

表面质量控制及检测

薄壁片状试件贴壁式振动光饰实验研究

王秀枝^{a,b}, 杨胜强^{a,b}, 李文辉^{a,b}, 陈玉楠^{a,b}, 张乔云^{a,b}

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

摘要: 目的 提出一种适用于中小型薄壁片状类零件提高表面质量的贴壁式振动光饰加工技术方案。方法 选取球形棕刚玉磨块, HYA 磨液作为加工介质, 选用 45#钢、钛合金 TC4 (Ti-6Al-4V)、铝合金 (A356)、304 不锈钢 4 种材料, 进行试件尺寸为 10 mm×20 mm×3 mm 的 10 mm×20 mm 单面贴壁加工实验及自由式加工实验。通过对比自由式与贴壁式加工中五个不同位置加工后试件的表面粗糙度值, 以确定贴壁式振动光饰加工的优势及贴壁式相对最佳加工位置。使用动态力传感器测试了对应五个不同位置处磨块对传感器 (即磨块对试件) 的动态力, 找出不同加工位置处试件受力规律。结果 初始表面粗糙度 Ra 值约为 2.6 μm 的两组 45#钢试件的加工实验中, 1 h 时自由式加工试件 Ra 值仍为 2.4 μm , 贴壁式加工试件已小于 0.5 μm 。不同位置加工的钛合金、铝合金、不锈钢试件实验结果得出, 容器底部位置是相对最佳加工位置, 容器内侧中部位置其次, 均明显优于其余三个位置, 容器内侧上部、外侧中部和上部位置对加工效果的影响规律不明显。动态力测试结果得出, 容器底部位置处磨块对传感器的平均力最大, 为 2.728 N, 容器内侧中部、外侧中部、内侧上部、外侧上部位置依次降低, 不同位置受力分布总体趋势与试件加工结果基本对应。结论 贴壁式加工较自由式加工效率高, 容器底部是获取试件相对最佳表面粗糙度的加工位置, 试件加工效果与试件受磨块动态力的大小直接关系。贴壁式振动光饰加工技术可应用于中小型薄壁片状类零件表面质量的提高。

关键词: 振动光饰; 振动器壁; 薄壁片状零件; 表面粗糙度; 动态力

中图分类号: TG506.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0261-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.039

Experimental Investigation of Adherent Vibratory Finishing for Sheet Specimens

WANG Xiu-zhi^{a,b}, YANG Sheng-qiang^{a,b}, LI Wen-hui^{a,b}, CHEN Yu-nan^{a,b}, ZHANG Qiao-yun^{a,b}

(a. College of Mechanical Engineering,

b. Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an adherent vibratory finishing processing technology for small and medium-sized sheet specimens to improve surface quality. Spherical corundum abrasive particles and HYA grinding fluid were selected as

收稿日期: 2017-04-24; 修订日期: 2017-05-20

Received: 2017-04-24; Revised: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (U1510118); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20131402110002); 山西省科技攻关项目 (2015031011-3)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1510118), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20131402110002) and Science and Technology Project of Shanxi Province (2015031011-3)

作者简介: 王秀枝 (1988—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密零件表面光整加工技术。

Biography: WANG Xiu-zhi (1988—), Female, Doctor candidate, Research focus: surface finishing technology for precision parts.

通讯作者: 杨胜强 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密零件表面光整加工技术。

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

processing medium. Processing experiments for single-sided adherent specimens and free specimens were conducted using four kinds of specimens made from 45[#] steel, titanium alloy TC4 (Ti-6Al-4V), aluminum alloy (A356) and 304 stainless steel. The specimen size was 10 mm × 20 mm × 3 mm, and 10 mm × 20 mm surface was processed during adherent vibratory finishing. Surface roughness value of the free specimens and adherent specimens in 5 different positions was compared before and after processing to determine advantages of adherent vibratory finishing and the relative optimal processing position. Dynamic forces of abrasive particles to the sensor (i.e., the abrasive particles to the specimen) in 5 different positions were tested using a dynamic force sensor, so as to find load-carrying rule in different processing position. In the processing experiment of two sets of 45[#] steel specimens with initial surface roughness R_a value of about 2.6 μm , the R_a value of the free specimens was still 2.4 μm in 1 h, and for adherent specimen, less than 0.5 μm . According to the experimental results of titanium alloy, aluminum alloy and stainless steel specimens processed in different positions, the bottom of the container was the relative optimal processing position, followed by inner middle position, which was superior to other three positions. The influence rule of inner upper position, outer middle position and outer upper position on processing effect was not obvious. Average force of abrasive particles to the sensor at the bottom of the container was the maximum, which was 2.728 N. And the dynamic force at the position of inner middle position, outer middle position, inner upper position and outer upper decreased successively. Overall trend of the force distribution in different positions basically corresponded to the result of the specimens processing. Processing efficiency of adherent vibratory finishing is higher than that of free vibratory finishing. The bottom of the container is the relative optimal processing position for specimens to obtain the best surface roughness. Processing effect of specimens is directly related to the dynamic force of abrasive particles carried by the specimens. The adherent vibratory finishing processing technology can be applied to improve the surface quality of small and medium-sized sheet parts.

KEY WORDS: vibratory finishing; vibratory container; sheet specimens; surface roughness; dynamic force

叶片作为航空发动机的关键部件之一,其表面质量对服役性能,尤其是对高速、高温和高压条件下工作的可靠性有很大的影响。传统的叶片加工工艺为数控铣削后留余量进行人工打磨抛光,这种方式生产效率低,表面质量一致性差。基于砂带磨抛机的机器人辅助叶片磨抛工艺,自动化程度高,可以适度解放劳动力,但存在粉尘污染的问题。使用工件自由放置的振动式、离心式、回转式或涡流式滚磨光整加工方式,可以实现小尺寸类普通级别的叶片抛光及修复抛光,但对新制高精度叶片或多或少存在进、排气边损伤超差的情况;使用工件固定在特定主轴上的立式或卧式主轴式滚磨光整加工方式,可以解决刚度较好的大尺寸叶片抛光问题。以叶片为典型代表的高精度薄壁片状类零件的表面光整是高端制造业的实际问题,值得探索研究。

振动光饰加工技术始于 20 世纪 50 年代,是将一定比例的工件、磨块和液体介质装入一定形状的容器中,当容器在特定的振幅和频率下振动时,工件和磨块按一定的轨迹运动。运动过程中,由于工件和磨块的质量、形状、所处位置的差异,迫使磨块对工件产生不同程度的碰撞、滚压、刻划、滑擦等综合的微量磨削,从而实现对工件的表面光饰加工^[1,2]。Cariapa 等^[3]指出在世界范围内的机加工零件中,约有 50%采用滚磨光整加工工艺提高零件表面质量,改善零件表

面完整性。国内外学者对振动光饰技术进行了深入的研究。S. Wang 等^[4]研究了当工件材料、磨块尺寸、液体介质和加工时间发生变化时,工件表面粗糙度和硬度的变化及其之间的相互关系,并测试了自由式振动光饰加工过程中工件受的法向力。A. Yabuki 等^[5]设计了一种力传感器,同时测量了自由式振动光饰加工中磨块撞击工件表面时的法向和切向力,并结合电子显微照片进一步观察磨块的运动,提出三种磨块的接触模型。S. E. Naeini 等^[6,7]提出了模拟振动光饰机中磨块运动的离散元模型。K. Hashemnia 等^[8,9]采用高速激光位移传感器测量了振动光饰机中不同位置、不同方向磨块的局部冲击速度、整体流动速度和磨块堆积等。E. Fleischhauer 等^[10]应用颗粒图像测速技术研究了振动光饰加工中磨块的速度特性。太原理工大学张建丽等^[11]使用动态力传感器,将轴类零件夹持固定插入加工容器中,测试了振动光饰加工过程中不同加工深度工件所受作用力。太原理工大学陈玉楠等^[12]使用动态力传感器测试了工件在主轴式滚磨光整加工中工件受磨块的动态力,并对其加工机理进行分析。太原理工大学闫霞等^[13]运用 EDEM 软件对瀑布式振动光饰加工中动态滚抛磨块介质进行仿真,分析了不同加工参数下滚抛磨块介质系统、滚抛磨块介质与工件间各参数的变化规律,对优化工艺具有重要意义。

对于精密工件, 加工过程中需避免工件之间、工件与容器之间相互碰撞引起的损伤, 薄壁件还需考虑加工变形问题, 因此, 加工时必须设计特定夹具。近年来, 关于夹具设计的专利数量逐渐增加^[14], 夹具在精密零件加工中的应用将稳固增长。针对薄壁片状零件自身刚度较差, 自由式加工时易变形的问题, 本文提出一种适合于中小型薄壁片状类零件, 提高零件表面质量的贴壁式振动光饰加工技术方案, 探索不同贴壁位置对加工效果的影响, 并对不同加工效果产生的原因进一步实验研究。

1 实验条件

1.1 振动光饰设备

本实验选用美国 Burr King MFG 公司生产的 Vibra King 150SX 振动光饰机, 设备简图如图 1 所示。加工容器为环形碗状, 容器材料为聚乙烯, 最大外径为 380 mm, 深度为 150 mm, 由 5 根弹簧支撑。与加工容器固连的激振电机下端装有两个夹角为 90° 的偏心块。在激振电机的作用下, 加工容器进行空间三维振动^[15], 放置于加工容器内的磨块呈环形螺旋运动。

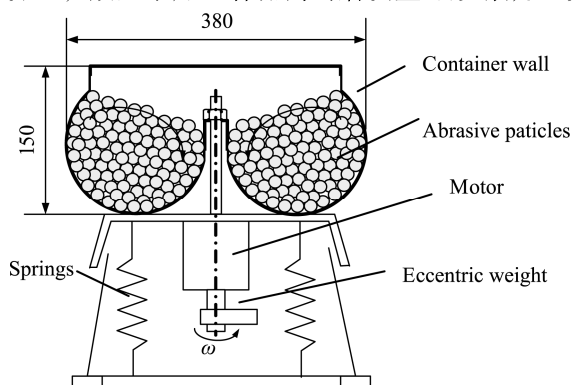


图 1 振动光饰机设备简图

Fig.1 Schematic diagram of vibratory polisher machine

1.2 试件

选用四种高端制造常用材料的试件进行加工实验研究, 分别为 45# 钢、钛合金 TC4 (Ti-6Al-4V)、铝合金 (A356) 和 304 不锈钢。为便于多次拆装测试, 实验暂不考虑加工中试件的变形问题, 加工试件尺寸为 10 mm×20 mm×3 mm, 被加工测试表面为 10 mm×20 mm 单一表面。

1.3 加工介质

振动光饰加工中使用的加工介质是指具备研磨、抛光、光饰、微量磨削等功能的磨块介质和具备清洗、防锈、腐蚀、软化、光亮、发泡、润滑、缓冲等功能的液体介质 (磨液和水)。实验中选用平均直径为 3.26 mm (标准差 S.D.=0.1457, 样本数 $n=20$) 的球

形棕刚玉磨块, 如图 2 所示。加工过程中使用在水中浸泡 24 h 后的磨块, 装入量为容器容积的 90%。选用市售的 HYA 磨液按 1:10 与水混合, 每次加工实验添加约 200 mL 作为加工的液体介质。



图 2 磨块

Fig.2 Abrasive particles

1.4 试件装夹

将两层厚度均为 3 mm、宽度为 20 mm 的橡胶条粘接固定于容器内壁。分别在 5 个不同位置切割 10 mm 宽、3 mm 深的沟槽, 将试件置于沟槽中, 使用 AB 胶粘结, 试件不同安放位置如图 3 所示。定义容器底部位置为 P3 位置, 容器内侧中部为 P2 位置, 容器内侧上部为 P1 位置, 容器外侧中部为 P4 位置, 容器外侧上部为 P5 位置。

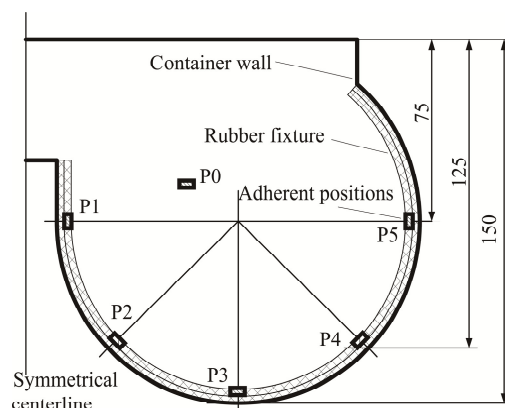


图 3 试件安放位置

Fig.3 Laying positions of specimens

1.5 测试

加工实验中, 加工前后试件的表面粗糙度值使用 Mahr Perthometer M2 粗糙度测量仪进行测量。测试实验中, 磨块对传感器的动态力采用动态力传感器进行测试 (型号为 501F01, 参考灵敏度为 10.69 mV/N, 测量极限为 500 N, 北京一洋应振测试技术有限公司), 通过数据采集系统进行数据采集分析 (DH5902 坚固型, 江苏东华测试技术股份有限公司), 动态力测试装置示意图如图 4 所示。

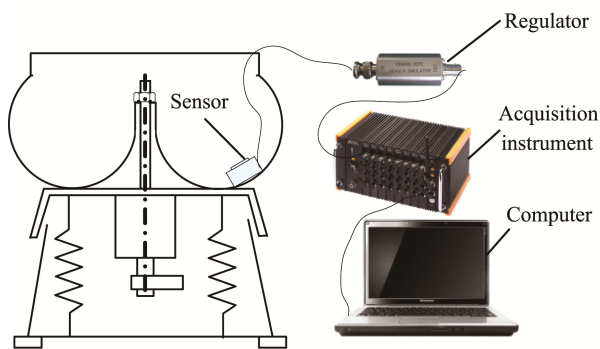


图4 动态力测试装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of dynamic force testing device

2 加工结果及分析

2.1 贴壁式与自由式对试件加工的影响

选用初始表面粗糙度基本相同 (R_a 值约为 $2.6 \mu\text{m}$) 的两组 45# 钢试件, 一组三件自由式放置, 另一组三件在图 3 所示的 P3 位置贴壁式放置, 进行同步加工实验。试件表面粗糙度 R_a 值对比如图 5 所示。由图 5 可知, 随着时间延长, 两组试件表面粗糙度 R_a 值均逐步降低, 贴壁式加工的试件表面粗糙度 R_a

值最终达到或接近极限状态。加工 1 h 时, 自由式加工试件 R_a 值约为 $2.4 \mu\text{m}$, 但贴壁式加工试件已小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。由此可知, 贴壁式相比自由式加工, 表面粗糙度减小的速度明显较快, 贴壁式加工可提高加工效率。

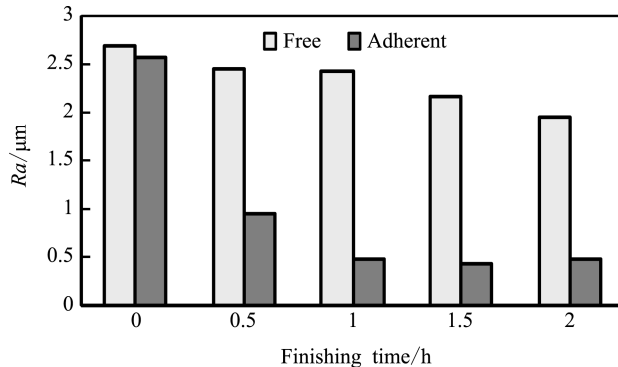


图5 自由式与贴壁式试件表面粗糙度值对比

Fig.5 Surface roughness value comparison of free and adherent specimens

2.2 贴壁位置对试件加工的影响

将钛合金 TC4 (Ti-6Al-4V)、铝合金 (A356)、304 不锈钢 3 组试件分别放置在图 3 所示 P1—P5 位置, 自由式放置的试件记为 P0, 不同安放位置处试件表面粗糙度 R_a 值随加工时间的变化如图 6 所示。

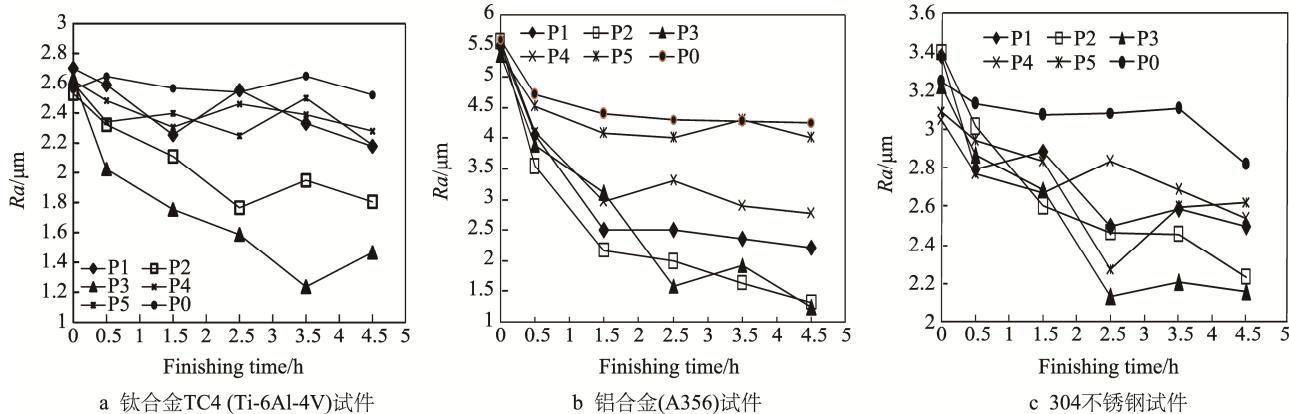


图6 不同安放位置处试件表面粗糙度值变化

Fig.6 Surface roughness value changes of (a) titanium alloy (b) aluminum alloy (c) 304 stainless steel specimens in different laying position

从图 6a 中可以看出, 随着时间的延长, P0 位置 (自由式) 加工后钛合金试件表面粗糙度几乎无变化, P1—P5 的 5 个位置 (贴壁式) 加工后钛合金试件的表面粗糙度均逐渐降低。P3 位置加工的试件表面粗糙度降低速度最快。P2 位置加工后的试件较 P1、P4 和 P5 位置加工后的试件 R_a 值较低, 但 P1、P4 和 P5 三个位置对试件加工效果影响的差别不明显。

从图 6b 中可以看出, 随着时间的延长, P0 位置及 P1—P5 位置加工后的铝合金试件表面粗糙度 R_a 值均有不同程度的下降, P1—P5 位置加工后试件的 R_a 值均低于 P0 位置。P3 位置及 P2 位置试件的 R_a

值变化规律接近, 较 P1、P4 和 P5 位置表面粗糙度降低速度快。

从图 6c 中可以看出, 随着时间的延长, P1—P5 位置加工后的不锈钢试件较 P0 位置加工后的试件表面粗糙度降低速度快。P3 位置加工后试件 R_a 值最低, P2 位置其次, P1、P4 和 P5 位置加工后试件 R_a 值变化规律接近。

综上所述可知, 相对于自由式加工, 贴壁式加工对试件表面粗糙度的改善效率有明显优势。对于钛合金 TC4 (Ti-6Al-4V)、铝合金 (A356)、304 不锈钢三种不同材料的试件, 容器底部位置均为相对最佳

加工位置, 容器内侧中部位置其次, 均明显优于其余三个位置; 容器内侧上部、容器外侧上部和中部位置对加工效果的影响规律不明显。对比 P3 位置处三种材料试件的加工速率得出, 铝合金试件加工速率最高。因此, 在实际生产中, 相对钛合金与不锈钢材料, 铝合金材料试件可适当减少加工时间。

在实际生产中, 针对薄壁片状工件进行贴壁式振动光饰加工时, 一般加工时间为 0.5~2 h。从图 6 中可以看出, 与实际生产中相比, 三种材料试件的实验加工时间均较长, 原因是 Vibra King 150SX 型振动光饰机的加工动力小, 容器小, 加工能力不足, 仅适用于实验研究。实际生产加工中应选用加工动力更强、容器更大、相同结构的其他型号设备。同时, 加工介质的选用对加工时间也有很大影响, 本实验不予研究。

3 测试结果及分析

振动光饰加工过程中, 试件表面粗糙度的变化和磨块与试件之间的接触力有很大关系^[16], 因此对加工过程中磨块对试件的动态力进行测试。将动态力传感器分别固定于图 3 中所示的 P1—P5 的 5 个位置, 分别测试未装入磨块及磨块装入量为 90% 时容器内外壁的动态力。每个位置有效测试 3 次, 采样频率为

1000 Hz。测试时考虑到传感器不防水, 且加工过程中是否加入液体介质, 以及液体介质的种类对力信号的影响极不明显^[4], 测试实验未加入液体介质。

未装入磨块时 P1 位置处的动态力原始信号如图 7a 所示, 将任意时刻 0.5 s 内信号局部放大, 如图 7b 所示。由图可知, 未装入磨块时动态力信号呈正余弦规律变化, 最大值为 -6.684 N。使用 Matlab 软件编写程序, 对原始信号进行傅里叶变换得出频谱图, 如图 7c 所示。得出最大幅值对应的频率为 48.233 Hz, 周期为 0.021 s。使用同一传感器, 对 P2—P5 位置进行测试发现, 未装入磨块时, 不同位置处的动态力信号差异较小。由于设备本身尺寸较小, 不同位置处振幅差异不明显, 即振动力可认为相同。

当容器中装有 90% 的磨块时, 测试 P1—P5 位置处传感器所受动态力, P1 位置处的动态力信号如图 8 所示。由图 8a 可知, 加入磨块后传感器所受的力信号不再是规律的正余弦曲线, 最大受力为 -28.909 N。经傅里叶变换后得图 8b, 最大幅值对应的频率为 42.979 Hz, 较未装入磨块时频率降低。在相同条件下于容器外壁 P1 对应位置进行测试, 得最大幅值对应的频率为 42.5 Hz。可见参振质量相同时, 容器内外壁对应位置处的振动频率基本相同。与未装入磨块时最大幅值对应的频率进行对比, 可以得出加入磨块后参振质量增加, 频率降低。

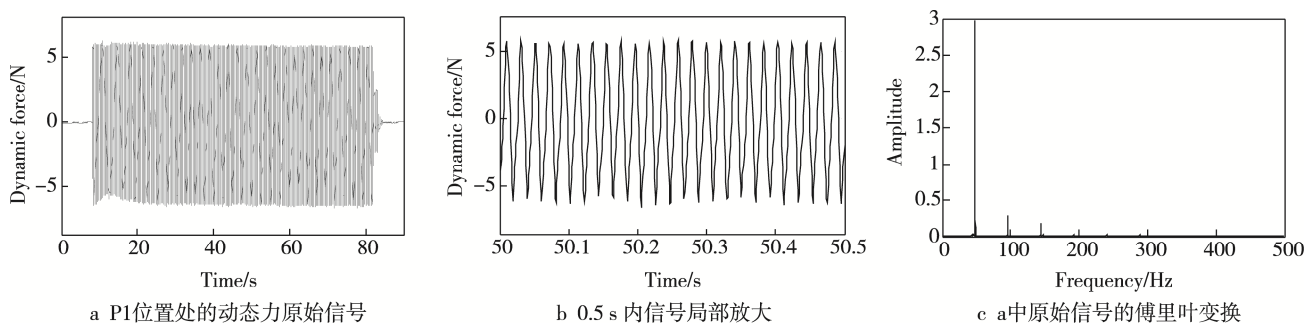


图 7 未装入磨块时 P1 位置处的动态力

Fig.7 (a) Dynamic force at P1, (b) Dynamic force at P1 in 0.5s, (c) Fourier transform of signal in (a) without abrasive particles

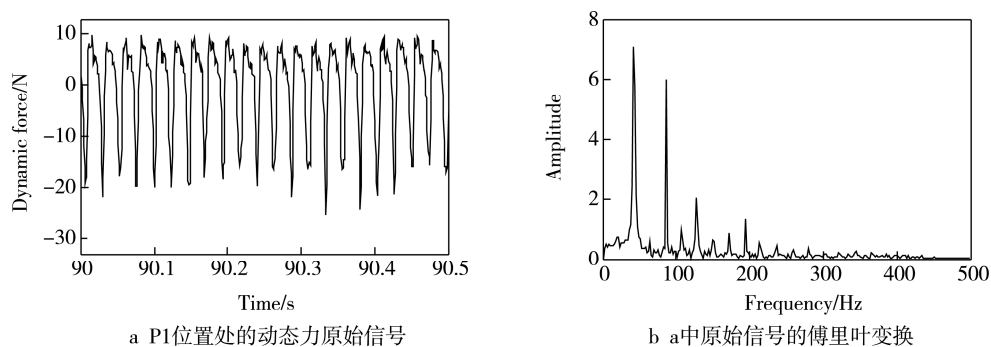


图 8 装入磨块时 P1 位置处的动态力

Fig.8 (a) Dynamic force in P1 position, (b) Fourier transform of signal in (a), loading with abrasive particles

因磨块对试件的接触频率明显低于设备的振动频率^[4],使用 Matlab 软件编写程序,对 P1—P5 位置处装入磨块时测得的动态力信号进行低通滤波处理。提取负值数据取平均值后取正^[12],得出不同位置传感器受动态力分布,如图 9 所示。

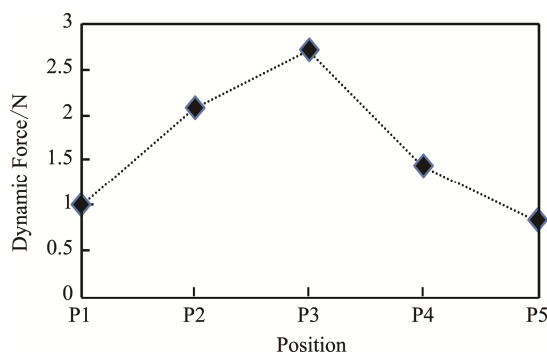


图 9 不同位置受力分布

Fig.9 Dynamic force distribution at different positions

从图 9 中可以看出,容器底部 P3 位置处磨块对传感器的平均力最大,为 2.728 N,容器内侧中部 P2、外侧中部 P4、内侧上部 P1、外侧上部 P5 位置依次降低。P3 位置受力最大,试件加工后的表面粗糙度最低,可以确定 P3 位置是相对最佳加工位置。P5 位置受力最小,加工效率较低,P2、P4、P1 位置受力依次降低。P2 与 P4 位置、P1 与 P5 位置处于容器的相同深度,但因磨块在容器中由外壁向内壁做螺旋翻滚运动,同一深度不同位置受力及加工效果并不相同。不同位置受力分布总体趋势与试件加工结果基本对应,说明试件加工效果与试件受磨块动态力的大小有直接关系。试件加工过程中磨块对试件有碰撞、滚压、刻划、摩擦等多种形式的作用力,不同形式作用力具体对加工表面质量的影响有待于研究。

4 结论

提出一种适用于中小型薄壁片状类零件,提高表面质量的贴壁式振动光饰加工技术方案。通过加工工艺实验及动态力测试实验,得出以下结论:

1) 较自由式振动光饰加工,贴壁式振动光饰加工试件时加工效率高。

2) 贴壁式振动光饰加工时,不同位置处加工试件后表面粗糙度不同。容器底部加工效率相对最高,为相对最佳加工位置。

3) 不同位置处磨块对试件的作用力不同,容器底部作用力最大。作用力和加工效果有直接关系,作用力最大的位置加工效果最好。

在实际生产加工中,需要选择合适型号的设备及设备参数、磨块及液体介质,通过制作合适的零件仿型夹具,容器底部位置可作为最佳加工位置,实现薄

壁片状零件的表面光饰加工。该加工技术可应用于航空航天、医疗、汽车等领域的多种精密薄壁片状类零件的表面光饰加工。

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 S Q, LI W H, CHEN H L, et al. Surface Finishing Theory and New Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [2] GILLESPIE L R. Mass Finishing Handbook[M]. New York: Industrial Press INC, 2006.
- [3] CARIAPA V, PARK H, KIM J, et al. Development of a Metal Removal Model Using Spherical Ceramic Media in a Centrifugal Disk Mass Finishing Machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(1-2): 92-106.
- [4] WANG S, TIMSIT R S, SPELT J K. Experimental Investigation of Vibratory Finishing of Aluminum[J]. Wear, 2000, 243(1): 147-156.
- [5] YABUKI A, BAGHBANAN M R, SPELT J K. Contact Forces and Mechanisms in a Vibratory Finisher[J]. Wear, 2002, 252(7): 635-643.
- [6] NAEINI S E, SPELT J K. Two-dimensional Discrete Element Modeling of a Spherical Steel Media in a Vibrating Bed[J]. Powder Technology, 2009, 195(2): 83-90.
- [7] NAEINI S E, SPELT J K. Development of Single-cell Bulk Circulation in Granular Media in a Vibrating Bed[J]. Powder Technology, 2011, 211(1): 176-186.
- [8] HASHEMNIA K, MOHAJERANI A, SPELT J K. Development of a Laser Displacement Probe to Measure Particle Impact Velocities in Vibrationally Fluidized Granular Flows[J]. Powder Technology, 2013, 235: 940-952.
- [9] HASHEMNIA K, SPELT J K. Particle Impact Velocities in a Vibrationally Fluidized Granular Flow: Measurements and Discrete Element Predictions[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 109: 123-135.
- [10] FLEISCHHAUER E, AZIMI F, TKACIK P, et al. Application of Particle Image Velocimetry (PIV) to Vibrational Finishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 322-328.
- [11] 张建丽,李文辉,张荔,等. 振动式滚磨光整加工过程中的受力测试与分析[J]. 表面技术, 2015, 44(7):

- 120-124.
- ZHANG J L, LI W H, ZHANG L, et al. Force Test and Analysis in the Process of Vibratory Barrel Finishing [J]. Surface Technology, 2015, 44(7): 120-124.
- [12] 陈玉楠, 李文辉, 李秀红, 等. 主轴式滚磨光整加工过程中滚抛磨块作用力测试与分析[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 33-40.
- CHEN Y N, LI W H, LI X H, et al. Force Test and Analysis of Abrasive in Spindle Barrel Finishing Process[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 33-40.
- [13] 闫霞. 瀑布式振动光饰设备振动系统的理论分析与仿真研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- YAN Xia, Theoretical Analysis and Simulation Study of Vibration System in Cascade Vibration Finishing Equipment[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [14] MEDIRATTA R, AHLUWALIA K, YEO S H. State-of-the-art on Vibratory Finishing in the Aviation Industry: an Industrial and Academic Perspective[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 415-429.
- [15] HASHIMOTO F, JOHNSON S P. Modeling of Vibratory Finishing Machines[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 345-348.
- [16] PANDIYAN V, CASTAGNE S, SUBBIAH S. High Frequency and Amplitude Effects in Vibratory Media Finishing[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 546-557.