

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.007

声悬浮抛光磨粒微流场研究*

林 云,王正伟,文东辉*,欧长劲
(浙江工业大学 机械工程学院,浙江 杭州 310014)

摘要:为了解决纳米试样超光滑表面的制备问题,将能提供稳定声压场的声悬浮抛光技术应用到流体抛光中,开展了声压场和磨粒流场之间关系的分析。利用Matlab /PDE工具箱对抛光装置内部声压仿真的方法,对比不同反射端对抛光槽声压场的影响,优化了适合抛光的反射端形状尺寸和发射端与反射端之间的距离。利用PIV测试分析了磨粒流场与声压场的相关性,建立了声压场和磨粒流场之间的关系。试验结果表明,磨粒的运动方向与声压等势线大致相同,而且磨粒的最大速度与声压大小成正比。

关键词:声悬浮;流体抛光;磨粒流;PIV;微流动

中图分类号: TG664;TH162*.1 **文献标志码:**A

文章编号:1001-4551(2013)03-0281-03

Research of abrasive microflow for acoustic suspension polishing

LIN Yun, WANG Zheng-wei, WEN Dong-hui, OU Chang-jing

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of the sample preparation of high quality, a new way of polishing named acoustic suspension polishing considering the stable sound pressure provided by the acoustic suspension was investigated. The sound pressure inside the polishing equipment was simulated by the PDE toolbox of the software Matlab. The effects of the sound pressure field in the polishing tank were compared by different reflector ends. The shape and the dimension of the ultrasonic reflector are suitable for polishing, the distance between the ultrasonic emission end and the ultrasonic reflector were optimized. With the help of the PIV, the correlation between the abrasive flow and the sound pressure field was analyzed. The results indicate that the direction abrasive moves are approximately the same as the equipotential line, while the biggest velocity of the abrasive is proportional to the sound pressure.

Key words: acoustic suspension; suspension polishing; abrasive flow; PIV; micro-flow

0 引 言

随着信息、微电子、智能系统向微型化转变,纳米器件得到了广泛应用,纳米力学作为提高纳米器件设计的理论基础得到了大量推广,美国政府报告中提出纳米技术未来的3项光辉前景中有2项与纳米力学息息相关^[1]。表征纳米力学最主要的是力学性能测量,而纳米力学的机械测量是纳米力学测量的重要组成部分,它可以通过纳米压痕、划痕测量获得相应的纳米力学参数。获得精确纳米力学参数的物质基础是高质量的纳米试样。其制备要求苛刻,试样要求表面粗糙度

值低、残余应力低,以及表面污染少^[2]。同时纳米试样需求量大特点需要提高加工的经济性。有研究表明,采用流体抛光的方法进行试样制备可以取得成功^[3]。国内外运用不同能量方式进行抛光,如电场、磁场控制流体特性的抛光以及弹性发射抛光、浴法抛光等,都存在经济性不高或加工效率方面存在不足^[4]。

郭钟宁教授^[5]将超声波作为运动载体驱动磨料应用于流体抛光技术中,在玻璃的加工中获得了 Ra 为 0.8 nm 的超光滑表面。清华大学郝鹏飞^[6]利用 Micro-PIV 系统观测了超声波引起示踪粒子微流动,其速度可达到 0.13 mm/s,提高了微尺寸条件下化学反应

收稿日期:2012-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075368);国家科技支撑计划资助项目(2011BAK15B07)

作者简介:林 云(1987-),男,江苏泰州人,主要从事精密与超精密加工方面的研究. E-mail:545827708@qq.com

通信联系人:文东辉,男,教授,博士生导师. E-mail:wendh@zjut.edu.cn

效率。Y Zhen^[7]运用压电晶体超声发生器在微小容器内引起的流体,提高了微尺度小的混合效率。J. C. Rife^[8]运用超声泵顺利完成流体微尺寸输运。上述两种现象与超声波诱发声流的原理有关,与超声波声压有紧密关系,但因为缺乏定量的测量手段,具体流动特性并不确定。运用PIV技术研究超声作用小为流动。声悬浮利用声源发出的超声波在发射端和反射端之间反复叠加后形成驻波,形成稳定声压场。

基于声悬浮基础,结合二维超声流体抛光,本研究提出一种新的可实现原子级材料去除的纳米加工技术—声悬浮抛光,通过试验装置的搭建以及有限元仿真,可知声悬浮抛光中具有稳定声压和磨粒流场,具有去除材料的效果。

1 试验原理和试验装置

当超声波激励源振动时,磨粒运动动力来源分为两部分:一个是沿声压等势线的贝努力应力(Bernoulli stress);另一个来自抛光槽空化后空化射流对磨粒的冲击。据研究,这两项运动都与声压存在密切关系。目前处理声压幅值的方法基本为有限元法。河南理工大学冯大圣^[9]利用Matlab/PDE工具箱模拟声悬浮场中的声压,仿真结果与实际相符,该仿真运用Matlab/PDE工具箱。

声悬浮试验装置的示意图如图1所示。

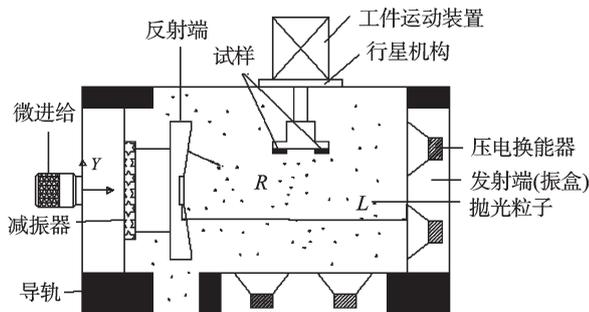


图1 声悬浮抛光装置模型

该装置的主要部件有:振盒、反射端、工件运动装置、控制器。装置的右边、底部各有一套独立的振盒,其中安装了4个呈正方形分布的换能器。在研究声悬浮声压场与抛光槽工件尺寸时,笔者选取抛光槽内最大声压幅值作为研究对象,因为它不仅能对抛光参数抛光粒子的速度有着直接影响。前面的试验研究表明,平面反射板对声悬浮抛光区域内声压稳定性影响较小,而反射端曲球半径 R 和发射端至发射端的距离 L 是影响最大声压的主要因素,本研究通过Matlab/PDE对抛光区域内声压进行仿真,对比不同模式下抛光区域内声压分布,优化设计反射端的几何参数 R ,以及发射端与反射端中心的距离 L ,使抛光槽中的声

场达到谐振模式,从而磨粒运动更加稳定。

声压在传播过程中满足速度势的波动方程式为:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

$$p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2)$$

式中: Φ —速度势, p —声压。

常用的测试流体运动方法包括LDV、PIV等。粒子图像测试技术(PIV)是一种新发展的流场测试技术。在测试过程中,它可以间接测量流场的瞬间流速场,克服了传统传感器单点测试的局限性,又具有较高的测量精度,所以近年来在国内外得到了广泛的应用和推广,具有较好的发展空间^[10]。试验中采用的示踪粒子为 $7 \mu\text{m}$ 的荧光粒子,该种示踪粒子可以吸收波长为 532 nm 的绿光。在本次试验中采用连续光源进行辅助拍摄,可以降低拍摄区域反射光对信号的干扰,减少图像误差。C. D. Meinhart等人^[11]利用PIV对宽度 $300 \mu\text{m}$,深度 $300 \mu\text{m}$ 的矩形流场测试,测得流场最大速度可达 10 mm/s 。

实验中PIV测试实物图如图2所示,PIV测试系统为Dantec PIV2100,该系统主要由硬件和软件两部分组成,硬件主要包括激光光源、CCD相机、计算机3部分。软件部分包括同步控制软件、实验图像采集软件、PIV分析软件。图像采集软件是PIV图像处理系统的核心。其中CCD采集速度是 25 fps ,分辨率为 768×576 。试样中示踪粒子为 $7 \mu\text{m}$ 的氧化铝。测量的空间分辨率为 $20 \mu\text{m}$ 。

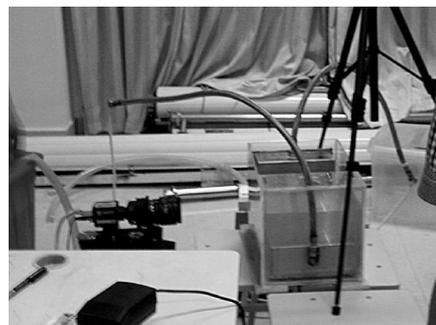
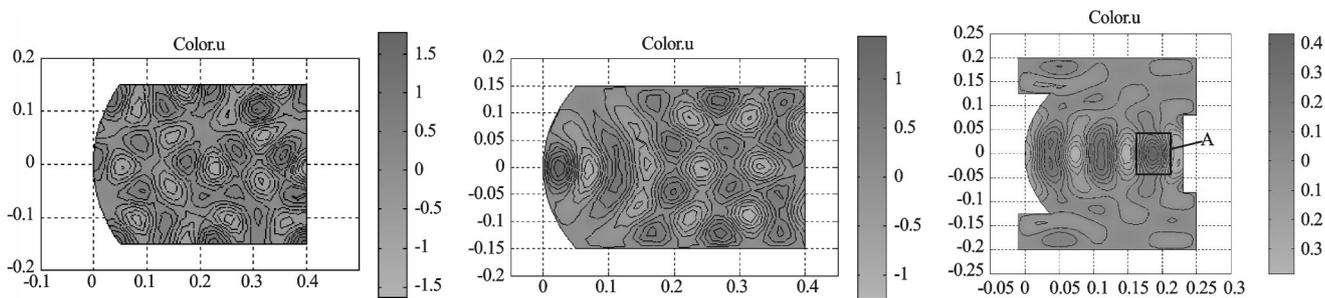


图2 PIV测试实物图

2 试验结果与讨论

在声压仿真过程中,假设流体为理想的、连续的,超声波发射端功率为 400 W ,频率为 28 kHz ,本研究利用Matlab/PDE工具箱对声压场进行仿真,沿 x 轴中截面(对称面)上声压分布如图3所示。其中,自由面反射的抛光装置(无反射端)如图3(a)所示;刚性壁反射抛光装置(普通反射端)如图3(b)所示;优化后的声悬浮抛光装置如图3(c)所示。图3中颜色较深的为声



(a) 自由面反射声压分布

(b) 刚性壁反射声压分布

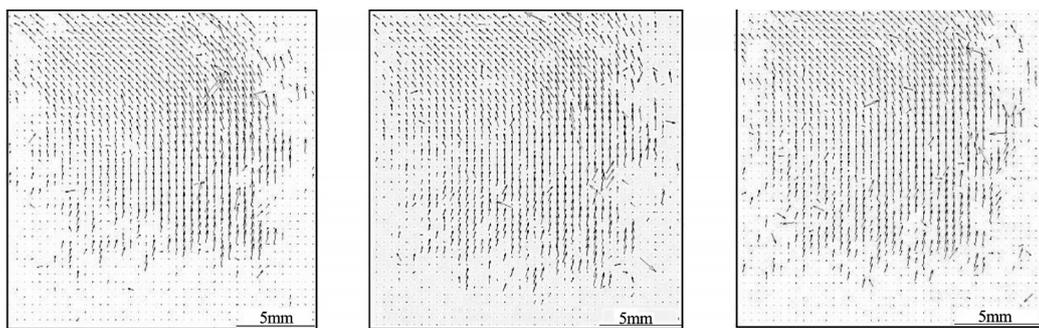
(c) 声悬浮场声压二维分布

图3 不同反射端端下声压分布

压幅值的极大处,颜色较浅的为声压幅值较小处。曲线为声压等势线。

自由面反射的抛光装置内的二维声压分布如图3(a)所示,声压分布紊乱;刚性壁反射的抛光装置内的二维声压幅值如图3(b)所示,与无反射端的情形相比较,该图中声压大小在发射端与反射端之间交替变化,分布较为均匀,但靠近反射端处声压也较紊乱;声悬浮场声压二维分布如图3(c)所示,图中有2个声压极小值和极大值点,声压幅值最大为0.4 MPa。笔者利用715所标准水听器($M = -218$ dB)测量抛光槽内最大声压大小为0.45 MPa,与仿真结果相符。其中声压每一个极值点都代表一个工件安装的预期位置。最终,由图3(c)中声悬浮抛光装置反射端半径为140 mm, L 为180 mm。

本研究利用如图2所示的PIV 装置测量超声功率为400 W(3 W/cm²)、超声频率为28 kHz条件下,0~5 min 沿X轴中间截面(对称面)上速度分布,CCD相机拍摄聚焦区域为图3中区域A,测试面积大小为20 cm×20 cm,空间分辨率为20 μm。从图3(a)发现,流场中垂直于超声振动方向不存在涡流,示踪粒子运动方向先竖直向上,在到达中间位置处,示踪粒子往左边倾斜。与声压等势线方向对比,它们在方向上大致相同。在声压较弱的边缘,示踪粒子几乎不运动,最大速度发生在声压较大处,最大速度值为0.11 mm/s,该处声压幅值为0.01 MPa。超声波发射端功率为400 W下,在第2 min、3 min,区域A处的示踪粒子流场分布如图4(b)、4(c)所示,在工作时间上,流场总体保持稳定,这与前文所述的声压分布有密切关系。



(a) 超声引起A处瞬间流场(1 min)

(b) 超声引起A处瞬间流场(2 min)

(c) 超声引起A处瞬间流场(3 min)

图4 超声引起A处瞬间流场测试

流场中磨粒最大速度与超声波发射端声压基本呈线性关系如图5所示。

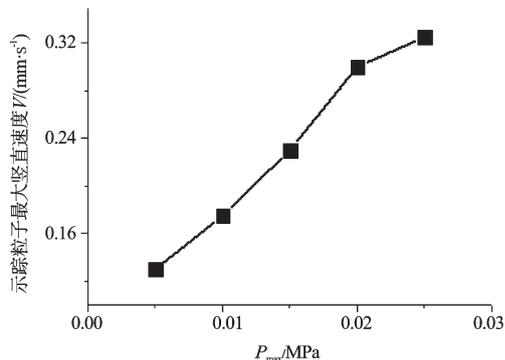


图5 声压与磨粒最大速度关系

试验结果表明,稳定的声压是声悬浮抛光的关键,磨粒微流场的运动与声压值的关系非常密切。

3 结束语

本研究利用有限元方法分析对比了不同反射端对抛光槽内声压稳定性影响,验证了设计的声悬浮抛光结构可产生稳定声压场。笔者利用粒子图像测试技术(PIV)研究了声压场引起的磨粒流场结构,发现了垂直超声波发射端的磨粒运动平面,并且运动方向与声压等势线大致相同。根据声流产生机理分析可知,声压的不均匀性分布是驱动磨料运动的主要原

(下转第287页)

频率调节方式的互锁。本研究通过指示灯 HL3、HL4 和 HL5 对被选择的频率调节模式进行显示。

(4) 变频器参数的设定及系统状态的显示。要满足上述的电机启动及调速控制功能,除了具备上述控制电路外,研究者还要对变频器的运转指令来源、频率指令来源等功能参数以及相应的运转状态参数进行设置。此外,工作台转速是变位机运转过程中需要监视的关键参数之一,研究者通过对变频器开机显示参数、频率显示倍率等参数的设定,可实现变频器操作面板上工作台转速的显示。本研究设定变频器为矢量控制方式,以提高低频下输出转矩。

(5) 回转导电系统。为满足电弧堆焊工艺要求,必须将焊机地线安全、可靠接入变位机。本研究在工作台主轴末端与主轴同轴安装导电滑环,通过导电滑环将焊机地线接入工件。导电滑环的两接线端子同轴线安装,可作相对转动。两接线端子分别接入主轴和焊机地线。导电滑环为单极,允许通过最大电流为 650 A。

3 结束语

轴类、盘类零件是工程机械典型零件之一。在工程机械零件修复中,常常需涉及这类零件某些回转面的堆焊修复。本研究介绍了一种用于装卡工程机械轴类、盘类零件,并对零件回转面进行堆焊的变位机。该设备通过工作台的翻转,可以实现工件空间位置的优化。通过变频技术的应用,可以实现工作台回

转的启动、停止、正/反转、调速等控制。通过变频器的设定以及相应控制电路,不仅能实现变位机的独立控制,而且还实现了与焊接机器人、机械手臂等其他配套装备联机控制。

参考文献(References):

- [1] 曾江. 堆焊技术的发展及实践经验的推广[J]. 金属加工, 2010, 24(4): 8-9.
- [2] 何实, 李家宇, 赵昆. 我国堆焊技术发展历史回顾与展望[J]. 金属加工, 2009, 24(22): 24-27.
- [3] 杨威, 张海燕, 尼军杰. 原料立磨的自保护堆焊技术[J]. 新世纪水泥导报, 2009, 12(6): 51-53.
- [4] KIM D W, CHO J S, NNAJI B O. Robot arc welding operations planning with a rotating/tilting positioner [J]. **International Journal of Production Research**, 1998, 36(4): 957-979.
- [5] 唐佳富. 新型焊接变位机的研制[J]. 机械工人, 2007(1): 31-32.
- [7] 韩安容. 通用变频器及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [8] 刘治平, 章青编. 机电传动控制[M]. 天津: 天津大学出版社, 2007.
- [9] 康艳军, 朱灯林, 陈俊伟. 曲线焊缝弧焊机器人和变位机之间协调运动的研究[J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(1): 76-80.
- [10] ZHANG Qing, ZHANG Jian-xin, XV Lian-jiang. Grouting control for deep-water jacket skirt pile [J]. **Transactions of Tianjin University**, 2006, 12(5): 369-372.

[编辑: 李辉]

(上接第 283 页)

因, 而声压的分布随着声悬浮结构变化而变化。通过测量而得不同功率下磨粒最大速度与超声波发射端功率呈线性关系。因此, 声悬浮抛光装置可以产生一种稳定的磨粒运动, 该运动可以有效地降低纳米试样的表面残余应力与表面损伤层。

参考文献(References):

- [1] 杨卫, 马新玲, 王洪涛, 等. 纳米力学进展[J]. 力学进展, 2002, 32(2): 161-174.
- [2] 张泰华. 微纳米力学测试技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] RING T A, FEENEY P, BOLDRIDGE D, et al. Brittle and ductile fracture mechanics analysis of surface damage caused during CMP [J]. **Journal of the Electrochemical Society**, 2007, 154(3): 239-248.
- [4] 袁巨龙. 功能陶瓷超精密加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [5] 黄志刚. 基于数值仿真的流体振动抛光机理研究[D]. 广

州: 广东工业大学机械电子工程学院, 2007.

- [6] 郝鹏飞, 何枫, 王健, 等. 利用 PIV 研究超声波引起的微流动现象[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 64-68.
- [7] ZHEN Y, SOHEI M, HISOSHI G, et al. Ultrasonic micro-mixer for microfluidic systems [J]. **Sensor and Actuator A**, 2001, 93(3): 266-272.
- [8] RIFE J C, BELL M I, HORWITZ J S, et al. Miniature valueless ultrasonic pumps and mixers [J]. **Sensors and Actuators**, 2002, 86(1): 135-140.
- [9] 冯大圣. 单轴式声悬浮器的优化设计及其悬浮性能研究[D]. 焦作: 河南理工大学机械与动力工程学院, 2007.
- [10] THEUNISSEN R, SCARANO F, RIETHMULLER M L. An adaptive sampling and windowing interrogation method in PIV [J]. **Measurement Science and Technology**, 2007, 18(1): 275-287.
- [11] MEINHART C D, WERELEY S T, SANTIAGO J G. PIV measurements of a microchannel flow [J]. **Experimental in Fluids**, 1999, 27(5): 414-419.

[编辑: 张翔]