

文章编号: 1001- 2486(2009) 06- 0084- 05

离子束加工误差对散射损失的影响研究*

吴冬良, 戴帆, 王贵林, 周林, 焦长君

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 离子束加工 (Ion Beam Figuring, IBF) 去除函数对加工残差具有重要的影响, 而加工残差引起的表面散射则导致光学性能发生变化。为了减小加工残差对光学性能的影响, 利用基于 CCOS 成形原理的离子束加工仿真程序对光学镜面进行修形, 分析不同去除函数宽度对散射损失 (Ratio of Scattering Loss, RSL) 指标的影响。通过研究可知, 随着去除函数宽度的减小, 加工残差对散射损失的影响越来越小。因此, 根据加工残差对 RSL 指标的影响程度以及 RSL 指标要求, 可以合理选择去除函数宽度, 从而在满足面形精度的同时, 优化加工工艺。

关键词: 去除函数; 加工残差; 散射损失比; 离子束加工; CCOS

中图分类号: TH161. 14; TH162. 1 文献标识码: A

Influence of the Fabrication Error in IBF on the Scattering Loss

WU Dong liang, DAI Yi fan, WANG Gui lin, ZHOU Lin, JIAO Chang jun

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

Abstract: The removal function in ion beam figuring (IBF) exerts great influence on the fabrication residual error of optical surface, so that the performance of optical surface is changed because of the surface scattering induced by the fabrication residual error. In order to reduce the influence of the fabrication residual error on the optical performance, the IBF simulation procedure based on the computer controlled optical surfacing (CCOS) technique was used in surfacing the optical mirrors, and the influence of the removal function width on the ratio of scattering loss (RSL) was analyzed. It was shown that the influence of the fabrication residual error on the RSL declines with decrease of the removal function width. Thus the removal function width can be chosen reasonably according to the influence of the fabrication residual error on the RSL and the requirement of RSL index, and the processing technique can be optimized under the condition of satisfying the surface accuracy requirement of the optical mirrors.

Key words: removal function; fabrication residual error; ratio of scattering loss; ion beam figuring; CCOS

在强激光系统中, 通过扩束子系统和聚焦子系统将入射光束大部分能量聚焦到一个直径很小的焦斑内, 以实现强激光的高聚能要求^[1]。在这类高聚能系统中, 除了系统设计带来的误差影响外, 光学系统聚焦能力主要取决于所使用的光学元件加工误差^[1]。由于加工残差对激光束进行调制, 使得远场光强分布发生变化, 进而对散射损失比 (Ratio of Scattering Loss, RSL) 指标产生影响, 而 RSL 指标主要用于描述加工残差对散射表面传递函数的影响。在系统参数确定的情况下, 可建立光学加工残差 RMS 值与 RSL 指标之间的关系模型^[2]。

离子束加工^[3-6]利用离子溅射形成类高斯分布的去除函数, 其稳定性和重复性使工艺过程具有很高的确定性^[7-8]。离子束加工误差修正能力随去除函数宽度的减小而提高^[9], 使 PSD 曲线逐渐得到改善, 同时降低面形误差 RMS 值, 改善 RSL 指标。采用不同去除函数宽度可处理不同精度光学镜面的修形, 去除函数宽度的降低拓宽了频域误差修形范围, 提高了误差修形能力。因此, 分析离子束加工工艺中去除函数宽度的影响, 对于控制镜面面形精度、优化加工工艺具有重要的意义。

* 收稿日期: 2009- 05- 12

基金项目: 新世纪优秀人才计划项目 (NCET); 国家自然科学基金资助项目 (50775215)

作者简介: 吴冬良 (1978-), 男, 博士生。

1 离子束加工残差对散射损失的影响研究

由于离子束加工去除函数稳定性和重复性好^[8], 可用如下卷积方程来描述离子束修形过程

$$E'(x, y) = R(x, y) \circledast T(x, y) \quad (1)$$

其中, “ \circledast ”表示卷积, $E'(x, y)$ 表示去除误差, $T(x, y)$ 表示驻留时间, $R(x, y)$ 表示去除函数, 定义为离子束加工在单位时间内工件表面的材料去除量函数, 单位为 $\mu\text{m}/\text{min}$, 通常表示为

$$R(x, y) = A e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中, A 为峰值去除速率, σ 为高斯函数分布参数, $d = 6\sigma$, 为去除函数宽度。

利用检测设备获得面形误差 $E(x, y)$, 通过实验得到去除函数 $R(x, y)$, 如图 1 所示, 最后采用迭代法解卷积方程 (1) 得到驻留时间 $T'(x, y)$, 从而加工残差 $\Delta E(x, y)$ 可表示为

$$\Delta E(x, y) = E(x, y) - R(x, y) \circledast T'(x, y) \quad (3)$$

由于加工残差对激光束的散射影响, 针对具有随机、各态历经的且服从高斯分布特征的光学表面, 根据 Goodman 统计光学理论^[10]可知, 屏的平均 OTF 还可表示为

$$H_s(vu, vv) = \exp\left\{-\sigma_\phi^2 \left[1 - \gamma_\phi(\mathcal{X}v_u, \mathcal{X}v_v)\right]\right\} \quad (4)$$

其中, γ_ϕ 为二维表面归一化自协方差函数, $\alpha_\phi = \frac{4\pi}{\lambda}$

• $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta E_i - \overline{\Delta E})^2 / (N-1)}$ 为表面高度分布相位方差, $\overline{\Delta E}$ 为残差 ΔE 的均值。

根据文献[10]可知, $H_s(vu, vv)$ 可看作是常数部分和钟形部分之和, 从而可将式(4)表示为

$$H_s(vu, vv) = \exp\left[-\sigma_\phi^2\right] + \exp\left[-\sigma_\phi^2\right] \left\{ \exp\left[\sigma_\phi^2 \gamma_\phi(\mathcal{X}v_u, \mathcal{X}v_v)\right] - 1 \right\} \quad (5)$$

因此可以认为式(5)中的第一项为镜面反射分量, 而第二项为散射分量。由于角扩散函数和表面自相关函数互为傅立叶变换, 对第二项进行傅立叶变换即得面形误差角扩散函数为

$$S(\alpha, \beta; r) = \mathcal{R} \left\{ \exp\left[-\sigma_\phi^2\right] \left[\exp\left[\sigma_\phi^2 \gamma_\phi\right] - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

散射损失比 RSL 指标定义为半径 R 外的散射能量占总能量的百分比, 可表示为

$$RSL = \left[1 - \exp\left[-\sigma_\phi^2\right]\right] \cdot \frac{\int_R^\infty \int_0^{2\pi} S(\alpha, \beta; r) r dr d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(\alpha, \beta; r) r dr d\theta} \quad (7)$$

由式(7)可知, RSL 指标能够用来描述加工残差对表面散射传递函数的影响程度, 从而可以用来控制加工残差所需满足的条件, 进而得到优化的去除函数宽度。针对高斯型光学加工误差, 其自相关函数亦为高斯型, 此时 N 阶近似角扩散函数以及对应的散射损失比 RSL 分别表示为

$$S(\alpha, \beta; r) = \sum_{n=1}^N \frac{\pi l_a^2 \exp(-\sigma_\phi^2) \sigma_\phi^{2n}}{n \cdot n!} \exp\left[-\frac{\pi^2 r^2 l_a^2}{n \lambda^2 L^2}\right] \quad (8)$$

$$RSL = \left[1 - \exp\left[-\sigma_\phi^2\right]\right] \cdot \frac{\sum_{n=1}^N (A_n \cdot B_n)}{\sum_{n=1}^N A_n} \quad (9)$$

其中, l_a 为自相关函数的相关长度, $A_n = \frac{\sigma_\phi^{2n}}{n \cdot n!}$, $B_n = \exp\left[-\frac{\pi^2 R^2 l_a^2}{n \lambda^2 L^2}\right]$ 。

对式(9)进行微分得

$$dRSL = 2\sigma_\phi \exp\left[-\sigma_\phi^2\right] \cdot \left[\sum_{n=1}^N (A_n \cdot B_n) \setminus \sum_{n=1}^N A_n \right] \cdot d\sigma_\phi + 2l_a \left[1 - \exp\left[-\sigma_\phi^2\right]\right]$$

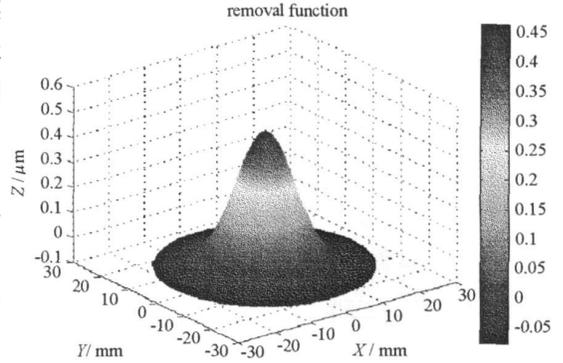


图 1 离子束加工去除函数

Fig. 1 Removal function on the IBF

$$\begin{aligned} & \cdot \left[\sum_{n=1}^N (A_n \cdot B_n) \setminus \sum_{n=1}^N A_n \right] \cdot dl_a + [1 - \exp(-\sigma_\phi^2)] \\ & \cdot \left[\sum_{n=1}^N (A'_n \cdot B_n) \setminus \sum_{n=1}^N A_n - \sum_{n=1}^N (A_n \cdot B_n) \setminus \sum_{n=1}^N A_n \cdot \sum_{n=1}^N A'_n \setminus \sum_{n=1}^N A_n \right] \cdot d\alpha_\phi \quad (10) \end{aligned}$$

从式(9)和式(10)可知,由于波长 λ 和距离 L 不变,因此影响 RSL 值的参数主要是加工残差 RMS 值 σ_ϕ 和相关长度 l_a 。在加工残差较小时, $\exp(-\sigma_\phi^2) \approx 1$, $[1 - \exp(-\sigma_\phi^2)] \approx 0$,且 l_a 变化非常小;而在加工残差较大时, σ_ϕ 变化相对 l_a 变化大得多。总的来说,误差 α_ϕ 值对 RSL 的影响更大。

2 加工残差频率成分对 PSD 和相关长度的影响分析

在进行 IBF 加工时,不同去除函数宽度对加工残差的影响是不同的。下面分析去除函数宽度对光学镜面修形能力以及 RSL 指标的影响,并根据 RSL 指标要求对去除函数宽度进行优化选取。

2.1 基于 PSD 曲线的仿真有效性分析

为了能够利用仿真加工代替实际加工分析去除函数宽度对 RSL 指标的影响,以 $\phi 200\text{mm}$ 微晶玻璃为例,分析95%区域在某去除函数宽度作用下对应的实际和仿真加工残差对 PSD 曲线的影响,其中加工步距为 1mm ,实际加工残差 $RMS = 0.017\lambda$,仿真加工残差 $RMS = 0.015\lambda$,结果如图2所示。其中,图2(c)中所标示的文字“Exp”表示实际加工残差,“Sim”表示仿真加工残差。

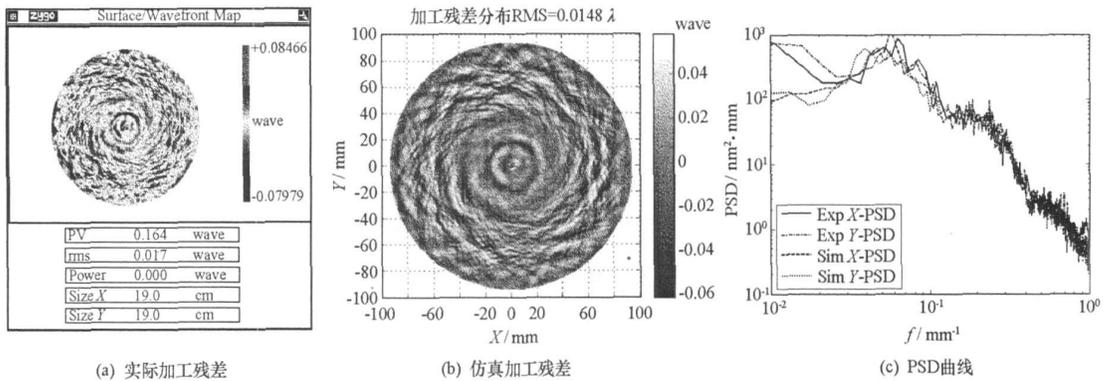


图2 加工残差和对应的 PSD 曲线

Fig. 2 Fabrication errors and PSD curve

从图2可以看出,实际加工残差分布与仿真加工残差分布具有一定的差异,不过差别不大,并且幅值有所不同,使得实际加工残差 RMS 值较仿真加工残差 RMS 值大些,这是因为实际加工过程中存在多方面的误差,如去除函数稳定性误差、测量误差(测量噪声、测量装置的平移和倾斜等引起的误差)等。从 PSD 曲线可以看出,实际加工残差与仿真加工残差对应的 PSD 曲线非常接近,不过有一定的差异,这主要是因为两者低频误差部分有所不同。

通过多组数据对比分析表明,实际加工残差与仿真加工残差分布相差较小,对 PSD 的影响相差也较小。因此,利用仿真加工残差可以分析去除函数宽度对 RSL 指标的影响。

2.2 加工残差频率成分对 PSD 和相关长度的影响分析

根据文献[3, 11]可知,利用仿真方法分析离子束去除函数宽度的影响是可行的。因此,下面采用仿真方法分析某加工误差(0.032λ RMS)在不同去除函数宽度作用下仿真加工残差对 PSD 曲线和相关长度 l_a 的影响规律,分析结果如表1和图3所示。

表 1 加工残差对应的 RMS 值和自相关函数相关长度

Tab. 1 RMS and correlation length of the autocorrelation function with the residual errors

去除函数宽度(mm)	80	70	60	50	40	30	20	10
误差均方根(RMS)	0.0172 λ	0.0170 λ	0.0167 λ	0.0161 λ	0.0148 λ	0.0123 λ	0.0094 λ	0.0065 λ
相关长度(mm)	108.627	108.533	108.420	108.306	108.284	108.285	108.321	108.323

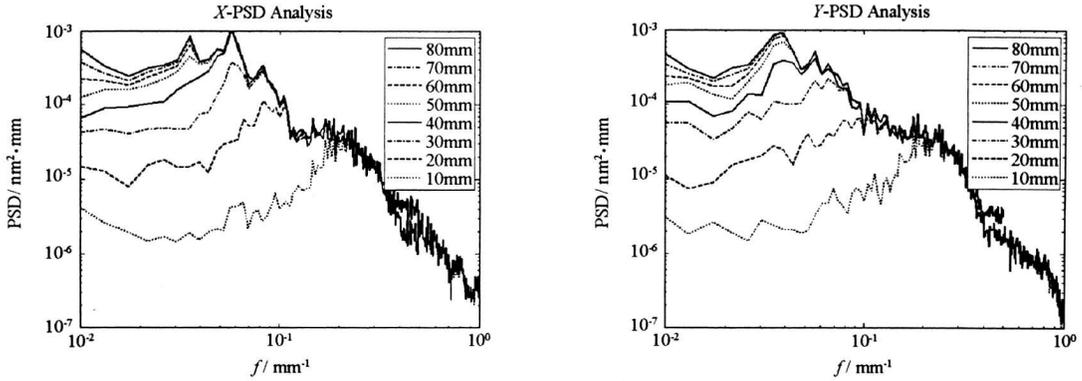


图 3 不同去除函数宽度对应的加工残差 X、Y 向 PSD 曲线

Fig. 3 PSD curve vs. simulation residual error

从表 1 和图 3 可以看出, 当去除函数宽度处于 50~80mm 时, 加工步距为 1.0mm。因去除函数宽度的不同而引起的各频段误差的修正体现在较低频段, 且可加工频段随去除函数宽度的减小而提高, 不过差别不大, 而其余频段则基本重合, 同时相关长度逐渐变小; 在去除函数宽度处于 10~40mm 时, 加工步距为 0.5mm。此时可明显看出, 随去除函数宽度的减小, 光学镜面修形效果越来越明显, 且可加工频段越来越宽, 同时相关长度逐渐增大。总的来说, 随着去除函数宽度的减小, 光学加工修形效果越来越明显, 可修形的频段范围越来越宽, 从而使得加工残差变化部分随去除函数宽度的减小而逐渐向更高频段扩展。由于加工残差幅值很小, 使得相关长度几乎没有变化, 从而相关长度的微小变化对 RSL 的影响很小。因此, 当加工残差较小时, 相关长度的影响可忽略不计。

3 离子束加工去除函数对 RSL 的影响分析

在进行离子束修形加工时, 不同去除函数宽度对加工残差的影响不同。下面分析去除函数宽度对光学镜面修形能力以及 RSL 指标的影响, 并根据 RSL 指标要求得到优化的去除函数宽度。

为了研究不同去除函数宽度对 RSL 指标的影响程度, 采用总积分散射损失 (Total Integrated Scattering, TIS)^[12] 来描述。针对加工残差对 RSL 指标的影响, 以加工残差引起的总散射损失达到 3% (系统不同, 要求不同) 为限来判断加工残差是否满足光学性能要求, 进而得到优化的去除函数宽度。即当 $TIS(RSL_{max}) \leq 3\%$ 时, 认为加工残差满足 RSL 指标要求, 否则不满足。

首先通过仿真分析光学镜面在不同去除函数宽度作用下加工残差对 RSL 指标的影响, 此时加工步距分别为 0.5mm 和 1.0mm, 去除函数宽度分别为 10~40mm 和 50~80mm, 相应的分析结果如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可以看出, 随着去除函数宽度的减小, 相应的 RSL 曲线逐渐下降, RSL 指标得到改善。由于离子束加工后对应的加工残差比较小, 从而加工残差对 RSL 指标的影响也很小。为了直观地表示这种变化, 采用图示方式进行描述, 结果如图 4(b) 所示。从图 4(b) 可以看出, 随着去除函数宽度的增大, 相应的 TIS 值随之增大。当去除函数宽度小于 25mm 时, 加工残差对 TIS 指标的影响小于 2%; 当去除函数宽度小于 35mm 时, 加工残差对 RSL 指标的影响小于 3%。

其次分析某椭圆 SiC 镜 (长宽为 90mm × 40mm) 实际加工过程中 $\Phi 40\text{mm}$ 区域在不同去除函数宽度作用下对应的加工残差对 RSL 指标的影响, 相应的分析结果如图 5 所示。其中第一次加工去除函数宽度为 30.3mm, 第二次加工去除函数宽度为 24.7mm。从图 5 可知, 随着去除函数宽度的减小, 相应的 RSL 曲线明显逐渐下降, RSL 指标得到改善。因此, 结合仿真加工分析结果, 可以根据 TIS 指标变化趋势判

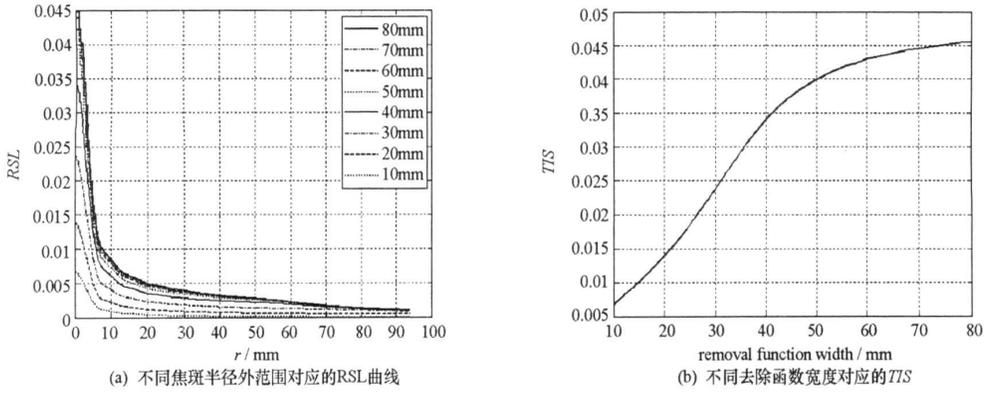


图4 RSL 曲线

Fig.4 RSL curve

定不同去除函数宽度的修形能力, 进而根据 TIS 指标要求, 合理选择去除函数宽度, 优化加工工艺。

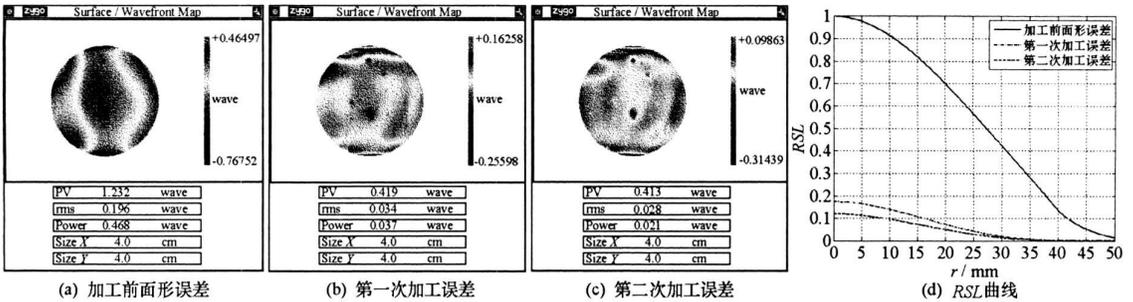


图5 加工残差和 RSL 曲线

Fig.5 Fabrication errors and RSL curve

4 结论

随着离子束加工去除函数宽度减小, 加工精度随之提高, 同时散射损失比(RSL)也随之减小。根据去除函数宽度对 RSL 指标的影响以及去除函数选取原则, 针对不同散射损失指标要求, 用于指导离子束加工去除函数宽度的优化选取, 对控制光学镜面面形精度、优化加工工艺具有重要意义。

参考文献:

[1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[2] Wu D L, Dai Y F, Wang G L. Influence of Optical Surface Error on Scattering Loss of Optical Mirror[C]//SPIE, 2009,7281, 728106.

[3] 戴一帆, 周林, 解旭辉, 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): 1131- 1135.

[4] 周林, 戴一帆, 解旭辉, 等. 计算机控制抛光中基于等面积增长螺旋线的加工路径[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 1- 4.

[5] 解旭辉, 周林, 古文华. 应用细小离子束加工小型精密光学零件[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 10- 14.

[6] Haensel T, Seidel P, Nickel A, et al. Deterministic Ion Beam Figuring of Surface Errors in the Submillimeter Spatial Wavelength Range[C]//EUSPEN, Baden, Vienna, Austria, 2006.

[7] Ghigo M, et al. Perspectives of Ion Beam Polishing of Mandrels for X-ray Replication Optics[C]//SPIE, 1995: 55- 63.

[8] 焦长君. 光学镜面离子束加工材料去除机理与基本工艺研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.

[9] Allen L N, Keim R E. An Ion Figuring System for Large Optic Fabrication. In Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics [C]//SPIE, 1989: 33- 50.

[10] Goodman J W. Statistical Optics[M]. A Wiley Interscience Publication, 1985.

[11] Zhou L, Dai Y F, Xie X H, et al. Analysis of Correcting Ability of Ion Beam Figuring[C]//Key Engineering Materials, 2008, 364: 470- 475.

[12] Harvey J E, Kotha A. Scattering Effects from Optical Fabrication errors[C]//SPIE, 1995,2576: 155- 174.