

磁流变抛光轮结构设计与磁场分析

郭隐彪, 郭江, 沈芸松

(厦门大学 微纳米加工与检测联合实验室, 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 目前对磁流变抛光中磁场的研究主要是进行粗略的评估, 并不能实现精确的控制. 本文对磁流变抛光中的磁场展开了更为精确的分析. 首先设计了磁流变抛光系统, 并对其抛光机理进行了阐述; 其次对磁流变抛光轮的结构进行了设计, 并对其实现方式进行描述; 进而利用有限元法对磁流变抛光轮内部磁场进行了具体分析, 得到了分布合理的梯度磁场. 利用在磁感线上取点进行拟合的方法得到磁感线方程, 计算磁感线与磁流变抛光轮表面所围成的面积值, 可通过有效控制磁流变抛光液的截面流量使其按照指定磁感线进行分布, 完成整个抛光过程, 从而为利用磁场控制磁流变抛光液进行确定性抛光提供了保证.

关键词: 磁流变抛光(MRF); 有限元; 磁场分析; 数据处理

中图分类号: TG 76

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2008)04-0528-04

光学元件其表面精度和表面质量的提高离不开超光滑表面抛光技术的支持. 最近一种新型的抛光技术——磁流变抛光技术能够加工出超光滑的表面, 而且几乎没有变质层, 因而越来越受到各国研究人员的广泛关注^[1]. 磁流变抛光技术是由美国 Rochester 大学的 Kordonski 及其合作者^[2]将电磁学、流体动力学、分析化学相结合而提出的一种新型的光学零件加工方法. 他们的加工中心将电磁学、流体动力学、分析化学的理论结合于光学加工, 已经研制出了 QED 系列磁流变抛光机, 可以对光学元件进行确定性加工, 并且不会产生亚表面损伤. 目前人们正在对磁流变抛光过程的化学原理和机械原理进行深入研究, 以便使这种光学加工技术得以更加成熟.

磁流变抛光能够顺利进行的两个前提条件: 一是提供适合于磁流变抛光的梯度磁场, 二是配制出具有良好流变性的磁流变抛光液^[3-4]. 本文针对第一个前提条件展开基础研究, 设计出结构合理的磁流变抛光轮, 从而得到分布合理的磁场. 通过在磁感线上取点进行拟合的方法得到磁感线方程, 计算磁感线与磁流变抛光轮表面所围成的面积值, 可通过有效控制磁流变体的截面流量使其按照指定磁感线进行分布, 完成整个抛光过程, 从而为实现利用磁场控制磁流变抛光液形成“小磨头”的大小、形状以及“小磨头”作用于工件上的压力, 进而控制材料的去除量, 获得稳定性的抛光过程提供了保证.

1 系统工作原理

磁流变抛光系统工作原理如图 1. 将被加工的光学元件安装在抛光轮下某一高度的位置上, 于是光学元件表面与抛光轮外壳之间就形成一个汇集间隙. 磁流变抛光液(即磁流变体)由磁流变体供应装置提供. 抛光过程中, 在光学元件和抛光轮外壳所形成的汇集间隙附近会形成一个高梯度的磁场, 磁场由抛光轮内部电磁场提供. 抛光轮内部电磁场对磁流变抛光液施加约束但保持不动, 抛光轮外壳带动其旋转抛光.

当磁流变抛光液经液压泵由液体喷射器送出到达抛光轮外壳后, 在高梯度磁场的作用下, 磁流变液受力压向运动盘, 形成一凸起的缎带形状. 同时磁流变抛光

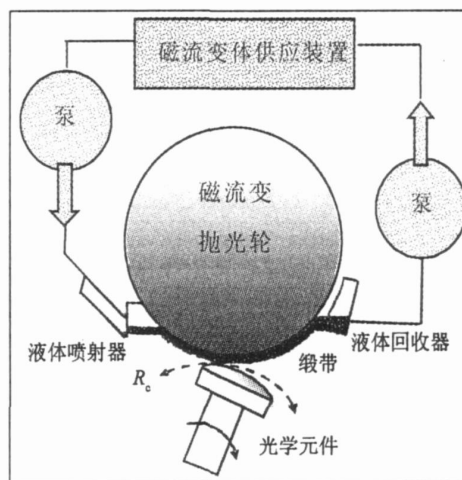


图 1 磁流变抛光系统工作原理

Fig. 1 The system principle of the magnetorheological finishing

收稿日期: 2007-10-17

基金项目: 福建省创新团队计划资助

Email: guoyb@xmu.edu.cn

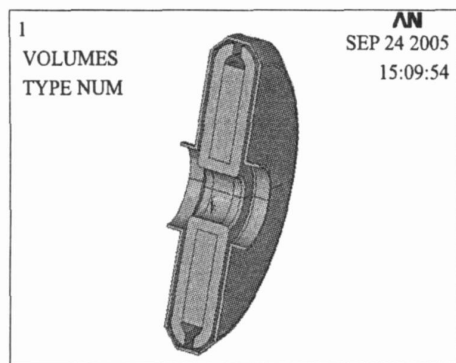


图2 电磁式磁流变抛光轮结构

Fig. 2 The cross section of electromagnetism polishing wheel

液变硬,成为具有粘塑性的 Bingham 介质.当这种 Bingham 介质随运动盘的运动进入光学元件和抛光轮外壳形成的汇集间隙时,对工件表面与之接触的区域产生很大的剪切力,从而使工件表面材料被去除.之后,随着抛光轮的旋转,磁流变液受到的磁场约束逐渐减小,变成液体,由液体回收器经液压泵流回到磁流变体供应装置.如此反复,以完成对光学元件的抛光.另外可通过调节液体喷射器口的横截面积形成不同大小的“磨头”,以满足对不同尺寸光学元件的需要.

光学元件表面被抛光的区域称为抛光区.光学元件的轴除了可以绕自身轴线做回转运动以外,还可以做以轴上某一点为中心,以工件的曲率半径 R_c 为半径的摆动.于是光学元件表面的各个带区都可以经过抛光区,从而实现对光学元件整个表面的材料去除.通过控制光学元件表面各个带区在抛光区内的停留时间,来控制各个带区材料的去除量,从而精修面形.

2 磁流变抛光轮结构设计

磁流变抛光方法可以认为是以磁流变抛光液在磁场的作用下,在抛光区范围内形成的具有一定硬度的“小磨头”代替散粒磨料抛光过程中的刚性抛光盘,因此在整个磁流变抛光装置中,磁场装置的作用是非常重要的,而且从磁流变抛光的过程可以看出,分布合理的磁场是实现磁流变抛光的关键所在,因此设计出合理的磁场是基本的前提^[5-9].

电磁场可以通过控制电流的强弱来控制发生流变的磁流变抛光液(小磨头)的硬度,相对于永磁场磁流变抛光在控制上具有更大的自由度,在磁场作用下,磁流变抛光液变硬,粘度变大,并且“小磨头”的形状和硬度可以由磁场实时控制,而影响抛光区稳定性的其他因素是固定不变的.这样既能通过控制磁场来控制抛光区的大小和形状,又能确保在一定磁场强度下抛光

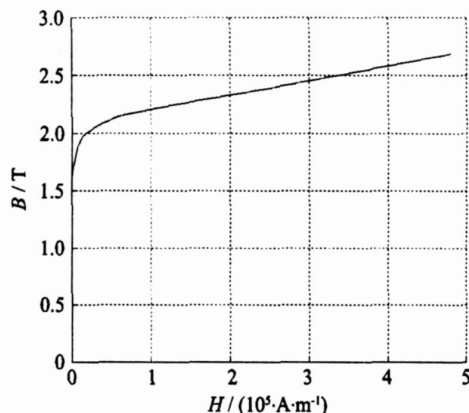
图3 软磁材料 $B-H$ 曲线图

Fig. 3 The $B-H$ curve of the magnetic material

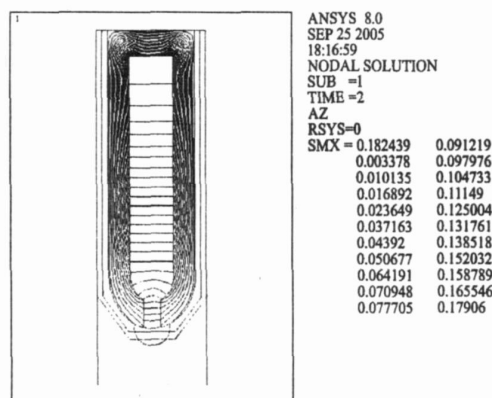


图4 磁场磁感线分布图

Fig. 4 The distributing of 2D flux lines

区的稳定性,并且加工去除量比较小,易于控制精抛光阶段工件的面形精度,因此本文决定采用电磁式磁流变抛光轮.

本文通过对比并分析多种电磁式磁流变抛光轮的结构及其形成的磁场的分布情况,设计了图2所示的结构.电磁式磁流变抛光轮由抛光轮外壳和电磁铁组成.抛光轮外壳为立式铝盘,中空壳体结构,厚度约2~4 mm,外部圆心处与机床主轴相连.电磁铁内部为线圈,铁心部分由两种材料合成,上部靠近工件所对圆心角约30°的部分由导磁性能强的软磁材料制成,磁场强度较大,用于对工件进行抛光.其余部分由导磁性能弱的材料制成,产生的磁场强度较小,用于与磁流变体供应装置配合,使得磁流变抛光液流入流出时不造成飞溅.

3 磁场建模与仿真

为验证电磁式磁流变抛光轮的结构和磁场分布的合理性,本文采用有限元法对其内部磁场进行建模与仿真.

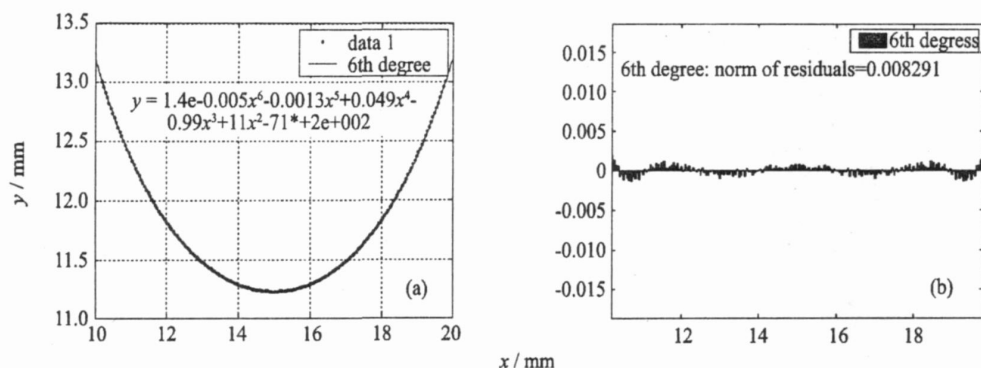


图5 6阶多项式拟合图与残差图

(a) 拟合图; (b) 残差图

Fig. 5 The 6th polynomial fitting and residual

由于抛光轮内部电磁铁为轴对称结构,故只需取其任意截面进行建模.仿真中铁心部分所用软磁材料的 $B-H$ 曲线如图3所示.仿真中网格划分的越细密,得到的结果越精确.经过创建物理环境、建立模型、划分网格、赋予特性、施加边界条件和载荷、求解后处理等操作,得到截面的磁感线的分布如图4.图中仿真结果的外方框为约束边界,内部为抛光轮轮廓和铁心,中心部分为线圈,仿真时用电流密度进行模拟.为了反映受力情况,还可得到磁通量密度和磁场强度等值线、矢量分布图等.由仿真结果可以判定磁场呈梯度分布,适合进行磁流变抛光.

4 数据获取与处理

当磁场强度很大时,磁流变抛光液的相对磁导率很低,可以认为其磁导率等于真空的磁导率,磁流变抛光液将按照磁感线分布情况进行分布,因此为更好的利用磁场控制磁流变抛光液的分布以进行确定性抛光,有必要对磁感线分布进行深入研究.

仿真中只要网格划分足够细密,所形成的磁感线分布曲线将是一条连续的平滑曲线,本文采用等弧长(等弧长方法相对其他方法可以更好的获取磁感线轮廓)的办法从其中一条合适的磁感线上取得一系列点,弧长为 0.05 mm.

经过对曲线外形和获取的数据进行分析,决定采用最小二乘意义上多项式拟合的方法,它将保证在数据点上残差最小.经过编程运行,可得到 2~10 阶多项式的拟合结果.经过运算可得:2 阶到 10 阶残差值递减,其中 2 阶,4 阶和 6 阶多项式拟合残差值分别为:0.048 939,0.043 573,0.008 289 1,越高阶次的多项式拟合的效果越好.而根据磁流变抛光所要求达到的面形精度,6 阶多项式拟合各点的误差值小于 $5 \mu\text{m}$,即可满足要求.

如图5,其中6阶多项式的拟合方程为:

$$y = 1.4367 \times 10^{-5} x^6 - 0.001293 x^5 + 0.048789 x^4 - 0.98777 x^3 + 11.377 x^2 - 71.385 x + 204.13 \quad (1)$$

进一步,为了能够有效的控制液体喷射器的截面流量,以使得磁流变抛光液按照指定磁感线进行分布,本文计算了指定磁感线与抛光轮外表面所围成的面积.用3次样条函数来模拟其边界曲线.此方法为目前计算不规则图形面积精度最高的方法.经过编程可得边界图形的面积值为 $11.880 8 \text{ mm}^2$.

5 结 论

本文针对磁流变抛光中的磁场开展了一些基础研究工作,得到以下结论:

- (1) 经过理论分析设计的磁流变抛光系统和抛光轮的基本结构,可以实现磁流变抛光的功能;
- (2) 利用有限元法得到了磁场的磁感线分布情况,在加工区域形成了较强的磁场,且分布合理,能满足磁流变抛光的要求;
- (3) 对磁感线上包含的数据进行了获取与处理,实现了对磁感线方程的精确把握.

参考文献:

- [1] Golini D. Precision optics manufacturing using magnetorheological finishing (MRF) [J]. SPIE, 1999, 3739: 78 - 85.
- [2] Kordonski W I, Golini D. Fundamentals of magnetorheological fluid utilization in high precision finishing [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2001, 10(9): 683 - 689.
- [3] Jacobs S D, Golini D, Su Y H, et al. Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing [J]. SPIE, 1995, 2576: 372 - 382.

- [4] Kordonski Wm I, Jacobs S D. Magnetorheological finishing[J]. International Journal of Modern Physics B, 1996, 10:2837 - 2848.
- [5] Zhang F, Yu J C, Zhang X. Mathematics model of magnetorheological finishing[J]. SPIE, 2000, 4231:490 - 497.
- [6] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡. 磁流变抛光中的磁场与磁流变液缎带成型分析[J]. 高技术通讯, 2004(4):58 - 59.
- [7] 郑军, 张光辉, 曹兴进. 磁流变传动装置工作机理分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30(11):20 - 22.
- [8] 胡皓, 戴一帆, 彭小强. 倒置式磁流变抛光装置的设计与研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(6):5 - 8.
- [9] 程灏波, 王英伟, 冯之敬, 等. 电磁抛光装置的结构设计及特性研究[J]. 航空精密制造技术, 2004, 40(5):19 - 22.

Structure Design and Magnetic Field Analysis of Magnetorheological Finishing Wheel

GUO Yin-biao, GUO Jiang, SHEN Yun-song

(Micro/ Nano Machining and Measuring Lab, School of Physics
and Mechanical Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The distribution and force of magnetic field in magnetorheological finishing(MRF) could not be controlled very well with the common method. In this paper, the magnetic field was studied in a more precise way. The MRF system was designed and the principle was analyzed. The structure of the electromagnetism polishing wheel was generally designed and described. The magnetic field was analyzed by finite element method and the grads magnetic field which fits to the MRF was obtained. By using the method of getting points on the 2D flux lines, the fitting equation of the 2D flux lines was acquired, and through calculating the area between the 2D flux lines and the polishing surface, the polishing curve was well controlled, and the accurate digital polishing was ensured.

Key words: MRF; finite element method; magnetic field analysis; data processing