

# 同步辐射超光滑 X 光学元件的加工 工艺及检测技术的研究

程曙初

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

**摘要** 综述了该领域的研究现状, 发展水平, 以及同步辐射光学元件的特点; 对超光滑表面的加工工艺及检测技术进行了归纳总结; 详细阐述了本人所承担的中国科学院高能物理所同步辐射光束线的关键部件—超环面反射镜的加工与检测的研究。用户反馈的信息表明其性能优于美国生产的同类产品, 标志着在该领域, 我们已接近或达到国外先进水平。

**关键词:** 同步辐射; 超光滑表面; 超环面

## 1 引言

### 1.1 同步辐射光束线中超光滑表面光学元件的特点

- (1) 光学系统绝大部分为反射系统;
- (2) 光学元件表面要求粗糙度很低, 一般为  $0.5\text{nm} \sim 5\text{nm}$ ;
- (3) 光学元件的面型多种多样: 面型有平面、大半径球面、柱面、抛物面、椭球面、超环面等等, 这些都是由光束线空间特性所决定的;
- (4) 光学材料的选择: 要考虑到光束线能量高, 要求散热快, 膨胀系数小, 适合于超真空系统中工作等因素。

### 1.2 超光滑光学表面加工方法

- (1) 传统的研磨及沥青抛光法;
- (2) 水中抛光法;
- (3) 离子束抛光法;
- (4) 单点金刚石切削加工与金刚石微粉研磨抛光法;
- (5) 金属表面的流体化学抛光法;
- (6) 弹性发射材料加工法。

### 1.3 超光滑表面的检测技术

#### (1) 光学表面曲率半径的测量

在 X 射线光学和同步辐射光束线中用得比较多的是大曲率半径的球面。大曲率半径测量中用得较多的仪器 ZYGO 干涉仪。

##### a 差分法测大曲率半径

采用 ZYGO 干涉仪, 在它的参数平面和被测凹球面间形成一个供光束折回反射的空腔, 准直光束通过平面进入空腔, 折反射几次后, 聚焦于任一表面。设腔长为  $Z_n$ , 则通过测连续两腔长之差  $Z_{n-1} - Z_n$ , 就可求出半径  $R$ 。

用下式计算半径  $R$

$$R = \frac{1}{C_{n-1} - C_n} (Z_{n-1} - Z_n)$$

测量的精度决定于: 调整被测件时的离焦误差和测量  $Z_n$  的长度误差。

##### b 数牛顿环法测量大曲率半径

对于超大曲率半径的测量, 用 ZYGO 干涉仪常规测半径的方法, 由于受导轨行程限制是难以测量的。我们可以在 ZYGO 干涉仪上用平面参考镜代替球面镜, 用类似于测牛顿环的原理, 按以下公式计算半径值

$$R = r_m^2 / m\lambda$$

式中  $r$  为第  $m$  级干涉条纹图的半径,  $m$  为干涉级次,  $r$  与  $m$  值可由干涉监视器呈现的干涉图上获得, 代入上式, 可计算出  $R$ 。

#### (2) 光学表面面形的测量

##### a 用 ZYGO 干涉法测面形

对于球面和平面面形可以用 ZYGO 干涉仪进行非接触测, 其工作原理如下: 调整 ZYGO 干涉仪, 使参考光束经过标准球面镜后聚焦于被测透镜球面中心, 于是检测光束在被测球面反射后与参考光束相干, 形成干涉条纹, 由光电转换器件 (摄像机或 CCD 阵列) 接收并进行 A/D 转换, 把干涉图输入计算机, 测得被测件出瞳处各点的波面程差, 把各点测定值代入波面像差 Zernik 多项式。

##### b 用 LTP (Long Trace Surface Profiler) 测量面形。

该装置测量面形精度高, 可达  $\pm 2\text{nm}$ , 可以测量的长度范围大, 特别是对于同步辐射光学系统中常用的长条形光学元件, 如: 柱面、超环面镜等面形精度测量尤为方便, 这种仪器是用来测量同步辐射光学元件的斜度误差 (Slope error)。

#### (3) 超光滑表面粗糙度的检测

##### a 等色序干涉法测量超光滑光学表面粗糙度

被测件与参考镜均镀新鲜银膜, 平行安置且靠得很近。一束平行白光垂直照射于二块平板上, 在镀银表面之间多次反射, 形成等色序干涉条纹, 通过显微物镜使干涉条纹成像于摄谱仪的入口狭缝上, 由色散棱镜 (或光栅) 把干涉条纹展现在摄谱仪的出射焦平面上, 用目镜可以观测到条纹。它是明亮背景上的黑条纹, 条纹形状有如高频噪声示波图的毛刺一样, 此曲折的干涉条纹就是等色序条纹, 它表示了被测面与参考镜的表面粗糙度信息。

##### b 用 WYKO 面型仪测量光学表面粗糙度

它是应用相移干涉技术 (PSI) 原理来测量表面粗糙度的数理统计特性。利用压电陶瓷传

传感器进行扫描，用 CCD 面阵作接收器，通过接口电路由 HP9816 计算机进行数据处理，最后打印机打印出所需的各种数据。这种仪器软件先进，功能齐全，测量精度可达 0.1nm。

### 1.4 几个超光滑光学元件的加工与检测的实例

#### (1) 熔石英球面相位光栅基体的加工与检测

该零件是为北京正负电子对撞机 (BEPC) 同步辐射光束线 4B9BN 研制的，用于光束线中的 X 光球面光栅单色仪。零件光学表面尺寸：105mm×35mm，球面半径及误差： $R57.304m \pm 1\%$ ，面形精度为  $\lambda/100RMS$ ，表面粗糙度为 0.5nmRMS。基体材料为熔石英。加工后粗糙度在 WYKO 上测量的结果为：粗糙度在 0.2~0.6nmRMS 范围，面形在 ZYKO 上测量的结果为：P-V 值为  $0.075\lambda$ ；RMS 值为  $0.014\lambda$ ，基本全部达到设计要求。

#### (2) 掠入射 X 射线光刻金属柱面扫描镜

3B1 光束线用于同步辐射软 X 射线光刻实验站，工作波长 0.4~2nm 为使同步辐射光源在垂直方向上照度分布均匀和使能量集中，使用了掠入射柱面反射镜，镜面尺寸 240mm×100mm，柱面半径  $R 572.5mm$ ，材料为经过稳定化处理的铝合金 (牌号 LD<sub>2</sub>)。加工完成后最终在 ZYGO 干涉仪上测量，实测结果：面形精度  $\lambda/5$  斜度误差为 8.3"。表面粗糙度用 WYKO 面型仪测量，均方根粗糙度为 0.534nm，所有数据均达到设计要求。

(3) 合肥国家同步辐射实验室 (HESYRL) 的光电子能谱实验光束线球面反射镜的加工与检测。

反射镜材料选用国内生产的零膨胀系数玻璃 (zerodur)，牌号为 V<sub>02</sub>。五块反射镜面尺寸 310mm×60mm，半径分别为 89050mm (4 块) 和 51180 (1 块)。

最终检测结果：面形精度优于  $\lambda/10$ ，表面粗糙度优于 1nmRMS。

## 2 超光滑超环面镜的加工工艺

### 2.1 4B9B 光束线光学系统设计简述及超环面镜的作用

图 1 为 4B9B 光束线光学系统图，这是北京正负电子对撞机 (BEPC) 中的同步辐射光束线中光学系统最复杂的一条，它是从 BEPC 贮存环 4 区 B9 弯转磁铁引出的一束同步辐射光。经过超环面镜 M<sub>1</sub> 反射聚焦于球面光栅单色仪 (SGM) 的入口狭缝 S<sub>1</sub>，使其单色化，然后经出射狭缝 S<sub>2</sub> 和真空紫外反射镜 M<sub>2</sub>，狭缝 3 进入离光源 24750nm 的光电子谱仪实验站，为实验站提供软 X 射线及真空紫外光源。

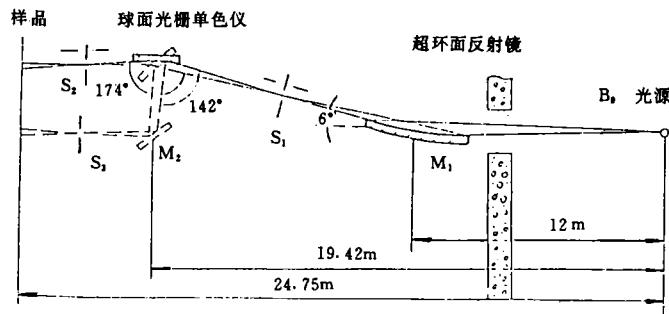


图 1 北京正负电子对撞机 4B9B 光束线光学系统示意图

超环面反射镜  $M_1$  位于距同步辐射光源 11900mm 处, 光束线沿镜面成  $3^\circ$  掠入射角, 水平接收角与垂直接收角分别为  $4.5\text{mrad}$  与  $1\text{mrad}$ 。由于同步辐射光源在子午面半径与弧矢面内有不同大小的发散角, 所以采用不同大小子午面半径与弧矢面半径的超环面作为光束线的前聚焦镜, 并实现子午面与弧矢面的聚焦, 子午面成像于  $S_1$  处, 像距为  $6025\text{mm}$ , 弧矢面像距为  $13155\text{mm}$ 。

### 2.2 超环面反射镜的技术要求

材料: 熔石英, 镜面尺寸:  $230\text{mm} \times 60\text{mm}$ 。子午面内曲率半径  $152860\text{mm}$ ; 弧矢面内曲率半径  $654\text{mm}$ , 零件图如图 2 所示。

- (1) 表面粗糙度优于  $1\text{nmRMS}$ ;
- (2) 面形精度按使用工作状态成像检验, 在子午焦面  $S_1$  处, 加工误差引起的像差为  $0.1\text{mm}$ , 在弧矢焦面内允许像差为  $0.5\text{mm}$ ;
- (3) 表面镀金, 镀层厚度  $100\text{nm}$ 。

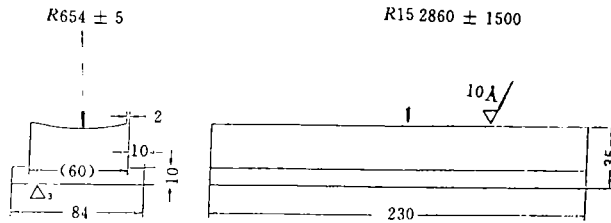


图 2 超环面反射镜光学元件

### 2.3 超环面反射镜加工机床简介

我们是在一台专门设计与改装的“多功能非球面光学加工机床”上完成超环面镜的加工。

图 3 为机床机构原理图。2 为被加工的零件及夹具; 3 是抛光工具; 4 是摆架; 5 和 6 分别为横向 ( $y$ ) 与纵向摆动 ( $x$ ) 机构, 由微机控制床身的纵向运动 ( $x$ ) 的行程与停留时间, 以及工具 3 的纵向摆动 ( $x$ ) 来加工出  $R152860\text{mm}$  的子午面半径, 同时控制镜面四角的等厚差, 以保证母线的平行性, 和面形的倾斜性误差 (Slope error)

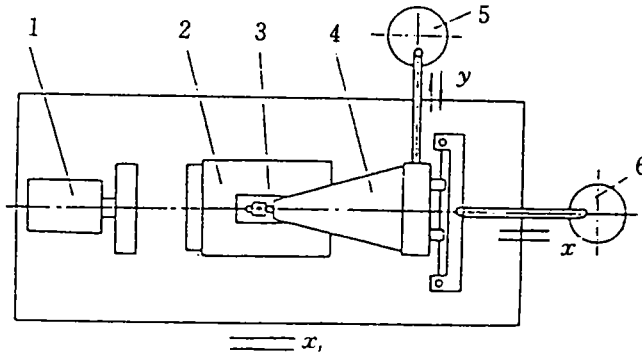


图 3 超环面反射镜加工机示意图

### 2.4 超环面加工流程及工艺

主要工序有:

- (1) 切割;
- (2) 粗磨;
- (3) 磨台阶: 在万能工具磨床上加工出零件二侧的台阶 (参阅图 2) 并保证宽  $60\text{mm}$  镜面二侧面与底部宽  $80\text{mm}$  的侧面平行度小于  $0.01\text{mm}$ 。
- (4) 拼盘: 对于长条形光学零件的加工通常均采用加垫块拼盘的方法, 可以保证零件本

身不塌边，并且可以提高被加工件的面形精度；

(5) 粗磨柱面；

(6) 精磨柱面；

(7) 超环面成形：用一个长度为 240mm 的长条状柱面磨具与被加工的镜盘对磨控制纵向摆架的运动 (x)，可以用单板机实现微机控制，控制磨盘沿镜盘长度方向不同位置的摆架速度、停留时间、压力大小，使镜面沿子午面内不同位置的磨削量不同，加工过程中不断地用“矢高测量仪”测量不同位置矢高，以逐步形成超环面；

(8) 超环面的抛光：抛光盘为硬度合适的沥青胶盘，先用长条状的胶盘，用加工样板时的工具盘压制胶盘，为提高抛光效率，抛光模采用网状结构，摆架沿纵向摆动，横向摆架不工作，加工过程中不停地用凸样板检验超环面面形，观察干涉条纹形状。由于只有单方向纵向的摆动，不能均匀磨削，存在明显的纵向加工纹路，精修面形时，改用小方块胶盘，同时作纵向 (x) 与横向 (y) 摆动，逐段修磨面形，最终在用样板检测时出现有规则的干涉条纹，并且条纹为直线状，才初步符合设计要求；

(9) 超光滑抛光：这是保持面形精度不变提高表面光洁度的工艺过程。选用较软的胶盘，用分选后的粒度很细的抛光剂（氧化铁—氧化铈）通过长时间的抛光，抛光剂自粉碎进一步细化，粒度更为均匀，抛光液的浓度较低，抛光压力应尽可能小，在抛光最后阶段往抛光液中加入蒸馏水，进一步降低浓度，最终在清水中抛光 15 分钟左右，可用 He-Ne 激光器照射表面，观察其散射情况，凭加工者的经验可以判断粗糙度程度，接近设计要求时可取下小垫块用 Talystep 仪器检测，达到要求，即可停止抛光；

(10) 综合检测面形与半径加工误差；

(11) 镀膜。

## 2.5 超环面加工工艺小结

(1) 超环面是一种非对称的特种非球面镜。我们采用的加工工艺方法，实际上是机械化的手修加工，即用较为现代化的机床加上老师付的手修经验结合进行，既保证了面形精度，又可达超光滑表面粗糙度。

(2) 超光滑抛光工艺几个重要因素。

a 对加工环境的要求：通常应当在封闭的超清洁环境中进行，保持加工间的温度恒定， $20^{\circ}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；

b 抛光磨料及分选方法；

c 抛光模的制作：抛光模的软硬程度是抛光工艺的关键问题之一；

d 其他工艺参数的选择。

## 3 超光滑超环面反射镜的检测技术

### 3.1 超环面曲率半径的测量方法及精度分析

#### 3.1.1 常规加工过程中的检测

超环面子午面和弧矢面有两个大小不同的半径，子午面半径 152.860m，弧矢面半径 654mm。对于弧矢面半径的测量，我们采用常用的球面标准样板，即用半径在超环面反射镜上的不同位置进行接触测量，观察不同位置的干涉条纹，使之达到大约在一个光圈。

对于子午面曲率半径的测量,我们采用自制的矢高测量仪。测量半径的基本公式:

$$R = r^2/2h \quad (3)$$

$r$ : 两支脚钢球球心间总长的一半。 $h$ : 矢高

### 3.1.2 超光滑加工过程中及最后的曲率半径的检测

#### a 成像法测量的基本原理

该超环面反射镜应用于同步辐射光束线,它的成像属轴外成像。几何成像关系如下:

$$\frac{1}{W_1} + \frac{1}{X_1} = \frac{2}{R_1 \cos I} \quad (4)$$

$$\frac{1}{W_2} + \frac{1}{X_2} = \frac{2 \cos I}{R_2} \quad (5)$$

$W_1, W_2$ : 分别为子午面和弧矢面的物距,此处它们数值相等。 $X_1, X_2$ : 分别为物体经超环面成像后对应的子午面和弧矢面的像距。

$R_1, R_2$ : 分别为子午面和弧矢面的曲率半径。

$I$ : 为入射角。

由此可知,只要能测出物距、子午面和弧矢面的象距,以及光线的入射角,根据公式(4)和(5),我们就能计算出子午面和弧矢面两曲率半径。

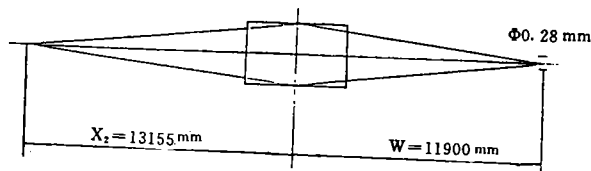
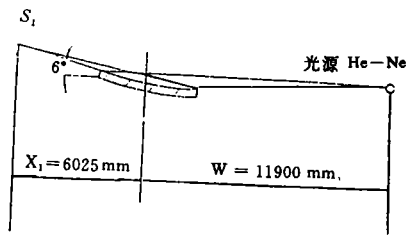


图4 检验超环面装置的光学原理图

#### b 测量的基本装置

图4是成像实验装置光学原理图, $S_1$ 是子午面的像的接收位置, $S_2$ 是弧矢面的接收位置。光源是一个用He-Ne照明的 $\phi 0.28\text{mm}$ 的光阑孔。

#### c 测量结果及精度分析

首先对式(4)和(5)进行全微分,并取绝对值:

$$\Delta R_1 = \frac{2W_1 X_1 \sin I}{(W_1 + X_1) \cos^2 I} |\Delta I| + \frac{2X_1^2}{\cos I (X_1 + W_1)^2} |\Delta W_1| + \frac{2W_1^2}{\cos I (X_1 + W_1)^2} |\Delta X| \quad (6)$$

$$\Delta R_2 = \frac{2W_2 X_2 \sin I}{W_2 + X_2} |\Delta I| + \frac{\cos I X_2^2}{(W_2 + X_2)^2} |\Delta W_2| + \frac{2 \cos I W_2^2}{(W_2 + X_2)^2} |\Delta X_2| \quad (7)$$

从上面两式,可以看出子午面和弧矢面两曲率半径的测量精度与各自的物距、象距以及入射角的测量精度有关。

(a) 入射角的测量误差对曲率半径测量精度的影响。只考虑 $\Delta I$ ,

$$\Delta R_1 = \frac{2W_1 X_1 \sin I}{(W_1 + X_1) \cos^2 I} \Delta I \quad (8)$$

$$\Delta R_2 = \frac{2W_2 X_2 \sin I}{(W_2 + X_2)} \Delta I \quad (9)$$

通过理论计算的结果可以看出,入射角的测量精度对子午面曲率半径的测量精度影响很大。我

们采用的方法是自准法测角度，用这种方法测量角度，精度提高 2 倍。

为了减小测量过程中的偶然误差，我们选取了工作在掠入射角  $3^\circ$  附近的一个小区内不同的角度值分别测量出这些角度对应的子午面和弧矢面的物距，计算出子午面和弧矢面的曲率半径，然后，取其平均值。

(b) 焦深对半径测量精度的影响：

焦深的计算公式：

$$\Delta L = \lambda / \sin^2 \alpha \quad (10)$$

对于子午面：

$$\Delta L_1 = \frac{\lambda X_1^2}{(D_1 \sin \alpha)^2} \quad (11)$$

对于弧矢面：

$$\Delta L_2 = \frac{\lambda X_2^2}{D_2^2} \quad (12)$$

式中： $\lambda$ ：He-Ne 激光光源的波长

$X_1, X_2$ ：分别为子午象距和弧矢象距

$D_1, D_2$ ：分别为超环面反射镜的长和宽

$\alpha$ ：掠入射角

将理论设计值以及超环面反射镜的几何参数代入，计算出子午面和弧矢面的焦深：

$$\Delta L_1 = 114.725 \text{mm} \quad (13)$$

$$\Delta L_2 = 30.419 \text{mm} \quad (14)$$

我们采用了光电测量能量分布曲线的方法，减小焦深的影响。

### 3. 2 超环面反射镜面形精度的测量

(1) 常规抛光过程中的测量：

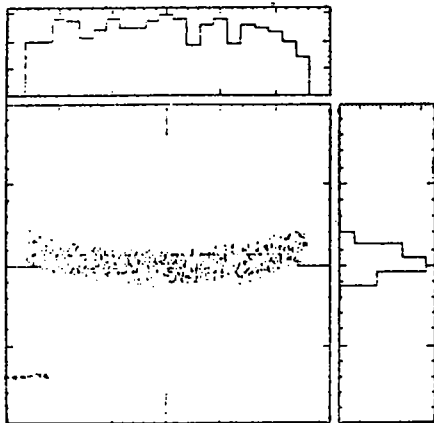


图 5 用 Shadow5 软件计算的子午焦面图像

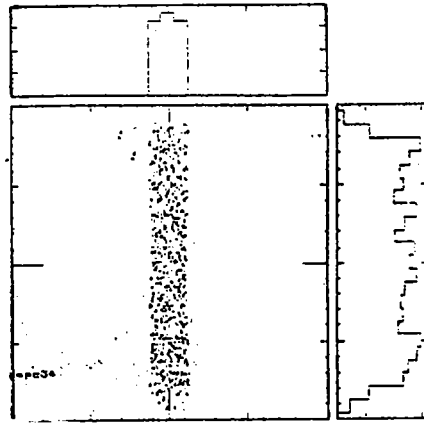


图 6 用软件 Shadow5 计算的弧矢焦面图像

常规抛光过程中面形精度测量最常用方法是样板法，为了检测超环面的面形精度，我们专门制作了一对超环面样板。在加工过程中，不断地用凸超环面样板进行测量，通过观察干

涉条纹, 得出面形精度。(2) 超光滑抛光过程中及最后的检测。

(a) 理论计算:

光源使用的是 He-Ne 激光, 光源尺寸  $\varphi 0.28$ , 使用软件 Shadow5 进行光线追踪, 由微机计算给出子午面的弧矢面上所成的象近似线状。图 5 是子午面成像的理论计算结果, 图 6 是弧矢面成像理论计算结果。子午面的线宽  $\Delta L_1 = 0.14\text{mm}$ , 弧矢面的线宽  $\Delta L_2 = 0.28\text{mm}$

b 测量方法及结果

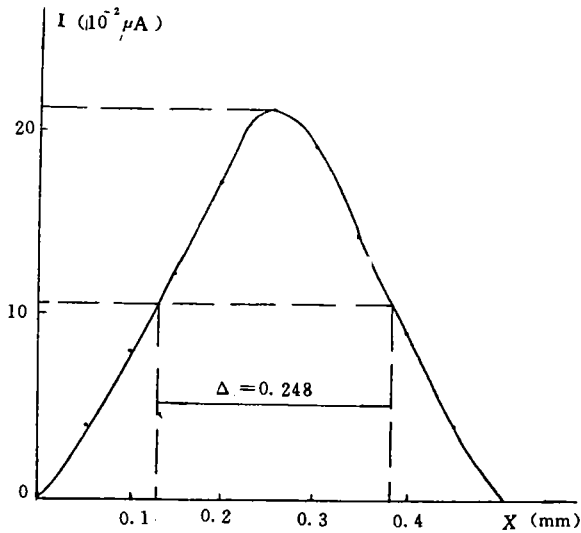


图 7 子午面 ( $X = 6250\lambda$  图像的能量分布曲线)

分布的  $I-X$ , 选择不同的像面位置, 同样可以作出不同焦面的  $I-X$  曲线, 取  $I/2$  对应的位置, 就可求出半宽度  $\Delta$ , 即成像光斑半宽度, 由图可以看出,  $\Delta$  最小的像面位置即焦面 ( $X_1 = 6250\text{mm}$ ,  $\Delta = 0.248\text{mm}$ )。光电测量法的灵敏度高, 能较为精确地确定焦面的位置, 以半宽度  $\Delta$  作为成像线宽也是比较合理与精确的。

c 衍射对线宽的影响

把衍射近似看成费琅和费衍射。

对于子午面:

$$D_t = D_1 \tan \alpha \quad (15)$$

$$\Delta L_t = \frac{M_t \lambda \cdot f_t}{D_1 \tan \alpha} \quad (16)$$

对于弧矢面:

$$\Delta L_s = \frac{M_s \lambda f_s}{D_2} \quad (17)$$

$M_t$ : 子午面象的放大倍率

$M_s$ : 弧矢面的放大倍率

$f_t, f_s$ : 分别为子午面、弧矢面的象距

理论计算表明, 子午面和弧矢面的成像都近似于线状, 如果面形精度很高, 焦面上的线状像就很细, 与理论值很接近。为了测量面形, 我们可以通过测量子午面的弧矢面的线宽来确定, 测量线宽的方法大致有三种:

(A) 读数显微镜法;

(B) 拍照法;

(C) 光电测量法。

在像面接收位置上放置扫描狭缝, 狭缝放置在  $X-Y-Z$  三维微动工作平台上, 且狭缝与线条平行, 令狭缝沿线条宽度方向 ( $X$ ) 进行扫描, 经光电倍增管转化成电信号, 由反射式检流计读出扫描狭缝对应各个位置光强的大小。根据测量结果可以画出光强

$\lambda$ : 激光光源的波长

$D_1, D_2$ : 分别为超环面的反射镜的长和宽

$\alpha$ : 掠入射角

计算得:

子午面线条的增宽:  $\Delta L_s = 0.14\text{mm}$

弧矢成线条的增宽:  $\Delta L_r = 0.15\text{mm}$

前述光学设计理论值加上衍射增宽后, 子午面线条的宽度为:  $L_s = 0.28, \text{mm}$  弧矢面线条的宽度为:  $L_r = 0.43\text{mm}$ , 与实测值较为接近。(见表 1)。

表 1 实测数据与理论数据比较

	子午面线宽 $\Delta$ (mm)	弧矢面线宽 $\Delta$ (mm)	子午面焦距 X (mm)	弧矢面焦距 X (mm)
理论计算值	0.28 (包括衍射)	0.43 (包括衍射)	6025	13155
显微镜与照相法	0.29	0.48	6170	13256
光电法	0.248		6250	

### 3.3 超环面反射镜表面粗糙度的检测

在超光滑抛光到一定阶段时, 用 He-Ne 激光照射零件表面, 用肉眼观察散射情况, 凭经验可以初步评估出粗糙度, 如果认为接近所要求的粗糙度时, 可从镜盘上取下一小块垫块, 小垫块是在同样的条件下与超环面反射镜一起加工的, 它可以代表超环面反射镜的粗糙度, 将小垫块放在 Taystep 上进行测量, 仪器将给出粗糙度的 P-V 值, 由此可以估算出粗糙度的 RMS 值, 测量的结果: 表面粗糙度值为  $20\text{\AA}$  (P-V 值) 相当于 RMS 值小于  $5\text{\AA}$ 。

## 4 小 结

我们研制的超环面反射镜现在已安置于中科院高能所同步辐射 4B9B 光束线上, 顺利地通过调试, 目前正处于正常的运行之中。我们研制的超环面反射镜同美国生产的同样尺寸的产品, 安装在 4B9B 光束线中, 在 BPEC 作对撞试验时给出的兼用光的实验条件下, 子午面的成像情况。从图像上看, 美国生产的超环面镜所成的象是纺锤形, 并且中间有黑线。我们研制的超环面反射镜子午面成像情况明显优于美国生产的。能量集中程度提高大约 3 倍。超环面反射镜的研制成功标志着我们的加工工艺和检测技术已经接近和达到了世界先进水平。

根据当前国内需要与国内研究现状及长远发展战略, 我认为关于我国超光滑光学表面的加工与检测这一新兴学科领域的研究方向, 大致有以下几个方面:

- (1) 进行超光滑加工机理的研究;
- (2) 超细磨料的分选和制备的研究;
- (3) 进行新的超精抛光方法的研究;
- (4) 超光滑表面非接触干涉测量方法的研究;
- (5) 各种软 X 射线光学元件的研制。

## Study on Fabrication and Testing of Supersmooth Soft X-Ray Optical Elements for Synchrotron Radiation

Cheng Shuchu

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun130021)*

### Abstract

The first part of the thesis gives a description in detail about the recent situation and development in this field, the character of the supersmooth X-ray/EUV optical elements for synchrotron radiation photoemission experiments, sums up the fabrication method and testing technology at present. The second part of this thesis describes the research which author has been engaged in on the fabrication and testing of the supersmooth toroidal mirror. According to the use of the toroidal mirror in beam line 4B9B at BEPC, We know that the main technology parameter of the toroidal mirror we produced is superior to that of the same product made in U. S. A.

**Key Words:** Synchrotron radiation, Supersmooth surface, Toroidal mirror