

超声波椭圆振动切削技术*

马春翔 胡德金

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要: 主要阐述了超声波椭圆振动切削原理和刀具椭圆振动系统; 分析了超声波椭圆振动切削运动特性; 介绍了超声波椭圆振动切削的实际切削效果。最后, 对超声波椭圆振动切削技术进行了展望。

关键词: 超声波 椭圆振动切削 超精密切削

中图分类号: TH16

0 前言

超声波椭圆振动切削技术是日本学者社本英二和森脇俊道在 20 世纪 90 年代提出的^[1]。与普通超声波振动切削(切削方向直线振动)^[2~6]不同的是将椭圆振动附加于刀具上, 使传统的切削过程发生了一些实质性的变化, 产生了一系列优良的切削效果^[1, 7~12]。将对超声波椭圆振动切削原理、刀具椭圆振动系统、切削运动特性和实际的切削效果等进行阐述、介绍和分析。

1 超声波椭圆振动切削原理

图 1 是超声波椭圆振动切削基本原理图, 是在包含切削方向和切屑流出方向的平面内将超声波椭圆振动附加于刀具上进行周期性的断续切削加工方法(这里指分离型超声波椭圆振动切削)。与普通超声波振动切削(切削方向上直线振动)一样^[3], 超声波椭圆振动切削可分为分离型和不分离型。

设刀具超声波椭圆振动轨迹为

$$x(t) = A \cos 2\pi ft \quad (1)$$

$$y(t) = B \sin 2\pi ft \quad (2)$$

则刀具相对工件运动轨迹为

$$x_r(t) = A \cos 2\pi ft + vt \quad (3)$$

$$y_r(t) = B \sin 2\pi ft \quad (4)$$

式中 A, B ——刀具椭圆振动振幅

f ——椭圆振动频率

v ——切削速度

当刀具在切削方向最大椭圆振动速度大于切削速度时, 为分离型; 当刀具在切削方向最大椭圆振动速度小于切削速度时, 为不分离型(以下只讨论分

离型超声波椭圆振动切削)。

图 1a 是刀具与切屑和工件处于分离状态, 即非切削状态。图 1b 是切削开始瞬间, 此时刀具与切屑并没接触。图 1c 是实际进行切削期间。图 1d 切削終了瞬间。超声波椭圆振动切削是以图 1a~d 为一个切削周期进行往复切削的一种断续的切削方法。



图 1 超声波椭圆振动切削基本原理

2 刀具椭圆振动系统

图 2 是作者研究开发的二段椭圆振动变幅杆, 在变幅杆的直交两面上贴上压电陶瓷片, 在这两片压电陶瓷片上加上正弦波电压, 这两片压电陶瓷发生伸缩, 这样变幅杆本体发生弯曲振动, 通过二段椭圆振动变幅杆, 发生的弯曲振动, 进一步增大。该超声波椭圆振动系统的振幅可达到 $6 \sim 18 \mu\text{m}$ 。这两个方向的弯曲振动合成之后, 可得到椭圆振动轨迹。通过调节相位差和振幅可得到任意形状的椭圆振动轨迹^[8]。图 3 是超声波椭圆振动的驱动和监测系统。切削力是通过在振动装置下面的测力仪获

* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。20030704 收到初稿, 20031106 收到修改稿

得。用非接触式光学位移传感器测定刀具的振动位移,椭圆振动轨迹通过光学示波器记录和监视。

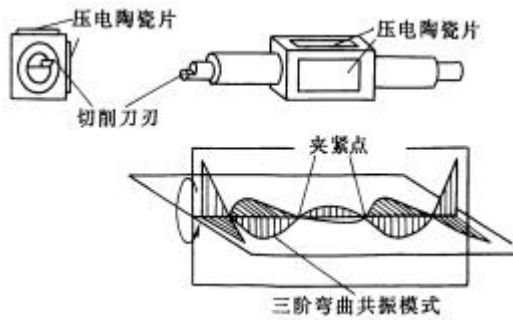


图2 椭圆振动变幅杆

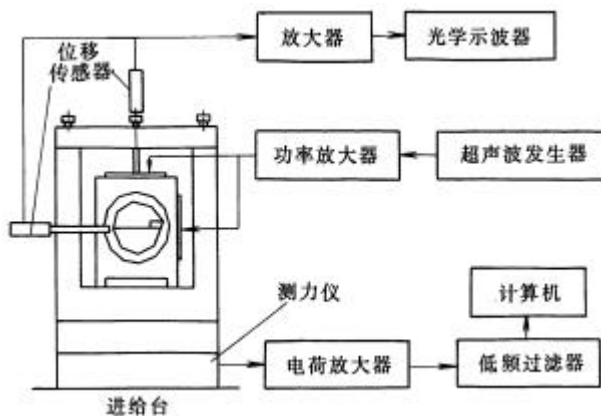


图3 超声波椭圆振动的驱动和监测系统

3 超声波椭圆振动切削运动特性

3.1 变速特性

与普通超声波振动切削一样^[3],超声波椭圆振动切削也具有变速特性,不同的是普通超声波振动切削仅是一个方向上变,而超声波椭圆振动切削是在两个方向上变速。刀具实际切削速度是分段连续的周期性函数,可表示为

$$v_x(t) = \begin{cases} -2pfA \sin 2pft + v & t_b + nT \leq t \leq t_e + nT \\ 0 & t_e + nT < t < t_b + (n+1)T \end{cases} \quad (5)$$

$$v_y(t) = \begin{cases} 2p f B \cos 2pft & t_b + nT \leq t \leq t_e + nT \\ 0 & t_e + nT < t < t_b + (n+1)T \end{cases} \quad (6)$$

式中 T ——椭圆振动周期

t_b ——在一个振动切削周期内切削开始时刻

t_e ——在一个振动切削周期内切削终了时刻

$n=0, 1, 2, \dots$

3.2 分离特性

与普通超声波振动切削一样^[3],超声波椭圆振动切削也具有分离特性,不同的是普通超声波振动

切削仅是刀具前刀面与切屑分离,而刀具后刀面与工件是不分离的;但是,超声波椭圆振动切削不仅是刀具前刀面与切屑分离,而且刀具后刀面与工件也分离(见图1a)。这样彻底地打开了“切削禁区”,可使切削液进入切削区,充分润滑和冷却刀具,导致刀具寿命提高^[11]。

3.3 前刀面摩擦力方向反转特性

由图1c可知:切削刚开始后,椭圆振动切削在 y 方向上的切削速度小于切屑流出速度,刀具前刀面与切屑之间的摩擦力方向与普通切削和普通振动切削时相同,与切屑流出方向相反,阻碍切屑流出;之后,椭圆振动切削在 y 方向上的切削速度逐渐增大,当 y 方向上的切削速度大于切屑流出速度时,刀具前刀面与切屑之间的摩擦力方向发生“反转”,与普通切削和普通超声波振动切削时不同,摩擦力方向与切屑流出方向相同,促进切屑流出,导致了背向切削力在一个切削周期内出现负值^[1],使平均切削合力大幅度地减小,特别是背向切削力的平均值,接近于0^[7,8]。

3.4 变切削角度特性

超声波椭圆振动切削在切削过程中,实际切削前角和实际切削后角是随时间变化的,可表示为

$$g_{oc} = \begin{cases} g_o + \left| \arctan \frac{2p f B \cos 2pft}{-2p f A \sin 2pft + v} \right| & t_b + nT \leq t < t_L + nT \\ g_o & t = nT + t_L \\ g_o - \left| \arctan \frac{2p f B \cos 2pft}{-2p f A \sin 2pft + v} \right| & t_L + nT < t \leq t_e + nT \end{cases} \quad (7)$$

$$a_{oc} = \begin{cases} a_o - \left| \arctan \frac{2p f B \cos 2pft}{-2p f A \sin 2pft + v} \right| & t_b + nT \leq t < t_L + nT \\ a_o & t = nT + t_L \\ a_o + \left| \arctan \frac{2p f B \cos 2pft}{-2p f A \sin 2pft + v} \right| & t_L + nT < t \leq t_e + nT \end{cases} \quad (8)$$

式中 γ_{oc} ——实际切削前角

γ_o ——标注前角

α_{oc} ——实际切削后角

α_o ——标注后角

t_L ——椭圆振动切削轨迹最低点

当 $t=t_L$ 时, $\gamma_{oc}=\gamma_o$, $\alpha_{oc}=\alpha_o$

当 $t=t_b$ 时, $\gamma_{oc}=\gamma_{ocmax}$, $\alpha_{oc}=\alpha_{ocmin}$

当 $t=t_e$ 时, $g_{oc}=g_{ocmin}=g_o-90^\circ$

$\alpha_{oc}=\alpha_{ocmax}=\alpha_o+90^\circ$

从切削动力学角度,为了使切削过程稳定,需满足: $\alpha_{ocmin} > 0$, 即

$$a_o - \left| \arctan \frac{2p f B \cos 2pft_b}{-2p f A \sin 2pft_b + v} \right| > 0 \quad (9)$$

在选刀具后角时，应考虑上式。

4 超声波椭圆振动切削实际切削效果

与普通切削相比，超声波椭圆振动切削如下切削效果已被确认^[1,12]。

- (1) 切削力大幅度地减小(1/50 左右)。
- (2) 加工精度明显提高。
- (3) 刀具寿命大幅度地延长。
- (4) 毛刺的抑制(图 4)。
- (5) 加工系统稳定性显著提高。
- (6) 自激振动的抑制(图 5 和图 6)。
- (7) 刀具表面附着物的抑制(图 7)。
- (8) 形状难加工部件的加工(图 8 和图 9)。
- (9) 难加工材料超精密镜面切削(图 10)。
- (10) 难加工材料超精密微细切削(图 11)。
- (11) 脆性材料超精密切削(图 12)。

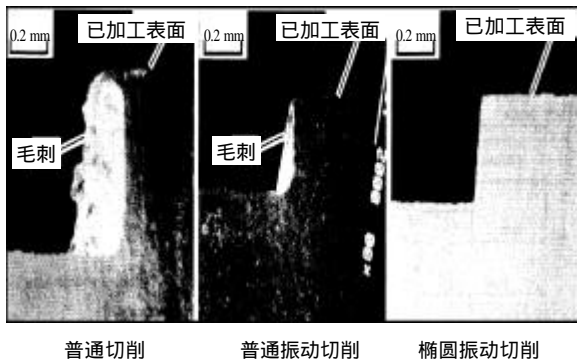


图 4 毛刺 SEM 照片

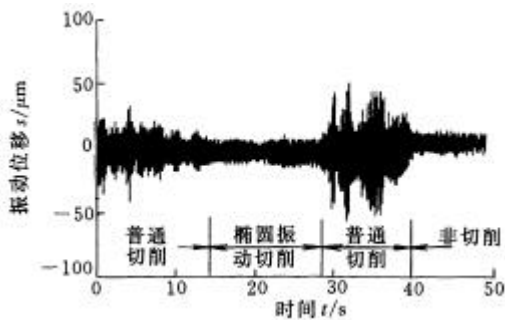


图 5 切削中振动信号

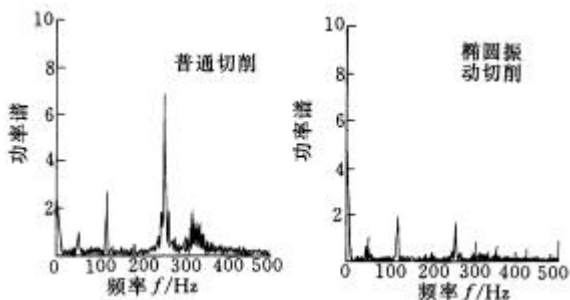


图 6 切削中振动信号的功率谱

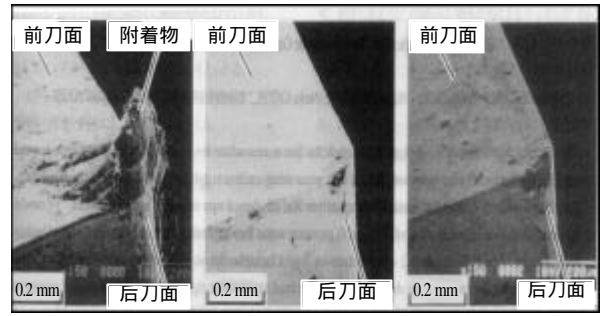


图 7 刀具表面附着物 SEM 照片

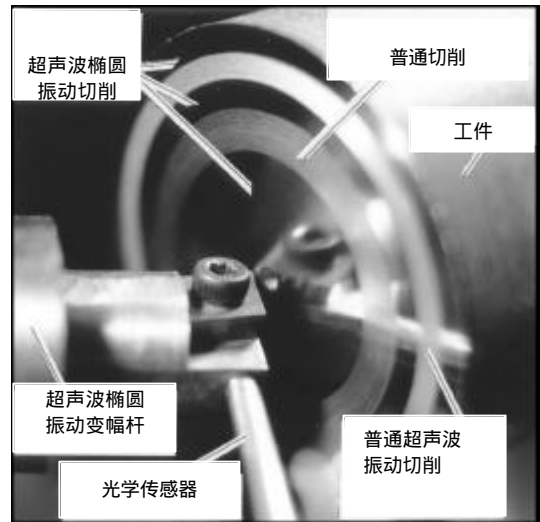


图 8 已加工表面照片

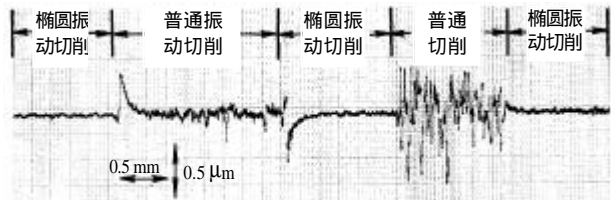


图 9 已加工表面粗糙度



图 10 淬硬钢的超精密镜面切削硬度 61 HRC

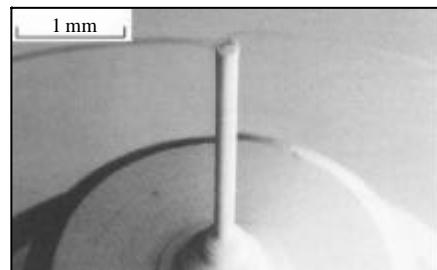


图 11 淬硬钢的超精密微细切削
硬度 44 HRC, 0.22X4.0 mm

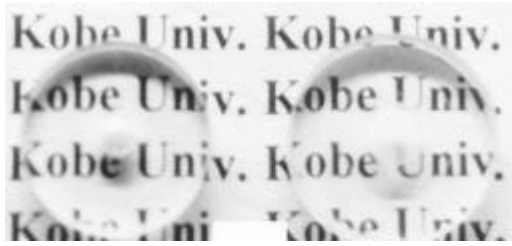


图 12 脆性材料的超精密切削

左：Soda-lime 玻璃，右：Quartz 玻璃

粗糙度 $R_y=0.025 \sim 0.030 \mu\text{m}$

5 结论

超声波椭圆振动切削已受到国际学术界和企业界的重视。美国、英国、德国和新加坡等国的大学以及国内的北京航空航天大学 and 上海交通大学已开始这方面的研究工作。日本企业界如日立、多贺和 Towa 公司等已开始这方面的实用化研究工作。但是，超声波椭圆振动切削在理论和应用方面还有许多工作要做。尤其是对硬脆性材料的超精密切削加工、微细部品和微细模具的超精密切削加工等方面还需要进一步研究。

参 考 文 献

- Shamoto E, Moriwaki T. Elliptical vibration cutting. *Annals of CIPR*, 1994, 43(1) : 35~38
- 隈部淳一郎. 超声波振动切削加工法. *机械と工具*, 1957(1) : 1~4
- 王立江, 赵继, 谭庆昌. 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
- Wang L J, Yu J. Suppressing action on chatter With ultrasonic vibration cutting. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(22) : 1 920~1 923
- 王立江. 超声波振动车削不分离区的三种状态. *中国科学(A 辑)*, 1992(3) : 332~336
- 张德远. 超声波振动车削精密微细切削特性. *北京航空航天大学学报*, 1993(4) : 61~67
- 社本英二, 马春翔, 森脇俊道. 椭圆振动切削. *精密工学会誌*, 1999, 65(4) : 586~591
- Ma Chunxiang, Shamoto E. Suppression of chatter in turning by ultrasonic elliptical vibration. *Mem. of Grad. School Sci. & Technol. Kobe Univ.*, 1999(17A) : 47~62
- Shamoto E, Ma Chunxiang, Moriwaki T. Ultraprecision ductile cutting of glass by ultrasonic elliptical vibration cutting. In : *Proc. of 1st Int. Conf. of European Society Presion Engineering and Nanotechnology*, 1999 : 408~411
- Shamoto E, Moriwaki T. Ultrasonicprecision diamond cutting of hardened steel by applying ultrasonic elliptical vibration cutting. *Annals of CIPR*, 1999, 48(1) : 441~444
- Brinksmeier E, Gläbe R. Elliptical vibration cutting of steel with diamond tools. In : *Proc. of 14th Annual ASPE Meeting, USA*, 1999(S) : 163~166
- Shamoto E, Suzuki N. Ultraprecision machining of hard materials by applying ultrasonic elliptical vibration cutting. In : *International Workshop on Extreme Optics and Sensors*, Tokyo, Japan, 2003

ULTRASONIC ELLIPTICAL VIBRATION CUTTING

Ma Chunxiang Hu Dejin
(Shanghai Jiaotong University)

Abstract The principle of ultrasonic elliptical vibration cutting, and ultrasonic elliptical vibration system are explained. The characteristics of elliptical vibration cutting are analyzed. The practical machining effects are introduced. At last, its applications are estimated.

Key word : Ultrasonic Elliptical vibration cutting
Ultra-precision cutting

作者简介：马春翔，男，1962 年出生，工学博士，副教授。研究方向：难加工材料超精密切削加工、智能自动机械和自动化生产线的开发设计。发表论文 30 余篇。