭圆超声振动切削有限元仿真

课题组采用 Third Wave Advantedge 有限元仿真软件建立硬质合金刀具切削 TC4 钛合金椭圆振动切削模型,模拟椭圆超声振动切削钛合金加工过程,进行切屑形态对比,切削力单因素仿真试验。

3.1 工件材料本构模型

切削过程是一个非线性的物理过程,伴随着切削中高温、高压以及材料的去除等,切削层中的应变率及温度变化强烈且不均匀,综合考虑应变、应变率以及热硬化等因素,并且由于 J-C (Johnson-Cook) 本构在描述被切削材料高应变率下的热粘塑性变形行为效果很好,所以本模型中选择 J-C 本构作为切削过程中工件材料的本构模型^[13]。J-C 本构模型为

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (17)$$

式中: A , B 和 n 为应变相关系数; c 和 ε_0 为应变率相关系数; T_r 和 T_m 分别为室温和材料熔点; m 为材料热软化系数。

钛合金 TC4 具体材料本构参数如表 1 所示^[14]。

表 3 常规切削和 EVC 切削的具体切削条件

Table 3 Specific cutting conditions for conventional and EVC cutting

切削方式	切削深度 a_p/mm	切削速度 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	刀尖圆角半径 r/mm				振动频率 f/kHz			切向幅值 $A_x/\mu\text{m}$				纵向幅值 $A_y/\mu\text{m}$
常规	0.1	10	0.01	0.02	0.03	0.04								
EVC							20	25	30	2	3	4	5	1

表 1 Johnson-Cook 材料参数

Table 1 Johnson-Cook material parameters

A/MPa	B/MPa	c	n	m	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_r/^\circ\text{C}$	$\dot{\varepsilon}$
875	793	0.01	0.386	0.71	1 680	20	1

3.2 材料失效准则

由于单元的破坏断裂使材料分离形成切屑和加工面,因此要定义切削单元的失效准则。J-C 损伤模型中的失效参数可以由式(18)获得:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^{-p}}{\varepsilon^{-pf}} \quad (18)$$

式中: $\Delta \varepsilon^{-p}$ 为材料积分点处等效塑性应变增量, ε^{-pf} 为材料失效应变。

失效应变可以由可由式(19)求得:

$$\varepsilon^{-pf} = (d_1 + d_2 \exp d_3 \sigma^*) \left[1 + d_4 \ln \frac{\varepsilon^{-p}}{\dot{\varepsilon}} \right] \cdot \left[1 - d_5 \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (19)$$

式中: d_1, d_2, d_3, d_4 和 d_5 为 TC4 材料的损伤参数^[15]。

钛合金 TC4 的损伤参数如表 2 所示。

表 2 钛合金 TC4 的 J-C 损伤模型参数

Table 2 J-C Damage Model Parameters of Titanium Alloy TC4

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
-0.09	0.25	-0.50	0.001 4	3.87

3.3 切削条件的选择

本节中,将介绍常规车削钛合金和超声椭圆振动车削钛合金的条件。切削采用干切削加工方式。工件长度为 5 mm,高度为 2 mm。为更好地比较常规车削和椭圆超声振动车削,本实验采用单因素试验法。刀具的前角为 5° ,后角为 10° ;刀尖圆角半径分别取 0.01,0.02,0.03 和 0.04 mm 进行比较,振幅只考虑了 X 方向振幅的变化, Y 方向的振幅保持恒定,为 1 μm ; X 方向的振幅分别取 2,3,4 和 5 μm 。振动的 2 个方向采用相同的振动频率,频率分别取 20,25 和 30 kHz 共 3 组。表 3 为常规切削和 EVC 切削的具体切削条件(切削速度满足 $v < 2\pi A f_x$)。

4 结果与分析

课题组选取 EVC 车削和常规车削的仿真过程中某一时刻的切屑形态图像以及主切削力和推向力的图像,当研究一因素对切削的影响时,控制其他因素保持不变。

4.1 常规切削和 EVC 切削的切屑形态对比

4.1.1 振动幅值对切屑形态的影响

切削条件采用切削速度 10 m/min,刀尖圆角半径为 0.02 mm, Y 方向振幅设定为 1 μm ,振动频率采用 20 kHz,进行超声椭圆振动车削钛合金的仿真。选择切削长度为 3 mm 时的切屑形态进行对比分析,如图 4 所示。

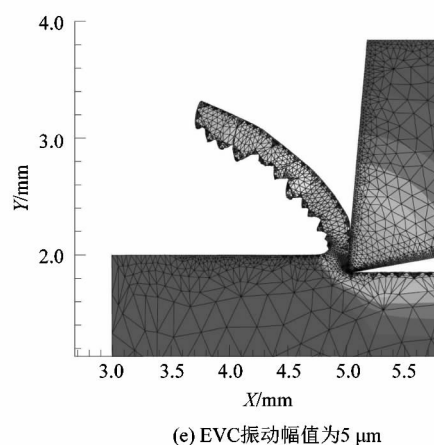
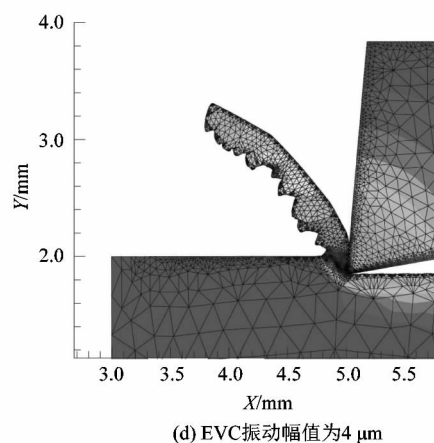
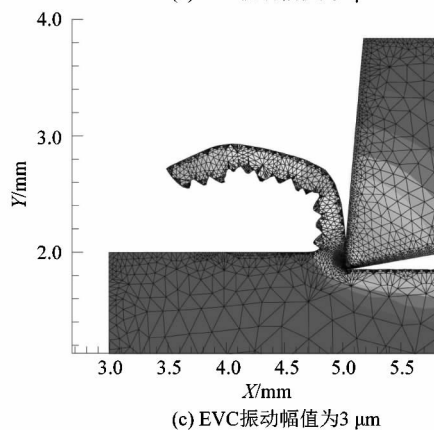
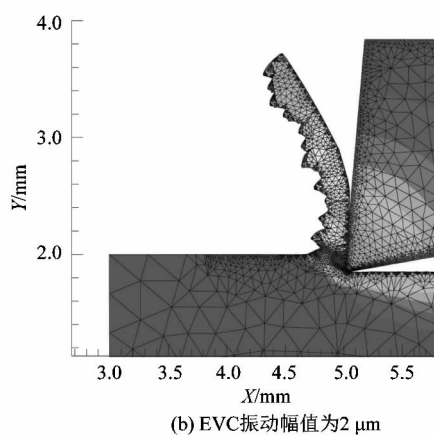
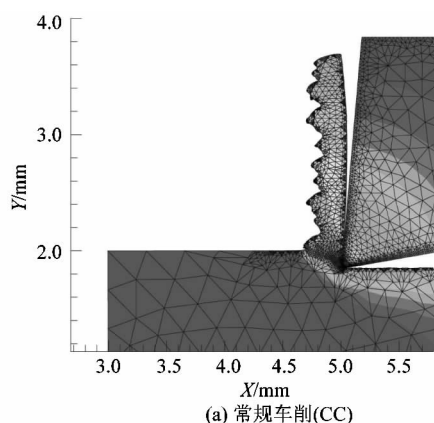


图4 CC与EVC在不同振幅下的切屑形态

Figure 4 Chip morphology of CC and EVC at different amplitudes

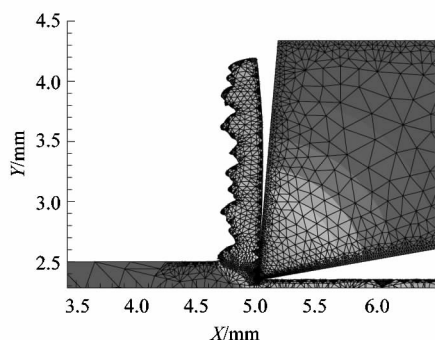
从图4的仿真结果可以看出,与常规切削相比,EVC方式能增加切屑的弯曲程度,增大刀屑之间的角度;钛合金切屑的锯齿数量增加,锯齿化程度增加,切屑的厚度有变薄的趋势。同时,在所选定的幅值变化范围内,随着幅值的增大,刀屑之间的夹角也随之变大,这有利于刀屑的分离以及切削热的排出。此外,相比于振幅为4和5 μm ,振幅为3 μm 时切屑的弯曲效果最好,更有利于断屑。

4.1.2 振动频率对切屑形态的影响

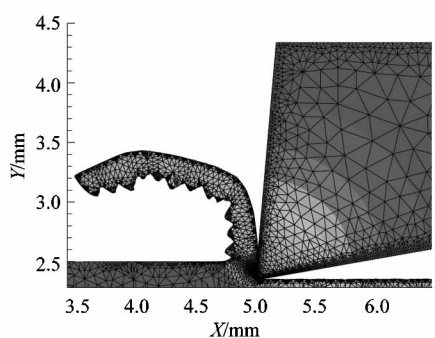
切削速度为 10 m/min,刀尖圆角半径为 0.02 mm,通过上一节得出的结果,椭圆超声振动的 X 方向和 Y 方向的分别设定为 3 μm 和 1 μm 进行仿真,选取切削过程中切削长度为 3 mm 处的切屑形态,如图 5 所示。

从图5中可以看到,与常规切削相比,EVC切削钛合金时切屑更容易弯曲,切屑的厚度也有所减小,也就意味着 EVC 切削更有利于切屑的折断。同时还可

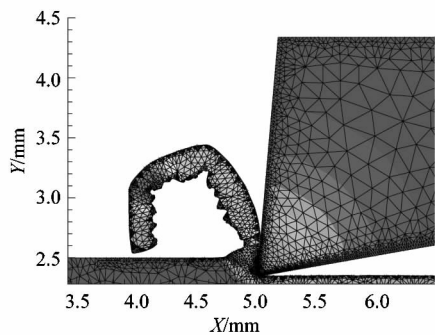
以看到,在选择的频率范围内随着频率的增加,EVC过程中切屑弯曲程度越大,越有利于断屑。



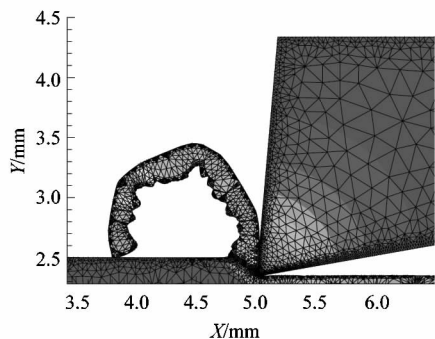
(a) 常规车削(CC)



(b) EVC振动频率为20 kHz



(c) EVC振动频率为25 kHz



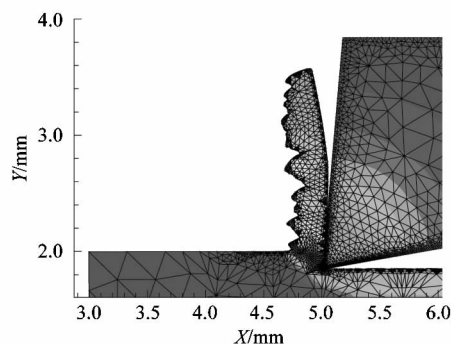
(d) EVC振动频率为30 kHz

图5 CC与EVC在不同频率下的切屑形态

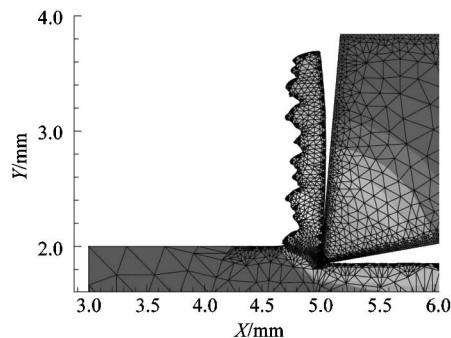
Figure 5 Chip morphology of CC and EVC at different frequencies

4.1.3 EVC方式下刀尖圆角半径对切屑的影响

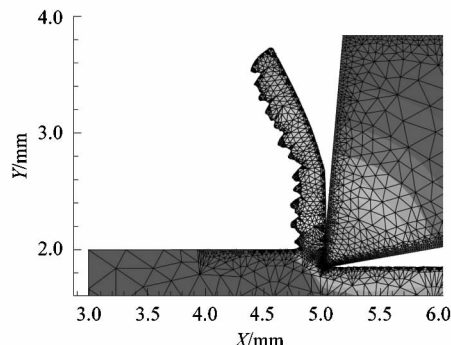
为了更好地比较常规切削和EVC方式刀尖圆角半径对切屑的影响,首先进行了常规切削钛合金的有限元仿真,并选取切削长度为3 mm时的切屑形态,探究刀尖圆角半径对切屑的影响,如图6所示。从常规切削可以看出,随着刀尖圆角半径的增大,切屑有弯曲程度增大的趋势,但趋势不明显。相同条件下,EVC方式的切屑如图7所示。与常规切削相比,EVC方式下切屑随着刀尖圆角半径的增大,切屑弯曲幅度更大。同时随着刀尖圆角半径的增加,刀具底部与切屑底部接触面积增大,这会在一定程度上降低刀具的寿命,应该尽量避免出现此类情况。在所选刀尖圆角半径参数范围内,刀尖圆角半径为0.02 mm时,刀尖与切屑底部接触面积最小。结合图6和图7,再次验证了EVC方式下切屑形态更易弯曲,更有利于切屑的折断。



(a) 刀尖半径为0.01 mm



(b) 刀尖半径为0.02 mm



(c) 刀尖半径为0.03 mm

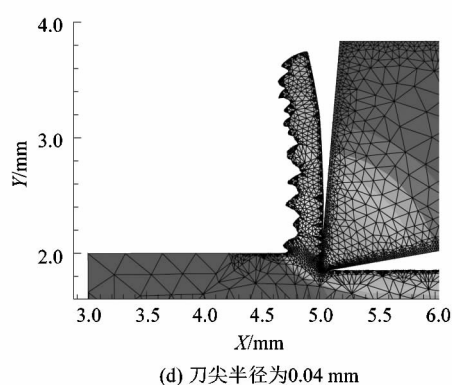


图6 常规切削下不同刀尖半径的切屑形态
Figure 6 Chip morphology with different tip radii under conventional cutting

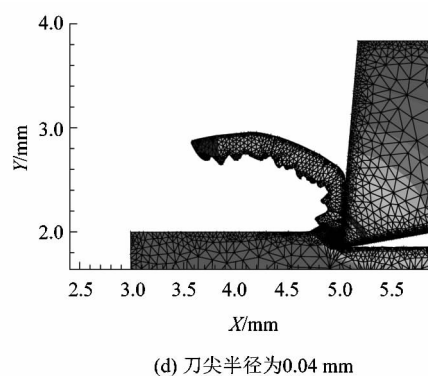


图7 EVC方式下不同刀尖圆角半径的切屑形态
Figure 7 Chip morphology with different fillet radii under EVC

4.2 EVC方式下切削力和切削温度的分析

4.2.1 振动幅值对切削力、切削温度的影响

通过对常规切削和EVC方式进行仿真,选取切削稳态时的切削力,利用求取平均值的方法得到稳定状态下切削的力;为方便作图,将常规切削视为振幅为 $0\ \mu\text{m}$,得到图8所示的切削力和刀具峰值温度。我们可以清楚地看到,EVC方式下2个方向的切削力均低于常规时的切削力,主切削力约降低62%,推向力最大降低约为73%。EVC方式下同样也有利于切削温度的降低,约为常规切削时的90%。EVC方式下能够降低切削力和切削温度,是因为EVC方式下刀具和工件周期性地分离,避免了常规切削中刀具和切屑始终接触带来的应力持续集中和热量的持续积累,在很大程度上给刀具提供了缓冲。

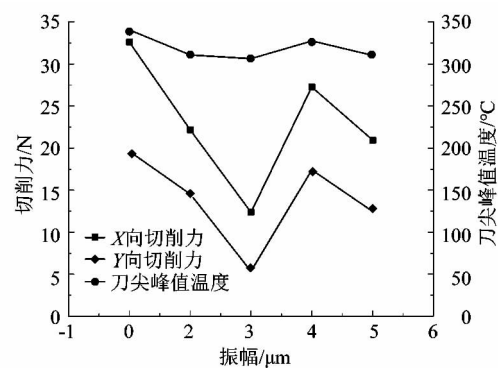
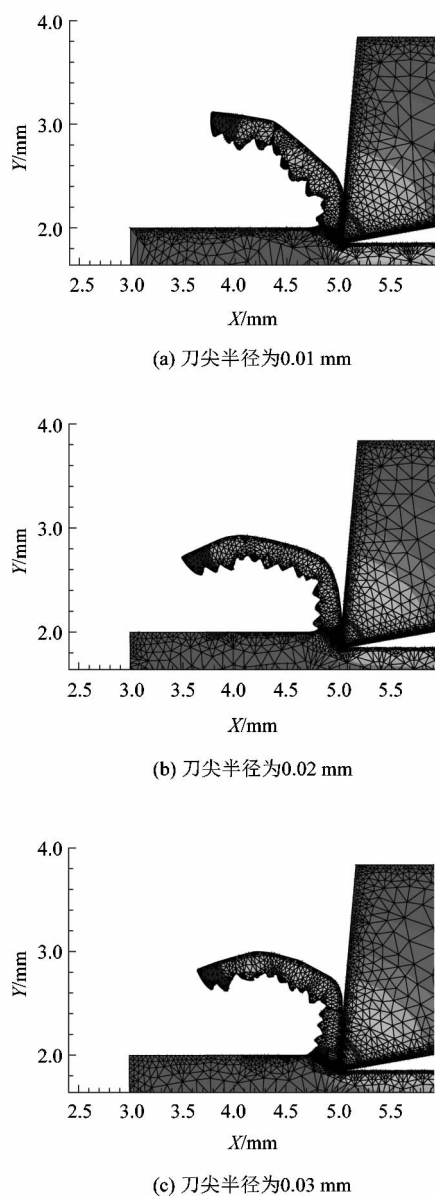


图8 CC和EVC在不同振幅下的平均切削力和刀具峰值温度
Figure 8 Average cutting force and tool peak temperature of CC and EVC at different amplitudes

4.2.2 振动频率对切削力、切削温度的影响

通过将不同振动频率超声振动车削与常规车削进行有限元仿真,选取车削稳定时某一时间段内的切削力,如图9所示。常规车削时,切削力波动很小,可以理解为车削过程中的正常波动;在EVC方式下,因施加谐波振动信号,所以切削力呈现有规律的振动,振动波形与谐波信号波形类似,随着振动频率的增加,切削力变化周期减小,切削力的幅值随之增大。以切削稳定过程的平均切削力为依据,与常规切削相比,EVC方式下主切削力可以降低约63%,进给力可以降低约73.4%,将常规切削视为频率为0 kHz,平均切削力如图10所示。图11为不同振动频率对应的切削温度。EVC方式下切削温度低于常规切削,并且在所选频率范围内随着频率的增加,切削温度逐渐降低。

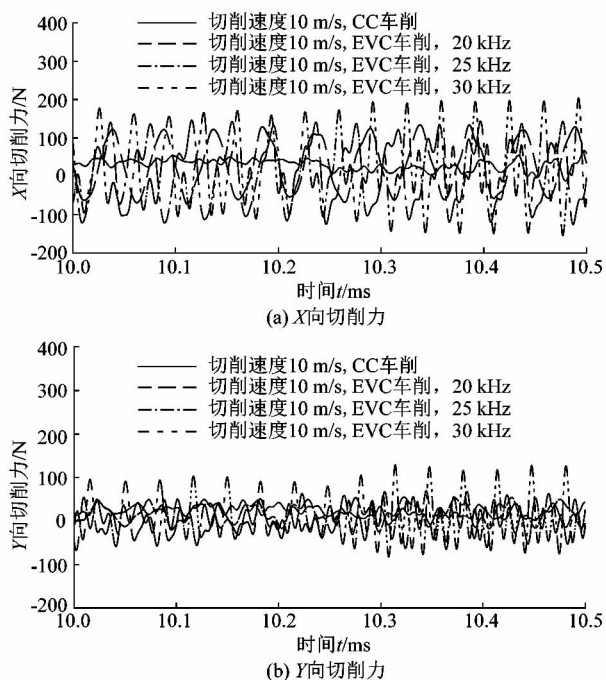


图9 CC和EVC在不同频率下的切削力

Figure 9 Cutting force of CC and EVC at different frequencies

5 结论

1) 课题组通过对切削过程中切削力和切屑的分析,建立切削力和切屑之间的数学模型;可以通过测量切屑厚度,进一步预测切削力。

2) EVC方式下,随着振动频率的增大,切屑越容易弯曲,更有利于切屑的折断。 X 方向振幅为 $3\text{ }\mu\text{m}$,刀尖圆角半径为 0.02 mm 时,刀尖与切屑的接触最小;在有利于切屑折断的同时,也可以降低刀具磨损。

3) 超声椭圆振动车削和常规车削相比,超声椭圆

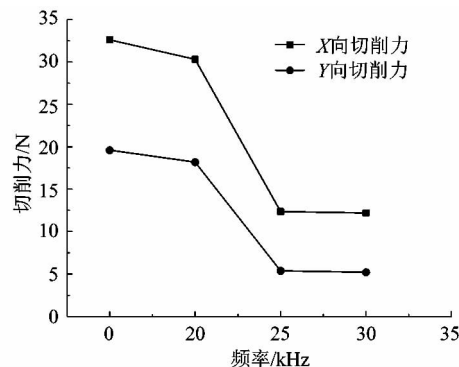


图10 CC和EVC在不同频率下的平均切削力

Figure 10 Average cutting force of CC and EVC at different frequencies

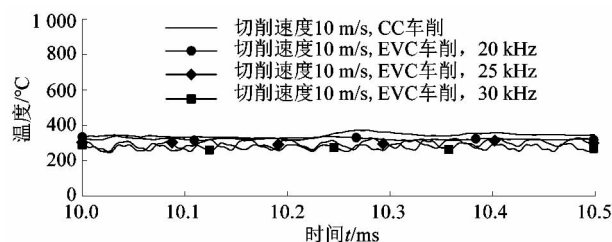


图11 CC和EVC在不同频率下的切削温度

Figure 11 Cutting temperature of CC and EVC at different frequencies

振动 X 方向振幅为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,主切削力最大降低约为62%,进给力最大降低约73%,切削温度降为常规切削的90%。切削力随着频率的增加而降低,在30 kHz时,主切削力最大降低约63%,进给力最大降低约73.4%。

4) 增加振幅、振动频率以及适当增加刀尖圆角半径可以减小切屑厚度,降低切削力。切削力以及切削温度的降低主要是因为刀具和工件的周期性分离,减少了接触时间,有利于散热。

5) 合理选择超声振动参数可以降低切削力和切削温度;并可以测量切屑厚度来判断切削力大小,更好的指导实际生产加工。

参考文献:

- [1] 陶镛光. 钛合金轴向超声振动车削数值模拟与实验研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014: 1-2.
- [2] 赵亭, 肖继明, 范思敏, 等. TC4 钛合金低频振动钻削切屑形态和切削力研究[J/OL]. 中国机械工程: 1-6. (2020-01-19)[2020-04-26].
- [3] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study on elliptical vibration cutting [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1994, 43(1): 35-38.
- [4] BROCATO B C, DOW T, SOHN A. Micromachining using elliptical vibration assisted machining (EVAM) [EB/OL]. [2020-2-10]. http://aspe.pointinspace.com/publications/Annual_2004/PAPERS/4PMACH1/1653.PDF.

(下转第38页)