

超声波振动车削产生超越性加工现象的研究

张 雷 王立江 赵 继

(吉林工业大学机械工程系 长春 130025)

摘要 利用超声波振动车削的方法加工时,出现了工件已加工表面粗糙度低于刀具表面粗糙度这一与传统切削理论相悖的超越性加工现象。本文对超越性现象产生的条件、规律进行了试验和理论分析,丰富了超声波振动切削理论。

关键词 振动车削 超越性 表面粗糙度

1 引 言

传统切削理论认为,刀具表面粗糙度必须低于工件表面粗糙度,即要想加工出表面粗糙度低的工件必须使用表面粗糙度更低的刀具。在普通切削中确实遵循这一规律,但在振动切削这一新工艺中能否使用粗糙度高的刀具加工出低粗糙度的工件呢?本文利用涂层硬质合金可转位刀具振动车削时出现了工件已加工表面粗糙度低于刀具表面粗糙度的现象,并称之为超越性加工现象。本文利用超声波振动切削理论对超越性现象产生的条件、规律进行了试验,并从理论上作了初步分析,这一现象的产生为振动切削理论又增添新的内容。

2 超声波振动车削装置

从声学角度来说,声振系统的耦合件越少越好,变幅杆小端最好直接与加工刀具相连,因为一般耦合件越多,调系统谐振越困难。本文采用的超声波振动车削装置如图1所示。该装置具有如下特点:

(1) 采用直接振动式结构。刀片随变幅杆一起做纵向振动,只要变幅杆处于谐振状态,刀具就能做稳定的超声振动,因此整个装置非常容易调到谐振状态。系统振动频率 $F = 27\text{kHz}$ 。

(2) 采用可转位刀片。它的主要优点是: a) 刀片体积小,质量轻,设计制造与之相配的变幅杆比较方便,不同型号的刀片,只要质量相差不多,使用时微调频率旋钮便可很快地谐振;

b) 可避免焊接式小车刀在焊接时产生的裂纹, 这对处于高频振动状态下的车刀来说是很利; c) 可转位刀片在试验中便于在一个刀片上磨出多个不同参数的刀尖, 保证了刀片材质及其它条件的一致性。

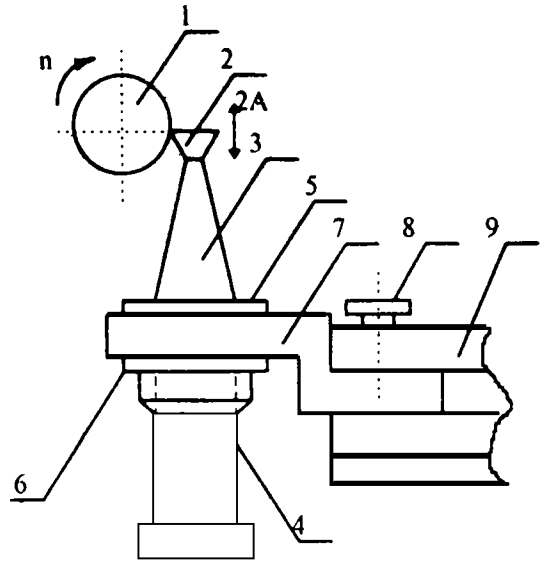
(3) 采用涂层硬质合金刀片。涂层刀片是硬质合金等刀具的重要发展方向之一^[4]。涂层硬质合金刀片以其高的硬度及耐磨性、高的耐热性、高的抗粘结性、高的化学稳定性和摩擦系数低等优良性能必须能带来比未涂层刀片好的切削效果。

3 超声波振动车削主要参数预选

在超声波振动车削中, 影响表面粗糙度 (R_a) 的主要因素有振幅 (A)、进给量 (f)、切削速度 (V) 和切削液等。本文在 CM0420M/2 型精密仪表车床上采用如图 1 所示的装置, 以黄铜作为加工对象, 用正交试验方法考察 A 、 f 、 V 和切削液对 R_a 的影响作用, 同时进行多工艺参数预选。正交试验因素及其水平见表 1, 具体试验安排及结果见表 2。

Table 1 Factors and levels of rectangular test

factor level	A (μm)	f ($\mu\text{m}/\text{r}$)	V (m/min)	cutting lubricant
1	2	3	14.20	alcohol
2	6	15	49.70	kerosene
3	9	35	117.15	engine oil 20 [#]



1. workpiece 2. round coated carbide resettable insert
3. horn 4. converter 5. upper locating ring
6. lower locating ring 7. tool clamp 8. fastening screw
9. tool post

Fig. 1 Sketch of ultrasonic vibration tool

Table 2 Arrangement and results of rectangular test

factor test No.	A (μm)	f ($\mu\text{m}/\text{r}$)	V (m/min)	cutting lubricant	R_a (μm)
1	2	3	14.20	alcohol	0.45
2	2	15	49.70	kerosene	0.81
3	2	35	117.15	engine oil 20 [#]	1.08
4	6	3	49.70	engine oil 20 [#]	0.54
5	6	15	117.15	alcohol	0.66
6	6	35	14.20	kerosene	0.65
7	9	3	117.15	kerosene	0.59
8	9	15	14.20	engine oil 20 [#]	0.44
9	9	35	49.70	alcohol	0.76

利用极差分析法对表 2 数据进行处理, 得到各因素的优水平为: $A = 9\mu\text{m}$, $f = 3\mu\text{m}/\text{r}$, V

= 14.20m/min, 切削液选用乙醇。在后续试验中, 考察某些因素对 R_a 的影响规律时, 其它因素均选用优水平。

4 超越性加工现象

4.1 试验条件

机 床: CM 0420M/2型精密仪表车床

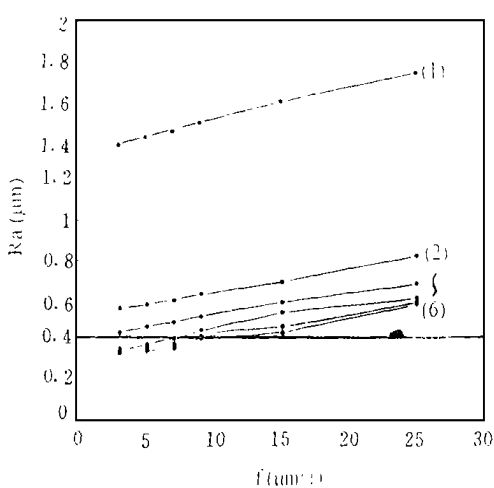
刀 具: TiN 涂层硬质合金圆形可转位刀具, 前角 $\gamma_0 = 20^\circ$ 后角 $\alpha_0 = 6^\circ$; 圆形刀片的半径 $R = 6\text{mm}$, 刀面粗糙度 $R_{ac} = 0.42\mu\text{m}$

工 件: 黄铜

切削条件: $F = 27\text{kHz}$, $A = 0, 2, 4, 6, 8, 9\mu\text{m}$, $V = 14.20, 31.95, 49.70, 83.42, 117.15\text{m/min}$, $f = 3, 5, 7, 9, 15, 25\mu\text{m/r}$, $a_p = 20\mu\text{m}$
乙醇切削液。

4.2 超越性加工现象的产生及其理论分析

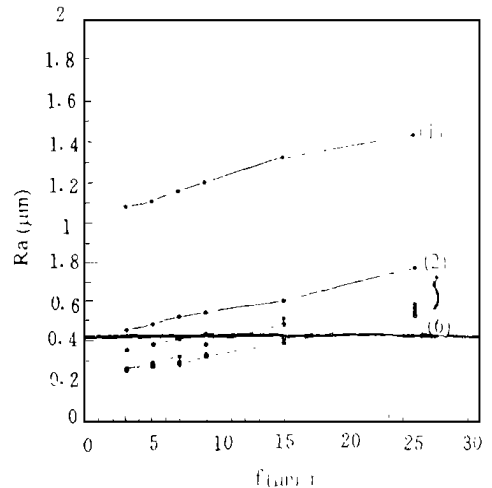
在上述试验条件下, 本文分别进行了不同振幅情况下, 进给量和切削速度对表面粗糙度影响规律的研究, 测量结果表明工件已加工表面粗糙度低于刀具表面粗糙度, 即产生了超越性加工现象(见图2和图3)。为了进一步说明超越性现象与超声波振动车削的关系, 根据图3绘制了如图4所示的速度系数 K ($K = \frac{V}{2\pi f A}$) 和 R_a 的关系曲线。图2、3和4中的水平实直线代表 R_{ac} 。 R_{ac} 以下的区域为超越性现象出现的区域。



(a) dry cutting

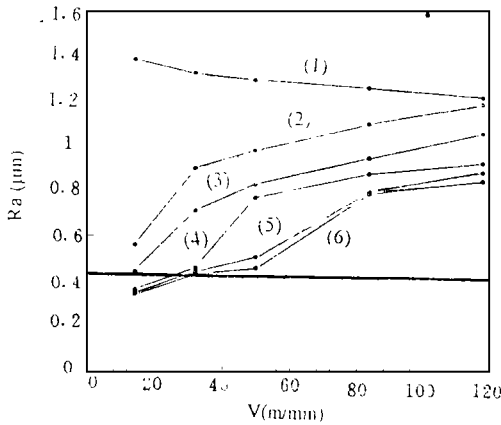
(1) $A = 0$ (2) ~ (6): $A = 2, 4, 6, 8, 9\mu\text{m}$

$V = 14.20\text{m/min}$, $a_p = 20\mu\text{m}$

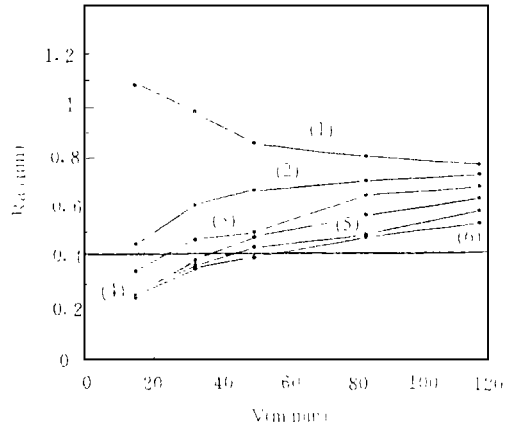


(b) alcohol as lubricant

Fig. 2 Curve of R_a and f



(a) dry cutting



(b) alcohol as lubricant

(1) $A = 0$ (2) $A = 2\mu\text{m}$ (3) $A = 4\mu\text{m}$ (4) $A = 6\mu\text{m}$ (5) $A = 8\mu\text{m}$
 (6) $A = 9\mu\text{m}$ $f = 3\mu\text{m/r}$, $a_p = 20\mu\text{m}$

Fig. 3 Curve of Ra and V

本文利用超声波振动切削理论对超越性现象进行了如下的分析:

(1) 理论粗糙度的影响

当刀尖为圆弧时, 切出的理论粗糙度为^[5]:

$$R_{o \max} = f^2 / (8R^2) \quad (1)$$

由公式(1)可见, f 越小, 表面粗糙度越低。这也是振动车削中, 在一定切削速度和振幅的条件下, 进给量越小, 越易出现超越性现象的原因之一(见图2)。

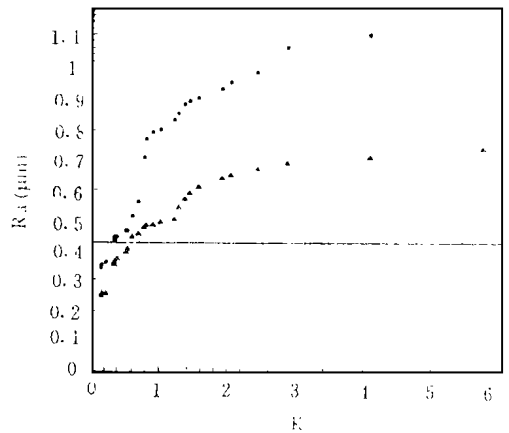
(2) 分离型超声波振动车削四个特性的影响

(a) 分离特性: Z 向分离型超声波振动车削时 ($K < 1$), 车刀前刀面与切屑之间不象普通车削过程 ($A = 0$) 那样总是紧密接触的, 而是周期性地分离。在振动的每一周期中前刀面离开切屑的距离 L_n 为^[3]:

$$L_n = -\frac{2}{w} \frac{\pi}{\varphi_1} (V + \omega A \cos \varphi) d \varphi = 2A [\sin \varphi - K(\pi - \varphi)] \quad (2)$$

且

$$\varphi = \arccos(-K) \quad (3)$$



$f = 3\mu\text{m/r}$, $a_p = 20\mu\text{m}$
 dry cutting alcohol as lubricant

Fig. 4 Curve of Ra and K

$$K = V/2\pi FA \quad (4)$$

其中 ω ——车刀刀刃的振动角速度;

φ_1 ——前刀面开始离开切屑时的相位。

分离特性彻底改变了车削时前刀面的接触条件,使前刀面与切屑的摩擦时间缩短,摩擦系数明显下降,剪切角增大,变形减小,特别是高频的分离使金属间的亲和作用和粘结作用大大减弱,切屑底层很难粘于前刀面上,从而使积屑瘤难以生成,切削过程平稳,排屑流畅。由式(2)、(3)和(4)可知,在一定切削速度的条件下,振幅越大,则 K 越小, L_n 越大,分离特性越强,越易出现超越性现象(见图2和4)。同样,在振幅一定的情况下,切削速度越低, L_n 值越大,分离特性越强,越易出现超越性现象(见图3和4)。

b) 冲击特性: 振动切削过程是宏观上连续,微观上高频断续的冲击切削,其动能 W_s 与普通切削时的动能 W 的关系式为^[3]:

$$W_s = W/\psi_2 \quad (5)$$

且

$$\psi = t_c/T \quad (6)$$

其中 t_c ——在振动的每一周期中车刀的切削时间;

T ——振动周期;

ψ ——切削系数。

冲击特性引起了振动车削过程中切屑形成机理的很大变化,刀具突然切入工件,使刀具在刀口附近产生局部很大的集中应力和局部高温,故使切屑较容易地从工件本体上分离出来,切屑变形减弱,平均切削力下降,出现了稳定的带状切屑和刚性化效果,对降低表面粗糙度非常有利。从式(5)和(6)可知, L_n 值越大, t_c 越短, ψ 越小,则动能 W_s 越大,越易出现超越性现象。

c) 变速特性: 振动车削是一种周期性的变速度和变加速度切削过程,其实质是把常速的普通车削在极短的周期内做了重新分配,使实际切削速度得以提高,降低了塑性变形量,提高了加工表面质量。

d) 往复熨压特性: 振动车削时,刀具相对于工件的运动并不是单方向前进的,而是周期性地往复运动。因此已加工表面在形成以后,又经过刀具后退、再前进的重复熨压作用,熨压次数由分离系数 Ω 决定。 $\Omega = 1$ 时只有两次, $\Omega > 1$ 时为多次, $\Omega < 1$ 时为部分熨压。 Ω 的表达式为^[3]:

$$\Omega = \frac{L_n}{L_c} \quad (7)$$

且

$$L_c = \frac{1}{\omega} \frac{2\pi\varphi_1}{\varphi_2} (V + \omega A \cos \varphi_1) = \frac{V}{F} = 2\pi A K \quad (8)$$

其中 L_c ——在振动的每一周期中车刀切削的长度;

φ_1 ——前刀面重新与切屑接触时的相位。

将式(2)、(3)、(4)和(8)代入式(7)得

$$\Omega = \frac{2A[\sin \varphi_1 - K(\pi - \varphi_1)]}{2\pi A K} = \frac{\sin[\arccos(-K)] - K[\pi - \arccos(-K)]}{\pi K} \quad (9)$$

把图4中出现超越性的各点的 K 值代入式(9) 求得相应的 Ω 并列入表3。由表3可见, K 值越大, Ω 值越小, 熨压次数由多次到两次到部分熨压。后刀面的熨压作用, 使已加工表面的粗糙度下降, K 越小, 熨压次数越多, 越易出现超越性现象(见图4)。

Table 3 Corresponding values of K and Ω

K	0.16	0.17	0.23	0.35	0.54
Ω	1.51	1.40	0.90	0.49	0.18

(3) 切削液的影响

乙醇由于其挥发速度快, 易于带走切削热而具有优良的冷却作用, 另外其渗透性强, 能有效地发挥润滑作用。而超声波振动车削又可以大大促进切削液的冷却、润滑作用的发挥, 故使用乙醇作切削液比干切更易出现超越性现象。将图2和3中的(b)图与(a)图相比较, 很容易看出这一点。

(4) 涂层刀具的影响

涂层硬质合金刀具的摩擦系数小, 切削时不易产生粘结和积屑瘤, 同时它的高硬度及耐磨性, 使得刀具后刀面在反复熨压已加工表面过程中其自身的磨损极少, 保证了已加工表面较低的粗糙度, 使超越性现象容易出现。

综上所述, 超越性加工现象是在超声波振动车削时, 切削速度较低, 振幅较大, 进给量较小的情况下出现的一种与传统切削理论相悖的现象。它是上述各因素综合作用的结果, 特别是分离型超声波振动车削所特有的四个特性共同作用的结果。在图2和图3中, 只有振动车削时才出现超越性现象而普通车削($A = 0$)时远离这一现象正说明了这一点。

5 结 论

(1) 本文在超声波振动车削中产生工件已加工表面粗糙度低于刀具表面粗糙度这一与传统切削理论相悖的现象, 并称之为超越性加工现象。

(2) 普通车削($A = 0$)的情况下不出现超越性现象; 振动车削显著地降低了表面粗糙度, 并在进给量较小, 振幅较大和切削速度较低的情况下出现超越性现象。选用乙醇作切削液比干切更易出现这一现象。

(3) 超越性现象是理论粗糙度, 分离型超声波振动车削的四个特性、切削液和涂层刀具共同作用的结果, 特别是分离型超声波振动车削的四个特性的作用更为重要。

(4) 超越性现象的研究为振动切削理论增加了新的内容, 这一现象和传统切削理论不相符合, 值得深入探讨。

参 考 文 献

- 1 隈部淳一良. 精密加工振动切削(基础与应用). 北京: 机械工业出版社, 1985
- 2 WANG Li-Jiang, et al. Influence on surface roughness in turning with ultrasonic vibration tool. Int J Mach Tools and Manufact, 1987, 27(2): 181 ~ 190
- 3 王立江等. 超声波振动车削的运动学及其加工表面质量. 兵工学报, 1987, (3): 24 ~ 31

- 4 肖诗纲. 现代刀具材料. 重庆: 重庆大学出版社, 1992
- 5 周泽化. 金属切削理论. 北京: 机械工业出版社, 1992

A Study on Outstanding Phenomenon in Ultrasonic Vibration Turning

ZHANG Lei, WANG Li-Jiang, ZHA O Ji

(*Department of Mechanical Engineering, Jilin University of Technology, Changchun 130025*)

Abstract

In ultrasonic vibration turning, present work finds such an outstanding phenomenon that the surface roughness of the workpieces is lower than that of the cutters used to machine, which is contrary to the traditional cutting theory. In this paper, the experiments and theoretical analyses are made about the occurring conditions and regularities of this phenomenon, which enriches the ultrasonic vibration cutting theory.

Key words: Ultrasonic vibration turning, Outstanding, Surface roughness

张 雷 男, 1970年12月生。1993年毕业于南京理工大学机械学院机械制造专业。1996年毕业于吉林工业大学研究生部机械制造专业, 获工学硕士学位。现为吉林工业大学博士研究生, 主要从事精密, 超精密加工的研究工作。