

# 外圆超声珩磨加工试验研究

马臻, 祝锡晶, 张颖

中北大学山西省先进制造技术重点实验室

**摘要:** 设计一套外圆超声珩磨装置, 借助 ANSYS 软件对该装置的变幅杆和珩磨头进行整体动力学分析。在相同加工参数下分别采用传统的普通外圆珩磨和附加超声的外圆珩磨对 SUS304 不锈钢外圆柱表面进行加工试验。在试验中采用单因素变量法, 分别改变工件回转速度与珩磨深度, 对比外圆超声珩磨与普通外圆珩磨的加工效果, 研究影响工件表面质量的主要因素。试验结果表明: 珩磨深度、工件回转速度是影响表面粗糙度的主要因素, 与普通外圆珩磨相比, 附加超声的外圆珩磨表面粗糙度降低约 10%。

**关键词:** 外圆珩磨; 超声振动; 变幅杆; 有限元分析

**中图分类号:** TG580.67; TH161.14

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Outer Cylindrical Ultrasonic Honing Machining

Ma Zhen, Zhu Xijing, Zhang Ying

**Abstract:** A set of outer cylindrical ultrasonic honing device is designed, then the dynamic analysis of the horn and honing head body is carried out by means of ANSYS software. Under the control of the same processing parameters, the outer cylinder surface of SUS304 stainless steel is tested by traditional conventional cylindrical honing and ultrasonic outer cylindrical honing. In the experiment, the single factor variable method is used by changing the workpiece rotation speed and honing depth respectively. By comparing with the effects of ultrasonic outer cylindrical honing and conventional cylindrical honing, the principal factors affecting the surface quality of the workpiece are studied. The results show that the honing depth and the workpiece rotation speed are the main factors influencing the roughness of the workpiece, the surface roughness in the test of ultrasonic outer honing is lower than that of the conventional outer honing test about 10%.

**Keywords:** cylindrical honing; ultrasonic vibration; ultrasonic horn; finite element analysis

## 1 引言

功率超声振动珩磨加工技术多数针对于内圆或内孔的加工, 而对于外圆柱的超声珩磨研究较为少见。根据功率超声振动珩磨具有磨削力小、磨削温度低、油石不易阻塞、加工效率高、加工质量高等优点, 其同样适用于外圆柱的加工<sup>[1]</sup>。

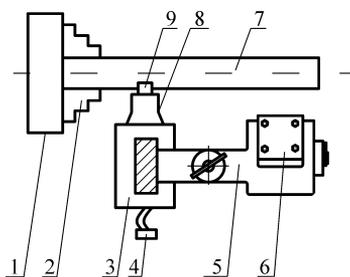
圆柱类零件外圆表面通常采用砂轮磨削的方式进行加工<sup>[2]</sup>, Ali Zahedi 等<sup>[3]</sup>采用有限元仿真和磨削试验的方法, 研究了氧化铝—氧化锆陶瓷材料去除特性和表面特性。张洪丽<sup>[4]</sup>分别从轴向、切向、径向对超声振动辅助磨削机理进行了研究。本文针对车床结构, 借助 ANSYS 软件设计了一套外圆超声珩磨装置<sup>[5,6]</sup>, 现有的外圆超声珩磨装置多采用珩磨头相对于工件轴向布置的形式, 即油石条以轴向超声振动方式珩磨工件外圆。

本文探索珩磨头径向布置于加工区并附加超声

振动, 为确保超声振动加工装置的加工特性<sup>[7]</sup>, 采用对比法控制单因素变量, 分别采用外圆超声珩磨装置和普通外圆珩磨装置对 SUS304 不锈钢进行珩磨试验。

## 2 装置设计及仿真

以 MT9510 先导式小型精密车钻铣多功能机床参数为基础, 设计了一套将超声振动施加于珩磨头上的外圆超声珩磨装置(见图 1)。采用 SHT - hj1520K 超声波发生器和夹心式压电换能器。



1. 机床 2. 三爪卡盘 3. 外罩 4. 超声波发生器 5. 卡具  
6. 车刀架 7. 工件 8. 超声变幅杆 9. 超声珩磨头部分

图 1 外圆超声珩磨装置

基金项目: 国家自然科学基金(51275490); 中北大学研究生科技基金(20161315)

收稿日期: 2017 年 5 月

### 2.1 变幅杆与珩磨头的整体设计

如图2所示,对该装置进行整体设计(包括变幅杆、珩磨头),其中 $L$ 为装置总长度; $D_1$ 、 $D_2$ 分别为变幅杆的小端直径和大端直径;变幅杆材料选择Ni-Cr合金。考虑到设计的珩磨头体积较小,为保证优良的超声传输性能,珩磨头材料选择TC4钛合金<sup>[8]</sup>。

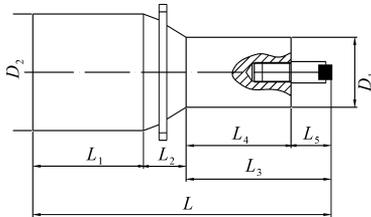


图2 变幅杆和珩磨头设计

变幅杆具有聚能、有效地向负载传输能量的作用,所以选择变幅杆应考虑三方面的因素<sup>[9-11]</sup>:①设计结构的简单性,设计数据的准确性;②加工的难易程度,避免因加工误差较大从而影响变幅杆的传输性能;③具有较准确的放大系数,良好的工作稳定性。因此,采用小端带有圆柱杆的复合圆锥形变幅杆。

复合圆锥形变幅杆的工作频率为20kHz,纵波声速为5895m/s,面积系数 $N = 1.67$ ,圆波数 $K = 0.0213$ ,设计参数见表1,依据该表进行各部分参数计算。

表1 变幅杆设计参数

材料	密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(GPa)	泊松比
Ni-Cr合金	8000	206	0.3
TC4合金	4500	110	0.34

超声变幅杆的运动形式为简谐振动,波动方程为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} + K^2 \xi = 0 \quad (1)$$

式中, $\xi = \xi(x)$ 为质点位移函数; $A = A(x)$ 为变截面函数; $K$ 为圆波数, $K = \frac{\omega}{c}$ ,其中 $\omega$ 为角频率, $c$ 为超

声在变幅杆中的传播速度, $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ , $E$ 为弹性模量, $\rho$ 为材料密度。

取 $L_2$ 为27mm, $D_1$ 为36mm, $D_2$ 为60mm,复合圆锥形变幅杆的超声频率方程为

$$\frac{N\alpha}{K} - \tan Kl_3 - \tan(Kl_2 + \alpha_2) = 0 \quad (2)$$

式中, $\alpha = \frac{D_2 - D_1}{D_2 L_2} = \frac{N - 1}{NL_2}$ , $N = \frac{D_2}{D_1}$ ; $\alpha_2 = \arctan \frac{\alpha}{K}$ 。

位移节点函数为

$$Kx_0 - Kl_2 - (Kl_3 - \frac{\pi}{2}) = 0 \quad (3)$$

放大系数为

$$M_p = \left| N(\cos Kl_2 - \frac{a}{K} \sin Kl_2) \frac{1}{\cos Kl_3} \right| \quad (4)$$

复合圆锥形变幅杆优势较为全面,具有较大的放大系数和良好的稳定性,结构简单且易于加工<sup>[12]</sup>。由于试验所设计的珩磨头体结构简单,并且形状较小,因此考虑把珩磨头体与所设计的变幅杆做整体分析(见图2), $L_4$ 与 $L_5$ 作为变幅杆 $L_3$ 部分进行整体分析。

珩磨头由带螺柱的油石座和油石组成,因此珩磨头与变幅杆通过螺柱固连,所以需要在复合圆锥形变幅杆的小端攻一个公称直径为10mm的内螺纹孔。珩磨装置整体设计尺寸见表2。

表2 珩磨装置整体设计尺寸

放大系数	位移节点 $x_0$ (mm)	总长 $L$ (mm)	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
2.96	27.75	153.5	57	27	69.5	54.5	15

### 2.2 装置有限元分析

利用ANSYS15.0软件对变幅杆与珩磨头整体进行动力学分析,主要进行模态分析和谐响应分析。通过SolidWorks软件建立装置的三维模型,并导入ANSYS15.0中。考虑分析过程中的合理性,忽略变幅杆小端部分螺纹孔的影响,对变幅杆、珩磨头(带螺柱的油石座和油石)做整体的模态分析。

单元类型选择SOLID185,采用四面体自由网格进行划分,利用分块Lanczos法特征值求解器进行求解,提取模态阶数为10阶,不考虑预应力,模态频率范围选择19-21kHz。

图3为变幅杆、珩磨头整体模态分析的总位移云图。可见,当频率达到19.672kHz时,与理论值20kHz接近,误差在允许范围5%-10%之内,珩磨头体处振幅位移最大,变幅杆法兰盘处的位移几乎为0。

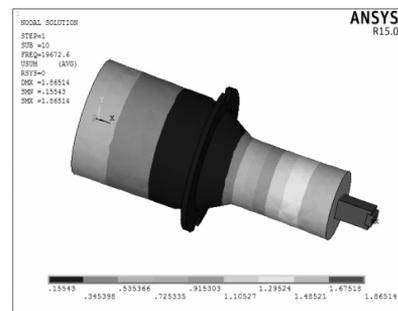


图3 装置整体模态分析

选用完全法对变幅杆、珩磨头体的整体做谐响

应分析,打印输出格式:实部+虚部输出,方程求解器选择 Program Chosen,取激振位移的幅值为 $10\mu\text{m}$ ,同时在轴向施加随时间按正弦规律变化的周期性载荷。强制频率范围选择 $19.5-20.5\text{kHz}$ ,子步数为20。

图4为变幅杆和珩磨头体的整体谐响应分析总位移云图。分析可知,在 $19.650\text{kHz}$ 的共振频率下,珩磨头处的位移振幅最大,同时变幅杆法兰盘处位移最小。珩磨头处的位移振幅为 $\text{SMX} = 0.298\text{E} - 04\text{m}$ ,与激振幅值相比,放大系数为2.98,接近理论计算值2.96,所以仿真结果符合设计要求,可以进行加工试验研究。

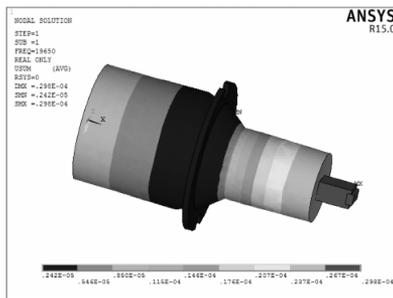


图4 装置整体谐响应分析

### 3 试验研究

#### 3.1 试验目的及条件

通过试验,对比超声外圆珩磨与普通外圆珩磨,探究附加超声后的外圆珩磨是否能够降低工件外圆表面粗糙度,并找出影响工件表面粗糙度值的主要因素。

珩磨头材料为TC4钛合金,油石为CBN磨料,油石通过环氧树脂粘接剂粘接在珩磨头的卡槽中,工件材料为SUS304不锈钢,装卡于机床三爪卡盘处,超声珩磨设备通过夹具安装至机床刀架部位,相对于工件径向布置,调试设备后进行试验。保持往复速度 $3\text{m}/\text{min}$ ,依次改变工件回转速度、珩磨深度,采用单因素控制变量法,每组试验加工时间为 $5\text{min}$ 。

试验机床为ML9510小型车削钻铣多功能机床,主轴转速范围 $(100-2000 \pm 10\%) \text{r}/\text{min}$ ,输出功率 $150\text{W}$ ;超声珩磨设备为SHT-hj1520K超声波发生器;采用JB-5C粗糙度测量仪测量粗糙度;珩磨油石CBN,粒度W20;工件尺寸 $\phi 15\text{mm} \times 60\text{mm}$ ,工件材质SUS304不锈钢,工件回转速度 $50\text{r}/\text{min}$ 、 $100\text{r}/\text{min}$ 、 $150\text{r}/\text{min}$ 、 $200\text{r}/\text{min}$ ,珩磨深度 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ ;珩磨头往复速度 $3\text{m}/\text{min}$ ;冷却液采用水基珩磨液。

#### 3.2 试验结果分析

分别采用普通外圆珩磨和超声外圆珩磨对SUS304不锈钢外圆柱表面进行珩磨对比试验。试验过程中保证往复速度不变,先后改变工件回转速度与珩磨深度,探究回转速度与珩磨深度在附加超声前后对试件外圆柱表面粗糙度的影响。

如图5所示,往复速度为 $3\text{m}/\text{min}$ ,珩磨深度为 $15\mu\text{m}$ ,工件回转速度对普通珩磨和超声珩磨影响基本一致。随工件回转速度的提高,粗糙度值均呈现逐渐下降的趋势,超声珩磨下降较为明显。由于超声的引入,较小的珩磨力和磨削温度在一定程度上减少了材料内部微裂纹的产生,改善了加工表面质量;随着回转速度的继续增加,附加超声的外圆珩磨工件表面粗糙度有变大的趋势。

如图6所示,往复速度为 $3\text{m}/\text{min}$ 、工件回转速度为 $100\text{r}/\text{min}$ 时,随着珩磨深度的变大,两种加工方式下的工件表面粗糙度整体呈现上升的趋势。对于外圆超声珩磨,在一定范围内,增大珩磨深度有助于工件表面质量的改善。但随着珩磨深度的继续增大,磨粒切入工件表面深度变大,对工件表面刻划增大,从而造成工件表面粗糙度增大。

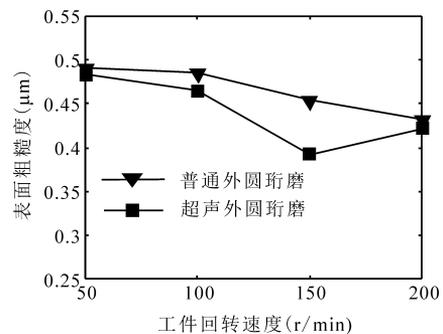


图5 工件转速对表面粗糙度影响

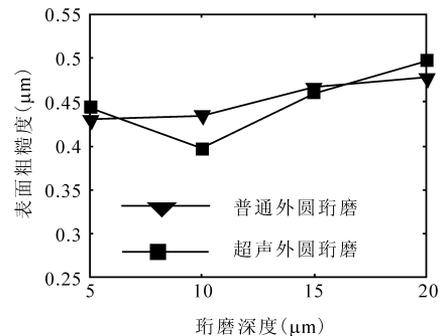


图6 珩磨深度对表面粗糙度的影响

### 4 结语

设计了将超声附加在珩磨头上的外圆超声珩磨装置,借助ANSYS15.0软件对变幅杆和珩磨头进行

整体的动力学分析。通过对比试验,分别采用超声珩磨和普通珩磨对 SUS304 不锈钢外圆柱表面进行珩磨试验,得出如下结论:

(1)借助 ANSYS15.0 软件对变幅杆、珩磨头进行整体模态分析和谐响应分析,仿真结果符合设计与试验要求。

(2)与普通外圆珩磨相比,在合理选择加工参数的条件下,外圆超声珩磨加工方式能够降低工件表面粗糙度约 10%。

(3)工件回转速度和珩磨深度是影响工件表面质量的主要因素。

试验结果表明,附加超声的外圆珩磨在加工表面质量上优于普通外圆珩磨。

### 参考文献

- [1] 祝锡晶. 超声光整加工及表面成型技术[M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2005.
- [2] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [3] Ali Zahedi, Taghi Tawakoli, Javad Akbari. Energy aspects and workpiece surface characteristics in ultrasonic-assisted cylindrical grinding of alumina-zirconia ceramics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 90:16-28.
- [4] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [5] 张伟. 超声振动外圆珩磨仿真及装置研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [6] 张小强. 不锈钢阀芯外圆柱超声珩磨装置设计及试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [7] 祝锡晶. 功率超声振动珩磨技术的基础与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [8] Nik M G, Movahhedy M R, Akbari J. Ultrasonic-assisted grinding of Ti6Al4V alloy [J]. Procedia Cirp, 2012, 1(1): 353-358.
- [9] 马付建, 康仁科, 董志刚, 等. 带中心孔的复合超声变幅杆设计及性能分析[J]. 机械设计, 2015(6): 51-55.
- [10] 王璟, 祝锡晶. 工件超声振动电火花线切割复合加工试验研究[J]. 工具技术, 2016, 50(9): 23-26.
- [11] Abdullah A, Shahini M, Pak A. An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer [J]. Journal of Electroceramics, 2009, 22(4): 369-382.
- [12] 刘垚, 轧刚. 圆柱圆锥复合型变幅杆的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 264-266.

第一作者: 马臻, 硕士研究生, 中北大学机械与动力工程学院, 030051 太原市

First Author: Ma Zhen, Postgraduate, School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

## 征 订

### 《常用孔加工刀具》

### 《高效高精度孔加工刀具》

《常用孔加工刀具》和《高效高精度孔加工刀具》是由全国刀具标准化技术委员会组织国内部分长期从事孔加工刀具设计、制造和使用方面有实践经验的专家和工程技术人员编写而成, 内容理论联系实际、实用方便、深入浅出, 为广大工程技术人员选择、使用、设计、制造常用孔加工刀具和高效高精度孔加工刀具提供了比较全面、实用的工具。

《常用孔加工刀具》主要内容有: 孔加工刀具材料及表面热处理、高速钢直柄类麻花钻、高速钢锥柄麻花钻、改进型麻花钻、焊接硬质合金钻头、整体硬质合金钻头、中心钻、铤钻、钢板钻、扩孔钻、孔加工刀具的测量技术等。《高效高精度孔加工刀具》主要内容有: 可转位(机夹式)麻花钻、齿冠钻、深孔钻、镗孔刀具、铰孔刀具、珩磨工具、复合孔加工刀具、金刚石、立方氮化硼钻头。

《常用孔加工刀具》约 50 万字, 《高效高精度孔加工刀具》约 45 万字, 采用小 16 开精装印刷。

《常用孔加工刀具》和《高效高精度孔加工刀具》由中国质检出版社和中国标准出版社出版, 定价均为 80 元/册。

购书联系: 成都工具检测所 曾宇环

电话: 028-83255594

E-mail: sac-tc91@163.com

