

DOI : 10.3901/JME.2013.17.019

光学元件气囊抛光系统动态去除函数建模*

王春锦 郭隐彪 王振忠 潘 日 谢银辉

(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

摘要 : 目前对于光学元件气囊抛光系统驻留时间的求解都是基于静态的去除函数, 然而实际抛光过程中, 抛光头不断地移动, 故对于动态去除函数的研究显得尤为必要。通过有限元仿真分析的方法得到动静态接触区的轮廓和接触应力分布数据, 发现对于平面工件, 动静态接触区均为圆形, 而且大小基本一致, 且动态接触区应力分布与静态接触区应力分布相比, 其峰值点沿抛光头移动的相反方向偏移。在此基础上, 根据静态接触区应力呈类高斯分布的理论, 利用最小二乘拟合的方法, 推导出动态接触区的应力分布函数。通过搭建动静态接触区轮廓提取装置, 设计不同下压量下动静态接触区的轮廓提取试验, 验证有限元仿真结果的准确性。基于仿真和试验结果推导出动态去除函数, 对其进行数值仿真, 并与静态去除函数进行对比, 发现前者去除率偏小, 而且最低点也发生偏移。

关键词 : 光学元件 气囊抛光 去除函数 建模 Preston 方程

中图分类号 : TQ171

Dynamic Removal Function Modeling of Bonnet Tool Polishing on Optics Elements

WANG Chunjin GUO Yinbiao WANG Zhenzhong PAN Ri XIE Yinhui

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract : The dwell time function of the bonnet tool polishing on optics elements is achieved based on static removal function in recent studies. But the polishing tool keeps moving during the process, it's necessary to do the research on dynamic removal function. The static and dynamic contact zone is acquired through finite element simulation analysis, and so is the contact pressure. Both of the contact zones are circle and the size of them are almost the same. The peak point of the dynamic contact pressure has an offset contrary to the direction of the tool movement compared to the static contact pressure. The dynamic contact pressure distribution function is deduced by using the least square method based on the theory that the static pressure distribution function is a modified Gaussian function. The device which can extract both the dynamic and static contact zone is set up to capture them on the condition of different offset. Then the simulation results are verified. The dynamic removal function is deduced and numerical simulated based on the forward simulation and experiment results. The removal rate of the dynamic removal function is smaller than the static removal function and its nadir has a deflection compared to the latter.

Key words : Optics elements Bonnet tool polishing Removal function Modeling Preston function

0 前言

现代尖端技术对光学元件的加工精度越来越高, 尤其是强激光技术的出现, 对光学表面粗糙度的要求极为苛刻, 要求光学表面粗糙度小于 $2 \text{ nm}^{[1]}$ 。而非球面光学元件, 鉴于其优良的光学性能, 在光学系统中得到广泛的应用^[2-3]。气囊式抛光技术是由英国 ZEEKO 公司和英国伦敦光学实验室于 20 世纪

90 年代联合提出的抛光新技术^[4]。其采用具有一定充气压力的球冠形气囊作为抛光工具, 不仅可以保证抛光头与被抛光工件表面吻合性好, 而且可以通过调节气囊内部压力控制抛光效率和被抛光工件的表面质量, 是一种极具发展潜力的抛光方法, 尤其适用于非球面和自由曲面的抛光^[5-7], 已被成功应用于大型天文望远镜镜片的加工^[8-10]。气囊抛光采用一种独特的进动运动方式, 即抛光过程中, 气囊自转轴始终与工件局部法线呈固定角度(称进动角)进行抛光。

影响气囊抛光精度的因素有很多, 包括进动

* 国家自然科学基金(51075343)和厦门市科技计划(3502Z20113007)资助项目。20121010 收到初稿, 20130318 收到修改稿

角、下压量、充气压力和抛光液浓度等^[5]。抛光过程中,首先根据测得的去除函数,计算驻留时间,然后生成数控程序。目前国内外的学者对抛光过程中进动运动的控制^[11-12]以及去除函数^[13-15]都进行了研究,但对于去除函数的研究都是以测量定点抛光后的表面去除量为基础,是静态的去除函数,而实际抛光过程中的气囊是在不断地移动。由于工件表面的材料去除量等于去除函数在运动轨迹上对驻留时间的卷积^[16],即

$$h(x, y) = r(x, y) * d(x, y) \quad (1)$$

式中 $h(x, y)$ —— (x, y) 点处的去除量矩阵

$r(x, y)$ ——去除函数矩阵

$d(x, y)$ ——驻留时间矩阵

x, y ——工件表面点的坐标

由此可知,去除函数是得到准确的驻留时间的关键。故对于移动状态下的去除函数即动态的去除函数的研究显得尤为必要。

本文基于 Preston 假设,通过有限元仿真分析与最小二乘曲线拟合相结合的方法首先确立了动态接触区轮廓和应力分布,并通过试验验证了有限元分析结果的准确性,继而对动态的去除函数进行数值仿真,通过试验验证了仿真结果,并将动态的去除函数和静态的去除函数进行对比研究。去除函数的变化将直接导致驻留时间求解的误差,从而最终导致工件抛光后的面型误差。故本文的研究将为后续抛光工艺的改进提供一定的理论依据。

1 动态接触区轮廓及应力分布

气囊定点抛光的状态下,气接触区的应力分布呈类高斯曲线分布,可表示为^[15]

$$p_s = p_{\max} \left[\exp\left(-\frac{\lambda^2}{2\sigma^2}\right) \right]^\varphi \quad (2)$$

式中 p_{\max} ——最大接触应力

λ ——接触区内部点到中心的距离

σ ——标准差

φ ——修正系数

但是当气囊在工作时,不断移动,抛光头在滑动摩擦力的作用下,其接触区的应力分布必然发生变化。由于气囊移动时接触区的应力分布数据很难通过试验获取,故为了分析气囊移动过程中接触区的应力分布,本文利用有限元分析的方法对其接触区的接触应力进行仿真。

1.1 动态接触模型的有限元分析

建立的仿真模型如图 1 所示,在表 1 所示的条件下采用分步载荷施加的方法分别施加下压量载荷和 x 向位移载荷,进行仿真求解。仿真计算后分别

提取静态和动态接触区的应力分布结果,如图 2 所示,图 2 中, Δx 表示接触应力的峰值点偏离接触区中心的距离。

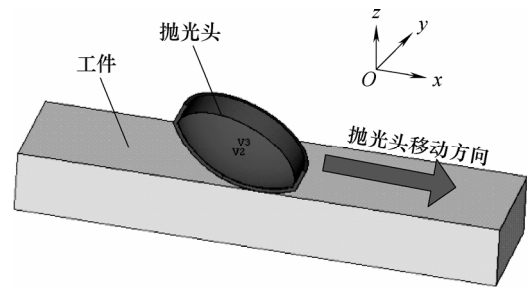
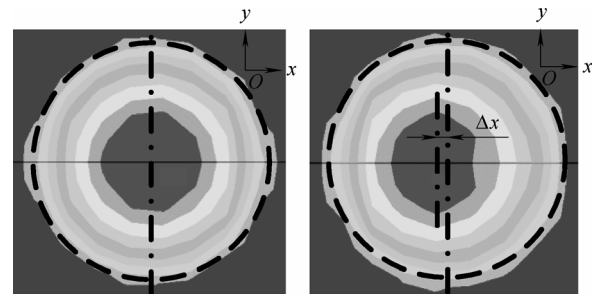


图 1 气囊抛光仿真模型

表 1 仿真条件

气囊半径 R/mm	充气压力 p/MPa	下压量 l/mm	进动角 $\alpha/(\text{°})$	x 向位移 s/mm
80	0.01	0.2	23	10



(a) 静态接触区应力分布

(b) 动态接触区应力分布

图 2 接触区应力分布

图 2 中两个虚线圆为等半径的标准圆。由此可知动静接触区的轮廓均呈圆形,而且两者大小基本一致。静态接触区应力分布呈中心最大并向边缘递减的类高斯分布,动态接触区应力分布在静态的基础上出现了峰值点沿 x 轴负方向偏移 Δx 的现象。图 2 中边缘以及应力分布出现的不均匀过渡是由于网格划分不够密的缘故。

1.2 动态接触应力分布函数拟合

为了得到峰值偏移后的应力分布函数,可以在原来表达式的基础上乘以一个修正函数,使其表达式变为

$$p_M = f(\lambda) p_{\max} \left[\exp\left(-\frac{\lambda^2}{2\sigma^2}\right) \right]^\varphi \quad (3)$$

式中, $f(\lambda)$ 为修正函数,由于去除函数的峰值只在 x 方向发生偏移,故修正函数在作用区间内必须是单调函数,可以是线性或非线性。为了确定 $f(\lambda)$ 函数的表达式,本文分别使用一次函数 $f_1(\lambda) = k\lambda + b$ 和二次函数 $f_2(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + C$ 作为修正函数,并用最小二乘拟合的方法来拟合接触应力分布函数,通过对比

两者的拟合误差来确定其表达式，其中， k 、 b 和 A 、 B 、 C 分别为一次函数的系数和二次函数的系数。从仿真结果中提取接触区 x 方向的接触应力数据作为拟合数据，气囊下压量变化范围为 0.05 ~ 0.30 mm。为了判断最小二乘拟合后的残差大小，本文以式(4)定义了拟合残差 Δd 的表达式

$$\Delta d = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{f(i)} - p_{d(i)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 $p_{f(i)}$ ——拟合后的曲线数据点
 $p_{d(i)}$ ——拟合前的曲线数据点

表 2 是只改变气囊下压量，其余抛光条件相同的条件下，静态接触应力分布的拟合结果。表 3 是在不同下压量的条件下，两种修正函数的拟合结果对比，其中 Δd_s 表示静态接触应力拟合后的残差， Δd_1 、 Δd_2 分别表示用一次函数和二次函数作为修正函数拟合后的残差。由表 2 和表 3 可知，利用式(2)拟合得到的接触区静态的应力分布曲线具有很高的拟合精度，最小残差达到 10^{-5} MPa 数量级，选用二次函数作为修正函数得到的动态接触应力分布曲线拟合残差值会略小于一次函数作为修正函数的残差，但二者的差值不大，且与静态的接触应力分布曲线的拟合残差值很接近，故两种均可以考虑作为修正函数使用。

表 2 不同下压量下静态接触应力分布拟合结果

下压量 l/mm	最大接触应力 p_{max} /MPa	标准差 σ	修正系数 φ	拟合残差 Δd_s /MPa
0.05	0.105	5.034	3.046	2.285×10^{-5}
0.10	0.310	5.105	3.001	3.269×10^{-5}
0.15	0.546	5.327	2.759	2.683×10^{-4}
0.20	0.806	5.571	2.522	3.245×10^{-4}
0.25	1.083	5.738	2.332	5.569×10^{-4}
0.30	1.368	5.887	2.172	2.237×10^{-3}

表 3 不同修正函数下动态接触应力拟合结果对比

下压量 l/mm	一次修正函数 $f_1(\lambda)$ 拟合后系数		拟合残差 Δd_1 /MPa	
	k	B		
0.05	-1.563×10^{-2}	1.067	4.215×10^{-5}	
0.10	-3.167×10^{-2}	0.985	3.665×10^{-5}	
0.15	-4.093×10^{-2}	0.969	1.820×10^{-4}	
0.20	-4.934×10^{-2}	0.948	3.396×10^{-4}	
0.25	-4.991×10^{-2}	0.945	2.775×10^{-4}	
0.30	-5.381×10^{-2}	0.937	1.955×10^{-3}	
下压量 l/mm	二次修正函数 $f_2(\lambda)$ 拟合后系数			拟合残差 Δd_2 /MPa
	A	B	C	
0.05	5.626×10^4	-1.562×10^2	1.066	4.208×10^{-5}
0.10	-1.381×10^3	-3.168×10^2	0.991	2.980×10^{-5}
0.15	-5.73×10^4	-4.093×10^2	0.972	1.772×10^{-4}
0.20	-5.739×10^3	-4.929×10^2	0.958	1.845×10^{-4}
0.25	-5.960×10^4	-4.991×10^2	0.949	2.326×10^{-4}
0.30	-1.500×10^3	-5.381×10^2	0.949	1.283×10^{-3}

图 3 是下压量为 0.2 mm 时的动静态接触应力的拟合曲线对比， p_M 指动态接触应力， p_{M1} 指修正函数为一次函数的动态接触应力拟合后的曲线， p_{M2} 指修正函数为二次函数的动态接触应力拟合后的曲线， p_S 指静态接触应力。由图 3 可知，动态情况下接触区的应力的峰值点沿 x 轴负方向偏移，与图 2 相对应，而且动态接触应力峰值略小于静态接触应力的峰值。修正函数为一次函数和二次函数拟合后的动态接触应力分布拟合曲线基本重合，这也正说明了两者的拟合后残差值很接近。故本文在对动态去除函数的数值仿真研究中选用一次函数作为动态接触应力分布曲线的修正函数。

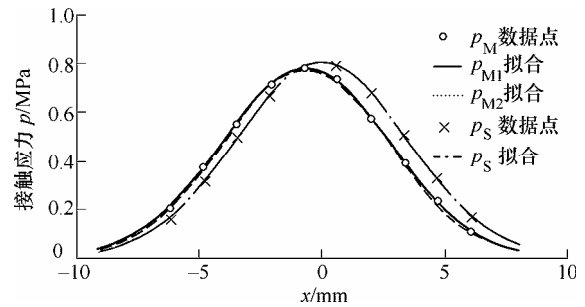


图 3 动静态接触应力的拟合曲线对比

为了验证该拟合的准确性，基于上文 x 方向上的拟合结果，拟合出动态接触应力在接触区内的空间分布图。由以上的分析可得，动态接触应力的空间分布函数可表示为

$$p_M = (kx + b)p_{max} \left\{ \exp \left[-\frac{(x^2 + y^2)^2}{2\sigma^2} \right] \right\}^\varphi \quad (5)$$

将表 2 中下压量为 0.2 mm 的结果代入式(5)中即可得到该下压量下动态接触应力的分布图。图 4 为拟合后动静态接触区接触应力分布对比图，拟合出的结果与图 2 的结果基本一致，均出现应力的峰值点沿 x 轴负方向移动的现象，由此验证了拟合结果的可靠性。

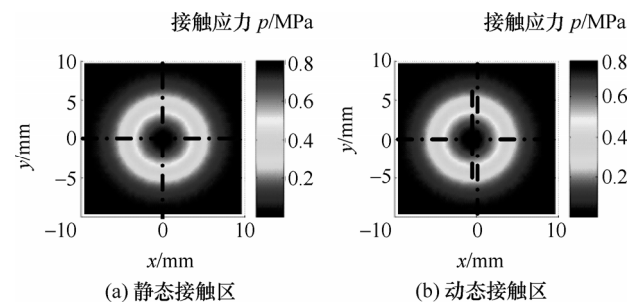


图 4 拟合后的动静态接触区接触应力分布对比图

2 动态接触区轮廓提取试验

为了说明动静态接触区轮廓的关系，验证上文

仿真分析的结果,本文设计了动态接触区轮廓的提取试验,试验装置如图 5 所示。该装置主要包括抛光头部分,xyz 进给平台,玻璃工作台和 CCD 摄像头四个部分。由于玻璃工作台的透光特性,置于其底部的 CCD 摄像头可实时拍摄抛光头作用于工件表面的情况。

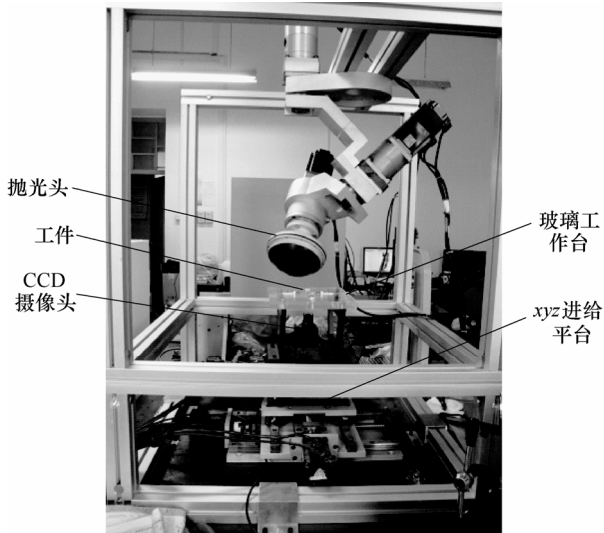


图 5 动态接触区轮廓提取试验装置

该试验选用印泥作为涂层材料,将其涂于工件表面,然后将抛光头压于工件表面,并移动工件,移动过程中,CCD 摄像头即可拍摄动态的接触区轮廓。选用 BK7 玻璃作为试验材料,气囊半径为 80 mm,气囊充气压力为 0.01 MPa,进动角为 23° ,下压量依次为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm,CCD 摄像机的拍摄频率设为 60 Hz,设置移动行程为 10 mm,拍摄抛光头从初始接触工件开始,到压缩至指定的下压量,然后移动抛光头到指定的行程的全过程。然后将拍摄的视频提取出动静态接触区的轮廓照片,并进行适当的图像处理即可得到清晰的轮廓图。图 6 为从视频中提取的轮廓原图和图像处理后的效果图的对比,图 7 为三种下压量条件下动静态接触区的轮廓。

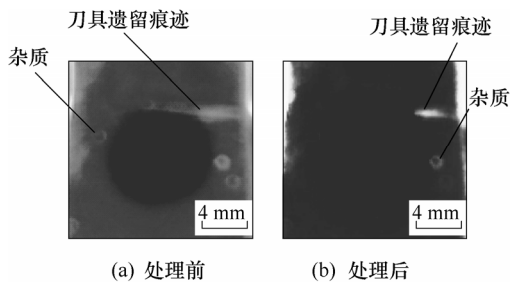


图 6 图像处理前后对比

图 6 中虽然由于玻璃工作台内部的一些杂质以及工作台加工后刀具的遗留痕迹,但是不影响对接触区的观测。处理前的图像由于拍摄时,抛光头位

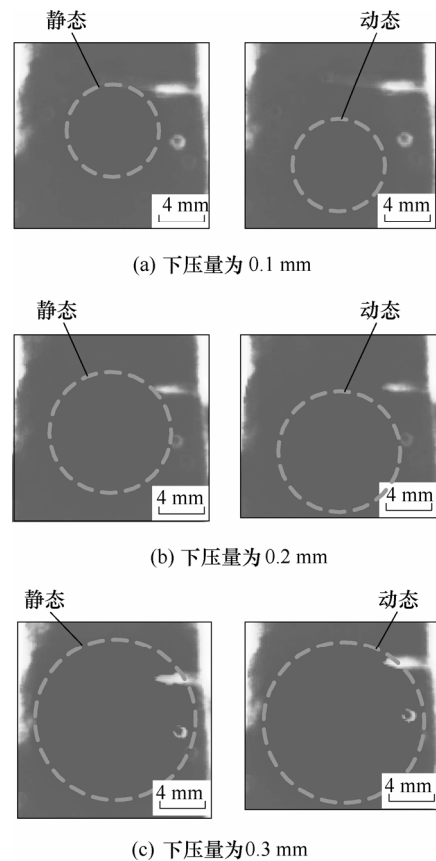


图 7 不同下压量下动静态轮廓对比

于工件上部,遮住了工件上方的光线,故拍出来的图片整体比较模糊,经过图像处理,接触区和非接触区界限十分明显。为了对比动静态的轮廓,图 7 中,每种下压量下得到的动静态轮廓图片中均画有半径相等的虚线圆,通过观察对比三种情况下的动静态接触区轮廓可知,当工件为平面时,动静态接触区轮廓均为圆,而且大小基本一致,由此也验证了仿真结果的准确性。

3 动静态去除函数的对比分析

气囊抛光采用独特的“进动”运动方式,如图 8 所示,为气囊进动运动的空间示意图。图 8 中, v_r 为抛光头自转下 Q 点的速度, v_p 为抛光头绕工件法向公转下 Q 点的速度, v_f 为工件进给速度,抛光气囊绕自身轴线的旋转角速度为 ω_1 ,绕工件法线的旋转角速度为 ω_2 , O_1 为气囊的球心位置点, O_2 为抛光接触区的圆心, l 为气囊的下压量, α 为进动角, Q 为接触区内某一点。进动抛光方法不仅解决了抛光区中心零去除量的问题,而且它能使得抛光头在工件表面的不同方向上进行材料去除,以致工件最终表面纹理具有很好的均匀性,取得较好的面型精度。

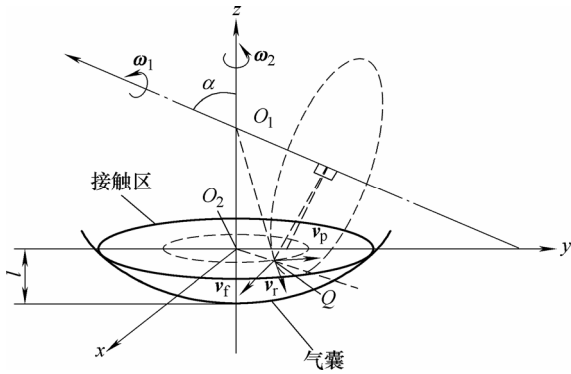


图 8 气囊进动运动空间示意图

定义动态去除函数 $r(x,y)$ 为移动时的抛光气囊在单位时间内的材料平均去除量，根据 Preston 方程，动态去除函数矩阵可用式(6)表示

$$r(x,y) = kp\mathbf{v} \quad (6)$$

式中 k ——比例常数，它与除速度和压力以外的抛光条件有关

p ——抛光接触区应力

\mathbf{v} ——抛光接触点处的抛光速度矩阵

3.1 动态接触区的抛光速度

Q 点坐标为 (x,y) ，气囊半径为 R ，则 Q 点的速度可以表示为

$$\mathbf{v}_Q = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_p + \mathbf{v}_f \quad (7)$$

又

$$\mathbf{v}_r = \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{l}_{O_1Q} = \begin{pmatrix} |\boldsymbol{\omega}_1| [(R-l)\sin\alpha - y\cos\alpha] \\ |\boldsymbol{\omega}_1| x\cos\alpha \\ |\boldsymbol{\omega}_1| x\sin\alpha \end{pmatrix}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_p = \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{l}_{O_2Q} = \begin{pmatrix} -|\boldsymbol{\omega}_2| y \\ |\boldsymbol{\omega}_2| x \\ 0 \end{pmatrix}^T \quad (9)$$

由于仿真分析中，抛光头的移动速度大小为 1 mm/s，方向为沿 x 轴正方向，故

$$\mathbf{v}_f = (1 \ 0 \ 0) \quad (10)$$

将式(8)~(10)代入式(7)即可得到 Q 点的速度。由于目前气囊抛光的工艺中，大多是将进动抛光转换成在一个圆周内的 $4 \times 90^\circ$ 方向或 $3 \times 120^\circ$ 方向上的斜抛运动组合，因此， $\mathbf{v}_p=0$ 。对于抛光平面，对材料去除起作用的速度只有工作平面内的速度分量，故抛光接触区的动态抛光速度可表示为

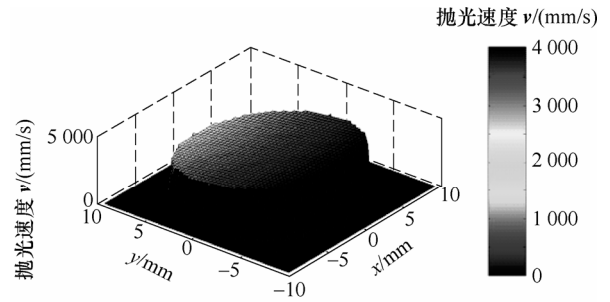
$$\mathbf{v}_M = \sqrt{(\mathbf{v}_{rx} + \mathbf{v}_{px} + \mathbf{v}_{fx})^2 + (\mathbf{v}_{ry} + \mathbf{v}_{py} + \mathbf{v}_{fy})^2} = \sqrt{\{|\boldsymbol{\omega}_1| [(R-l)\sin\alpha - y\cos\alpha] + 1\}^2 + (|\boldsymbol{\omega}_1| x\cos\alpha)^2} \quad (11)$$

抛光接触区的静态抛光速度与动态抛光速度相

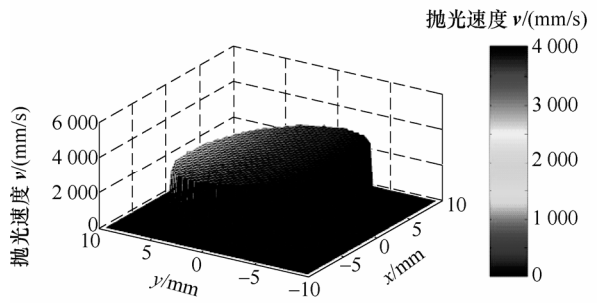
比只是少了进给速度 \mathbf{v}_f ，故静态抛光速度可表示为

$$\mathbf{v}_S = \sqrt{(\mathbf{v}_{rx} + \mathbf{v}_{px})^2 + (\mathbf{v}_{ry} + \mathbf{v}_{py})^2} = \sqrt{\{|\boldsymbol{\omega}_1| [(R-l)\sin\alpha - y\cos\alpha]\}^2 + (|\boldsymbol{\omega}_1| x\cos\alpha)^2} \quad (12)$$

利用计算机仿真可得接触区的动静态速度分布如图 9 所示。由式(11)、(12)和图 10 可得，动静态抛光速度在分布规律上区别不大，均是距离自转轴越远的区域，速度越大。两者只在数值上存在一定的差异，差异的大小随着进给速度的增大而变大。



(a) 动态抛光速度



(b) 静态抛光速度

图 9 接触区动静态抛光速度

3.2 动静态去除函数的数值仿真

由于对于动静态去除函数而言，比例常数 K 是不变的，故在数值仿真中可以不考虑其的影响，将其赋值 1。故分别将式(3)、(11)和式(2)、(12)代入式(6)即可分别得到动静态去除函数的表达式，利用计算机仿真可以得到去除函数的空间去除模型如图 10 所示。

图 10a、10b 分别为动态去除函数的等轴测图和俯视图，图 10c、10d 分别为静态去除函数的等轴测图和俯视图。从图 10 中可知，静态去除函数的最低点沿 y 方向出现偏移，这是由于接触区抛光速度沿 y 方向不对称造成的，如图 9 所示。动态去除函数相对于静态去除函数整体上基本一致，但是其最低点不仅沿 y 方向发生了偏移，沿 x 方向亦出现了明显的偏移。为了更好地区别两者间的差异，分别提取了动静态去除函数的 x 方向和 y 方向的数据并作对比分析，如图 11 所示。

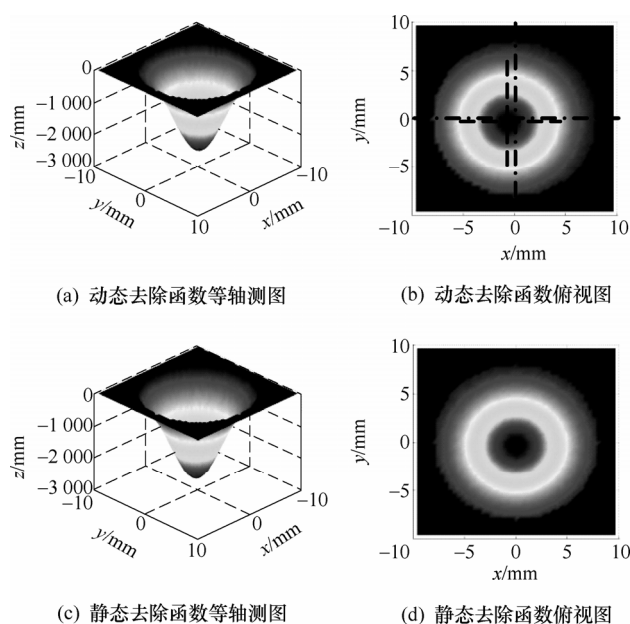


图10 去除函数空间去除模型

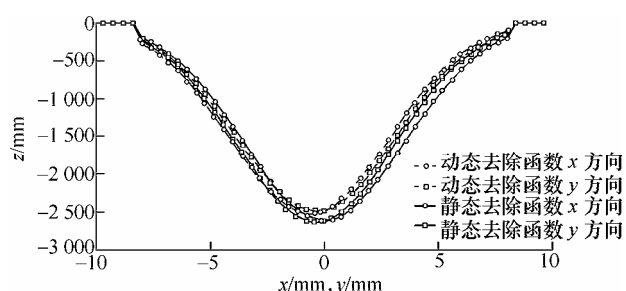
图11 动静态去除函数 x 、 y 方向数据对比

图11中,动态去除函数的 x 、 y 方向数据和静态去除函数的 x 、 y 方向数据均不重合,动态去除函数的去除率略小于静态去除函数。

4 结论

(1) 利用有限元仿真分析的方法计算得到相同条件下气囊抛光平面工件的动静态接触区轮廓均为圆形,且大小基本一致。静态接触区应力分布呈类高斯分布,动态接触区的应力分布在静态接触区应力分布的基础上,出现了峰值点沿抛光头移动的反方向偏移的现象。

(2) 在静态接触区应力呈类高斯分布的基础上,只需要将分布函数乘以一修正函数即可得到动态接触区应力分布函数,该修正函数为一次函数或二次函数均可。

(3) 动静态接触区的抛光速度分布整体趋势一致,均是距离抛光头自转轴越远的区域,抛光速度越大。两者的数值大小的差别随着进给速度的增大而变大。

(4) 拟合得到动态去除函数的去除模型,呈类

高斯分布。与静态去除函数相比,前者的去除率略小于后者。而且动态去除函数的最低点在静态去除函数的基础上沿抛光头移动的反方向偏移了一定的距离。

(5) 由于动静态去除函数的差别,必将导致二者求解出的驻留时间不一致。对于动态去除函数和静态去除函数的定量关系以及基于二者所加工出的面型精度的对比将在后文中报道。

参 考 文 献

- [1] 袁哲俊,王先逵. 精密和超精密加工技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
YUAN Zhejun, WANG Xiankui. Precision and ultra-precision machining technology [M]. Beijing :China Machine Press, 1999.
- [2] 杨华军,胡渝,谢康. 大功率导体激光束非球面准直系统的优化设计[J]. 中国激光,2007,34(12):1607-1612.
YANG Huajun, HU Yu, XIE Kang. Optimization design for aspheric collimation system of high-power semiconductor laser beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1607-1612.
- [3] 张凤生. 非球面系统中高斯光束传输的数值模拟[J]. 光学学报,2008,28(1):179-184.
ZHANG Fengsheng. Numerical computation for propagation of Gaussian beam through aspheric system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 179-184.
- [4] BINGHAM R G, WALKER D D, KING D L, et al. Novel automated process for aspheric surfaces[C]// Current Developments in Lens Design and Optical Systems Engineering, August 2-4, 2000, San Diego, CA, United states. Bellingham: SPIE, 2000: 445-450.
- [5] WALKER D D, BROOKS D, KING A, et al. The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. Optics Express, 2003, 11(8): 958-964.
- [6] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, DOUBROVSKI V, et al. New results extending the Precessions process to smoothing ground aspheres and producing freeform parts[C]// Optical Manufacturing and Testing VI, July 31-August 1, 2005, San Diego, CA, United States. Bellingham: SPIE, 2005: 1-9.
- [7] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BROOKS D, et al. New results from the precessions polishing process scaled to larger sizes[C]// Optical Fabrication, Metrology, and Materials Advancements for Telescopes, June 24-25, 2004, Glasgow, United Kingdom.

- Bellingham : SPIE , 2004 : 71-80.
- [8] WALKER D D , BEAUCAMP A T H , BINGHAM R G , et al. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation[C]// Specialized Optical Developments in Astronomy , August 25-26 , 2002 , Waikoloa , HI , United States. Bellingham : SPIE , 2002 : 73-84.
- [9] WALKER D D , BEAUCAMP A T H , BROOKS D , et al. Recent development of Precessions polishing for larger components and free-form surfaces[C]// Current Developments in Lens Design and Optical Engineering V , August 4-5 , 2004 , Denver , CO , United States. Bellingham : SPIE , 2004 : 281-289.
- [10] WALKER D D , BEAUCAMP A T H , DOUBROVSKI V , et al. Commissioning of the first precessions 1.2 m CNC polishing machines for large optics[C]// Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VII , August 14-15 , 2006 , San Diego , CA , United States. Bellingham : SPIE , 2006 : 1-8.
- [11] 高波, 姚英学, 谢大纲, 等. 气囊抛光进动机构的运动建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2) : 101-104. GAO Bo , YAO Yingxue , XIE Dagang , et al. Movement modeling and simulation of precession mechanisms for bonnet tool polishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2006 , 42(2) : 101-104.
- [12] 潘日, 王振忠, 郭隐彪, 等. 大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制[J]. 机械工程学报, 2012 , 48(11) : 183-190. PAN Ri , WANG Zhenzhong , GUO Yinbiao , et al. Movement modeling and control of precession mechanism for bonnet tool polishing large axisymmetrical aspheric lenses[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2012 , 48(11) : 183-190.
- [13] 张伟, 李洪玉, 金海. 气囊抛光去除函数的数值仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2009 , 45(2) : 308-312. ZHANG Wei , LI Hongyu , JIN Hai. Research on digital simulation and experiment of removal function of bonnet tool polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2009 , 45(2) : 308-312.
- [14] 李洪玉, 张伟, 于国彘. 空间光学元件超精密气囊抛光的去除特性研究[J]. 光学学报, 2009 , 29(3) : 811-817. LI Hongyu , ZHANG Wei , YU Guoyu. Removing characteristics of ultraprecise bonnet polishing on spatial optics elements[J]. Acta Optica Sinica , 2009 , 29(3) : 811-817.
- [15] 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.
- [16] 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 Quandou , LIU Mincai , ZHANG Hongxia. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing[J]. Optical Technique , 2000 , 26(1) : 32-34.
-
- 作者简介: 王春锦, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超精密加工装备及系统控制, 精密检测技术。
E-mail : wcj-2000@163.com
- 郭隐彪, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密加工、机电一体化、微补偿控制技术和微精密系统。
E-mail : guoyb@xmu.edu.cn
- 王振忠(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为精密加工装备及系统控制, 精密检测技术。
E-mail : wangzhenzhong@xmu.edu.cn