

表面质量控制及检测

振动式滚磨光整加工过程中的受力测试与分析

张建丽, 李文辉, 张荔, 陈玉楠, 李唯东

(太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024)

摘要: **目的** 测试不同加工参数对振动式滚磨光整加工过程中作用力的影响, 对实际加工过程中加工参数的选择提供一定的数值指导。 **方法** 通过改变偏心块夹角、固定工件埋入深度及固定工件装夹角度, 应用动态式压力传感器测试每种加工参数对加工作用力的影响。 **结果** 偏心块夹角不同时, 磨料的运动形态及运动轨迹差异明显, 且偏心块夹角大小对工件的作用力影响显著, 偏心块夹角为 90° 时磨料螺旋运动显著, 加工效果好。固定工件埋入深度越深, 其所受作用力越大; 超过一定范围时, 作用力陡增。通过改变固定工件装夹角度, 观察磨料流态并测试工件不同装夹角度下所受作用力, 分析得到在装夹角度为 20° 时磨料会以工件为中心聚集, 工件所受作用力最大。 **结论** 偏心块夹角不同, 磨料的运动流态及对工件的作用力不同, 偏心块夹角为 90° 时光整加工效果最好。埋入深度对工件作用力影响显著, 加工过程中应根据工件的加工要求确定合适的埋入深度。固定工件装夹角度不同, 磨料流态变化明显, 固定工件装夹角度为 20° 时工件所受作用力最大, 需根据实际加工要求确定装夹的具体角度。

关键词: 振动式滚磨光整加工; 偏心块夹角; 埋入深度; 固定工件装夹角度; 作用力; 测试

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)07-0120-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.022

Force Test and Analysis in the Process of Vibratory Barrel Finishing

ZHANG Jian-li, LI Wen-hui, ZHANG Li, CHEN Yu-nan, LI Wei-dong

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze the influences of process parameters on the force in vibratory barrel finishing, so as to provide certain guide for selection of process parameters in actual processing. **Methods** The influences of parameters such as eccentric block angle, buried depth of workpiece and the champing angle of workpiece on the force were analyzed by using dynamic pressure sensor. **Results** The movement forms and motion trails were significant different at different eccentric block angles, and the force of

收稿日期: 2015-04-07; 修订日期: 2015-05-25

Received: 2015-04-07; Revised: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金主任基金资助项目(51345010); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20131402110002)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51345010) and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20131402110002)

作者简介: 张建丽(1989—), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要研究方向为精密零件表面光整加工技术。

Biography: ZHANG Jian-li(1989—), Female, from Shanxi, Master degree student, Research focus: mass finishing technology of the precision surface.

通讯作者: 李文辉(1975—), 男, 山西人, 博士, 教授, 主要从事精密零件表面光整加工技术。

Corresponding author: LI Wen-hui(1975—), Male, from Shanxi, Doctor, Professor, Research focus: mass finishing technology of the precision surface.

workpiece was influenced by the angle, the abrasive flow was remarkable when the eccentric block angle was 90° . The force of the workpiece increased with the buried depth, however, the force abruptly increased when the depth exceeded a certain range. During changing of the chamfered angle of workpiece, the abrasive flow and the force were observed and the test data showed that abrasive gathered together centered on the workpiece when $\alpha=20^\circ$, and the force of workpiece reached the maximum. **Conclusion** In conclusion, the abrasive flow and the force of workpiece were different at different eccentric block angles, the effect of finishing was the best at the eccentric block angle $\alpha_0=90^\circ$. The influence of buried depth on the force was significant, the buried depth should be chosen according to the processing requirements. The abrasive flow was varied at different chamfering angles α of the fixed workpiece and the force was the maximum when $\alpha=20^\circ$, the α should be determined based on the processing demand.

KEY WORDS: vibratory barrel finishing; eccentric block angle; buried depth; chamfering angle of fixed workpiece; force; test

振动式滚磨光整加工作为目前应用最广泛、最成熟的一种表面处理方法,可以对不同材料(如钢、铜、铝、胶木等)的中小零件去毛刺、去毛边、除锈、倒圆、倒棱角及去应力,降低零件表面粗糙度值^[1-2],提高零件的耐磨性、配合质量、抗疲劳强度、抗腐蚀性、接触刚度,改善零件表面的光泽度和光亮程度。其加工原理是在特定的振幅和振动频率下,容器内一定配比的工件、磨料及磨剂等加工介质既绕容器轴线公转,又绕圆环中心翻滚,形成螺旋运动^[3-5],由于工件和磨料的质量、形状及所处位置的不同,在运动过程中磨料会对工件产生一定的碰撞、滑擦、滚压及微量磨削,从而完成对工件的表面光整。在滚磨光整量化方面,国外一些学者通过应用 MRI 技术, EDEM 三维离散元法等多种测试模拟方法进行了相关分析^[6-11], 多伦多大学的 D. Ciampini 等^[12]通过自由落体物体下落后对工件的作用力推导出速度-力的关系,在振动式滚磨光整加工设备中测试加工过程中磨料对工件的撞击速度反推出其对工件的作用力;日本广岛大学的 A. Yabuki 等^[13]利用微型录像装置分析磨料撞击工件表面时的运动情况,结果表明磨料对工件的碰撞主要分为正面冲击碰撞、滚划过表面、周围介质的滚动迫使磨料撞击工件等 3 种碰撞方式。目前国内对振动式滚磨光整加工的运动分析还停留在理论分析上,本文通过改变不同加工参数并选择 501F01 型号的动态式压力传感器^[14],应用 DASP 信号处理仪对振动式滚磨光整加工设备(型号:ZL-180)加工过程中工件所受作用力进行测试及分析,对振动式滚磨光整加工过程中不同加工参数对作用力的影响进行定量描述。

图 1 为立式振动式滚磨光整加工设备,由空间运动单轴惯性激振器驱动,激振器竖直安装,轴的上下两端装有偏心块;当激振器主轴高速旋转时,带动偏心块旋转,由于两个偏心块存在相应的夹角,偏心块在水平面内产生一定的离心激振力,使磨料绕容器轴

线公转;在竖直面内产生一定的激振力矩,使磨料又绕圆环中心翻滚,从而使容器产生复杂的周期性振动,磨料产生螺旋运动^[15]。

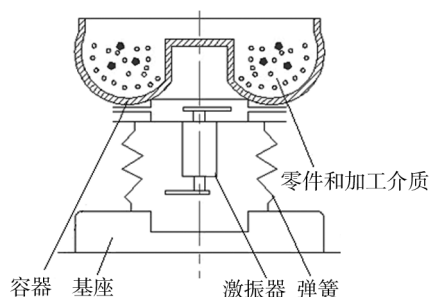


图 1 振动式滚磨光整加工设备的原理简图

Fig. 1 Principle sketch of vertical vibratory barrel finishing

1 偏心块夹角 α 对作用力的影响

振动式滚磨光整加工中,影响加工效果的设备参数主要包括:偏心块的配置参数,弹簧的刚性系数,振动轴的回转速度。其中偏心块的安装夹角不但影响工件和磨料在容器中的运动情况,更重要的是影响加工效率和加工质量,是十分重要的设备参数。加工过程中偏心块在水平面内产生的激振力见式(1),在竖直面内产生的激振力矩见式(2)^[16]:

$$P(t) = 2m_0\omega^2 r \cos \frac{\alpha_0}{2} (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (1)$$

$$M(t) = 2m_0\omega^2 r \left[\left(\frac{l_0}{2} + l \right) \cos \frac{\alpha_0}{2} (\cos \omega t + i \sin \omega t) + \frac{l_0}{2} \sin \frac{\alpha_0}{2} (\sin \omega t - i \cos \omega t) \right] \quad (2)$$

式中: m_0 为偏心块质量(假设两偏心块质量相等), ω 为激振器旋转角速度, α_0 为两偏心块夹角, r 为偏心块质心到竖直轴的距离, l_0 为两偏心块中心距离, l 为偏心块到容器质心的距离。偏心块夹角不同时,产生的激振力和激振力矩不同。

1) 当 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时:

$$P(t) = 2m_0\omega^2 r (\cos \omega t + i \sin \omega t)$$

$$M(t) = 2m_0\omega^2 r \left[\left(\frac{l_0}{2} + l \right) (\cos \omega t + i \sin \omega t) \right]$$

2) 当夹角 $\alpha_0 = 90^\circ$ 时:

$$P(t) = \sqrt{2}m_0\omega^2 r (\cos \omega t + i \sin \omega t)$$

$$M(t) = \sqrt{2}\omega^2 r \left[\left(\frac{l_0}{2} + l \right) (\cos \omega t + i \sin \omega t) + \frac{l_0}{2} (\sin \omega t - i \cos \omega t) \right]$$

3) 当 $\alpha_0 = 180^\circ$ 时:

$$P(t) = 0$$

$$M(t) = m_0\omega^2 r [l_0 (\sin \omega t - i \cos \omega t)]$$

实践表明,两个偏心块安装相对角度的大小,与振动轴的有效长度、偏心块产生的离心力大小等因素有关。由上述理论分析可知,随着偏心块夹角的变化,激振力和激振力矩也变化明显。实验通过将传感器固定于工件上,通过改变偏心块的夹角,测试不同夹角下磨料对工件的作用力,测试结果如图2。

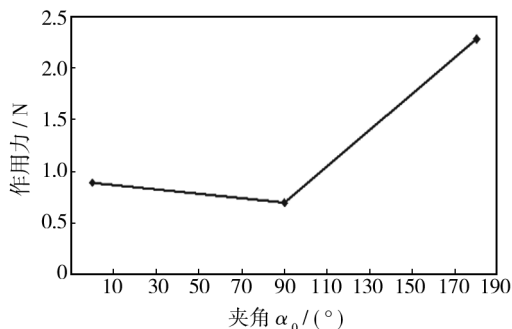


图2 不同夹角对应的作用力

Fig. 2 Force of workpiece at different eccentric block angles

当 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时,磨粒绕容器轴线公转运动强度最大,磨料对工件主要进行径向碰撞,此时磨料对工件作用力总有效值约为 0.89 N,工件和磨料在容器内缓慢翻滚,加工效率低;随着夹角 α_0 的增大,磨料的绕容器轴线公转运动强度逐渐减弱,螺旋运动逐渐增强;当 $\alpha_0 = 90^\circ$ 时,磨粒的螺旋运动强度最大,此时磨料对工件的作用力总有效值约为 0.70 N,磨料运动规律性明显,磨料与工件的相对运动复杂且剧烈;随着夹角 α_0 继续增大,磨料的螺旋运动逐渐减弱;当 $\alpha_0 = 180^\circ$ 时,螺旋径向周向运动都基本消失,只有磨粒的上下振动,此时磨料对工件作用力总有效值约为 2.28 N,磨料对工件只有竖直方向碰撞作用,测试结果与理论分析一致。综上所述,两个偏心块安装布置夹角一

般选择 90° 。

2 固定工件埋入深度对作用力的影响

中小零件的振动式滚磨光整加工中,一般是将工件直接埋入磨料中,工件随着磨料一起做自由运动,工件埋入磨料深度不同,磨料的重力及磨料对工件的作用力有很大的差异。由于工件自由运动过程中,测试比较困难,实验通过将轴类零件夹持在三爪卡盘上固定,在轴底端等距贴 3 个传感器,其中 1 号传感器加工深度 5 mm,2 号传感器加工深度 25 mm,3 号传感器加工深度 45 mm,间距均为 20 mm,测试数据通过 DASP 信号采集仪收集处理,测试加工过程中工件加工深度对加工过程中作用力的影响,测试装置如图 3 所示,测试结果如图 4 所示。



图3 传感器布置图

Fig. 3 Sensor arrangement diagram

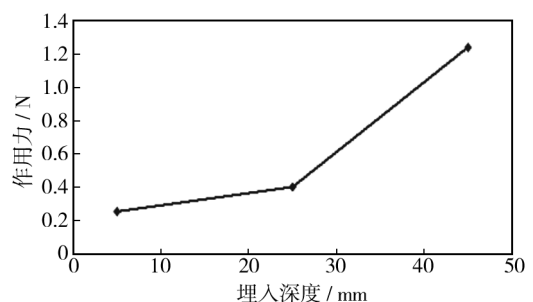


图4 作用力与加工深度的关系

Fig. 4 The diagram of force and depth

图4为测试得到的数据,当磨料深度为 5 mm 时,磨料对工件的作用力约为 0.255 N;当磨料深度为 25 mm 时,磨料对工件的作用力约为 0.402 N,增幅约为 57.65%;当磨料深度为 45 mm 时,磨料对工件的作用力约为 1.243 N,较加工深度为 25 mm 的增幅约为

209.2%。可见在一定加工深度内,磨料对工件的作用力随着加工深度的增加而增大,加工效率高;随着加工深度的增加,磨料对工件的作用力陡增,作用力变化幅度大,对工件的碰撞作用加剧。在实际加工中需根据不同的加工要求将工件埋入一定的深度。

3 加工过程中最大作用力方向的确定

振动式滚磨光整加工不仅可以对自由运动工件进行光整加工,也可以通过设计相关的工装装置,对轴类零件进行光整加工,为方便加工轴类零件,设计如图 5 所示的固定工件装置。固定工件在振动式光整加工中,由于磨料做螺旋运动,磨料的不同旋向对工件的作用力不同,相应的加工效果不同,因此分析不同装夹角工件所受作用力对实际加工具有一定的指导意义。由于加工过程中磨料运动轨迹复杂,无法确定工件的最大受力面(角),因此本文建立如图 6 所示的坐标系,将工件固定后,在工件上安装两个传感器,两个传感器夹角为 180° ,且 2#传感器的安装角度 α 与工件装夹角度相同,通过改变传感器的安装角度来确定工件最大受力方向。

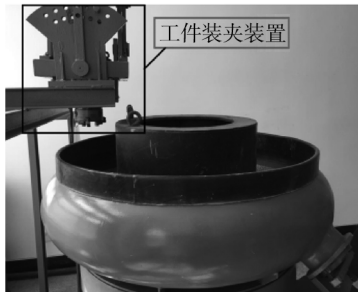


图 5 工件装夹装置图
Fig. 5 The clamping device of workpiece

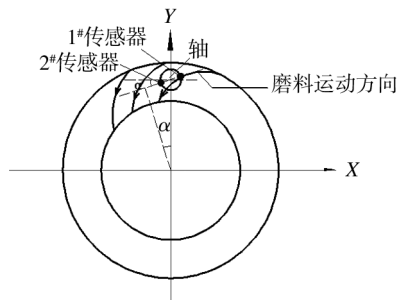


图 6 测试采用的坐标系
Fig. 6 The coordinate system of test

通过对加工过程的观察分析,当固定工件装夹角 α 在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 范围内时,磨料对工件的撞击比较激

烈,作用效果明显;当 α 在 $40^\circ \sim 160^\circ$ 范围时,磨料对工件的作用效果减弱。因此,设计 $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 100^\circ, 120^\circ, 170^\circ, 180^\circ, 190^\circ, 200^\circ, 210^\circ$ 共 13 组实验,测试不同 α 下磨料对工件的作用力,并经过相应的信号处理得到工件不同装夹角 α 下作用力的频域值,具体测试结果见图 7 和图 8。

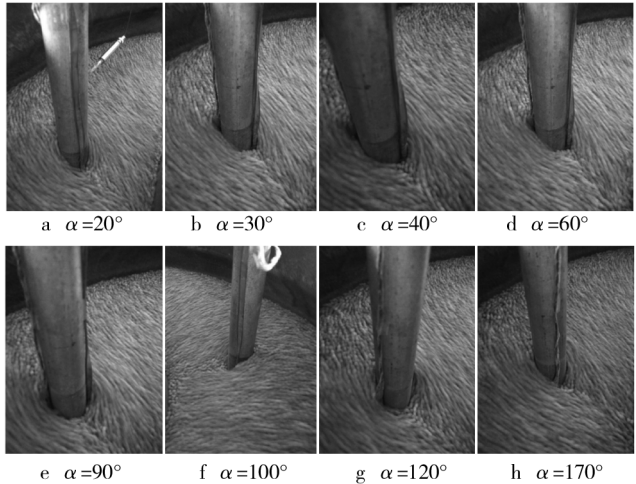


图 7 不同装夹角对应磨料的运动形态
Fig. 7 The fluidization of abrasive at different angles

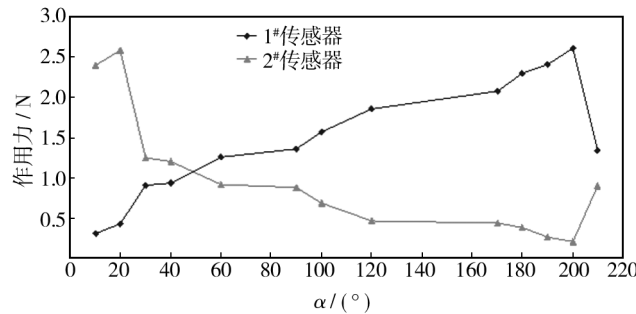


图 8 不同装夹角作用力
Fig. 8 Force of workpiece at different clamping angles

固定工件装夹角 α 不同时,磨料在运动过程中的流动状态及在工件周围聚集的状态不同, $\alpha = 20^\circ$ 时,磨料流以 2#传感器为中心聚集,此时对传感器的作用力增加;随着夹角 α 的增大,2#传感器背离最佳聚集位置,作用力逐渐减小,1#传感器向最佳位置靠近,1#传感器受到的作用力逐渐增大; $\alpha = 190^\circ$ 时,两个传感器完成一个周期的旋转; $\alpha = 200^\circ$ 时 1#传感器转到 $\alpha = 20^\circ$ 时 2#传感器所在位置,1#传感器的受力达到最大。由此可知,固定装夹工件在装夹角 $\alpha = 20^\circ$ 时磨料会以工件为中心聚集,所受作用力最大。若工件要求去除量大,可以将该工件装夹于 20° 处的位置,在实际滚磨光整加工中,需根据不同工件的加工要求,选择相应

的装夹角。

4 结论

1) 当偏心块的夹角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时,磨料运动简单,加工效率低;当 $\alpha_0 = 90^\circ$ 时,磨粒的螺旋运动强度最大,磨料与工件的相对运动复杂,加工效果好;当 $\alpha_0 = 180^\circ$ 时,螺旋径向周向运动都基本消失,只有磨粒的上下振动,磨料对工件的作用力较大。

2) 固定工件埋入深度为 5 mm 时,其所受作用力为 0.255 N;埋入深度为 25 mm 时,工件所受作用力约为 0.402 N,增幅约为 57.65%;埋入深度为 45 mm 时工件所受作用力约为 1.243 N,较埋入深度为 25 mm 时增幅约为 209.2%。在一定埋入深度内,磨料对工件的作用力随着埋入深度的增加而增大,但随着埋入深度的增加,磨料对工件的作用力陡增。实际加工过程中,需根据相关加工要求确定工件埋入深度。

3) 通过改变固定工件装夹角度,分析 ZL-180 型号的振动式滚磨光整加工设备加工过程中,固定工件装夹角度 $\alpha = 20^\circ$ 时磨料以工件为中心聚集,工件所受作用力最大。

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] 杨世春,杨胜强. 自由磨具光整加工技术的发展方向[J]. 机械工人, 2002(1): 11—12.
YANG Shi-chun, YANG Sheng-qiang. The Development Direction of Free Abrasive Finishing[J]. Mechanical Worker, 2002(1): 11—12.
- [3] 都春义,高云松,刘永平. 表面滚磨光整加工的技术特征及发展趋势[J]. 机械管理开发, 2013(3): 19—20.
DU Chun-yi, GAO Yun-song, LIU Yong-ping. Technology Characteristics and Development Trend of Surface Finishing[J]. Mechanical Management and Development, 2013(3): 19—20.
- [4] 张晓东,李秀红,李文辉. 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—12.
ZHANG Xiao-dong, LI Xiu-hong, LI Wen-hui. Numerical Simulation Analysis of the Centrifugal Roll Finishing of Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 11—
- 12.
- [5] 田峰,杨辉. AM50 镁合金孔挤压强化对其疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 55—58.
TIAN Feng, YANG Hui. Effects of Hole-expansion on Fatigue Property of AM50 Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 55—58.
- [6] KAMYAR H, AMIRHOSSEIN M, JAN K. Development of a Laser Displacement Probe to Measure Particle Impact Velocities in Vibrationally Fluidized Granular Flows[J]. Powder Technology, 2013, 235: 940—952.
- [7] KETTERHAGEN W R. Granular Segregation in Discharging Cylindrical Hoppers: a Discrete Element and Experimental Study[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62: 6423—6439.
- [8] KAWAGUCHI T. MRI Measurement of Granular Flows and Fluid-particle Flows [J]. Advanced Powder Technology 2010, 21: 235—241.
- [9] DOMBLESKY J. Material Removal Model for Vibratory Finishing[J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(5): 1029—1041.
- [10] KETTERHAGEN W R. Predicting the Flow Mode from Hoppers using the Discrete Element Method[J]. Powder Technology, 2009, 195: 10—12.
- [11] DAVID A. Precision Finishing Processes in Centrifugal Barrel Equipment[J]. Metal Finishing, 2006, 104(8): 65—67.
- [12] CIAMPINI D. Impact Velocity Measurement of Media in a Vibratory Finisher [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183: 347—357.
- [13] YABUKI A. Contact Forces and Mechanisms in a Vibratory Finisher[J]. Wear, 2002, 252: 635—643.
- [14] 梁福平,孔力. 传感器原理及检测技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2010.
LIANG Fu-ping, KONG Li. Sensors Principle and Detection Technology[M]. Wuhan: Huazhong Science and Technology Press, 2010.
- [15] 卫俊峰. 基于 L 系统分形造型的光整加工磨具运动的模拟研究[D]. 太原:太原理工大学, 2003.
WEI Jun-feng. The Simulative Research on the Movement of the Finishing Grinder Based on the L-system of Fractal Mould [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003.
- [16] 宋春华. 基于三维离散元的离心式滚磨光整加工理论分析和仿真模拟[D]. 太原:太原理工大学, 2009.
SONG Chun-hua. Theory Analysis and Simulation of the Centrifugal Barrel Finishing based on the Three Dimensional Discrete [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.