

文章编号 1004-924X(2004)04-0402-05

大口径轻质反射镜坯的制造

陈 亚,宋淑梅

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:给出了制造大口径轻质反射镜坯的机械法减重技术及所制造的反射镜坯。在镜坯制造过程中通过计算机辅助设计搜索轻量化加工区域的形状、大小、深度,并对其进行分类标识;编辑 TPH(tool path)轨迹数据文件,编写 CNC(computer number control)数控系统的零件加工程序,由数控系统在图形方式下控制实际加工。同时采用化学方法消除加工过程中产生的应力与微小裂纹。加工出的大口径轻质反射镜坯达到设计要求,轻量化率达到 65%以上,加工后的非球面面形精度达到 0.029 (rms, $\lambda = 633$ nm)。制造过程中在不同支撑状态下,变形量很小,保持了非球面面形精度稳定性,显示出了结构的稳定性。该方法已经成为大口径反射镜制造的关键支撑技术。

关键词:轻质反射镜;机械法;轻量化;数控

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Manufacturing of a big aperture light weight mirror

CHEN Ya, SONG Su-mei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The mechanical light-weighting technique to manufacture a big aperture lightweight mirror was given. Based on CAD(computer aided design),the technique searches the zone of the lightweight process and marking it, then chooses the radii of the diamond tool, and describing the tool path in the lightweight process zone. If the area of the tool path covers the lightweight process zone, it will write down the tool path datum for the editing CNC program. The CNC program is made up of TPH documents and program language that follow definite regulations of frame, syntax, and format. The CNC program can control system functions such as principal axis rotating speed, tool moving speed, cooling form of mirror, workbench travel path. Meantime the chemical etching is used to eliminate the stress and minute cracks induced in the manufacturing process, which can affect the quality of the mirror and reduce its working life, and even more lead to the serious sequent of mirror breaking. Using the technique, a big aperture lightweight mirror was achieved. The results show that the big aperture lightweight mirror has met the requested specifications, with the lightweight rate of more than 65%, the precision of the aspheric surface is 0.029 (rms, $\lambda = 633$ nm). The mirror is steady in both its testing and working status.

Key words: lightweight mirror; mechanical method; lightweighting; CNC

1 引言

随着科学技术的发展,大口径反射镜在空间

光学、天文观察、高功率激光技术等诸领域都获得了重要的应用。因此,大口径反射镜的制造已经成为当代科技前沿不可或缺的关键支撑技术。随着反射镜的口径加大,其自重而引起的光学面形

的变化就显得格外突出,而光学面形的质量则直接影响系统的光学质量。因此,解决大口径反射镜自重变形问题是研制大型光学系统的关键技术之一。解决这一问题的方法就是采用不同的方式减轻大口径反射镜的质量。

就采用玻璃材料制作轻质反射镜而言,主要有以下种方法,即:浇铸成型法^[1]、高温熔接^[2]或熔接物封接法^[3]、机械减重法^[4]。浇铸成型法是在高温下将熔融的玻璃注入模具,形成需要的反射镜坯形状,待温度逐渐下降,玻璃液转为固体而得到反射镜坯。浇铸成型法存在的最大问题是制作过程中易产生气泡,尤其是出现在反射面的气泡,它将使反射面难以达到规定的光学面形要求。高温熔接法和熔接物封接法的共同特点是反射镜由反射板、底板和蜂窝夹芯层三部分组成。蜂窝夹芯层是轻型反射镜的骨架,制作符合刚性和减重要求的蜂窝夹芯层,是轻质反射镜研制的重要环节。该方法主要的不足之处是蜂窝单元的尺寸精确性和一致性较差,在焊接部位可能会有些缺陷,如气泡、气线等。另外,熔接后镜坯的精密退火工艺制约了残余应力程度,往往给后续镜面加工带来一定困难。机械减重法包括机械钻铣减重法、水刀切割减重法和超声波减重法^[5]。水刀切割法的工作原理是:水在高压气泵的作用下产生几千 Kg/cm^2 的压力,高压水通过 1 mm 级孔径的喷孔产生一个高真空,将金钢砂磨料吸入水中,饱含金钢砂磨料的高压水流从喷嘴高速喷出,喷射到指定的地方实现材料的去除。超声波减重法是使磨料悬浮液中的磨粒在超声振动下的冲击、抛磨和空化作用下实现对镜坯的切蚀。由于利用超声波去除材料主要依靠磨粒瞬时局部的冲击作用,所以容易产生向镜面发展的微裂纹,且由于裂纹较深,不易处理。机械钻铣减重法则是通过金钢石钻头的高速机械转动对玻璃进行机械磨削,逐步在镜坯背部钻铣成各种形状的盲孔,实现减重,从而形成背部呈蜂窝状结构的大口径轻质反射镜镜坯。机械钻铣加工完成后还需进行旨在消除残余加工应力与微裂纹的化学处理。本文介绍的大口径反射镜就是采用机械钻铣减重法制造的。

2 大口径轻质反射镜坯制造

2.1 镜坯材料与结构

2.1.1 技术要求

应用于一个大型光学系统的大口径反射镜轻

质镜坯的技术要求是:

- (1) 减重率: $> 65\%$;
- (2) 消除微裂纹及粗加工残余应力。

2.1.2 材料选择

光学系统反射镜,应该具有良好的光学面形并且能在一定工作条件下保持可靠的性能,这就要求应该选用符合系统质量要求的反射镜材料。因此,对反射镜材料的选择应注意以下几个方面:(1)材料热物理性能;(2)材料光学可加工性;(3)材料力学性能;(4)材料的化学稳定性和安全性。综合来讲,制造大口径轻质反射镜的合适材料要具有低热膨胀系数、良好的导热性能、微观结构均匀(无气孔、气泡、结石等缺陷)、高弹性模量、低密度、安全无毒、化学性能稳定等特点。根据以上所述,人们进一步提出了评价材料性能的品质因数,用以比较材料的综合性能。常用的品质因数有:材料比刚度(E/ρ)、共振频率(E/ρ)^{1/2}、稳态变形系数(δ/D)、瞬态变形系数(δ/D)等^[6]。能够拥有以上优点的材料当然是优质材料,但现实情况是:现有材料极难同时达到上述性能要求。因此,必须对反射镜坯材料作性能综合比较,选择出比较优秀的材料,尽可能多方面满足系统的性能要求。通过综合比较熔石英、ULE、Zerodur 等材料的性能及其供货渠道等因素,我们采用德国 Schott 公司生产的零膨胀微晶玻璃 Zerodur 做为轻质反射镜坯的材料。

2.1.3 反射镜结构形式

轻质反射镜要想满足系统要求,必须保证在其工作状态下具有稳定的光学面形和足够的刚度。目前轻质反射镜常用的镜体结构形式为夹芯结构形式、背部开口结构形式和泡沫夹芯层结构^[7]。通过有限元的计算分析发现,在反射镜质量相同时反射镜因自重产生的机械变形以夹芯结构形式为最小,但在相同条件下,背部开口结构反射镜可以做得最轻。考虑到设计中轻量化率较高的要求,采用反射镜背部开口蜂窝状结构形式,反射镜蜂窝单元主体采用三角形,辅之以规则排列圆形、四边形和多边形等异形孔,支撑形式采用背部 18 点的多点支撑方案,支撑处每 6 点 120°对称^[8]。经有限元分析,此反射镜的结构形式可以达到足够的刚度,且变形量也满足系统要求。

2.2 机床与工具

2.2.1 CNC 光学加工中心

为了适应大口径轻质反射镜加工的发展趋

势,长春光机所光学技术研究中心于 2001 年研制成功了新型的四轴 CNC 光学加工中心 ZYZ—110,其重复定位精度: X、Y 轴可达 0.012 mm,Z 轴可达 0.004 mm。该加工中心布局形式为立式主轴,固定龙门型,其对称框架结构具有良好的力平衡性和精度保持性。数控坐标为 X、Y、Z、C 四轴数控,可任意三轴联动,主轴是带轴承自冷和自动松夹刀的高速数控电主轴,具有精度高、转速范围广、刚性好、扭矩大、结构紧凑的特点,其运转速度最高达 15 000 r/min,根据工件的加工位置,主轴头可在 Y-Z 平面内 $\pm 15^\circ$ 范围任意调整,以便主轴适应不同位置的加工需要。滑座在床身上运动副采用进口高精度直线滚动导轨,由交流伺服电机通过 $i = 1:2$ 的无间隙齿形轮—齿形带无间隙降速机构,传动滚珠丝杠实现数控进给。回转工作台相对滑座数控回转,采用了先进的国外引进技术消除间隙机构和液压卸荷,保证回转工作台运转轻便、位置准确,电机至工作台降速比为 $i = 1:360$ 。该加工中心可对光学元件进行钻孔、铣磨、内外圆及曲面的铣磨加工。

CNC 光学加工中心采用法国施耐德电气公司的 NUM1040 型数控系统,该系统是 90 年代中后期开发出的全新的数控系统,是紧凑且功能完善的 32 位数控系统,是世界上较为先进的系统之一。该系统具有开放的、可扩展的多处理器结构,可采用 32 位微处理器,对每一个微处理器而言,其计算速度为 2.5 Mips,分辨率为 $1\ \mu$ 时,其进给速率可超过 200 m/min,程序块准备时间少于 5 ms,这就使高速运算、模块化及多轴成组控制成为可能。

2.2.2 刀具设计

首先,根据轻量化盲孔的形状、大小、圆角与深度等情况设计金刚石刀具的外形尺寸与结构,设计时要充分考虑刀具材料的硬度及磨损情况,更要考虑刀具的结构形式是否有利于机床的冷却系统对刀具及镜坯的冷却,如果刀具结构不利于冷却,则可使镜坯因局部过热而炸裂,造成严重后果。镜坯玻璃材料的不同,适用的金刚石的浓度、粒度及结合剂也不相同,这些参数的选择要通过工艺实验进行优化。

2.3 编程及加工

2.3.1 计算机辅助编程(CNC)

根据 CAD 设计出的轻量化结构图纸,利用

CAD 软件在图纸上搜索需要轻量化加工的区域,再根据加工区域的形状、大小、深度的不同对其进行分类标识。需轻量化加工的区域在图纸上必然表现为封闭轮廓,CAD 搜索组成一个轮廓的线条,并排列线条顺序,然后选择加工该轮廓区域所用的刀具半径(加工不同区域所用刀具半径可能不同),对该封闭轮廓求等距曲线,再判断该等距曲线上刀具扫过的面积是否完全覆盖该封闭轮廓,否则继续向内做等距曲线,直至刀具扫过的面积完全覆盖封闭轮廓。记录下等距曲线中各线段的数据,存作 TPH 轨迹数据文件,在以后的工作中也可以随时读取 TPH 文件,对其进行必要的编辑、观察。

记录下所有封闭轮廓的 TPH 轨迹数据文件后,则利用该数据遵循一定结构、句法和格式规则编写 CNC 数控系统的零件加工程序。该程序为一组由数控系统专用编程语言书写的指令和数据,包括主轴转速、进给速度、冷却形式、进刀方式、工作台运动轨迹等工艺参数。程序编写完成后,通过 RS-232 连接从计算机调入 CNC 数控系统的 RAM 中。

2.3.2 工艺实验与轻量化加工

调出系统 RAM 中的数控程序进行语法检查,当所有程序通过测试后,进行工艺实验。工艺实验要模拟实际加工,观察加工过程与结果,看冷却是否顺畅,刀具与镜坯摩擦后有无温升,检验工具是否切伤零件或碰撞夹具,以及切削量是否与计划去除量一致。如果发现问题,重新编辑程序中的工艺参数,修改后再实验,直至检查无误,进行实际加工。实际加工可在系统的图形方式下对零件的切削阶段进行监控,显示页面将实时地显示出刀具的移动情形,这样更加有利于对加工状况的实时了解,更有利于控制加工。

由于采用的是机械法,光学玻璃属脆性材料,因此,轻量化加工后的反射镜毛坯不可避免的会残留加工过程中产生的应力,以及在与金刚石刀具接触的光学玻璃表面产生的微小裂纹。如果对此不加以处理,则会严重影响反射镜面的光学成像质量,在冲击振动等条件下,玻璃表面的微小裂纹会继续向镜体内部发展,导致镜面变形,使用寿命降低,甚至造成镜体断裂的严重后果。为此采用化学方法处理轻量化加工后的反射镜坯,恒温放置一段时间。实验证明用此方法可以解决上述

问题。

2.4 加工结果

加工后的大口径轻质反射镜见图1,其实测尺寸为:

- (1) 中心孔椭圆度:0.01 mm
- (2) 中心孔锥度:0.005 mm

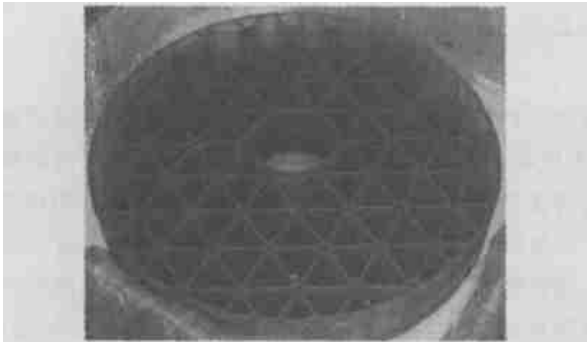


图1 大口径轻质反射镜坯
Fig.1 Big aperture lightweight mirror

(3) 轻量化程度: > 65 %

(4) 中心孔与外圆同轴度:0.015 mm

经后续的非球面加工后,进行面形检验,镜面面形精度达到0.029 (rms, = 633 nm),在不同支撑状态下,显示出结构稳定,变形量很小。

3 结论

通过对工艺方法的改进,轻质反射镜坯的加工效率得到了显著提高,轻量化程度达到了65%,采用化学方法解决了反射镜坯中残留应力的问题。实验表明对于口径为1 m量级的轻质反射镜坯,数控机械钻铣减重法仍是一种重要的反射镜轻量化方法,能够完全达到设计要求。对于口径更大的轻质反射镜,如果对工艺方法进行改进与完善,加工效率与轻量化程度仍有提高的空间。

参考文献:

- [1] ANGEL J R P, HILL J M. Manufacture of large glass honeycomb mirrors[J]. *SPIE*, 1982, 332:198-206.
- [2] MCCARTHY D J, FACEY T A. Design and fabrication of the NASA 2.4-meter space telescope[J]. *SPIE*, 1982, 330:139-143.
- [3] SPANGENBERG JOLLEY J, HOBBS T. Mirror substrate fabrication techniques of low expansion glasses[J]. *SPIE*, 1989, 1013:198-206.
- [4] MORIAN H F. Zerodur for lightweight secondary/tertiary mirrors[J]. *SPIE*, 1998, 3352:140-150.
- [5] 宋素玫. 计算机控制的轻质大型反射镜坯钻铣加工技术[J]. *光学技术*, 2001, 27(6):549-555.
SONG S M, et al. Manufacturing of large lightweight mirror substrate by CNC machining[J]. *Optical Technology*, 2001, 27(6):549-555. (in Chinese)
- [6] 刘宏伟,张芹. 基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6):556-558.
LIU H W, ZHANG Q, et al. Design of strip primary mirror supporting structure based on finite element analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6):556-558. (in Chinese)
- [7] 吴清彬,陈时锦,董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5):467-470.
WU Q B, CHEN SH J, DONG SH. Optimization of parameters structural design of lightweight reflector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5):467-470. (in Chinese)
- [8] 付芸,徐长吉,丁亚林. 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6):551-554.
FU Y, XU CH J, DING Y L. Scanning mirror supporting structure of aerial remote sensing camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6):551-554. (in Chinese)

作者简介:陈亚(1975-),男,辽宁新民人,1999年毕业于长春光学精密机械学院获学士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所为在职硕士研究生,主要研究方向为先进光学制造与检测技术。E-mail: chenya321@sohu.com.