

弹性球状小磨头加工 Wolter 型 掠入射反射镜的去除函数

王永刚^{1,2}, 崔天刚^{1,2}, 马文生¹, 陈斌¹, 陈波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 提出用弹性球状小磨头以旋进方式加工 Wolter 型反射镜的柱面内表面, 根据 Preston 方程、Hertz 接触理论和掠入射反射镜特殊的柱面结构, 推导出基于旋偏动模式的磨头去除函数理论模型。实验结果表明, 理论去除函数曲线与实验曲线的均方根距离偏差为 0.101 22 μm, 偏差比值为 9.8%。分析验证了不同旋偏角对去除函数的影响并与理论模拟结果进行了比较。结果显示, 随着旋偏角的增大, 最大去除值位置逐渐向 y 轴正方向偏移。不同的旋偏角, 最大理论去除深度与最大实际去除深度的均方根偏差为 0.201 μm; 最大理论去除位置与最大实际去除位置的均方根偏差为 0.255 mm。旋偏角越大, 材料去除量就越多, 去除函数也越显对称。实验结果很好地验证了去除函数理论模型的准确性, 该模型可指导 Wolter 型掠入射反射镜的加工, 实现确定性材料去除。

关键词: Wolter 型掠入射反射镜; Preston 方程; 弹性球状小磨头; 旋偏动模式; 去除函数; 赫兹接触理论

中图分类号: T Q171.684 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0010

Removal function for fabrication of Wolter grazing mirror by elastic ball tool

WANG Yong-gang^{1,2}, CUI Tian-gang^{1,2}, MA Wen-sheng¹, CHEN Bin¹, CHEN Bo¹

(1. 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: A novel technology for fabricating Wolter grazing mirrors by an elastic ball tool was described in this paper. According to the Hertz contacting theory and Preston equation, a removal function model for tool movement on a cylinder surface was established based on the precession motion. The comparison of the theoretical model and the experimental results shows that the RMS distance warp between the theoretical removal function curve and the experimental curve is 0.101 22 μm, and its deflection ratio is 9.8%. Furthermore, the effect of different precession angles on the removal function was validated, which points out that the larger the precession angle is, the more the material are removed and the max removal point moves to the centre of contact area closely. With different precession angles, the rms deviation of max removal depth is 0.201 μm and the rms position deviation of

收稿日期: 2010-02-09; 修订日期: 2010-04-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10878004)

max removal depth is 0.255 mm. The experimental results verify the feasibility of the theoretical model of removal function. The model can direct the fabrication of Wolter grazing mirrors and can realize the deterministic material removal.

Key words: Wolter type grazing mirror; Preston equation; elastic ball tool; precession motion; removal function; Hertz contact theory

1 引言

近地空间环境与人类的生活息息相关, 而空间环境状态的改变直接受太阳活动的影响和调制。当太阳爆发时, 其 X 射线波段辐射特征变化十分显著, 因此, 观测太阳 X 射线辐射对研究太阳活动的形成、发生和发展具有重要意义。目前, 许多国家相继在气象卫星上搭载太阳 X 射线成像仪对太阳活动以及其它天体活动进行监测和科学研究^[1], 采用的 X 射线成像仪多为 Wolter I 型结构, 该结构由一个旋转抛物面和一个旋转双曲面组成同轴共焦系统, 通过两次反射, 实现对 X 射线的聚焦成像, 并获得较高的成像分辨率。

传统的光学元件表面一般为平面或者小曲率的球面和非球面。加工这些表面, 一般采用平转动或行星运动的方式来获得磨头的去除函数^[2-6]。最近几年, 也有一些研究人员采用磨头旋进的方式来获得去除函数^[7-13]。旋进法可以加工各种平面, 球面以及非球面表面, 亚利桑那大学的工作小组就利用这种方法成功地加工出了六边形的 2 m 级反射镜主镜, 最终的 PV 面形精度达到 $\lambda/10$, RMS 面形精度达到 $\lambda/50$ ($= 600 \text{ nm}$)^[9]。目前, 磨头平转动或行星运动去除方式已不再适用于加工 Wolter 型掠入射反射镜特殊的近似柱面结构, 旋进方式虽可以用来加工柱面内表面, 但是目前已有的文献只讨论了小磨头作用在平面上或小曲率非球面上($R \gg r$, R 为工件的曲率半径; r 小磨头半径) 的去除函数理论模型^[2-3], 尚未见有讨论磨头加工柱面内表面时的去除函数。针对上述研究现状, 本文使用自研的长程轮廓仪系统作为测量材料去除轮廓和表面轮廓的设备^[16], 基于 Preston 方程, 提出了弹性球状小磨头数控加工 Wolter 型掠入射反射镜时去除函数的理论模型。通过实验值与理论模型模拟的去除函数进行比较, 分析了不同旋偏角对去除函数的影响。

理论模型的建立

描述光学表面成型比较成功的模型是 Preston 方程:

$$R(x, y) = K \int p(x, y) v(x, y) dt, \quad (1)$$

其中, $R(x, y)$ 为磨头与工件接触区域内任意点在 (x, y) 单位时间内的材料去除量; K 表示比例系数, 与加工过程有关, 如温度、磨头材料、抛光磨料等; $p(x, y)$ 表示 (x, y) 点的瞬时相对压强; $v(x, y)$ 表示 (x, y) 点的瞬时相对速度。

实验获得去除函数时, 工件保持静止, 球状小磨头作用在工件表面并压下一定深度, 同时绕过球心的旋转轴以角速度 ω 旋转。磨头与工件的接触面为曲面, 即为磨头对工件的去除面, 如图 (1), (2) 所示。

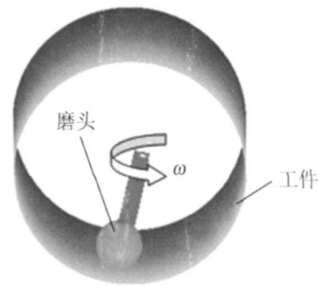


图 1 磨头与工件接触示意图

Fig. 1 Sketch of tool contacting with workpiece

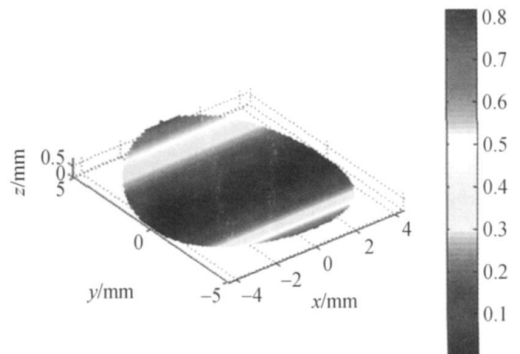


图 2 磨头作用工件的去除表面

Fig. 2 Contact area of real removal surface

考虑磨头与工件的接触面为曲面, Preston 方程应修正为:

$$R(x, y, z) = K p(x, y, z) v(x, y, z), \tag{2}$$

K 为常数, 为了求得曲面上任一点的 (x, y, z) 的去除量, 分两步分别确定接触表面上的压力分布函数 $p(x, y, z)$ 和速度分布函数 $v(x, y, z)$ 。

为了理论计算的方便, 把加工过程简化为如图(3)所示的模型。磨头旋转轴与 Z 轴的夹角为旋偏角。

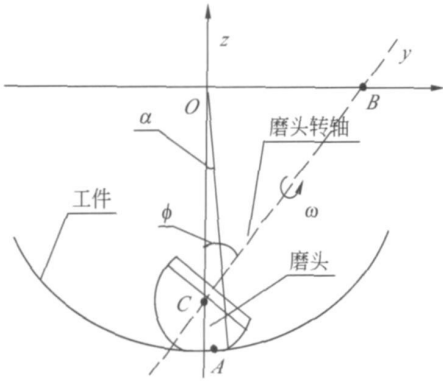


图 3 磨头作用工件的几何示意图

Fig. 3 Geometric sketch of tool contacting with workpiece

1 确定压力分布函数

为了讨论方便, 将 Wolter I 型结构的反射镜简化成柱面模型, 磨头简化为球面模型。模型如式(3), (4) 所示:

球面方程:

$$x^2 + y^2 + (z + l)^2 = r^2, \tag{3}$$

柱面方程:

$$y^2 + z^2 = R^2, \tag{4}$$

其中, r 为磨头半径, R 为柱面半径, l 为球心与柱面中心间距离。

根据 Hertz 接触理论^[14-15], 柔性物体与刚体接触时, 接触面上各点的单位压力大小与材料的变形量有关, Z 轴上的变形量大, 故沿 Z 轴将产生最大单位压力 p_0 , 其余各点的单位压力 p 是按接触面规律分布的, 如下式所示

$$\left[\frac{p(x, y, z)}{p_0} \right]^n + f(x, y, z) = 1, \tag{5}$$

式中 n 为压力分布修正因子, 根据不同的材料特性, 可以由实验获得; $f(x, y, z)$ 为接触面方程, 在 (x, y) 平面上展开后为椭圆面, 所以 $f(x, y, z)$ 必须满足式(4)和式(6):

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} = 1, \tag{6}$$

其中: $x_0 = \sqrt{r^2 - (R - l)^2}$

$$y_0 = r \arcsin \left[\frac{1}{2lR} \sqrt{4l^2 R^2 - (r^2 - R^2 - l^2)^2} \right]$$

选择适当的参数值, 利用式(5), (6) 模拟了三维曲面上的压力分布数值解, 如图(4) 所示。图中三维曲面为接触面, 面上的色度分布表示相应的压力分布。可以看出, 接触面的中心位置压力最大, 即为最大中心压力; 压力按照一定的规律从接触中心点向边缘部分逐渐衰减为 0。

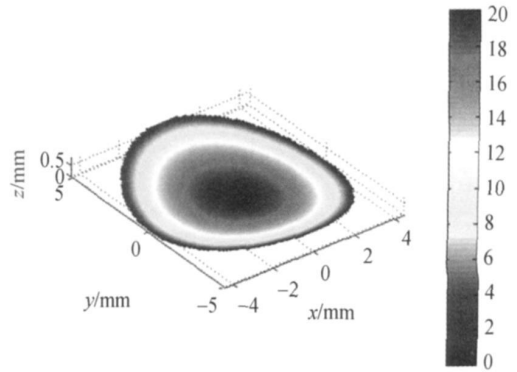


图 4 接触曲面上的压力分布图

Fig. 4 Pressure distribution on contact area

速度分布函数

材料去除量只和磨头与工件的相对速度相关。由图(3) 可知, 磨头旋转轴线和坐标的 2 个交点分别为 $B(0, l \tan \alpha, 0)$, $C(0, 0, -l)$ 。磨头的旋转角速度为 ω , 所以接触面上的速度标量分布为:

$$v(x, y, z) = h(x, y, z), \tag{7}$$

其中 $h(x, y, z)$ 为接触面上任意点 $A(x, y, z)$ 到磨头转轴的距离。根据空间点到直线的距离公式得到:

$$h = 2 \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} / c, \tag{8}$$

其中 $s = \frac{a+b+c}{2}$; a, b, c 分别为 AB, AC, BC 的长度。

选择相应的参数值, 利用公式(7), (8) 模拟了三维曲面上的速度分布数值解, 如图(5) 所示。图中三维曲面为接触面, 面上的色度分布表示相应的速度分布。可以看出: 接触面的速度沿 y 轴正方向上逐渐增大, 且关于 y 轴对称。

由式(5), (7) 求出接触表面上的压力分布函

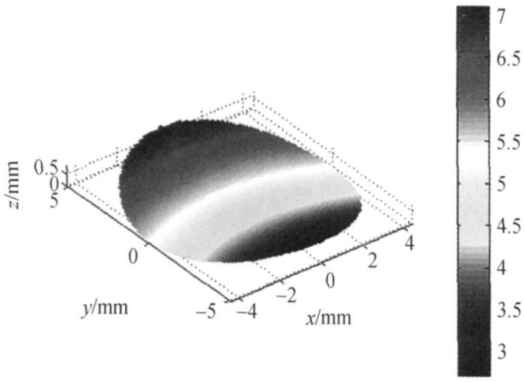
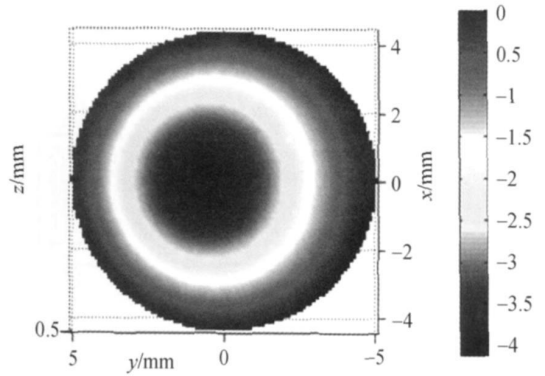


图 5 接触表面上的速度分布图

Fig. 5 Velocity distribution on contact area



(b) 俯视图

(b) Top view

图 6 接触表面上去除函数模拟图

Fig. 6 Simulation graph of removal function on contact area

数 $p(x, y, z)$ 和速度分布函数 $v(x, y, z)$ 后, 根据式(2)就可以求出旋偏动模式下球形磨头加工柱面的去除函数分布, 如下式:

$$R(x, y, z) = K \cdot p_0 \cdot \sqrt[3]{1 - f(x, y, z)} \cdot h(x, y, z), \quad (9)$$

根据加工实际情况, 令 $l = 60.5 \text{ mm}$, $r = 20 \text{ mm}$, $R = 80 \text{ mm}$, $n = 80 \text{ r/min}$, $\omega = 300$, p_0 为 20 个压力单位。利用式(9)模拟出在上述条件下的磨头去除函数, 如图(6)所示。

图 6 中三维曲面为接触面, 面上的色度分布表示相应的去除深度分布。可以看出, 中间去除多, 边缘去除少, 材料去除是关于 y 轴对称的, 对 x 轴是不对称的, 如图(7)所示。由于速度分布不均衡, 材料最大去除点位置不在磨头和工件表面接触面的中心, 而是向 y 轴正方向偏移, 所以在下面讨论中只选取了 y 轴方向的去除函数。

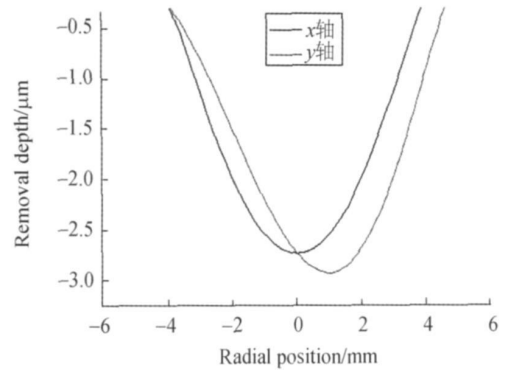


图 7 去除函数在 x, y 轴上的剖面图

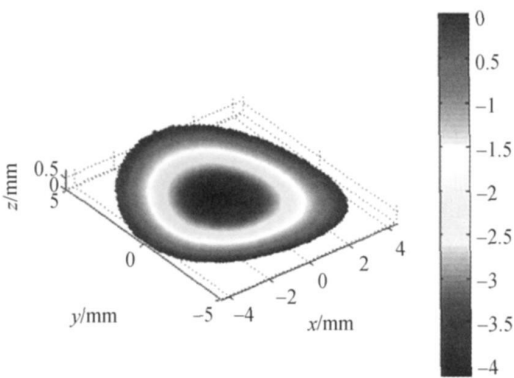
Fig. 7 Cross section of removal function on x and y axes

3 实验验证及分析

加工 Wolter I 型掠入射反射镜的实验装置如图(8)所示。这是一个五轴联动的数控加工平台, 利用这台设备开展了弹性球状小磨头数控加工 Wolter I 型掠入射反射镜去除函数工艺的研究。

选择微晶玻璃为反射镜材料, 粒径为 $5 \mu\text{m}$ 的氧化铈作为抛光磨料。测量材料去除的设备为自研的长程轮廓仪^[16], 采样间隔为 0.2 mm , 中心孔半径为 80 mm 。实验中保持工件静止, 磨头的旋偏角为 30° , 旋转角速度为 80 r/min , 抛光 8 min 后, 测量其沿 y 轴的去除轮廓如图(9)所示。

对测量结果进行低频拟合后, 将实验测量值与理论模拟值相比较。如图(10)所示, 去除量最大值不在中心零点位置, 而是向 y 轴正方向偏



(a) 侧视图

(a) Side view

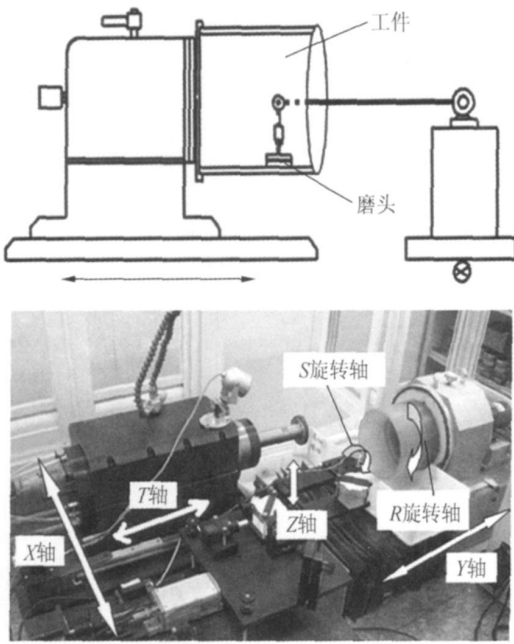


图 8 去除函数实验装置图

Fig. 8 Experimental equipment for obtaining removal function

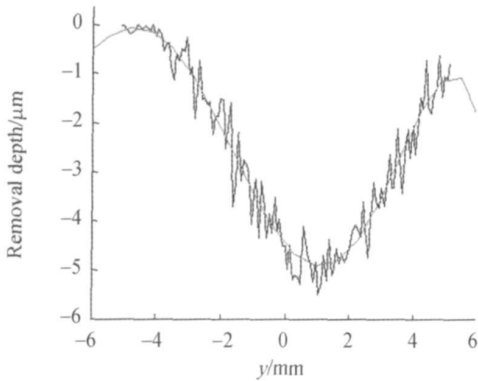


图 9 Y 方向去除轮廓实验测量值

Fig. 9 Experimental result of removal profile in Y axis

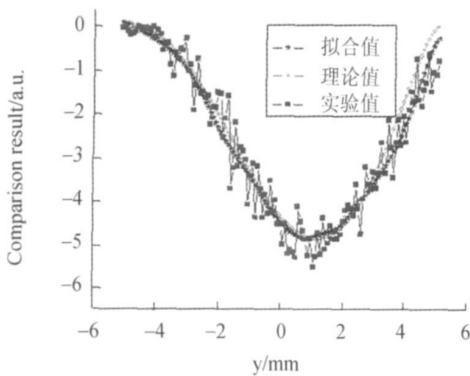
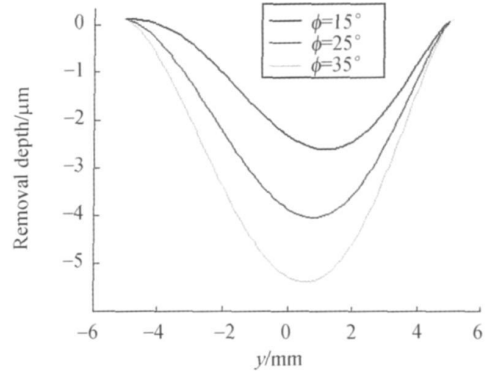


图 10 实验测量值与理论模拟值比较

Fig. 10 Comparison of experimental and theoretical results

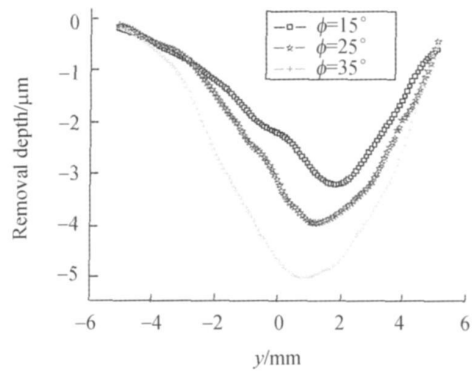
移。通过计算, 获得两曲线标准偏差为 $\sigma = 0.10122$, 其与最大理论去除率的比值为 $\frac{\sigma}{R_{max}} = 9.8\%$ 。虽然二者有些许差别, 但整体来看吻合度还是较高的。这也直接验证了去除函数理论模型的准确性。

在其他参数不变的情况下, 比较了单位时间内不同旋偏角对去除函数的影响, 如(11)所示。



(a) 理论模拟值

(a) Simulation values



(b) 平滑处理后的实验值

(b) Experimental values by fitting

图 11 不同的旋进偏角对去除函数的影响

Fig. 11 Effect of different precession angles on removal function

从图(11)可以看出, 随着旋偏角的增大, 最大去除值位置逐渐向 y 轴正方向偏移。旋偏角的大小不但影响去除函数的分布, 而且影响去除量的大小。从表 1 可以看出, 最大理论去除深度与最大实际去除深度的均方根偏差为 $0.201 \mu\text{m}$; 最大理论去除位置与最大实际去除位置的均方根偏差为 0.255 mm 。旋偏角越大, 材料去除量就越多, 去除函数也越显对称, 因此, 实际加工中应尽

量选择较大的旋偏角。

表 1 旋进偏角对去除函数的影响

Tab. 1 Effect of different precession angles on removal function

旋偏角/(°)		15	25	35
最大去除	理论值	2.569	3.920	5.187
深度/ μm	实验值	3.009	3.756	4.838
最大去除	理论值	1.147	0.834	0.522
位置/ mm	实验值	1.762	1.214	0.809

4 结 论

针对 Wolter 型掠入射反射镜特殊的近似柱面结构,选择弹性球状小磨头旋进方式来加工柱面内表面。基于 Hertz 接触理论,求出磨头和工件接触面的压力分布。根据 Preston 方程和掠

入射反射镜特殊的柱面结构,推导出基于旋偏动模式的磨头去除函数理论模型。实验结果表明,理论去除函数曲线与实验曲线的标准偏差为 0.101 22,偏差比值为 9.8%。另外,分析验证了不同旋偏角对去除函数的影响并与理论模拟结果相比较。结果显示,随着旋偏角的增大,最大去除值位置逐渐向 y 轴正方向偏移;旋偏角的大小不但影响去除函数的分布,而且影响去除量的大小。针对不同的旋偏角,最大理论去除深度与最大实际去除深度的均方根偏差为 0.201 μm ;最大理论去除位置与最大实际去除位置的均方根偏差为 0.255 mm。旋偏角越大,材料去除量就越多,去除函数也越显对称。实验结果很好地验证了去除函数理论模型的准确性。该模型能够指导 Wolter 型掠入射反射镜的加工,实现确定性材料去除。

参考文献:

- [1] JAMES R L, DEXTER D, CHRISTOPHER E, *et al.*. Solar X-ray imager for GOES [J]. *SPIE*, 2004, 5171: 65-76.
- [2] 王权陡,余景池,张峰. 数控抛光中不同运动方式下小跑光盘抛光特性之比较 [J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 73-79.
WANG Q D, YU J CH, ZHANG F. Polishing performance comparison of small polishing pad worked in different motion model in computer controlled optical polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 73-79. (in Chinese)
- [3] 王权陡,刘民才,张红霞. 数控抛光技术中抛光盘的去除函数 [J]. *光学技术*, 2000, 26(1): 32-34.
WANG Q D, LIU M C, ZHANG H X. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(1): 32-34. (in Chinese)
- [4] 王旭,张学军. 固着磨料加工碳化硅反射镜的微观理论模型 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 513-518.
WANG X, ZHANG X J. Micro theoretical model for grinding SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 513-518. (in Chinese)
- [5] 王旭,张峰,张学军. 固着磨料抛光碳化硅反射镜的去除函数 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 951-957.
WANG X, ZHANG F, ZHANG X J. Removal function of computer controlled polishing SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 951-957. (in Chinese)
- [6] 王旭,张学军,徐领娣,等. 固着磨料加工碳化硅反射镜的实验 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 771-777.
WANG X, ZHANG X J, XU L D, *et al.*. Experiment of grinding SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 771-777. (in Chinese)
- [7] YACOBS S D. International innovations in optical finishing [J]. *SPIE*, 2004, 5523: 264-272.
- [8] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BROOKS D, *et al.*. Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces [J]. *SPIE*, 2002, 4767: 99-105.
- [9] KIM D W, KIM S W. Novel simulation technique for efficient fabrication of 2 m class hexagonal segments for extremely large telescope primary mirrors [J]. *SPIE*, 2005, 5638: 48-59.
- [10] KIM D W, PARK W H, KIM S W, *et al.*. Parametric modeling of edge effects for polishing tool influence functions [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5656-5665.
- [11] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BINGHAM R G, *et al.*. The precessions process for efficient pro-

duction of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation [J]. *SPIE*, 2003, 4842: 73-84.

[12] KIM D W, KIM S W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 910-917.

[13] WALKER D D. The Precessions tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces [J]. *Optics Express*, 2003, 11(8): 958-964.

[14] 黄炎. 局部应力及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 591-615.

HUANG Y. *Local Stress and its Application*

[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1996: 591-615. (in Chinese)

[15] JOHNSON K L. *Contact Mechanics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

[16] 崔天刚, 王永刚, 马冬梅, 等. Wolter I型反射镜面形在线检测装置设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1801-1806.

CUI T G, WANG Y G, MA D M, *et al.*. Design of surface profile online measuring device used for Wolter Type I mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1801-1806. (in Chinese)

作者简介:



王永刚(1982-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 主要从事光学加工及表面检测的研究。E-mail: vangernh@126.com



陈斌(1958-), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 于吉林工业大学继续教育学院机械制造工艺与设备专业获工学学士学位, 主要从事超精密加工工艺的研究。chenbin5812@yahoo.com



崔天刚(1983-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事光学设计及非球面表面检测的研究。E-mail: foreverctg@163.com

导师简介:



陈波(1961-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1984年于吉林大学获得学士学位, 2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事软X射线极紫外波段光学和空间光学研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn



马文生(1949-), 男, 吉林磐石人, 高级工程师, 于长春光机学院继续教育学院机械制造工艺与设备专业获工学学士学位, 主要从事超精密加工工艺的研究。E-mail: 439304194@qq.com