

精密加工

高陡度光学非球面高效制造的探讨 *

陆永贵^{1,2}, 杨建东¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

2. 长春理工大学, 长春 130022)

[摘 要] 分析了计算机控制光学表面成形法、计算机控制应力盘抛光、磁流变抛光制造光学非球面元件的几项先进技术,探讨了光学元件的高速、高效加工,提出了高陡度光学非球面的固着磨料研磨加工。

[关键词] 非球面; 研磨; 高效; 高陡度

[中图分类号] TG508.68

[文献标识码] A

[文章编号] 1003- 5451(2007) 02- 0008- 03

Discussion on the Manufacturing Technology of High- Gradient Optical Aspheric Surface with High Efficiency

LU Yong- gui, YANG Jian- dong

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

[Abstract] The advanced manufacturing technology of aspheric optical surface is considered. The key technology of computer controlled optical surfacing (CCOS), computer controlled stressed lap (CCSL) and magnetorheological finishing is investigated. The manufacturing technology of optical surface with high efficiency is discussed, and the aspheric optical surface lapping with solid abrasives is put forward.

[Keywords] aspheric surface; lapping finish; high efficiency; high- Gradient

引言

目前非球面的加工方法有以下基本类型: 一是变形加工法, 二是去除加工法, 三是附加加工法。对于不同的材料, 即使是相同的非球面形状, 加工方法上也存在很大的区别。常用的非球面光学零件的材料有塑料、光学玻璃、晶体、金属及金属化合物等, 它们可以分为两大基本类型: 塑性材料和脆性材料。对于有色金属类光学零件常采用单点金刚石切削技术, 在高精度的金刚石机床上直接切出非球面零件, 面形精度可以达到 $0.3\sim 0.5\mu\text{mP-V}$, 表面粗糙度可达 $Ra6\sim 10\text{nm}$ 。对于塑料类材料通常使用模压成型的方

法。对于光学玻璃类脆性材料一般采用粗磨、精磨、抛光的工艺路线进行去除加工。

高陡度非球面是指与最接近球面相比偏离量较大(一般在毫米级或毫米级以上)的非球面。对于光学玻璃类脆性材料用去除法加工时, 高陡度非球面光学零件的加工难点在于其去除量大, 由最接近球面修磨成非球面时不容易快速去除满足抛光工序的余量, 造成制造周期长。为此, 急需找到可行的工艺方法, 代替传统的手工研磨, 提高高陡度非球面的加工效率。

1 非球面制造的几项先进技术

* 国家自然科学基金(50375021)

1.1 计算机控制光学表面成形法^{[1],[2]}

计算机控制光学表面成形法(CCOS)的理论基础是建立在普林斯顿方程基础上的。通过普林斯顿假设和线性理论推导,可以建立如下一个关于材料去除量的数学模型:

$$\frac{dh}{dt} = KPV \quad (1)$$

式中, K——比例常数,与加工过程参数有关(加工温度、磨头材料、工件材料等);

P——磨头与工件间的相对压力;

V——磨头与工件间的相对运动速度;

h——工件去除量。

由此公式可知,一旦知道了抛光模运动的特征去除函数和驻留时间函数,就可以通过卷积的方法计算在驻留区域内的材料去除量。在实际抛光过程中,选择恰当的去函数,通过控制驻留时间来取得所要求的材料去除量。

CCOS技术实现的关键在于采用高精度的加工设备以及先进的精密控制系统。CCOS的抛光机床采用计算机数控系统,控制小工具按照所编制的加工程序自动在工件表面上进行抛光。材料去除函数是一个旋转对称的连续光滑函数。平转动和行星转动方式可以取得具备以上特点的去函数。机床的机械系统为抛光模提供需要的运动。CCOS法可以加工各种类型的非球面,尤其对于口径较大、相对口径也比较大的离轴非球面工件来说,采用三轴联动的数控系统,抛光模可以精确地到达非球面上的任意一点,按照要求去除加工余量。

1.2 计算机控制应力盘抛光技术^[3]

计算机控制应力盘抛光技术采用的应力盘是大尺寸刚性盘作为基盘,由钢带拉动,在可变应力的作用下,盘的面形可以实时地变成所需要的形状。如图1所示。在加工过程中,改变力矩的大小,使应力盘始终与非球面光学工件表面相匹配。同小工具磨头一样,应力盘的磨削运动也是在数控系统控制下完成的,但是应力盘抛光技术可以很好地抑制中、高频误差的出现。

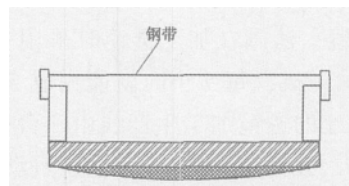


图1 计算机控制应力盘抛光

应力盘抛光技术实现的关键在于能够进行适时控制改变应力盘的面形和采用先进的数控加工设备。应力盘在加工过程中能动地改变自身的表面形状,与所在位置的非球面适配。数控设备提供所需要的精密运动和准确的控制。

1.3 磁流变抛光技术^[4]

二十世纪九十年代初,William I. Kordonski, I. Prokhorov 及其合作者将电磁学、流体动力学理论、分析化学结合于光学加工中,发明了磁流变抛光技术。这种方法利用磁流变抛光液在磁场中的流变性进行抛光。在高强度的梯度磁场中,磁流变抛光液变硬,成为具有粘塑性的介质。当这种介质通过工件与运动盘形成的很小空隙时,对与之接触的工件表面区域产生很大的剪切力,从而使工件表面材料被去除。

磁流变抛光方法,可以认为是磁流变抛光液在磁场作用下,在抛光区范围内形成的具有一定硬度的“小磨头”进行抛光。在磁场的作用下,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,而保持可能影响抛光区稳定性的其它条件都固定不变。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区的稳定性。这些优点是传统的刚性抛光盘所无法比拟的。

2 高陡度光学非球面的高效加工

2.1 光学元件的高效加工

以上几种非球面的先进制造技术已经得到了实际应用。但是,普遍存在的一个问题就是加工效率低。从光学元件的高效加工来看,美国在实际生产中,一台铣磨机、一台精磨机和一台抛光机每7个小时可以生产1680个面。德国设计的透镜生产线只用半自动透镜铣磨机四台、精磨机一台、抛光机五台、透镜自动定心磨边机三台,每7个小时就可以生产

1400 盘透镜。法国在加工透镜时采用一台铣磨机、八台透镜精抛机, 每 7 小时就能完成 500 个成品透镜。日本组建的透镜加工生产线由三台铣磨机, 两台高速精磨机、五台抛光机、三台透镜自动定心磨边机组成, 每 7 小时可生产 1400 个光学透镜。俄罗斯光学工厂的光学透镜流水生产线, 包括一台自动透镜铣磨机、一台透镜高速精磨机、五台高速抛光机, 每 7 小时可生产 1500 个光学透镜。

我国早在二十世纪八十年代初期就开展了光学冷加工最佳工艺参数的研究, 经过多年的努力提出了新的光学元件高效加工工艺。其工艺流程为刚性盘中频上盘、金刚石磨轮铣磨、金刚石固着磨料、氧化铈丸片高速抛光。这一工艺的特点可概括为刚性上盘、高速磨削、固着磨料加工, 从而实现了加工设备少、生产周期短、场地集中, 有利于形成流水作业。

2.2 高陡度非球面的固着磨料研磨加工

采用固着磨料研磨加工^[5]是超精密加工中的一种重要方法, 尤其是对于光学玻璃等绝大多数脆硬材料, 切削加工难以实现。固着磨料的研磨技术国外是在二十世纪六十年代、我国是在七十年代发展起来的。此后, 一直有专家、学者从事着固着磨料研磨加工技术的研究。固着磨料研磨是指将散粒的磨料固结起来, 制成专用磨具进行高速研磨的方法。采用固着磨料研磨工艺较好地解决了散粒磨料研磨中磨料飞溅、研磨效率低、研磨磨料与磨屑一起被清洗掉, 既造成浪费又容易污染环境等缺点。但是, 使用固着磨料进行研磨加工有一个最大的缺点就是磨具在研磨中会出现磨损, 这就要引起其面形精度发生变化, 导致工件面形精度下降。合理设计磨具表面磨粒分布密度, 使磨具能够均匀磨损, 可以解决磨具磨损引起面形精度变化问题。

设计了如图 2 所示的一种加工方法。

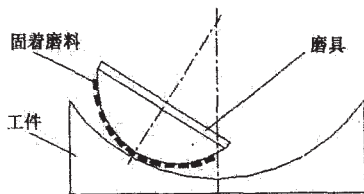


图 2 用固着磨料磨具加工非球面

根据公式(1)可以得到:

$$H(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T KP(x, y) V(x, y) dt \quad (2)$$

在 CCOS 法加工非球面中, 磨具与工件尺寸上相比很小, 可以认为压力 P 为定值; 但固着磨料磨具半径与工件半径相比很大, 在各接触点处压力分布不是均匀的, 即各点的去除量不仅与研磨速度 V 、驻留时间 t 有关, 而且还与压力 P 有关。按照设计要求可以先制造出所需半径大小的球面元件, 再用带有固着磨料的磨具将此球面元件修磨成非球面元件, 可以为后续的抛光工序快速去除加工余量。

用固着磨料磨具加工非球面可以对工件表面施加较大的压力, 因此, 在加工效率上较高。尤其对于高陡度非球面, 去除量较大, 人工研磨劳动量大, 用固着磨料磨具加工, 结合抛光等工艺, 可以有效地提高高陡度非球面的加工效率。

3 结束语

在高精度的光学玻璃元件制造方面, 模压技术还没有能够得到广泛应用。对于玻璃类脆硬材料使用传统的粗磨、精磨、抛光工艺可以得到很高的精度和表面质量。由于高陡度非球面的修磨量大, 制造这类光学元件的周期长, 加工效率低。使用固着磨料磨具加工高陡度非球面可以达到在精磨工序中快速去除加工余量的目的。

参考文献:

- [1]杨力, 郑耀, 曾志革等.大型非球面反射镜的柔性光学制造技术[J].光学技术, 2001, 27(6): 490-492
- [2]余景池, 张学军, 孙侠菲等.计算机控制光学表面成型技术综述[J].光学技术, 1998, 3(2): 5-8
- [3]堪桂萍, 杨力.计算机数控应力盘面形研究[J].光电工程, 2000, 27(3): 20-23
- [4]张峰, 余景池, 张学军等.磁流变抛光技术[J].光学精密工程, 1999, 7(5): 1-8

(收稿日期 2006-09-14)

作者简介: 陆永贵, 男(1971-), 长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生, 主要从事精密超精密加工研究。