

超声波椭圆振动切削加工系统稳定性研究

张 华¹, 张飞飞¹, 卢 博¹, 詹海鹏¹, 史永刚¹,

强 薇¹, 张 鹏¹, 马 杰², 马春翔²

(1. 西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 切削加工系统的稳定性是影响零件加工质量的重要因素之一。通过建立超声波椭圆振动切削系统动力学模型, 对超声波椭圆振动切削系统稳定性进行了分析, 从理论上预测出超声波椭圆振动切削的稳定极限, 并对其进行 Matlab 仿真, 得出稳定极限图。最后介绍了高温合金材料弱刚度零件加工试验情况, 证实了与普通加工系统相比, 超声波椭圆振动切削加工系统处于分离状态时具有更高的加工稳定性, 可以提高弱刚度零件的加工质量。

关键词: 超声波椭圆振动切削; 系统稳定性; Matlab 仿真; 加工质量

中图分类号: V434-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2016) 03-0081-05

Study on machining stability of ultrasonic elliptical vibration cutting system

ZHANG Hua¹, ZHANG Feifei¹, LU Bo¹, ZHAN Haipeng¹, SHI Yonggang¹,

QIANG Wei¹, ZHANG Peng¹, MA Jie², MA Chunxiang²

(1. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Machining system stability is one of the important factors of influencing machining quality. The machining stability of ultrasonic elliptical vibration cutting system is analyzed by means of the established dynamic model of the ultrasonic elliptical vibration cutting system to predict the theoretic stability limit of the ultrasonic elliptical vibration cutting. The stability limit curve of the machining system is drawn with Matlab. The testing situation of the face cutting of the high temperature alloy workpiece with weak rigidity are processed, which proves that the stability of ultrasonic elliptical vibration cutting system is higher than that of ordinary cutting systems when it is in separating status. As a result, it can improve the machining quality of the workpieces with weak rigidity.

Keywords: ultrasonic elliptical vibration cutting; system stability; simulation; machining quality

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-03-28

基金项目: 中国航天科技集团重大工艺专项资助项目(ZDGY2014-27)

作者简介: 张华 (1963—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机材料与工艺

0 引言

超声波椭圆振动切削技术是上世纪 90 年代提出的新型精密加工技术,分为分离型和不分离型^[1-2]。它改变了传统的切削加工过程,使刀具以椭圆振动轨迹对工件进行切削。刀具前刀面与切屑之间的摩擦力有利于切屑的排出,不仅可有效抑制毛刺和刀尖处积屑瘤的产生^[3],而且使平均切削合力大幅地减小,特别是背向切削力的平均值接近于 0^[4],可以用来加工脆性等难加工材料,提高加工精度和刀具寿命。本文通过理论计算和计算机仿真分析了分离型超声波椭圆振动加工系统的稳定极限,并进行弱刚度零件加工试验验证。

1 椭圆振动切削系统动力学模型

切削系统模型如图 1 所示。

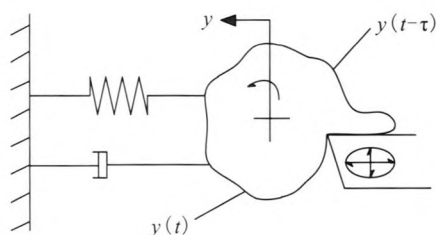


图 1 带再生效应的超声波椭圆振动切削模型

Fig. 1 Ultrasonic elliptical vibration cutting model with regenerative effect

系统动力学方程可表示为

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = dF_y(t) = bk_c h(t) [\mu y(t-\tau) - y(t)]$$

$$\text{或 } \ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = \frac{dF_y(t)\omega_n^2}{k} = bk_c h(t) [\mu y(t-\tau) - y(t)] \quad (1)$$

式中: m 为等效质量; c 为等效阻尼; k 为等效刚度; b 为切削宽度; k_c 为切削力的切削厚度系数,即单位切削宽度下切削厚度单位变化所引起的切削力的变化; ω_n 为系统固有频率; μ 为重叠系数; τ 为工件转一圈所用时间; ξ 为阻尼; $h(t)$ 为超声波椭圆振动切削的特征函数^[9],如图 2 所示。

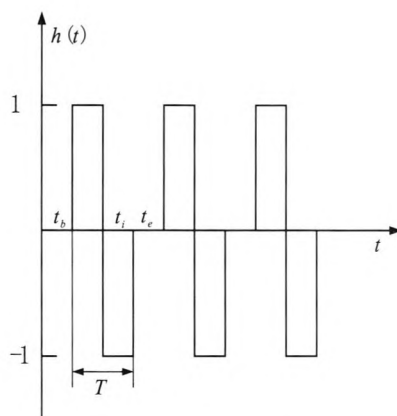


图 2 表征椭圆振动切削状态的特征函数

Fig. 2 Characteristic function to character state of elliptical vibration cutting

$$h(t) = \begin{cases} 1 & (t_b + nT) \leq t < (t_i + nT) \\ -1 & (t_i + nT) \leq t < (t_e + nT) \\ 0 & (t_e + nT) \leq t < (t_b + (n+1)T) \end{cases} \quad (2)$$

对 $h(t)$ 作傅里叶级数展开,则动态切削力可表示成

$$dF_y(t) = bk_c [\mu y(t-\tau) - y(t)] \left(\frac{t_{c1}}{T} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{t_{c2}}{T} n\pi \cos n\omega_n t - \frac{t_{c2}}{T} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{t_{c2}}{T} n\pi \cos n\omega_n t \right) \quad (3)$$

式中: $t_{c1} = t_i - t_b$; $t_{c2} = t_e - t_i$ 。

由于超声波椭圆振动频率远远大于再生颤振频率,谐波部分对振动系统所作的功为零,所以在考虑系统动态切削力时只需要考虑傅里叶级数展开式中的常数项,而其谐波对抗振稳定性的作用可以忽略。故椭圆超声波振动切削动态切削力可以简化成:

$$dF_y(t) = bk_c \frac{t_{c1} - t_{c2}}{T} [\mu y(t-\tau) - y(t)] \quad (4)$$

显然超声波椭圆振动的动态切削力在其他切削条件不变的情况下取决于 $\frac{t_{c1} - t_{c2}}{T}$,于是系统动力学可模型简化为

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = bk_c \frac{t_{c1} - t_{c2}}{T} [\mu y(t-\tau) - y(t)] \quad (5)$$

2 椭圆振动切削稳定性极限分析

设本转的切削的振动位移为

$$y(t)=A \sin(\omega t) \quad (6)$$

前一转的振动位移为

$$y(t-\tau)=A \sin(\omega t-\omega \tau)=y(t) \cos(\omega \tau)-\dot{y}(t) \frac{\sin(\omega \tau)}{\omega} \quad (7)$$

将上式代入(1)式,得

$$\ddot{y}(t)+\left(2 \omega_n \xi-\frac{\mu b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T} \sin(\omega \tau)}{\omega}\right) \dot{y}(t)+\left(\omega_n^2-b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}(1-\mu \cos(\omega \tau))\right) y(t)=0 \quad (8)$$

对(8)式进行拉氏变化得:

$$s^2+\left(2 \omega_n \xi-\frac{\mu b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T} \sin(\omega \tau)}{\omega}\right) s+\omega_n^2-b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}(1-\mu \cos(\omega \tau))=0 \quad (9)$$

由控制理论知 $s=\sigma+i \omega$,当 $\sigma=0$ 时系统处于稳定与不稳定的临界状态^[6],将 $s=i \omega$ 代入(9)式得

$$\begin{aligned} \omega_n^2-\omega^2+2 \omega_n \omega \xi i &=b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}(1-\mu \cos(\omega \tau))+ \\ &\mu b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T} \sin(\omega \tau) i \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式成立的充要条件为等式两边的实部和虚部分别相等^[7-8],则有

$$\omega_n^2-\omega^2=b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}(1-\mu \cos(\omega \tau)) \quad (11)$$

$$2 \omega_n \omega \xi=\mu b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T} \sin(\omega \tau) \quad (12)$$

令 $\lambda=\frac{\omega}{\omega_n}$,则(11)和(12)式可转化为

$$1-\lambda^2=b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T k}(1-\mu \cos(\omega \tau)) \quad (13)$$

$$2 \lambda \xi=b k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T k} \mu \sin(\omega \tau) \quad (14)$$

由于再生颤振在 $\mu=1$ 时稳定性最差,相应的极限切削宽度最小,故以此条件由(13)和(14)式推导出超声波椭圆振动切削的极限切削宽度:

$$b_{\lim \text{ evc}}=\frac{-k\left[\left(1-\lambda^2\right)^2+\left(2 \xi \lambda\right)^2\right]}{2 k_c \frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}(1-\lambda^2)} \quad (15)$$

同理可得普通车削的极限切削宽度

$$b_{\lim \text{ oc}}=\frac{-k\left[\left(1-\lambda^2\right)^2+\left(2 \xi \lambda\right)^2\right]}{2 k_c(1-\lambda^2)} \quad (16)$$

由于 $\frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}<1$,因此 $b_{\lim \text{ evc}}>b_{\lim \text{ oc}}$

而车床转速

$$n=\frac{60 f_n \lambda}{N+1-\frac{\varphi_{\lim}}{2 \pi}} \quad (17)$$

式中: $\varphi_{\lim}=2 \tan^{-1}\left|\frac{1-\lambda^2}{2 \xi \lambda}\right|$; $f_n=\frac{\omega_n}{2 \pi}$; $N=0, 1, 2, 3 \cdots$ ^[9]。

3 计算机仿真

将机床切削系统动力学参数($k, \omega_n, \xi, \mu, k_c$)代入式(15)和式(17),即可求得 N 值取为0,1,2...时所对应的主轴转速 n 值和极限切削宽度 b_{\lim} 值。据此即可以绘制以极限切削宽度 b_{\lim} 为纵坐标,以机床主轴转速 n 为横坐标的机床切削稳定极限图,如图3和4所示。将式(15)式对 λ 求导,得当 $\lambda=\sqrt{1+2 \xi^2}$ 时, $b_{\lim \text{ evc}}$ 取得最小值:

$$b_{\lim \text{ evc}(\min)}=\frac{2 k \xi(1+\xi)}{\frac{t_{c1}-t_{c2}}{T} k_c} \quad (18)$$

当切削宽度取在耳垂线以下时,无论切削转速 n 取多大,都不会发生颤振,称为稳定区;当切削宽度取在耳垂线之上时,无论切削转速 n 取多大,都会发生颤振。具体仿真参数值如下:

$k=453 \text{ N/mm}$; $\omega_n=2 \pi \times 260 \text{ rad/s}$; $\mu=1$;

$k_c=105.8 \text{ N/mm}$; $\xi=0.05$; $\frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}=\frac{1}{10}$ 。

由计算机仿真结果可以看出,当机床转速达到 $n=726 \text{ r/min}$ 时,加工系统由分离型超声波椭圆振动切削进入不分离型状态;当加工系统处于不分离状态时比普通切削有更大的极限切削宽度,在切削条件一定的情况下其极限切削宽度取

决于 $\frac{t_{c1}-t_{c2}}{T}$ 。这也意味着超声波椭圆振动切削有更高的系统稳定性,对提高切削加工质量,加工弱刚度零件和提高生产效率是非常有意义的。

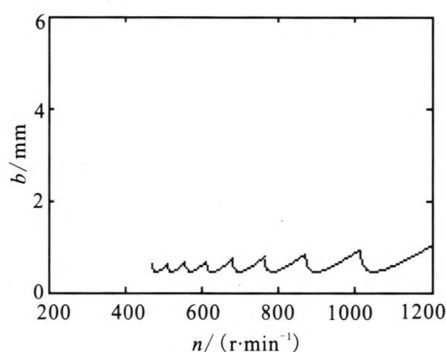


图3 普通切削稳定极限图

Fig. 3 Stability limit curve of ordinary cutting

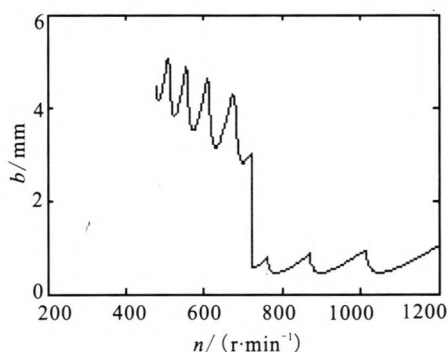


图4 超声波椭圆振动切削稳定极限图

Fig. 4 Stability limit curve of ultrasonic elliptical vibration cutting

4 弱刚度的零件精密切削

图5是切削实验装置。在相同的切削条件下,用普通切削和椭圆振动切削这两种切削加工方法对弱刚度零件进行了切削加工,分析这两种切削加工方法对工件已加工表面的影响。

切削条件:主轴转数 $n=45$ r/min, 进给量 $f=0.02$ mm/r, 切削深度 0.025 mm, 刀具前角 0° 、后角 7° , 刀尖圆弧半径 0.1 mm; 工件材料: 高温合金GH1131; 刀具材料: K10; 超声波椭圆振动参数: 频率 $f=20.98$ kHz, 振动轨迹为长轴半径

$8\text{ }\mu\text{m}$, 短轴半径 $4\text{ }\mu\text{m}$ 。试验用作者研制的超声波椭圆振动系统在普通机床上进行。

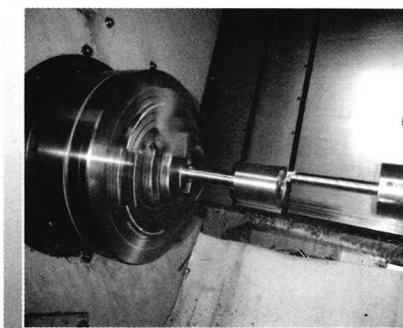


图5 超声波椭圆振动切削实验装置

fig. 5 Experiment device for ultrasonic elliptical vibration cutting

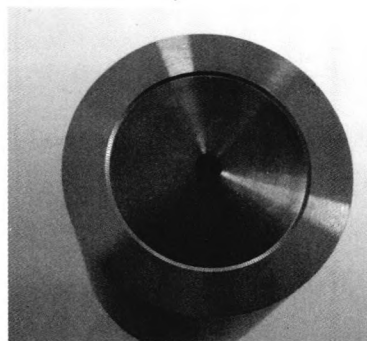
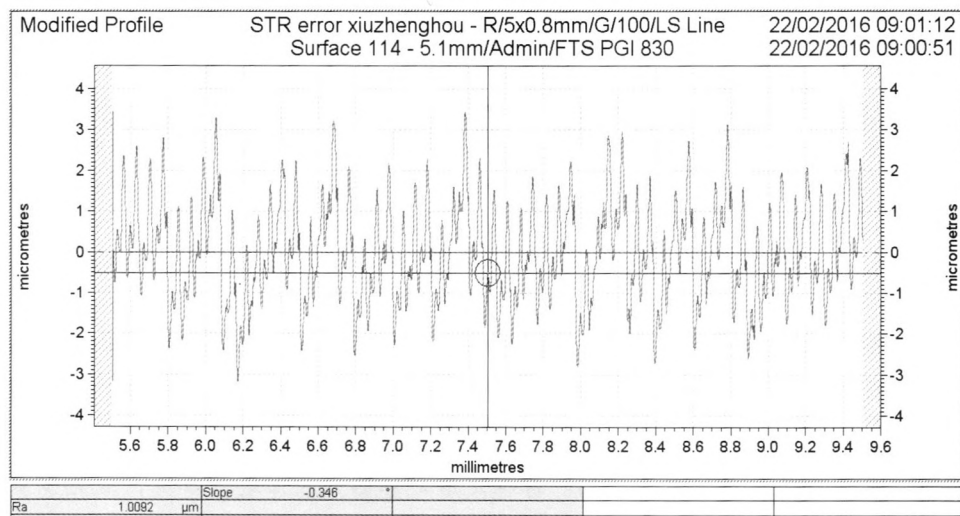


图6 已加工表面

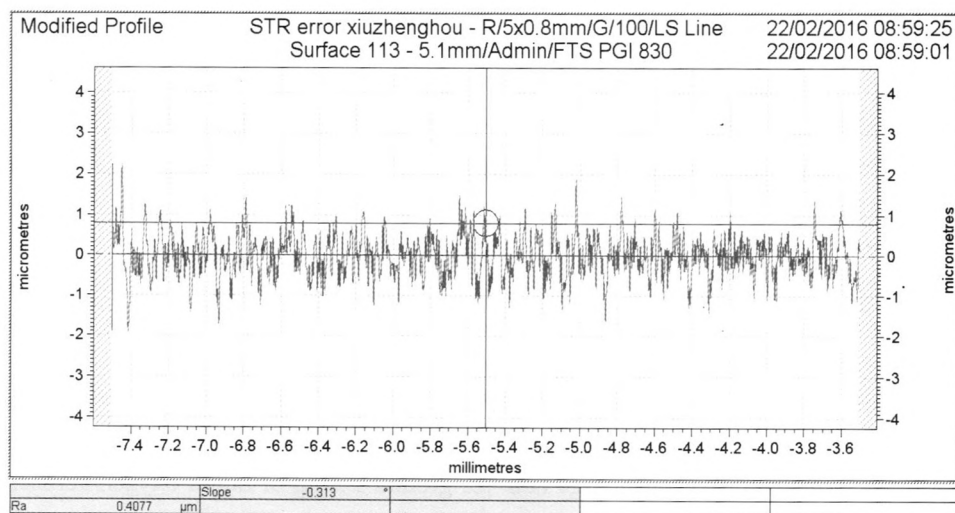
Fig. 6 Picture of machined surface

图6是用这两种方法切削加工的表面,普通切削加工的工件表面粗糙,椭圆振动切削的工件表面光滑。图7是测量的粗糙度曲线,普通切削加工的表面粗糙度约为 $1.0\text{ }\mu\text{m}$; 椭圆振动切削加工的表面粗糙度约为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

图8是用两种切削方法加工的表面局部放大的微观形貌,普通切削加工表面有明显的振动条纹,说明切削过程中发生颤振,它导致已加工表面质量恶化。与普通切削相比,超声波椭圆振动切削时工件已加工表面无振动条纹,只有清晰的、规则的切削进给痕迹。试验结果表明椭圆振动切削能有效地抑制普通切削产生的颤振,能实现弱刚度的零件精密加工。



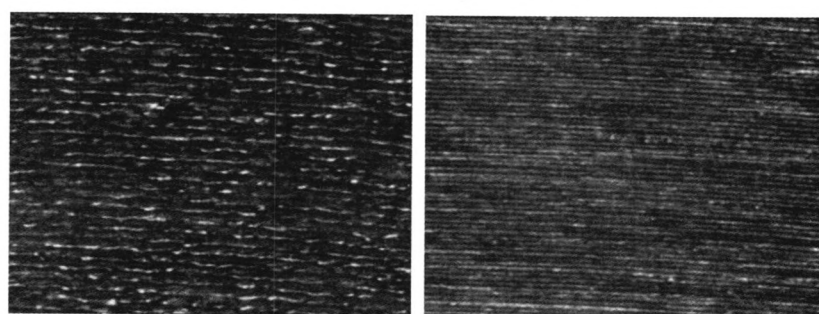
(a) 普通切削表面粗糙度



(b) 超声波椭圆振动切削表面粗糙度

图 7 已加工表面粗糙度

Fig. 7 Roughness of machined surface



(a) 普通切削微观形貌

(b) 超声波椭圆振动切削微观形貌

图 8 已加工表面形貌

Fig. 8 Morphology of machined surface

(下转第 92 页)

- 动机试验过程低温气动阀可靠性研究[C]. 中国航天可靠性学术交流会议论文集, 北京, 2013.
- [5] LIU Kun, ZHANG Yulin. A study on versatile simulation of liquid propellant rocket engine systems transients: AIAA 2000-3771[R]. Reston CA: AIAA, 2000.
- [6] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [7] 秦永涛, 曹文庆, 李党科, 等. 低温气动阀的人机环境可靠性评估方法[J]. 火箭推进, 2014, 40(2): 82-89.
- QIN Yongtao, CAO Wenqing, LI Dangke, et al. The man-machine-environment reliability evaluation method of cryogenic pneumatic valve[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(2): 82-89.
- [8] 赵万明. 液氧密度测量技术研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(4): 56-62.
- ZHAO Wanming. Research on liquid oxygen density measurement[J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(4): 56-62.
- [9] 李建军. 涡轮流量计在火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(3): 52-55.
- LI Jianjun. The application of turbo-flowmeter in the test of rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(3): 52-55.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 85 页)

5 结论

超声波椭圆振动切削中刀具以椭圆形的振动轨迹对工件进行切削加工, 理论分析、计算机仿真得到的极限切削宽度和切削稳定极限图以及弱刚度零件加工试验结果均表明超声波椭圆振动切削有更高的加工稳定性, 可以用于弱刚度零件精密加工。

参考文献:

- [1] SHAMOTO E, MORIEAKI T. Study on elliptical vibration cutting[J]. Annuals of CIPR, 1994, 43(1): 35-38.
- [2] MORIEAKI T. SHAMOTO E. Ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. Annuals of CIPR, 1995 (44): 31-34.
- [3] 马春翔, 胡德金. 超声波椭圆振动切削技术[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 67-70.
- [4] SHAMOTO E, MA C X, MORIWAKI T. Elliptical vibration cutting[J]. Journal of the japanese society for precision engineering, 1999, 65(4): 586-591.
- [5] MA C X, SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study of machine accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. International journal of machine tool and manufacture, 2004, (44): 1305-1310.
- [6] 于劲, 王立江. 分离型超声波振动切削动力学模型及其稳定性分析[J]. 振动工程学报, 1991, 4(2): 27-33.
- [7] 王晓军. 车削加工系统稳定性极限预测的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005.
- [8] 杨叔子, 杨克冲, 吴波. 机械控制基础 [M]. 4 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [9] 张军, 唐文彦, 强锡富. 再生型切削颤振稳定性极限的图解法[J]. 中国机械工程, 2000, 11(5): 496-498.

(编辑: 陈红霞)