

文章编号 1004-924X(2008)08-1343-06

光学镜面离子束加工的材料去除效率

焦长君,解旭辉,李圣怡,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:分析了离子束加工光学镜面的材料去除效率和不同材料之间的相对去除效率与工艺参数的关系。基于 Sigmund 溅射理论,建立了表征去除效率的指标—法向去除速率、体积去除速率和溅射产额与束能、束流以及入射角度之间的关系模型。以石英、微晶和 K4 玻璃等为样件,实验分析了去除效率与工艺参数的关系,验证了模型的正确性。分析结果表明,材料去除效率随束流线性增大,与束能平方根约呈线性关系;随着入射角度先缓慢增大,约在 $60\sim 80^\circ$ 达到最大值,然后迅速降为 0。不同材料之间的相对去除效率与束流无关;与束能的关系较弱,可以忽略;随角度变化较为明显。

关键词:光学加工;离子束修形;离子溅射;去除效率

中图分类号:TQ171.68 文献标识码:A

Material removal efficiency in ion beam figuring for optical component

JIAO Chang-jun, XIE Xu-hui, LI Sheng-yi, ZHOU Lin

(School of Mechanical Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The removal efficiency and the relative removal efficiency between two different materials and three performance factors, normal removal rate, volume removal rate and sputtering yield, were analyzed in ion beam figuring process. With the Sigmund sputtering theory, the relation models between three factors and processing parameters, such as ion energy, ion flux and ion incident angle, were established. The experiments with samples of zerodur, SiO₂ and K4 glass were carried out to analyze these relations and to verify the theoretical models, which indicates that the removal efficiency increases with the ion current linearly and shows an approximate proportion to the square root of the ion energy. It also increases with incident angle and climbs the summit at about $60\sim 80^\circ$. The relative removal efficiency is independent of ion flux, but has a little effect from beam energy, which can be ignored. However, the effect of angle on the relative removal efficiency is rather obvious.

Key words: optical fabrication; ion beam figuring; ion sputtering; material removal efficiency

1 引言

随着对现代光学系统性能要求的不断提高,对其镜面精度以及亚表面质量也提出了更高的要求,传统的接触式加工方法已经不能满足加工要求^[1]。离子束加工方法具有原子尺度材料去除能力、非接触式加工方式和高工艺确定性等特点,作为修形的最后一道工序被引入光学镜面的加工中已有 20 余年的历史^[2-3],国防科技大学在国内率先开展了加工原理和工艺方法的研究^[6,7,9]。

离子束加工方法利用离子溅射效应去除材料。高能离子入射到工件表面与工件表层原子碰撞并进行能量和动量的转移,若被碰撞的工件材料原子获得足够的能量,即可摆脱原子间的约束,形成初始运动原子,与工件材料的其余原子继续发生碰撞。在这一系列碰撞过程中,处于工件表层的原子若获得足够的指向工件外部的动量,即可摆脱工件材料的束缚,飞溅出来,形成材料去除。加工过程中材料的去除效率以及不同材料之间的相对去除效率与离子能量、束流以及入射角度等工艺参数密切相关。

本文基于 Sigmund 溅射理论,建立了离子束加工材料去除效率以及不同材料相对去除效率与工艺参数的关系模型,并进行了实验研究,检验了模型的有效性。

2 理论分析

利用 Sigmund 理论,建立了高斯束作用下平面的法向去除速率分布模型,据此建立表征去除效率的法向去除速率、溅射产额和体积去除速率与工艺参数的关系模型。

2.1 法向去除速率

Sigmund 假设入射离子与靶原子之间的碰撞是一线性级联过程,利用 Boltzman 迁移方程研究离子溅射过程。得到的一个重要结论如图 1 所示, B 点处入射的离子,在其能量散射中心 P 处建立如图 1 所示的能量散射中心坐标系 P - XYZ ,则在此坐标系中入射离子能量散射分布满足^[5]:

$$E = \frac{\epsilon}{(2\pi)^{3/2} \sigma \mu^2} \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma^2} - \frac{X^2 + Y^2}{2\mu^2}\right), \quad (1)$$

a 、 σ 和 μ 属于亚微米尺度。

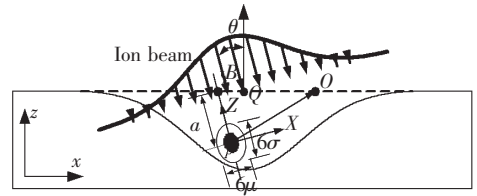


图 1 材料去除速率理论计算示意图

Fig. 1 Schematic illustration of theoretical removal efficiency

工件 O 点处的材料法向去除速率与离子束在此点沉积的能量成正比,为^[5-6]:

$$\nu_O = p \int_R \Phi E dq, \quad (2)$$

如图 1 所示,具有高斯型束流密度分布的离子束,倾斜 θ 入射平面工件,在工件参考系 Q - xyz 中的分布为:

$$J(x, y) = \frac{J_0}{2\pi\eta^2} \exp\left[-\frac{(x\cos\theta)^2 + y^2}{2\eta^2}\right], \quad (3)$$

式中, η 为束流分布方差,一般属于毫米以上尺度。

据式(2),平面工件在式(3)表征的束流作用下,轰击区域任意点 O 的材料法向去除速率 ν 为:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{pJ_0\epsilon\cos\theta g(\theta)}{(2\pi)^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + \eta^2}} \exp\left[-\frac{y^2}{2(\mu^2 + \eta^2)}\right] \times \\ &\quad \frac{1}{\sqrt{\mu^2\eta^2\sin^2\theta + \sigma^2\eta^2\cos^2\theta + \sigma^2\mu^2\cos^2\theta}} \times \\ &\quad \exp\left[-\frac{\cos^2\theta(\sigma^2x^2\cos^2\theta + x^2\mu^2\sin^2\theta)}{2(\mu^2\eta^2\sin^2\theta + \sigma^2\eta^2\cos^2\theta + \sigma^2\mu^2\cos^2\theta)}\right] \times \\ &\quad \exp\left[-\frac{\cos^2\theta(2\mu^2ax\sin\theta + a^2\mu^2 + a^2\eta^2)}{2(\mu^2\eta^2\sin^2\theta + \sigma^2\eta^2\cos^2\theta + \sigma^2\mu^2\cos^2\theta)}\right] \\ &\approx J(x, y)g(\theta)F, \quad (4) \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned} a_\sigma &= a/\sigma \quad a_\mu = a/\mu \quad f = a_\sigma^2\sin^2\theta + a_\mu^2\cos^2\theta \\ a \propto \epsilon^{2m} \quad F &= \frac{p\epsilon a_\sigma a_\mu \cos\theta}{a\sqrt{2\pi}\sqrt{f}} \exp\left(-\frac{a_\sigma^2 a_\mu^2 \cos^2\theta}{2f}\right), \quad (5) \end{aligned}$$

$g(\theta)$ 为角度修正函数^[6]。式(4)简化近似中利用了溅射参数 a 、 σ 和 μ 与束流宽度 η 之间的量级差别。 F 为工件在单位束流倾斜 θ 角作用下的法向去除速率。式(5)表明,高斯束作用下的工件材料法向去除速率为束流与单位束流作用下的法向去除速率的乘积,其分布形状与束流密度的分布一致,与工件材料不相关。

2.2 溅射产额

材料溅射产额定义为单个人射离子溅射出的工件材料原子数的统计平均值,根据文献[6],利用法向去除速率可以求解出溅射产额为:

$$Y = \frac{g(\theta)tN \iint_R v dx dy}{t \iint_R J(x,y) \cos \theta dx dy} = \frac{g(\theta)NF}{\cos \theta}, \quad (6)$$

式(6)表明,同一入射角度下溅射产额与法向去除速率成正比,故可测量法向去除速率来测定溅射产额。

考虑到 a_o 和 a_p 几乎不随能量变化的特性^[12],不同能量下,法向去除速率以及溅射产额随入射角度变化趋势基本一致。离子束加工所用能量在 1 keV 左右, m 约为 0.2~0.3^[4],则法向去除速率和溅射产额都大约与入射离子能量的平方根成正比。

2.3 体积去除速率

体积去除速率 V 定义为在入射离子束的作用下工件材料单位时间内的体积去除量,可以通过此指标来衡量束流对工艺的影响。根据式(5)可以计算出为:

$$V = \iint_R v dx dy = \frac{FJ_0}{\cos \theta} = \frac{YJ_0}{N}, \quad (7)$$

对于大倾斜角的情形,上述的角度修正函数 $g(\theta)$ 仍然适用。式(7)表明,体积去除速率与法向去除速率 F 、束流密度 J 以及溅射产额 Y 成正比关系。

以上分析表明,表征材料去除效率的法向去除速率 v 、体积去除速率 V 以及溅射产额 Y 之间存在相互转化的关系,研究分析工艺参数对加工去除效率的影响,仅需根据工艺特点,验证其中一个指标即可。不同材料间的相对去除效率为相应指标之商,此时上述 3 个指标一致,统称为相对去除效率。

3 实验研究与分析

3.1 实验设备和方法

实验所用设备为自行设计的 KDIFS-500^[7]。根据 Kaufman 型离子源的结构,用频栅电压和电流分别表征出射离子束的电压和电流^[8]。缺少直接测量出射束流的分布的专业仪器,故将实验分成两类。

第一类考察去除效率与束流的关系。如图 1 所示,出射的类高斯束流在固定时间内轰击大样件,再利用 zygo GPI XP1000 干涉仪测量材料去

除的分布以计算出其体积去除速率,以此考察与束流的关系。

第二类考察去除效率与入射角度、相对去除效率与束能、入射角度的关系。采用小样件,如图 2 所示,用掩模覆盖小样件加工面的一半,通过测量轰击前后的法向去除深度 h ,分析去除效率以及相对去除效率。法向去除深度 h 用 zygo 轮廓仪测量。

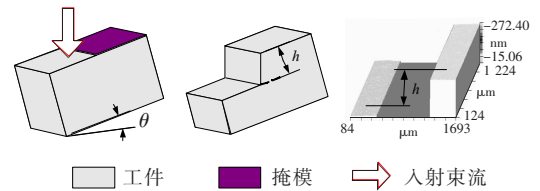


图 2 小样件实验方法示意图

Fig. 2 Experimental steps with small samples

3.2 材料去除效率

3.2.1 与束流的关系

以 K4 玻璃大样件为实验样本,分析体积去除速率与束流的关系。图 3 给出此两者之间的关系,指数函数拟合参数为 1.04。表明体积去除速率与束流之间为线性关系,与式(7)的理论分析一致。工艺实验中,可以通过提高入射束流来提高材料去除效率。

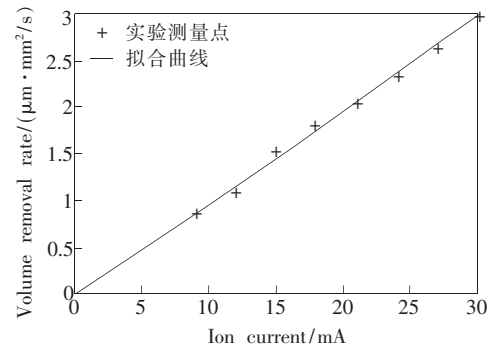


图 3 体积去除速率与束能关系曲线

Fig. 3 Relation between volume removal rate and ion current

3.2.2 与束能的关系

由于实验测试仪器的限制,本文引用参考文献[8]的数据进行分析。法向去除速率与束流成正比,将文献中有关普通玻璃、碳化硅以及石英的实验数据进行规整,结果如表 1。

表 1 表明,离子束垂直入射工件,在离子束加

表 1 法向去除速率与能量的关系

Tab.1 Normal removal rate vs ion energy

材料	单位束流下法向去除速率 (nm/min)				
	400 eV	500 eV	600 eV	650 eV	750 eV
玻璃 (Na Ca)	17.6	20.0	22.0	23.0	24.8
碳化硅 (SiC)	28.0	32.0	35.2	36.7	39.6
石英 (SiO ₂)	35.2	40.0	44.0	46.0	49.5

工的所用能量范围内,工件的法向去除速率约与入射离子能量平方根成正比,与理论模型式(6)一致。不建议在工艺实验中通过提高入射束能提高去除效率,如此会恶化加工中的热效应^[6]。

3.2.3 与角度的关系

以微晶、石英和 K4 玻璃的小尺度样件为样本进行实验,通过测量法向去除深度,分析了法向去除速率、溅射产额等去除效率指标与入射角度的关系。

图 4 给出了法向去除速率相对于垂直入射时的归一化曲线。微晶玻璃在 3 种能量下的曲线几乎重合,入射能量对法向去除速率与入射角度之间的关系的影响可忽略,与式(4)的理论分析以及文献[6]分析一致。实验表明,入射角度对微晶玻璃和石英玻璃的影响要强于 K4 玻璃。在同一束流的作用下,倾斜约 50°入射时得最大去除速率;在垂直入射时,角度的偏差对去除速率影响最小。

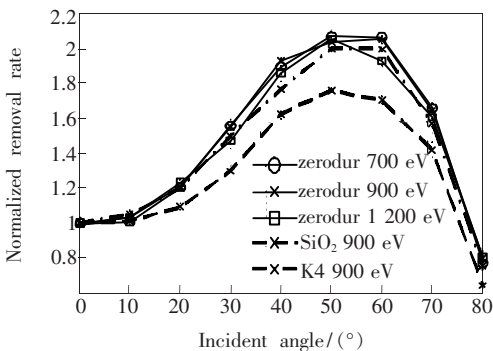


图 4 法向去除速率与入射角度关系曲线

Fig.4 Relation between normal removal rates and incident angles

据式(6),将法向各角度下的去除速率除以入射倾角的余弦,并相对于垂直入射时的情形进行归一化,再利用式(6)进行拟合分析,得到了如图 5

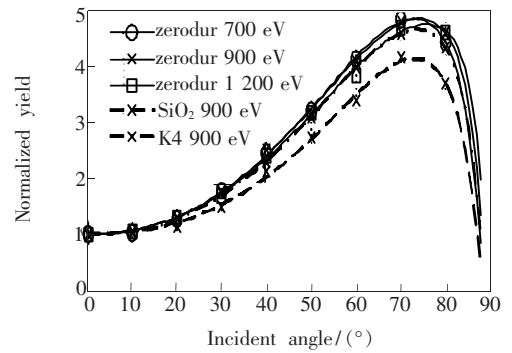


图 5 归一化溅射产额与入射角度关系曲线

Fig.5 Relation between normalized yields and incident angles

所示的溅射产额随入射角度变化的归一化曲线。

入射角度造成入射束流法向分量变化,与法向去除速率不同,入射角度大约为 75°时溅射产额最大,此时单个入射离子溅射出的工件原子数最多。

工艺实验中,若需高的材料去除效率可以采用大倾角入射;但如果需要抑制入射倾角的扰动对材料去除效率的影响,建议采用垂直入射的方式。

3.3 材料间相对去除效率

离子束修形加工中,首先必须在与待加工工件的同种、同批次的材料的样件上做出去除函数,然后依据待加工工件的面形误差和此去除函数,计算加工所需的驻留时间。但在实际工艺中可能不能够提供满足要求的样件。式(4)指出,去除函数的形状与束流密度的分布一致,与材料不相关,仅去除效率存在差异。任意一种材料的去除效率皆与入射束流成正比,故材料间的相对去除效率与束流没有关系。

3.3.1 与束能的关系

以微晶、石英和 K4 玻璃的小尺度样件为样本,离子束垂直入射进行实验,通过测量法向去除深度,分析相对去除效率与束能的关系。

图 6 表明 3 种材料间的相对去除效率皆随能量增大而略微减小。式(6)表明材料 m 值的微小差异造成相对去除效率随能量微变的效应。图 7 表明,对于样本的 3 种材料有 $m_{\text{zerodur}} > m_{\text{K4}} > m_{\text{SiO}_2}$ 。相对去除效率的能量效应较小,在工艺中可以忽略。

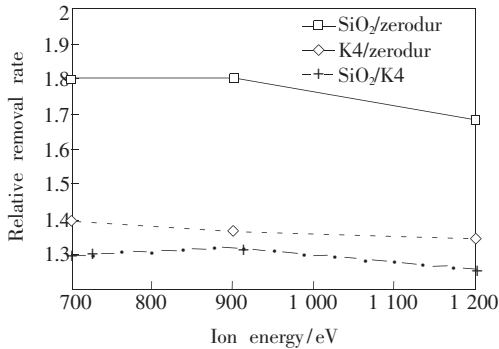


图6 材料相对去除效率与离子能量关系

Fig 6 Relation between the relative removal rate and ion energy

3.3.2 与角度的关系

此实验方法与束能效应的实验方法一致。式

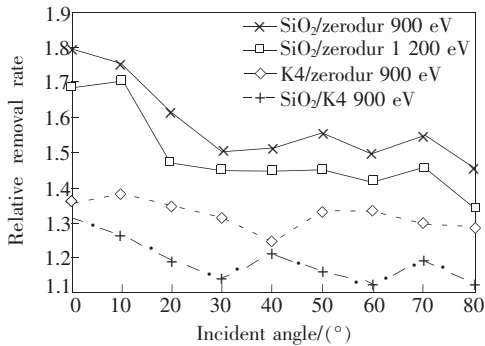


图7 材料相对去除效率与入射角度关系

Fig 7 Relation between relative removal rate and incident angle

(6)指出,材料随入射角度的不同变化趋势引入了相对去除效率与角度的关系。图7表明,在不同的能量下,同一对材料间的相对去除效率的变化趋势基本一致,与式(6)的理论分析一致;但相对去除效率的角度效应较为明显,要进行高精度、高确定性的修形实验需要根据不同工艺参数测定出相对去除效率。

4 结 论

基于 Sigmund 溅射原理,建立了表征离子束加工材料去除效率指标的模型,并进行了实验验证,研究结果表明:

(1) 材料去除效率与束流成线性关系;与束能近似呈平方根关系;随角度先缓慢变大,约在60~80°达到最大,然后迅速减小至0。若需抑制角度偏差对去除效率的影响,则工艺中优选束流垂直入射工件。

(2) 在相同的工艺参数条件下,不同材料的法向去除速率归一化分布相同,与束流密度分布一致。

(3) 常用于离子束加工的材料间的相对去除效率与束流没有关系;与束能的关系较弱,可以忽略;与角度的关系比较明显,需要根据工艺参数具体确定。

参考文献:

- [1] 牛海燕,张学军. $\Phi 124$ 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):539-544.
NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\Phi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):539-544. (in Chinese)
- [2] LYNN N A, ROBERT E K. An ion figuring system for large optic fabrication [J]. *SPIE*, 1989, 1168:33-50.
- [3] FLAMM D, SCHINDLER A, BERGER M. Ion beam milling of optically polished CaF₂ surfaces [J]. *SPIE*, 2003, 5180:81-88.
- [4] BEHRISCH R. *Sputtering by Particle Bombardment I* [M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [5] MAXIM A M, RODOLFO C, ALBERT-LÁSZLÓ B. Morphology of ion-sputtered surfaces [J]. *NIM B*, 2002, 197: 185-227.
- [6] 焦长君,李圣怡,王登峰,等. 离子束加工光学镜面的材料去除特性[J]. 光学精密工程,2007,15(10):1520-1526.
JIAO CH J, LI SH Y, WANG D F, et al.. Material removal property in ion figuring process for optical components [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1520-1526. (in Chinese)
- [7] JIAO CH, XIE X H, LI SH Y, et al.. Design of ion beam figuring machine for optics mirrors [C]. Asia Pacific Precision Engineer for Optics Manufacture 2007, HongKong, Janua, 2007:13-17.

- [8] 刘金声. 离子束沉积薄膜技术应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
LIU J SH. *Ion Beam Deposition Film Technic and Its Application* [M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2003.
- [9] 周林,戴一帆,解旭辉,等. 光学镜面离子束加工的可达性[J]. 光学精密工程,2007,15(2):160-166.
ZHOU L, DAI Y F, XIE X H, *et al.*. Machining reachability in ion beam figuring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):160-166. (in Chinese)

作者简介:焦长君(1979—),男,博士研究生,主要研究方向为精密工程。E-mail:kdj@vip.sina.com

李圣怡(1946—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为精密工程与机电系统,机电系统测控理论与技术。

E-mail:syli@nudt.edu.cn

● 下期预告

基于眼模型的数字眼底相机设计

王肇圻,许妍

(南开大学 现代光学研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

基于 Gullstrand-Le Grand 眼模型设计了一个视场角为 30° 免散瞳手持式的数字眼底相机,在综合考虑人眼本身和外部系统的像差后,实现了全视场 2×10^6 pixel 的高清晰眼底成像;引入眼模型辅助设计,解决了人眼自身的色差问题,从而适用于白光照明。同时,为避免角膜中心曲率大的区域反射引入杂散光,专门设计了环形光阑和共轴照明相结合的照明系统。结果表明,该相机系统成像分辨率 > 120 lp/mm,场曲值 < 0.86 mm,畸变仅为 7.2%,色差值 $< 3.5 \mu\text{m}$,并且具有较大的调焦能力,对 -10D 至 7D 屈光度人眼普遍适用。