

非球面零件超精密加工技术

中国航空精密机械研究所 杨福兴

[摘要] 介绍了非球面零件超精密切削、超精密磨削、超精密抛光(研磨)、等离子体的CVM、复制等技术的超精密加工方法。

关键词: 非球面 切削 磨削 抛光 复制

[Abstract] This paper introduces the ultra-precision machining technology of aspheric parts, including ultra-precision cutting, ultra-precision grinding, ultra-precision polishing or lapping, CVM of plasmas and copying technology.

Keywords: aspheric cutting grinding polishing copying

1 概述

1.1 非球面光学零件的作用

非球面光学零件是一种非常重要的光学零件,常用的有抛物面镜、双曲面镜、椭球面镜等。非球面光学零件可以获得球面光学零件无可比拟的良好成像质量,在光学系统中能够很好的矫正多种像差,改善成像质量,提高系统鉴别能力,它可以以一个或几个非球面零件代替多个球面零件,从而简化仪器结构,降低成本并有效的减轻仪器重量。

非球面光学零件在军用和民用光电产品上的应用也很广泛,如在摄影镜头和取景器、电视摄像管、变焦镜头、电影放映镜头、卫星红外望远镜、录像机镜头、录像和录音光盘读出头、条形码读出头、光纤通信的光纤接头、医疗仪器中等。

1.2 国外非球面零件的超精密加工技术的现状

80年代以来,出现了许多种新的非球面超精密加工技术,主要有:计算机数控单点金刚石车削技术、计算机数控磨削技术、计算机数控离子束成形技术、计算机数控超精密抛光技术和非球面复印技术等。这些加工方法,基本上解决了各种非球面镜加工中所存在的问题。前4种方法运用了数控技术,均具有加工精度较高,效率高等特点,适于批量生产。

进行非球面零件加工时,要考虑所加工零件的材料、形状、精度和口径等因素,对于铜、铝等软质材料,可以用单点金刚石切削(SPDT)的方法进行超精加工。对于玻璃或塑料等,当前主要采用先超精密加工其模具,而后再用成形法生产非球面

零件。对于其它一些高硬度的脆性材料,目前主要是通过超精密磨削和超精密研磨、抛光等方法进行加工的,另外,还有非球面零件的特种加工技术如离子束抛光等。

国外许多公司已将超精密车削、磨削、研磨以及抛光加工集成为一体,并且研制出超精密复合加工系统,如Rank Pneumo公司生产的Nanoform 300、Nanoform250、CUPE研制的Nanocentre、日本的AHN60-3D、ULP-100A(H)都具有复合加工功能,这样可以使非球面零件的加工更加灵活。

1.3 我国非球面零件超精密加工技术的现状

我国从80年代初才开始超精密加工技术的研究,比国外整整落后了20年,近年来,该项工作开展较好的单位有北京机床研究所、中国航空精密机械研究所、哈尔滨工业大学、中科院长春光机所应用光学重点实验室等。为更好的开展对此项超精密加工技术的研究,国防科工委于1995年在中国航空精密机械研究所首先建立了国内第一个从事超精密加工技术研究重点实验室。

2 非球面零件超精密切削加工技术

美国Union Carbide公司于1972年研制成功了R- θ 方式的非球面刨削加工机床。这是一台具有位置反馈的双坐标数控车床,可实时改变刀座导轨的转角 θ 和半径R,实现非球面的镜面加工。加工直径达 $\Phi 380\text{mm}$,加工工件的形状精度为 $\pm 0.6\mu\text{m}$,表面粗糙度为 $Ra 0.025\mu\text{m}$ 。

摩尔公司于1980年首先开发出了用3个坐标控制的M-18AG非球面加工机床,这种机床

可加工直径 356mm 的各种非球面的金属反射镜。

英国 Rank Pneumo 公司于 1980 年向市场推出了利用激光反馈控制的两轴联动式加工机床 (MSG—325), 该机床可加工直径为 350mm 的非球面金属反射镜, 加工工件形状精度达 $0.25 \sim 0.5\mu\text{m}$, 表面粗糙度 Ra 在 $0.01 \sim 0.025\mu\text{m}$ 之间, 随后又推出了 ASG2500、ASG2500T、Nanoform 300 等机床, 该公司又在上述机床的基础上, 于 1990 年开发出了 Nanoform 600, 该机床能加工直径为 600mm 的非球面反射镜, 加工工件的形状精度优于 $0.1\mu\text{m}$, 表面粗糙度优于 $0.01\mu\text{m}$ 。

代表当今最高水平的超精密金刚石车床是美国劳伦斯·利弗莫尔 (LLNL) 实验室于 1984 年研制成功的 LODTM, 它可加工直径达 2100mm, 重达 4500kg 的工件, 其加工精度可达 $0.25\mu\text{m}$, 表面粗糙度 Ra $0.0076\mu\text{m}$, 该机床可加工平面、球面及非球面, 主要用于加工激光核聚变工程所需的零件、红外线装置用的零件和大型天体反射镜等。

英国 Cranfield 大学精密工程研究所 (CUPE) 研制的大型超精密金刚石镜面切削机床, 可以加工大型 X 射线天体望远镜用的非球面反射镜 (最大直径可达 1400mm, 最大长度为 600mm 的圆锥镜), 该研究所还研制成功了可以加工用于 X 射线望远镜内侧回转抛物面和外侧回转双曲面反射镜的金刚石切削机床。

日本开发的超精密加工机床主要是用于加工民用产品所需的透镜和反射镜, 目前日本制造的加工机床有: 东芝机械研制的 ULG—100A(H)、不二越公司的 ASP—L15、丰田工机的 AHN10、AHN30×25、AHN60—3D 非球面加工机床等。^[1]

3 非球面零件超精密磨削加工技术

3.1 非球面零件超精密磨削装置

英国 Rank Pneumo 公司 1988 年开发了改进型的 ASG2500、ASG2500T、Nanoform 300 机床, 这些机床不仅能够进行切削加工, 而且也可以用金刚石砂轮进行磨削, 能加工直径为 300mm 的非球面金属反射镜, 加工工件的形状精度为 $0.3 \sim 0.16\mu\text{m}$, 表面粗糙度达 Ra $0.01\mu\text{m}$ 。最近又推出 Nanoform 250 超精密加工系统, 该系统是一个两轴超精密 CNC 机床, 在该机床上既能进行超精密车削, 又能进行超精密磨削, 还能进行超精密抛光。最突出的特点是可以直接磨削出能达到光学系统要求的具有光学表面质量和面型精度的硬脆材料光学零件。该机床采用了许多先进的 Nanoform 600、Optoform 50 设计思想, 机床最大加工工件直径达 250mm, 它通过一个升高装置使机床的最大加工工件直径达到

450mm, 另外通过控制垂直方向的液体静压导轨 (Y 轴), 还能磨削非轴对称零件。机床数控系统的分辨率达 $0.001\mu\text{m}$, 位置反馈元件采用了分辨率为 8.6nm 的光栅或分辨率为 1.25nm 的激光干涉仪, 加工工件的面型精度达 $0.2\mu\text{m}$, 表面粗糙度优于 Ra $0.01\mu\text{m}$ 。

Nanocentre 250、Nanocentre 600 是一种三轴超精密 CNC 非球面范成装置, 它可以满足单点和延性磨削两个方面的使用要求。通过合理化机床结构设计、利用高刚度伺服驱动系统和液体静压轴承使机床具有较高的闭环刚度, X 和 Z 轴的分辨率为 1.25nm, 这个机床被认为是符合现代工艺规范的。CUPE 生产的 Nanocentre 非球面光学零件加工机床, 加工直径达 600mm, 面型精度优于 $0.1\mu\text{m}$, 表面粗糙度优于 Ra $0.01\mu\text{m}$ 。CUPE 还为美国柯达公司研究、设计和生产了当今世界上最大的超精密大型 CNC 光学零件磨床 “OAGM2500”, 该机床主要用于光学玻璃等硬脆材料的加工, 可加工和测量 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m} \times 0.61\text{m}$ 的工件, 它能加工出 2m 见方的非对称光学镜面, 镜面的形状误差仅为 $1\mu\text{m}$ 。

日本丰田工机研制的 AHN60—3D 是一台 CNC 三维截形磨削和车削机床, 它能在 X、Z 和 Y 三轴控制下磨削和车削轴向对称形状的光学零件, 可以在 X、Z 和 Y 轴二个半轴控制下磨削和车削非轴对称光学零件, 加工工件的截形精度为 $0.35\mu\text{m}$, 表面粗糙度达 Ra $0.016\mu\text{m}$ 。另外东芝机械研制的 ULG—100A(H) 超精密复合加工装置, 它用分别控制两个轴的方法, 实现了对非球面透镜模具的切削和磨削, 其 X 轴和 Z 轴的行程分别为 150mm 和 100mm, 位置反馈元件是分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 的光栅^[2]。

3.2 非球面光学零件的 ELID 镜面磨削技术

日本学者大森整等人从 1987 年对超硬磨料砂轮进行了研究, 开发了使用电解 In Process Dressing (ELID) 的磨削法, 实现了对硬脆材料高品位镜面磨削和延性方式的磨削。现在该方法已成功的应用于球面、非球面透镜、模具的超精密加工。

① ELID 镜面磨削原理

ELID 磨削系统包括: 金属结合剂超微细粒度超硬磨料砂轮、电解修整电源、电解修整电极、电解液 (兼作磨削液)、接电电刷和机床设备。磨削过程中, 砂轮通过接电电刷与电源的正极相接, 安装在机床上的修整电极与电源的负极相接, 砂轮和电极之间浇注电解液, 这样, 电源、砂轮、电极、砂轮和电极之间的电解液形成一个完整的电化学反应系统。

采用 ELID 磨削时, 对所用的砂轮、电源、

电解液均有一些特殊要求。要求砂轮的结合剂有良好的导电性和电解性、结合剂元素的氢氧化物或氧化物不导电,且不溶于水。ELID磨削使用的电源,可以采用电解加工的直流电源或采用各种波形的脉冲电源或直流基量脉冲电源。在ELID磨削过程中,电解液除作为磨削液外,还起着降低磨削区温度和减少摩擦的作用。ELID磨削一般采用水溶性磨削液。

金属基结合剂砂轮的机械强度高,通过设定合适的电解量,砂轮磨损小。同时能得到高的形状精度。应用这个原理,能实现从平面到非球面,各种形状的光学元件的超精密镜面磨削。

② ELID 镜面磨削实验系统

在 Rank Pneumo 公司的 ASG-2500T 机床上,装上由砂轮、电源、电极、磨削液等组成大森整 ELID 系统。

在毛坯粗成形加工时使用 400[#]、半精加工时使用 1000[#]或 2000[#]、作镜面磨削时使用 4000[#](平均粒径约为 4 μ m)或 8000[#](平均粒径约为 2 μ m)的铸铁结合剂金刚石砂轮。

电解修锐电源(ELID 电源),使用的是直流高频脉冲电压式专用电源,工作电压为 60V,电流为 10A。

所用的磨削液,使用时要求用纯水将水溶性磨削液 AFH-M 和 CEM 稀释 50 倍。

③ ELID 镜面磨削实验方法和实验结果

作非球面加工时,通过安装在工件轴上的碗形砂轮(325[#]铸铁结合剂金刚石砂轮为 $\phi 30 \times W2mm$)进行平砂轮的 R 成形修整,作 10min 的电解初期修锐之后,经过 400[#]的粗磨和 1000[#]的半精加工,最后再用 4000[#]进行 ELID 镜面磨削。

在超精密非球面加工机床上,借助 ELID 磨削技术,成功地加工出了光学玻璃 BK-7 非球面透镜,面型精度达到优于 0.2 μ m,表面粗糙度达 Ra20nm。而对于稍软如 LASFN30 和 Ge 等材料的非球面加工,同样能达到面型精度优于 0.2 ~ 0.3 μ m,表面粗糙度达 Ra30nm。^[1]

4 非球面零件的超精密抛光(研磨)技术

超精密抛光是加工速度极慢的一种加工方法,不适合形状范成法加工。近年来,由于短波长光学元件、OA 仪器和 AV 机器等的飞速发展,对零件的表面粗糙度提出了更高的要求,到目前为止还没有比超精密抛光更好的实用的方法,尤其当零件的表面粗糙度要求优于 0.01 μ m 时,这种方法是不可缺少的。对形状精度要求很高的工件,如果采用强

制进给的方法进行切削或进行磨削时,其形式精度将直接受到机床进给定位精度的影响,达到所要求的高精度,目前还是很困难的。当采用定压进给的方式进行抛光(研磨)加工,可以通过控制工具的扫描速度、滞留时间,获得高精度工件形状,甚至可以加工出超过机床定位精度所限定的更高精度工件。

4.1 非球面零件超精密机械抛光技术

日本 CANON 公司根岸真人等人研制出了非球面光学元件超光滑抛光装置,这种装置交替反复的对工件形状进行测量和进行修正抛光,可以实现直到达到工件的设计精度要求为止。它所采用的修正抛光法是一边改变抛光头在工件表面上的滞留时间,一边进行扫描的修正抛光法。

为了实现对自由形状的工件的加工,抛光头必须能够实现在任意方向上对工件表面进行加工,因而定位机构需要有六个自由度,即工作台的 X、Z、 θ 和 3 个直线机构构成的摆动臂运动,用计算机实时计算控制滞留时间和扫描速度,同时控制抛光头的位置。

利用这个装置,经过 500h,16 次的加工循环,加工出了口径为 200mm,有效口径为 150mm,中心厚度为 20mm,最大非球面量 5.7 μ m,抛光后的工件形状精度达到 77nmP-V $\phi 150mm$,表面粗糙度达 0.13nmRMS,材料为单晶 CaF₂ 的轴对称非球面光学元件,达到了目标精度值^[4]。

日本黑田精工研制出了超光滑抛光机床 KRP-2200。该机床具有以下功能:对负荷、跟踪倾斜和滞留时间进行实时控制。为了进一步提高被加工工件的形状精度,还具有加工数据库积累和修正加工功能。

4.2 非球面光学曲面 EEM (Elastic Emission Machining)

EEM 是利用流动的水输送粉末颗粒,在流动过程中,微细粉末粒子表面与工件表面产生反应进行超精密加工的一种方法。其工作原理是:利用了粉末颗粒和工件表面间的原子产生的化学结合作用。当价电子状态发生变化时,由于工件表面原子的结合能的减小和由于粉末颗粒表面原子与工件表面原子只在相互作用的部分上存在加工过程,而在工件表面存在的微小凹的部分不起加工作用,从而获得原子级的平坦表面的。相对化学研磨而言,EEM 被认为是一种在原子量级上进行的利用粉末颗粒表面反应的“化学研磨”过程。

根据 EEM 加工硅和石英玻璃等的许多功能材料的实验证实,采用 EEM 法,能得到原子级的

加工表面,而在常用的化学研磨中,由于分子和离子间存在反应,并由此引起的加工作用,在工件表面上存在同样微小凹的部分,在一般情况下,只能获得波纹起伏较大的表面。

日本大阪大学工学部森勇正教授等人利用 EEM 开发了一种三轴 (X、Z、C) 数控光学表面范成装置,利用该装置加工时,一边在工件表面上控制聚胺脂球的滞留时间,一边用聚胺脂球扫描加工对象的物全领域。利用该装置能加工高精度的任意曲面。^[9]

5 非球面零件等离子体的 CVM (Chemical Vaporization Machining) 技术

目前广泛采用的切削、研磨、抛光等机械加工方法,由于加工材料中存在微细裂纹或结晶中的晶格缺陷等原因,无论怎样提高加工精度,改进加工装置,总存在一定的局限性。为此,日本大阪大学工学部森勇正教授提出了一种用化学气体加工的新的加工工艺方法,称为等离子 CVM 法,这是一种利用原子化学反应,获得超精密表面的一种技术,其加工原理和等离子体刻蚀一样,在等离子体中,被激活的游离基和工件表面原子起反应,将之变成挥发性分子,并通过气体蒸发实现加工的。在高压下所产生的等离子体,能够生成密度非常高的游离基,所以这种加工方法能达到与机械加工方法相匹敌的加工速度。在高压下,由于气体分子的平均自由行程极小,等离子体局限在电极附近,所以可以通过电极扫描,加工出 $0.01\mu\text{m}$ 精度的任意形状的零件。另外可以以 $50\mu\text{m}/\text{min}$ 的速度加工单晶硅平面,加工工件的表面粗糙度可达 0.1nm (Rrms)。

下个世纪,在硅芯片加工和半导体曝光装置用的非球面透镜加工等很多领域中,将应用 CVM 技术。当前有人正在研究通过 CVM 和 EEM 的组合,加工同步加速器用的 X 射线反射镜等原子级平坦的任意曲面。^[10]

6 非球面零件复制技术

用控制除去厚度的抛光(研磨)方法能够制造出高精度的非球面零件,但和一般的光学零件加工方法相比,这种方法的加工效率很低。解决这个问题之一有复制技术,即塑料注射成形和玻璃的模压成形技术,这种技术能够制造一部分非球面透镜。

塑料透镜注射成形是将熔化的树脂注入模具内,一边施加压力,一边冷却固化的加工方法,这种方法能够进行廉价、大批量生产,但存在塑料自身的某些问题,如温度变化、吸湿导致透镜折射率的变化。

玻璃的模压成形是代替切削、磨削、研磨加工透镜、棱镜的最佳的小型零件大批量生产方法。

模压成形技术是将模具内的温度控制在冲压的玻璃转移温度以上,软化温度以下,在模具内,进入有流动性的玻璃,加压成形,并且保持这种状态 20s 以上,直到成形了的玻璃温度分布均匀化,将模具的形状精度作到 $0.1\mu\text{m}$,表面粗糙度作到 $0.01\mu\text{m}$ 以下,在上述条件下加压成形,能加工出和模具精度相近的零件。

参考文献

- 1 铃木弘. 依靠超精密切削的镜面加工技术. 机械与工具. 1984, (1)
- 2 铃木弘. 三维截形的光学用高精度磨削和车削机床. JSPE. 1995, 29 (4)
- 3 大森整. 超精密非球面加工系统. 机械研究. 1996, 48 (4)
- 4 根岸真人. 非球面光学元件的超平滑抛光技术的研究. 精密工学会志. 1995, 61 (10)
- 5 竹本诚. 边提高形状精度边能加工镜面的 KRP-2200. 机械与工具. 1995, (7)
- 6 森勇正. 担负下世纪的原子、电子级水平的尖端技术. 精密工学会志. 1996, 62 (6)

(收稿日期: 1997-07)

97' 中国国际工具及制造设备展览会将在上海举行

为了推动我国工具制造行业的对外交流与合作、促进工具行业内外贸易的发展,由中国机床总公司、中国机械工业金属切削刀具技术协会、中国国际贸促会机械行业分会主办的 97' 中国国际工具及制造设备展览会将于 1997 年 11 月 10 日 ~ 13 日在上海国际展览中心举行。

这届展览会将展出金属切削刀具、非金属材料加工用刀具、工具材料、涂层设备、制造专机、磨料磨具、专用夹具、量具、测量仪器及其他设备和系统。展览会将通过展览与贸易相结合的形式,广泛邀请国内外工具制造与我国对口行业开展国际交流与合作。

摘自《工具技术》1997, (7)

气垫运输装置

气垫运输装置,利用气浮原理,在装置与支承表面之间形成一层空气润滑薄膜,使装置与支承表面间相对移动时,摩擦系数极小,一般在1‰~3‰之间,因而整个装置移动精确、平稳;因使用车间压缩空气,所以无污染。此装置适用于车间内大件的工序间移动或洁净厂房中。

如图所示为40t气垫运输装置,现用于常州东芝变压器有限公司线圈压紧工序。

其技术性能指标如下:

外形尺寸: 2800mm × 2800mm × 300mm

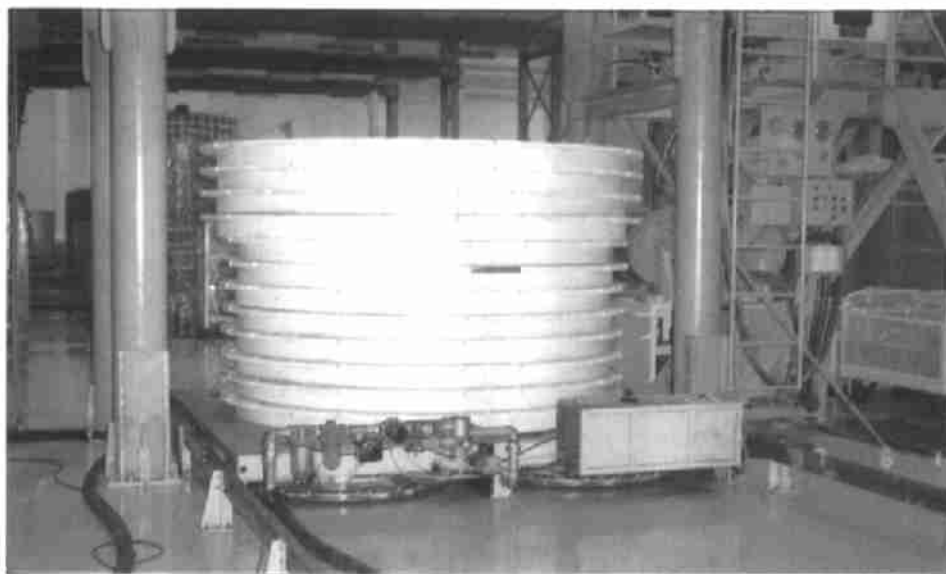
承载能力: 40t

所需驱动力: 100kgf

耗气量: 3.5m³

地面: 水磨石地面刷漆

我所还可承接各种规格、性能要求的气垫运输装置。



中国航空精密机械研究所

地址: 北京丰台区南苑东路5号

通讯: 北京 2559 信箱 48 分箱

邮编: 100076

电话: (010)68383390

联系人: 刘艳丽