

# 具有公自转运动模式的高效轮式抛光工具设计

张毅, 张学军\*, 李锐钢, 李英杰

(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中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了提高光学加工效率, 缩短大口径光学元件制造周期, 本文提出了一种具有公自转运动模式的新型高效抛光方式, 对其结构、工作原理以及去除特性进行了研究。首先, 介绍了公自转抛光装置机械结构及工作原理。接着, 根据 Hertz 接触理论和 Preston 方程进行了去除函数建模, 讨论了不同转速比情况下的去除函数形状。然后, 根据理论模型进行了去除函数实验、工艺参数实验以及稳定性实验, 研究了压入深度、转速等工艺参数对去除结果的影响。最后, 进行了 200 mm 口径 SiC 工件的仿真加工。实验结果表明: 在 2 mm 压入深度、200 rpm 转速情况下, 去除区域直径为 19.23 mm, 体去除率达到  $0.197 \text{ mm}^3/\text{min}$ , 去除效率高于同等去除区域大小的传统小磨头加工方式; 仿真加工结果表明: SiC 仿真镜经过 3.7 h 加工, 面形从  $3.008\lambda \text{ PV}$ ,  $0.553\lambda \text{ RMS}$  提高到  $0.065\lambda \text{ PV}$ ,  $0.005\lambda \text{ RMS}$ , 收敛效率为达到 98.18%。

**关键词:** 光学抛光; 计算机辅助表面成型; 公自转轮式抛光; 去除函数; 高效加工

**中图分类号:** TB133 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20160901.0155

## Design of an high-efficiency wheeled polishing tool combined with co-rotation and self-rotation movement

ZHANG Yi, ZHANG Xue-jun\*, LI Rui-gang, LI Ying-jie

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

**Abstract:** In order to improve the material removal rate and reduce the fabricating cycle of large aperture optical components, a new type of high-efficiency polishing method combined with self-rotation and co-rotation movement is proposed in this paper. The structure, working principle and removal characteristics are studied. First, the mechanical structure and working principle are introduced. According to the Hertz contact theory and Preston equation, the removal function is modeled, and the shape of the removal function of different rotational speed ratio is discussed. Then, according to the theoretical model, the removal function, process pa-

收稿日期: 2015-09-11; 修订日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61036015)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61036015)

rameters and stability experiments are carried out to study the influence of process parameters such as the depth and speed on the removal result. Finally, the fabrication simulation of the 200 mm diameter SiC workpiece is carried out. The experimental results show that the removal rate of the body is  $0.197 \text{ mm}^3/\text{min}$  and the diameter of removal region is 19.23 mm when the pressure depth is 2 mm and the rotation speed is 200 rpm, which is more efficient than the traditional CCOS Technology. After 3.7 hours of simulation polishing, the initial face shape of 200 mm SiC workpiece with  $3.008\lambda\text{PV}$  (Peak-to-valley) and  $0.553\lambda\text{RMS}$  (Root Mean Square) is improved to  $0.065\lambda\text{PV}$ ,  $0.005\lambda\text{RMS}$ , and the convergence efficiency is 98.18%.

**Key words:** optical polishing; computer controlled optical surfacing; co-rotation and self-rotation polishing; removal function; high-efficiency fabrication

## 1 引言

大口径光学系统具有空间角度分辨力高、能量收集能力强的特点,被广泛应用于宇宙深空探测及高精度对地成像等领域。从光学加工角度来讲,大尺寸反射镜意味着在研磨和抛光中需要去除更多的材料<sup>[1-4]</sup>,因此大口径光学镜面对光学加工的效率提出了更高的要求。计算机控制光学表面成型技术(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)出现于20世纪70年代,该技术根据定量的数据检测结果,由计算机控制小磨头对工件表面进行研磨、抛光,并通过控制磨头在工件表面的驻留时间、磨头转速、相对压力等工艺参数来控制工件表面的材料去除量,最终得到满足精度要求的镜面面形。

在广泛应用的CCOS小工具加工中,由于平转动模式限制机械结构不能承载较高的转速,加之磨头尺寸大小限制,导致CCOS小工具加工大口径非球面光学元件效率低。虽然目前也有应力盘抛光技术用于大口径反射镜加工,但由于其面形精度控制难度较大,精抛光阶段收敛效率低,应力盘抛光技术主要用于粗研磨阶段。另外,采用CCOS工具加工光学元件边缘时,去除函数的不完全卷积会产生边缘效应<sup>[5-6]</sup>。虽然有离子束修形方法在理论上可控制边缘效应,但离子束成形技术加工时间较长,加工效率低,面形误差收敛慢<sup>[7]</sup>。

针对传统CCOS小工具加工大口径光学元件效率低,面形收敛能力差,易产生边缘效应的问题

题<sup>[8]</sup>,本文提出了一种新型公自转轮式抛光技术,并完成其机械结构设计和去除函数的理论建模。通过工艺实验验证了该抛光方法具有材料去除高、去除函数稳定等优点。仿真加工证明该装置具有很高的面形收敛效率和加工效率。

## 2 公自转抛光装置研究背景及其结构与工作原理

### 2.1 国内外研究现状

目前轮式抛光技术研究较少,仅在一些特殊形状工件内表面抛光时使用过类似方式,如Mingyang Yang等人<sup>[9]</sup>和Fang-jung Shiou等人<sup>[9]</sup>均使用球形磨头对钢材磨具内表面,抛光原理如图1所示。

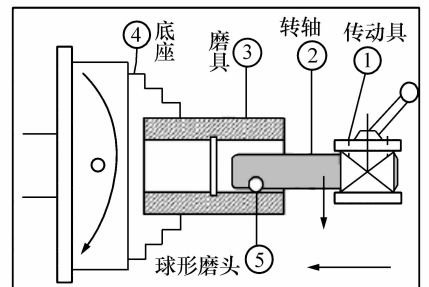


图1 使用球形磨头抛光磨具内表面

Fig. 1 Inner surface polishing of abrasive tool with spherical head

德国Optotech公司生产的MCG 150抛光机使用抛光轮自转配合工件转台转动,实现4轴联动,抛光轮转速可达20 000 rpm,工件转速可达

1 500 rpm,可以抛光 10 ~ 200 mm 口径非球面工件,如图 2 所示。

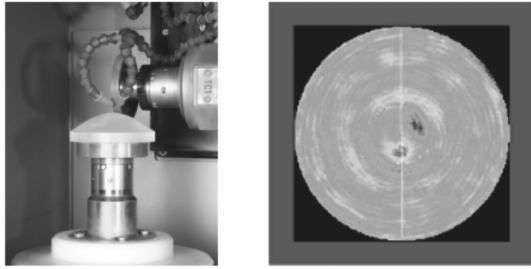


图 2 MCG 150 研磨机  
Fig. 2 MCG 150 CNC

然而目前国外关于将类似结构抛光技术用于大口径 SiC 材质反射镜制造中的研究较少,而且详细机械结构也没有披露,因此该技术具有相关研究价值。

### 2.2 公自转抛光装置结构

如图 3 所示,公转和自转分别由两个电机驱动,轮式抛光磨头角速度为  $\omega(0, \omega_y, \omega_z)$ ,  $\omega_y$  为其自转角速度,  $\omega_z$  为其公转角速度。在抛光过程中调节两个电机之间转速比可以得到不同的公转自转速度之比,进而得到不同形状的去除函数。

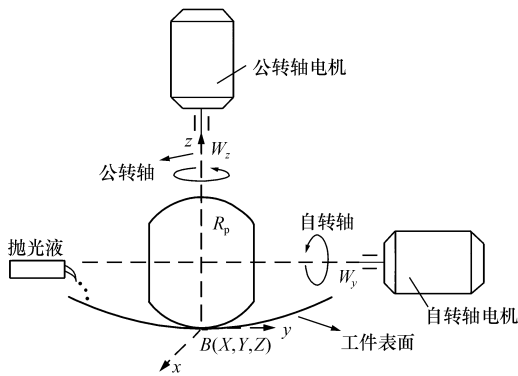


图 3 公自转轮式抛光装置结构简图  
Fig. 3 Structure sketch of the co-rotation and self-rotation wheeled polishing device

公自转轮式抛光装置机械结构如图 4 所示<sup>[9]</sup>,装置包括两个电机,左侧电机提供公转速度,同时通过传动齿轮驱动抛光轮自转;右侧电机通过皮带与公转轴相连,右侧电机可以用来补偿或抵消公转速度,从而实现不同公转自转转速比。整个装置集成在具有三轴联动能力的 HAAS V2

机床上实现非球面加工能力。

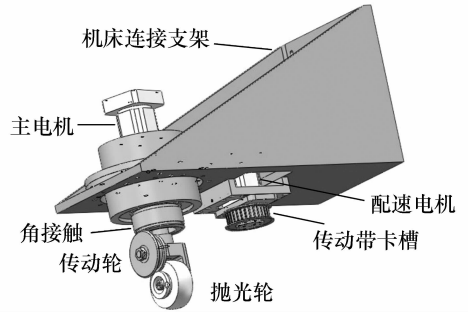


图 4 公自转轮式抛光装置机械结构  
Fig. 4 Mechanical structure of the co-rotation and self-rotation wheeled polishing device

### 2.3 抛光磨头结构

如图 5 所示,轮式磨头结构分三层:刚性主体部分、过渡柔性部分、抛光工作层。刚性主体部分采用高刚度钢材主要起骨架和接口的作用;过渡柔性层采用可注塑硅橡胶材料,它具有适当的刚度,可保证抛光垫的去膜特性,同时具有柔性,可保证抛光垫与工件良好吻合。抛光工作层采用聚氨酯抛光垫,使用硅橡胶粘合剂贴附在球模上。为了使磨头不与齿轮支架干涉,获得尽可能大的去除函数,束径选取抛光轮半径为 90 mm 的球形轮廓抛光轮,轮宽为 50 mm。

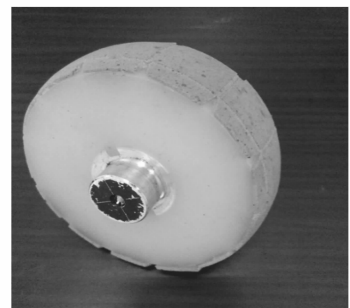


图 5 抛光磨头实物图  
Fig. 5 Photograph of the polishing head

## 3 公自转轮式抛光装置去除函数仿真

### 3.1 Preston 假设

光学表面加工受多种因素影响,定量控制比较困难。多年来光学加工人员一直在探索材料去

除量与各种影响因素之间的关系。但到目前为止,描述光学加工最成功的模型仍是早年提出的 Preston 假设:

$$\Delta Z(x,y) = KP(x,y)V(x,y), \quad (1)$$

式中,  $\Delta Z(x,y)$  为磨头接触点材料去除量,  $P(x,y)$  为磨头对工件的正压力,  $V(x,y)$  为磨头与工件间的相对运动速度,  $K$  为与加工参数相关的比例常数。去除函数也可表示为:

$$R(x,y) = \frac{1}{T} \int_0^T KP(x,y)V(x,y) dt. \quad (2)$$

本节将在普利斯頓方程基础上,结合弹性力学和运动学原理完成公自转轮式抛光方式去除函数建模以及计算机仿真。

### 3.2 去除区域压力分布

假设磨头与镜面为弹性接触,以接触点  $O$  为原点建立坐标系,以磨头与镜面接触面的公切面为  $xy$  平面,  $z$  轴方向指向磨头内部。以此建立  $xyz$  坐标系,如图 6 所示。

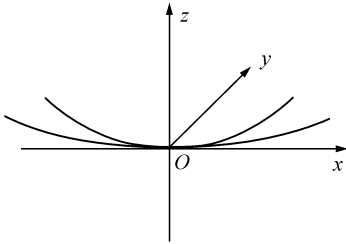


图 6 轮式磨头接触区域简图

Fig. 6 Principle sketch of the polishing head's contact area

根据 Hertz 接触理论,一个刚性半空间与一个主曲率半径为  $R_1$  和  $R_2$  的弹性体之间接触,产生的接触面为椭圆<sup>[10-11]</sup>。接触区域边界方程为:

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1, \quad (3)$$

式中,  $a = \sqrt{R_1 d}$  为椭圆长轴,  $b = \sqrt{R_2 d}$  为椭圆短轴,  $d$  为压入深度。接触区域应力分布为:

$$P(x,y) = P_0 \left[ 1 - \left( \frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式中,  $P_0$  为峰值压强,根据 Hertz 理论近似为:

$$P_0 = \frac{3F}{2\pi ab}. \quad (5)$$

由于抛光轮磨头为球形,所以其主曲率半径  $R_1 = R_2$ ,接触区域为圆形。考虑到实际磨头为三层结构,对式(4)进行修正表述为<sup>[12-14]</sup>:

$$P(x,y) = \frac{5F}{2\pi a^2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} \right) \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

$$a = \sqrt{R_p d}, \quad (7)$$

式中,  $R_p$  为抛光轮半径,在压入深度  $d = 2$  mm 时,根据式(7)可知接触区域圆半径为 9.49 mm,归一化压力分布使用 Matlab 软件仿真,如图 7 所示,可以看出压力分布呈存在中心峰值的类高斯型分布。

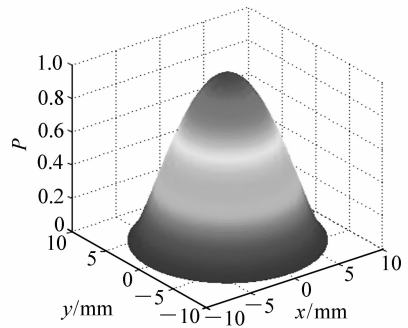


图 7 接触区域归一化压力分布

Fig. 7 Normalized pressure distribution in the contact region

### 3.3 去除区域速度分布

公自转磨头半径为  $R_p$ ,绕  $z$  轴以角速度  $\omega_z$  公转,同时以角速度  $\omega_y$  自转。由于接触区域束径较小,所以曲率半径变化较小,可以简化为平面,基础区域轮廓视为圆形。其接触区域运动分析如图 8 所示。

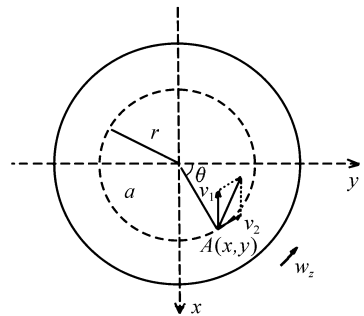


图 8 公自转轮式磨头运动分析

Fig. 8 Analysis of the polishing head's movement

因为接触区域简化为平面,磨头在整个接触区域内自转产生的速度可以看作相等,接触区域某点  $A(r, \theta)$  的速度  $v$  可以表示为自转产生线速度  $v_1$  和公转产生的线速度  $v_2$  的合速度,其中:

$$\begin{aligned} v_1 &= \omega_y \cdot R_p, \\ v_2 &= \omega_z \cdot r \end{aligned} \quad (8)$$

合速度  $v$  表示为:

$$v = \sqrt{(\omega_y R_p)^2 + (\omega_z r)^2 + 2\omega_y R_p \omega_z r \cos\theta}. \quad (9)$$

当  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ,  $R_p = 45 \text{ mm}$ , 压入深度  $d = 2 \text{ mm}$ , 自转速度  $\omega_y = 100 \text{ rpm}$ , 公转速度为  $\omega_z = 50 \text{ rpm}$  时, 合速度分布如图 9 所示。可见, 在公转角速度不大时, 抛光区域速度分布比较均匀, 其对速度分布影响较弱, 主要起到平滑刀痕降低高频误差作用。

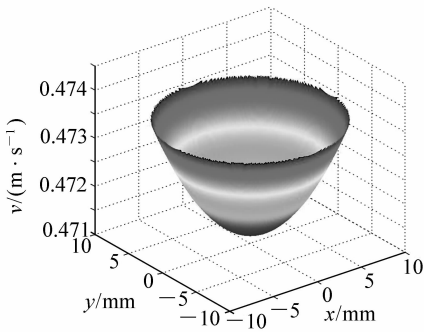


图 9 磨头接触区域速度分布

Fig. 9 Velocity distribution in the contact region of polishing head

### 3.4 去除函数模拟

根据 Preston 方程联立式(6)和式(9)可以得到去除函数<sup>[15]</sup>:

$$R(r) = \frac{k_w P_0}{\Omega_0} \int_0^{\Omega_0} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{(\omega_y R_p)^2 + (\omega_z r)^2 + 2\omega_y R_p \omega_z r \cos\theta} d\theta. \quad (10)$$

式中,  $K_w$  为与加工参数相关的比例常数。

可以看出去除函数是中心对称的。使用 MATLAB 软件仿真不同转速比情况下的去除函数, 如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 当自转角速度  $\omega_y$  为 0 时, 由于去除区域中心速度为 0, 去除函数呈现倒 W

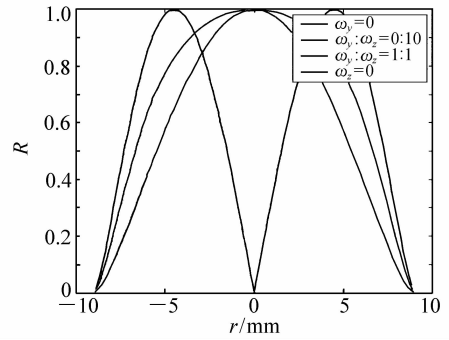


图 10 不同转速比情况下的去除函数形状比较

Fig. 10 Comparison of the removal function under different rotational speed ratio

型分布; 当公转角速度  $\omega_z$  为 0 时, 由于去除区域速度分布均匀, 去除函数分布与压力分布相似; 当自转角速度  $\omega_y$  与公转角速度  $\omega_z$  相差不大时, 此时去除函数形状与公转角速度为 0 时的去除函数形状相似, 可计算去除效率误差不超过 2%。此时公转速度主要起到平滑刀痕降低表面粗糙度的作用; 当公转角速度  $\omega_z$  为自转角速度  $\omega_y$  的 10 倍时, 自转速度与公转速度量级接近, 可以看出去除函数形状更加饱满。

## 4 工艺实验与结果

### 4.1 实际实验条件

由于图 2 所示部分机械结构尚未加工完成, 现使用 HAAS V2 机床加装立卧转换机构, 将垂直于镜面的主轴转速旋转  $90^\circ$ , 变为平行于镜面的转速作为自转速度; 同时配合转台转动作为公转

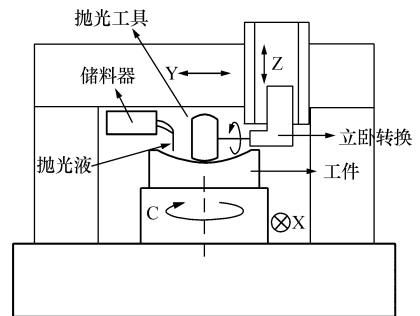


图 11 工艺实验装置结构简图

Fig. 11 Principle sketch of the experimental device

速度。从而实现公自转模式并完成工艺实验,如图 11 所示。

具体实验条件为:加工机床为主轴转速可达 8 100 rpm、转台转速可达 20 rpm 的 HAAS VF2 机床;实验材料为直径为 150 mm 的平面 SiC;磨头为直径 90 mm、宽度 50 mm 的轮式磨头,磨头中间层为邵氏硬度 70A 的硅橡胶,外层粘合聚氨酯抛光垫作为抛光层;抛光液为金刚石微粉水溶液,磨料颗粒大小为  $1.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ ,固液比为 1:2。

#### 4.2 去除函数实验

去除函数实验步骤:先使用干涉仪对初始面形进行测量,并在镜面上标注 3 个参考点,然后进行去除函数实验并记录实验时间,完成后对齐参考点再次测量去除后面形,前后两次面形相减得出去除量,结合去除时间计算出去除函数。

去除函数实验具体实验参数为:轮式磨头转速为 100 rpm,转台转速为 10 rpm;磨头压入深度为 0.5 mm;抛光时间为 24 s。去除函数实验如图 12 所示。

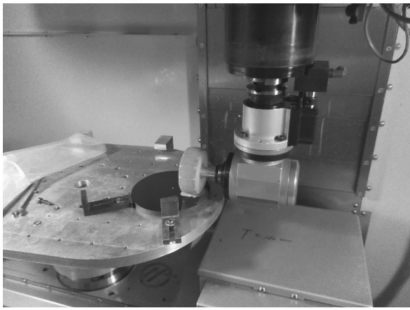


图 12 去除函数实验图

Fig. 12 Photograph of the removal function experiment

抛光前使用干涉仪检测初始面形 PV 值为  $0.353\lambda$ 、RMS 为  $0.023\lambda$ 、平面度良好的平面。经过 24 s 定点去除函数实验,实测去除区域束径为 9.83 mm,使用干涉仪检测抛光区域,zoom 后得到面形分布如图 13 所示。

将抛光实验所得去除函数与仿真得到的去除函数进行归一化比较,如图 14 所示。从图 14 可以看出,实际实验结果与理论模拟具有很好的吻合性,但也可以看出模拟去除函数曲线更加饱满,这种情况主要是由于压力分布模型精度不足造成的。

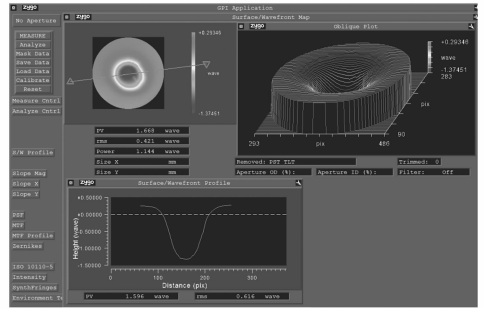


图 13 SiC 加工后去除区域面形

Fig. 13 Removal region surface shape of SiC after polishing

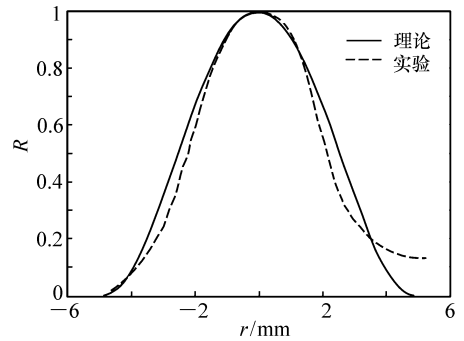


图 14 归一化去除函数实验值与理论值比较

Fig. 14 Comparison between experimental value and theoretical value of normalized removal function

#### 4.3 工艺参数实验

为了确定磨头转速、压入深度等参数对去除函数的影响,规划了多组实验,具体实验条件为:直径为 150 mm 的 SiC 实验件 2 块,每块可进行 7 组单点去除函数实验;抛光液为金刚石微粉水溶液,固液比 1:2;抛光模材料为聚氨酯抛光垫,磨头半径 45 mm;使用 zygo GP1 干涉仪检测面形,对于由于深度过深无法检测的面形使用 LEITZ 三坐标检测仪检测。

由之前分析可知,公转速度对去除结果影响不大,可以忽略,所以转台转速统一选择 10 rpm,以减小无关因素影响。使用干涉仪测量初始面形与加工后面形,使用 MetroPro 软件导出去除区域 xyz 数据,使用 MATLAB 软件计算得出去除区域束径、峰值去除率、体积去除率等实验结果,具体实验参数与结果如表 1 所示。

表 1 工艺参数实验结果

Tab.1 Experimental results of process parameters

实验序号	自转速 度/rpm	压入深 度/mm	转台转 速/rpm	实验时 间/s	去除区域 直径/mm	体积去除效率/ ( $\mu\text{m} \cdot \text{mm}^2/\text{min}$ )	峰值去除率/ ( $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	100	0.5	10	24	9.83	24.21	0.044
2	100	1	10	16	14.16	52.75	0.091
3	100	2	10	8	19.08	111.83	0.172
4	150	0.5	10	24	9.67	33.12	0.069
5	150	1	10	16	14.07	74.25	0.140
6	150	2	10	8	18.67	161.34	0.273
7	200	0.5	10	24	9.75	42.58	0.083
8	200	1	10	16	13.98	89.17	0.173
9	200	2	10	8	19.23	196.67	0.353

4.3.1 压入深度对去除区域大小的影响

根据上述实验结果,研究不同自转速度和压入深度对去除区域大小的影响,在 Origin 实验数据处理软件中画出在不同磨头自转速下去除区域直径 D 和压入深度 1/2 次方的关系并进行拟合,结果如图 15 所示。

从图中可以看出,去除区域直径和压入深度 1/2 次方成正比,斜率拟合为 13.61,与理论计算式(7)的斜率  $2\sqrt{R_p} = 2\sqrt{45} = 13.42$  非常吻合。同时可以看出自转速度对去除区域大小没有影响。

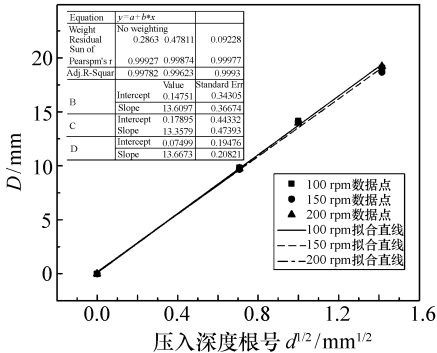


图 15 压入深度对去除区域大小的影响

Fig. 15 Influence of the pressure depth on diameter of the removal area

4.3.2 抛光速度对去除效率的影响

对于压入深度分别为 0.5、1、2 mm 时使用 Origin 软件画出体去除率和抛光速度的关系曲线,如图 16 所示。

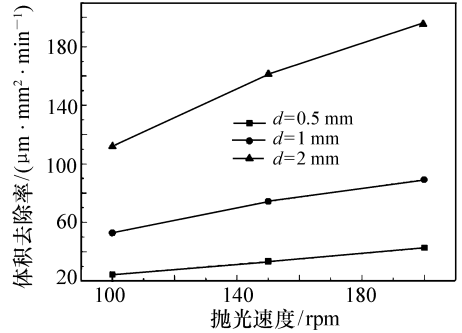


图 16 抛光速度对体积去除率的影响

Fig. 16 Influence of polishing speed on volume removal rate

从图 16 可以看出,材料去除效率与抛光速度接近正比关系,与压入深度呈正相关,与普利斯頓方程表述的材料去除效率与相对速度成正比基本吻合。但是可以看出在抛光速度为 200 rpm 时,材料去除效率增长速度变缓,产生这种现象的原因可能是:随着转速增大,磨头上磨料被甩走量增多,使去除效率增长曲线变缓。

4.3.3 压入深度对去除效率的影响

对于公转角速度为 0 的情况,由之前讨论可知其对于体去除率的影响不足 2%,故忽略公转速度,去除函数表述为:

$$R(r) = \frac{k_w P_0}{\Omega_0} \int_0^{\Omega_0} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}} \omega_y R_p d\theta = k_w P_0 \omega_y R_p \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

体积去除率表述为:

$$Z = \int_0^a R(r) \cdot 2\pi r dr = \frac{2}{5} \pi k_w P_0 \omega_y R_p a^2. \quad (12)$$

通过 Hertz 接触理论将上式化为关于压入深度的公式, 表述为:

$$Z = k_w \omega_y R_p^{\frac{1}{2}} \frac{4E^2}{3(1-\nu^2)} d^{\frac{3}{2}}, \quad (13)$$

式中,  $E$  为硅橡胶弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $R_p$  为磨头半径,  $d$  为压入深度。可见体积去除率与压入深度  $3/2$  次方成正比。以压入深度  $3/2$  次方与体积去除率为坐标使用 Origin 作图如图 17 所示。

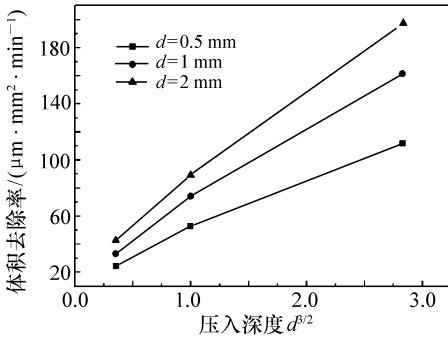


图 17 压入深度对体积去除率的影响

Fig. 17 Influence of pressure depth on volume removal rate

如图 17 所示, 体积去除效率随压入深度  $3/2$  次方增长而增长, 但并非成正比线性关系, 而是随着压入深度变大而出现增长变缓的情况。这种情况成因是由于随着压入深度的增加, 磨料逐渐被挤向外侧, 中心区域的磨料颗粒减少使抛光能力下降, 造成去除率增长趋势变缓。

#### 4.3.4 去除效率评价

由式(13)可知, 体积去除率跟自转速度成正比, 跟压入深度  $3/2$  次方成正比。由表 1 可知, 在自转速率为 200 rpm、压入深度为 2 mm 时, 体积去除率为  $196.67 \mu\text{m} \cdot \text{mm}^2/\text{min}$ 。由此可以得出体积去除率与自转速度和压入深度的关系, 如图 18 所示。

从图 18 可以看出, 在压入深度为 10 mm、转速为 600 rpm 时, 体积去除率高达  $6.59 \text{mm}^3/\text{min}$ , 基本满足大口径 SiC 反射镜的粗抛光阶段的加工能力要求。

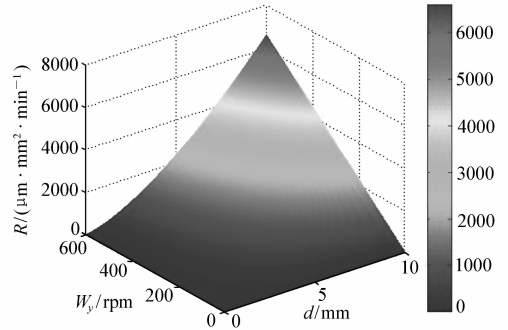


图 18 压入深度与自转速度对体积去除率的影响  
Fig. 18 Influence of polishing speed and pressure depth on volume removal rate

为了客观评价本文加工方式的去除效率, 选用结构较为相似的气垫抛光方式进行比较, 张伟等人<sup>[16]</sup>提出采取直径为 80 mm 的气囊抛光头。被测工件材料选用微晶玻璃; 测试时间为 10 s; 进动角为  $15^\circ$ ; 抛光头旋转速度为 250 r/min; 气囊充气压力为 1 个标准大气压; 抛光头覆盖材料为聚氨酯; 抛光剂颗粒尺寸为  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ ; 抛光液相对浓度为 1.03; 室内温度为  $20^\circ\text{C}$ 。在压入深度为 0.5 mm 时, 去除函数半径为 5 mm, 峰值去除率为  $0.1055 \mu\text{m}/\text{s}$ 。可见与表 1 中第 7 组实验条件相当, 去除区域大小相近, 但是本文提出的加工方式可以在 SiC 工件上实现  $0.083 \mu\text{m}/\text{s}$  的峰值去除效率, 加工效率要优于气垫抛光方式, 具有实用价值。

#### 4.3.5 加工曲面工件能力分析

假设使用半径为  $R_p$  的轮式磨头加工曲率半径为  $R_r$  的工件, 如图 19 所示, 由 Hertz 接触理论可知等效半径  $R$  可以表示为:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_p}, \quad (14)$$

峰值压强可表述为:

$$P_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left( \frac{R_r R_p}{R_r + R_p} \right)^{1/2} d^{3/2}, \quad (15)$$

式中,  $E^*$  为弹性模量, 接触区域半径为:

$$a = \sqrt{Rd} = \sqrt{\frac{R_r R_p}{R_r + R_p} d}. \quad (16)$$

压力分布仍可表示为:

$$P(x, y) = P_0 \left[ 1 - \left( \frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} \right) \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (17)$$



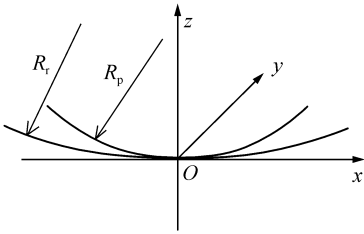


图 19 轮式磨头与曲面接触区域简图

Fig. 19 Principle sketch of the polishing head's contact area with curved surface

本实验室常用  $R$  数反射镜进行误差估计,对于口径为 200 mm、曲率半径为 450 mm 的球面反射镜,在相同压入深度时,峰值压强与加工平面时峰值压强误差为 4.41%。当压入深度为 2 mm 时,去除区域中心与边缘速度误差为 2.59%,可以计算出体去除率误差不超过 7.11%。对于  $R$  数为 2.25 的曲面工件可以看出去除函数比较稳定,具有加工曲面的能力。对于  $R$  数更小的曲面,通过更改中间层材料刚度等工艺参数可以使去除函数更加稳定。

#### 4.4 去除函数稳定性实验

稳定的去除函数是光学加工面形收敛的先决条件。不稳定的去除函数会导致加工时去除函数与理论值有差距,达不到计划去除量,使加工后的面形存在误差。所以去除函数的稳定性是评价一个抛光方式是否有效的重要指标。

由之前工艺实验可知,由于去除效率很高,过久的加工时间会导致去除深度过深,使去除后面形无法使用干涉仪检测,所以在做稳定性实验时时间选取不宜过长,故选为 30 s;压入深度选为 0.5 mm;转速选为 50 rpm。稳定性实验总共分为 5 组,每组实验进行 30 s,组间相隔 1 h,间歇时间

表 2 稳定性实验结果

Tab.2 Stability test results of the removal function

实验序号	体积去除效率/ ( $\mu\text{m} \cdot \text{mm}^2/\text{min}$ )
1	16.175
2	15.946
3	16.353
4	16.436
5	16.289

保持磨头在 SiC 废件上以 0.5 mm 的压入深度自转,用以模拟实际加工中的抛光磨头的磨损。实验结果如表 2 与图 20 所示。

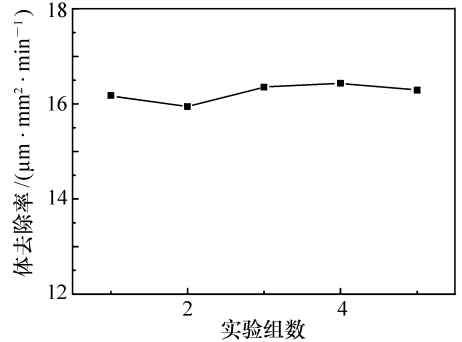


图 20 稳定性实验结果

Fig. 20 Stability test results of the removal function

可以看出,在 4 h 内的体去除效率变化幅度很小,并且本课题组先前用于小磨头的聚氨酯抛光垫磨损特性实验也表明聚氨酯的长时磨损率很低,综上验证了公自转轮式抛光模具有很好的去除函数时间稳定性。

#### 4.5 仿真加工实验

对 SiC 试件进行的一系列工艺实验已经验证了公自转轮式抛光装置具有高效稳定的去除函数。而由于目前本装置只是原理样机,并不具有独立加工光学元件的能力,只能利用去除函数进行仿真加工,以验证公自转轮式抛光装置是否能够实现高效加工能力以及良好的面形收敛能力。

由于去除函数束径较小,仿真镜面采用直径为 200 mm 的 SiC 平面,算法采用实验室最新的图像延拓技术<sup>[17-18]</sup>,将初始镜面尺寸延拓至

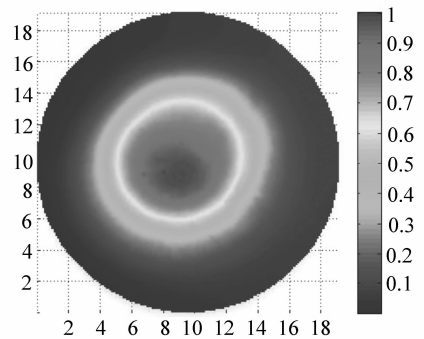


图 21 SiC 去除函数

Fig. 21 Removal function of SiC

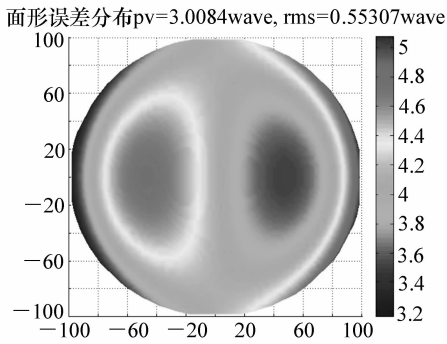


图 22 直径 200 mm SiC 仿真镜初始面形

Fig. 22 Initial faceshape of  $\phi$  200 mm SiC simulation mirror

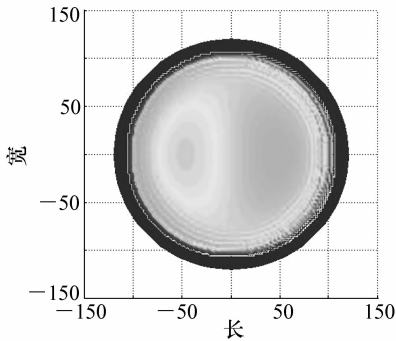


图 23 驻留时间分布

Fig. 23 Dwell time distribution

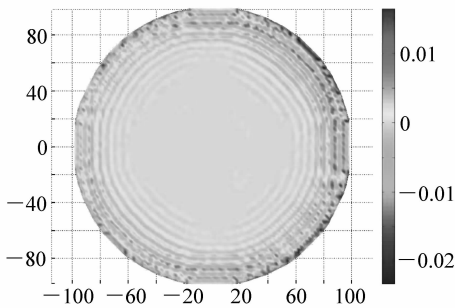


图 24 仿真加工后面形

Fig. 24 Final surface after simulation polishing

240 mm,以减小振铃效应,边界条件是一阶可导、光滑连续。采用表 1 第 9 组对应的去除函数进行仿真加工,去除函数如图 21 所示,仿真镜初始面

#### 参考文献:

[1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社,2001.

YANG L. Advanced Optics Manufacturing Technology[M]. Beijing:Science Press,2001. (in Chinese)

形如图 22 所示。利用 MATLAB 进行仿真,忽略边缘效应,仿真算法使用基于矩阵代数的驻留时间求解算法,仿真驻留时间分布如图 23 所示。经过 3.7 h 的加工,镜面面形从  $3.008\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) PV,  $0.553\lambda$ RMS 提高到  $0.065\lambda$ PV,  $0.005\lambda$ RMS,如图 24 所示,收敛效率达到 98.18%。

仿真加工结果表明公自转轮式抛光装置去除函数与实验室现有算法配合很好,可以实现高效去除能力且面形收敛效率较高。

## 5 结 论

大口径光学技术的快速发展给光学加工能力带来了新的挑战,研制一种高效稳定的加工方式对缩短加工时间,提高光学制造能力具有重要意义。本文提出了一种新型公自转轮式抛光技术,并介绍了该加工方式结构与工作原理。然后基于 Hertz 接触理论对于接触区域大小以及应力分布进行了分析,结合普林斯顿方程完成了公自转轮式抛光工具的去除函数理论建模。

根据理论模型指导完成了相应工艺实验,实验结果证明,在 2 mm 压入深度、200 rpm 转速情况下去除率达到  $196.67 \mu\text{m} \cdot \text{mm}^2/\text{min}$ ,去除效率优于同等去除函数束径情况下的传统小磨头技术。提高压入深度、转速以及磨头尺寸等参数,去除效率会明显提高;通过 5 组稳定性实验验证了 1 h 内去除率变化很小,去除函数具有较高的稳定性;为了验证该技术能否用于实际加工,基于矩阵算法进行了 200 mm SiC 镜面的仿真加工,经过 3.7 h 的加工,镜面面形从  $3.008\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) PV,  $0.553\lambda$ RMS 提高到  $0.065\lambda$ PV,  $0.005\lambda$ RMS,收敛效率达到 98.18%。上述实验验证了该技术具有稳定高效的加工能力和很好的面形收敛能力,为大口径光学加工提供了一种非常有发展前景的加工方式。

- [2] 张峰. 纳米级面形精度光学平面镜加工[J]. 中国光学, 2014, 4(4): 616-621.  
ZHANG F. Fabrication of optical flat mirror with nanometer surface error[J]. *Chinese Optics*, 2014, 4(4): 616-621. (in Chinese)
- [3] 范楠. 碳化硅光学表面抛光机理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 2(2): 127-130.  
FAN D. Study on the polishing mechanism of Silicon Carbide optical surface[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, 2(2): 127-130. (in Chinese)
- [4] 张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 5(5): 577-582.  
ZHANG X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 5(5): 577-582. (in Chinese)
- [5] 高劲松, 申振峰, 王笑夷, 等. SiC 空间反射镜材料及其表面改性技术现状分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 71-78.  
GAO J S, SHEN ZH F, WANG X Y, *et al.*. Research status of SiC space mirror material and its surface modification[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(2): 71-78. (in Chinese)
- [6] 赵汝成, 包建勋. 大口径轻质 SiC 反射镜的研究与应用[J]. 中国光学, 2014, 4(4): 552-558.  
ZHAO R CH, BAO J X. Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror[J]. *Chinese Optics*, 2014, 4(4): 552-558.
- [7] KASUNIC K J. *Optical Fabrication*[M]. John Wiley & Sons, Inc, 2015: 35-56.
- [8] MA Z, WANG J. Ultra-precision optical fabrication technology[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2013.
- [9] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
CHENG D X. *Handbook of Mechanical Design*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [10] MILLER F P, VANDOME A F, MCBREWSTER J. *Contact Mechanics*[M]. Alphascript Publishing, 2010.
- [11] SHIOU F J, CIOU H S. Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(7-8): 721-732.
- [12] 金明生, 计时鸣, 张利. 气囊抛光工具的模块化设计及应用[J]. 机电工程, 2012(12): 1395-1399.  
JIN M SH, JI SH M, ZHANG L. Modular design of gasbag polishing tool and its application[J]. *J. Mechanical & Electrical Engineering*, 2012(12): 1395-1399. (in Chinese)
- [13] 计时鸣, 郑高安, 金明生, 等. 柔性抛光工具与工件接触区应力的测量方法与分布规律研究[J]. 中国机械工程, 2011, (9): 1107-1111.  
JI SH A, ZHENG G A, JIN M SH, *et al.*. Study on measuring method and distribution law of stress of contact area between bonnet polishing tool ab workpiece[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 09: 1107-1111. (in Chinese)
- [14] 王永刚, 崔天刚, 马文生, 等. 弹性球状小磨头加工 Wolter I 型掠入射反射镜的去除函数[J]. 光学精密工程, 2011(1): 10-16.  
WANG Y G, CUI T G, MA W SH, *et al.*. Removal function for fabrication of Wolter I grazing mirror by elastic ball tool[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011(1): 10-16.
- [15] JONES R A, RUPP W J. Rapid optical fabrication with computer controlled optical surfacing[J]. *Optical Engineering*, 1991, 2(12): 19.
- [16] 张伟, 李洪玉, 金海. 气囊抛光去除函数的数值仿真与实验研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 308-312.  
ZHANG W, LI H Y, JIN H. Research on digital simulation and experiment of removal function of bonnet tool polishing[J]. *J. Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 308-312. (in Chinese)
- [17] 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(3): 56-59.  
LI Q SH, CHENG Y, CAI F ZH, *et al.*. Dwell time algorithm in computer controlled optical surfacing[J]. *Optical Technique*, 1999, 3(3): 56-59.
- [18] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 基于矩阵运算的光学零件磁流变加工的驻留时间算法[J]. 国防科技大学学报, 2009(2): 103-106.

SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Dwell time algorithm based on vector for mrf process of optics[J]. *J. National University of Defense Thchnology*, 2009(2):103-106. (in Chinese)

#### 作者简介:



张毅(1989—),男,河北石家庄人,2013年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事先进光学制造方面的研究。E-mail:yizhang19@outlook.com



张学军(1968—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事大口径非球面加工与检测、新型空间反射镜制造、空间相机总体设计等方面的研究。E-mail:zxj@ciomp.ac.cn

## “太赫兹技术与应用”专题征文通知

太赫兹(THz)科学技术作为一门交叉学科一经提出便受到了广泛关注。其对国民经济发展将起着重要的推动作用,在国家安全、反恐方面的应用有着独特的优势,是新一代产业的基础。近年来,太赫兹科学与技术研究得到了巨大的发展,除了传统的太赫兹辐射源、太赫兹探测、太赫兹光谱与太赫兹成像研究以外,太赫兹遥感、太赫兹雷达、太赫兹通信、太赫兹计量、太赫兹无损检测以及太赫兹技术在材料表征、环境监测、石油化工、航空航天、生物医学、军事国防、国家安全等方面的应用都得到了全面的发展。

为及时总结最新的技术进展和促进相关领域的学术交流,《中国光学》拟在2016年下半年出版“太赫兹技术与应用”专题,专题主编为上海理工大学朱亦鸣教授和中科院苏州纳米所秦华研究员。

现公开征集专题论文,诚挚欢迎和邀请国内外专家、学者和科研人员积极投稿,具体征文事项如下:

### 一、征文方向

- ◇ 太赫兹辐射源
- ◇ 太赫兹探测
- ◇ 太赫兹传输
- ◇ 太赫兹调控
- ◇ 太赫兹与物质相互作用
- ◇ 太赫兹无线通信
- ◇ 太赫兹成像
- ◇ 太赫兹光谱
- ◇ 太赫兹学科交叉领域研究
- ◇ 太赫兹领域其他相关应用技术研究

### 二、征文要求

1. 观点明确,论据充分,引证准确,文字简练,图表清晰,尚未公开发表,中英文皆可。
2. 来稿必须进行脱密处理,发表前应提交保密审查表(盖章)。
3. 题目、作者姓名及单位、摘要、关键词应给出中英文。
4. 文中单位和物理量的使用符合国家标准。
5. 投稿请在《中国光学》网站(<http://www.chineseoptics.net.cn>)“作者投/查稿”处注册、上传,在作者留言中注明“太赫兹技术与应用”专题论文。
6. 投稿截止日期:2016年6月30日。
7. 联系人:张莹,电话:0431-86176852,邮箱:chineseoptics@ciomp.ac.cn