

·结构与工艺·

## 非球面数控加工技术研究

李作文<sup>1</sup>, 于海月<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 郑州 450001; 2. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘要:**随着微电子、光电子、太阳能光伏技术的发展以及光学与电子学的融合及国内外市场竞争的日趋激烈,以非球面光学元件为代表的先进技术日益成为一个国家制造实力的重要体现,发展新的非球面加工技术,提高加工精度和效率,降低加工成本是不懈追求的目标。针对 $\Phi 76.2$  mm非球面透镜,对铣磨成型工艺、抛光工艺、抛光设备等相关工艺参数进行了研究,采用弹性模预抛光与小磨头修正抛光相结合的两步研抛法对零件表面快速抛光,给出了一套规范的非球面数控加工工艺,并对影响因素进行了分析。

**关键词:**非球面; 铣磨成型; 小磨头修正抛光

**中图分类号:** TH744

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2015)-04-0074-06

## Research on Numerical Control Processing Technology of Aspheric Surface

LI Zuo-wen<sup>1</sup>, YU Hai-yue<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** With the development of microelectronics, optoelectronics, solar photovoltaic technology and the integration of optics and electronics and increasingly fierce competition in domestic and foreign market, advanced manufacturing technology of aspheric optical components is increasingly becoming an important manifestation of a country's manufacturing capability. It is the constant pursuit goal to develop new aspheric processing technology, improve processing accuracy and efficiency and reduce the aspheric processing cost. The techniques parameters such as grinding process, polishing process and polishing equipment for fabrication technology of  $\Phi 76.2$  mm aspheric lens are researched. Two-step polishing method combined with elastic model pre-polishing and corrective polishing with small tool is used to polish accessory surface quickly. A set of standard numerical control processing technology for aspheric surface is introduced, and the influencing factors are analyzed.

**Key words:** aspheric surface; grinding process; corrective polishing with small tool

非球面光学零件已广泛应用于航空机载设备、卫星、激光制导、红外探测等领域,同时在民用光电产品上的应用也越来越普及。光学系统中采用非球面元件,可以提高系统的性能<sup>[1]</sup>,减少光学元件的数量,从而减轻仪器的质量,减小体积,紧凑结构。

正是由于光学非球面元件的广泛使用,使得光学非球面的加工技术得到了快速发展。近年来随

着超精密微细加工技术的发展、高精密数控机床的出现,使非球面光学零件的加工技术有了长足的进展。它提高了加工精度和加工质量,缩短了产品研制周期,实现了加工及检测的自动化、数字化,突破了传统的手工或半手工操作,也使各国开展了对各种新型抛光工艺的深入研究,从而提高了加工效率和制造精度。

收稿日期:2015-08-03

作者简介:李作文(1992-),男,力学与工程科学学院学士,研究方向为安全工程;于海月(1992-),女,光电工程学院学士,研究方向为探测制导与控制技术。

## 1 非球面的理论基础

随着光学科学的发展,设计自由度需求的增加,光学系统中用到的光学曲面形状也越来越复杂。从广义上来讲,除了球面和平面以外的光学曲面,其他表面都可以统称为非球面,亦可称为复杂光学曲面。这些复杂的面形在不同的场合下有不同的定义和分类,至今尚未形成统一的认识。

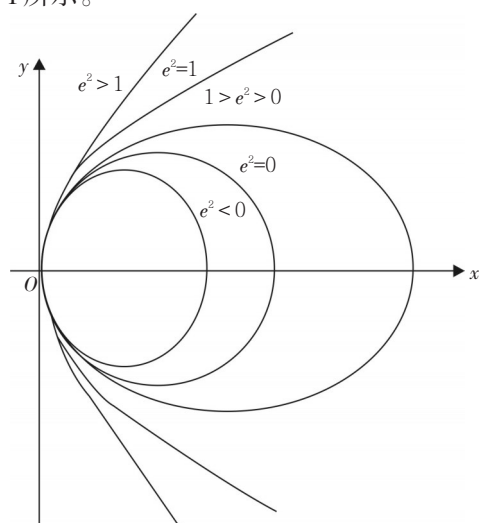
非球面光学零件就是有一个或两个与球面有差异的光学表面构成的光学零件,在这些非球面中最常见的是一个对称轴的回转非球面。回转非球面通常采用数控机床进行加工。

国际上普遍通用的轴对称回转非球面表达式<sup>[2]</sup>为

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + B_1y^4 + B_2y^6 + B_3y^8 \dots \quad (1)$$

式中, $x$ 表示非球面的回转对称轴; $y$ 表示入射光线在非球面上的投射高度; $c$ 为顶点曲率, $c=1/R_0$ , $R_0$ 为顶点曲率半径; $k$ 为圆锥常数, $k=-e^2$ ;  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 为高次项系数。

当形状系数  $e^2 > 1$  时,式(1)表示为双曲面;当  $e^2 = 1$  时,表示抛物面;当  $0 < e^2 < 1$  时,表示以长轴为对称轴的半椭圆形球面;当  $e^2 = 0$  时,表示球面;当  $e^2 < 0$  时,表示以短轴为对称轴的半椭圆形球面。如果选取相同的  $R_0$ ,不同  $e^2$  值对应的二次曲线的形状如图1所示。



1—扁圆;2—圆;3—椭圆;4—抛物线;5—双曲线

图1 形状系数与二次曲线形状的关系

在回转非球面中又以二次回转非球面的应用

最为广泛,二次非球面的子午面方程为

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} \quad (2)$$

## 2 直径76.2 mm非球面数控加工工艺研究

将利用 OPTECH 非球面数控机床加工直径为  $\Phi 76.2$  mm,  $R$  为 125.2 mm,  $K=0.475$ ,  $d=8 \pm 0.1$ ,  $A=5.35741e-8$ ,  $B=-2.84656e-11$ ,  $C=4.16788e-14$ ,  $D=-2.54751e-17$ , 材料为 K9 的非球面透镜。

### 2.1 计算机控制光学表面加工技术的理论基础

非球面数控加工主要运用的是计算机控制光学表面成型 (computer controlled optical surface, CCOS) 技术<sup>[3-4]</sup>, 根据定量的面形检测数据, 建立加工过程的控制模型, 用计算机控制工具对非球面表面进行研磨和抛光。

#### 2.1.1 CCOS 技术的基础理论方程

目前, 描述光学表面抛光过程比较成功的数学模型是 Preston 方程<sup>[5]</sup>如下

$$\frac{dz}{dt} = KVP \quad (3)$$

式中, $K$ 为比例常数,它由除速度和压力以外的其他所有因素决定; $V$ 为表面某一点  $(x,y)$  和瞬时  $(t)$  的抛光速度,  $V=V(x,y,t)$ ;  $P$ 为抛光压力,是关于位置坐标  $(x,y)$  和瞬时  $(t)$  的函数值,  $P=P(x,y,t)$ 。

在这个假设中, Preston 将速度和压力以外的其他因素的作用归于一个比例常数  $K$ , 这样, 就建立起了一个关于材料去除量、压力和瞬时速度之间的线性关系。

这样, 就可以根据被加工位置与加工工具之间的相对速度和压力, 以及加工时间  $t$ , 计算出在这段时间内表面材料的去除量  $\Delta z$  为

$$\Delta z(x,y) = K \int_0^t V(x,y,t)P(x,y,t)dt \quad (4)$$

#### 2.1.2 去除特征函数的推导

从式(4)中可以看出, 在抛光过程中, 材料去除量与该点的压强、速度及作用时间成正比。定义工具的位置不移动的情况下, 单位时间内工具的去特征函数<sup>[6-7]</sup>为  $R(x,y)$ , 则有下式

$$R(x,y) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T kP(x,y,t)V(x,y,t)dt \right] \quad (5)$$

小抛头抛光过程中,工件以角速度  $n$  绕轴自转,工具以角速度  $\omega$  高速自转的同时,沿  $X$  方向进给,并在  $z$  轴方向做升降运动,运动方式如图2所示。俯视加工轨迹为一螺旋线。工具与工件的接触区域为椭圆区域,接触区域的压强分布满足椭圆赫兹分布<sup>[8]</sup>。

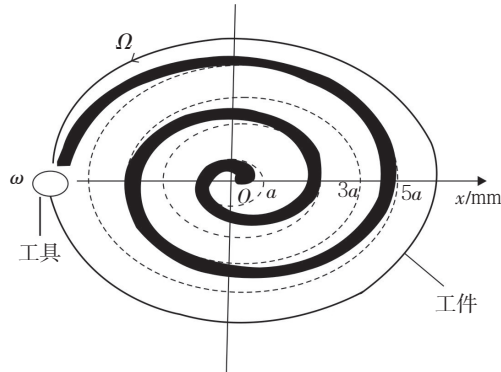


图2 小工具抛光运动方式

工具与工件接触示意图如图3所示。设初始驻留状态下,接触区域为一椭圆,由于接触半径很小,所以近似作圆域处理,接触圆域的半径为  $a$ 。工具与工件接触区域的中心点为  $C(x_c, y_c, z_c)$ ,  $r$  为  $P$  到工件中心  $O$  的距离,  $r_c$  是  $C$  距工件中心  $O$  的距离。

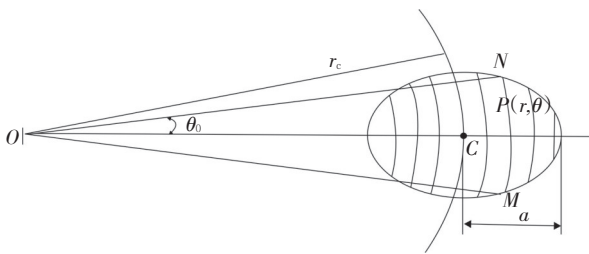


图3 工具与工件接触示意图

其压强分布为

$$P = P_0 \left( 1 - \frac{CN^2}{a^2} \right)^{\frac{3}{2}} = P_0 \left( 1 - \frac{r^2 + r_c^2 - 2rr_c \cos \theta}{a^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

其中,  $P$  为  $P_0$  工具中心处的压强。

工具在  $P$  点自转的线速度为

$$v_\omega = OC \cdot \omega = \sqrt{r^2 + r_c^2 - 2rr_c \cos \theta} \cdot \omega \quad (7)$$

工件在  $P$  点自转的线速度为

$$v_\Omega = \Omega r \quad (8)$$

$P$  点处工具和工件的相对速度为

$$v = \sqrt{v_\Omega^2 + v_\omega^2 + 2v_\Omega v_\omega \frac{r^2 + (CN)^2 - r_c^2}{2rCN}} \quad (9)$$

令  $k = \frac{\omega}{\Omega}$ , 工件旋转一周的特征去余量为

$$\Delta z(r, r_c) = kP_0 \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \left( 1 - \frac{r^2 + r_c^2 - 2rr_c \cos \theta}{a^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{(1+k)^2 r^2 + k^2 r_c^2 - 2rr_c \cos \theta (k^2 + k)} d\theta \quad (10)$$

## 2.2 非球面数控加工工艺研究

非球面加工工艺流程如图4所示。

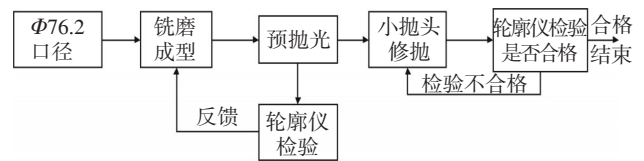


图4 工艺流程图

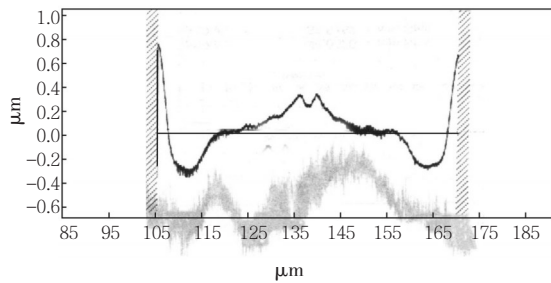
### 2.2.1 预抛光工艺

零件经铣磨成型后,表面留有金刚石砂轮铣磨痕迹,要通过抛光过程将痕迹去除。采用面积较小的抛光盘,能够跟踪工件面形的变化趋势,更好地修正局部误差,在短时间内就能使工件的面形精度达到要求,但是由于它产生比较明显的表面波纹度,从而导致表面中高频误差,元件产生高级像差。为了避免这种中高频误差,首先对零件进行弹性抛光盘预抛光。

预抛光过程中,工件轴、工具轴转速分别为 150 rpm 和 450 rpm,摆角  $21.7^\circ$  时,抛光 15 min,工件表面的铣磨痕迹全部被去除掉。研究过程中发现,抛光液温度调整到  $27^\circ\text{C}$  时,材料去除量最大,整个表面能够被快速抛亮。

### 2.2.2 非球面数控反馈铣磨抛光工艺

为解决弹性抛光盘严重破坏面形精度的问题,现将检测曲线反馈到铣磨机中,第二次铣磨非球面,在此过程中引入补偿量,补偿掉由抛光引起的面形误差。即在铣磨过程中刻意使其具有与之前测得的误差相反的面形误差,在抛光去除量大的地方磨削量减小,而抛光去除量小的地方则增大。经过铣磨后,用轮廓仪测得的面形曲线如图5所示。得到了期望的面形误差曲线,  $PV$  值为  $1.1465 \mu\text{m}$ 。

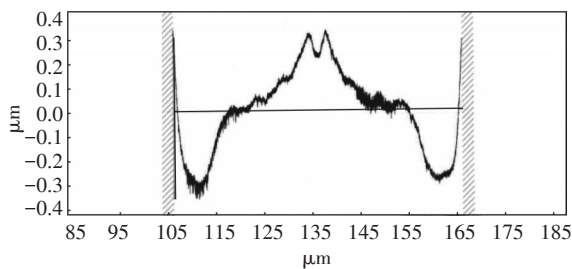


Rt	1.146 5 μm	Xp	-31.916 0 mm	Smx	0.787 4
Ra	0.156 4 μm	Xv	-25.200 1 mm	Smn	0.095 3
Fig	0.203 8 μm	Xt	31.984 0 mm	Tilt	0.091 1

图5 反馈精磨后抛光的面形精度

### 2.2.3 非球面数控小磨头修抛工艺

小抛头修抛过程中,表面去除量参数之间的关系可以由 Preston 模型给出,在磨头与工件间相互作用的小区域内,磨头对工件表面材料的去除量与压力、相对速度以及驻留时间成正比<sup>[9]</sup>。根据轮廓仪测得的预抛光检测曲线,调整工件轴转速和工具轴转速分别为 500 rpm 和 2 500 rpm,其他条件不变,进行几次修正抛光。采用氧化铈作为抛光磨料,多次重复修磨元件,表面面形精度逐步收敛。最终面形如图 6 所示。PV 值达到 0.721 1 μm,面形精度符合设计要求,表面光洁度达到 III 级。



Rt	0.721 1 μm	Xp	-30.485 9 mm	Smx	0.787 4
Ra	0.141 2 μm	Xv	-25.206 8 mm	Smn	0.095 0
Fig	0.227 8 μm	Xt	30.485 9 mm	Tilt	0.087 5

图6 小磨头修抛后面形精度

## 2.3 影响因素

### 2.3.1 粗磨的影响因素

#### (1) 粒度

金刚石磨具的粒度对磨削效率和表面粗糙度的影响正好相反,粒度越细,工件表面粗糙度愈小,

则效率越低。粒度对表面粗糙度的影响近似成直线关系。选择粒度的原则是:在保证工件粗糙度要求的前提下,尽可能采用粒度粗的磨轮加工,以提高磨削效率。但是,在浓度一定的情况下,粒度越大,粒数越少,每个颗粒上受到的压力加大,则造成磨具磨耗增大。一般铣磨用的磨具粒度范围在 80<sup>#</sup>~120<sup>#</sup>。

#### (2) 硬度

磨轮的硬度是指磨具表面的磨粒在外力作用下脱落的难易程度。磨粒易脱落则磨具软,反之则硬。

磨轮硬度的选择,对磨削效率、加工质量和磨具寿命影响很大。若磨具硬度过高,则结合剂把已经磨钝而失去磨削能力的磨粒牢牢把持住而不让其脱落,这样会造成磨具与工件之间摩擦力增大,发热量大,严重时会使零件炸裂。同时,硬度过高将大大降低磨削效率和表面质量。相反,磨具硬度过低,磨粒还在锋利时候就会掉下来,这样不但会影响效率,而且还造成磨具不应有的损耗。

#### (3) 浓度

金刚石磨具的浓度,是指在磨具金刚石层内每立方厘米的体积内含有金刚石的质量。规定每立方厘米中含有 4.4 克金刚石作为 100% 浓度。“克拉”是金刚石质量的计量单位,1 克拉=0.2 g,浓度为 50%,其金刚石含量为 2.2 克拉/cm<sup>3</sup>。

若浓度过高,结合剂相对减少,这样对金刚石颗粒的把持力减弱,使颗粒有过早脱落的可能,不能充分发挥磨料的磨削作用。若浓度过低,使磨轮表面金刚石颗粒减少,作用在没颗粒上切削力相应增大,也有促使磨料过早脱落的可能。

浓度选择的原则:假如金刚石粒度比较粗,浓度相对的应高些,例如,铣磨用的磨轮的金刚石浓度应该比金刚石精磨片的浓度高,100<sup>#</sup>粒度的金刚石应选 100% 的浓度,W28 粒度的精磨片选用 50% 的浓度就够了。假如结合剂品种不同,则金刚石的浓度也应该不同,树脂结合剂选用 100%,而电镀结合剂选用 50% 的浓度。

#### (4) 铣磨深度

铣磨深度是指工件转动一周的吃刀量。实践表明,吃刀量愈大,铣削效率愈高,但表面粗糙度愈大。在铣磨周期内,磨去量一般是经过多次铣削完成的。

从磨具合理使用的角度考虑,铣磨深度不应该超过金刚石层的厚度,否则易损坏磨轮。尤其在加工块料毛坯时,更应特别注意吃刀量不能过大。

在弹性进给的条件下,铣磨深度与磨轮转速、工件线速度、磨削压力以及金刚石粒度和工件材料等因素有关。

### 2.3.2 精磨的影响因素

#### (1) 金刚石颗粒

在使用散粒磨料研磨玻璃时,切削能力和工件表面的粗糙度仅取决于磨料颗粒的粒度。但是,在使用固着磨料磨研时,尤其是在金刚石精磨中,磨具的切削能力,不仅取决于金刚石颗粒的粒度,而且还取决于它在结合剂中的浓度以及颗粒从结合剂里露出的尺寸,并且与玻璃原始表面的粗糙度有关。

#### (2) 结合剂

在金刚石精磨过程中,保证研磨的稳定性和重复性的首要条件是:金刚石与结合剂的平衡磨损,也就是结合剂磨损,磨具表面上的金刚石切削刃的密度始终保持不变。这种平衡是靠金刚石磨具的自锐作用实现的。如果均衡条件遭到破坏,将会导致两种情况:或者金刚石过早的脱落,从而缩短磨具的使用寿命;或者钝化的颗粒长期把持不脱落,这样不仅会降低磨削效率,而且也影响价格表面的粗糙度。

#### (3) 玻璃

为了合理地选择和使用金刚石磨具,以获得最好的工艺效果,必须考虑到玻璃的物理力学特性对磨削效率和表面质量的影响。例如,在加工表面粗糙度相同的情况下,用金刚石精磨比散粒磨料研磨所形成的裂纹深度要小。这是由于前者加工的切削力的合力方向几乎与玻璃表面相切所致。

### 2.3.3 抛光的影响因素

#### (1) 抛光介质水对玻璃的侵蚀作用

玻璃表面在水的作用下发生水解,形成硅酸凝胶层,在正常情况下,硅酸凝胶层能保护玻璃表面,减缓侵蚀速度。但在抛光粉的作用下,胶层不断被刮去,露出新的表面又被水解,如此往复循环,构成抛光过程。因此,水解作用是非常重要的。如果用其他介质代替水时,抛光速度显著下降,这是由于

这些介质不能进行水解反应。此外,水能使抛光粉均匀分布在抛光膜的工作表面上,同时水还有良好的冷却和洗涤作用<sup>[10]</sup>。

#### (2) 光学玻璃化学稳定性与抛光速度的关系

玻璃的抛光速度与玻璃的硬度和软化点无关,而与化学稳定性有关。玻璃腐蚀后质量减少愈多,抛光速度愈高。而硅酸盐和硼酸盐玻璃之间的差别,是由腐蚀层的硬度造成的,也就是说,未经腐蚀的玻璃,抛光速度与硬度无关。玻璃是否容易抛光取决于表面水解后形成的腐蚀层,抛光速度则取决于破坏腐蚀层的难易程度。一般来说,抛光困难的玻璃,不易出现表面疵病;反之,容易抛光的玻璃,也容易出现疵病。

#### (3) 抛光液PH值的影响

一般来说,大多数光学玻璃是不耐碱的,至于耐酸的程度,则视光学玻璃的牌号不同而异。但总的来说,酸度较大时,对玻璃的侵蚀严重。因此,光学加工中,大多数光学玻璃,在弱酸性抛光液中抛光(PH=5.5~7),具有较高的速率和表面质量。

#### (4) 添加剂对抛光过程的影响

在抛光液中加入少量的其他物质,以达到提高速率和改善表面质量的目的,这种物质称为抛光液的添加剂。

#### (5) 抛光模的作用

光学零件的抛光,是在抛光机上,由模具对工件施加压力,使其与工件紧密接触,在抛光剂作用下,通过两者(模具和工件)的相对运动而达到抛光的。由此看来,抛光模层不仅起着承载抛光粉的作用,同时也起到一定的化学作用。

非球面数控抛光是一个机械、化学和物理等方面综合作用的柔性加工过程<sup>[11]</sup>,抛光模的磨损、抛光液的种类和浓度、工件材料、抛光压力、抛光模运动方式、转速、摆动频率、湿度和温度等因素都会对抛光表面质量有很大影响<sup>[12]</sup>。另外,轮廓仪的测量误差影响修抛的反馈量,也会对抛光结果产生影响。

## 3 结 论

目前国内外仍然广泛使用计算机控制铣磨、抛光技术来加工非球面透镜。文中对数控技术加工非球面进行了深入的研究,针对 $\Phi 76.2$  mm非球面透镜,借鉴传统加工工艺的实践经验,对铣磨成型工艺、抛光工艺、抛光设备等相关工艺参数进行了

研究,采用弹性模预抛光与小抛头修正抛光相结合的两步研抛法对零件表面快速抛光,给出了一套规范的非球面数控加工工艺,同时保证了零件具有较高的面形精度,表面光洁度达到Ⅲ级,满足了设计的需要。

随着非球面元件的广泛应用,数控加工非球面正成为各国关注的核心技术之一,优化工艺流程、改善面形精度、缩短加工时间、提高生产效率是非球面加工产业发展的方向。

#### 参考文献

- [1] 蔡立,耿素杰,付秀华.光学零件加工技术[M].2版.北京:兵器工业出版社,2006.
- [2] 潘君弊.光学非球面的设计加工及检验[M].北京:科学出版社,1991.
- [3] H Ta kino. Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication[J]. SPIE,1998,37:5198-5209.
- [4] Tsushima A, Kawazu M, Ito M, et al. Development of ultra-precise injection molding method for thermoplastic lenses[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992,1720:50-59.
- [5] 王毅,倪颖,余景池.小型非球面数控抛光技术的研究[J].光学精密工程,2007,10:1527-1533.
- [6] ZHENG W M, CAO T N, ZHANG X Z. Applications of a novel general removal function model in the CCOS[J]. SPIE, 2000, 4231:51-58.
- [7] WENZEL D J, MCFALLS D S. An optimal material removal strategy for automated of aircraft canopies[J]. IEEE Conf on Robotics and Automation, 1989, 4532:370-376.
- [8] YANG M Y, LEE H C. Local material removal mechanism considering curvature effect in the polishing process of the small aspherical lens die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 116:298-305.
- [9] 李全胜,成晔,蔡复之等.计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究[J].光学技术,1999,3:56-62.
- [10] Mehta P K, Reid P B A mathematical model for optical smoothing prediction of high-spatial frequency surface errors[J]. SPIE, 1999, 3786:447-459.
- [11] Yoshiharu NAMBA, Morihiko SAEKI, Takatomo SA SAKI. Ultra-precision grinding of KPT crystals for optical surfaces[J]. Japan Soc. Pree. Eng, 1998, 28(1):39-40.
- [12] 王德全.砂轮特性与磨削加工[M].北京:中国标准出版社,2001.

#### (上接第4页)

- [7] Moharam MG, Pommet Da, Grann EB, et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(5):1077.
- [8] Lalanne P, Morris GM. Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(4):779.
- [9] Ordal M A, Long L L, Bell R J, et al. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared [J]. Appl. Opt., 1983, 22(7):1099-20.

#### (上接第7页)

- [11] 孙孟相,谭满清,王鲁峰.1300 nm超辐射发光二极管寿命测试[J].光学学报,2008,28(10):1994-1997.
- [12] 闫立华,徐会武,任永学,等.不完全匹配吸收方法测试激光二极管阵列寿命[J].微纳电子技术,2011,48(7):472-476.
- [13] 江剑平.半导体激光器[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [14] 雷志锋,杨少华,黄云.高功率半导体激光器的可靠性与寿命评价[J].应用光学,2008,29(1):90-95.
- [15] 张勇,杨瑞霞,安振峰,等.腔长对高功率单管半导体激光器性能的影响[J].半导体技术,2013,38(12):914-918.
- [16] 高信松,魏彬,吕文强,等.高功率二极管激光器失效特性研究[J].强激光与粒子束,2005,17(4):97-100.