

# 内孔光整可调珩磨头的理论分析与试验研究

陈世彬<sup>1,2</sup>, 杨胜强<sup>1,2</sup>, 李文辉<sup>1,2</sup>

(1.太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024; 2.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

**摘 要:** **目的** 目前对内孔的珩磨加工, 一种珩磨头只能加工一种口径的内孔, 加工尺寸单一, 适应性差。为了提高珩磨头的通用性, 适应小批量、多规格珩磨加工, 介绍一种尺寸可调的珩磨头。**方法** 对珩磨头尺寸调节原理进行了介绍, 并分析了珩磨时工件所受的珩磨力以及珩磨头的运动情况。用 SolidWorks 建立了装置的三维模型, 并加工出了适应孔径为 95~125 mm 的珩磨头实物样机。通过对内径为  $\phi 98$  mm 和  $\phi 106$  mm 的不锈钢钢管进行加工实验, 加工 6 min 后, 获取了表面粗糙度  $Ra$  变化曲线和加工后的表面形貌。**结果** 加工后  $\phi 98$  mm 管的表面粗糙度  $Ra$  值由  $2.174\ \mu\text{m}$  降低到  $0.869\ \mu\text{m}$ ,  $\phi 106$  mm 管的表面粗糙度由  $1.582\ \mu\text{m}$  降低到  $0.758\ \mu\text{m}$ 。加工后的工件表面变得光滑、明亮, 表面形貌得到明显改善。**结论** 珩磨头结构简单易于实现, 在普通机床上即可使用, 通过实验验证了装置的可行性。

**关键词:** 光整加工; 珩磨头; 可调; 珩磨力; 运动分析; 试验研究

**中图分类号:** TG580.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)05-0224-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.035

## Theoretical Analysis and Experimental Study of an Adjustable Honing Head for Hole Finishing

CHEN Shi-bin<sup>1,2</sup>, YANG Sheng-qiang<sup>1,2</sup>, LI Wen-hui<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China)

**ABSTRACT:** **Objective** At present, a honing head can only hone holes with a single size, which is poor in suitability. In order to improve the versatility of honing head and to adapt low-volume and multi-standard honing, an adjustable honing head was introduced. **Methods** Adjustment principle of this honing head was introduced. The honing force suffered by workpiece and the movement of this honing head were analyzed. The 3D modeling was built using the software SolidWorks, and the physical prototype which adapted to the inner diameter from 95 mm to 125 mm was manufactured. Experiments were carried out using stainless steel pipe with inner diameter of 98 mm and 106 mm respectively. After 6 minutes of honing, the  $Ra$  curve and surface

收稿日期: 2016-01-18; 修订日期: 2016-04-27

Received: 2016-01-18; Revised: 2016-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50675149)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(50675149)

作者简介: 陈世彬 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 精密零件表面光整加工。

Biography: CHEN Shi-bin(1990—), Male, Master degree student, Research focus: surface finishing of the precision parts.

通讯作者: 杨胜强 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事精密零件表面光整加工技术研究。

Corresponding author: YANG Sheng-qiang(1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface finishing of the precision parts.

topography were acquired. **Results**  $R_a$  decreased from  $2.174\ \mu\text{m}$  to  $0.869\ \mu\text{m}$  for the stainless steel pipe with inner diameter of  $98\ \text{mm}$ , and  $R_a$  decreased from  $1.582\ \mu\text{m}$  to  $0.758\ \mu\text{m}$  for the one with inner diameter of  $106\ \text{mm}$ . The surface became smooth and bright, and the surface topography was significantly improved. **Conclusion** The honing head described in this article was simple and easy to use, and it could be used on general machine tool. The feasibility of this device was verified by experiments.

**KEY WORDS:** finishing; honing head; adjustable; honing force; motion analysis; experimental research

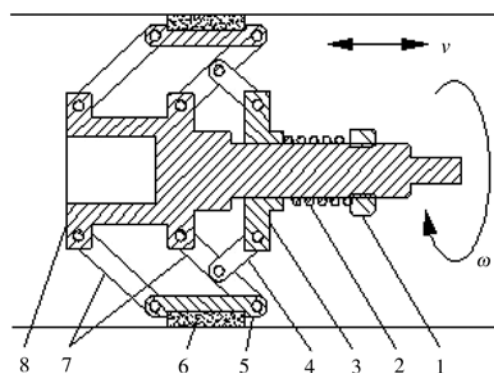
零件在从毛坯到成品的过程中，总会在表面留有不同程度的粗糙表面和各种缺陷，如飞边毛刺、棱边残缺、表面凹凸不平、微观裂纹等。它们的产生与存在不仅影响着零件本身的质量和使用寿命，也会影响装配后产品整机的性能和寿命。为了改善零件的表面质量，提高零件的使用性能，并保证产品的整机性能，零件在获得了规定的尺寸精度和几何精度后，还需进行表面光整加工。所谓光整加工技术是指机械加工中旨在提高零件表面质量的各种加工方法和加工技术，简称光整技术<sup>[1-3]</sup>。

机械加工中，孔加工约占加工总量的三分之一<sup>[4]</sup>，且孔常与轴类零件配合使用，因此对其表面质量要求较高。然而，孔加工是半封闭式加工，无论散热、排屑还是切削液浇注都比较困难，因此对孔进行机械加工时，常会在内孔表面留有各种缺陷。这不但影响了孔类零件的性能，对其配合后的机械产品的使用性能也是严峻的考验。珩磨是利用镶嵌在珩磨头上的油石（又称珩磨条）对待加工表面进行的精加工的过程。珩磨作为传统的内孔光整加工手段，已经得到广泛的应用<sup>[5-9]</sup>。但是传统的珩磨头都是针对专门的孔径而设计，这样就导致了一种珩磨头只能针对某一口径的内孔表面进行珩磨，其斜楔状的调整锥虽然可以进行小范围调节，但也主要是为了提高油石的利用率而设计。这极大降低了珩磨头的使用范围，尤其是对于小批量、多规格生产造成了极大的局限。

程德本在文献<sup>[10]</sup>中介绍了一种基于双联-齿差行星轮系的可调珩磨头，具有快调和微调功能。杨沁等人通过一套凸轮调节机构设计了一种尺寸可调的珩磨头，并申请了发明专利<sup>[11]</sup>。从检索的文献来看，目前有关大尺寸可调珩磨头的研究甚少。本文介绍的尺寸可调的珩磨头，可以在一定范围内对不同尺寸规格的内孔表面进行光整加工，其结构简单易于实现，在普通机床上即可使用。

## 1 装置原理

装置主要由变径机构结合传统珩磨头设计而成。其装置原理简图如图 1 所示。



1.调整螺母 2.弹簧 3.滑块 4.顶杆 5.油石座 6.油石 7.支撑杆 8.支架

图 1 装置原理简图

Fig.1 Schematic diagram of the device

装置主要由调整螺母、弹簧、滑块、顶杆、油石座、油石、支撑杆、支架等部分组成。支撑杆和油石座互相铰链，组成平行四边形式机构，共三组呈  $120^\circ$  均匀分布于支架周围。滑块通过顶杆与三组平行四边形机构铰链，通过调节滑块的位置，控制装置的尺寸变化，达到变径的目的。装置就像一把伞可以收缩与伸张，达到改变尺寸的目的，以适应不同口径的内孔。

装置工作时弹簧处于压缩状态，弹簧力通过滑块传递到顶杆。该平行四边形机构靠来自顶杆的支撑力将其撑开。油石座内部开槽，油石置于槽内，并用结合剂粘接。通过转动调整螺母控制弹簧的压缩量，并最终控制油石与对内孔表面的压力。

由于油石对孔壁形成一定的压力，在珩磨头的旋转运动和往复运动共同作用下，油石上的磨粒与孔表面互研，从孔表面去除一层极薄的材料，实现对孔表面的光整加工，并在孔表面形成交叉网纹式的磨削痕迹，这种交叉网纹有利于润滑油的贮存和油膜的保持。

## 2 理论分析

珩磨头以一定的力和相对运动作用于内孔表面完成光整加工,力和运动是影响珩磨的两个最基本的参数。其对加工精度、表面质量、油石寿命以及加工效率等众多方面都有影响,因此需要研究珩磨时的磨削力以及珩磨头的运动情况。

### 2.1 受力分析

由于三组平行四边形机构均匀分布,选取一组进行研究,并将其简化成如图 2 所示的结构简图。

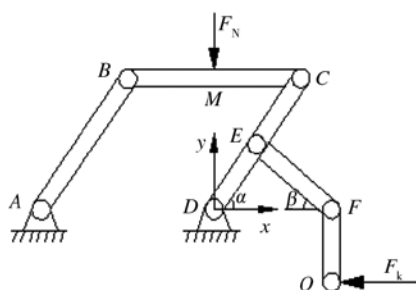


图 2 变径机构结构简图

Fig.2 Schematic diagram of adjustable mechanism

图 2 中  $M$  为油石座  $BC$  的质心,  $O$  为滑块的质心, 支撑杆  $CD$  与顶杆  $EF$  的铰接于点  $E$ ,  $\alpha$  为  $CD$  与水平线的夹角,  $\beta$  为  $EF$  与水平线的夹角。  $F_N$  为孔壁对油石座  $BC$  的反作用力,  $F_k$  为弹簧对滑块的作用力。以  $D$  为原点建立直角坐标系, 并进行受力分析。为了便于分析, 此处不考虑重力作用<sup>[12]</sup>。由几何关系有:

$$\begin{cases} x_O = l_{DE} \cos \alpha + l_{EF} \cos \beta \\ y_M = l_{CD} \sin \alpha \\ l_{EF} \sin \beta = l_{DE} \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_O$  为  $O$  点的横坐标,  $y_M$  为  $M$  点的纵坐标。对(1)式取微分得:

$$\begin{cases} dx_O = l_{DE} d\alpha \sin \alpha + l_{EF} d\beta \sin \beta \\ dy_M = l_{CD} d\alpha \cos \alpha \\ l_{EF} d\beta \cos \beta = l_{DE} d\alpha \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

由虚功原理:

$$3F_N dy_M + F_k dx_O = 0 \quad (3)$$

由式(2)和式(3)得:

$$F_N = \frac{F_k l_{DE} \sin(\alpha + \beta)}{3l_{CD} \cos \alpha \cos \beta} \quad (4)$$

油石与孔壁之间的摩擦力即为珩磨力:

$$F = \mu F_N = \frac{\mu F_k l_{DE} \sin(\alpha + \beta)}{3l_{CD} \cos \alpha \cos \beta} \quad (5)$$

式中:  $F$  为珩磨力;  $\mu$  为油石与孔壁之间的摩擦系数。为了便于计算和分析, 取  $E$  位于  $CD$  的中点, 且  $DE=EF$ , 即  $CD=2DE=2EF$ ,  $\alpha=\beta$  此时有:

$$F = \frac{\mu F_k \tan \alpha}{3} \quad (6)$$

对于不同口径的孔, 装置尺寸不同导致角度  $\alpha$  不同, 通过调节螺母的配合使用, 获取所需的珩磨力。

### 2.2 运动分析

珩磨头在旋转运动和往复运动共同作用下与内孔表面互研, 在内孔表面形成交叉网纹状的表面形貌, 如图 3 所示。其网纹夹角和珩磨运动是由旋转运动和轴向往复运动共同决定的<sup>[13-16]</sup>。

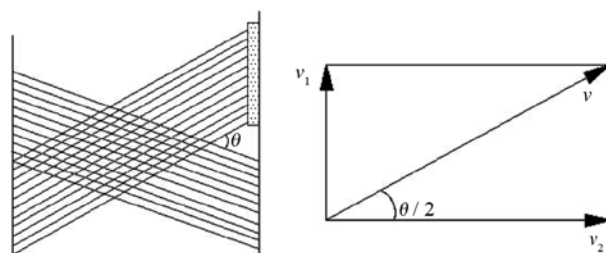


图 3 珩磨加工形成的交叉网纹

Fig.3 Cross hatch formed after honing

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (7)$$

$$\theta = 2 \arctan \frac{v_1}{v_2} \quad (8)$$

式中:  $v$  为珩磨速度;  $\theta$  为网纹夹角;  $v_1$  为往复速度;  $v_2$  为旋转速度。

## 3 装置的建模与制作

SolidWorks 是常用三维机械设计软件, 利用 SolidWorks 建立装置的三维模型如图 4 所示, 装置的主要参数如下:  $AB=CD=40$  mm,  $DE=20$  mm,  $EF=20$  mm,  $BC=40$  mm。

调整螺母选用 M20 的不锈钢薄螺母, 弹簧劲度系数  $k=2.6$  N/mm。其他非标准件通过三维图生成零件的二维图纸, 将零件加工后组装。考虑相关设计要求及材料的方便性, 珩磨头中支架、滑块、油石座的材质为铝合金, 顶杆、支撑杆的材质为不锈钢。组装后的样机如图 5 所示。珩磨头适应的内

孔直径范围约为 95~125 mm。

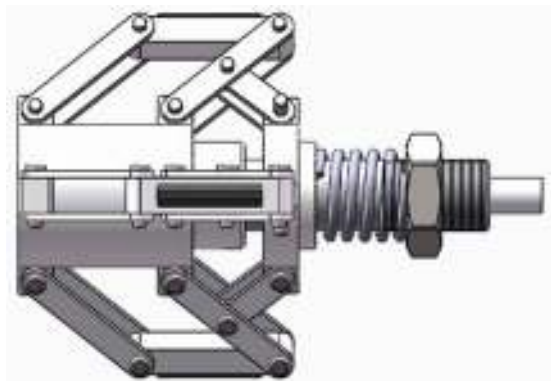


图 4 可调珩磨头三维装配图

Fig.4 The 3D modeling of the adjustable honing head



图 5 可调珩磨头样机图

Fig.5 The physical prototype of the adjustable honing head

## 4 实验与分析

### 4.1 实验条件

实验采用 H-ZX20 钻铣机床, 将不锈钢管固定在工作台上, 机床主轴通过十字万向节与珩磨头相连。这种浮动连接形式, 可以保证在珩磨加工时, 珩磨头的往复运动是以孔壁为导向, 减少主轴回转误差及机床主轴与工件中心的同轴度误差对加工精度造成的影响。油石选用 6 mm×6 mm×30 mm 的方形刚玉, 目数为 240<sup>#</sup>, 通过调整螺母调整弹簧压缩量为 20 mm, 机床转速 200 r/min (由于本机床不能给定确定速度的往复运动, 本次实验不采用往复运动), 分别对内径为  $\phi 98$  mm、 $\phi 106$  mm 的不锈钢管 (以下简称细管、粗管) 进行实验。实验时向其浇注 LC-10 珩磨液, 在管的周向选取 4 个标记点测量其表面粗糙度, 取其平均值作为该时刻的粗糙度值, 实验每隔 1 min 测量一次表面粗糙度。

### 4.2 实验结果与分析

经过 6 min 珩磨加工, 细管的表面粗糙度  $R_a$  值由 2.174  $\mu\text{m}$  降低到 0.869  $\mu\text{m}$ , 粗管的表面粗糙度由 1.582  $\mu\text{m}$  降低到 0.758  $\mu\text{m}$ 。从图 6 中的粗糙度曲线可以看出, 曲线大致呈现 3 个阶段。第 0~2 min 为第一阶段, 粗糙度下降较快; 第 2~4 min 为第二阶段, 粗糙度继续下降, 但是其下降速率远低于第一阶段; 4 min 以后为第三阶段, 虽然加工继续进行, 但是粗糙度值基本维持不变。这主要是由于加工初始阶段内孔表面粗糙, 且油石较锋利, 油石与孔表面接触面积小, 接触压力大, 内孔表面凸起部分被很快磨平, 粗糙度快速下降。随着加工的进行, 内孔表面变得越来越光滑, 油石相对于初始阶段也变得越来越钝, 接触面积越来越大, 单位面积接触压力下降, 切削效率降低。随着时间的进行, 慢慢达到本次工艺条件下表面粗糙度的极限值。

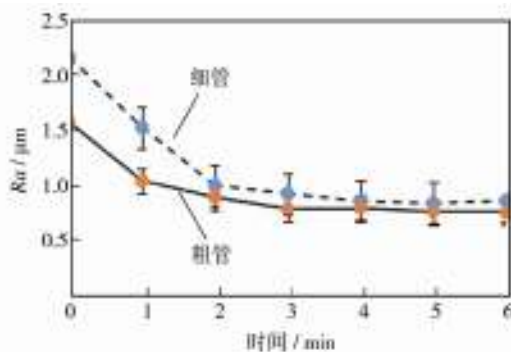


图 6 粗糙度变化曲线

Fig.6 Variation curves of  $R_a$

观察图 7 中加工后的表面形貌图像, 对比加工部分和未加工部分, 可以看出, 加工后管壁变得光滑、明亮、纹理清晰、富有光泽。说明该珩磨头不但尺寸可调范围大, 而且加工效果良好。

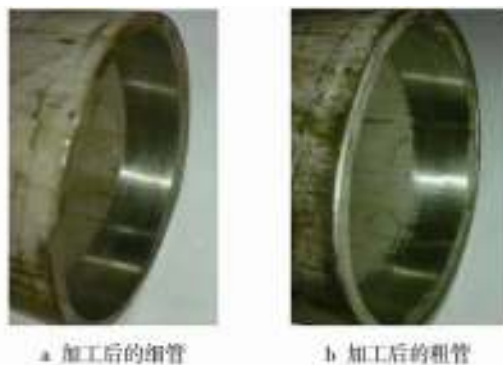


图 7 加工后不锈钢管

Fig.7 The stainless steel pipe after finishing: a) thick pipe after finishing, b) thin pipe after finishing

## 5 结语

介绍了一种尺寸可调的珩磨头,相对于传统珩磨头而言,其伞式变径结构,可以进行自身尺寸的调整,适应不同口径的内孔加工,增加了珩磨头的通用性。对其进行了理论分析,推导了其珩磨力、珩磨速度、网纹夹角的公式,建立了装置的三维模型并完成了样机制作。通过实验,验证了可调珩磨头的可行性,对于一定范围内不同尺寸的内孔都有良好的加工效果。可以有效降低表面粗糙度,改善表面形貌,提高表面质量。对于提高珩磨头的通用性,适应多规格、小批量生产具有重要意义。

相信通过改善工艺条件,比如提高油石目数或调节珩磨头与工件间的压力等,工件的表面质量会得到进一步提高。相关的工艺实验将在以后的研究中详细讨论。

## 参考文献

- [1] 杨胜强, 李文辉, 陈红玲. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.  
YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, CHEN Hong-ling. Surface Finishing Theory and New Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [2] 徐杰, 杨胜强, 李文辉. 直孔表面光整加工进给部件的受力分析与运动仿真[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(2): 111—114.  
XU Jie, YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui. Force Analysis and Kinematical Simulation of the Feed Component for Straight Hole Surface Finishing[J]. Machine Design and Research, 2014, 30(2): 111—114.
- [3] 张晓东, 李秀红, 李文辉, 等. 离心式滚磨光整加工钛合金的数值模拟分析[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 11—15.  
ZHANG Xiao-dong, LI Xiu-hong, LI Wen-hui, et al. Numerical Simulation Analysis of the Centrifugal Roll Finishing of Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 11—15.
- [4] 杨胜强, 李文辉, 杨世春, 等. 面向内孔的表面光整加工技术研究综述[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010, (1): 56—60.  
YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, YANG Shi-chun, et al. Research on Hole Surface Finishing Technology[J]. Combined Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2010, (1): 56—60.
- [5] 朱林, 郑挺军. 深孔珩磨刀具 CAD 的研究[J]. 机械设计与制造, 2006, (10): 60—62.  
ZHU Lin, ZHENG Ting-jun. Searching on Cutting Tool CAD for the Deep Hole Honing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006, (10): 60—62.
- [6] 高罗辉. 汽车发动机缸孔珩磨误差分析与精度控制[D]. 上海:上海交通大学, 2013.  
GAO Luo-hui. Error Analysis and Accuracy Control in Honing Process of Automotive Engine Cylinder[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [7] YU A B. Analysis of Material Removal in Alumina Ceramic Honing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(2): 167—170.
- [8] CABANETTES F, DIMKOVSKI Z, ROSÉN B G. Roughness Variations in Cylinder Liners Induced by Honing Tools' Wear[J]. Precision Engineering, 2015, 41: 40—46.
- [9] 郑华林, 张伟. 超声振动珩磨表面残余应力数值模拟研究[J]. 表面技术, 2015, 44(7): 131—136.  
ZHANG Hua-lin, ZHANG Wei. Simulation Research on the Surface Residual Stress of Ultrasonic Vibration Honing[J]. Surface Technology, 2015, 44(7): 131—136.
- [10] 程德本. 新型可调刚性珩磨头的设计与使用[J]. 机械, 1993, 20(3): 30—33.  
GHENG De-ben. Design and Application of a New Adjustable Honing Head[J]. Machinery, 1993, 20(3): 30—33.
- [11] 杨沁, 杨成, 卫道柱, 等. 可调节的珩磨头机构:中国, CN201410063746. 7[P]. 2014-05-28.  
YANG Qin, YANG Cheng, WEI Dao-zhu, et al. Adjustable Honing Head Structure:China, CN201410063746. 7[P]. 2014-05-28.
- [12] 徐小云, 颜国正, 丁国清, 等. 管道机器人适应不同管径的三种调节机构的比较[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 60—65.  
XU Xiao-yun, YAN Guo-zheng, DING Guo-qing, et al. Comparative Study of Three Regulating Mechanisms for Pipeline Robot to Suit Different Pipe Diameters[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(1): 60—65.
- [13] MEZGHANI S, DEMIRCI I, YOUSFI M, et al. Running-in Wear Modeling of Honed Surface for Combustion Engine Cylinder Liners[J]. Wear, 2013, 302(1/2): 1360—1369.
- [14] 庞阳. 工况条件对珩磨头静态特性的影响分析[D]. 兰州:兰州理工大学, 2014.  
PANG Yang. Analysis of the Influence of Working Conditions on the Static Characteristics of the Honing Head[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2014.
- [15] 孙伏. 珩磨头三维设计与仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2013, (3): 188—190.  
SUN Fu. 3-D Design and Simulation Analysis of Honing Head[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013, (3): 188—190.
- [16] 宋凤敏, 赵玉祥, 高罗辉, 等. 汽车发动机珩磨缸孔形状精度分析与控制[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(6): 63—65.  
SONG Feng-min, ZHAO Yu-xiang, GUO Luo-hui, et al. Shape Accuracy Analysis and Control for Honing Hole of Automobile Cylinder[J]. Machine Design and Research, 2013, 29(6): 63—65.