

文章编号 1674-2915(2009)05-0414-07

环带抛光技术材料去除理论模型研究

李俊峰^{1,2}, 陈亚¹, 宣斌^{1,2}, 王朋^{1,2}, 陈晓苹^{1,2}, 宋淑梅¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了完善环带抛光技术并指导加工, 根据 Preston 方程建立了材料去除量的理论模型。考虑环带抛光技术中的影响因素, 如抛光盘与工件之间的转速比、偏心距及压强分布等参数, 建立了材料去除量与各影响因素之间相互关系的数学模型。理论分析和实验结果显示, 转速比、偏心距和压强分布对磨削量均有影响, 材料的去除效率随转速比和偏心距增加而增大, 转速比越接近于 1, 磨削越均匀; 工件露边时, 工件露出部分材料的去除效率急剧下降。实验结果表明, 通过对该理论模型中相关技术参数的研究来完善环带抛光技术, 有效地提高了抛光的效率及稳定性。

关键词: 环带抛光; 材料去除; 转速比; 偏心距

中图分类号: TN305.2 文献标识码: A

Study on material removal theoretical model of zone polishing technology

LI Jun-feng^{1,2}, CHEN Ya¹, XUAN Bin^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, CHEN Xiao-ping^{1,2}, SONG Shu-mei¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to improve the zone polishing technology, a material removal theoretical model of zone polishing technology is founded based on the Preston equation. In consideration of all influencing factors, such as rotating speed ratio, eccentric distance, pressure distribution between polishing laps and workpieces, the mathematical model about the relationship between the material removals and the influencing factors is established. The theoretical analysis and experiment results indicate that the rotating speed ratio, eccentric distance and pressure distribution all have effects on the material removals. The material removal efficiency is increased as the increases of rotating speed ratio and eccentric distance. When the rotating speed ratio is near to 1, the removal distribution is more uniform. The material removal efficiency of edge is quickly reduced as the edge of workpiece holds out of the polishing lap. These results show that the zone polishing technology is improved through researching the technological parameters of the theoretical model, and the polishing efficiency and sta-

bility are increased.

Key words: zone polishing; material removal; rotating speed ratio; eccentric distance

1 引言

在高精度平面光学元件加工领域,环带抛光是由古典加工法发展起来的一种重要的抛光技术,在光学加工中得到了广泛的应用,但是该项技术的发展还存在一定的不足,比如对技术人员的经验依赖性强、加工效率比较低、加工稳定性不好等,其主要原因在于环带抛光工艺是一个多种因素相互作用的过程,而人们对抛光磨削规律以及一些工艺参数影响的认识还不够深刻。

本文针对环带抛光技术中抛光盘、校正板及工件之间的相互作用关系,从理论上分析了采用环带抛光技术进行光学元件加工时材料磨削量的分布情况以及与各影响因素之间的关系。

2 理论分析

2.1 环带抛光工艺原理及结构

通常环带抛光机由带有环形抛光盘的转台和圆形光学玻璃校正板组成。工作时,抛光盘由电机驱动以稳定的速度转动,校正板和工件在主动驱动电机的作用下以一定的速度自转,环带抛光

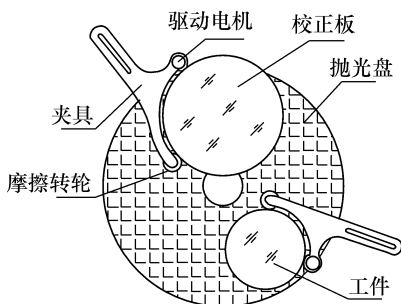


图1 环带抛光工艺结构简图

Fig.1 Framework diagram of zone polishing

工艺的结构简图如图1所示。校正板直径比工件直径大得多,校正板对抛光盘面形的影响比工件对于抛光盘面形的影响要大,校正板的面形决定了工件的面形。抛光盘靠校正板修正面形,从而

加工工件;同时工件又会破坏抛光盘的面形,而抛光盘也影响校正板的面形,校正板与工件之间的面形关系可表示为:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2, \quad (1)$$

式中, N_1 是直径为 D_1 的校正板的光圈数; N_2 是直径为 D_2 的工件的光圈数。可见,光圈数与加工零件直径平方成正比。所以用大的环带抛光机加工小的光学平面,可以大大提高工件的面形精度。

2.2 数学模型

环带抛光工艺的工作原理符合 Preston 方程,即单位时间内材料的去除量与抛光点的压强、抛光盘和工件的相对速度及抛光比例常数成正比^[1-3]。环带抛光技术模型的建立基于 Preston 方程,工件表面任一点在单位时间内的磨削量为 $dz(x,y)/dt$,可表示为:

$$dz(x,y)/dt = kp(x,y,t)v(x,y,t), \quad (2)$$

其中, k 为比例常数,其值大小与被抛光元件材料、抛光盘材料、抛光液材料(种类、浓度和 pH 值)及温度等参数有关; p 为 t 时刻工件上某点 A 的压强; v 为 t 时刻工件上点 A 与抛光盘的相对速度。

2.2.1 相对运动分析

图2所示为工件在抛光盘上的相对运动情况。设抛光盘以角速度 ω_p 旋转,工件以角速度 ω_w 旋转,偏心距 e 为抛光盘中心 O_1 到工件中心 O_2

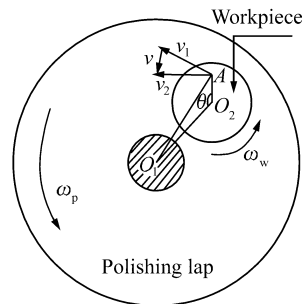


图2 环带抛光工艺运动状态示意图

Fig.2 Sketch of zone polishing moving state

的距离,工件上任意一点 A 距工件中心的距离为 r ,点 A 和 O_2 的连线与 O_1 和 O_2 的连线之间夹角为 θ 。抛光盘上点 A 处相对于 O_1 的速度为 v_1 ,工件上点 A 处相对于 O_2 的速度为 v_2 ,因此工件上点 A 处与抛光盘的相对速度为 v ,通过运动学分析和计算,可得:

$$v(r,t) = [e^2\omega_p^2 + r^2(\omega_p - \omega_w)^2 + 2re\omega_p(\omega_p - \omega_w)\cos\omega_w t]^{1/2}, \quad (3)$$

$$z(r) = k \int_0^T p(r,t)v(r,t) dt, \quad (4)$$

将相对速度 $v(r,t)$ 代入公式(4)中,就可得到点 A 的磨削量为:

$$z(r) = k \int_0^T p(r,t) [e^2\omega_p^2 + r^2(\omega_p - \omega_w)^2 + 2re\omega_p(\omega_p - \omega_w)\cos(\omega_w t)]^{1/2} dt, \quad (5)$$

2.2.2 压强分布分析

如上所述,环带抛光系统主要由抛光盘、校正板和工件组成。抛光盘沥青的主要成份为含少量松香和蜂蜡的石油沥青。沥青材料的力学特性对温度变化比较敏感,属于一种非线性材料,而对沥青的非线性力学分析是相当复杂的过程。因此,当应力和温度在一定范围变化时,可以认为抛光沥青为线性弹性材料,沥青的受力情况属于弹性力学范畴^[4]。

2.2.2.1 工件与抛光盘之间的压强分布

工件与抛光盘之间的压强分布是工件材料磨削量的影响因素之一。对于直径小于抛光盘环带宽度的工件,实际加工中可能出现两种夹持情况,

式(7)中:

$$A_1 = (\theta_2 + \frac{\sin 2\theta_2}{2} + \frac{\pi}{2}) \cdot R_2^2 + (\frac{\pi}{2} - \theta_1 - \frac{\sin 2\theta_1}{2}) \cdot R_1^2$$

$$A_2 = A_3 = (\theta_1 + \frac{\sin 2\theta_1}{2} - \frac{\pi}{2}) \cdot eR_1^2 - \frac{2}{3}(R_2^2 - y_{p1}^2)^{3/2} + \frac{3}{2}[R_1^2 - (y_{p1} + e)^2]^{3/2}$$

$$A_4 = (\frac{\pi}{8} + \frac{\theta_2}{4} - \frac{\sin 4\theta_2}{16}) \cdot R_2^4 + (\frac{\pi}{8} - \frac{\theta_1}{4} + \frac{\sin 4\theta_1}{16}) \cdot R_1^4 + (\frac{\pi}{2} - \theta_1 - \frac{\sin 2\theta_1}{2}) \cdot e^2R_1^2 - \frac{4e}{3}[R_1^2 - (y_{p1} + e)^2]^{3/2}$$

$$\theta_1 = \arcsin(\frac{y_{p1} + e}{R_1})$$

$$\theta_2 = \arcsin(\frac{y_{p1}}{R_2})$$

取 $G = \pi \times (0.4/2)^2 \times 0.045 \times 2.54 \times 10^3 \times 9.8 = 140$ N,偏心距 e 分别为 400、420 和 460 mm 时,工件上径向各点压强分布曲线如图 4 所示。从图中可以看出,当偏心距为 400 mm 时,整个工

即现露边或不露边。以 1.2 m 环带抛光机加工 $\Phi 400$ mm $\times 45$ mm 反射镜为例,分析这两种偏心距情况下工件与抛光盘之间的压强分布情况。

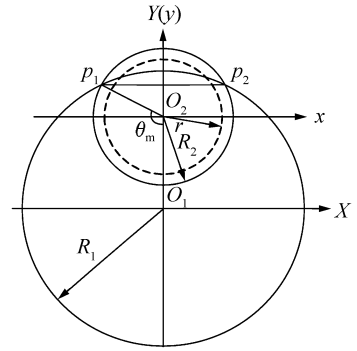


图3 工件与抛光盘的相对位置

Fig. 3 Relative position of workpiece and polishing lap

如图 3 所示,抛光盘半径为 R_1 ,工件半径为 R_2 ,偏心距为 e ,以 O_2 为中心建立坐标系 xO_2y 。根据弹性力学理论,在上下两个面接触范围内的压强呈线性分布^[4~6]:

$$p = p_0 + Ky, \quad (6)$$

式(6)中 p_0 工件中心点的瞬时压强; K 为瞬时压强线性分布的斜率。

根据工件与抛光盘之间的受力和力矩平衡方程,可以得到:

$$R_0 = \frac{A_4}{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3} G, \\ K = - \frac{A_3}{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3} G, \quad (7)$$

件都在抛光盘上(不露边)两表面之间的压强是均匀分布的;当工件与抛光盘不完全接触时(露边),压强的梯度和截距均随偏心距的增加而增大。

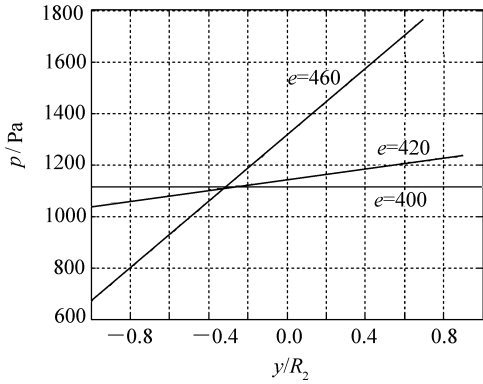


图4 接触区域内的压强分布曲线

Fig.4 Pressure distribution curves in the meeting area

2.2.2.2 校正板与抛光盘之间的压强分布

通常,校正板的直径大于抛光盘的环带宽度,实际使用中校正板也刚好覆盖这个环带,即校正板在抛光盘环带的内侧和外侧位置均有露边。通过分析可以得出,校正板在靠近抛光盘的内侧边缘和外侧边缘处的压强都比较大,两侧向中心逐渐递减,在环带中心部分压强最小。校正板向外移动,则抛光盘外侧边缘压强增大;向内移动,则抛光盘内侧边缘压强增大;当校正盘移动至一定位置时,抛光盘外侧和内侧压强分布基本一致。

研究校正板的压强分布情况,有助于在抛光过程中通过控制校正板的位置提高修盘的效率,从而有效地控制抛光盘的面形。

2.2.3 转速比与磨削量的关系

在加工过程中,工件的偏心距保持不变且绕其中心旋转,因此被抛光元件同圆周上的点在旋转一周后的磨削量是相同的。研究工件沿某一径向方向上各点的磨削量就可以得到整个工件表面的磨削量分布,可以用沿半径方向的一维结果来表示磨削量的分布情况。因此,计算工件旋转一周后材料的磨削量的分布就可以得出整个镜面的材料去除分布情况,令 $m = \omega_p / \omega_w$, 抛光时间设为 $t = 2\pi / \omega_w$, 则磨削量可表示为:

$$z(r) = k\omega_w \int_0^{2\pi/\omega_w} p(r,t) [e^2 m^2 + r^2(m-1)^2 + 2rem(m-1)\cos(\omega_w t)]^{1/2} dt, \quad (8)$$

对于图4中第一种压强分布情况(不露边)进行材料磨削量分析,压强在整个接触面上呈均匀分布,则同圆周上的点的压强相等,压强函数 $p(r,t)$ 为一常数,则:

$$z(r) = kp \int_0^{2\pi} [e^2 m^2 + r^2(m-1)^2 + 2rem(m-1)\cos\theta]^{1/2} d\theta, \quad (9)$$

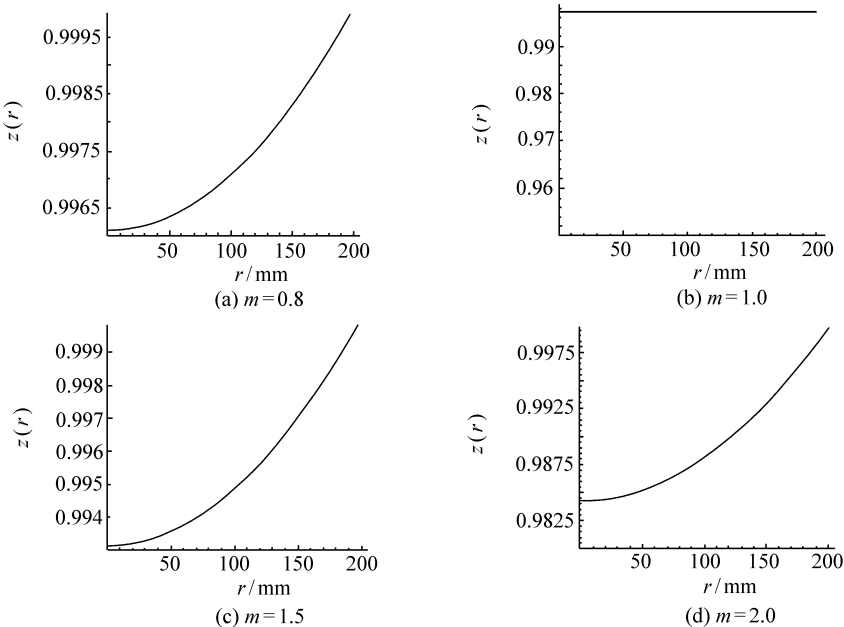


图5 规一化磨削量分布曲线

Fig.5 Normalized removal distribution curves

通过 Mathematic 数学分析仿真软件,计算偏心距 $e=400$ mm,转速比 m 分别为 0.8、1.0、1.5、2.0 时,沿工件径向磨削量函数 $z(r)$ 的归一化分布曲线,如图 5(a)~(d)所示。

从图 5 中可以看到,在抛光盘的转速与工件转速不相等时,都是工件中心的磨削量最小,随着半径增大磨削量也逐渐增大,在工件的边缘处,磨削量达到最大值。从计算中可以得出,材料的去

$$z(r) = 2k \int_0^{2\pi} (p_0 - Kr \cos\theta) [e^2 m^2 + r^2 (m-1)^2 + 2rem(m-1) \cos\theta]^{1/2} d\theta, \quad (10)$$

露边部分材料的磨削量函数 $z(r)$ 可表示为:

$$z(r) = 2k \int_0^{\theta_m} (p_0 - Kr \cos\theta) [e^2 m^2 + r^2 (m-1)^2 + 2rem(m-1) \cos\theta]^{1/2} d\theta, \quad (11)$$

式(11)中, $\theta_m = \pi - \arccos \frac{R_1^2 - r^2 - e^2}{2er}$

通过仿真分析,计算偏心距 $e=460$ mm,转速

除效率随着转速比的增大而增加,但相对材料去除量变化不大。当抛光盘和工件的转速相等时,工件表面各个位置的磨削量都相等,即磨削均匀。

对于图 4 中其它两种情况(露边),压强在整个面上从里到外呈递增的线性分布。此种情况下压强是变化的,且为时间 t 的函数,则在工件旋转一周的时间内未露边部分的材料磨削量函数 $z(r)$ 可表示为:

比 m 分别为 0.8、1.0、1.5、2.0 时,沿工件径向磨削量函数 $z(r)$ 的归一化分布曲线,如图 6(a)~(d)所示。

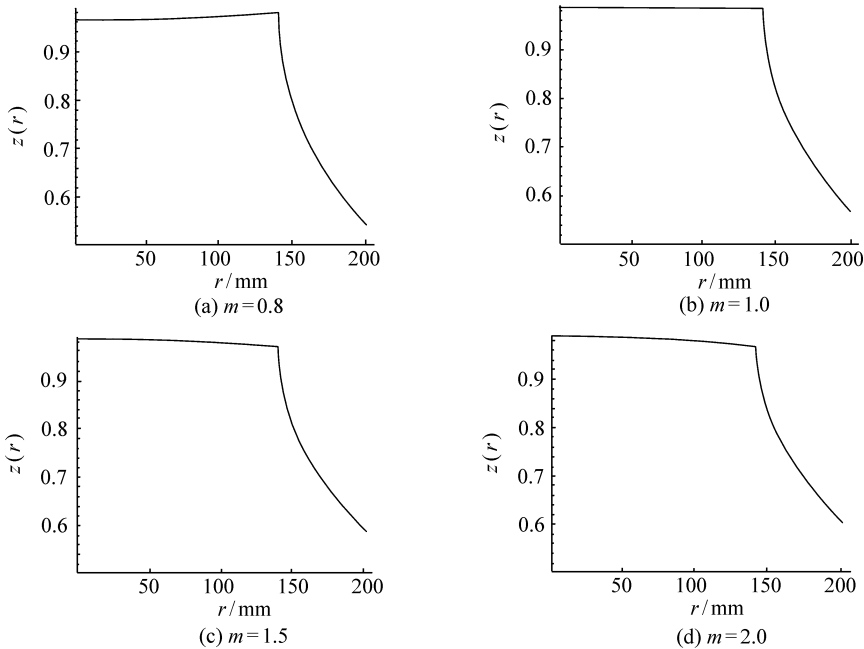


图6 归一化磨削量分布曲线

Fig.6 Normalized removal distribution curves

从图 6 中可以看出,当转速比 $m < 1$ 时,工件不露边区域材料的去除量随半径的增大而增加,工件露边区域材料的去除量随半径增大而迅速减少;当转速比 $m = 1$ 时,工件不露边区域材料的去除量比较均匀,工件露边区域材料的去除量随半径增大而迅速减少;当转速比 $m > 1$ 时,工件不露

边区域材料的去除量随半径的增大而减小,工件露边区域材料的去除量随半径增大而迅速减少。因此,可以通过调整工件的偏心距来控制边缘部分材料的去除,从而有效地抑制材料在加工过程中产生的边缘效应。

3 实验结果及数据分析

3.1 实验过程

以 1.2 m 环带抛光机加工 $\Phi 400 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ 反射镜为实验对象。抛光机环带宽度为 500 mm,校正板外形尺寸为 $\Phi 650 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,抛光盘沥青厚度约为 10 mm。抛光过程大致可以分为两个阶段:

(1)初抛光:去除表面的砂眼及划痕等表面疵病,改善表面粗糙度,将光学表面的光圈抛修至 1 个光圈左右,该阶段的检测手段主要是样板检验;

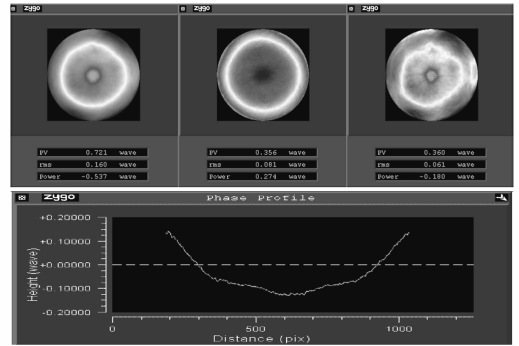
(2)精抛光:表面面形的修正,即光学表面抛修至工件的技术指标要求,该阶段的检测手段主要是利用干涉仪进行干涉检验。

在精抛光过程中,采用 ZYGO 数字激光干涉仪作为检测手段,分析材料的去除量与各影响因素之间的关系。利用干涉仪 MetroPro 软件,可以检测出抛光前后镜面面形误差变化,即用抛光后面形数据减去抛光前面形数据,得到此次抛光过程中材料去除量分布。

3.2 实验结果及数据分析

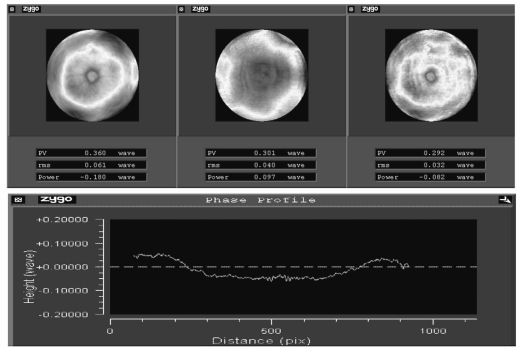
在加工过程中,进行了多次参数调整及面形检测试验,在文中给出了两组典型面形误差的参数控制和面形检测数据的抛光实验记录。表 1 为抛光过程中的工艺参数,两次抛光前后的干涉检

验结果与去除量分布结果如图 7 所示,在每组结果中依次为抛光前面形、材料去除量、抛光后面形及径向材料去除量分布曲线。



(a) 第一组检测结果

(a) Test results in the first group



(b) 第二组检测结果

(b) Test results in the second group

图 7 抛光前后面形误差及材料去除量分布

Fig. 7 Results of surface error and material removal distributions

表 1 抛光实验的参数控制

Tab. 1 Parameters of polishing experiment

抛光次数	抛光盘转速 (r/min)	校正板偏心距 e_c (mm)	校正板转速 (r/min)	工件偏心距 e_w (mm)	工件转速 (r/min)
第一组	2.6	370	1.8	460	4
第二组	2.6	350	1.8	400	2

通过理论与实验综合分析可得出:

(1)通过校正板转速主动控制有助于抛光盘的面形修正。抛光盘由低圈改高圈时,校正板减速,抛光盘加速,使转速比 $m > 1$;高圈改低圈,则反之。

(2)对于被抛光工件而言,转速比和偏心距增加都会提高抛光的效率。当工件不露边时,偏

心距越大材料去除得越均匀。

(3)当工件露边时,随着偏心距的增大,未露部分去除效率提高,露边部分去除效率降低,但容易导致磨削不均匀,出现环带误差。因此,实际加工过程中要根据实际塌边的范围来选择露边量的大小。

(4)当抛光盘的面形不好时,调整工件转速

对工件抛光面形影响不大,说明抛光盘的面形好坏决定了工件的面形。当抛光盘面形比较好且工件面形精度接近技术指标要求时,调整工件转速和偏心距可以使工件的面形得到有效的收敛,提高抛光的效率。

从参数变化和检测结果可以看出:实验结果与理论分析的趋势相一致,但实际磨削量和理论磨削量还存在一定的偏差,这主要由于环带抛光工艺是多种因素相互作用的过程,而理论模型是建立在主要影响因素的基础上的。

4 结 论

本文研究了环带抛光技术中转速比、偏心距和压强分布与磨削量之间的相互关系。根据 Preston 方程,建立了材料去除量与其影响因素之

间相互关系的数学模型,转速比、偏心距和压强分布对磨削量均有影响,转速比和偏心距越大,材料的去除效率越高。在工件不露边的情况下,压强呈均匀分布,转速比 m 越接近于 1,材料的磨削越均匀,转速比不等于 1 时,材料去除量从中心到边缘逐渐增加,但相对去除量变化不大;在工件露边的情况下,压强从工件内侧向外侧呈线性递增分布,露边部分材料的去除量下降得比较快。

以上提到 3 种因素是环带抛光技术的最主要影响因素,但环带抛光是多种影响因素相互作用的过程,该理论模型的研究为实际工作提供了较好的参考和理论指导,有助于环带抛光技术的完善。在实际的加工中,由于工艺影响因素复杂,还需要理论分析与实际情况相结合,来完成实际的工作。

参考文献:

- [1] 王权陡,余景池,张峰. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较[J]. 光学 精密工程,1999,7(5):73-80.
WANG Q D, YU J CH, ZHANG F. Comparing the feature of small polishing tools in different movement style[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5):73-80. (in Chinese)
- [2] 高宏刚,陈斌,曹健林,等. 超光滑光学表面加工技术[J]. 光学 精密工程,1995,3(4):7-14.
GAO H G, CHEN B, CAO J L, et al. . Ultra-smooth optical surface manufacturing technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(4):7-14. (in Chinese)
- [3] 丁凌艳,戴一帆,陈善勇. 平面子孔径拼接测量技术[J]. 光学 精密工程,2008,16(6):978-985.
DING L Y, DAI Y F, CHEN SH Y. Experiments of sub-aperture stitching interferometry for flat mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):978-985. (in Chinese)
- [4] 王贵林. SiC 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2002.
WANG G L. A study on key techniques in ultra-precision lapping and polishing for optical SiC materials[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [5] JONES R A. Computer controlled optical surfacing with orbital tool motion[J]. *Opt. Eng.*, 1986, 25(6):59-62.
- [6] LUNA-AGUILAR E, CORDERO-DAVILA A, GONZALEZ J. Edge effects with Preston equation[J]. *SPIE*, 2003, 4840:598-603.

作者简介:李俊峰(1980—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事先进光学制造与检测方面的研究。

E-mail:ljf220@sohu.com

通讯作者:宋淑梅(1963—),女,研究员,主要从事先进光学制造与检测方面的研究。E-mail:smsong@ciomp.ac.cn