

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.02.009

超声椭圆振动切削航空铝合金的数值研究

董慧婷, 张敏良, 李莹, 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:为了研究 7075 航空铝合金在超声椭圆振动切削(Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, UEVC)下切削速度、背吃刀量、振幅和频率对切削力和切削温度的影响。课题组运用 ABAQUS 有限元软件建立了仿真模型,对比分析了不同切削方式对航空铝合金力学性能的影响。仿真结果表明:在 UEVC 过程中,随着切削速度和切深的增加,切削力逐渐增加,切削温度逐渐升高;随着 X 方向的振幅和振动频率的增加,切削力和切削温度逐渐降低;背吃刀量对切削力的影响最为明显。与常规切削(Conventional Cutting, CC)相比,UEVC 能够明显降低切削力和切削温度,是一种改善航空铝合金切削性能的有效加工方式。

关键词:超声椭圆振动切削;有限元分析;ABAQUS 软件;背吃刀量;切削温度

中图分类号: TG506.5; TH162 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2021)02-0048-08

Numerical Study on Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting of Aviation Aluminum Alloy

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

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

Abstract: In order to study the influence of cutting speed, cutting depth, amplitude and frequency of 7075 aviation aluminum alloy under UEVC (Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting) on cutting force and cutting temperature, a simulation model was established by Abaqus finite element software, and the influence of different cutting methods on the mechanical properties of aviation aluminum alloy was compared and analyzed. The results show that in the UEVC process, with the increase of cutting speed and cutting depth, the cutting force and the cutting temperature increase gradually; with the increase of amplitude and vibration frequency in X direction, the cutting force and cutting temperature decrease gradually; the cutting depth has the most obvious effect on cutting force. Compared with CC (Conventional Cutting), UEVC can significantly reduce the cutting force and cutting temperature, which is an effective machining method to improve the cutting performance of aviation aluminum alloy.

Keywords: UEVC (Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting); FEA (Finite Element Analysis); ABAQUS; cutting depth; cutting temperature

7075 铝合金作为商用强力合金之一,具有良好机械性能,它在商用飞机上的使用量已经达到了飞机结构质量的 80% 以上,减轻了飞机的结构重量,改善了飞行性能并增加了经济效益。用传统的车削加工 7075-T6 铝合金极易产生变形缺陷,导致产品质量下降,甚至成为废品。超声椭圆振动车削技术作为一种新型特种加工技术提高了加工效率,改善了工件的加工表面质量,减少刀具磨损,延长刀具寿命。

超声椭圆振动切削(Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, UEVC)最早是由日本学者社本英二和森脇俊道^[1]在 CIRP 国际会议上提出来的。UEVC 指的是通过将超声波椭圆振动附加于切削刀具或加工工件,使刀尖相对于加工工件按椭圆轨迹进行振动,从而实现高频间歇性振动切削。Jinglin Tong 等^[2]设计了单激励超声椭圆振动系统,发现了在适当的超声振幅和低速进给速度下,铝合金能够获得最佳的表面形态。

收稿日期:2020-06-26;修回日期:2021-01-10

第一作者简介:董慧婷(1995),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为高效精密加工。E-mail:1767859249@qq.com

Weihai Huang 等^[3]研究了 UEVC 在脆性材料的超精密加工中对临界切削深度的影响,发现振动幅度、切割速度对临界切削深度都有一定的影响。Yu He 等^[4]对硬质材料的超声椭圆振动切削进行了仿真分析,发现 UEVC 的平均表面粗糙度 Ra 小于常规切削 (Conventional Cutting, CC),且 UEVC 与 CC 的切屑形态各有不同。Wu-Le Zhu 等^[5]使用新开发的 UEVC 系统对硬质合金刀具前刀面进行微切槽,发现与激光加工方法相比,UEVC 工艺的效率得到了极大地提高,UEVC 的摩擦因数较小,并且加工表面质量得到改善。Chao Kong 等^[6]研究了 UEVC 在 AISI 1045 钢加工中的性能,发现频率和幅度都对 UEVC 加工有着显著的影响。

原路生等^[7]研究了 UEVC 辅助加工铝合金的表面微结构特性,发现随着转速和进给速度的改变,微结构凹槽的几何尺寸、轮廓高度及表面粗糙度 Ra 均会发生规律性变化。曹腾等^[8]分析了 UEVC 加工铝合金时加工参数对微结构几何尺寸的影响,为表面微结构几何参数的优化提供了依据。张国华等^[9]研究了 UEVC 加工的表面三维几何形貌形成规律及影响因素,结果发现切削过程中相邻 2 转之间不同的相位差特征值对最终表面形貌有着重要的影响。徐文君等^[10]分析了铝合金细长轴超声振动辅助车削切削力变化规律,发现 UEVC 能够有效降低切削力,且 UEVC 下表面粗糙度的均匀一致性优于 CC。吴得宝等^[11]研究了径向超声振动参数及切削参数对车削 6061 铝合金的影响,发现振动参数和切削参数对表面残余应力、表面粗糙度以及表面形貌有显著的影响。

目前,国内外学者在超声椭圆振动方面的研究已经成熟,但是对于超声椭圆振动车削 7075 航空铝合金方面的研究相对较少。课题组针对超声椭圆振动切削技术在 7075 铝合金加工过程中的应用进行仿真分析,研究不同切削方式下切削参数和振动参数对切削力和切削温度的影响,以期在实际生产加工提供参考。

1 超声椭圆振动车削的运动学分析

超声椭圆振动加工一般是在刀具的切削方向和切深方向输入规律性的频率和振幅作为激励信号,经过合成后刀具在基面内形成椭圆形状的运动轨迹^[12]。如图 1 所示,在切削过程中刀具循环做椭圆运动,改变常规车削的连续加工方式为断续加工,使刀具与工件和切屑周期性的接触、分离,达到加工的目的。

将超声椭圆振动车削的刀具运动轨迹分解为 X 方向和 Y 方向的 2 个具有相同振动频率的正交简谐运

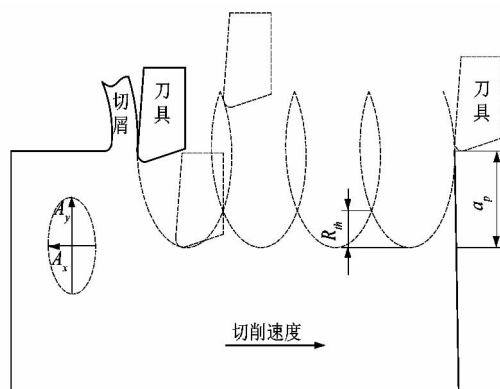


图 1 刀具运动轨迹

Figure 1 Tool trajectory

动,如图 2 所示。刀具在 X 、 Y 2 个方向的位移方程分别为:

$$X(t) = A_x \sin(2\pi ft + \varphi); \quad (1)$$

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

式中: A_x 是 X 方向的振幅, μm ; A_y 是 Y 方向运动的振幅, μm ; f 是超声椭圆振动的频率, kHz ; φ 是 X 方向与 Y 方向之间的相位差。

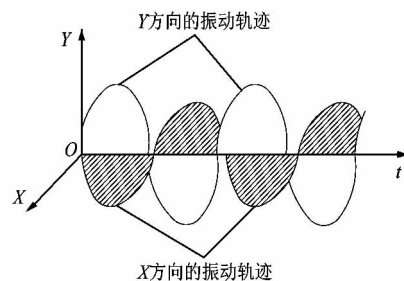


图 2 刀具振动轨迹坐标系

Figure 2 Tool vibration path coordinate

在超声椭圆振动车削过程中,将工件作为参照物,刀具相对工件的运动轨迹方程分别为:

$$X(t) = A_x \sin(2\pi ft) + V_t; \quad (3)$$

$$Y(t) = A_y \cos(2\pi ft). \quad (4)$$

刀具与工件之间的相对速度为:

$$V_x(t) = \frac{dx}{dt} = 2\pi A_x f \cos(2\pi ft) + V; \quad (5)$$

$$V_y(t) = \frac{dy}{dt} = 2\pi A_y f \sin(2\pi ft). \quad (6)$$

式中: V 为刀具的切削速度, m/min 。

当切削速度 V 小于切削临界速度 $V_{\max}$ 时,前刀面与切屑发生周期性的接触和分离。速比 K 可以表示为:

$$K = \frac{V}{V_{\max}} = \frac{V}{2\pi A_{\sqrt{f}}} \quad (7)$$

2 超声椭圆振动切削模型

2.1 超声椭圆振动切削力模型

在传统切削过程中,刀具所受的力有主切削力、吃刀抗力、前刀面与切屑之间的摩擦力、后刀面与已加工表面的摩擦力,这些分力合成的合力即常规切削的切削力。超声椭圆振动切削过程为断续切削,因此可分为2个阶段,在切削阶段受力情况与传统切削一致,在分离阶段后刀面与已加工表面不接触,此时工件不受刀具的正压力以及后刀面和已加工表面的摩擦力。

超声椭圆振动车削初始时,排屑速度大于Y方向的振动速度,切屑流出方向与刀-屑间的摩擦力方向相反,摩擦力阻碍切屑流出,这一过程与常规切削相似^[13]。随着切削的进行,由于变速切削的特性,Y方向的振动速度从慢变快,当振动速度大于排屑速度时,刀-屑间的摩擦力方向发生反转,与切屑流出方向相同,有利于切屑的排出,使得平均切削力大幅降低。

图3为超声椭圆振动切削基于Merchant模型的受力分析^[14-15],其中: N_r 为切削主力; N_f 为吃刀抗力; F_r 为正压力; F_f 为刀具前刀面与切屑的摩擦力; F_n 为法向力; F_s 为剪切平面的剪切力; F 为切削合力; θ 为反转摩擦区的剪切角; λ 为摩擦角; γ_0 为刀具前角。

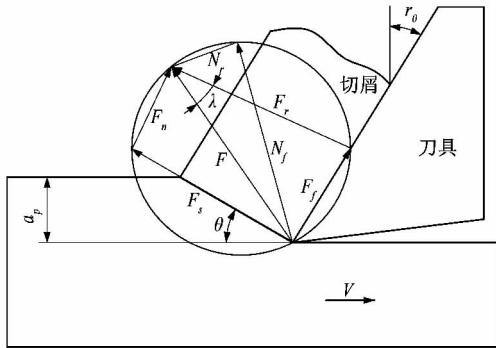


图3 UEVC 过程中的受力分析

Figure 3 Force analysis in UEVC process

2.2 超声椭圆振动切削温度模型

超声椭圆振动切削过程中切削热的主要来源是刀具与切屑之间的摩擦以及剪切面上金属发生的塑性变形^[16]。假设在超声椭圆振动切削过程中的热量分布是均匀的,刀具与切屑摩擦产生的热量为 Q_f ;剪切面产生的热量为 Q_s 。则在 UEVC 过程中产生的热量可表示为:

$$Q = Q_f + Q_s = \frac{F_t V_p}{S_t J_0} + \frac{F_s V}{S_c J_0} \quad (8)$$

式中: V_p 为 UEVC 过程中切屑排出速度; S_t 为刀-屑摩擦面的接触面积; J_0 为热功当量; S_c 为切屑在 X-Z 平面内的截面积。

3 超声椭圆振动切削有限元仿真

课题组采用 ABAQUS 仿真软件对硬质合金刀具 YG8 车削 7075-T6 铝合金切削过程进行建模,模拟不同切削条件和振动条件下的切削过程,探究各因素对切削力和切削温度的影响。如图4所示为 UEVC 的仿真模型。

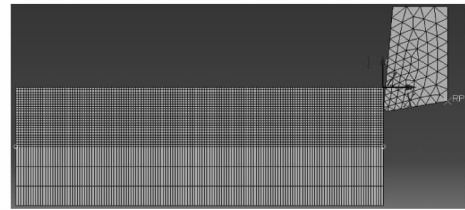


图4 UEVC 仿真模型

Figure 4 UEVC simulation model

3.1 材料本构模型

课题组采用 Johnson-Cook 本构模型,该模型描述材料高应变速率下热黏塑性变形行为,其具体表达如下:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] [1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})] [1 - (\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}})^m] \quad (9)$$

式中:第1项描述了材料的应变强化效应,第2项反映了流动应力随对数应变速率增加的关系,第3项反映了流动应力随温度升高指数降低的关系。其中, A, B, n, C, m 为应变的相关系数。 A 为屈服强度,MPa; B 为硬化模量,MPa; n 为硬化系数; C 为应变率系数; m 为热软化系数; ε 为塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为材料的应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为材料的参考应变速率; T 为材料的温度; T_R 为参考室温; T_M 为材料熔化温度。

3.2 材料失效准则

Johnson-Cook 剪切失效准则是材料即将失效时的等效塑性应变计算方法。课题组采用的是 Johnson-Cook 剪切失效模型实现切屑从工件分离,当损伤参数达到1时,单元即失效,失效参数定义如下:

$$\omega = \frac{\varepsilon_0^{-pl} + \sum \Delta \varepsilon^{-pl}}{\varepsilon_f^{-pl}} \quad (10)$$

式中: ω 为失效参数; ε_0^{-pl} 为等效塑性应变初始值;

$\Delta \varepsilon^{-pl}$ 为等效塑性应变增量; ε_f^{-pl} 为失效应变, 其表达式为:

$$\varepsilon_f^{-pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})][1 + d_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}^{-pl}}{\varepsilon_0}](1 + d_5 T) \quad (11)$$

式中: $d_1 \sim d_5$ 为材料的失效参数; $\dot{\varepsilon}^{-pl}$ 为塑性应变率; T 由式(12)确定

$$\left. \begin{aligned} &0, T < T_{room}; \\ &\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}, T_{room} < T < T_{melt}; \\ &1, T_{melt} < T. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3.3 切削条件

本研究中, 工件材料为 AL 7075-T6, 其 Johnson-Cook 参数为: $A = 546 \text{ MPa}$, $B = 678 \text{ MPa}$, $C = 0.024$, $n = 0.71$, $m = 1.56$, $T_R = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_M = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon}_0 = 1$; 工件长度为 3 mm, 高 1 mm; 刀具采用 YG8 硬质合金材料, 刀具前角为 5° , 后角为 10° , 刀尖圆角半径为 0.03 mm。具体的切削条件如表 1 所示。

表 1 切削条件

Table 1 Cutting conditions

测试组	$V/(m \cdot min^{-1})$	a_p/mm	$A_x/\mu m$	$A_y/\mu m$	f/kHz
A	20, 40, 60	0.2	10	5	20
B	40	0.1, 0.2, 0.3	10	5	20
C	40	0.2	6, 8, 10	5	20
D	40	0.2	10	5	20, 30, 40
常规车削	40	0.2			

4 结果与分析

课题组采用单一控制变量法, 在研究一个参数对切削力和温度的影响时固定其他参数值。

4.1 常规车削与超声椭圆振动车削对比

4.1.1 应力对比分析

图 5 为 CC 与 UEVC 切削时的 Mises 应力分布云图, 从图中可以看出 2 种切削方式中切屑的主应力都为压应力, 且主要集中在第 1 变形区。通过比较可以发现: UEVC 的 Mises 应力明显小于 CC 的 Mises 应力; 随着 UEVC 过程的进行, Mises 应力的变形区会整体随着切屑的不断产生与排除发生变化, 在切屑产生时会形成新的应力变形区。这样反复的变化使剪切变形区的切屑始终处于屈服状态, 有利于切屑的形成, 且 UEVC 由于其独特的断续切削方式, 更加利于切屑的塑性流动, 有助于切屑的排出。

4.1.2 切削力对比分析

图 6 为 CC 与 UEVC 的切削力曲线, 从图中可以看出, 这 2 种切削方式的主切削力都是 X 方向的切削

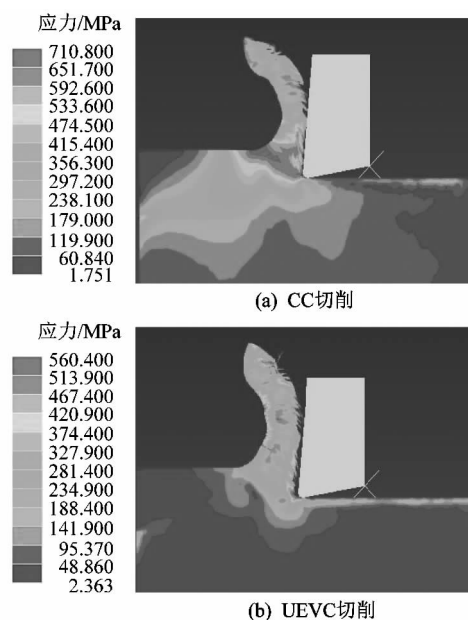


图 5 不同切削方式的 Mises 应力分布云图

Figure 5 Mises stress distribution cloud diagram for different cutting methods

力, CC 切削方式的切削力分布不均匀, UEVC 切削方式的切削力为周期分布。从图 8 可看出 UEVC 的平均切削力明显小于 CC 的切削力, 在相同的切削参数下, UEVC 的平均主切削力降低了 58%, 平均吃刀抗力降低了 71%。

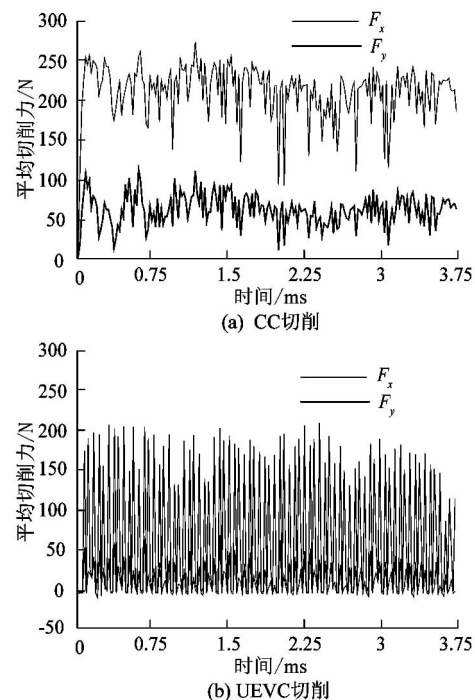


图 6 不同切削方式的切削力

Figure 6 Cutting force of different cutting methods

4.1.3 切削温度对比分析

图7为CC与UEVC切削过程中的温度变化图。从图中可以看出,切削热主要分布在切屑和前刀面接触的区域以及刀尖区域。在切削过程中,切屑越靠近与刀具接触的部位,温度越高。

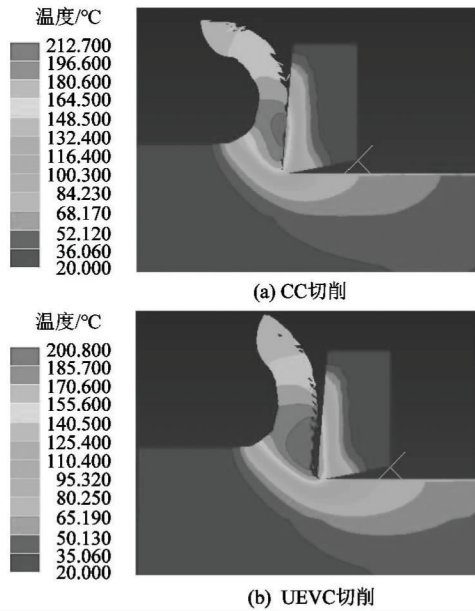


图7 不同切削方式的切削温度分布

Figure 7 Cloud map of cutting temperature distribution for different cutting methods

图8为不同切削方式下的平均切削力和切削温度图。从图中可以看出,前刀面的平均温度高于刀尖的平均温度,且在相同参数下,CC的温度要高于UEVC的温度,在相同的切削参数下,UEVC前刀面的平均温度降低了2%,刀尖的平均温度降低了7.5%。

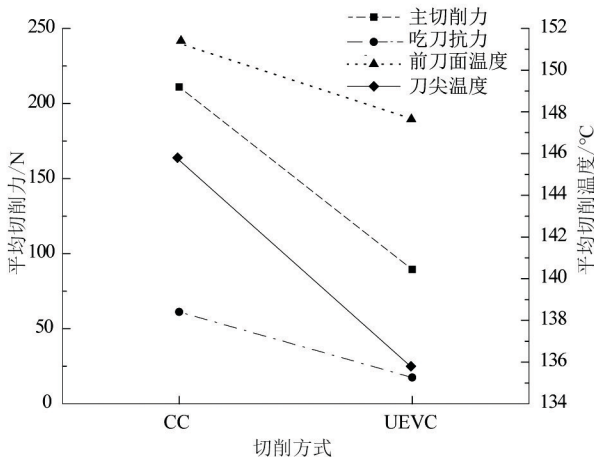


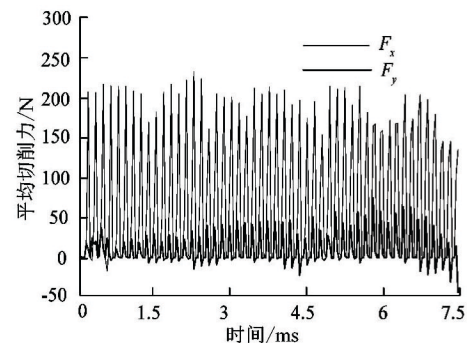
图8 不同切削方式下的平均切削力和切削温度

Figure 8 Average cutting force and cutting temperature under different cutting methods

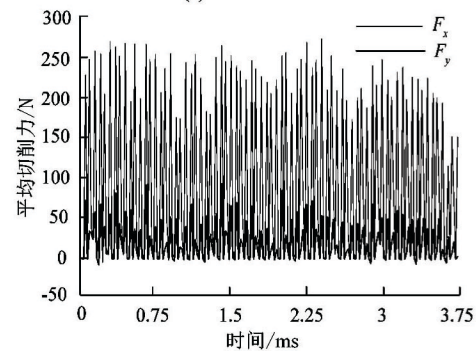
4.2 UEVC 切削参数对切削力和切削温度的影响

4.2.1 速度的影响

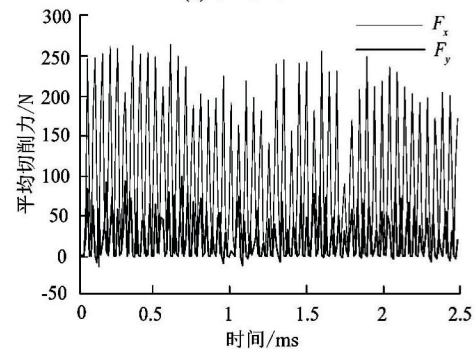
图9(a)、(b)、(c)为不同切削速度下的切削力变化曲线,图10为UEVC过程中不同速度下的平均切削力和切削温度,从图中可以看出,随着速度的增加,平均切削力增大。速度从20 m/min增加到40 m/min, X 方向的平均切削力增大了18%,当速度从40 m/min增加到60 m/min时, X 方向的平均切削力增大了5%。随着速度的增加,刀尖和前刀面的温度都随之升高,速度从20 m/min升高到40 m/min时,前刀面平均温度和刀尖平均温度都升高了14%;当速度从40 m/min升高到60 m/min时,前刀面平均温度和刀尖平均温度分别升高了5%与10%。



(a) $V=20$ m/min



(b) $V=40$ m/min



(c) $V=60$ m/min

图9 不同切削速度下的切削力

Figure 9 Cutting force at different cutting speeds

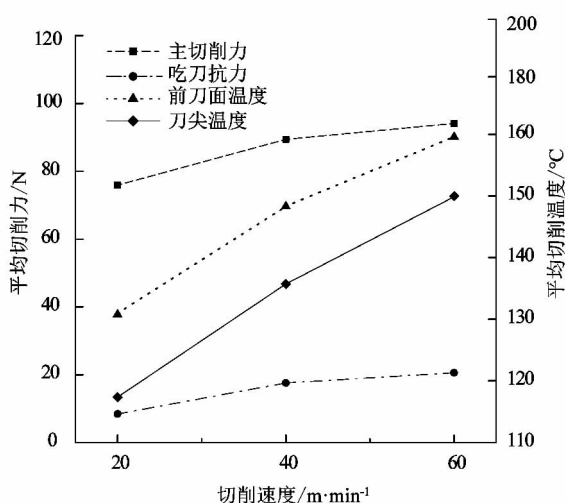


图 10 不同速度下的平均切削力和平均切削温度

Figure 10 Average cutting force and average cutting temperature under different speeds

4.2.2 背吃刀量的影响

图 11(a)、(b)、(c) 为不同切削速度下的切削力变化曲线,图 12 为 UEVC 过程中不同背吃刀量下的平均切削力和切削温度,从图中可以看出,随着背吃刀量的增加,工件材料的去除量变大,刀-屑接触面积变大,金属弹塑性变形增大,摩擦力增加,切削层的做功随之增大,导致平均切削力增大。背吃刀量每增加 0.1 mm, X 方向的切削力增大 37 N。随着背吃刀量的增加,刀尖和前刀面的温度都随之增加。背吃刀量从 0.1 mm 增大到 0.2 mm 时,前刀面平均温度和刀尖平均温度分别升高了 1% 和 10%;当背吃刀量从 0.2 mm 增大到 0.3 mm 时,前刀面平均温度和刀尖平均温度分别升高了 2% 与 9%。

4.3 UEVC 振动参数对切削力和切削温度的影响

4.3.1 X 方向振幅的影响

图 13(a)、(b)、(c) 为不同切削速度下的切削力变化曲线,图 14 为 UEVC 过程中不同 X 方向振幅下的平均切削力和切削温度,从图中可以看出,随着 X 方向振幅的增加,平均切削力减小, X 方向振幅从 6 μm 增大到 8 μm 时, X 、 Y 方向的平均切削力分别降低 12% 和 11%; X 方向振幅从 8 μm 增大到 10 μm 时, X 、 Y 方向的平均切削力分别降低 10% 和 19%。随着 X 方向振幅的增加,刀尖和前刀面的温度都随之降低,振幅从 6 μm 增大到 8 μm ,从 8 μm 增大到 10 μm 时,前刀面平均温度和刀尖平均温度都分别降低了 1% 和 1.5%。

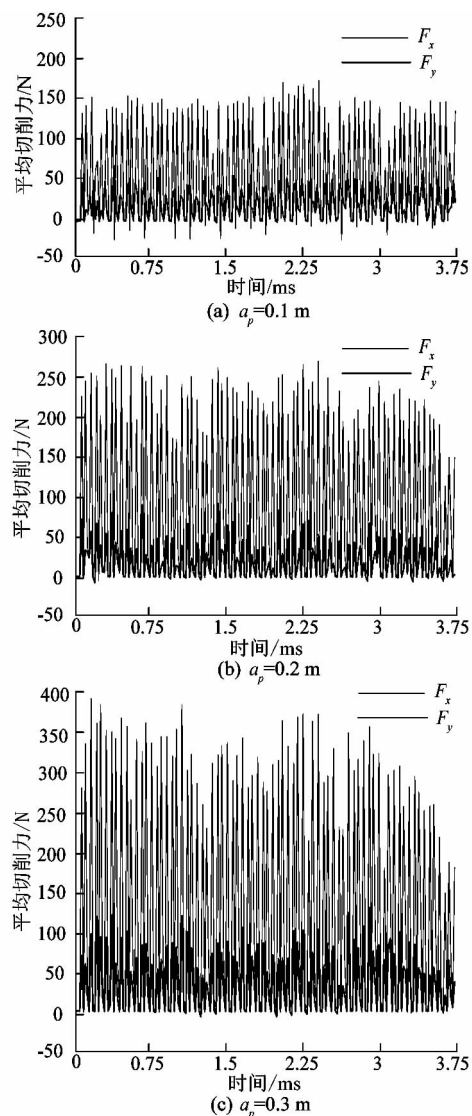


图 11 不同背吃刀量下的切削力

Figure 11 Cutting force at different cutting depth

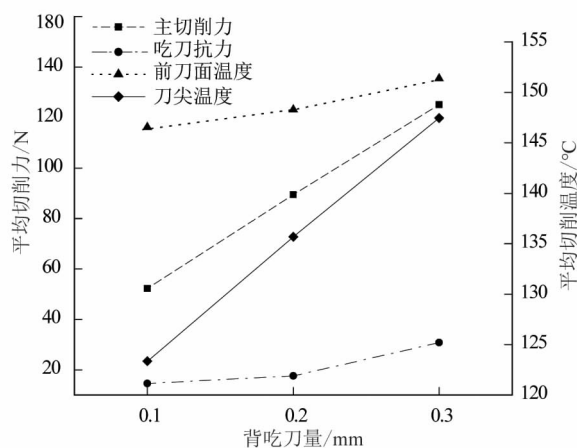


图 12 不同切深下的平均切削力和平均切削温度

Figure 12 Average cutting force and average cutting temperature under different chip thickness

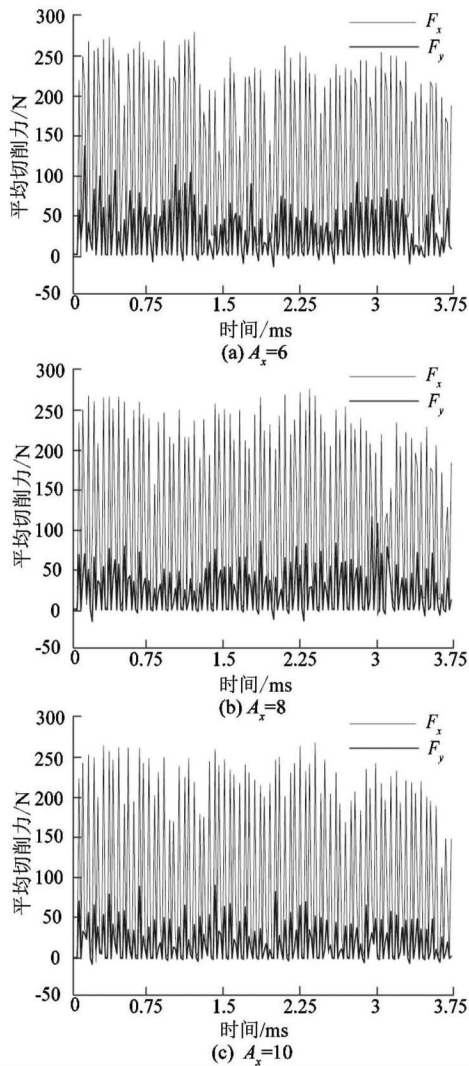


图 13 不同 X 方向振幅下的切削力
Figure 13 Cutting force at different X -direction amplitude

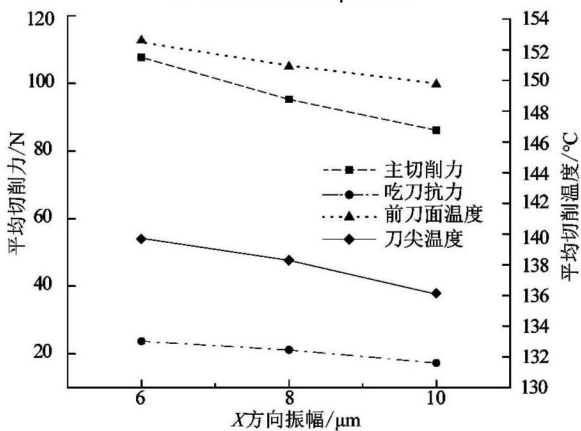


图 14 不同 X 方向振幅下的平均切削力和平均切削温度

Figure 14 Average cutting force and average cutting temperature under different X -direction amplitude

4.3.2 频率的影响

图 15(a)、(b)、(c) 为不同切削速度下的切削力变化曲线,图 16 为 UEVC 过程中不同频率下的平均切削力和切削温度,从图中可以看出,随着频率的增加,平均切削力减小,频率每增大 10 kHz, X 方向的平均切削力降低 19 N;频率从 20 kHz 增大到 30 kHz 时, Y 方向的平均切削力降低 38%,当频率从 30 kHz 增大到 40 kHz 时, Y 方向的平均切削力降低 46%。随着频率的增加,刀尖和前刀面的温度都随之降低,频率从 20 kHz 增大到 30 kHz 时,前刀面平均温度和刀尖平均温度分别下降了 0.5% 和 0.6%;当频率从 30 kHz 增大到 40 kHz 时,前刀面平均温度和刀尖平均温度分别下降了 1.7% 与 1.4%。

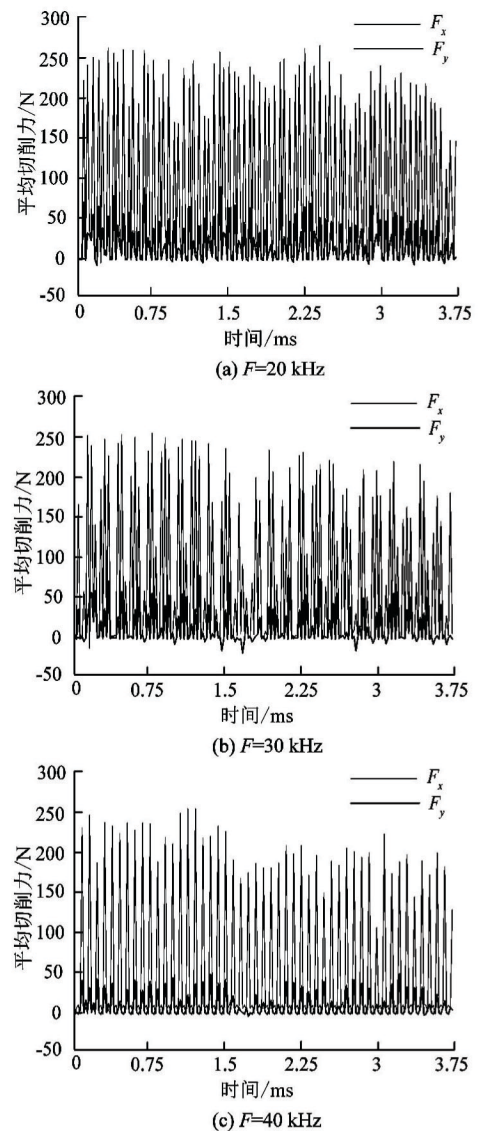


图 15 不同频率下的切削力

Figure 15 Cutting force at different frequencies

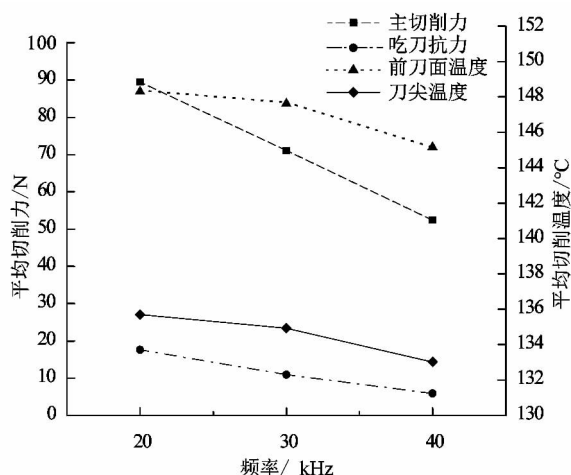


图 16 不同频率下的平均切削力和平均切削温度

Figure 16 Average cutting force and average cutting temperature under different frequencies

5 结论

课题组运用 ABAQUS 软件对航空铝合金进行 UEVC 仿真分析,探究切削参数和振动参数对切削力和切削温度的影响,得出以下结论:

1) 与 CC 比较发现,UEVC 的 Mises 应力分布更加有利于切屑的形成和排出,UEVC 因其独特的切削性能够明显降低切削力,在一定程度上降低切削温度。

2) 在 UEVC 过程中,切削力呈周期性的变化规律,主要受 X 方向的主切削力。切削力随着速度和背吃刀量的增大而增大,随着 X 方向振幅和频率的增大而减小。

3) 在 UEVC 过程中,切削热主要集中在切屑与前刀面接触的区域。切削温度随着速度和背吃刀量的增大而增加,随着 X 方向振幅和频率的增大而减小,切削温度与切削力表现出一致性。

4) 在切削参数中,背吃刀量对切削力的影响最为显著,切削速度次之;在振动参数中,频率对切削力的影响最为显著,振幅次之。

5) 课题组采用控制变量的方法进行研究,研究数据比较局限,还可以扩大参数的范围,更加准确地研究切削力和切削温度的影响。

参考文献:

- [1] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study on Elliptical vibration cutting [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1994, 43(1): 35-38.
- [2] TONG Jinglin, ZHAO Junshuai, CHEN Peng, et al. Effect of ultrasonic elliptical vibration turning on the microscopic morphology of aluminum alloy surface [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(9): 1397-1407.
- [3] HUANG Weihai, YU Deping, ZHANG Xinqian, et al. Ductile-regime machining model for ultrasonic elliptical vibration cutting of brittle materials [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 68-76.
- [4] HE Yu, ZOU Ping, ZHU Wule, et al. Ultrasonic elliptical vibration cutting of hard materials: simulation and experimental study [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1/2/3/4): 363-374.
- [5] ZHU Wule, XING Youqiang, EHMANN K F, et al. Ultrasonic elliptical vibration texturing of the rake face of carbide cutting tools for adhesion reduction [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9/10/11/12): 2669-2679.
- [6] KONG Chao, WANG Dazhong. Numerical investigation of the performance of elliptical vibration cutting in machining of AISI 1045 steel [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1/2/3/4): 715-727.
- [7] 原路生, 赵波, 王毅, 等. 椭圆振动辅助车削 7075 铝合金表面微结构及其特性探究 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(15): 1831-1838.
- [8] 曹腾, 路冬, 舒嵘, 等. 基于超声椭圆振动辅助车削的铝合金表面微结构仿真 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 50-57.
- [9] 张国华, 李咚咚, 李茂伟, 等. 超声椭圆振动车削三维形貌形成研究 [J]. 兵工学报, 2017, 38(10): 2002-2009.
- [10] 徐文君, 路冬, 李卫生, 等. 细长轴超声椭圆振动辅助车削试验 [J]. 工具技术, 2016, 50(11): 17-22.
- [11] 吴得宝, 刘宪福, 孟翔宇, 等. 6061 铝合金径向超声振动车削的表面完整性研究 [J]. 工具技术, 2019, 53(4): 16-20.
- [12] 史桂林. 基于超声椭圆振动辅助的表面微结构切削加工技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 9-10.
- [13] 宗昌生. 难加工材料的超声椭圆振动切削技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016: 14-15.
- [14] 韩金国. 难加工材料椭圆振动辅助切削技术及实验研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2018: 59-60.
- [15] 柏伟. 典型难加工材料振动辅助切削机理与可加工性实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 47-53.
- [16] 冯答. 椭圆振动切削过程中切削温度研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2018: 15-18.