

文章编号: 1001-2486(2009)04-0010-05

应用细小离子束加工小型精密光学零件*

解旭辉, 谷文华, 周林

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 随着现代光学技术的发展, 全频段误差控制已成为高精度光学零件制造的一个基本要求。基于小磨头抛光原理的先进修形技术虽然能有效修正低频面形误差, 但对于中高频段的面形误差难以修正。中高频误差成为了现代光学加工普遍关注的难点。理论研究表明, 减小小磨头尺寸可以提高工艺对中高频误差的修正能力, 进一步提高光学加工精度。本文针对中高频面形误差的控制问题, 开展细小离子束修形工艺研究, 研究了获取小束径离子束的引束机理和引束结构, 初步实现了稳定的细小离子束, 针对某小型精密光学元件的具体加工问题, 仿真研究了不同束径的加工效率和加工残差, 并选择最优束径对元件进行了加工试验, 使元件的精度从初始的 0.111λ rms 减小到了 0.015λ rms ($\lambda=632.8\text{nm}$)。

关键词: 离子束抛光; 中高频; 面形误差; 抛光

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A

Study on Machining Small Precision Optical Component Using Thin Ion Beam

XIE Xu-hui, GU Wen-hua, ZHOU Lin

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With the development of modern optical technology, there has been a basic requirement to control the surface error in all spatial frequency ranges for precision optics. The low spatial frequency range error of the surface can be easily and effectively eliminated by CCOS methods, but for the surface error in the middle and high spatial frequency ranges, there are few effective methods to correct them. Hence it has become a universal concern in modern optical manufacturing because of its serious influence on some modern precision optical systems. As is proved previously, the correcting ability of middle and high frequency error can be improved by reducing the size of the polishing lap. Based on this theory, the small ion beam figuring method has been introduced to solve the problem of middle and high frequency error correcting. Firstly, we studied how to gain small and steady ion beams by two methods. Then we designed a series of actual figuring experiment and computer simulation to test the effectiveness of those methods on small scale optic surfaces. The desired results have been gained to reduce the surface error from 0.111λ rms to 0.015λ rms ($\lambda=632.8\text{nm}$).

Key words: ion beam figuring; middle-high frequency; surface error; polishing

不同频段的制造误差会对不同的光学性能产生影响, 一般来说, 低频误差使成像系统的像扭曲变形, 引入各种像差; 中频误差使光线发生小角度散射, 从而使所成像产生耀斑, 影响像的对比度; 高频误差使光线发生大角度散射, 降低镜面的反射率^[1]。随着现代光学技术的发展, 全频段误差控制已成为高精度光学零件制造的一个基本要求。

现代光学加工技术较传统加工技术的一个突破性进展是基于计算机控制“小磨头”抛光原理的应用, 近来发展的计算机控制光学表面成形 (CCOS)、磁流变抛光、气囊进动抛光和离子束抛光等技术, 都是基于这一原理的抛光技术^[2-5]。小磨头尺寸比被抛光工件小得多, 每一时刻只对光学镜面的一个局部区域进行抛光, 抛光的时间 (即驻留时间) 越长, 则去除的材料越多。小磨头在计算机的控制下, 以特定的路径和速度在光学镜面上运动, 通过控制小磨头在不同抛光区域的驻留时间来控制抛光过程中元件表面的材料去除量, 从而达到修正面形误差, 提高面形精度的目的。小磨头抛光过程可以准确建模,

* 收稿日期: 2009-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50775215)

作者简介: 解旭辉 (1967-), 男, 副教授, 博士。

去除函数稳定, 抛光确定性高, 面形收敛快。特别是离子束抛光技术的出现, 由于利用离子溅射原理能够实现原子分子量级的材料可控去除, 将光学制造精度提升到前所未有的高度^[6]。

在小磨头抛光技术应用过程中, 中高频面形误差成为了普遍关注的问题。因为中高频面形误差严重影响零件的光学性能, 并且在小磨头抛光过程中难以收敛。日本东京大学进行了离子束抛光小尺度误差的试验^[7], 试验结果表明镜面的中高频面形误差没有减小。国防科技大学在离子束抛光技术研究中, 也得到类似的结论^[8-9]。最近我们发现并不是小磨头不能修除中高频误差, 而是修正能力与小磨头的尺寸或去除函数的直径有关。去除函数直径越小, 对中高频误差的修正能力越强。这一发现为提高小磨头抛光修形能力提供了新思路, 可以用减小小磨头尺寸的方法提高修形能力。德国的 IOM 研究所已经开始了这方面的研究, 他们在离子源与工件之间安装类似光阑作用的“离子光阑”来缩小离子束, 应用该方法能获得 0.6mm 宽度 (FWHM) 非常细小的离子束^[10], 他们应用 1.0mm 和 2.2mm 宽度的离子束分别将一块 $\phi 12\text{mm}$ 的凸镜和一块 $\phi 63\text{mm}$ 的小型精密光学零件的精度加工到了 0.8nm RMS (初始值 4.0nm RMS) 和 0.5nm RMS (初始值 22.5nm RMS), 有效去除了镜面上的中高频误差。本文针对高精度光学零件中高频误差的控制问题, 开展细小束径离子束修形工艺研究。首先研究了去除函数直径与中高频误差修正能力的关系, 其次研究了小束径离子束的引束机理和引束结构, 最后针对某小型精密光学元件的具体加工问题, 讨论了最优加工束径, 并成功进行了加工。

1 中高频误差修正能力分析

在研究修形工艺过程中, 我们发现并不是小磨头不能修除中高频误差, 而是由于去除函数具有一定的宽度, 加工中实际去除的材料量总是多于需要修正的面形误差材料量 (期望去除的材料量), 修形过程的材料去除量示意图如图 1 所示。一个好的修形过程, 或者说修形能力强的修形过程, 它实际去除的材料量应该接近期望去除的材料量。根据这一思想, 提出以材料去除有效率对修形工艺的中高频误差修正能力进行量化评价的方法:

$$\text{材料去除有效率}(\eta) = \frac{\text{期望去除的材料量}}{\text{实际去除的材料量}} \quad (1)$$

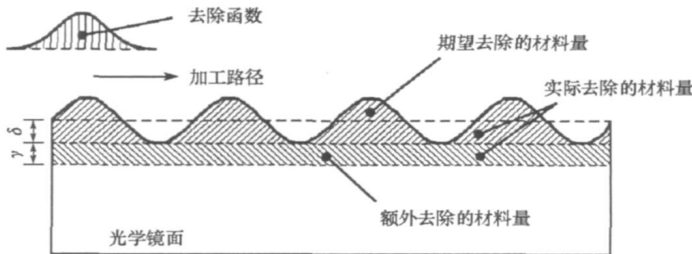


图 1 修形过程的材料去除量示意图

Fig. 1 Material removed in process

根据定义可知, 材料去除有效率 $0 < \eta \leq 1$, η 越接近 1, 则修正能力越强, 反之, η 越接近 0, 则修正能力越弱。可以计算出用直径为 d 的高斯型去除函数修正波长为 λ 的空间误差的材料去除有效率 η 为^[8]

$$\eta(d, \lambda) = e^{-\frac{\pi^2}{18} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2} \quad (2)$$

可见, 材料去除有效率与去除函数直径和空间误差频率都有关系。材料去除有效率 $\eta(d, \lambda)$ 是变量 d/λ 的平方的负指数函数, 随着 d/λ 的增大, 材料去除有效率迅速下降。当 $d/\lambda = 1$ 时, 材料去除有效率下降到 58%; 当 $d/\lambda = 2$ 时, 则迅速下降到 11%。随着空间误差频率 f 的增加 (即 λ 减小), 材料去除有效率急剧下降。

可见离子束抛光不能修除中高频误差是相对的, 因为 IBF 工艺对中高频误差的修正能力取决于离子束直径的大小。如果减小离子束直径, 则可以增强 IBF 工艺的修形能力。因此首先研究减小离子束的方法, 即研究细小离子束的引束机理和引束结构。

2 小束径引束机理和引束结构

离子束的引束机理和结构如图 2 所示,通过球形栅网抽取、加速并汇聚离子源中的离子形成离子束。离子束的宽度主要取决于栅网的结构,包括栅孔面积、栅网曲率等。

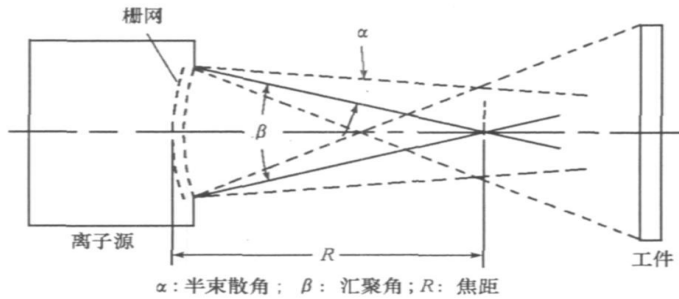


图 2 小束径引束机理和结构示意图

Fig. 2 Mechanism and structure of small ion beam

2.1 减小栅网直径

由图 2 引束机理和结构示意图可以看出,减小离子束宽度的有效方法是优化栅网结构,即减小栅网的栅孔面积、增大栅网的曲率等。

国防科技大学研制的离子束抛光机床 KDIFS-500^[11]所使用的栅网尺寸为 $\phi 90\text{mm}$ 。为了获取细小离子束,我们分别新设计了 $\phi 50\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$ 和 $\phi 15\text{mm}$ 三种规格的栅网,不同程度地减小了离子束的宽度。表 1 是 4 种规格栅网的去除函数实验结果。

表 1 不同出口直径栅网的去除函数

Tab. 1 Beam removal functions with different screen grids

栅网直径(mm)	$\phi 90$	$\phi 50$	$\phi 25$	$\phi 15$
去除束径(mm)	$\phi 45$	$\phi 32$	$\phi 25$	$\phi 21$
函数峰值去除率($\mu\text{m}/\text{min}$)	0.49	0.41	0.13	0.025
参数体积去除率($10^{-3}\text{mm}^3/\text{min}$)	179	62.4	16.6	1.67

由实验结果可以看出,随着栅网面积的减小,离子束的直径也相应地减小,当栅网尺寸由 $\phi 90\text{mm}$ 减小到 $\phi 15\text{mm}$ 时,束径由 $\phi 45\text{mm}$ 减小到 $\phi 21\text{mm}$ 。但是从表 1 的试验结果还可以看出,随着栅网出口直径的减小,去除函数的峰值去除速率和体积去除速率也减小,并且减小的幅度很大,当栅网出口直径由 $\phi 90\text{mm}$ 减小到 $\phi 15\text{mm}$ 时,峰值去除速率由 $0.4\sim 0.5\mu\text{m}/\text{min}$ 减小到了 $0.025\mu\text{m}/\text{min}$; 体积去除速率由 $179(10^{-3}\text{mm}^3/\text{min})$ 减小到了 $1.67(10^{-3}\text{mm}^3/\text{min})$ 。可见虽然减小栅网出口直径能减小去除函数直径,但是去除速率将急剧减小,因此,减小栅网出口直径的方法加工效率较低。因此我们又研究了减小离子束的“离子光阑”法。

2.2 离子光阑

“离子光阑”方法是直接在离子束接近工件的地方增加一块光阑,从而只允许很小一部分离子通过,该方法的原理如图 3 所示。分别设计了 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 2\text{mm}$ 三种孔径的离子光阑,并进行了去除函数实验。3 种规格光阑的去除函数试验结果整理为表 2。

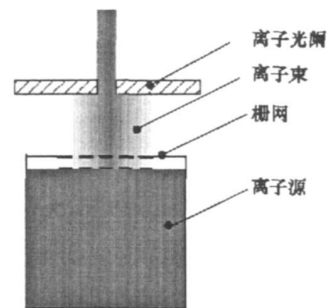


图 3 离子光阑原理示意图

Fig. 3 The principle of diaphragm

表 2 不同光阑去除函数试验结果

Tab. 2 Beam removal functions with different diaphragms

光阑孔径(mm)		$\phi 10$	$\phi 5\text{mm}$	$\phi 2\text{mm}$
去除	束径(mm)	$\phi 15.8$	$\phi 10.4$	$\phi 7.7$
函数	峰值去除率($\mu\text{m}/\text{min}$)	0.23	0.17	0.032
参数	体积去除率($10^{-3}\text{mm}^3/\text{min}$)	6.5	4.0	0.33

由实验结果可以看出, 增加离子光阑后获得的去除函数直径明显减小了, 并且同时保持了较高的去除速率。例如使用 5mm 的小孔可以获得 $\phi 10.4\text{mm}$ 的束径, 去除速率还能保持 $0.17\mu\text{m}/\text{min}$; 而采用更换栅网的方法, 随着栅网口径的减小, 去除速率急剧下降, 所获得的最小束径为 $\phi 2\text{mm}$, 去除速率只有 $0.025\mu\text{m}/\text{min}$ 。可见使用离子光阑较之更换栅网可以获得更小的束径, 同时保持较大的去除速率。因此离子光阑是减小束径、提高修形能力并保证加工效率的有效方法。

3 细小离子束修形实验

小型精密光学元件富含中高频误差, 由于元件尺寸较小, 因此其上的误差频率成份较高, 是典型的难以加工的光学零件。图 4 所示是一种微晶玻璃材料的超精密元件。其外形尺寸为 $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 10\text{mm}$, 外框面的尺寸是 $50\text{mm} \times 10\text{mm}$, 内框面的尺寸是 $45\text{mm} \times 10\text{mm}$, 形状精度要求为 $0.4\mu\text{m}$ 。该元件尺寸比传统光学加工所用的抛光盘小, 传统加工无法满足加工精度要求。如果采用常规离子束加工, 由于离子束的宽度比元件的尺寸大, 也无法满足加工精度要求。因此, 需要采用细小离子束进行加工。

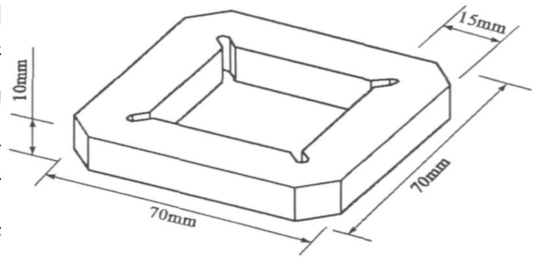


图 4 超精密元件结构示意图

Fig. 4 A precise workpiece for figuring

细小离子束加工中的一个关键问题是确定加工的束径大小。较宽的离子束, 材料体积去除速率大, 加工时间短, 但是中高频误差去除较少, 加工精度低; 而较窄的离子束, 材料体积去除速率小, 加工时间长, 但是中高频误差去除较多, 加工精度高。因此, 选择能平衡加工时间和加工精度的束径是加工工艺的关键。

为了选择合适束径的加工工艺, 首先仿真了所设计的 3 种离子光阑加工的残差和时间, 对每种束径的束流分别采用不同的加工参数进行了仿真, 仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同束径离子束加工仿真结果, 初始面形: PV: 0.618λ , rms: 0.111λ Tab. 3 Residuals simulated of processes with different ion beams, with original surface error: PV: 0.618λ , rms: 0.111λ

去除函数		仿真残差		加工时间(min)
光阑孔径(mm)	束径(mm)	PV(λ)	rms(λ)	
10	15.8	0.227	0.0254	119.6
		0.242	0.0268	29.8
		0.251	0.0274	24.3
		0.268	0.029	17.4
5	10.4	0.17	0.166	112.9
		0.171	0.0168	86.3
		0.176	0.0171	70.3
		0.205	0.0181	54.9
2	7.7	0.21	0.0148	755.4
		0.222	0.0159	483.9
		0.24	0.0183	357.9
		0.255	0.0218	285.5

根据表3中的加工仿真结果,选择加工时间较短、加工精度较高的5mm光阑进行加工。图5所示为其中一个面加工前后的面形误差测量结果,加工过程分两次进行,总的加工时间为78.7min。由加工结果可见,面形误差由原来的 0.111λ rms减小到了 0.015λ rms,面形精度提高了7.4倍。

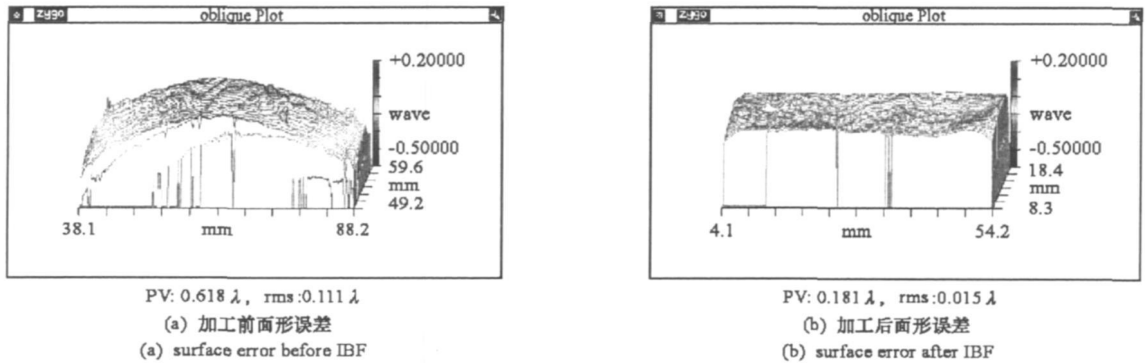


图5 细小离子束加工试验结果

Fig. 5 The result of IBF process with thin ion beam

4 结论

基于小磨头抛光原理的工艺,由于小磨头具有一定的宽度,因此难以有效修正比小磨头尺寸特征小的中高频面形误差。减小小磨头的尺寸可以提高对中高频误差的修正能力,提高加工精度。离子束抛光工艺中材料去除有效率随变量 d/λ (去除函数直径/空间误差波长)的增大迅速下降,减小离子束直径,则可以增强IBF工艺对中高频误差的修正能力。

减小栅网面积能有效减小去除函数直径,但是峰值去除率和体积去除率急剧减小。增加离子光阑可以获得更小的束径,同时保持较大的峰值去除率和体积去除率。因此离子光阑是减小束径、提高对中高频误差的修正能力并保持加工效率的有效方法。

小型精密光学元件尺寸较小,因此其上的误差频率成份较高,是典型的难以加工的光学零件。应用5mm离子光阑获得的细小束径对最小尺寸为10mm的小型精密光学元件进行了面形误差修正,面形精度由原来的 0.111λ rms减小到了 0.015λ rms,提高了7.4倍。实验结果表明基于细小离子束的加工工艺是抛光中高频误差的有效方法。

参考文献:

- [1] Barkat R. The Influence of Random Wavefront Errors on the Imaging Characteristics of an Optical System[J]. *Optica Acta*, 1971(18): 683- 694.
- [2] Jones R A, Rupp W J. Rapid Optical Fabrication with CCOS[J]. *SPIE*, 1990, 1333: 34.
- [3] Kordonsky W I, Jacobs S D. Magnetorheological Finishing[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 1996(10): 2837- 2848.
- [4] Walker D D, et al. The 'Precessions' Tooling for Polishing and Figuring Flat, Spherical and Aspheric Surfaces[J]. *Opt. Express*, 2003(11): 958 - 964.
- [5] Allen L N, Keim R E. An Ion Figuring System for Large Optic Fabrication[J]. *SPIE*, 1989, 1168: 33- 50.
- [6] Fruit M, Schindler A, Hansel T. Ion Beam Figuring of SiC Mirrors Provides Ultimate WFE Performances for Any Type of Telescope[J]. *SPIE*, 1999, 3739: 142- 154.
- [7] Jun T, et al. Surface Roughness of Optical Substrate Finished by Ion Beam Figuring[C]// *EUV Symposium*, 2003.
- [8] Zhou L, et al. Analysis of Correcting Ability of Ion Beam Figuring[J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 364: 470- 475.
- [9] 周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [10] Haensel T, et al. Deterministic Ion Beam Figuring of Surface Errors in the Sub-millimeter Spatial Wavelength Range[C]// *6th EUSPEN intl. conf.*, Baden, Vienna, Austria, 2006.
- [11] Zhou L, et al. Ion Beam Figuring System in NUDT[J]. *SPIE*, 2007, 6722: 67224A 1- 6.