

文章编号: 0253-2239(2009)01-0027-08

光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状

张 伟¹ 李洪玉¹ 于国或²

¹ 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

² Ultra Precision Surfaces, OPTIC Technium, Ffordd William Morgan, St Asaph Business Park,
North Wales, LL17 0JD, UK

摘要 空间光学元件对面形精度和表面质量有着极高的要求,气囊抛光采用了新型的抛光工具和特殊的运动形式,是一种高精度、高效率的光学元件加工方法,尤其适用于非球面的加工,具有广阔的应用前景。分析了气囊抛光技术的基本原理及该技术的发展过程,介绍了气囊抛光相关技术的研究情况和实验结果,对几项关键技术研究现状进行综述,重点介绍材料去除特性、驻留时间控制算法、边缘精度控制以及最新开发的喷液抛光技术的研究情况。

关键词 空间光学; 超精密加工; 气囊抛光; 光学元件; 面形精度

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092901.0027

Current Situation of Ultra-Precision Bonnet Polishing Key Technology of Optical Elements

Zhang Wei¹ Li Hongyu¹ Yu Guoyu²

¹ Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² Ultra Precision Surfaces, OPTIC Technium, Ffordd William Morgan, StAsaph Business Park,
North Wales, LL17 0JD, UK

Abstract Space optical elements require highly surface shape precision and surface quality. Bonnet polishing, with new polishing tool and special motion trait, is a high precision and efficient optical component machining method, especially for aspheric surface machining. It has a extensive application prospect. Principle and developing process of related bonnet polishing technology are analyzed, and research situation and test result of bonnet polishing technology are introduced. Current situation of several important and critical technologies is reviewed. The removing characteristics material, control algorithm of resident time, control of marginal precision and latest-developed spray polishing technology are introduced significantly.

Key words space optics; ultra-precision machining; bonnet polishing; optical surface; surface shape precision

1 引 言

精密、超精密光学元件在光学、电子、航空航天以及民用等诸多领域中得到了日益广泛的应用,同时,对其加工精度和表面质量也提出了极高的要求。现代尖端技术领域中对光学元件的加工精度要求越来越高,面形精度达到几十分之一波长(一个波长为 632.8 nm)甚至纳米级的形状与尺寸精度、超光滑表面以及最小的次表面损伤。短波段光学的发展尤

其是强激光技术的出现,对光学元件表面粗糙度的要求极为苛刻,要求光学表面粗糙度小于 2 nm^[1]。非球面透镜或反射镜由于具有优良的光学性能,使得越来越多地应用在光学系统中^[2,3],非球面特殊的几何形状决定了无论是制造难度还是制造成本都远远高于球面光学元件^[4,5],传统的抛光方法在加工光学非球面上,存在一些明显的缺点^[6],为适应特殊材料的超高精度、低粗糙度、无损伤的加工,新原理

收稿日期: 2008-10-10; 收到修改稿日期: 2008-11-26

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 张 伟(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学元件的超精密加工与检测、空间光电信息获取、空间目标测量技术等方面的研究。E-mail: hongyuli@hit.edu.cn

的研磨、抛光方法不断出现,如计算机控制小工具抛光技术^[7]、激光抛光技术^[8]、离子束抛光技术^[9,10]、应力抛光技术^[11]、磁流变抛光技术^[12,13]等。

超精密气囊抛光方法是 20 世纪 90 年代伦敦光学实验室提出来的一种新的抛光方法,在 UK 粒子物理、天文学研究委员会和工商界的资助下,开展了气囊抛光理论与技术的研究^[14,15],并与 Zeeko 公司合作开发了 IRP 系列气囊抛光机床,为气囊抛光技术的发展做出了很大的贡献,但该项技术的研究及应用仍属于发展阶段,很多关键技术的研究有待进一步深入。哈尔滨工业大学联合英国 Zeeko 公司和伦敦光学实验室对该项技术展开研究,取得了一定成果,对气囊抛光方法中几项关键技术的研究成果及现状进行介绍。

2 气囊抛光技术的原理和发展

2.1 原理及特点

气囊抛光方法是采用特殊的抛光头结构和独特的运动原理^[16],用一个尺寸比被加工元件小得多的球形抛光模,在计算机的控制下,以一定路径、速度和压力抛光工件表面。气囊为球形的柔性膜,外表面粘贴聚氨酯抛光垫,装于旋转的工作部件上,形成封闭的腔体,内部充入低压气体。内部的压力、抛光接触区、进动运动、旋转速度等变量是可以独立控制的,它的空间运动方向被一个 7 自由度的计算机数字控制系统控制。抛光气囊随旋转工作部件而旋转,通过抛光液的作用,达到抛光玻璃表面的目的。

气囊抛光是一个复杂的过程,这种“进动”相对于典型的旋转抛光头的结构有很多优点^[17]:1) 抛光工具与工件的吻合性好。在抛光非球面等曲率变化的曲面时,抛光工具与工件表面的紧密吻合是保证抛光质量的基本条件,气囊抛光采用的抛光工具为柔性的气囊,抛光过程中,抛光工具与工件表面完全吻合,在局部接触区内抛光模和工件的面形一致,使所有的局部抛光区的去除函数都相同,对于提高表面粗糙度、控制面形精度十分重要;2) 局部抛光区内材料去除均匀;气囊抛光采用了一种类似陀螺的“进动”运动,抛光时气囊抛光头的旋转轴线与工件局部高速旋转。由此,抛光区域在不同的方向得到了均匀一致的抛光,不但获得了高斯型的去除函数,而且抛光的划痕也得到了平滑,因此有利于气囊抛光材料去除的数值优化和保证整个加工的质量,图 1 为进动抛光与旋转抛光所产生的抛光痕迹比较图。3) 工艺过程可控性好:气囊抛光工艺没有采用传

统抛光工艺中的压力控制方式,而是以柔性气囊作为抛光工具,通过调节气囊球心与被抛光工件表面相对位置和气囊内部的充气压力来实现抛光过程的控制,且位置调节和压力调节可独立进行,增强了抛光参数选择的灵活性。

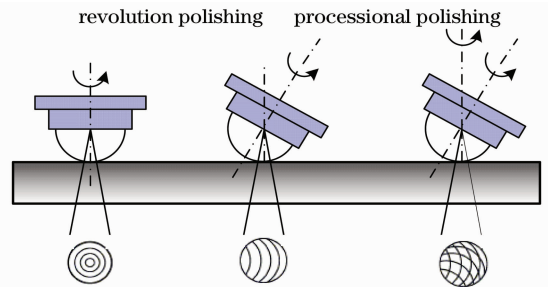


图 1 旋转抛光和“进动”抛光的痕迹比较

Fig. 1 Trace comparison of revolution polishing and processional polishing

2.2 气囊抛光技术的发展

伦敦光学实验室最初在一台原理样机上做了大量的工艺实验,2000 年研制了 IRP200 抛光机床,并利用改进的抛光控制算法抛光了施密特校正板,实验结果令人满意^[15],随后又相继研制了 IRP300、IRP600 抛光机床^[18]。

2002 年,在 IRP 系列机床上做了大量的抛光实验,典型的工件有:直径为 200 mm 的熔融硅非球面,其曲率半径为 450 mm,抛光后面形精度峰谷值为 $0.19 \mu\text{m}$,表面粗糙度 Ra 值达到 1.8 nm;直径为 184 mm 的 BK7 材料凹面卡塞格林反射镜,经过两次抛光面形精度峰谷值为 $0.18 \mu\text{m}$ ^[19]。

2004 年 IRP1200 研制成功,最大可以加工直径为 1.2 m 的工件,面形精度可达 RMS 值 $1/40\lambda$,表面粗糙度 Ra 值可达 1 nm,粗抛光材料的去除率为 $2.0 \text{ mm}^3/\text{min}$,精抛光材料去除率为 $0.25 \text{ mm}^3/\text{min}$ ^[20];哈尔滨工业大学在此机器上成功加工出面形精度 RMS 值为 $1/80\lambda$ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$) 的微晶玻璃工件。

2005 年,在 IRP600 抛光机床上开发出新的抛光工艺,用射流代替气囊,并开发了 FJP600 机床^[21],该工艺不但可以提高面形质量,并且对边缘控制有很好的效果。

2007 年,伦敦光学实验室和 Zeeko 公司,依靠该项技术承担了欧洲“超大望远镜”项目的主镜加工任务,该望远镜主镜由 1100 块直径为 1.44 m 的微晶玻璃镜片组成^[22],欧洲“超大望远镜”外观如图 2 所示,计划 5 年内完成。

目前,最大可以加工直径 2.4m 的 IRP2400 的抛光机床正在设计中。

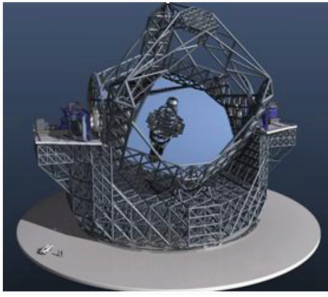


图 2 欧洲“超大望远镜”外观

Fig. 2 Appearance of european extremely large telescope

3 气囊抛光关键技术的研究状况

3.1 气囊工具的开发及抛光实验

抛光气囊是气囊抛光工艺的一个关键部件,它对气囊抛光质量有重要影响。使用上需要协调充气下气囊的抗变形能力与柔性之间的关系,气囊的抗变形能力与气囊的材料、结构和气囊膜的厚度有关,抛光气囊由支撑层、增强纤维层、橡胶层组成,在伦敦光学实验室的研究中,目前设计了 4 种规格的抛光气囊,其半径分别为 20 mm, 40 mm, 80 mm 和 160 mm。为了满足加工更复杂面形的需要,目前正在开发 10 mm 的抛光气囊,工件和气囊尺寸之间选择的原则是气囊半径至少比工件半径小 50%。最初研究使用的气囊内部典型充气压力为 1 bar,后来所使用的半径为 80 mm 的抛光气囊时,其内部气压可达到 1.5 bar。针对加工件的材料特性以及不同的误差面形,伦敦光学实验室通过大量的实验,设计了处理不同工艺的抛光气囊^[23],如图 3 所示,分别是固着金刚石丸片、不锈钢圈、黄铜片的抛光气囊,它们可以更有效地去除研磨时留下的中高频成分,



图 3 不同工艺的抛光气囊

Fig. 3 Polishing bonnet with different technology

并且对去除工件中的凸凹层、变质层的去除也有很好的效果^[24]。

D. D. Walker 在实验室的条件下,使用具有“进动”运动特征的是实验台,对各种材料进行了抛光实验,得到了表 1 的初步抛光结果^[15]。从结果可以看出,气囊抛光能获得较高质量的抛光表面,所抛光的材料不仅仅局限于光学玻璃一类材料,应用的范围十分广泛,表 1 所示为不同实验材料抛光后的表面粗糙度。气囊抛光的效果如图 4 所示^[25],图 4(a)为没有采用“进动”工艺所进行的抛光结果,在工件的表面出现了比较小的弧形划痕;而图 4(b)为采用了“进动”工艺所进行的抛光结果,在工件的表面上没有明显可见的划痕,且抛光后的表面粗糙度 Ra 约为 0.5 nm。实验很好地说明了“进动”抛光工艺所具有地效果。

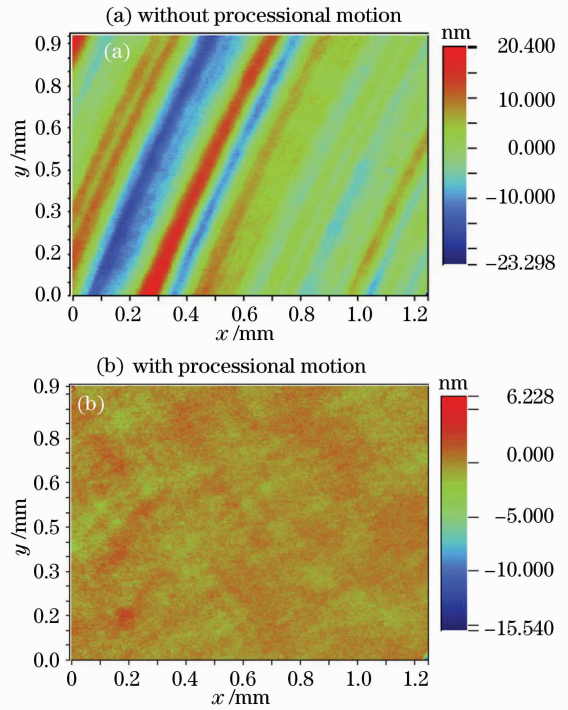


图 4 “进动”工艺抛光的效果

Fig. 4 Effect of processional technology polishing

表 1 不同实验材料抛光后表面粗糙度

Table 1 Surface roughness of different test material polished

Material	BK7	Nickel-coated aluminum	Stavax stainless steel	Graphite-fibre
Application	Transmission optics	Metal mirrors	Moulds	Ultra-light-weight mirrors
Ra	0.5 nm	1 nm	1 nm	5 nm

3.2 消除“切带”误差的研究

气囊抛光工艺是光学零件超精密加工的最后—

道工序,去除率是有限的,对于工件中存在的高频信息很难去除,这也是计算机控制光学表面成形技术中普遍存在的现象。这些光学元件表面的中高频误差严重影响了强激光系统、短波光学系统和高分辨率成像系统的光学性能,因此,这些中高频误差必须严格加以控制。理论上讲,抛光气囊的尺寸越小,则其在运动轨迹上的抛光量与理论模型吻合得越好,面形误差也就越容易收敛,但实际上抛光气囊不可能做得很小,因此实际去除量与理论去除量之间存在一定的偏差,而且在实验中发现,当气囊尺寸很小时,虽然面形误差在开始阶段能够很快地收敛,但由于小抛光头的非连续作用,而引入了一些高次像差,表面存在微小“切带”,同时面形误差很难进一步控制。伦敦光学实验室研制了一种环形加工工具^[24~26],如图 5 所示,可以有效去除“切带”误差,它被装在安装气囊的位置上,在抛光主轴的带动下旋转。环形工具支撑在一个弹性的橡胶层上,在该橡胶层上装有硬的抛光模。根据耐魁斯特采样理论确定此抛光模的尺寸,抛光模的尺寸至少跨越所要去除空间频率的两个周期。2007 年,伦敦光学实验室利用此工具成功抛光了带有明显“切带”痕迹的工件^[23],该工件为直径 500 mm 的微晶玻璃球面,抛光后的面形精度 RMS 值达到 $1/50\lambda$ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$),实验结果表明使用此环形抛光工具可以很好地去除“切带”误差。



图 5 消“切带”误差环状工具

Fig. 5 Ring tool for eliminating girdle error

3.3 去除特性的研究

气囊抛光去除特性的确定是驻留时间求解算法的基础,也是影响加工效率和误差收敛的关键因素,哈尔滨工业大学通过大量的实验对气囊抛光去除特性进行了研究,取得了一定的结果。

光学表面抛光受多种因素影响,在一定的假设条件下,可以用 Preston 方程描述气囊抛光材料去除量与各种工艺参数的关系^[27]。Preston 方程中,

将速度和压力以外的一切因素的作用全部归为一个比例常数,这样就建立了材料去除量、压力和瞬时速度的线性关系

$$dz/dt = k \cdot v \cdot p,$$

其中 k 为比例常数,它与被抛光材料、抛光膜层材料、抛光粉种类、抛光液浓度、pH 值以及抛光温度有关; v 为工件表面某一点的瞬时抛光速度, p 为抛光压力, v 和 p 都是关于位置坐标 (x, y) 和时间 t 的函数。

运用运动学原理,由进动运动的几何关系可以求得抛光接触区任意点的速度 $V(r, \theta)$;当气囊压缩量不大时,按照 Hertz 接触理论求解抛光接触区的压力分布^[28,29],进而得到气囊抛光材料的去除模型

$$H(r, \theta) =$$

$$\int K_p \frac{(m+1)ke}{\pi ab} \left[1 - \frac{r^2 \cos^2(\theta)}{a^2} - \frac{r^2 \sin^2(\theta)}{b^2} \right]^m \times V(r, \theta) \cdot dt,$$

其中 m 为压力分布系数, e 为抛光气囊压缩量, $(m+1)ke/(\pi ab)$ 为抛光区平均压力;抛光面积被认为是椭圆形接触区的边界所围成的区域,由接触区的椭圆方程 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ 确定。

通过数值仿真,得到气囊抛光去除特性的仿真结果,与实验结果吻合较好,如图 6 所示的。“定点”抛光的抛光区域为一椭圆,“进动”抛光的去除函数为近高斯分布。并得到了几个重要参数对抛光结果的影响规律和取值范围,为准确求解驻留时间提供依据。2007 年哈尔滨工业大学以此为工艺指导加工得到了超光滑玻璃表面。实验件为直径 150 mm 的 BK7 玻璃平面,经过大约 79 min 的抛光,面形精度 RMS 值达到 0.024λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)。

3.4 驻留时间控制算法研究

驻留函数的求解实质上是反卷积过程,由于气囊抛光过程的复杂的物理、化学作用,去除特性很难把握,尤其边缘区域的求解,会因发生振荡而无法收敛,反卷积的求解往往是一个病态问题^[30,31]。2007 年哈尔滨工业大学针对气囊数控抛光方法,结合 CCOS 工艺中的实际情况,提出了基于非周期矩阵模型的加权空间反卷积算法,对反卷积和平滑性加以局部的适应性控制,避免了因测量误差而引入的噪音导致求解的病态,并利用共轭梯度迭代法对离散卷积方程进行求解,在空间域迭代计算有效减少了工作量。算法中提出了采用边缘修正因子,控制边缘精度,得到了良好的效果。图 7 为基于非周期矩阵的加权空间反卷积算法的流程图。

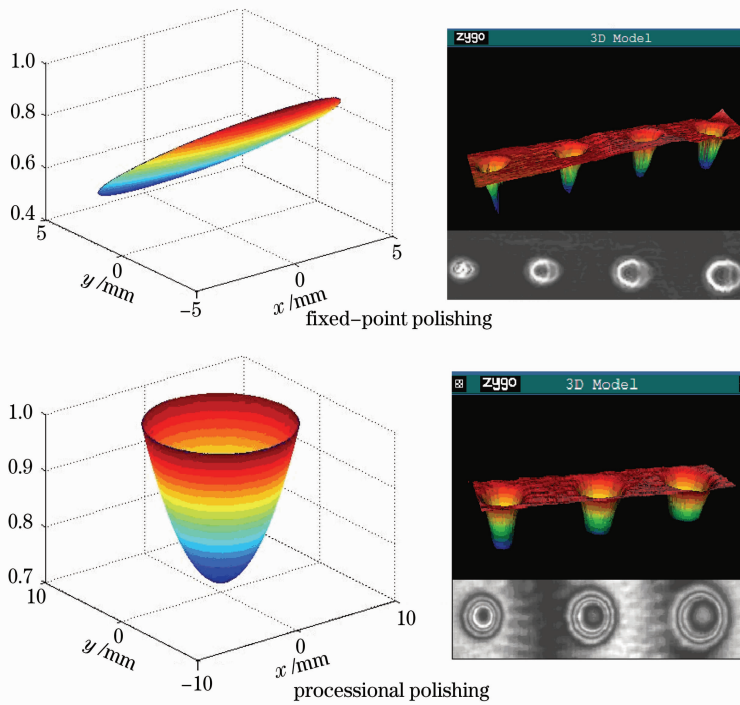


图 6 去除特性仿真与实验结果

Fig. 6 Simulation and experiment results of removing characteristics

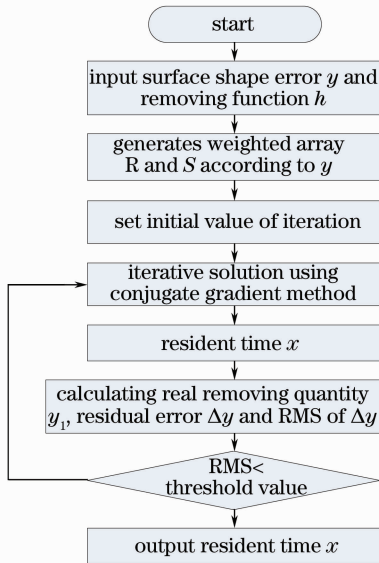


图 7 非周期矩阵的加权空间反卷积算法流程图

Fig. 7 Flowchart of weighted space deconvolution algorithm

该算法在超精密数控气囊抛光机上得到了验证,实验件为 80 mm 正方形平面,材料为微晶玻璃,测量结果如图 8 所示,图 9 为利用该算法优化得到的残余误差分布,RMS 值为 0.008λ ;经过 70 min 的抛光加工,面型精度的 RMS 值达到了 0.013λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$),图 10 为实验结果,证明了算法的有效

性和稳定性。

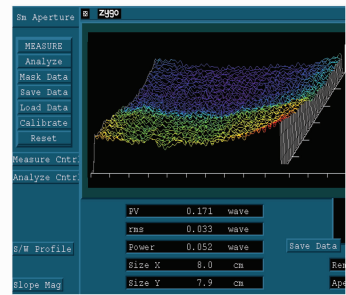


图 8 原始测量结果

Fig. 8 Original measurement results

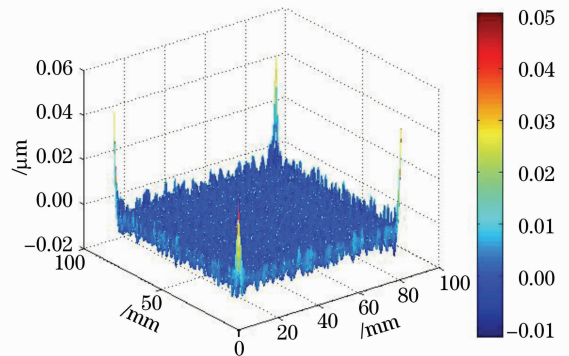


图 9 残余误差

Fig. 9 Residual error

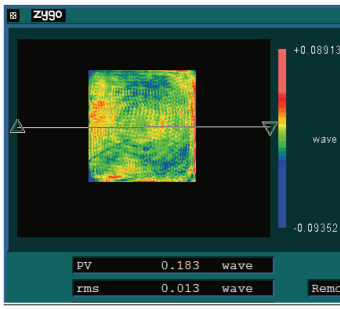


图 10 加工结果

Fig. 10 Processing results

目前哈尔滨工业大学已经编制了实现该算法的软件,如图 11 所示为软件界面。首先输入工艺参数,主要包括抛光头尺寸、进动角、气囊压缩量等,便可模拟得到材料的去除特性,通过优化功能得到驻留时间分布,并且预知加工后的面形精度。通过进一步优化得到边缘修正系数,得到控制边缘后的面

形,该算法已经在该数控抛光机上得到应用。

3.5 气囊抛光路径规划的研究

目前气囊抛光最主要的抛光路径方式有螺旋形和光栅形两种,光栅路径的应用不但能抛光旋转对称曲面,而且能抛光自由曲面^[32]。如图 12 所示,这两种路径的重要特点是路径本身不能相交,目的是可以利用面形控制算法优化驻留时间函数,优点是能够更好地进行边缘精度控制,其关键技术是如何合理规划路径参数的选择,用以指导抛光头的运动。经过大量实验发现,两种路径都会不同程度地引入中高频误差,这是由于两种路径本身固有的周期性,为了减小中高频误差,D. D. Walker 等^[17]开发了一种新的路径规划算法,称为自由路径算法,该路径采用“一笔画”,以保证路径本身不相交,可以进行驻留时间控制。通过实验证明,该路径可以有效降低面形中高频信息。

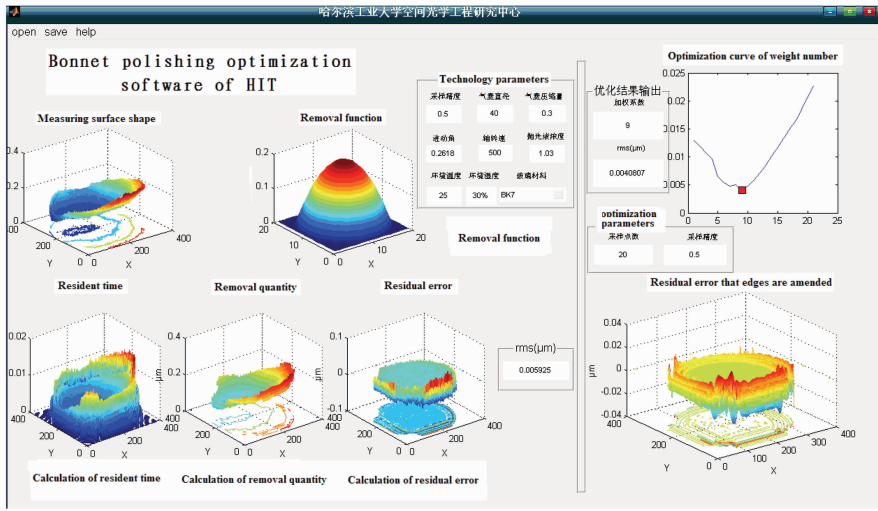


图 11 哈尔滨工业大学气囊抛光优化软件

Fig. 11 Optimization algorithm software of bonnet polishing

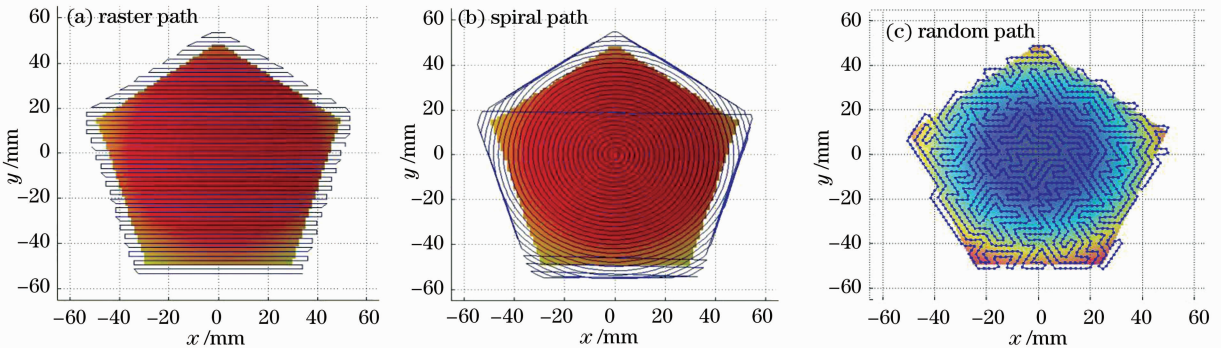


图 12 抛光路径示意图

Fig. 12 Sketch of polishing path

3.6 气囊抛光边缘控制的研究

对于大光学元件,边缘的面形质量十分重要,小

区域的边缘效应会对红外背景产生比较大的影响,这也是目前空间光学元件加工过程急于解决的关键

技术之一,为了对气囊抛光工件的边缘进行有效控制,伦敦光学实验室进行了大量的研究,并取得了一定进展,主要包括策略为:

1)在被抛光元件外围镶上一些垫块,将工件的边缘包围起来进行抛光。抛光结束后,分离出被抛光元件。镶嵌块可以避免气囊运动到工件边界时,由于气囊变形产生的受力不均匀,而且镶嵌块充当了气囊抛光运动的“回程带”,气囊可以运动到工件边界以外,避免了抛光气囊在工件边界的加速或减速,使整个工件均匀抛光。但该方法也存在不少问题,为了避免由于热胀等产生的影响,镶嵌块和工件的材料性能必须很好地一致,而且每一个工件加工都要设计专门的镶嵌块,使得加工成本很高。加工结束后伴随胶结应力的释放,有可能扭曲被抛光元件,破坏面形精度。

2)制造抛光元件时,将被抛光元件外形尺寸加大,抛光后磨边处理。但这种方法有可能引起材料内部应力的重新分布,从而导致被抛光元件形状的变化。

3)根据抛光所具有的工艺特点,优化抛光的工艺参数和控制算法,主动控制被抛光元件的边缘质量,不需要其他的辅助工艺。算法中抛光气囊运动到工件边界时,按照一定的数学规律逐渐减小压缩量,保证不露边,如图13所示,实验测量结果如图14所

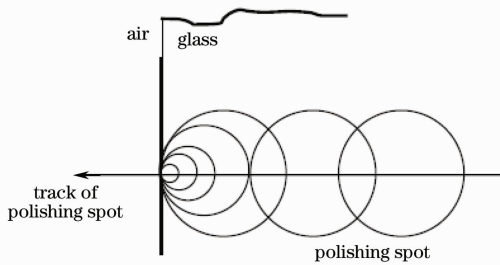


图 13 边缘控制运动过程

Fig. 13 Movement process of edges control

示,边缘效应得以控制,目前 Zeeko 开发的软件中已经有此功能^[17]。

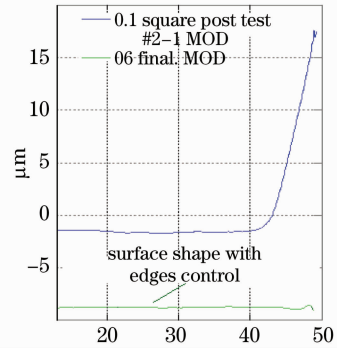


图 14 边缘控制的实验结果

Fig. 14 Experimental results of edges control

控制边缘精度的策略中,第 3 种方法边缘处理的效果最好,可以直接抛光达到要求的表面形状,避免了辅助工艺可能产生的问题,但是需要建立理论模型,对工件边缘的材料去除特性进行描述。

4)伦敦光学实验室为了控制边缘质量在气囊抛光机上开发了射流抛光技术。射流抛光通过控制抛光液颗粒高速喷射、撞击工件表面进行抛光,不需要抛光工具与工件直接接触,没有抛光工具的磨损,Booij 等^[33]证明了喷射抛光去除速率与抛光液浓度成线性关系、与喷射速率成平方关系,P. Guo 等^[34]通过对喷流抛光去除机理的研究指出,喷射抛光是抛光颗粒对工件剪切与撞击的综合作用,去除效果与抛光液颗粒的尺寸、动能、入射角有关。喷射抛光去除特性比较稳定,抛光区域容易控制,可以有效修正中高频信息,尤其对工件的边缘控制有显著效果。目前,Zeeko 抛光机所有型号都能扩展此功能,并与 Zeeko 气囊抛光机使用通用的软件和硬件^[35],位置和压力通过 7 自由度的数控系统控制。图 15 所示喷液抛光过程及实验结果,实验结果证明,喷液抛光可以有效控制工件的边缘精度。

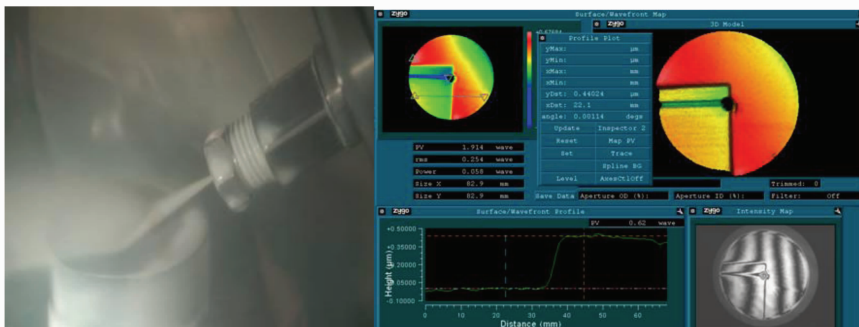


图 15 喷液抛光过程及实验结果

Fig. 15 Process and experimental results of jet polish

5 结 论

气囊式抛光工艺方法是近十几年发展起来的一种新型抛光方法,具有广阔的应用前景,与传统的抛光方法相比较,具有加工精度高、效率高、操作简便等优点,有望成为光学元件加工的主要方法,非常适合于曲面的加工,它突破了传统超光滑表面依赖于手工抛光的局面,对于简化工艺过程、提高自动化程度和加工质量、缩短加工周期,具有重要的工程应用价值。

参 考 文 献

- Yuan Xuejun, Wang Xiankui. Precision and Ultra-Precision Machining Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 2~8
袁哲俊,王先逵. 精密和超精密加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 2~8
- Yang Huajun, Hu Yu, Xie Kang. Optimization design for aspheric collimation system of high-power semiconductor laser beam[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(12): 1607~1612
杨华军,胡渝,谢康. 大功率半导体激光束非球面准直系统的优化设计[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1607~1612
- Zhang Fengsheng. Numerical computation for propagation of gaussian beam through aspheric system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 179~184
张凤生. 非球面系统中高斯光束传输的数值模拟[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 179~184
- Xiaokun Wang, Lihui Wang, Longhai Yin *et al.*. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 645~648
- Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large-diameter optical aspheric mirror[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(12): 1705~1710
陈建平,沈林成. 大口径非球面加工建模与控制技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1705~1710
- Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 65~68
潘君骅. 非球面的设计与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 65~68
- Robert A. Jones. Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing [J]. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(11): 1962~1969
- F. Laguarda, N. Lupon, F. Vega *et al.*. Laser application for optical glass polishing[C]. *SPIE*, 1996, **2775**: 603~617
- Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1132~1137
戴一帆,周林,谢旭辉等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1132~1137
- G. Roland, R. Andre, R. Emmanuel. Large optics ion figuring [C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 161~166
- H. M. Martin, D. S. Andersen, J. R. P. Angel *et al.*. Progress in the stressed lap polishing of a 1.8 m *f*/1 mirror[C]. *SPIE*, 1990, **1236**: 682~690
- H. M. Pollicove. Next generation optics manufacturing technologies[C]. *SPIE*, 2000, **4231**: 8~15
- Peng Xiaoqiang, Dai Yifan, Tang Yu. Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(1): 100~105
彭小强,戴一帆,唐宇. 基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(1): 100~105
- D. D. Walker, D. Brooks. The first aspheric form and texture results from a production machine embodying the precession process[C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 267~277
- D. D. Walker, R. Freeman, G. Cavana *et al.*. The Zeeko/UCL process for polishing large lenses and prisms[C]. *SPIE*, 2002, **4411**: 106~112
- R. G. Bingham, D. D. Walker, D.-H. Kim *et al.*. A novel automated process for aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 2000, **4093**: 445~451
- D. D. Walker, A. Beaucamp, V. Doubrovski *et al.*. New developments in the precessions process for manufacturing freeform, large-optical, and precision mechanical surfaces [C]. *SPIE*, 2005, **6148**: 51~60
- D. D. Walker, A. Beaucamp, D. Brooks *et al.*. New results from the precessions polishing process scaled to larger sizes[C]. *SPIE*, 2004, **5494**: 71~81
- D. D. Walker, A. Beaucamp, D. Brooks *et al.*. Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 2002, **4767**: 99~106
- D. D. Walker, A. Beaucamp, V. Doubrovski *et al.*. Automated optical fabrication—first results from the new “Precessions” 1.2 m CNC polishing machine[C]. *SPIE*, 2006, **6273**: 91~98
- D. D. Walker, A. Beaucamp, V. Doubrovski *et al.*. New results extending the precessions process to smoothing ground aspheres and producing freeform parts[C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690E1
- D. D. Walker, A. T. H. Beaucamp, C. Dunn *et al.*. Active control of edges and global microstructure on segmented mirrors [C]. *SPIE*, 2008, **7018**: 67~76
- D. D. Walker, A. Baldwin, R. Evans *et al.*. A quantitative comparison of three grinding techniques for the precessions TM process[C]. *SPIE*, 2007, **6671**: 66710H-1
- D. D. Walker, A. Beaucamp, D. Brooks *et al.*. Recent development of precessions polishing for larger components and free-form surfaces[C]. *SPIE*, 2004, **5523**: 281~290
- D. D. Walker, A. Beaucamp, V. Doubrovski *et al.*. Commissioning of the first precessions 1.2 m CNC polishing machines for large optics[C]. *SPIE*, 2006, **6288**: 62880P-1
- D. D. Walker, P. Shore. Manufacture of segment for extremely large telescopes; a new perspective[C]. *SPIE*, 2006, **5382**: 277~284
- Wang Guilin. A Study on key techniques in ultra-precision lapping and polishing for optical sic materials[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2002. 55~56
王贵林. 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002. 55~56
- Gao Bo. Development of bonnet tool polishing apparatus and research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. 55~57
高波. 气囊抛光实验样机研制及其关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005. 55~57
- K. L. Johnson. Contact Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992. 72~77
- Deng Weijie, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1009~1015
邓伟杰,郑立功,张学军. 基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(7): 1009~1015
- Li Quansheng, Cheng Ye. Dwell time algorithm in computer controlled optical surfacing[J]. *Optical Technique*, 1999, **3**(5): 56~59
李全胜,成晔. 计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究[J]. 光学技术, 1999, **3**(5): 56~59
- R. G. Bingham, D. D. Walker, D. Kim *et al.*. A novel automated process for aspheric surfaces[C]. *SPIE*, 2000, **4093**: 445~450
- S. M. Booij, H. Brug, J. J. Braat *et al.*. Nanometer deep shaping with fluid jet polishing[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8): 1926~1931
- P. Guo, H. Fang, J. Yu. Computer controlled fluid jet polishing [C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 187~195
- A. Beaucamp, R. Freeman, R. Morton *et al.*. Removal of diamond-turning signatures on X-ray mandrels and metal optics by fluid jet polishing[C]. *SPIE*, 2008, **7018**: 351~359