

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.06.007

线性液动压抛光装置设计及其动压力分布研究*

沈张军,文东辉*,袁巧玲

(浙江工业大学 机械工程学院,浙江 杭州 310014)

摘要:针对以往液动压抛光装置中存在的压力较小、不均及离心力无法消除的问题,提出了一种线性液动压抛光方法。基于液体动压润滑理论,该方法在抛光液浸没环境中,以高速旋转的辊子带动抛光液对工件表面进行了材料微量去除;同时,设计了一种新型抛光辊子,并在辊子表面设计了不同形状的沟槽,加强了液动压效应;利用 CFD 软件,对抛光环境下的流体进行了数值模拟,得出了线性液动压抛光的流体压力分布,并与前人的研究结果进行了比较。研究表明,新装置所能形成的液体动压力明显大于以往装置,该线性抛光方式能够提高加工区域的流体压力,并能改善压力不均及离心力等问题,更好地满足超精密抛光的需求。

关键词:新型;液动压;旋转辊子;抛光;数值模拟

中图分类号:TH122;TG356.2⁺8

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)06-0586-04

Design and dynamic pressure distribution of linear hydrodynamic polishing machine

SHEN Zhang-jun, WEN Dong-hui, YUAN Qiao-ling

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

Abstract: Aiming at the problems such as low and unbalanced fluid pressure, inevitable centrifugal force, a linear hydrodynamic polishing method was put forward. This method is based on fluid hydrodynamic lubrication theory, using the polishing roller in fluid surrounding at high-speed rotation to drive the slurries to realize the process of micro-wipe off of workpiece surface. A new polishing roller was put forward and different kinds of grooves were also designed to strengthen the effect of hydrodynamic pressure. Fluid model in polishing environment was also simulated by CFD software to get the result of fluid pressure distribution of linear hydrodynamic polishing and compare it with former achievements, it was found that the new device could form a more powerful dynamic fluid pressure than former devices. The results candidate that the new device could form a more powerful dynamic fluid pressure than former devices, that means this linear polishing method is better to enhance the fluid pressure in working area and problems like pressure unbalance and centrifugal force, so that to meet the requirement of ultra-precision polishing better.

Key words: new type; hydrodynamic; rotation roller; polishing; numerical simulation

0 引言

随着微电子技术和微系统的发展,许多微小结构得到了实际应用,材料在微小尺度下的力学性能研究也逐渐成为关注的对象。因此,如何高效稳定地获得超光滑、低损伤的超光滑表面作为超精密加工的一个重要分支,已逐渐成为超精密表面加工领域的科学前

沿和研究热点^[1]。

线性化学机械抛光装置最早由 Lam Research Corporation、OnTrak System Inc. 等共同研发,Yi^[2]在此基础上分析了线性单面化学机械抛光的摩擦学特性;而后 Yasui 等^[3]研制开发了线性双面化学机械抛光机床,并成功应用于磁盘基片的抛光;Lee、Wang 等^[4-5]改进了新型线性化学机械抛光装置,使其具有线接触抛

收稿日期:2017-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305399;51375457)

作者简介:沈张军(1993-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事超精密研磨加工方面的研究。E-mail:15868153066@163.com

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

光加工的特征,通过控制加工载荷、旋转速度、进给速度等参数对加工过程的作用规律,得出辊子旋转速度对加工均匀性无明显影响。

本研究在以非接触式游离磨粒抛光为研究对象的基础上,提出一种线性液动压抛光新方法。该线性液动压装置采用全浸没式加工方法,与以往的液动压装置相比具有下列特点:

(1)抛弃传统装置中的圆形工件盘结构^[6],避免工件在加工过程中所受的离心力影响;

(2)该装置中直线分布的液动压效应不会因为圆柱辊子的速度提高而产生压力分布不均匀的情况,能有效改善以往抛光盘流体液动压力沿直径方向分布不均匀的缺陷;

(3)突破以往液动压装置中存在的 kPa 级^[7-8]限制,液动压效果在一定程度上得到增强。

1 线性液动压抛光装置与辊子模型

1.1 线性液动压悬浮抛光原理

流体润滑理论^[9]大致经历了以下几个阶段^[10]:

(1)牛顿(I·Newton)奠定了流体润滑的基础,为粘度作了定义;

(2)1883年,英国学者托尔(B·Tower)通过对火车轮轴滑动轴承的实验研究发现了流体动压现象;

(3)同年,俄国科学家彼得洛夫提出完全流体润滑的第一个表达式,即有润滑的两同心圆柱体间摩擦力表达式;

(4)随后,雷诺(O·Reynolds)提出有关流体中压力分布的雷诺方程,奠定了流体动力润滑理论的数学基础。

线性液动压悬浮抛光就是基于流体动压润滑理论,采用抛光液浸没工件、浸没或部分浸没旋转辊子的方式,使带有磨粒的抛光液在辊子的旋转驱动下,通过液体楔形形成液动压,从而使工件和辊子之间形成数十微米厚的浮动间隙,磨粒被旋转辊子带动在该间隙内对工件冲击,去除工件表面材料,从而达到对工件材料的非接触式抛光。

1.2 抛光装置及辊子的设计

磨粒与工件表面的接触状态与材料的微去除量息息相关,是获取原子级超光滑表面的重要影响因素^[11-13]。国内外学者相继研究了浴法抛光、浮法抛光、弹性发射抛光、水面滑行抛光等众多抛光方法^[14-17]。在当前的低弹性模量试样的原子级超光滑表面的平面抛光方法中,浴法、浮法与弹性发射抛光更具代表性。通过上述流体抛光的研究理论、技术方法和实验结果,可以得出结论:依赖于磨粒与工件表面间

的准/非接触形态的具有流体动压效应的抛光技术是获取超光滑表面的主要手段,但也存在一些不足之处:

(1)特殊的抛光盘如锡盘需要精细的制造,并且需要经过精细的修整以确保其平面度及沟槽角度和形状;

(2)浴法抛光和浮法抛光的流体动压效应微弱,对工件表面的材料去除率较低;

(3)设备的成本高,获得均匀流场的控制难度相对较大。

为了克服以上问题,笔者设计了线性液动压抛光装置。该装置包括旋转辊子、运动平台、工件载盘等部分,其中在辊子表面设计了如L形、抛物线形、楔形等的结构化表面,可以形成液动压效应。

线性液动压抛光加工装置如图1所示。

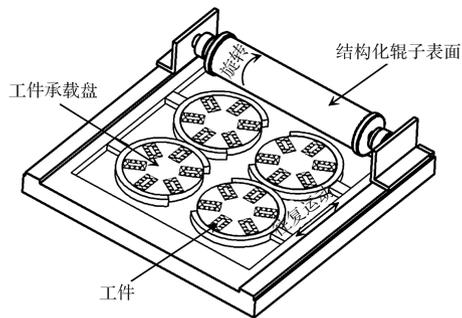


图1 线性液动压抛光加工装置

装置工作时,将工件贴片于载盘并固定在运动平台上,将辊子固定并高速旋转,由于液体动压效果,辊子转动时会产生上浮力使辊子离平台约 50 μm。

上述运动均在抛光液环境中进行,抛光液中的磨粒在高速旋转的辊子带动下以接近水平角度撞击工件表面,以此达到除去工件表面材料的目的。

装置的一些相关参数如表1所示。

表1 线性液动压抛光装置部分参数

参数名称	数值
辊子直径/mm	90
辊子材质	铝合金
工件尺寸/mm	30 × 10 × 1
工件载盘移动速度/(m · s ⁻¹)	0.25
辊子转速/(rad · s ⁻¹)	628
辊子与工件间隙/μm	50
工件材质/弹性模量	聚碳酸酯/3 GPa、牙齿/ 20 GPa、玻璃/55 GPa
磨粒直径/μm	5

2 抛光流体的数值模拟

2.1 确定流体模型及划分网格

如前文所说,抛光辊子的尺寸设计为长 350 mm,直径 90 mm,转速设为 6 000 r/min,材质为铝合金,并在辊子表面设计有 L 形、抛物线形或楔形等结构。本

文取 L 形沟槽进行说明。

辊子模型如图 2 所示。

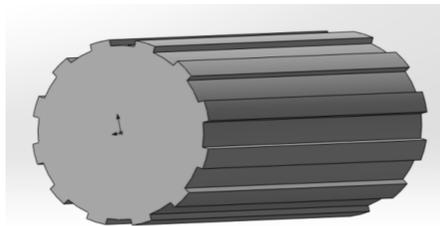


图 2 线性液压抛光辊子

抛光液设计固液比为 1:19,取纯水作为液体部分,固体部分(磨粒)材质为 SiO_2 ,磨粒直径设为 $5 \mu\text{m}$ 。并以此确立辊子及相应的流体模型。

线性液压流体模型剖面图如图 3 所示。

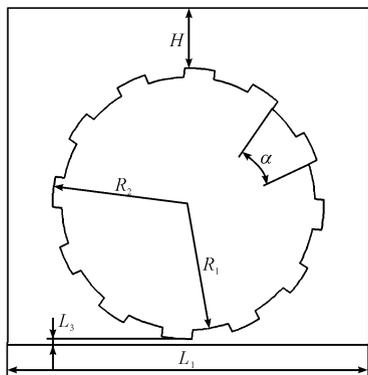


图 3 线性液压流体模型剖面图

流体模型尺寸如表 2 所示。

表 2 流体模型的几何尺寸

参数名称	数值
下表面宽度 L_1/mm	120
辊子内径 R_1/mm	40
冲击区域高度 $L_3/\mu\text{m}$	50
液面高度 H/mm	300
辊子外径 R_2/mm	45
模型单元角度 $\alpha_1/^\circ$	30

首先本研究利用 SolidWorks 软件对流体进行三维建模,并在 Ansys Workbench 软件工具栏中打开 Fluid Flow(Fluent)仿真系统,将流体模型以 x_t 格式文件导入到 Fluent 系统中的 Geometry 模块,并在 Mesh 模块中对其进行网格划分。

本文对对象模型采用六面体网格画法对其进行网格划分,因为六面体网格在计算精度、变形特性、划分网格数量、抗畸变程度及再划分次数等方面比其他类型的网格具有优势。本次网格划分对该模型共有 788 916 个节点,714 126 个单元网格。

2.2 边界条件设置

在研究间隙流动时,为了简化问题,并且使数值模拟过程有更好的收敛性及数值模拟的可靠性,本文在

仿真时作如下假设:

- (1) 不考虑液面处液体在辊子带动下的飞溅问题。事实上,装置有专门的挡板用以避免液体飞溅;
- (2) 假设内部流场的流体为不可压缩的粘性流体,且加工间隙中的流体状态为层流;
- (3) 流体与辊子、工件及载盘表面之间无相对滑动;
- (4) 流体运动过程中不考虑抛光辊子的热变形。

根据以上假设,抛光液边界处压力为 0,因此本研究将流体出口处(液面)的边界类型设置为 Pressure Outlet,边界条件 Initial Gauge Pressure、Gauge Total Pressure 均设置为 0;流场下表面(运动平台)设置为移动壁面 Moving Wall,取 Absolute Speed 为 0.25 m/s ;流体与辊子接触面(辊子表面)设置为旋转壁面 Rotating Wall,取 Absolute Rotational Speed 为 628 rad/s ,即辊子旋转速度为 6000 r/min ;流场的两侧壁面设置为静壁面 Static Wall;

2.3 数值计算结果及机制分析

本文以 Ansys Fluent 为计算平台,采用 3D 单精度损态隐式压力基求解器进行求解。

仿真参数如下:

辊子转速 6000 r/min ,加工间隙为 $50 \mu\text{m}$,抛光液粘度为 $0.001003 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

得出的流体压力分布云图如图 4 所示。

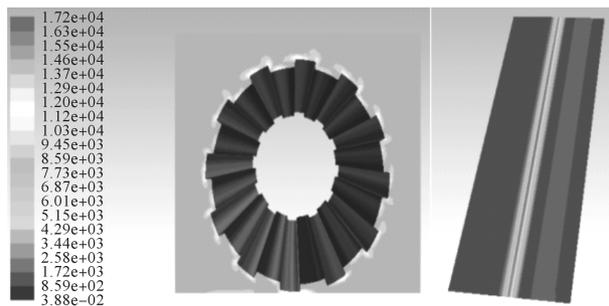


图 4 流体/工件表面的动压力分布云图

从图 4 可以看出,流体压力主要分布在旋转辊子与液体的接触面附近,并且在一个单元结构内,沿辊子运动逐渐增大,在 L 形沟槽的约束边界处达到最大。而当沟槽截面突扩时,引起流体的相互碰撞并形成漩涡造成局部能量损失,因而流体压力较小。其中可以看出,当辊子结构单元转动离运动平台达到最近距离时,沟槽表面所形成的液体动压力也随之达到最大,约为 17.2 kPa ,达到 10^4 数量级,从工件动压分布图亦可看出,工件表面压力在此时也达到最大。

笔者将其与以往的液压抛光装置^[8]进行对比分析。

传统抛光装置工件载盘动压力分布云图如图 5 所示。

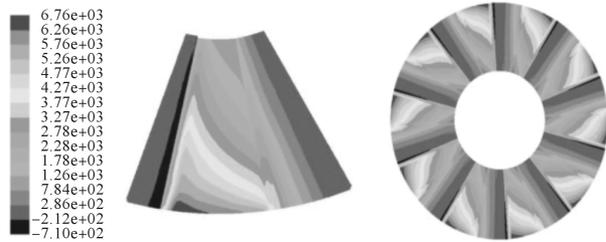


图5 传统抛光装置工件载盘动压力分布云图

从图5可以看出,在工件抛光加工区域中,所能达到的最大流体动压力仅为约6.7 kPa(载盘边缘处),且该装置只能用于加工铜等弹性模量较大的材质。

该装置能够达到的动压数量级数为以往的液动压抛光装置所能达到的数值(10^3 级)的约3倍,在抛光纳米级材料表面的效果方面有较大的提升。并且如上文所述,新装置不存在圆形抛光盘中的离心力与径向动压力不均等问题,能更好地满足超精密抛光的需求。

3 结束语

本研究在以非接触式游离磨粒抛光为研究对象的基础上,提出了一种线性液动压抛光新方法,并设计了一种新的抛光装置。研究表明:相较以往液动压抛光装置,该装置有其独有的优点,能够较好地替代以往装置,完成对材料的抛光任务。具体如下:

(1)针对以往液动压抛光装置中存在的压力较小、不均及离心力无法消除的问题,笔者设计了一种线性液动压抛光装置,提出了液动压抛光新方法。该新方法能有效改善此类问题;

(2)根据流体动压理论,对线性液动压抛光装置的流场区域进行数值模拟,结果表明:该装置中所产生的液体动压力相较以往,有了明显的提升,对加工超精密工件产生积极影响。线性液动压抛光装置所能产生的液体动压力突破了以往装置所能产生的 10^3 级,并在此基础上提升了一个数量级;

(3)同时,线性分布的液动压力不会因为辊子转速的提高而产生压力分布不均的问题,能有效改善以往装置中的缺陷。

参考文献(References):

- [1] 李言,孔祥健,郭伟超,等. 纳米压痕技术研究现状与发展趋势[J]. 机械科学与技术,2017,36(3):469-474.
- [2] YI J G. Friction modeling in linear chemical-mechanical planarization[J]. *IEEE Control Systems Magazine*,

2008,28(5):59-78.

- [3] YASUI H, FUKAKUSA N, YAMAGUCHI K. Development on linear motion type of high efficient ultra-smoothness double sides polishing machine: trial manufacturing of machine and some experiments[J]. *The Japan Society for precision engineering*,2010,76(10):1171-1175.
- [4] LEE H, WANG H, PARK J, et al. Experimental investigation of process parameters for roll-type linear chemical mechanical polishing (Roll-CMP) system[J]. *Precision Engineering*,2014,38(4):928-934.
- [5] LEE H. Mathematical modeling of material removal rate in roll-type linear CMP (roll-CMP) process: effect of polishing pad[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*,2016,17(4):495-501.
- [6] 荣烈润. 超精密研磨抛光方法[J]. 航空精密制造技术,2005,41(2):4-8.
- [7] 徐钉,文东辉,朴钟宇. 液动压悬浮抛光流场的数值模拟及其试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械学院,2015.
- [8] 孙发青,李庆忠. 基于正交试验的雾化施液抛光工艺参数研究[J]. 轻工机械,2016,34(5):7-11.
- [9] 陈伯贤,裘祖平,张慧生. 流体润滑理论及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [10] 宋强,孙逢春,马金奎. 滑动轴承油膜参数识别及稳定性研究综述[J]. 润滑与密封,2002(4):40-43.
- [11] 程宇,马会娟. 基于油液清洁度要求的滑靴油膜厚度设计[J]. 液压气动与密封,2016(9):4-6.
- [12] 安永畅男. 研磨加工[M]. 东京:东京电机大学出版社,2011.
- [13] 郭东明,孙玉文,贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展[J]. 机械工程学报,2016,50(11):119-134.
- [14] DIETZ R W, BENNETT J M. Bowl feed technique for producing supersmooth optical surface[J]. *Applied Optics*,1966,5(5):881-882.
- [15] RINGEL G A, FRANK K, DIRK-ROGER S, et al. Manufacture and calibration of optical supersmooth roughness artifacts for intercomparisons[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*,1995(2536):317-326.
- [16] LI C J, XIAO J L. The experimental study of super smooth surface processing technology for optical glass and sapphire component[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*,2005(5635):349-360.
- [17] NAMBA Y, OHNISHI N, YOSHIDA S, et al. Ultra-precision float polishing of calcium fluoride single crystals for deep ultra violet applications[J]. *Annals of the CIRP*,2004,53(1):459-462.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

沈张军,文东辉,袁巧玲. 线性液动压抛光装置设计及其动压力分布研究[J]. 机电工程,2018,35(6):586-589.

SHEN Zhang-jun, WEN Dong-hui, YUAN Qiao-ling. Design and dynamic pressure distribution of linear hydrodynamic polishing machine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(6):586-589.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>