

文章编号: 1000-6893(2006)04-0720-04

单激励超声椭圆振动车削薄壁筒实验研究

李 勋, 张德远

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

Research on Experiments of Single Actuator Driven Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Ultra thin Wall Parts

LI Xun, ZHANG De yuan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 通过对普通夹心式超声椭圆振动换能器结构的研究, 设计了一种能够在单一纵向激励的情况下产生椭圆振动的换能器结构, 利用有限元分析工具对换能器的结构进行分析, 并且利用光纤测振仪对单一纵向激励换能器进行了测量, 验证了可以通过单向激励产生椭圆振动。利用这种结构研制了一套单激励超声椭圆振动车削系统, 采用 PCD 刀具对 LY12 实心件和薄壁筒工件进行了精密切削实验, 实验结果表明椭圆振动切削可以大幅度降低切削力, 明显改善薄壁工件的形状精度, 同时工件还具有较好的表面粗糙度。

关键词: 薄壁件; 车削; 切削力; 超声振动; PCD 刀具

中图分类号: V261.2⁺1; TB115; TB552 文献标识码: A

Abstract: In many fields of high tech industry ultra thin wall parts are employed. In this paper, an asymmetrical structural model of the ultrasonic elliptical vibration transducer only with the longitudinal driven is presented through analyzing the model of the longitudinal vibration transducer. A system of the ultrasonic elliptical vibration cutting with the single longitudinal animation was developed. With the polycrystalline diamond (PCD) tool, the precision ultrasonic elliptical vibration experiments were carried out on LY12 and ultra thin wall parts. The results show that single actuator driven ultrasonic elliptical vibration cutting can reduce cutting forces and the deformation of the ultra thin wall parts effectively, and the surface roughness of the workpiece is about $R_a = 0.09 \mu\text{m}$.

Key words: ultra thin wall parts; cutting; cutting force; ultrasonic vibration; PCD tools

薄壁圆筒类零件在航空航天、兵器工业等领域应用广泛, 并且许多薄壁件在整个系统承担较重要的作用, 薄壁件的形位精度直接影响系统的整体性能。薄壁件在实际的加工中有很多的难题, 切削力以及夹具装夹力的释放都很容易引起零件的变形。由于切削特性的制约, 采用常规普通的切削技术, 单纯依靠增加刀具锋利度(如利用天然单晶金刚石刀具)、减少进刀量, 采用专用夹具, 虽也能降低切削力, 提高工件的形状精度, 但尚难达到理想的加工效果, 无法从根本上解决此类零件的精密加工问题^[1-4]。

利用单向超声振动加工也可以在一定程度上提高薄壁件的表面粗糙度和形状精度^[1,4], 但是还不能实现薄壁件的精密和超精密加工。超声椭圆振动加工能够大幅降低切削力和减小加工变形

的优点^[5], 通过对换能器的结构进行分析, 改变机械结构的参数, 研制出一种在结构非对称的情况下利用一路信号激励就可以产生椭圆振动的超声换能器, 并且利用人造多晶金刚石(PCD)刀具对薄壁铝筒进行车削实验, 取得了很好的工艺效果, 单激励超声椭圆振动切削大幅降低了切削力, 有效地提高了薄壁筒的形状精度, 较好的解决了薄壁筒形状精度不易保证的加工难题。

1 单激励超声椭圆振动换能器的研制

超声振动换能器是超声振动车削系统中最重要的组成部分, 一般情况下, 换能器自身有 3 种振动形式: 纵向振动、扭转振动和弯曲振动, 当换能器本身结构存在不对称的情况下, 就会出现一些复合振动, 比如纵扭复合、纵弯复合和弯扭复合。如果复合的 2 种振动之间存在一定的相位差, 那么在换能器的输出端就会产生椭圆振动。利用这

种换能器本身结构的不对称性, 适当调整换能器的结构参数, 就可以得到适合超声振动车削的椭圆振动形式^[6]。

根据换能器的设计原则和振动车削的实际加工要求, 应采用夹心式换能器, 此种结构具有输出功率大, 制造、安装简单等特点, 频率应在 20 000~ 30 000 Hz 之间, 同时为了使换能器结构存在自身的不对称性, 需要给换能器附加上一个刀具, 使之产生所需的纵弯复合椭圆振动。换能器的结构如图 1 所示(L 为附加刀具长度)。

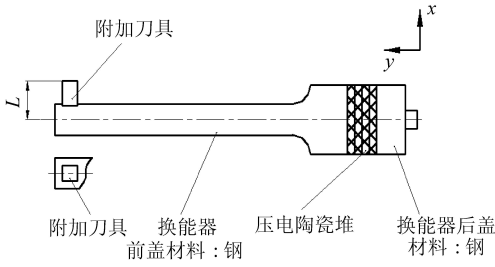


图 1 换能器结构示意图

Fig 1 Structure of the transducer

利用有限元分析软件对换能器模型进行模式分析, 得到换能器的纵弯振动模式如图 2 所示, 纵弯振动的固有频率为 22 500 Hz。

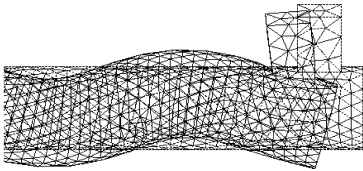


图 2 换能器纵弯复合振动模式

Fig 2 Mode of longitudinal bended

从计算的结构可以看出, 换能器的结构在附加刀块质量后, 在机械结构上就有不对称性, 这使换能器的振动模式也发生了相应的变化, 出现了一种纵弯复合的振动模式。适当调整换能器变幅杆的尺寸参数和附加刀具的长度 L (图 1 所示), 使纵弯复合振动的频率满足设计的要求。

在换能器纵弯复合振动的谐振频率附近, 给纵向振动压电陶瓷堆加载正弦交流电压, 观察附加刀具的振动形式, 验证换能器在结构不对称的情况下通过单一的纵向激励, 可产生纵弯复合椭圆振动。在压电陶瓷堆的 4 片压电陶瓷上加载 $800\cos(2\pi \times 22\ 500t)$ 的交流电压, 利用有限元静力学分析求解出在加载的条件下附加刀具刀尖的轨迹曲线如图 3、图 4 所示(参照图 1 坐标系)。

从图 3、图 4 可知在加载交流电压的情况下, 附加刀具在 x 向和 z 向都可以产生相应的交变位

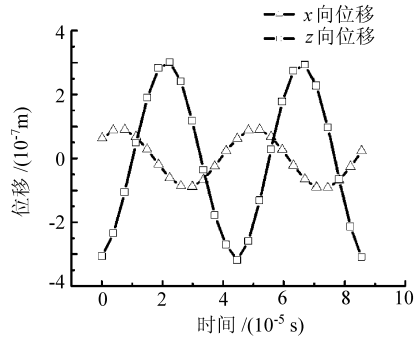


图 3 刀具 x 向和 z 向位移曲线

Fig 3 Amplitude of the tool point

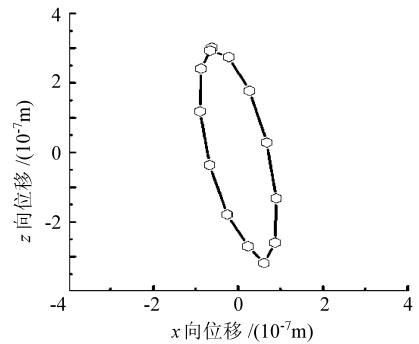


图 4 刀具椭圆振动轨迹

Fig 4 Vibration mode of longitudinal bended

移, 两者振幅比值在 1: 4 左右, 而且存在一定的相位差, 此时刀尖的运动轨迹就是一个椭圆, 椭圆的长轴和变幅杆的轴线的夹角大约在 7° 左右。

2 椭圆振动车削实验

2.1 椭圆振动形式测试

通过有限元分析和理论计算, 研制出一套单激励椭圆振动切削系统, 为了进一步了解椭圆振动形式和振动的方向, 利用 2 个美国 PHILTEC 精密动态测量仪 (PHILTEC made in U. S. A precision dynamic measurements) 对附加刀块 x 向和 z 向振动进行动态测量, 利用示波器观察输出的振动信号如图 5 和图 6 所示。

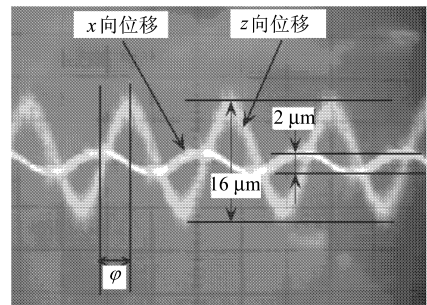


图 5 换能器 x 向和 z 向位移曲线

Fig 5 Curves of the two directional amplitude measured

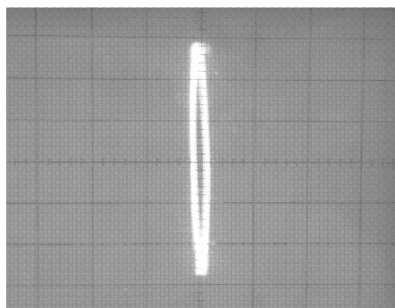


图 6 纵弯复合椭圆振动轨迹

Fig. 6 Compound vibration mode of longitudinal bended

从图 5、图 6 可知 x 向与 z 向的振幅比值在 1:8, 相位差在 100° 左右, 两者复合后的振动轨迹为如图 6 所示的椭圆。因为结构的不对称性使换能器产生纵弯复合椭圆振动, 所以这种椭圆振动的长轴方向不会与 z 向平行, 在实际应用中要调整换能器与铅垂线的夹角, 使椭圆振动的长轴与铅锤方向相互平行, 从而实现椭圆振动车削。

通过上述有限元分析和实际测试, 发现换能器的理论振动形式(如图 3 和图 4)和实际的测试结果(如图 5 和图 6)存在一定的偏差, 主要原因在于有限元分析的是理论上的等效模型, 得到的是一个理想的理论状态下的分析结果, 而实际测量结果受很多因素影响, 包括换能器的机械机构的加工精度、装配精度、材料的均一性以及测试的误差等影响。但是通过有限元分析可以在理论上起到指导作用, 找到影响换能器椭圆振动形式的主要因素, 实现参数优化。

2.2 普通车削和椭圆振动车削切削力实验

利用自行研制的单激励超声椭圆振动车削系统进行振动车削和普通车削的切削力对比实验, 加工条件如表 1 所示, 实心工件材料为 LY12, 直径为 $\varnothing 20$ mm。

表 1 椭圆振动车削实验条件

Table 1 Conditions of elliptical vibration cutting

机床设备	SF 235 精密仪表车床
主轴转速	200 r/min
进给量	40 $\mu\text{m}/r$
PCD 刀具	$\gamma_0 = 0^\circ$, $\alpha_0 = 15^\circ$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\kappa'_r = 45^\circ$, $r_{e0} = 1.2$ mm
切削液	酒精
振动频率	22.5 kHz

利用 Kistler 9256B2 型 3 向压电式精密测力仪对不同车削条件下的切削力进行测量, 得到图 7 和图 8。

从图 7、图 8 可知单激励超声椭圆振动车削可大幅降低切削力。当换能器的振幅为 $5 \mu\text{m}$ 时,

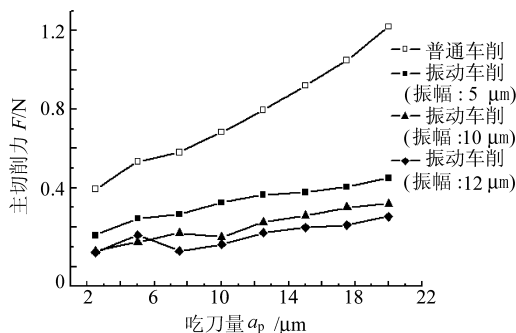


图 7 普通车削和振动车削的主切削力曲线

Fig. 7 Principal components of cutting force measured

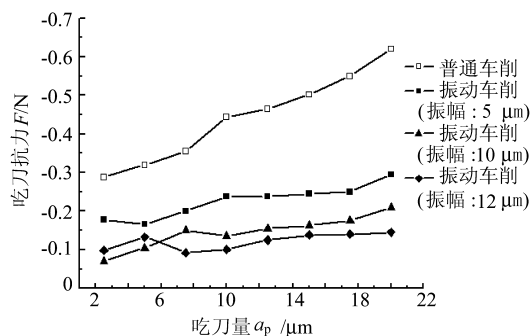


图 8 普通车削和振动车削吃刀抗力曲线

Fig. 8 Thrust components of cutting force measured

振动车削时的主切削力和吃刀抗力分别下降到普通车削时的 50% 和 45% 以下, 当换能器的振幅为 $12 \mu\text{m}$ 时, 振动车削的主切削力和吃刀抗力均下降到普通车削的 35% 以下。

2.3 超声椭圆振动车削形状精度实验

通过切削力实验可以看出, 单激励超声椭圆振动切削可以有效地降低切削力, 而在车削薄壁件的过程中, 影响工件形状精度的主要因素就是切削力。以下通过薄壁件振动车削实验来验证单激励超声椭圆振动车削在提高薄壁件形状精度方面的优势, 实验条件如表 1 所示, 换能器的振幅取 $8 \mu\text{m}$, 薄壁工件的安装状态、主要尺寸和测量位置如图 9 所示。

薄壁件切削实验过程首先经过“毛坯件装夹镗内孔车外圆”的定轴心过程, 保证薄壁件壁厚的均匀性, 此时薄壁件的壁厚一般在 0.8 mm 左右, 然后经过“吃刀 $15 \mu\text{m}$ (大约 20 次) \rightarrow 吃刀 $10 \mu\text{m}$ (大约 15 次) \rightarrow 吃刀 $5 \mu\text{m}$ (大约 15 次) \rightarrow 吃刀 $3 \mu\text{m}$ 以下”的过程使工件达到最终的加工尺寸。

利用单激励超声椭圆振动车削和普通车削分别加工出壁厚为 0.3 mm 的薄壁工件, 利用英国 Taylor Hobson 圆柱度测量仪依照图 9 所示位置进行圆柱度和圆度测量, 得到图 10、图 11。

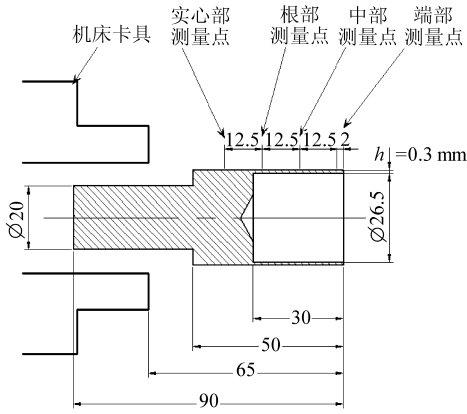
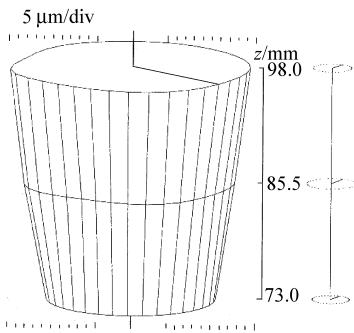


图 9 薄壁件切削及测量状态示意图

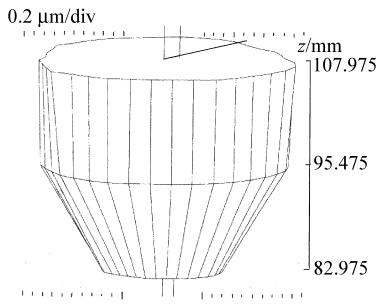
Fig. 9 Conditions of cutting and the measured places of ultrathin wall parts



(根部圆度: 0.46 μm; 中部圆度: 6.85 μm; 端部圆度: 9.55 μm)

图 10 普通车削薄壁件圆柱度: 22.08 μm

Fig. 10 Cylindricity of ultrathin wall part by conventional cutting: 22.08 μm



(根部圆度: 0.23 μm; 中部圆度: 0.23 μm; 端部圆度: 0.50 μm)

图 11 椭圆振动车削薄壁件圆柱度: 1.69 μm

Fig. 11 Cylindricity of ultrathin wall part by vibration cutting: 1.69 μm

由图 10 和图 11 的实验结果可以看出, 单激励超声椭圆振动车削在改善薄壁件形状精度方面有很大的优势, 在不用任何专用夹具的加工条件下, 实现薄壁件的精密车削, 与相同切削条件的普通车削和单向超声振动车削相比, 大幅度地提高薄壁工件的圆度和圆柱度, 此时薄壁件的表面粗糙度为 0.0919 μm。

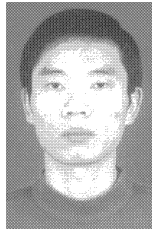
由此可以得出, 在加工过程中, 切削力是影响

薄壁件形状精度的主要因素, 利用单激励超声椭圆振动车削技术可以有效地降低切削力, 从而减小工件的加工变形, 有效地改善薄壁件的形状精度, 实现薄壁件的精密和超精密车削。

参 考 文 献

- [1] 焦锋, 赵波, 刘传绍, 等. 超声振动切削超薄壁精密零件的圆度误差试验研究[J]. 现代制造工程, 2002, 33(8): 53-55.
Jiao F, Zhao B, Liu C S, et al. Research on roundness error of precise ultrathin wall parts in ultrasonic vibration cutting[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2002, 33(8): 53-55. (in Chinese)
- [2] 王志刚, 何宁, 武凯, 等. 薄壁零件加工变形分析及控制方案[J]. 中国机械工程, 2002, 13(2): 114-117.
Wang Z G, He N, Wu K, et al. Analysis and control approach for machining deflection of thin-walled workpiece[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(2): 114-117. (in Chinese)
- [3] 徐可伟, 陈斌, 朱训生, 等. 薄壁零件的超声振动精密切削研究[J]. 航空精密制造技术, 2001, 37(4): 1-5.
Xu K W, Chen B, Zhu X S, et al. A study on the precision ultrasonic vibration cutting of thin wall pieces[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 13(2): 114-117. (in Chinese)
- [4] Gao G F, Zhao B, Jiao F, et al. Research on the influence of the cutting conditions on the surface microstructure of ultrathin wall parts in ultrasonic vibration cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(2): 60-70.
- [5] Moriawaki T, Shamoto E. Ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. Annals of CIRP, 1995, 44(1): 31-34.
- [6] Burhanettin K, Serra C, Kenji U. Piezoelectric motor using two orthogonal bending modes of a hollow cylinder[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2002, 49(4): 495-500.

作者简介:



李 勋(1980-) 河南汝州人, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院博士生, 主要从事超声振动精密及超精密加工、精密测力仪和超声振动换能器设计方面的研究工作。

E-mail: lixun@m.e.buaa.edu.cn



张德远(1963-) 北京航空航天大学机械制造及自动化系主任, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 生物加工与纳米技术、MEMS加工与微系统技术、振动加工与功率超声技术。部级奖励 5 项, 国家发明专利 6 项, 发表论文 90 余篇。E-mail: zhangdy@buaa.edu.cn

(责任编辑: 蔡 斐)