

文章编号 1004-924X(2007)03-0344-06

# 光学自由曲面反射镜模芯的镜面成型磨削

谢 晋, 阮兆武

(华南理工大学 机械工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**采用精密修锐修整的圆弧形粗金刚石砂轮在 CNC 精密磨床上进行了数控成型磨削加工, 实现了高效镜面磨削。分析金刚石砂轮圆弧形轮廓的成型修整原理, 建立了圆弧形修整的数控模式。通过建立曲面数控成型磨削的行走轨迹算法, 实现了自由曲面的圆弧包络成型磨削加工。分析了磨削工艺参数和砂轮出刃形貌参数与超光滑表面形成的作用机制, 进行了镜面磨削试验并检测表面微观形貌和粗糙度, 分析实现镜面磨削的脆/塑性磨削转换机理。理论分析表明, 降低砂轮行走速度, 提高砂轮转速以及改善出刃形貌可以获得纳米级粗糙度的超光滑磨削表面。试验结果显示, 先将砂轮修锐修整再控制砂轮行走速度小至 15 mm/min 时, 表面粗糙度小于 10 nm 以下, 且微观加工表面没有发生脆性破坏, 形成镜面。加工高速钢自由曲面时, 面形误差(PV 值)可以达到 10  $\mu\text{m}$  以下, 表面粗糙度  $R_a$  可以达到约 16 nm。实验结果表明: 利用数控技术和粗金刚石砂轮可以实现自由曲面模芯的高效镜面磨削加工, 保证了高精度的光学自由曲面反射镜注塑模芯。

**关键词:**反射镜模芯; 金刚石砂轮; 数控磨削; 表面粗糙度; 面形误差

**中图分类号:** TQ171.683; TG659 **文献标识码:** A

## Mirror form grinding of free-form surface of reflector mould core

XIE Jin, RUAN Zhao-wu

(School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to assure form accuracy and surface roughness of optic free-form surface of injection mould core, form grinding of free-form surface was conducted in CNC precision grinder by use of precisely dressed and trued arc-shaped coarse diamond grinding wheel to realize effective mirror grinding. The form truing principle of arc-shaped diamond grinding wheel was investigated to establish number control mode of arc-truing, and wheel path algorithm for equal-envelope-height grinding was established to realize CNC grinding of free-form surface. Then, formation of super-smooth ground surface was theoretically analyzed in connection with grinding parameters and wheel topography. The theoretical analysis shows that super-smooth ground surface of nanometer order can be produced by increasing wheel rotating speed, decreasing wheel moving speed and improving wheel topography. Experimental results show that surface roughness of  $R_a < 10$  nm may be obtained by use of dressed and trued wheel with wheel moving speed in less than 15 mm/min, and no brittle cracks on microscopic ground surface. The form accuracy of  $PV < 10 \mu\text{m}$  and the surface roughness of  $R_a < 20$  nm can be obtained when machining the free-form surface of high-speed steel.

**Key words:** reflector mould core; diamond grinding wheel; CNC grinding; surface roughness; form accuracy

收稿日期: 2007-01-22; 修订日期: 2007-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 50436010); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 广东省自然科学基金博士启动基金项目(No. 05300140)。

## 1 引言

光学自由曲面反射镜的精密注塑成型加工的市场需求正在急速增加,其中,成型模具模芯的加工精度决定产品的最终质量,所以,要求光学曲面模芯表面具有纳米镜面。在超精密机床上采用单点金刚石切削方法可实现光学曲面模芯的镜面成型加工<sup>[1,2]</sup>,但很难加工超硬模具材料。

金刚石砂轮磨削可以实现超硬模芯的精密加工,但实现镜面还需后续的低效、高成本的抛光<sup>[3-7]</sup>。为此,取代抛光的镜面磨削技术已经得到了广泛的研究<sup>[8-10]</sup>,其中,关键技术是对粒度为微米级及以下的金刚石砂轮进行修锐。ELID (Electrolytic in-process dressing) 技术可以有效地实现超硬材料的镜面磨削<sup>[9,10]</sup>,但其复杂的修锐修整装置会造成加工费高、效率低、实用难等问题。

因此,本文提出了在数控精密磨床上利用圆弧形粗金刚石砂轮对自由曲面模芯进行包络成型磨削试验的研究。首先,建立了等包络迹高度的数控成型磨削加工模式,然后,分析超光滑表面磨削的形成机理,通过精密修锐修整试验确定镜面磨削工艺参数,最后,实现自由曲面的镜面成型磨削。

## 2 圆弧形砂轮的数控成型修整

### 2.1 圆弧形砂轮的半径

图1为圆弧形金刚石砂轮成型修整原理图。金刚石砂轮绕着磨石进行半径为 $R_0$ 的圆弧差补运动,且与修整磨石对磨,逐渐形成各自的圆弧半径 $R$ 和 $r$ 。因为砂轮始终与修整轮保持相切,所以砂轮圆弧半径 $r$ 可计算为

$$r = \frac{b}{B+b} R_0, \quad (1)$$

式中  $b$ ——金刚石砂轮的宽度  
 $B$ ——修整磨石的宽度

### 2.2 成型修整试验

图2为圆弧形金刚石砂轮的成型修整工作图。表1为成型修整试验条件。修整后的圆弧形轮廓精度用石墨板复制进行检测。通过多次误差补偿,将砂轮的圆弧形轮廓的形状精度控制在 $10 \mu\text{m}$ 以下。

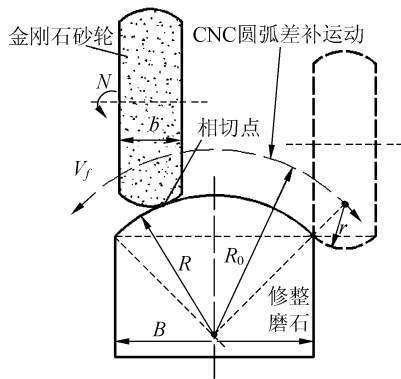


图1 圆弧形金刚石砂轮的成型修整原理图  
Fig. 1 Scheme of form truing of arc-shaped wheel

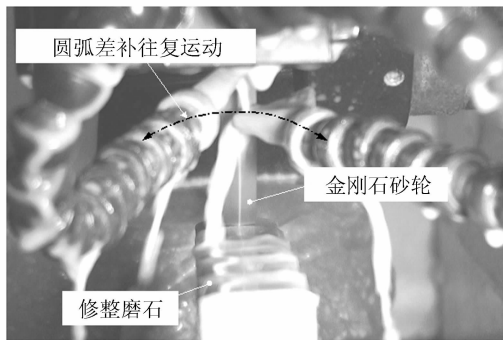


图2 圆弧形金刚石砂轮的成型修整工作图  
Fig. 2 Truing of arc-shaped diamond wheel

表1 修整试验条件

Tab. 1 Truing conditions

数控磨床	SMRART B818
砂轮	SDI180N75M, 宽 $b=10.0 \text{ mm}$
修整磨石	GC180, 陶瓷结合剂, 宽 $B=25.0 \text{ mm}$
修整方式	圆弧差补运动, 半径 $R_0=50.0 \text{ mm}$
修整参数	$N=1\ 500 \text{ r/min}$ $V_f=600 \text{ mm/min}$ , $a=0.3 \text{ mm}$ , $\Sigma a=4.0 \text{ mm}$
冷却液	BM 水溶性磨削液

## 3 等包络迹高度的包络成型磨削

### 3.1 砂轮的行走路径

图3为砂轮行走路径示意图。转速为 $N$ 的圆弧形砂轮在 $YZ$ 平面内以速度 $V_f$ 作曲线行走,行走路线间隔为 $\Delta x_i$ ,且保持砂轮圆环面与工件相切。当 $\Delta x_i$ 减小到一定程度,可以消除包络迹带来的面形误差,实现光滑曲面。

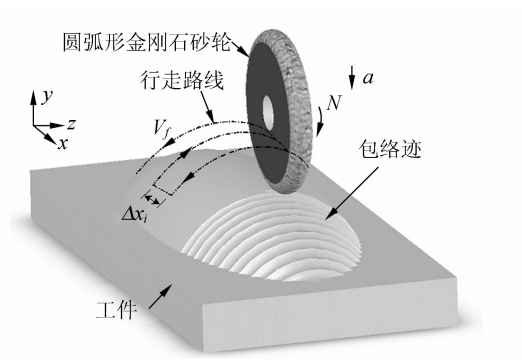


图 3 砂轮行走路径示意图

Fig. 3 Scheme of wheel moving path

### 3.2 等包络迹高度和行走路线间隔

自由曲面设计为椭圆面,其方程式设定为

$$\frac{x^2}{170^2} + \frac{y^2}{68^2} + \frac{z^2}{68^2} = 1, \quad (2)$$

因为 YZ 截面是圆,所以砂轮作圆弧插补运动。

图 4 为包络迹高度与移动间隔的几何示意。包络迹高度  $h_e$  定义为在通过椭圆长轴 XY 截面

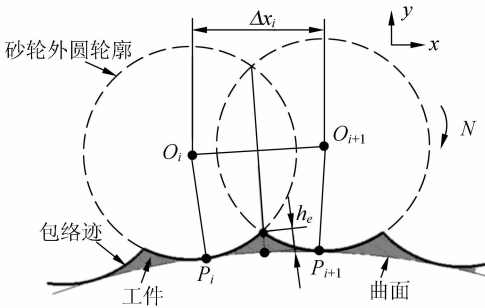


图 4 包络迹高度与移动间隔的几何示意图

Fig. 4 Geometrical scheme of equal-envelope height and tool-path spacing distance

上砂轮的外圆轮廓与曲面包络的痕迹高度。依据包络迹高度  $h_e$  设计  $\Delta x_i$ , 可以进行随曲率变化的自适应成型磨削。当砂轮从点  $O_i(x_{oi}, y_{oi})$  移动到  $O_{i+1}(x_{oi+1}, y_{oi+1})$  时, 砂轮与曲面的切点  $P_i$  也移动到  $P_{i+1}$ 。在椭圆面曲率较小情况下,  $\Delta x_i$  可近似计算为

$$\Delta x_i \approx 2b^2 x_{oi} \sqrt{\frac{(R)^2 - (R - h_e)^2}{b^4 x_{oi}^2 + a^4 y_{oi}^2}}, \quad (3)$$

## 4 镜面磨削原理

### 4.1 磨削表面的成型理论

图 5 为砂轮轴向的磨削表面粗糙轮廓几何示意图。磨削表面是由许多微小金刚石磨粒不断地切削形成的。当砂轮旋转 1 圈时, 单颗有效磨粒在工件上移动间隔  $f$  可计算为

$$f = \frac{V_f}{N}, \quad (4)$$

因此, 加工的粗糙轮廓的高度  $h_g$  可计算为

$$h_g = \frac{f}{2 \tan \frac{\theta}{2}}, \quad (5)$$

式中  $\theta$ ——磨粒出刃顶锥角

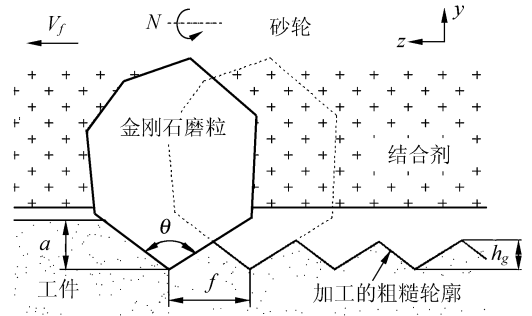


图 5 砂轮轴向的磨削表面粗糙轮廓几何示意图

Fig. 5 Geometrical scheme of wheel-axial-orientation rough profile on ground surface

### 4.2 磨削表面的理论粗糙度

假如只有一颗有效磨粒, 根据图 5 粗糙轮廓形成的几何关系, 粗糙度  $R_a$ , 可计算为

$$R_a' = \frac{h_g}{4}, \quad (6)$$

考虑到砂轮表面有  $n_g$  颗有效磨粒, 且利用公式(4)、(5)和(6), 理论粗糙度可计算为

$$R_a = \frac{V_f}{8 n_g N \tan \frac{\theta}{2}}, \quad (7)$$

图 6 为砂轮行走速度对理论粗糙度的影响。当  $V_f < 100$  mm/min 时,  $R_a$  可以达到 10 nm 以下。因此, 降低砂轮行走速度, 提高有效磨粒出刃数以及增加磨粒出刃顶角, 可以实现超光滑表面磨削。

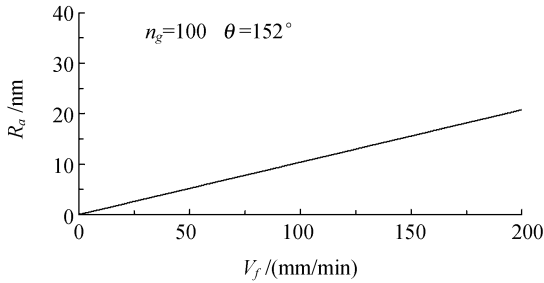


图6 砂轮行走速度对理论粗糙度的影响

Fig. 6 Effect of wheel-axial moving speed on ground surface roughness

## 5 镜面成型磨削试验

### 5.1 磨削

图7为自由曲面的成型磨削试验现场。在试验中,砂轮沿着砂轮切削方向行走,如图1所示。为了实现超平滑表面磨削,选择等包络迹高度 $h_e$ 为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。为了确定镜面磨削工艺参数,先进行平面磨削试验,然后进行曲面成型磨削试验。



图7 自由曲面的成型磨削试验现场

Fig. 7 Form grinding of free-form surface

采用 Talysurf series 2 检测形状精度和表面粗糙度,且用扫描电镜观测磨削表面的脆/塑性切除机理,分析镜面形成原理。然后,进行自由曲面的数控成型磨削试验。磨削试验条件如表2所示。

表2 磨削试验条件

Tab. 2 Grinding conditions

数控磨床	SMRART B818
砂轮	SD180N75M
砂轮几何尺寸	外径 $D=174.2\ \text{mm}$ , 宽 $b=10.0\ \text{mm}$ 圆弧形轮廓半径 $r=14.3\ \text{mm}$
工件	HSS (6Mo5Cr4V21, HRC=62)
超光滑磨削参数	$N=3000\ \text{r/min}$ $V_f=15, 50, 100, 150, 210\ \text{mm/min}$ $a=10\times 3\rightarrow 5\times 2\rightarrow 3\times 2\rightarrow 2\rightarrow 1\times 1\ \text{m}$ 零磨削 2次
数控成型磨削参数	$N=3000\ \text{r/min}$ $V_f=50\ \text{mm/min}$ $a=2\ \text{m}, \Sigma a=10\ \text{m}$ $h_e=0.1\ \text{m}$ 零磨削 1次
冷却液	BM 水溶性磨削液

### 5.2 修锐修整

在磨削试验前,采用#180GC磨石对砂轮进行修锐。修锐过程中,砂轮对磨石进行横向往复间歇式平面磨削,其条件为, $N=1\ 500\ \text{r/min}$ , $V_f=600\ \text{mm/min}$ , $a=0.5\ \mu\text{m}$ , $a=4\ \text{mm}$ ,间歇间隔为 $3\ \text{mm}$ ,采用水溶性磨削液BM2。此外,修锐后采用铸铁对金刚石砂轮表面进行修整,使磨粒出刃角修齐修平,增加有效磨粒数,改善砂轮出刃形貌特征。

## 6 结果和分析

图8为砂轮行走速度对表面粗糙度 $R_a$ 的影响。在磨削试验中,表面粗糙度 $R_a$ 随着砂轮行走速度 $V_f$ 的减小而减小。这验证了如前所述的粗糙度随砂轮行走速度变化的理论模式。

此外,有铸铁修整的粗糙度 $R_a$ 比无铸铁修整的要小,且当 $V_f < 50\ \text{mm/min}$ 时可小到 $10\ \text{nm}$ 以下,形成超光滑表面。这是因为铸铁修整可将金刚石磨粒出刃修齐修平,增加有效磨粒出刃数,这与图6所示的行走速度与粗糙度的理论关系基本一致。

图9为磨削表面的微观切除形貌(SEM)。当采用铸铁修整时,磨削表面的破碎痕迹明显比无铸铁修整的要少,而且,当 $V_f=15\ \text{mm/min}$ 时有铸铁修整的加工表面显现出塑性域切除形貌,

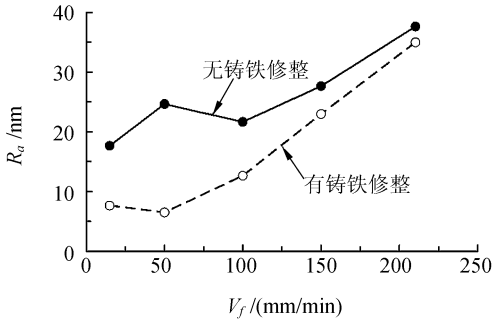


图 8 砂轮行走速度对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Surface roughness versus wheel moving speed

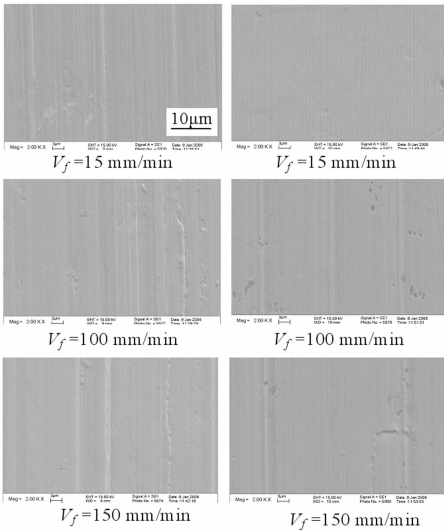


图 9 磨削表面的微观破碎形貌 (SEM)

Fig. 9 Micro crack feature on ground (SEM)

达到镜面磨削效果。

在 CNC 系统中编写 G 代码实现等包络迹高度的成型磨削,加工中采用以上的镜面磨削工艺参数,加工的样品如图 10 所示。

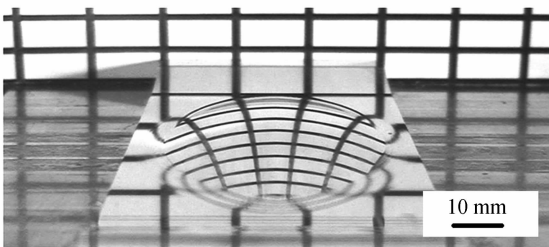
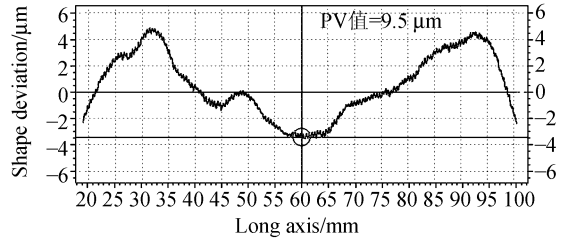


图 10 加工实物

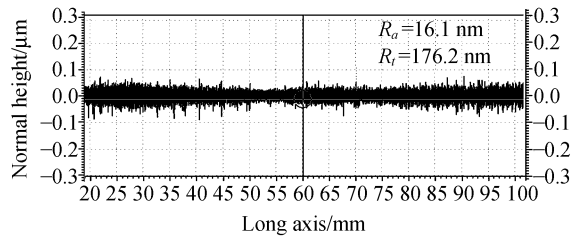
Fig. 10 Machined workpiece

图 11 为加工椭圆面的形状偏差和粗糙轮廓。在椭圆长轴方向 80 mm 内,面形误差(PV 值)可以达到  $10 \mu\text{m}$  以下,且表面粗糙度约  $16 \text{ nm}$ 。



(a)形状偏差

(a)Form error



(b)表面粗糙轮廓

(b)Rough profile of machined ellipsoidal surface

图 11 加工椭圆表面的形状偏差和粗糙轮廓

Fig. 11 Form error and rough profile of machined ellipsoidal surface

### 7 结 论

利用等包络迹高度的成型磨削方法、砂轮轴向行走的磨削方式和金刚石砂轮的精密修整技术,在 CNC 精密磨床上采用粗金刚石砂轮可实现自由曲面反射镜凸模芯的镜面成型磨削加工。加工高速钢模芯的面形精度可以达到  $10 \mu\text{m}$  以下,表面粗糙度可以达到约  $16 \text{ nm}$ 。具体结论如下:

(1)减小等包络迹高度可以进行随曲率变化的自适应成型磨削,当等包络迹高度为  $0.1 \mu\text{m}$  时,可以获得超光滑曲面;

(2)减小砂轮轴向行走速度可以减小磨削表面的粗糙度,当行走速度小于  $50 \text{ mm}/\text{min}$  时,可以实现镜面磨削;

(3)采用铸铁修整可以提高有效出刃磨粒数和增大出刃顶角,从而改善磨削表面质量,实现镜面磨削。

## 参考文献:

- [1] 谢晋,耿安兵,熊长新,等. 红外线聚光非球面透镜的单点金刚石镜面切削方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 566-569.  
XIE J, GENG A B, XIONG CH X, *et al.*. Single-point diamond mirror turing of infrared aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 566-569. (in Chinese)
- [2] 杜建军,高栋,孔令豹,等. 光学自由曲面误差评定中匹配方法的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 12(6): 133-138.  
DU J J, GAO D, KONG L B, *et al.*. Study of matching methods for error evaluation of optical free-form surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 1336-138. (in Chinese)
- [3] 牛海燕,张学军. 124 mm 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 124 mm aspheric reaction burned silicon carbide mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)
- [4] 薛栋林,张忠玉,张学军. 一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 198-204.  
XUE D L, ZHANG Z Y, ZHANG X J, *et al.*. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 13(2): 198-204. (in Chinese)
- [5] 程灏波. 精研磨阶段非球面形接触式测量误差补偿技术 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 228-231.  
CHENG H B. Touch trigger probe measurement accuracy of aspherical mirror during fine lapping process [J]. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2005, 41(8): 228-231. (in Chinese)
- [6] KATAOKA I. Super smooth polishing technology for aspheric mirrors [J]. *J. Jpn. Soc. Precision Eng.*, 1998, 64(7): 983-986.
- [7] KUROSAWA H. Polishing method with the coat of dissolved pitch for high precision optical components-2nd report: Application to single-crystal CaF<sub>2</sub> spherical lens for deep UV wavelength [J]. *J. Jpn. Soc. Abrasive Technol.*, 2005, 49(5): 239-249.
- [8] KURIYAGAWA T, SEPASY ZAHMATY M S, SYOJI K. A new grinding method for aspheric ceramic mirrors [J]. *J. mater. process Technol.*, 1996, 62: 387-393.
- [9] STEPHENSON D J, SUN X, ZERVOS C. A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission [J]. *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 2005, 46(10): 1053-1063.
- [10] UEUARA Y, MITUISHI N, NARUSE T, *et al.*. Development of aspherical lens by desktop machine tools with ELID grinding system [J]. *J. Jpn. Soc. Abrasive Technol.*, 2006, 50(3): 154-157.

作者简介:谢 晋(1963—),男,华南理工大学副教授,工学博士(日本北见工业大学,2002年),从事非球面精密及超精密加工的研究。E-mail: jinxie@scut.edu.cn