

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.05.006

# 超声振动车削参数对切削力的影响

郭东升, 张敏良, 赵 森, 丁 宁, 吴经洋

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘 要:**为了探究超声振动车削(UVT)过程中刀具振动频率、振幅和切削速度3个参数对切削力的影响,课题组通过建立有限元模型,对高强度铝合金超声振动车削和普通车削(CT)过程进行了对比研究。首先,研究了切削区域的Mises应力分布的变化;其次,对切削区域温度和微观切屑形态进行了分析,从微观层面揭示UVT方法降低切削力和切削温度的机理;最后,分别研究了刀具振动频率、振幅和切削速度对UVT平均切削力的影响。研究表明:超声振动车削的有限元仿真结果与“刀具-工件接触比理论”一致;在一定的范围内,增大刀具振动频率或振幅以及降低切削速度的方法可以有效降低切削力。文中的研究显示合理的选择超声振动车削工艺参数可以降低切削力,改善高强度铝合金的制造工艺。

**关 键 词:**金属切削;超声振动车削;微观切屑形态;切削速度;振动参数;切削机理

中图分类号: TG506.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2019)05-0029-06

## Effect of Ultrasonic Vibration Turning Parameters on Cutting Force

GUO Dongsheng, ZHANG Minliang, ZHAO Sen, DING Ning, WU Jingyang

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

**Abstract:** To explore the influence of tool vibration frequency, vibration amplitude and cutting speed on cutting force in ultrasonic vibration turning (UVT), the UVT process of high-strength aluminum alloys was compared with that conventional turning (CT) by establishing the finite element model. Firstly, the distribution of Mises stresses in the cutting zone was investigated. Next, the temperature of cutting zone and microcosmic chip morphology were studied, which revealed the mechanism of UVT method to reduce cutting force and cutting temperature on the micro level. Furthermore, the effects of tool vibration frequency, tool vibration amplitude and cutting speed on average cutting forces of UVT were investigated, respectively. The results show that the finite element simulation of UVT are in accordance with the theory of tool-workpiece contact ratio. Both the increase of tool vibration frequency or tool vibration amplitude and the decrease of cutting speed within limits reduce the cutting forces. It is indicated that reasonable selection of ultrasonic vibration turning parameters can reduce cutting force and improve the manufacturing process of high-strength aluminum alloy.

**Keywords:** metal cutting; ultrasonically vibration turning; microcosmic chip morphology; cutting speed; vibration parameters; cutting mechanism

科学技术的不断发展,对机械加工制造提出了更高的要求。机械加工正向着轻量化、高精度及高效率的方向发展。高强度铝合金是机械制造领域最重要的材料之一。与钛合金相比,铝合金成本较低,是轻量化材料的首选。优良的物理性能使其在汽车<sup>[1]</sup>、航空航天、交通运输<sup>[2]</sup>和生物医学等领域得到了广泛的应用,但也给切削加工带来一些问题。铝合金强度高、韧

性好的特点导致切削过程中产生较大的切削力;塑性好、粘附性强导致切屑不易与工件分离,容易产生积屑瘤。这些现象的产生加剧了刀具的磨损,从而降低了工件的表面质量。切削过程中刀具与工件的强烈摩擦产生了大量切削热。为了降低切削区域的温度,切削液被广泛使用。但切削液的处理必须严格遵守环境保护的规定,这导致加工成本的增加<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2019-04-01;修回日期:2019-07-29

第一作者简介:郭东升(1995),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为超声振动切削。E-mail:ml15934562197@163.com

超声振动车削(UVT)是一种将微小振幅的高频振动叠加在刀尖的先进加工技术<sup>[4]</sup>。在“难切削”材料,如超硬合金<sup>[5]</sup>和脆性材料<sup>[6]</sup>的加工方面,UVT表现出一系列的优势。研究<sup>[7-8]</sup>表明超声振动切削技术极大地降低了切削力并延长刀具的寿命。超声振动车削得到的工件表面粗糙度小,车床噪音及颤振的幅度小<sup>[9]</sup>,这说明与普通切削相比,超声振动车削提升了工件的表面质量以及切削过程的动态稳定性。Mitrofanov<sup>[10]</sup>的研究证明由于超声振动切削的分离特性,降低了切削区域的温度。Patil<sup>[11]</sup>证实,与CT相比,UVT的热软化强度和剪切带形成强度降低。研究表明使用UVT,在钛基合金和镍基合金的加工中,材料去除率提高了2~3倍<sup>[12]</sup>。这种方法通过节省约5%~10%的制造时间,从而提高生产效率<sup>[13]</sup>965。

通过建立有限元模型,课题组研究了7050高强度铝合金的超声振动切削过程,微观揭示了UVT方法降低切削力和切削温度的机理;研究了刀具振动频率、振幅和切削速度对平均切削力的影响规律。研究表明超声振动车削方法可以改善高强度铝合金的制造工艺。

## 1 基于刀具-工件接触比的UVT机理

超声振动车削优良的加工性能是由刀具的分离或脉冲切削特性决定的。图1显示了正交超声振动车削中工件和刀具的相对运动方案。刀具以微小振幅沿X向作高频简谐振动,工件沿X向匀速移动,工件的移动速度为 $v$ ,即切削速度为 $v$ 。

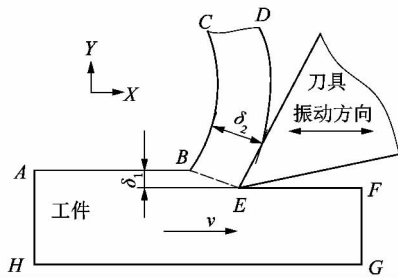


图1 正交超声振动车削中工件和刀具的相对运动

Figure 1 Relative movement of workpiece and cutting

tool in orthogonal ultrasonic assisted turning

振动刀具的位移:

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

式中: $x$ 和 $\omega$ 分别是刀具运动的位移和角速度, $a$ 和 $f$ 分别为刀具的振幅和频率,其中 $\omega = 2\pi f$ 。

利用式(1),刀具位移与时间的关系可在图2中描述。在 $t=0$ 时,刀具位于起点 $O$ 并开始向工件移动;刀具在 $t=t_m$ 时与工件接触,然后在 $t_m \sim t_n$ 时间段切削工件材料; $t=t_n$ 时与工件分离。从图2可以看

出,在一个完整的振动周期,刀具仅在一个确定的时间段内切削工件。

刀具振动速度表示为 $v_t = \dot{x} = a\omega \cos(\omega t)$ 。图2中,除了初始点 $O$ 外,振动速度在任何峰值或谷点处都达到最小值,在其简谐运动的平衡位置处达到最大值 $a\omega$ 。因此,UVT方法中的临界切削速度定义为 $(v_{cr}) = a\omega = 2\pi f a = (v_t)_{\max}$ 。UVT过程满足刀具工件分离的前提条件是 $a\omega > v$ ,否则它成为了普通的切削过程。

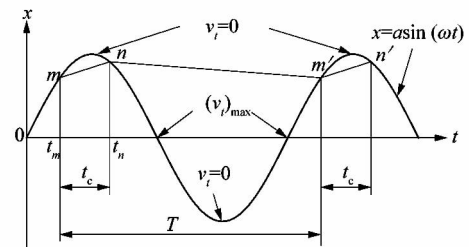


图2 刀具位移和刀具与工件的接触作用

Figure 2 Displacement of tool and contact

interaction between tool and workpiece

根据图2可以推导出关于超声振动车削的3个基本方程:

$$v + a\omega \cos(\omega t_n) = 0, (t = t_n); \quad (2)$$

$$a \sin[\omega(T + t_m)] - a \sin(\omega t_n) = v(T + t_m - t_n); \quad (3)$$

$$t_c = t_n - t_m. \quad (4)$$

式中振动周期 $T = 1/f$ 。

刀具-工件接触比(tool-workpiece contact ratio, TWCR)是在一个完整的振动周期内刀具-工件接触时间与振动周期的比值,可定义为

$$r = t_c/T. \quad (5)$$

通过式(2)~(5)得到

$$v(1-r) = 2af \sin(\pi r) \cos[\cos^{-1}(-v/(2\pi af)) - \pi r]. \quad (6)$$

可以看出,超声振动车削过程中的接触比取决于振动频率、振幅和切削速度3个主要参数。在每个振动周期中,刀具在确定的时间段切削工件,因此超声振动车削时的切削力应是普通车削的切削力的 $r$ 倍<sup>[13]</sup>967。式(6)表明,通过控制这3个重要参数,可以降低刀具-工件接触比,从而减小超声振动车削的切削力。

### 1.1 振动频率对接触比的影响

根据式(6),用MATLAB绘制了当振幅 $a = 20$

$\mu\text{m}$ , 切削速度  $v = 30 \text{ m/min}$  时 TWCR 关于频率的变化曲线。如图 3 所示, 在超声振动车削过程中, 刀具的振动频率越大, 刀具-工件的接触比越小。因此使用高频刀具时, 刀具切削区域会经历短时间的脉冲切削力。可以看出随着刀具振动频率的增加, 刀具-工件接触比减少得越来越缓慢。

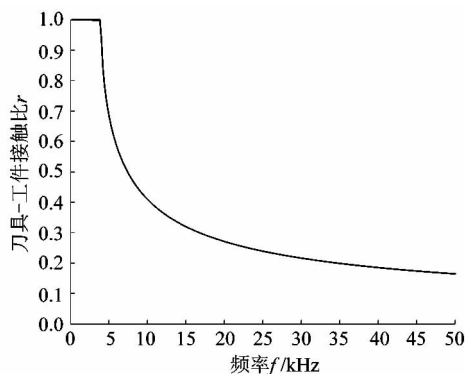


图 3 刀具-工件接触比与振动频率的关系

Figure 3 Relationship between TWCR and vibration frequency

### 1.2 振幅对接触比的影响

图 4 为接触比  $r$  和振幅的关系曲线, 其中  $f = 20 \text{ kHz}$ ,  $v = 30 \text{ m/min}$ 。在超声振动车削过程中, 随着振幅的增大, 接触比  $r$  不断减小。从振幅为  $15 \mu\text{m}$  开始, 曲线下降缓慢, 即  $r$  值减少的趋势放缓。

### 1.3 切削速度对接触比的影响

图 5 绘制了接触比  $r$  与切削速度的关系曲线, 其中  $f = 20 \text{ kHz}$ ,  $a = 20 \mu\text{m}$ 。图 5 表明, 在超声振动车削过程中, 随着切削速度的增大, 刀具-工件接触比不断增大。这意味着超声振动切削过程中切削速度低时, 刀具会经历短时间的脉冲切削力<sup>[13]974</sup>。

## 2 有限元模型

根据图 1, 在 AdvantEdge FEM 软件中建立了 Al7050 正交车削过程的二维有限元模型, 采用了前角为  $10^\circ$  的通用硬质合金刀具。在模型中, 使用的工件尺

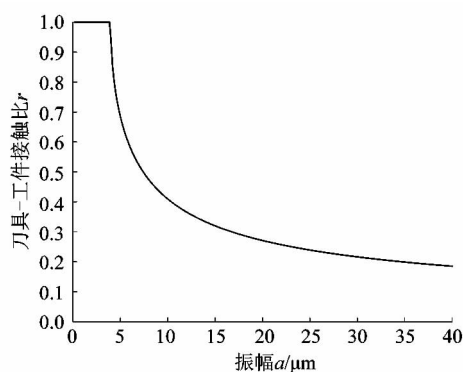


图 4 刀具-工件接触比与振幅的关系

Figure 4 Relationship between TWCR and vibration amplitude

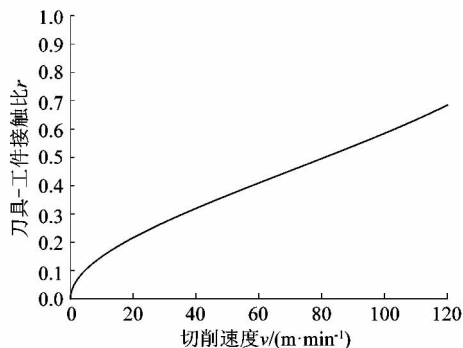


图 5 接触比与切削速度的关系

Figure 5 Relationship between TWCR and cutting speed

寸为长  $3.5 \text{ mm}$ , 高  $1.0 \text{ mm}$ 。图 1 中的未切削切屑厚度  $\delta_1 = 0.1 \text{ mm}$ , 即对应的进给速度为  $0.1 \text{ mm/r}$ , 有限元仿真主要参数如表 1 所示。工件以恒定的切削速度运动, 对于普通车削加工, 刀具是固定的, 然而, 在超声振动车削过程中, 刀具沿切削速度方向高频振动。在分析过程中, 采用了网格的重划分技术, 因此在仿真中有限元模型的单元和节点的数量时刻发生变化, 以保证仿真计算顺利进行。

表 1 主要参数

Table 1 Main parameters

| 刀具参数         |              |           | 振动参数    |                   | 切削参数                                     |                                        |         |
|--------------|--------------|-----------|---------|-------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|---------|
| 前角/ $^\circ$ | 后角/ $^\circ$ | 刀尖圆弧半径/mm | 频率/kHz  | 振幅/ $\mu\text{m}$ | 切削速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 进给量/ $(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$ | 背吃刀量/mm |
| 10           | 10           | 0.1       | 20 ~ 40 | 10 ~ 40           | 30 ~ 90                                  | 0.1                                    | 1       |

## 3 结果和讨论

通过对 Mises 应力分布的对比, 研究了超声振动车削与普通车削过程中刀具-工件相互作用机理的差

异。分析了切削区域的温度分布以及微观切屑形态。最后, 分别研究了刀具振动频率、刀具振幅和切削速度对平均切削力的影响。

### 3.1 CT与UVT的对比分析

图6(a)表示切削速度  $v = 30 \text{ m/min}$ , 进给量  $t_1 = 0.1 \text{ mm/r}$  时, 普通车削过程中的稳态切削的应力分布。在此基础上, 图6(b)~(d)描述了振动频率  $f = 20 \text{ kHz}$ , 振幅  $a = 20 \text{ }\mu\text{m}$  时 UVT 过程切削区域的 Mises 应力分布变化。切削过程中的各种现象与早期参考文献[5]第 697 页中利用 UVT 方法加工 Ti6Al4V 的各个阶段相似。图6(b)代表振动过程的第1阶段, 刀具向切屑移动, 切削区域的应力水平开始增加; 图6(c)表示在第2阶段, 刀具接触切屑并开始穿透工件, 应力持续上升; 第3阶段如图6(d)所示, 刀具最大程度地切入工件, 并且在切削区域产生了最高应力水平。接下来刀具与切屑分离, 切削区域的应力值逐渐降低到第1阶段的水平。对比图6(a)和图6(d), 可以看出 UVT 第3阶段应力分布与 CT 稳态过程相似, 而在振动周期的其他阶段, 超声振动切削的应力值远低于普通切削, 因此在一个振动周期中, 应力大小的变化使得 UVT 过程中的平均应力远低于 CT 过程中的平均应力, 这是 UVT 过程中的切削力减小的主要原因。

切削区域的温度是切削过程中最重要的参数之一。在铝合金的切削过程中, 切削温度的升高会影响材料的性能。过多的切削热导致前刀面出现积屑瘤现象, 从而加速刀具磨损。在 UVT 过程中, 间歇接触导致刀具和切屑之间的热传导总时间减少, 有利于切削系统与环境的热交换<sup>[14]</sup>。图7(a)和图7(b)分别显示了 CT 法和 UVT 法切削区的温度分布。从图7中可以看出, UVT 过程中切屑温度高于 CT 的切屑温度。因此, 采用 UVT 方法, 切屑带走了切削中更多的生成热。

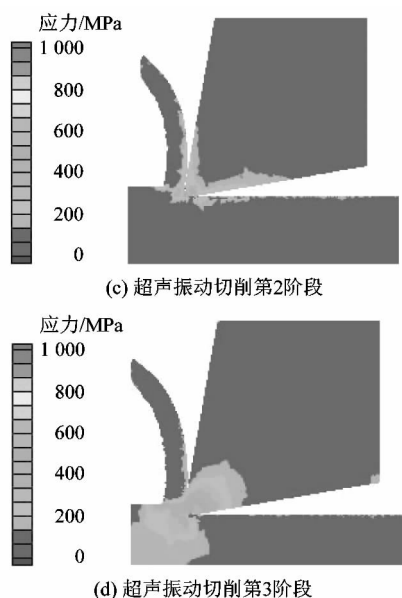
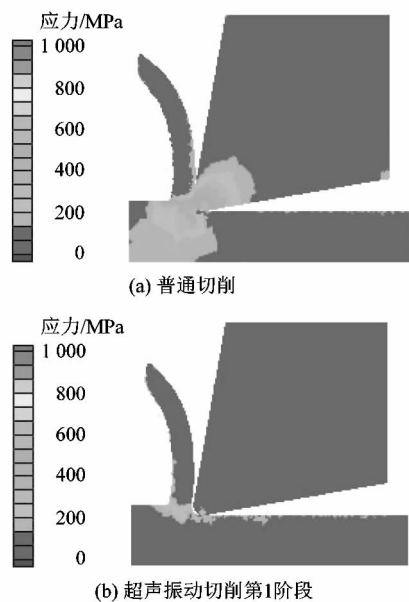


图6 切削区域 Mises 应力分布  
Figure 6 Distribution of Mises stresses in cutting zone

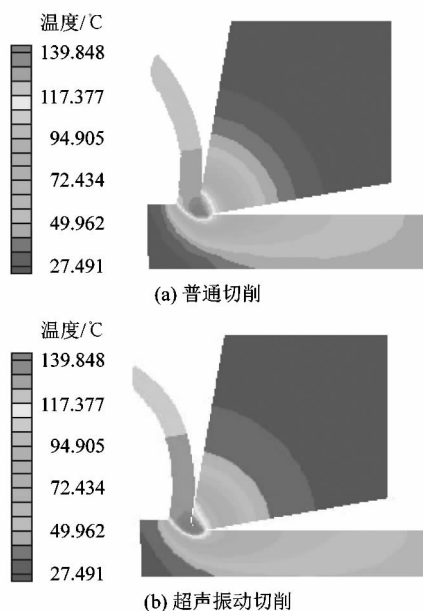


图7 切削区域的温度分布

Figure 7 Temperature distribution in cutting zone

### 3.2 振动频率对切削力的影响

课题组研究了当切削速度  $v = 30 \text{ m/min}$ 、振幅  $a = 20 \text{ }\mu\text{m}$ 、振动频率分别为 0, 20, 25, 30, 35 和 40 kHz 时的平均切削力分量。其中 0 kHz 表示 CT 方法, 分析结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出, UVT 法的切削力分量均低于 CT 法, 当振动频率为 20 kHz 时, UVT 切削的 X 向的切削力比普通切削降低了 63.5%, Y 向的切削力也降低了 59.4%。当振动频率从 20 kHz 增加

到 25 kHz 时,  $X$  向与  $Y$  向的平均切削力分量分别减小了 23% 和 11%。由 1.1 节理论分析可知, 随着振动频率的增大, UVT 切削过程中刀具-工件的接触比不断减小, 导致切削力不断减小, 且切削力减小的越来越不明显。这一趋势与振动频率  $f$  对 TWCR 的影响关系是一致的。

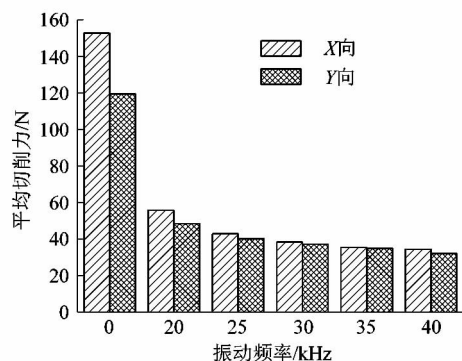


图 8 振动频率对平均切削力的影响

Figure 8 Effect of  $f$  on cutting forces

### 3.3 振幅对切削力的影响

为了研究振幅对切削力的影响, 通过有限元模拟, 研究了  $v = 30 \text{ m/min}$ ,  $f = 20 \text{ kHz}$  时, 振幅从 0 增加到  $40 \mu\text{m}$  的情况, 结果如图 9 所示。图中  $a = 0$  表示普通切削, UVT 过程的切削力明显低于 CT 过程。切削力分量值随振幅的增大而减小, 其原因是当振动频率一定时, 随着振幅的增大, 刀具与工件之间的分离效应更加明显。以往的实验研究发现, UVT 方法中振幅的增大提高了切削质量, 延长了刀具寿命<sup>[15]</sup>, 这证明了研究结果的可靠性。

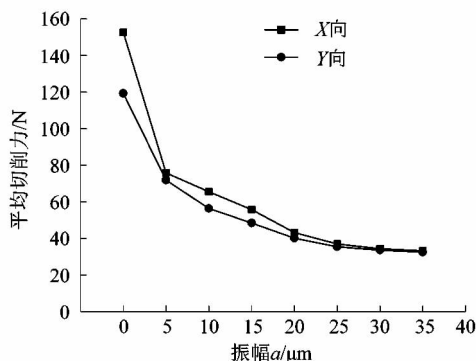


图 9 振幅  $a$  对切削力的影响

Figure 9 Effect of  $a$  on cutting forces

### 3.4 切削速度对 UVT 的影响

通过有限元模拟, 研究了切削速度对平均切削力的影响。考虑振动频率  $f = 20 \text{ kHz}$  和振幅  $a = 20 \mu\text{m}$  时, 切削速度分别为 30, 40, 50, 60, 70, 80 和 90 m/min

的切削力变化情况, 如图 10 所示。由  $(v)_{cr} = a\omega = 2\pi fa$  得到 UVT 方法的临界切削速度为 150 m/min。根据图 10, 随着切削速度的增加, 切削力分量不断增大, 这是由于切削速度的增加使刀具和工件之间的分离特性逐渐减弱, 刀具-工件接触比增大。该变化趋势与图 5 中切削速度对 TWCR 的影响关系是一致的, 印证了 UVT 加工过程中, 采用低速切削可以获得更好的切削质量。

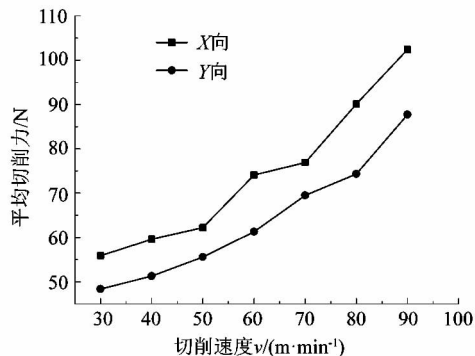


图 10 切削速度对切削力的影响

Figure 10 Effect of  $v$  on cutting forces

## 4 结论

1) 超声振动车削过程中刀具与工件的相互作用机理主要取决于刀具与工件的接触比  $r$ 。接触比主要与振动频率、振幅和切削速度 3 个参数有关。

2) 在超声振动车削过程中, 为了降低切削力, 应该使接触比的值尽可能小。通过增加振动频率和振幅或降低切削速度, 可以减小  $r$  的数值。

3) 通过比较 UVT 过程和 CT 过程中微观应力的分布, 说明切削区域的应力分布的周期性变化是超声振动切削过程中切削力减小的主要原因。

4) 增大刀具振动频率或振幅、降低切削速度都会降低切削力。有限元分析的结果与刀具工件之间的接触比理论相一致。

5) 课题组的研究表明合理选择超声振动车削工艺参数可以降低切削力。超声振动切削的方法可以有效改善高强度铝合金的加工工艺。

## 参考文献:

- [1] 刘颖, 朱成. 铝合金用于新能源乘用车车身轻量化及经济性分析[J]. 科技与创新, 2018(3): 20-23.
- [2] 王伟, 张勇, 余敏, 等. 从航空看轨道交通高强铝合金的发展趋势[J]. 材料导报, 2018, 32(增刊 1): 415-418.
- [3] MAUROTTO A, MUHAMMAD R, ROY A, et al. Enhanced ultrasonically assisted turning of a  $\beta$ -titanium alloy[J]. Ultrasonics, 2013, 53(7): 1242.

(下转第 38 页)