

文章编号 1004-924X(2021)07-1620-11

预置曲率研磨盘提高行星研磨技术 去除函数稳定性

海 阔¹, 曾雪锋^{2*}, 李锐钢², 李英杰², 李龙响², 张学军²

(1. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:行星研磨技术由于提升磨削接触点相对速度,能够有效提高材料去除效率。但由于传统研磨盘不均匀磨损,导致研磨盘形状持续改变,从而影响了研磨过程中去除函数的稳定性和准确性,限制了该技术的应用。本文针对基于小磨头行星运动方式,通过建立构建磨损函数,预置研磨盘曲率半径,使研磨盘满足在加工单周期后各点去除量相等,从而提升去除函数稳定性。通过实验验证,研磨去除函数与模型仿真计算结果一致,验证了模型的准确性,利用优化后的研磨盘可获得高效稳定的去除函数。采用直径 40 mm SiC 研磨盘研磨 SiC 工件,实验结果表明:对比加工前后研磨盘磨损情况,面形变化小于 1%,符合均匀去除要求;对比多组不同研磨阶段去除函数,体积去除率误差小于 2.3%,满足光学研磨去除函数稳定性要求;在公转 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 自转 $-100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下,体积去除率达到 $6.879 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,比同样参数下的平转动研磨提高了 40.9% 的去除量。证明了行星研磨技术能够通过参数设计获得高稳定性的高效去除函数,为行星运动研磨技术应用于 SiC 镜片高效加工提供了可靠的理论指导。

关键词: 光学加工;行星运动研磨;研磨盘磨损模型;去除函数稳定性

中图分类号: TN394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212907.1620

Method for improving the stability of removal function of planetary grinding technology by presetting curvature grinding disk

HAI Kuo¹, ZENG Xue-feng^{2*}, LI Rui-gang², LI Ying-jie², LI Long-xiang², ZHANG Xue-jun²

(1. *Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

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

Abstract: Planetary grinding technology can effectively improve material removal efficiency by improving the relative velocity of grinding contact points. However, the uneven wear of the traditional grinding disk (or grinding plate) results in the continuous change of the shape of the grinding disk, which affects the stability and accuracy of the removal function in the grinding process, and also limits the application of this technology. In this study, based on the planetary motion mode of a small grinding head, the wear function

收稿日期:2020-12-24;修订日期:2021-02-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61975201, No. 11903035, No. 61605202, No. 52005463);国家重点研发计划(No. 2017YFA0701200)

was established and the curvature radius of the grinding disk was preset to ensure that the removal amount at each point of the grinding disk was equal after a single processing cycle to improve the removal function stability. Experimental verification was also carried out, and the grinding removal function was found to be consistent with the simulation calculation results obtained using the model, which verified the accuracy of the model. Finally, an efficient and stable removal function was obtained by using the optimized grinding disk. A SiC grinding disk with a diameter of 40 mm was used to grind the SiC workpiece. The experimental results showed that the surface shape changed by less than 1% after comparing the wear of the disk before and after machining, and the volume removal error was less than 2.3%, which meets the stability requirements of the optical grinding removal function. Under the conditions of revolution at $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ and rotation at $-100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the volume removal rate reached $6.879 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Compared with the single rotation grinding with the same parameters, the removal amount of 40.9% was increased, which proved that the planetary grinding technology can obtain a highly stable and efficient removal function based on parameter design, and provided reliable theoretical guidance for the application of planetary motion grinding technology in the efficient processing of SiC mirror.

Key words: Optical processing; Planetary motion grinding; Wear model of grinding plate; Stability of removal function

1 引言

碳化硅(SiC)材料具有比刚度高、热稳定性好等一系列优秀的物理特性,是建造大口径、轻量化空间望远镜的首选镜头反射镜材料。但其高硬度、高弹性模量等性质,导致SiC光学元件的加工难度大、效率较低,其中研磨过程材料去除量大,但精度要求很高,研磨效率对整个元件加工周期影响较大。

研磨过程中一种常用做法是采用SiC研磨盘,添加的金刚石微粉对SiC光学元件进行研磨。研磨盘与工件在材料去除的过程中,各自被去除的材料量基本一致,最终获得目标面形^[1-4]。在该工艺过程中,数控小磨头(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)研抛是一种已经验证的有效技术,但传统方法一般采用研磨盘平转动方式研磨,研磨盘上各点去除速率基本一致,该技术能够实现相对长时间研磨盘稳定形状,因此,加工去除函数稳定,是目前非球面制造商和研究所的首选方案^[5-8]。

根据Preston方程,在压力恒定的情况下,相对速度决定去除效率。但是,传统的平转动研磨盘加工是离心运动方式,过高的平转动速度严重影响设备和研磨盘稳定性,极易造成加工飞车,所以,要求平转动研磨保持在相对较低的运动速

度。这导致材料去除效率相对较低,同时其原理决定了该方法的去除效率难以进一步提升。对于SiC这种超硬材料,其加工去除效率不高^[5-7],是目前该研究领域的重要难点问题。而基于行星式运动的CCOS技术结合公转和自转速度^[9-11],能够实现高相对速度。但高速研磨过程中的去除函数模型,及其稳定性方法还需要深入研究。该运动模式结构简单、成本较低,因此将其运用在SiC光学材料的光学加工阶段具有巨大的潜力,该研究也具有价值和意义。

相关领域学者已开展了一些研究工作:其中国防科技大学在研究行星抛光技术时,通过将研抛盘切割成三角形或正方形,使去除函数逼近脉冲函数,从而提高了对局部误差的修形能力^[10]。天津大学研究了小磨头行星运动抛光时抛光垫表面的微接触机制,以此研究抛光垫形貌对材料去除特性的作用^[11]。复旦大学研究了行星抛光时磨盘的压力分布,对不同曲率的工件进行接触压力分析,补偿了传统的基于Preston方程的材料去除模型^[12]。长春光机所和长春理工大学等也着重对小磨头行星运动的抛光技术进行了一定的理论研究和仿真对比^[13]。但是,将该技术应用在研磨过程中的研究较少。在相对运动的研磨阶段,相互研磨的研磨盘和工件在材料去除过程中均有损耗。由于其研磨盘上各点运动速度

不同,导致各点损耗不同,研磨盘形状在变化,传统的求解单一速度模型代替去除函数已经不能够得到稳定、准确的去除函数,不能够将抛光阶段的研究成果完全照搬到研磨阶段,这也是该技术在研磨阶段不能够广泛应用的原因。

本文通过深入研究行星运动加工过程研磨盘磨损函数,通过求解速度模型、压力模型,提出了利用具有一定曲率半径的研磨盘来替代传统平面研磨盘的方法。该研磨盘设计能够保证在研磨过程后能够获得稳定、高效的去除函数。最后通过利用设计好的研磨盘进行研磨实验,用来验证该方法的正确性与去除函数的稳定性,与相同速度的平转动研磨实验进行对比,验证其高效性。

2 行星运动研磨的理论模型

2.1 Preston 理论模型

针对光学表面研抛技术中材料去除率理论模型被广泛证明可以利用 Preston 方程进行求解^[14-15]:

$$\frac{dz}{dt} = Kvp, \quad (1)$$

式中: K 为比例常数,由磨料等其它因素决定; v 为表面某点的瞬时速度 $v=v(x,y,t)$; p 为研抛压力, $p=p(x,y,t)$ 。

由 Preston 方程可知,在已知加工位置、研磨工具与工件的相对速度和压力的条件下,可以计算出在加工时间 t 内,被加工位置的材料去除量 $\Delta z(x,y)$:

$$\Delta z(x,y) = K \int_0^t v(x,y,t) p(x,y,t) dt, \quad (2)$$

Preston 方程将复杂的光学加工过程简单描述成相对速度和压力对材料去除率的影响,在一定程度上被认为是准确的。因此,将除 v, p 之外的所有因素都归入比例常数 K 并保持恒定,这样 Preston 方程可视为线性方程。本文基于 Preston 理论,下面通过分别研究速度和压力模型,研究行星运动中公转和自转的最佳速度配比,并最终获得形状较好的去除函数模型。

2.2 行星运动速度模型的选取

行星运动模式是研磨盘在平转动的同时,其

本身也以恒定速度自转。研磨盘或对应工件上任一点的瞬时速度为二者速度的矢量和,如图 1 所示:

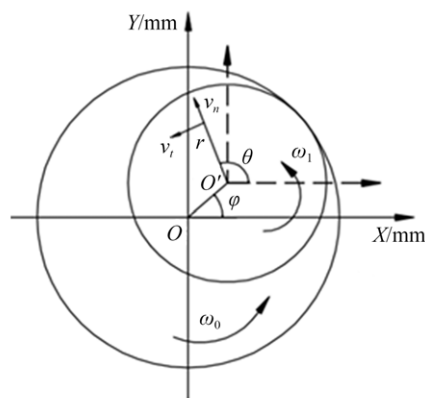


图 1 速度合成示意图

Fig. 1 The sketch of velocity synthesis

速度合成公式如下:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(x - e \cos(\phi))^2 + (y - e \sin(\phi))^2} \\ v_x &= \omega_1 r \sin(\theta) + \omega_0 e \sin(\phi) \\ v_y &= \omega_1 r \cos(\theta) + \omega_0 e \cos(\phi) \\ v(x,y) &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: e 为偏心距 oo' , 单位 mm; ϕ 为研磨盘中心相对工件转过的角度, 单位°; θ 为研磨盘上一点相对于研磨盘圆心转过的角度, 单位°; ω_1 为研磨盘自转角速度, 单位 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; ω_0 为研磨盘公转角速度, 单位 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; r 为研磨盘上任意点的位置距离工件中心的半径, 单位 mm。

定义研磨盘自转角速度 ω_1 与磨盘公转角速度 ω_0 之比为速度比 n , $n = \omega_1 / \omega_0$, 定义偏心距 e 与研磨盘的半径 R' 之比为偏心率 k , $k = e / R'$, 本文中研磨盘口径为 40 mm, 即 $R' = 20$ mm。

设压力恒定, 工件上任意一点瞬时速度为 $v(x,y)$, 利用公式(3)进行计算, 研究其对去除函数的影响。为了获得平滑的, 去除率较高的去除函数, 针对速度配比和偏心率进行选择与优化。

由于公转与自转合成运动的标量值依然是旋转对称的, 从对称轴(即母线)上的各点相对速率可以得到如下图所示的不同条件下的去除曲线。仿真结果如图 2~图 3 所示:

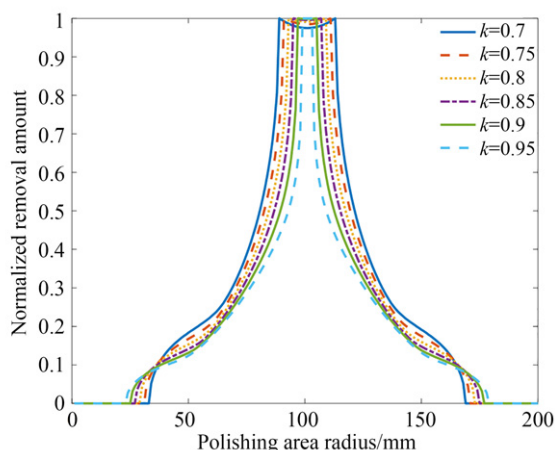


图2 速度比-3, 偏心率变化时的去除率

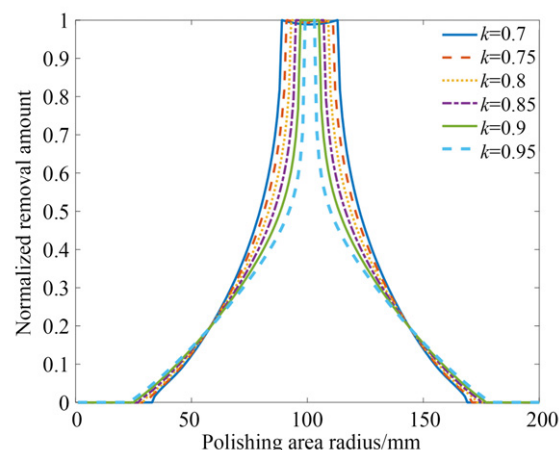
Fig. 2 $n = -3$, normalized removal amount when eccentricity changes

图4 速度比-1, 偏心率变化时的去除率

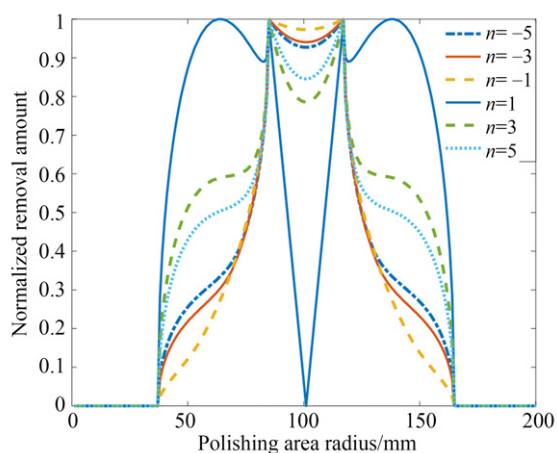
Fig. 4 $n = -1$, normalized removal amount when eccentricity changes

图3 偏心率0.6, 速度变化时的去除率

Fig. 3 $k = 0.6$, normalized removal amount when velocity ratio changes

图2仿真图像通过控制速度比来对比偏心率对去除函数的影响;由此发现,当偏心率越大,M形中间凹陷半宽与深度变小,这种去除函数突变小,可以更好地避免加工结果的中高频误差。

图3仿真图像通过控制偏心率来对比速度比去除函数的影响;由此发现,当速度比为负时,两侧去除量的一阶偏导数恒正,且中间M形凹陷深度变小,这种去除函数有利于最大提高去除效率。

基于以上两点去除函数较好的标准,从上述两种仿真结果对比,选择速度比为-1,偏心率为0.8进行研磨与抛光实验(图4所示)。

2.3 行星运动压力模型

在以往的选取平面研磨盘进行的实验中,若选用上述参数来进行研磨实验,对工作状态下的研磨盘测量其瞬时压力情况,如图5所示。加工时,工件受到研磨盘的压力,研磨盘公转和自转运动周期为0.6 s,速度运动周期为0.3 s,压力周期是速度周期的2倍。

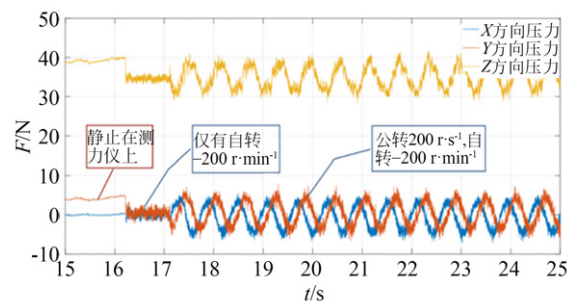


图5 研磨盘上压力随时间变化曲线

Fig. 5 Time-dependent pressure curve on grinding head

静止时,存在4 N的水平压力,地面倾斜会导致一部分压力的分量在水平方向上,若考虑地面倾斜导致周期变化,则倾斜角度应为 8° ,与实际情况显然不一致,那么还有一部分的压力分量则是研磨盘面形所引起的。

研磨盘在公转运动时存在小量倾斜,导致摩擦力做周期性变化,表现为摩擦力与压力的合力呈现正弦变化。原因主要有以下两点:

(1) 研磨盘的机械结构采用万向节进行传

动,传动点到底面距离大,力矩大,导致传动精度下降,从而使得研磨盘下表面压力存在周期性的变化。

(2)在研磨过程中,由于研磨盘与工件均有损耗,导致研磨盘由平面变成有曲率的球面,从而使下表面压力分布呈现非线性。

根据现有的加工理论,在去除过程中,压入的深度 d 为磨料直径与表面被破坏后尖端进入的深度共同作用,其公式为^[16]:

$$d = d_{w,i} + d_s + d_{p,i}, \quad (4)$$

其中: $d_{w,i}$ 为磨料破坏后尖端进入工件的深度, d_s 为磨料未破坏前研磨盘与工件的距离, $d_{p,i}$ 为磨料破坏后尖端进入研磨盘的距离。可把此过程近似成刚性球体和一个弹性半空间体的接触,在一个最初为平整的表面和一个半径为 R 的刚性球体的接触区域,压力 p 正相关于间距 d ,因此只考虑接触力与间距 d 的关系来进行计算。

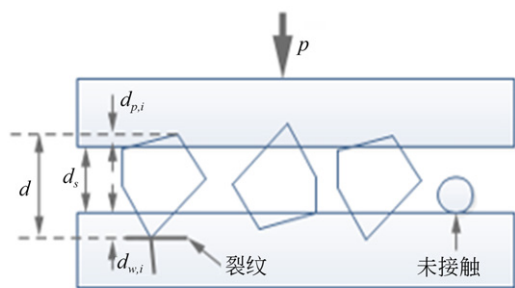


图6 压入深度 d 的示意图

Fig. 6 Drawing of indentation depth d

构建研磨盘形状与运动情况图7所示:当研磨盘静止在工件某点上时,由于下表面磨料的流

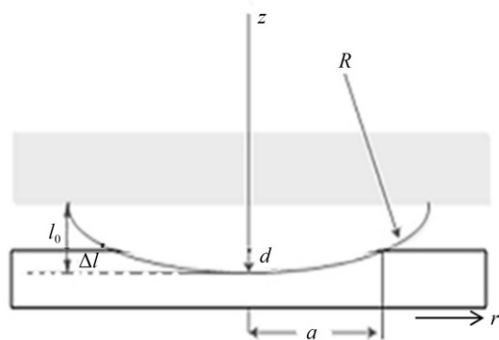


图7 研磨盘加工工件时压力等效状态

Fig. 7 Equivalent pressure state in workpiece while grinding

动性,可以将下表面与磨料组合体看作是弹性半空间体,而研磨盘看作是一个刚性球体的表面。其中: R 为研磨盘的曲率半径, l_0 为研磨盘球面面形的深度, a 为接触区域半径。

假设在接触区域,被加工工件与磨料组合体发生形变;根据赫兹接触理论^[17],从图7中可以得出,接触区域半径 a 和压入深度 d 的关系应为:

$$a \approx \sqrt{2Rd}. \quad (5)$$

一个刚性球体和一个弹性半空间体的接触,最大接触压力 p_0 可描述为^[17]:

$$p_0 = \frac{4}{3} ER^{1/2} d^{3/2}. \quad (6)$$

因此接触压力分布为:

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}, \quad (7)$$

其中,由实验得知 d 的大小在10 nm量级。经分析可得:万向节传动力的作用点较高,机械传动误差导致研磨盘实际呈倾斜状态;因此,研磨盘上不同半径的对工件的压力不同。磨料在两个表面间的形态及运动状态如图8所示:

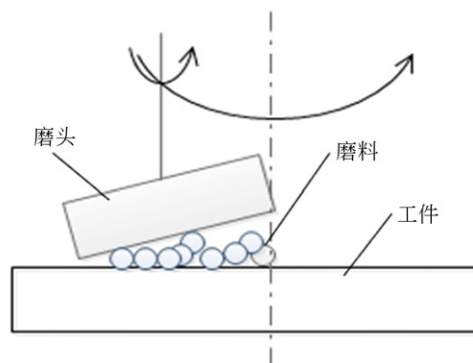


图8 研磨盘运动时倾斜状态

Fig. 8 Tilt state of grinding head in motion

在平面支撑下,处在离心位置的研磨盘在其作用区域产生挤压,向边缘方向产生横向的形变,并对所处一侧面形成弯曲,产生在镜体上的弹性势能。也因此,加工时研磨盘存在向外部的倾斜。

在整个加工的过程中,随着研磨盘的移动,研磨盘不断在新区产生挤压,老区域释放变形,从而在研磨盘与所接触镜体的局部存在动能与势能的相互转换,形成振动。

由于机械传动误差使得下表面压力分布沿

oo'的方向在原有基础上增加了一定的倾斜量,且随运动位置周期性变化,因此该倾斜状态可近似为 $Tilt(r, \theta)$ 。

因此,接触压力可修正为:

$$p(r) = \frac{4}{3} ER^{1/2} d^{3/2} Tilt(r, \theta) \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}. \quad (8)$$

3 稳定去除函数模型

为了实现行星研磨稳定,去除函数不随加工时间变化,不仅要求设备能够维持稳定的状态,更需要加工的工具头形状是稳定的,即研磨盘上的各点在一个研磨周期内损耗量一致,研磨盘面形不随加工时间变化。

由 Preston 理论和公式(2)、公式(3)得到:若要研磨盘的去除率恒定,定义研磨盘的磨损函数 Q 表示研磨盘上每点在一完整运动周期内的材料损耗量,如下式:

$$Q(x, y) = \int_0^T K \cdot p \cdot v dt, \quad (9)$$

式中: v 是研磨盘上每点的瞬时速度, p 是研磨盘每点的瞬时压力, K 为磨损常数。

$$Q(r) = p_0 \cdot K \int_0^T Tilt(r, \phi) \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\omega_0^2 e^2 + \omega_1^2 r^2 + 2\omega_0 \omega_1 e r \cos(\theta - \phi)}} dt, \quad (10)$$

又:

$$T = 2\pi/\omega_0, \quad (11)$$

$$\frac{dQ}{dr} = 0, d\theta = \omega_0 dt, \quad (12)$$

当 $\omega_0/\omega_1 = -1, \theta/\phi = -1$ 时,可求得在该参数下的磨损函数的最终表达式:

$$Q(r) = \frac{4}{3} KER^{1/2} d^{3/2} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \cdot \int_0^{2\pi/\omega_0} Tilt(r, -\theta) \sqrt{(e+r)^2 - 4er \sin^2 \theta} d\theta, \quad (13)$$

式中,当 $Q(r)$ 恒为常数时,即 $\frac{dQ}{dr} = 0$,此时研磨盘上每一点在一个周期内的损耗量都相同。

式(13)难以定量求解,通过 Wolfram Mathematica 数学软件进行定性分析:

函数 Q 的积分项部分的变化曲线随 r 的变

化是单调递增的,而压力分布项是单调递减的,即速度项积分使研磨盘的去除量随半径部分增大,而去除量增大导致压力降低,从而去除量减小,这使得磨损函数存在一种自适应的调节过程,使最终研磨盘形成一种动态平衡的面形。

在该面形条件下,研磨盘上各点的损耗量在运动周期的整数倍将保持常数,即为研磨盘各点等量磨损。此时,在对工件加工的整数倍周期,加工零件的去除函数将始终维持不变,此时的研磨盘的曲率半径为一确定值,可称之为特征曲率半径,与加工参数相关。

下面将实验参数代入对应公式,求得在该曲面研磨盘工况下的去除函数形式。

实验数据为:公转速度 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,自转速度 $-100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,压力 40 N , SiC 的弹性模量 $E = 330 \text{ GPa}$,压入深度^[13] d 的经验值为 10 nm 。待求解变量为 a, R, l_0 。

磨料粒径选择 $14 \sim 28 \mu\text{m}$ 金刚砂颗粒。将下表面看作一段圆弧,则 R 与 l_0 的关系可由下式表示:

$$l_0 = R - \sqrt{R^2 - a^2}. \quad (14)$$

将参数代入式子(5),式(6),式(14),并联立求解得:

$$l_0 = 23 \mu\text{m}, R = 400 \text{ mm}$$

用上述参数进行计算机仿真实验,模拟曲面研磨盘的去除过程,获得最终稳定的去除函数,如图9~11所示,分别为曲面研磨盘加工过程中对工件的瞬时去除深度,最终去除函数和二维去除函数曲线:

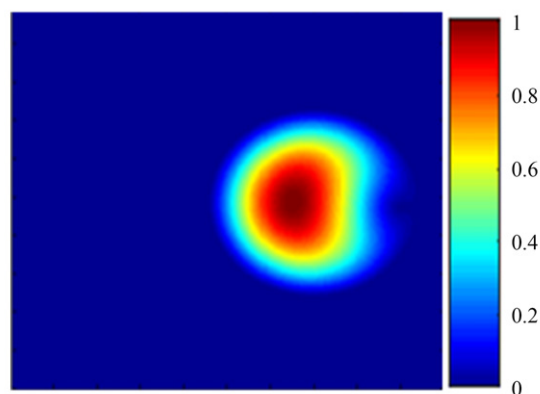


图9 工件上瞬时的去除深度

Fig. 9 Grinding depth on workpiece at instantaneous time

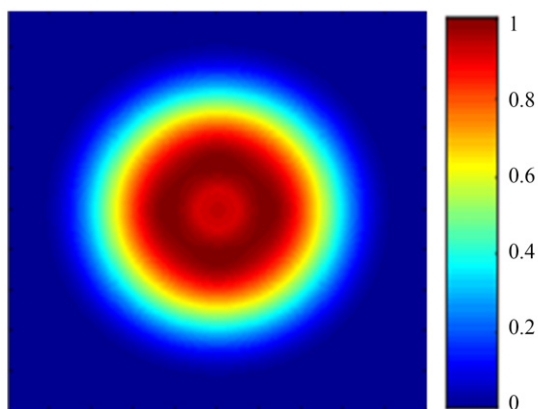


图 10 加工完整周期工件去除函数形状

Fig. 10 Grinding depth function on workpiece from a complete period

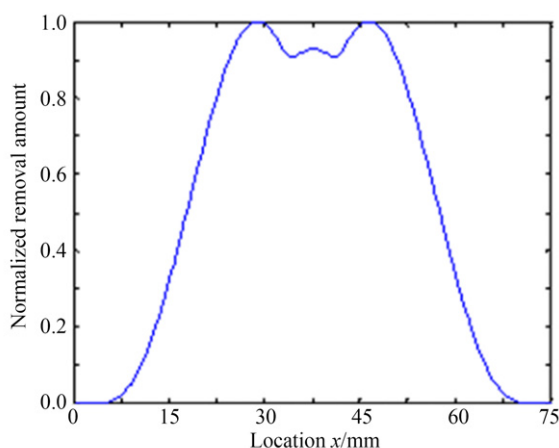


图 11 母线上归一化去除函数仿真曲线

Fig. 11 Normalized removal function curves on busbar

由于研磨盘上不同点的瞬时速度和瞬时压力不一致,所以如图 9 所示,工件上不同点的瞬时去除率也不一致。但是,由于速度函数和压力函数均为周期函数,所以如图 10 所示,在一个完整周期内,研磨盘上相同半径的点的加工去除率均相同,整个函数具有良好的中心对称形状。

如图 11 所示,将完整周期内的去除函数分布沿直径进行表示,整条去除函数曲线光滑,且最大值和边缘部分的斜率接近 0,中间存在三个峰值部分,三个峰值间差异小于 10%,较为平缓,能近似为一种类高斯形的曲线。这样的去除函数具有较好的误差收敛能力,即能够尽快地将面形误差收敛到最小值。

4 实验与结果分析

4.1 实验装置

实验设备选择中国科学院长春光机所光学技术中心设计研发的 FSGJ-1 机床,该加工机床是一台集抛光研磨与一体的五轴联动机床,如图 12(a)所示。行星主轴研抛运动机构,采用双电机制动,研磨盘位置由万向节进行传动设置,如图 12(b)所示,机床运动与公自转运动都由计算机集成控制。



(a) 机床设备
(a) Machine tool

(b) 实验装置
(b) Experimental setup

Fig. 12 实验设备及装置照片

Fig. 12 Photos of experimental equipment and devices

4.2 稳定性实验验证

选取 $\Phi 150$ mm 的 SiC 工件进行研磨实验,研磨盘选取 $\Phi 40$ mm 口径初始面为平面和曲率高于目标面形的曲面进行两组实验,研磨每间隔一段时间检测并记录研磨盘的面形变化,用研磨盘的中心到边缘位置的矢高来表示研磨盘曲率随时间的变化关系,具体加工参数如表 1 所示,每次检测后都在新的平面上进行新一轮加工。

从图 13 的加工结果中可以得出如下结论:在平面研磨的过程中,当初始面形曲率半径不等于特征曲率半径时,研磨盘的面形随时间发生改变,逐渐趋近于特征曲率半径,之后就不再随时间改变,证明了公式 13 的理论的正确性;而具有特征曲率的研磨盘继续加工,其上各点去除量基本保持一致,如图 14 所示,研磨盘面形加工前后形状变化小于 1%,满足等厚去除。不失一般性地,利用特征曲率研磨盘对镜片研磨,去除函数也会是稳定的。

表 1 行星研磨实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of planetary motion grinding

基本参数	压力/N	偏心量/mm	公转转速/(r·min ⁻¹)	自转转速/(r·min ⁻¹)
数值	30	16	100	—100
实验变量及具体参数				
初始面形矢高/mm	实验次数	加工时间/min	加工时间/min	加工时间/min
0	3	5	5	5
0.17	3	10	10	5

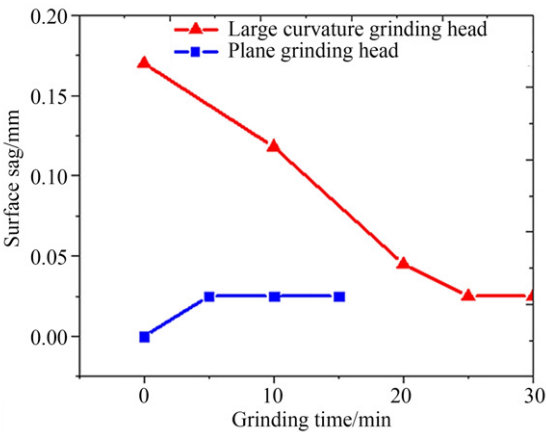


图 13 研磨盘面形矢高随加工时间的变化

Fig. 13 Surface sag varies with the processing time

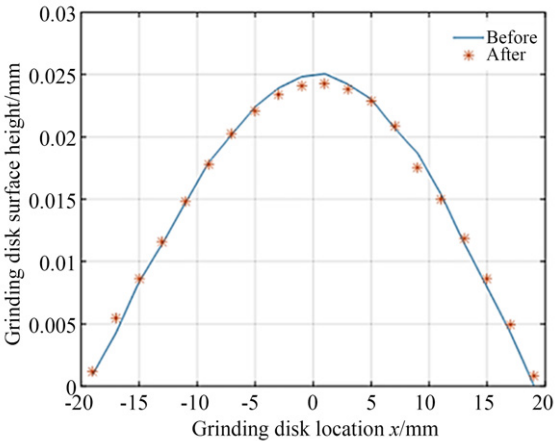


图 14 达到稳定面形后,加工前后研磨盘形状对比

Fig. 14 After reaching the stable shape, the shape of grinding head before and after grinding is compared

4.3 去除效率对比实验

选取 $\Phi 150$ mm 的 SiC 工件进行研磨实验,表面初始面形为平面,PV 值为 99.31 nm,RMS 值为 21.63 nm,满足仿真实验所要求的初始表面面

形。研磨盘口径为 40 mm,初始面形是曲率半径为 400 mm,矢高为 25 mm 的曲面;磨料为金刚石微粉,粒径为 14~28 μm 。实验结果利用三坐标测量臂对面形测量,测量精度为 0.001 mm。行星运动研磨与平转动研磨实验对比加工参数如表 2 所示。

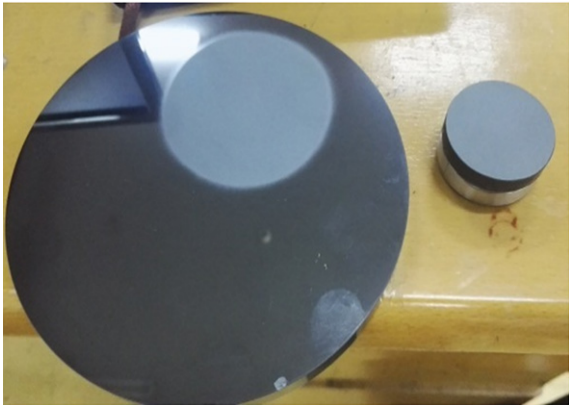


图 15 行星运动加工后镜片(左:加工后工件 右:研磨盘)

Fig. 15 Lens after planetary motion grinding (left: work-piece after processing right: grinding head)

图 15 为行星运动加工后的镜片和研磨盘形状的实物图。通过检测工件去除区域内的多条母线去除深度,绘制了图 16 的面形轴向函数曲线,从图中可以看出研磨区域去除函数形状较好(平滑、对称、中间具有最大去除且斜率为 0)。分布图中间存在三个主峰,经分析,一方面峰值间波动区域在三坐标误差范围之内,另一方面研磨过程中磨料的非均匀分布也会导致一定程度的顶端非均匀性。综上,实验结果与图 11 仿真结果中的去除函数形式基本符合,这证明了去除函数理论模型的正确性,其能够对行星运动研磨加工工艺进行指导。

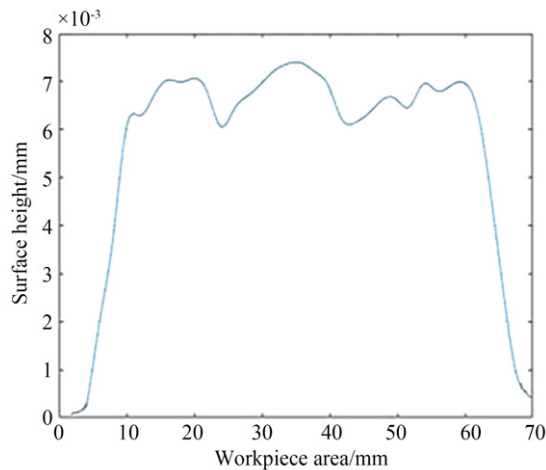


图 16 行星运动研磨后镜片去除函数曲线
Fig. 16 Lens removal function curve after planetary motion grinding

表 2 行星研磨实验参数
Tab.2 Experimental parameters of planetary motion grinding

SiC 研磨	加工参数	行星运动	平转动
实验参数	压力/N	30	30
	偏心距/mm	16	16
	时间/s	300	300
	公转转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	100	100
	自转转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	−100	0
实验结果	去除效率	6.879	4.883
	(mm^3/min)		

表 2 所示的对比实验中,设定行星运动研磨 SiC 镜片的研磨盘公转速度为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,速度比 -1,实验结果进行计算可知。利用该磨头进行了三组定点研磨实验,其体积去除率分别为 $7.035, 6.873, 6.729 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,平均值为 $6.879 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,标准差为 $0.223 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,最大误

差为 2.3%。基于该种研磨盘设计,证明了该曲面研磨盘的去除函数具有较好的稳定性。

在平转动研磨 SiC 镜片实验中,设定研磨盘的公转速度为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,得到单位时间体积去除率为 $4.883 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。相比平转动小工具研磨技术,该行星运动研磨 SiC 镜片加工效率提高了约 40.9%,证明了该状态行星研磨技术具有一定的高效性。

5 结 论

本文基于 Preston 方程对行星研磨技术进行了深入的研究。首先,通过对公转和自转的速度比与偏心率的仿真分析,选取了最佳参数($n=-1, k=0.8$),然后对压力模型进行修正,使模型更加符合实际的加工情况。为了提高行星研磨技术的去除函数的稳定性,本文提出设计预置曲率的研磨盘,结合对研磨盘的加工压力模型和速度模型的计算,最终保证研磨盘各点的损耗量为定值,从而保持了去除函数的稳定性。通过实验验证了研磨盘的稳定性和高去除效率,随研磨时间的增大,研磨盘逐渐趋于一个稳定的面形,加工前后的面形误差小于 1%,符合均匀去除,加工后的去除函数,面形误差小于 2.3%,证明了利用这样的研磨盘进行 SiC 镜片的研磨,其去除函数具有较好的稳定性,能够有效提高加工的准确度。实验结果显示,在给定参数条件下,行星研磨技术体积去除率为 $6.879 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,相比较平转动,行星运动研磨 SiC 镜片加工效率提高了约 40.9%。本文探究的方法也可以用于其他材料的研磨过程,具有一定的普适性和参考性。

参考文献:

[1] 王旭,张学军. 固着磨料数控加工碳化硅反射镜工艺研究[D]. 长春:长春光机所,2010. 5.
WANG X, ZHANG X J. *Experimental study on computer controlled grinding and polishing SiC mirror with fixed abrasive* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010; 5. (in Chi-

nese)
[2] 王孝坤,薛栋林,张学军. 大口径非球面系统的共基准加工与检验[J]. 光学精密工程, 2018, 26 (4): 743-748.
WANG X K, XUE D L, ZHANG X J. *Fabrication and testing of large aspheric system based on common reference* [J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 2018, 26 (4): 743-748. (in Chinese)

- [3] 殷龙海,王孝坤,李龙响,等. 大口径SiC离轴非球面的高效磨削加工[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2497-2505.
YIN L H, WANG X K, LI L X, *et al.* Fast grinding of large SiC off-axis aspheric surface[J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2497-2505. (in Chinese)
- [4] 杨秉新. 空间相机用碳化硅(SiC)反射镜的研究[D]. 北京:北京空间机电研究所, 2003. 3.
YANG B X. *Research of SiC Reflection Mirror for Space Camera* [D]. Beijing: Beijing Institute of Space Optics and Electricity, 2003. 3. (in Chinese)
- [5] 张峰,徐领娣,范镒,等. 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[D]. 长春:长春光机所, 2008. 12.
ZHANG F, XU L D, FAN D, *et al.* *Fabrication of Surface Modification Aspheric SiC Mirror* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 12. (in Chinese)
- [6] 罗霄,张学军. 采用平转动应力盘技术加工超大口径非球面的研究[D]. 长春:长春光机所, 2011. 5.
LUO X, ZHANG X J. *Fabrication of Large Aspherics Using Stressed Lap with Orbital Tool Motion* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. 5. (in Chinese)
- [7] 邓伟杰,郑立功,史亚莉,等. 离轴非球面数控抛光路径的自适应规划[D]. 长春:长春光机所, 2009. 1.
DENG W J, ZHENG L G, SHI Y L, *et al.* *Adaptive programming algorithm for generating polishing tool-path in computer controlled optical surfacing* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009. 1. (in Chinese)
- [8] 刘振宇,张学军. 大口径非球面反射镜组合加工技术驻留时间算法研究[D]. 长春:长春光机所, 2013. 5.
LIU ZH Y, ZHANG X J. *Dwell Time Algorithm of Multi-mode Technique for Fabrication of Large Aspherics* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. 5. (in Chinese)
- [9] 孙小苑,李大琪,陈勇,鲁卫国. 光学镜片平面行星式研磨加工关键技术研究[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 681-685
SUN X Y, LI D Q, CHEN Y, *et al.* Key technologies of flat planetary lapping of optical lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4): 681-685
- [10] 尚文锦. 计算机控制确定性研抛的建模与仿真[D]. 长沙:国防科技大学机电工程与自动化学学院, 2005.
SHANG W J. *Model Building and Simulation of Computer Control Deterministic Grinding and Polishing* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [11] LIN B, LI L K, CAO ZH CH, *et al.* Modeling of pad surface topography and material removal characteristics for computer-controlled optical surfacing process [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2018.
- [12] WAN S L, ZHANG X CH, ZHANG H, *et al.* Modeling and analysis of sub-aperture tool influence functions for polishing curved surfaces [J]. *Precision Engineering*, 2018, 51.
- [13] 王权陡,余景池,张峰,等. 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): 73-79.
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]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5): 73-79.
- [14] 王旭,张学军,徐领娣,等. 固着磨料加工碳化硅反射镜的实验[D]. 长春:长春光机所, 2009. 4.
WANG X, ZHANG X J, XU L D, *et al.* *Experiment of Grinding SiC Mirror with Fixed Abrasive* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009. 4. (in Chinese)
- [15] 宋驰,张学军. 采用非牛顿流体磨盘技术加工超大口径非球面的研究[D]. 长春:长春光机所, 2017. 5.
SONG CH, ZHANG X J, *Fabrication of Large Aspherics Using Non-Newtonian Fluid Polishing Tool* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. 5. (in Chinese)
- [16] 李圣怡,戴一帆. 大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011. 8.
LI SH Y, DAI Y F. *New Technology for Manufacturing and Measurement of large and Middle-scale aspheric surfaces* [M]. Beijing: National De-

fense Industry Press, 2011. 8. (in Chinese)

- [17] [德]瓦伦丁 L. 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及应用[M]. 李强, 雒建斌译. 北京:清华大学出版社, 2011:10

[Germany] PopovValentin L. *Contact Mechanics and Friction Physical Principles and Applications* [M]. LI Q, LUO J B. Peking: Tsinghua University Press, 2011:10. (in Chinese)

作者简介:



海 阔(1991—),男,吉林吉林人,博士,工程师。2015年于西安交通大学获得理学学士学位,2020年于长春光机所获得博士学位。主要从事光学精密与超精密加工与检测方面的研究。E-mail:824639163@qq.com



曾雪锋(1987—),男,江西省抚州人,博士,副研究员,2009年于南京理工大学获工学学士学位,2014年于长春光机所获得博士学位。主要从事先进光学制造技术方面研究。E-mail:zengxf@ciomp.ac.cn