

文章编号 1004-924X(2026)03-0353-12

细束径离子束变去除函数加工工艺及补偿

毛 旭^{1,2,3}, 张 峰^{1,3*}, 唐 瓦^{1,3}, 胡海翔^{1,3}, 季 鹏^{1,3}, 张学军^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为了实现离子束对高精度光学表面的确定性加工, 加强对加工过程中离子束去除函数的精确控制, 建立细束径离子束的变去除函数补偿模型。实现对加工过程中细束径变去除函数问题的研究、分析、补偿和优化。根据实际加工中去除函数不稳定的问题进行理论分析, 结合理论推导探究影响去除函数的直接因素和间接因素, 直接因素包括热积累和能量分配问题, 间接因素为驻留时间和进给速度。通过动态去除函数实验验证驻留时间对加工过程中去除速率的影响, 对两组不同尺寸束径的实验证明了该规律的重复性。最后, 提出了基于进给速度对去除速率的影响规律给出补偿方案及加工建议。实验结果表明: 通过控制驻留时间/进给速度的方式, 可以有效提高细束径在高精度光学表面的加工收敛率。在亚纳米光学加工的实验验证中, 在 100 mm ULE 平面反射镜上达到 0.332 nm RMS 的加工结果, 满足细束径离子束在实际应用中的稳定可靠、精度高、确定性强等要求。

关键词: 光学加工; 离子束加工; 细束径; 变去除函数; 驻留时间; 非线性补偿

中图分类号: TN305.2 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263403.0353

CSTR: 32169.14.OPE.20263403.0353

Machining process and compensation for variable removal function with fine-diameter ion beams

MAO Xu^{1,2,3}, ZHANG Feng^{1,3*}, TANG Wa^{1,3}, HU Haixiang^{1,3}, JI Peng^{1,3}, ZHANG Xuejun^{1,3}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangfjyz@sina.cn

Abstract: Deterministic ion-beam figuring of high-precision optical surfaces requires stable and accurately controllable removal functions. To improve in-process control of the ion-beam removal function and to establish a variable removal-function compensation model for fine-beam-diameter ion beams, a sys-

收稿日期: 2025-12-09; 修订日期: 2025-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62405314); 吉林市科技发展计划资助项目 (No. SKL202402021); 长春市科技发展计划资助项目 (No. 2024GZZ19)

tematic framework was developed for investigating, compensating, and optimizing removal-function variability during machining. First, the practical instability of the removal function was analyzed theoretically. Subsequently, the governing factors were derived and classified into direct effects (thermal accumulation and energy distribution) and indirect effects (dwell time and lateral velocity). Dynamic removal-function experiments were then performed to validate the influence of dwell time on the removal rate, and tests using two beam diameters confirmed the generality of the observed behavior. Finally, a compensation strategy and machining guidelines were proposed based on the effect of lateral velocity on the removal rate. The results demonstrate that regulating dwell time and lateral velocity can significantly enhance the convergence rate in fine-beam-diameter machining of high-precision optical surfaces. In sub-nanometer machining validation, a 0.332 nm RMS figure error was achieved on a 100 mm ULE flat mirror, satisfying practical requirements for stability, reliability, high precision, and controllability of fine-beam-diameter ion-beam processing.

Key words: optical manufacturing; ion beam figuring; fine beam diameter; variable removal function; dwell time; nonlinear compensation

1 引言

随着先进光学系统向高数值孔径光刻、X射线反射镜与自由电子激光、高功率激光装置等方向发展,光学元件对面形精度、斜率误差以及中高频误差抑制提出了更严苛的要求。离子束加工(Ion Beam Figuring, IBF)以物理溅射为材料去除机理,具有非接触、无应力、去除可预测等优点,已成为高精度反射镜与关键光学元件最终修形的重要手段^[1]。

为提高局部调控能力与空间分辨率,细束径离子束(直径小于8.5 mm)加工近年来持续受到关注。针对X射线反射镜^[2]与EUV光刻反射镜等超光滑表面,Pradhan等在综述中系统总结了IBF在去除函数获取、驻留时间求解与误差频段控制方面的最新进展,并指出小口径工具对中高频误差控制的重要性^[3]。在工艺层面,研究人员通过可变束斑技术扩展了IBF的加工带宽与效率。Qiao等提出了基于Einzel透镜的可控变束径离子源,可在调压条件下实现去除函数宽度与峰值去除率的协同调节^[4]。Zou等提出原位动态可变孔径装置,实现加工过程中束斑实时调节并提升复杂误差分布的收敛能力^[5]。此外,脉冲离子束(PIB)用于降低对机床动态性能的依赖并提高微量去除分辨率,Xie等给出了面向亚纳米精度的自适应脉冲加工策略与实验验证^[6]。在超精

密X射线光学领域,Huang等提出利用一维离子束系统配合孔阵掩模实现长镜二维修形,使有效口径内RMS显著降低至纳米量级,展示了离子束系统在大尺度高精度光学制造中的工程潜力^[7]。

尽管上述研究在工具尺度调控、路径/驻留时间优化以及系统稳定性方面取得了进展,细束径条件下去除函数仍可能随时间与加工状态发生漂移,表现为动态去除函数与静态去除函数不一致。该时变非线性将导致传统基于恒定去除函数的线性卷积模型失准,从而引起面形收敛率下降,尤其在亚纳米级微量去除阶段更为突出。近年来,Liu等针对小口径离子束的中高频误差修正指出,若忽略去除函数随过程变化,易在迭代收敛中引入系统性偏差^[8]。为了改善加工效果,脉冲离子束、路径优化、在线补偿等手段被提出。卞萌等基于频域滤波面形提出毫米级束径离子束驻留时间补偿方法^[9],为细束径加工中驻留时间补偿与收敛效率提升提供了新思路。蔡根等针对多光谱硫化锌(ZnS)光学窗口开展离子束抛光工艺研究及参数优化^[10],验证了工艺参数对去除特性与面形质量的显著影响。然而,针对细束径下的变去除函数问题尚缺乏系统研究。

本文基于溅射能量分配理论,系统研究了细束径离子束加工中去除函数的时变特性,提出了基于局部去除速率控制的驻留时间补偿方法,并

通过仿真与实验验证了该方法的可行性与有效性,为高精度光学制造提供了新的工艺解决方案。

2 原理

2.1 离子束加工机理与去除函数

离子束抛光原理的微观作用机理如图1所示。离子源电离工作气体产生离子束,通过控制离子源的入射角度和距离将离子束流发射到元件表面。根据Sigmund溅射原理^[11],射到工件表面的离子与工件原子发生碰撞,入射离子在工件表层内的能量分布呈高斯型,将能量传递给光学元件表面原子,获得能量的原子会与表面其他原子发生级联碰撞,当被撞击的表面原子获得的动能大于晶格束缚能时,就实现了对目标材料的去除^[12]。再结合CCOS技术,就可以通过驻留时间的控制实现对目标面形的精确控制。

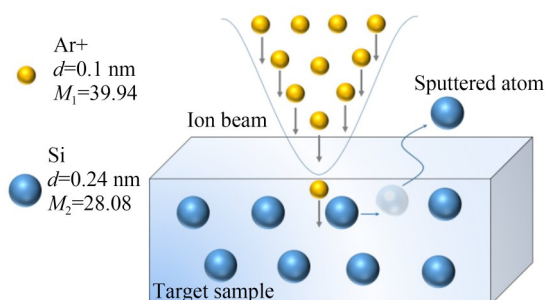


图1 离子束加工的微观作用机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of microscopic mechanism for ion beam processing

离子束去除函数通常近似为高斯分布。基于溅射理论,束流密度分布可描述为:

$$R(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \frac{Y \cdot J \cdot e}{n} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\pi\sigma^2}\right), \quad (1)$$

其中: $R(x, y)$ 为点 (x, y) 处的去除速率, Y 为溅射产额, J 为离子束电流密度, e 为元电荷, n 为材料原子密度, σ 为束流尺寸参数。

为了简化分析,去除函数可表达为:

$$R(r) = R_{\max} \exp\left(-\frac{r^2}{2\pi\sigma^2}\right), \quad (2)$$

其中: $R_{\max}$ 为去除函数中心的最大去除率, r 为到束流中心的距离。

在离子束加工中,通常先在与目标材料相同的实验片上测定去除函数,然后进行正式加工。以150 mm熔石英实验片为例,分别按不同的进给速度做沟槽实验,并通过干涉仪测量加工前后的面形信息,对比得到:

$$r(x, y) = R_{\max} \cdot e^{-\frac{4\ln 2(x^2 + y^2)}{FWHM^2}}, \quad (3)$$

其中:FWHM (Full Width at Half Maximum)是半高全宽, e 是欧拉常数,图2为高斯分布离子束去除函数示意图。

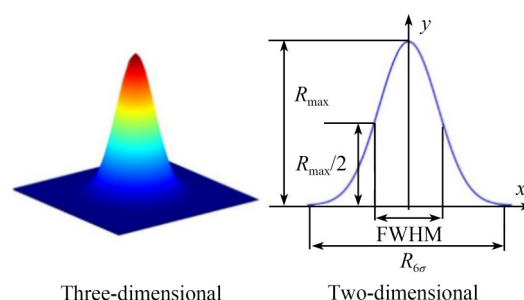


图2 高斯分布离子束去除函数示意图

Fig.2 Schematic of Gaussian ion beam removal function

在离子束加工中,通常认为去除函数的参数状态是恒定的,除离子源自身波动外,加工过程中的去除函数的半高全宽(FWHM)、去除速率(Removal Rate, R)以及体积去除速率(Volume Removal Rate, V_r)都是恒定不变的,并以此为前提,计算驻留时间开展加工实验。在离子束刻蚀沟槽实验中,当总驻留时间相同设置不同进给速度分别做直线沟槽实验,理论上沟槽深度应该是基本一致的。然而,实际实验结果得到不同去除深度的沟槽,且呈现出单点驻留时间越长实际去除深度越大的特点,即去除函数的峰值去除速率不是常数。这里将去除函数的去除速率、体积去除率或半宽随加工环境变化的问题定义为变去除函数问题。为建立离子束变去除函数与材料实际去除量之间的定量关系,本文开展了系统的理论推导与实验验证工作。

2.2 去除函数的影响因素分析

2.2.1 能量分配理论

在离子束加工过程中,材料去除行为可通过能量分配理论进行解释。该理论基于如下假设:入射离子束的总能量通量为 E ,即单位时间、单

位面积上所传递的能量。材料去除过程需首先克服阈值能量 E_t , 该部分能量用于活化表面原子, 仅当局部能量超过 E_t 时, 超出部分的能量方可贡献于材料的实际去除。因此, 有效用于材料去除的能量可表示为 $E - E_t$ (当 $E > E_t$ 时); 若 $E \leq E_t$, 则材料去除率为零。在此基础上, 材料去除率与有效能量呈正相关关系, 即:

$$R \propto (E - E_t). \quad (4)$$

这一关系为理解离子束加工中去除函数的能量依赖性提供了理论依据。

从能量分配理论的角度考虑, 在实验中发现驻留时间或进给速度会影响离子束去除函数的去除速率, 重点体现在静态去除函数的去除速率大于动态去除函数, 不同速度下的去除函数也有不同的去除速率。动态去除函数与静止去除函数之间的区别在于材料表面单位面积的驻留时间不同, 这里可以将单位面积的驻留时间定义为 T_0 , 即在离子束加工的过程中单位面积内高速等离子体与材料的相互作用时间为 T_0 , 在 T_0 时间内对应的总能量为 E 。在加工过程中, 主要分为用于分子热运动的 Q 以及用于溅射的 E_{eff} 两部分^[13]。

在工程实践中发现存在离子源参数状态正常, 但由于目标去除量较小, 实际单点驻留时间较短, 会出现一轮加工前后无实际去除的现象。基于这个无去除现象可以推测出能量分布趋势, 即进给速度越大, 驻留时间越短, 用于分子热运动的能量 Q 占比总能量 E_0 的比例越大, 如图 3 所示。 E_{eff} 的占比越小, 对应用于去除的能量占比越少, 从而影响材料的真实去除速率。

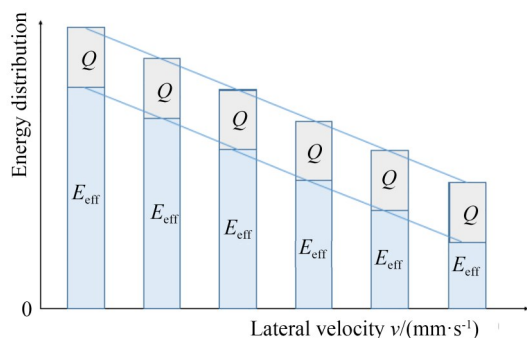


图 3 注入能量分配情况

Fig. 3 Distribution of injected energy

2.2.2 热积累效应

在实际离子束扫描加工过程中, 束流的进给速度 v 对材料表面的能量沉积有显著影响, 主要通过热积累效应^[14-15]体现。由于能量沉积并非瞬时完成, 而与离子束在局部位置的驻留时间密切相关, 该驻留时间 t 与进给速度成反比关系, 即 $t \propto 1/v$ 。进给速度越低, 驻留时间越长, 能量积累越多; 反之, 进给速度较高时, 能量积累较少。

因此, 在简化模型中, 假设能量积累与驻留时间呈线性关系, 则可推导出实际作用于材料表面的有效能量 E_{eff} 为:

$$E_{\text{eff}} \propto \frac{1}{v}, \quad (5)$$

其中: 一般情况下, 有效能量和进给速度之间的关系可能服从幂指数规律:

$$E_{\text{eff}} \propto v^{-k}, \quad (6)$$

其中 k 为与工艺条件和材料特性相关的常数。这一关系表明, 进给速度对去除函数的影响可通过能量积累效应进行量化建模, 为离子束加工中动态去除行为的预测与控制提供了理论依据。

根据目标去除量可以得出驻留时间的长短, 驻留时间会影响去除函数的实际去除速率, 即去除速率是驻留时间的函数。

当离子束以速度 v 沿着 x 轴正向加工时, 某点 (x_0, y_0) 处的总去除深度为:

$$Z(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} R(x_0 - x, y_0) \cdot \frac{dt}{dx} dx, \quad (7)$$

其中: Z 为去除深度, R 为去除速率, $\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v}$ 是单位长度内的驻留时间, 带入后得到:

$$Z(x_0, y_0) = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{\infty} R(x_0 - x, y_0) dx. \quad (8)$$

对于高斯型去除函数, 沿着 $X+$ 方向积分可以得到:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} R(x_0 - x, y_0) dx = \\ & R_0 \exp\left(-\frac{y_0^2}{2\sigma^2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_0 - x)^2}{2\sigma^2}\right) dx = \\ & R_0 \exp\left(-\frac{y_0^2}{2\sigma^2}\right) 2\pi\sigma. \end{aligned} \quad (9)$$

因此:

$$Z(x_0, y_0) = \frac{1}{v} \cdot R_0 \exp\left(-\frac{y_0^2}{2\sigma^2}\right) 2\pi\sigma. \quad (10)$$

这里可以将单位时间的去除深度定义为有效去除深度 Z_{eff} , 其表达式为:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{Z(x_0, y_0)}{t}. \quad (11)$$

从热累积效应的角度解释上述结果, 当 (x_0, y_0) 处驻留时间过长时, 局部温度升高, 可能改变溅射产额或引起再沉积, 导致去除效率下降。另一方面再溅射与再沉积: 长时间溅射使剥离物质部分重新沉积到表面, 减少净去除率。

结合上述两条理论, 可以得出去除速率与有效能量成正比:

$$R \propto (E_{\text{eff}} - E_t). \quad (12)$$

带入 $E_{\text{eff}} \propto v^{-k}$ 可以得到:

$$R \propto (c \cdot v^{-k} - E_t), \quad (13)$$

其中 c 为比例常数。当 v 很大时, E_{eff} 很小, 若小于 E_t , 则此时去除速率为零; 当 v 较小时, $E_{\text{eff}} > E_t$, 去除速率为正。

因此, 去除速率 R 与 v 的关系为:

$$R = A \cdot v^{-k} + B. \quad (14)$$

即去除速率或体积去除率是进给速度的幂函数。式中, A, B 为常数与束流或材料特性有关。可通过实验得出待定系数 A, B 和 k , 最终找到实际加工中细束径去除函数去除速率的真实变化规律。

3 实验

3.1 口径 0.5 mm 的去除函数实验

为了探究细束径离子束再加工过程中去除函数的变化问题, 探寻驻留时间和进给速度对去除速率 R 的关系, 进行了动态去除函数实验。在实际加工中, 离子束在亚纳米面形精度下存在收敛率低的问题^[16], 这是因为高精度面形的加工中, 去除函数的自身波动性的影响被放大, 进而影响去除精度。为了进一步提升加工过程中去除函数状态的确定性, 本次结合动态去除函数 Groove^[17] 和静态函数 Footprint 实验, 对去除函数充分预热再进行实验分析。

结合实际的加工情况, 首先明确分析过程中可能影响稳定性的因素^[18-19]: (1) 离子源未充分预热, 对应去除速率随时间增大; (2) 镜子加工过程中的热积累会影响离子束的实际去除速率; (3) 在去除函数提取过程中点对点做差不精准。

通过分析加工前后的面形数据, 依次排除分析。沟槽加工参数如表 1 所示。

表 1 离子源参数

Tab. 1 Parameter of ion beam source

Parameter	Value
Aperture size	0.5 mm
Work distance	5 mm
Gas flow rate	5 sccm
Neu. current	21 mA
Removal rate	1.7 nm/s
Beam power	1 000 W
Acc. voltage	100 V
RF power	50 W

在检测过程中, 需要对面形进行测量并对齐, 以减小面形对实验结果的影响。实验前对离子源进行充分的预热。在设置好离子源的工作参数后, 从起辉状态开始计时 60 min, 在此过程中可每隔 10 min 用法拉第杯扫描去除函数的中心面电流分布。直至两次扫描的中心电流差值小于 1%, 认为离子束已经充分预热, 并达到热稳定状态。

实验中, 通过在相邻时间下刻蚀沟槽和单点驻留, 从而确保离子源的工作状态基本一致。动态去除函数是离子源在实验片表面做往复的直线运动实现沟槽的刻蚀; 静态去除函数是通过固定点位驻留加工实现单点驻留的。再通过对加工前后实验片表面进行点对点幅值做差以及数值计算, 实现对动态去除函数和静态去除函数的提取。

加工中, 静态去除函数较为稳定, 且去除速率大于动态去除函数, 该现象与理论推导结果一致。实验结果如图 4 所示, 动态去除函数的去除速率会随进给速度的增大而减小, 经过数据拟合可以得到, 在 3~30 mm/s 的速度区间内, 两者满足一定的线性关系。

3.2 口径 1 mm 的去除函数实验

前述实验条件未能覆盖小于 3 mm/s 的区间, 因此, 补充开展了 1 mm 离子束的去除函数稳

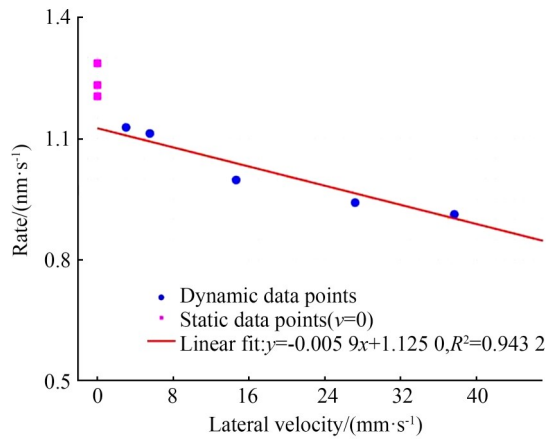


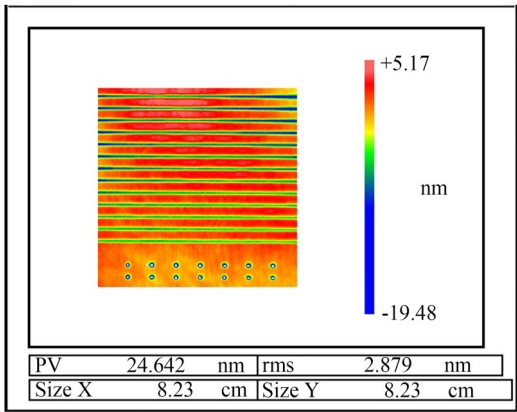
图4 0.5mm去除函数峰值去除速率与进给速率关系图
Fig. 4 Relationship between removal rate and lateral velocity for the 0.5 mm tool influence function

定性实验,进一步验证了0~3 mm/s的进给速度下去除函数的变化情况。改变离子源尺寸是因为相较于0.5 mm的去除函数,1 mm有更大的去除效率,1 mm离子束属于兼顾效率与响应频率的选择。

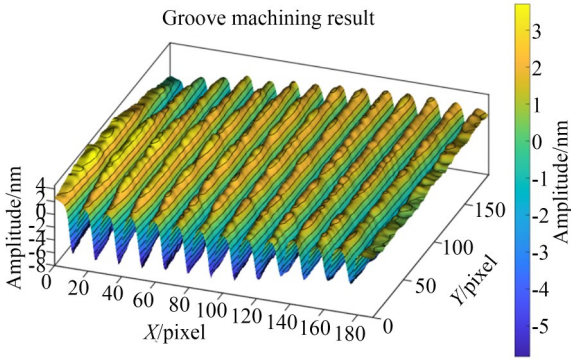
本实验在150 mm熔石英实验片上开展沟槽和单点驻留实验,通过在实验Y+做标记的方式结合校畸变,确保点对点做差的准确性^[20]。在进给速度设置方面,采用实际加工常用的速度0.2~30 mm/s。去除函数选10 mm栅网结合0.5 mm离子光阑截断。为了排除离子源自身飘移对实验结果的影响,本次实验将通过两种方式减少离子源自身飘移对去除速率的影响。

图5为加工结果和三维面形。从图5(b)中可以直观看出不同沟槽之间的深度变化。通过对加工数据进行提取,统计结果如表2所示,从中可以看出,去除函数的去除速率、体积去除速率和半高宽3个关键参数随进给速度和驻留时间的变化关系。

将表2中的数据进行拟合分析,得到的实验结果如图6所示。通过分析可以得到,随着驻留时间的增大即进给速度的减小,去除速率和体积去除率先增大后趋于稳定,半宽呈现出逐渐减小后趋于稳定的趋势。在3个变量中半宽的变化幅度较小,仅为5.9%,又因为体积去除率和去除速率共同影响体积去除率,所以重点关注体积去除率和去除速率对加工结果的影响。半高全宽FWHM、峰值去除速率 R 和体积去除速率 V_v 之



(a) 加工布局
(a) Machining strategy



(b) 沟槽加工结果的面形三维图
(b) 3D surface topography of groove machining results

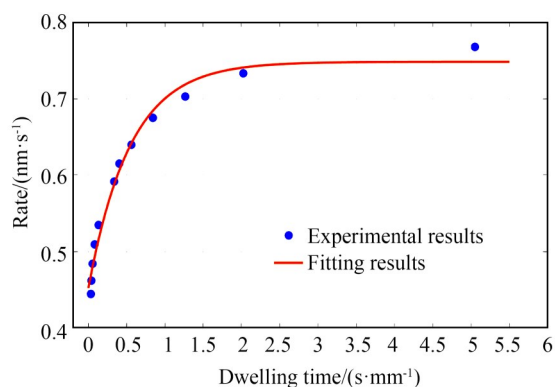
图5 动态去除函数实验结果

Fig. 5 Results of dynamic removal function experiment

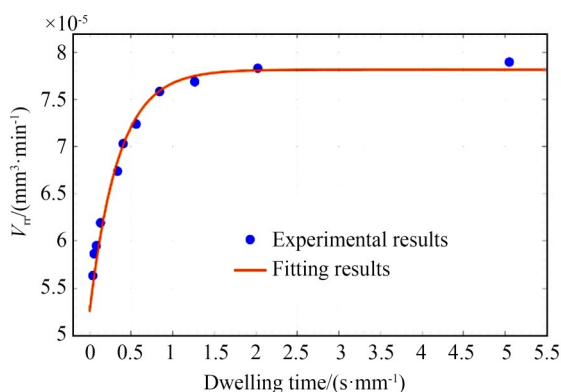
表2 动态去除函数实验结果

Tab. 2 Experimental result of dynamic removal function

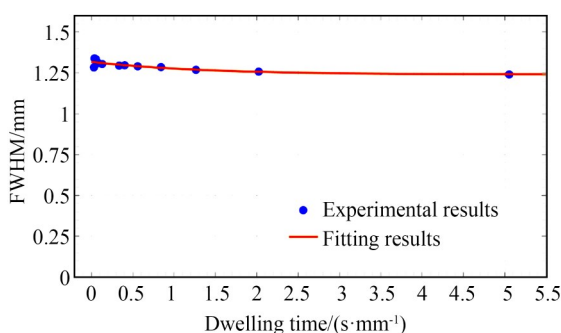
实验 次数	进给 速度	驻留 时间	去除 速率	半宽 FWHM	体积去除率
	mm/s	s/mm	nm/s	mm	10 ⁶ mm ³ /min
1	0.198	5.051	0.768	1.241	8.05
2	0.494	2.024	0.733	1.258	7.88
3	0.79	1.266	0.703	1.269	7.69
4	1.186	0.843	0.675	1.286	7.58
5	1.779	0.562	0.640	1.291	7.24
6	2.47	0.405	0.615	1.297	7.03
7	2.964	0.337	0.591	1.295	6.74
8	7.509	0.133	0.535	1.305	6.19
9	12.054	0.083	0.509	1.311	5.95
10	17.983	0.056	0.484	1.335	5.87
11	24.998	0.040	0.462	1.339	5.63
12	30.037	0.033	0.444	1.284	4.98



(a) 去除速率随驻留时间的变化情况
(a) Relationship between removal rate and dwelling time



(b) 体积去除率随驻留时间的变化情况
(b) Relationship between volume removal rate and dwelling time



(c) FWHM随驻留时间的变化情况
(c) Relationship between FWHM and dwelling time

图6 实验加工结果及拟合结果

Fig. 6 Experimental processing and fitting results

间的关系满足:

$$V_r = 1.13 \cdot R \cdot FWHM^2. \quad (15)$$

当半高全宽的变化较小时,可以得到体积去除率和去除速率的线性关系:

$$V_r = k \cdot R. \quad (16)$$

故研究去除函数的变化情况,聚焦于去除速

率 R 的变化。

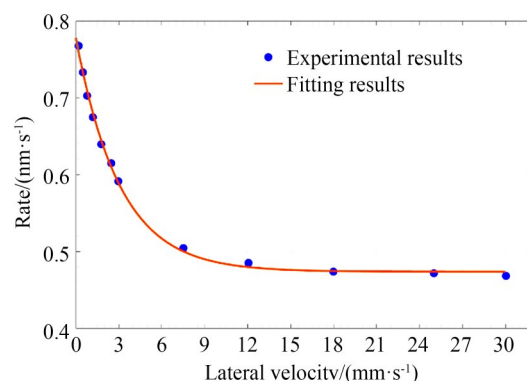


图7 去除速率随进给速度的变化情况

Fig. 7 Relationship between removal rate and lateral velocity

重复实验表明,在1 mm去除函数下, $R = 0.6716v^{-0.1137} + 0.0073$,拟合评价指标 $R^2 = 0.9937$ 。如图7所示,进给速度对去除函数去除速率的影响范围约为最大去除速率的42.11%。在0~7.5 mm/s内,去除函数变化72.2%,在大于7.5 mm/s的速度下变化27.8%。在亚纳米量级的加工中,补偿进给速度对去除函数的影响,可以提升离子束加工的收敛效率和确定性^[21]。

4 补偿方案及实验验证

4.1 补偿方案

在细束径的离子束加工中,去除函数的中心去除速率呈现出一种非线性特性,会影响表面加工的收敛效率,即造成实际收敛效果与理论收敛效果有差距。基于这一发现,可将此规律补偿至实际加工中,进而减少非线性效应对收敛率的影响。

理论上,离子束的去除函数受多因素耦合作用影响,对各因素独立效应的解析是一个复杂的解耦问题。然而,实验表明,细束径离子束在熔石英表面的去除函数具有明确的规律。基于此,本研究提出可直接依据待加工面形数据,对加工过程中变去除函数所引起的误差进行迭代补偿,从而提升面形精度与控制效率^[22]。

如图8所示,体积去除率随驻留时间变化明显。传统驻留时间求解基于恒定去除函数的线

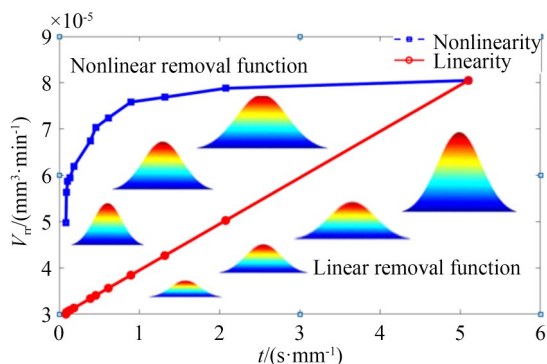


图8 去除函数体积去除率与驻留时间的关系

Fig. 8 Relationship of removal function volume removal rate to dwell time

性卷积模型,难以表征该类时变非线性,从而在微量去除阶段引入系统性误差。

根据去除函数的去除速率随驻留时间的变化关系,本文提出一种迭代局部去除速率控制模型。常见加工过程中,去除函数不是稳定不变的,引入变去除函数的概念可以提高离子束加工过程的实际收敛率。将原去除函数变为时间相关的函数,收敛过程的去除量 $\Delta Z(x, y)$ 为:

$$\Delta Z(x, y) = R(x, y) \otimes T(x, y). \quad (17)$$

当去除函数中引入时间影响参数 $t(x, y)$ 时,变去除函数为 $R_v(x, y)$:

$$R_v(x, y) = R(x, y, t(x, y)). \quad (18)$$

$t(x, y)$ 可通过前序实验来提取,具体方法可参照沟槽去除函数实验。以1 mm动态去除函数实验结果为例:

$$R = 0.6716v^{-0.1137} + 0.0073, \quad (19)$$

$$v(x, y) = 1/t(x, y), \quad (20)$$

$$R(x, y, t) = 0.6716t^{0.1137}(x, y) + 0.0073. \quad (21)$$

设 (x, y) 处的驻留时间为 $T_0(x, y) = 0$,迭代系数为 I ,残余误差 $^{[23]}H_1(x, y)$ 为:

$$H_1(x, y) = E(x, y) - R_v \otimes T_0(x, y). \quad (22)$$

驻留时间表示为:

$$T_{k+1} = [H_k - R_v(x, y, t) \otimes T_0(x, y)]/I + T_k. \quad (23)$$

加工残差 $H_{k+1}(x, y)$ 为:

$$H_{k+1}(x, y) = E(x, y) - R_v(x, y, t) \otimes T_k(x, y). \quad (24)$$

若 $T_k \leq 0$,将 T_k 置零。当迭代至残差

$H_{k+1}(x, y)$ 小于预设目标残差数值时,得到变去除函数下的驻留时间,对其取倒数即可得到用于实际加工的进给速度分布。该变去除函数补偿流程如图9所示。

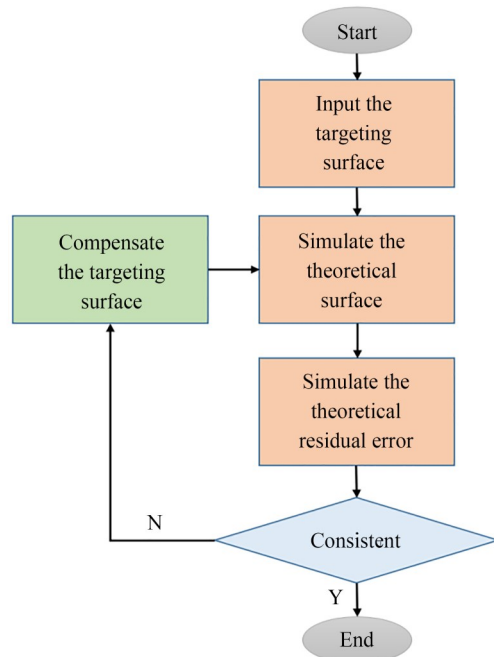


图9 变去除函数补偿流程

Fig. 9 Flowchart of variable removal function compensation

4.2 补偿方案验证实验

实验采用最大加工口径为300 mm的NTG-1000,离子源状态与上述沟槽实验参数保持一致,如图10所示。离子源中采用10 mm的离子光栅系统配合1 mm离子光阑截断。经法拉第杯扫描得到加工前的峰值去除速率为0.65 nm/s,半高全宽为0.99 mm。选用上述补偿工艺对100

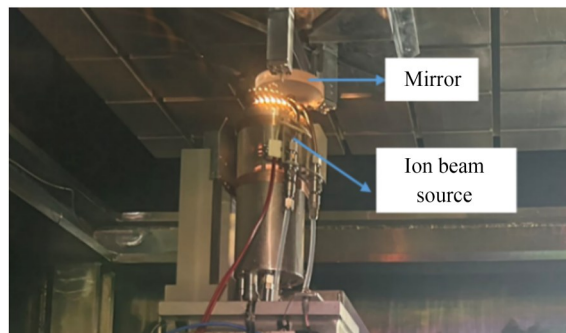


图10 离子束加工系统

Fig. 10 System of ion beam figuring

mm 直径的圆形 ULE 平面光学反射镜进行加工,对比传统恒定去除函数和变去除函数的加工结果。

为排除不同实验片之间固有微观差异对结果的干扰,本实验采用单一样品自身对照的策略。

略。通过对同一块 100 mm ULE 反射镜进行相邻区域、条件可控的序列加工与对比分析,以确保所观测到的效应差异可直接归因于工艺参数的改变,从而提高实验结论的可靠性。在加工过程中离子源参数如表 3 所示。

表 3 离子源参数设置

Tab. 3 Experimental parameters of ion source

Gas flow	Beam power	Acceleration power	Radio frequency	Neutralization current	Work distance
5.0 mL/min	1 000 V	100 V	58 W	22 mA	8 mm

4.3 实验结果

在不考虑去除函数变化的情况下,利用经典的驻留时间生成方式^[24-25],如图 11(a)和 11(b)所示,经历 33 min 的加工后面形 PV 由 5.977 nm 变

为 4.702 nm,RMS 由 0.760 nm 变为 0.648 nm,即 RMS 的收敛率为 14.73%。主要误差虽有一定程度的抑制,但是收敛率低,并未达到理想效果。

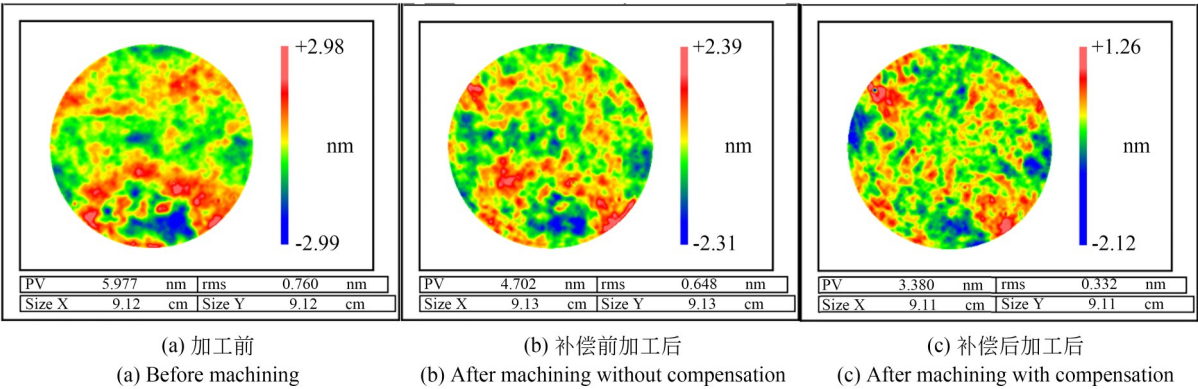


图 11 变去除函数补偿模型实验验证结果

Fig. 11 Variable removal function compensation model experimental verification results

采用变去除函数的补偿方案计算驻留时间并进行加工修形实验。采用相同的离子源参数进行第二轮实验,在求解去除函数过程中,考虑去除函数随驻留时间的变化规律,对驻留时间进行补偿,通过干涉仪检测得到的加工结果如图 11(c)所示。PV 由 4.702 nm 变为 3.380 nm,RMS 由 0.648 nm 变为 0.332 nm,即 PV 的收敛率为 28.12%,RMS 的收敛率为 48.76%。观察误差分布,三叶项误差成分得到显著抑制,且收敛率较好。面形 RMS 达到了 0.332 nm,较好地实现了光学元件的亚纳米级加工。

为了能更全面地评价 ULE 平面反射镜表面质量的频段收敛效果,对加工前后的元件进行了 RMSD 分析^[26],结果如图 12 所示。

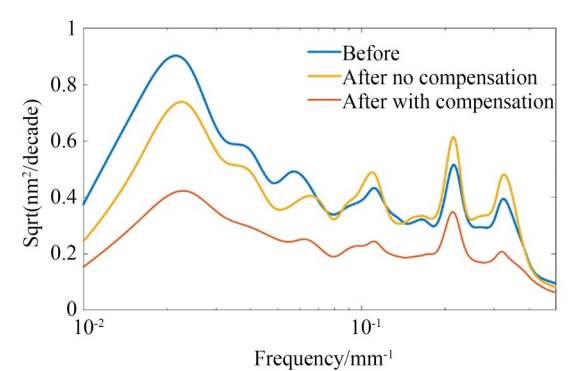


图 12 加工结果的 RMSD 分析

Fig. 12 RMSD analysis of machined surface profile

在半高全宽对应的中频范围^[27]0.01~0.5 mm⁻¹进行分析,可以看出,定去除函数的加工方

式收敛效果有限,在 $0.1\sim 0.5\text{ mm}^{-1}$ 频段内甚至出现增大的趋势,加入变去除函数补偿模型后,离子束加工中整个观测频段内收敛效果明显。需要指出的是,本文模型基于熔石英与 ULE 材料实验建立,其参数形式与系数可能随材料热学与溅射特性发生变化,但所揭示的时变规律与补偿思想具有普适意义。

5 结 论

本文针对细束径离子束加工在高精度光学表面的实际加工中单轮收敛率低的问题展开研究。通过理论分析发现,去除函数随驻留时间呈非线性变化,加工过程中能量分配和热积累是导致这个现象的主要原因。通过实验找到了细束径加工过程中的变化规律,与理论推导结果一致。为了解决这一问题,本文提出了一种细束径

离子束加工变去除函数补偿模型,并将变去除函数补偿模型应用到实际光学表面加工中。实验结果表明,RMS 收敛率从 14.73% 变为补偿后的 48.76%,最终精度达到了 0.332 nm RMS,且元件表面在 1 mm 附近的频段误差收敛情况也有显著提升。通过对离子束实际加工的去函数变化进行补偿,可以实现亚纳米光学表面的超精密加工。

作者贡献声明:

毛旭:模型提出,论文构思与初稿撰写,实验验证,可视化呈现;

张峰:论文构思与指导,论文审核与编辑;

唐瓦、胡海翔:论文构思,获取资源,论文审核与编辑;

季鹏:论文指导,论文审核与编辑;

张学军:获取资源。

参考文献:

- [1] MAKEEV M A, CUERNO R, BARABÁSI A L. Morphology of ion-sputtered surfaces [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, 197(3/4): 185-227.
- [2] SHURVINTON R, WANG H C, PRADHAN P, *et al.* Ion beam figuring for X-ray mirrors: history, state-of-the-art and future prospects [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2024, 31(Pt 4): 655-669.
- [3] PRADHAN P, SHURVINTON R, BOURGENOT C, *et al.* Ultra-high precision NiP mirror fabrication using ion beam figuring for space applications [J]. *Optics Express*, 2025, 33(8): 17721-17734.
- [4] QIAO D Y, WANG B, GUO S P, *et al.* Controllable variable beam diameter ion source based on the Einzel lens [J]. *Vacuum*, 2024, 228: 113503.
- [5] ZOU H Y, HU H, PENG X Q, *et al.* Research on optimized design of in situ dynamic variable-aperture device for variable-spot ion beam figuring [J]. *Micromachines*, 2025, 16(8): 849.
- [6] XIE L B, TIAN Y, SHI F, *et al.* Adaptive processing strategy of pulse ion beam for sub-nanometer precision optical components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 327: 118341.
- [7] HUANG Q S, HUANG H D, WU Q Y, *et al.* Two-dimensional precise figuring of 500mm-long X-ray mirror using one-dimensional ion beam system [J]. *Advances in Manufacturing*, 2024, 12(1): 177-184.
- [8] LIU M, PENG X Q, HU J, *et al.* Research on strategies for optimizing small-sized ion beam performance to achieve figuring of mid-spatial frequency errors on complex curved mirrors [J]. *Vacuum*, 2025, 240: 114480.
- [9] 卞萌, 胡海翔, 唐瓦, 等. 基于频域滤波面形的毫米级束径离子束驻留时间补偿 [J]. *光学精密工程*, 2025, 33(11): 1739-1749.
- BIAN M, HU H X, TANG W, *et al.* Dwell time compensation for millimeter spot-sized ion beam figuring based on frequency-domain filtered surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(11): 1739-1749. (in Chinese)
- [10] 蔡根, 朱蓓蓓, 秦琳, 等. 多光谱硫化锌光学窗口离子束抛光工艺研究及参数优化 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(14): 2247-2255.
- CAI G, ZHU B B, QIN L, *et al.* Ion beam polish-

- ing process parameters optimization and polishing experiment of ZnS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(14): 2247-2255. (in Chinese)
- [11] SIGMUND P. A mechanism of surface micro-roughening by ion bombardment [J]. *Journal of Materials Science*, 1973, 8(11): 1545-1553.
- [12] XIE X H, ZHOU L, DAI Y F, *et al.* Ion beam machining error control and correction for small scale optics [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(27): 5221-5227.
- [13] 王永刚, 李昂, 孟晓辉, 等. 光学反射镜组件离子束加工中的热效应[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(3): 72-78.
- WANG Y G, LI A, MENG X H, *et al.* Thermal effect in ion beam figuring of optical mirror assembly [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(3): 72-78. (in Chinese)
- [14] 周迪. 基于离子束表面抛光的热效应抑制研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- ZHOU D. *Study on Thermal Effect Inhibition Based on Surface Polishing of Ion Beams* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022. (in Chinese)
- [15] 于浩, 袁征, 解旭辉, 等. 离子束加工中工件吸收热功率分析与建模研究[J]. *航空精密制造技术*, 2011, 47(5): 18-22.
- YU H, YUAN ZH, XIE X H, *et al.* Analysis and modeling on power absorbed by workpiece during ion beam figuring [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2011, 47(5): 18-22. (in Chinese)
- [16] XU M J, DAI Y F, XIE X H, *et al.* Fabrication of continuous phase plates with small structures based on recursive frequency filtered ion beam figuring [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10765.
- [17] ZHANG X, WANG C Y, FENG S, *et al.* Stability analysis of ion beam figuring removal function based on line scan [C]. *Third International Conference on Photonics and Optical Engineering*. December 5-8, 2018. Xi'an, China. SPIE, 2019: 138.
- [18] 彭冰, 顿爱欢, 吴伦哲, 等. 大气等离子体变去除函数加工方法研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(24): 2403002.
- PENG B, DUN A H, WU L ZH, *et al.* Variable removal function in atmospheric pressure plasma polishing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(24): 2403002. (in Chinese)
- [19] SU X, JI P, JIN Y, *et al.* Freeform surface generation by atmospheric pressure plasma processing using a time-variant influence function [J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11479-11493.
- [20] VORONOV D L, WANG T, PARK S, *et al.* Nanometer flat blazed X-ray gratings using ion beam figure correction [J]. *Optics Express*, 2023, 31(21): 34789-34799.
- [21] 戴作财. 电感耦合大气等离子体高效加工熔石英的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- DAI Z C. *Study on the Key Technology for Efficient Machining of Fused Silica Using Atmospheric Inductively Coupled Plasma* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] ZHANG J, WANG H. Generic model of time-variant tool influence function and dwell-time algorithm for deterministic polishing [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 211: 106795.
- [23] HU J, HU H, PENG X Q, *et al.* Multi-dimensional error figuring model for ion beams in X-ray mirrors [J]. *Optics Express*, 2024, 32(17): 29458-29473.
- [24] XU M J, DAI Y F, XIE X H, *et al.* Structure optimization and fabricating capability analysis of an ion-beam machine for a subnanometer optical surface [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8055.
- [25] WANG R Q, ZHANG Z Y, BAI Y Y, *et al.* Scanning ion beam etching: a method for the fabrication of computer-generated hologram with nanometric accuracy for aspherical testing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 139: 106503.
- [26] XU K, HU H X, ZHANG X, *et al.* Accuracy verification methodology for computer-generated hologram used for testing a 3.5-meter mirror based on an equivalent element [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(2): 1.
- [27] 李文卿, 张继友, 王永刚, 等. 离子束加工中全频段误差的演变 [J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(5): 47-54.

LI W Q, ZHANG J Y, WANG Y G, *et al.* Evolution of full band errors in ion beam processing

[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(5): 47-54. (in Chinese)

作者简介:



毛 旭(1995—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,2018年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学制造中离子束加工技术的研究。E-mail: maoxu18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



张 峰(1969—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,博士生导师,1991年于长春理工大学获得学士学位,1997年于长春理工大学获得硕士学位,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zhangfjyz@sina.cn