

基于环摆式双面抛光法加工预测模型的去除均匀性研究

王春阳^{1,2}, 帅闻², 肖博^{3*}, 黄思玲⁴, 王大森⁴¹西安工业大学西安市主动光电成像探测技术重点实验室, 陕西 西安 710021;²长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;³西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;⁴中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103

摘要 针对环摆式双面抛光难以建立稳定去除函数并进行加工面型预测这一问题, 提出了基于磨粒运动学的环摆式双面抛光加工预测模型, 并通过预测模型分析不同参数影响下元件表面去除均匀性, 针对不同特征面型给出优化策略以指导加工实验。首先, 根据环摆式双面抛光机理, 探究了环摆式双面抛光中影响去除均匀性的主要因素, 提出了元件上、下表面磨粒运动学模型, 结合 Preston 方程给出了基于磨粒运动学的环摆式双面抛光去除均匀性预测模型。根据实际加工工况, 分析了不同抛光均匀性影响因素下的磨粒轨迹分布与抛光去除非均匀性, 最后通过加工实验验证环摆式双面抛光加工预测模型。实验结果表明: 环摆式双面抛光加工预测模型的预测结果与实际加工结果基本吻合, 其面型去除特征相同。元件上表面是元件去除非均匀性的主要来源, 通过改变中心偏心距、径向摆动距离等参数能改变元件上表面的去除非均匀性, 从而影响元件整体面型特征, 并实现基于预测模型指导下元件表面面型的快速收敛。

关键词 光学设计; 环摆式; 双面抛光; 去除均匀性; 加工预测

中图分类号 TH706

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221863

1 引言

国家天文、军事以及航天领域等大型工程, 对于高端精密光学元件的需求与日俱增。以空间望远镜、高能激光武器为代表的一系列超精密光学系统对高端精密光学平面元件的需求量大, 应用范围广。而对于高端精密光学平面元件而言, 使用常见的抛光工艺即可制备得到, 如小工具抛光工艺、气囊抛光工艺、磁流变抛光工艺、应力盘抛光工艺、离子束抛光工艺等, 这些加工工艺较为成熟, 但仍存在加工周期长、加工环境要求高、加工成本昂贵等劣势^[1-8]。环摆式双面抛光工艺表现出面型快速收敛、抛光效率高、加工时间短等优势^[9-11], 但环摆式双面抛光目前缺乏较为完善的去除预测方法, 依靠经验或仅借助环抛、摆抛模型难以对其进行准确分析, 因此建立环摆式双面抛光去除均匀性加工预测模型对进一步提高抛光效率、缩短抛光时间有着重要意义。

近几年, 国内外部分学者已经开展有关环摆式双面抛光等方面的研究。张洋等^[12]通过向量法构建了工件上任一点的运动轨迹及其相对速度的数学模型, 并

运用 Preston 模型建立了双面抛光过程中材料的去除特性方程, 但其没有进行加工预测模型分析。Zhao 等^[13]分析了直线摆动驱动下, 工件盘与研磨盘转速比、工件盘往复周期与研磨盘转动周期之比之间的耦合关系对轨迹分布的影响, 但是没有考虑其他参数对抛光均匀性的影响; Huang 等^[14]研究了光学抛光过程中驻留时间的优化函数, 将稀疏的病态线性方程转化为具有边界约束的二次规划问题。杨金双等^[15]通过磨粒运动学分析, 提出了一种基于离散统计的磨粒轨迹均匀性评价方法, 并求取了设定参数下双面研磨轨迹分布均匀性的方差值, 但并未进行加工实验验证。

本文针对环摆式抛光工艺目前缺乏较为完善的去除预测模型的问题, 首先根据环摆式双面抛光的实质, 分析得出影响环摆式双面抛光的主要因素, 进而建立基于磨粒轨迹运动学的加工预测模型, 通过软件对抛光过程中磨粒运动进行仿真。仿真中输入工艺参数, 在计算机上进行虚拟加工, 分析主要影响抛光去除均匀性的加工参数, 通过改变中心偏心距、径向摆动距离等参数能影响去除均匀性, 并根据模拟加工结果来指导加工实验。使用环摆式双面抛光机床, 针对边长为

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2022-11-19; 录用日期: 2022-12-16; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 快速扶持项目(第二阶段)(80923010202)

通信作者: *13610701380@126.com

430 mm 的正方形熔石英元件进行抛光实验。

2 环摆式双面抛光磨粒运动学分析

2.1 环摆式平面抛光机理

环摆式双面抛光机床结构简图如图 1 所示。在抛

光过程中,抛光压力通过气缸施压给上抛光盘,并传递到元件表面,上抛光盘可同时进行旋转与钟摆式径向运动,元件盘带动元件同时旋转与径向摆动,下抛光盘绕一个固定轴旋转。抛光运动系统与机械固定结构、抛光液环境等共同组成环摆式平面抛光系统。

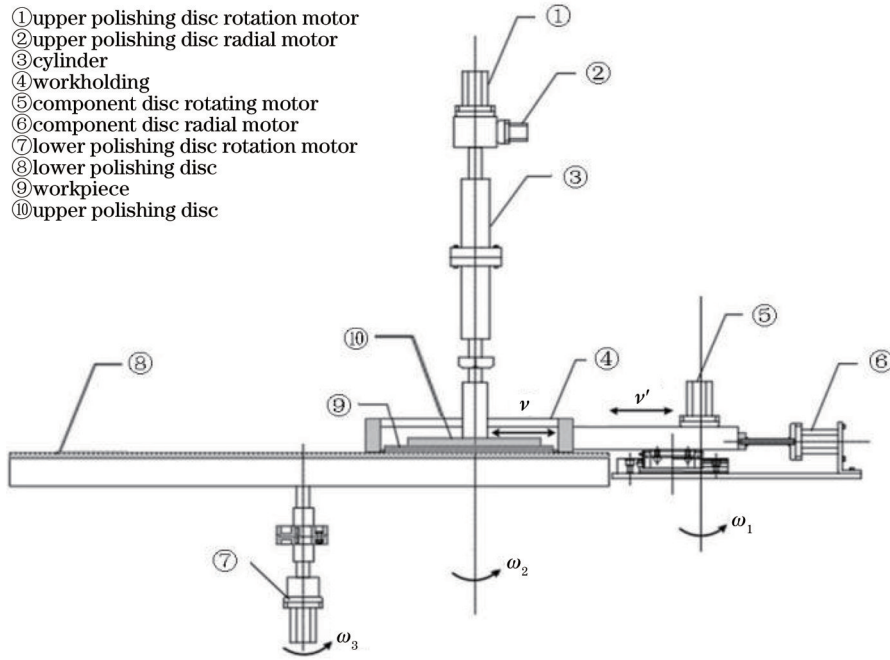


图 1 环摆式双面抛光机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of ring pendulum double-sided rapid polishing machine

环摆式双面抛光工艺的去磨本质仍是在浸润抛光液的环境下,通过抛光盘与元件的相对运动来使元件抛光。因此,对于大多数研磨抛光适用的 Preston 公式,这里仍然适用。抛光时某一点的去磨量满足

$$dW = CPVdT, \quad (1)$$

式中: W 是该点去除量; C 是抛光常数; P 为该点抛光压力; V 为该点相对速度; T 是该点抛光驻留时间。考虑抛光环境的稳定性,抛光过程中,抛光常数 C 通常视为一定值,此时影响去除量的主要变量因素是压力、相对速度与抛光时间。

本文利用有限元分析软件 ANSYS 对元件表面压力进行静态建模仿真分析,如图 2 所示。中间正方形围起来的区域为边长为 430 mm 的元件,由于上盘中心及周边存在圆孔,这些区域用灰色表示其压力为零。从图 2 的压力分布情况可以得出,在环摆式双面抛光过程中,压力分布是相对均匀的,因此本文在后续分析中假定抛光过程元件各处压力恒定。

2.2 磨粒运动学建模

2.2.1 元件上表面磨粒运动学建模

本文首先以单颗磨粒为对象进行运动学建模分析,建立以元件转动中心为 O_1 原点的相对坐标系 $\phi_1 = [O_1, x_1, y_1]$ 、以上抛光盘旋转中心 O_2 为原点的相对坐

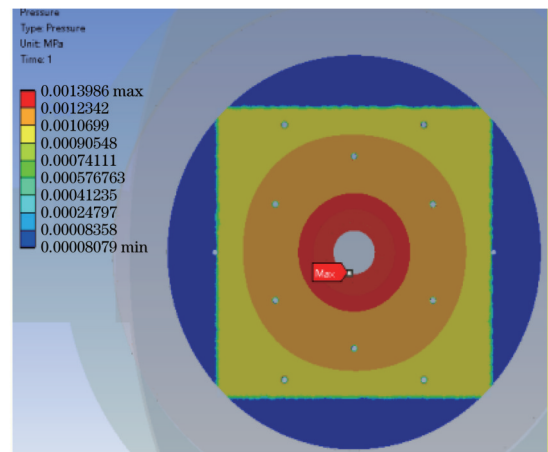


图 2 ANSYS 静态压力建模仿真

Fig. 2 ANSYS static pressure modeling simulation

标系 $\phi_2 = [O_2, x_2, y_2]$ 和以上抛光盘旋转中心 O_3 (O_2) 为原点的定坐标系 $\phi_3 = [O_3, x_3, y_3]$,如图 3 所示,坐标系 ϕ_1 以角速度 ω_1 绕元件盘中心 O_1 旋转,坐标系 ϕ_2 以角速度 ω_2 绕上抛光盘中心 O_2 旋转,在定坐标系内抛光盘上任意一点磨粒 p 的初始相位角为 θ ,点 p 到上抛光盘中心 O_2 的距离为 r_p ,上抛光盘和元件盘的偏心距为 X 。

p 点在定坐标系 ϕ_3 中的坐标方程为

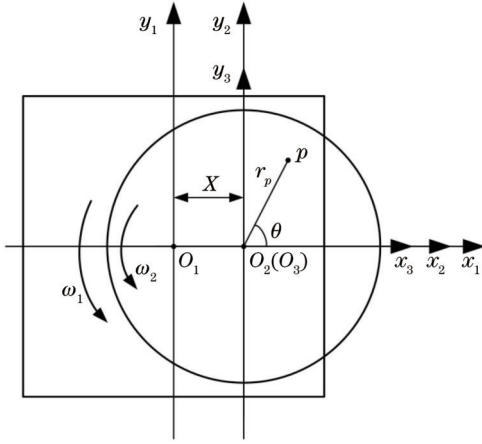


图3 磨粒运动学分析简图

Fig. 3 Schematic diagram of kinematic analysis of abrasive particles

$$\begin{cases} x_p = r_p \cos \theta \\ y_p = r_p \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

p 点经过旋转坐标变换后有

$$[x'_p \ y'_p \ 1] = [x_p \ y_p \ 1] \begin{bmatrix} \cos(\omega_2 t) & \sin(\omega_1 t) & 0 \\ -\sin(\omega_2 t) & \cos(\omega_2 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

则其在上抛光盘旋转坐标系 ϕ_2 中的轨迹方程式如下所示:

$$\begin{cases} x'_p = r_p \cos(\theta + \omega_2 t) \\ y'_p = r_p \sin(\theta + \omega_2 t) \end{cases} \quad (4)$$

根据模型的分析,上抛光盘和元件盘之间的坐标变换只需平移和旋转两种。由坐标复合变换先平移后旋转的原理,可得到变换矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -X & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) & -\sin(\omega_1 t) & 0 \\ \sin(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

旋转坐标系 $\phi_1 = [O_1, x_1, y_1]$ 下 p 点坐标向旋转坐标系 $\phi_2 = [O_2, x_2, y_2]$ 下 p 点坐标转换的方程为

$$[x''_p \ y''_p \ 1] = [x'_p \ y'_p \ 1] M, \quad (6)$$

最后得到在相对坐标系下 $\phi_2 = [O_2, x_2, y_2]$ 关于 p 点坐标 (x''_p, y''_p) 的轨迹运动方程为

$$\begin{cases} x''_p = r_p \cos(\theta + \omega_2 t - \omega_1 t) - X \cos(\omega_1 t) \\ y''_p = r_p \sin(\theta + \omega_2 t - \omega_1 t) + X \sin(\omega_1 t) \end{cases}. \quad (7)$$

2.2.2 元件下表面磨粒运动学建模

元件下表面的单磨粒运动类型与元件上表面单磨粒运动类型相似,区别在于下抛光盘不存在径向摆动。但由于装夹元件的元件盘存在相对于下抛光盘的径向摆动速度,若将装夹元件的元件盘视为参考坐标系,即下抛光盘相对元件存在一径向摆动速度,其速度矢量与元件径向摆动速度方向大小相等,方向相反。因此经式(3)的平移变换改变后可以得到变换矩阵 M' 为

$$M' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ X' & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) & -\sin(\omega_1 t) & 0 \\ \sin(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

只需将下抛光盘上磨粒映射到元件上,下抛光盘的转速为 ω_3 ,与式(4)、式(5)同理可得到下抛光盘某一点 p' 磨粒在元件下表面的轨迹方程:

$$\begin{cases} x'_p = r'_p \cos(\theta' + \omega_3 t - \omega_1 t) + X' \cos(\omega_1 t) \\ y'_p = r'_p \sin(\theta' + \omega_3 t - \omega_1 t) - X' \sin(\omega_1 t) \end{cases}. \quad (9)$$

2.2.3 磨粒速度场分布

为得到抛光过程中任一点的相对速度,根据式(7)对时间求导,得到

$$\begin{cases} v_x = -r_p(\omega_2 - \omega_1) \sin(\theta + \omega_2 t - \omega_1 t) + X\omega_1 \sin(\omega_1 t) \\ v_y = r_p(\omega_2 - \omega_1) \cos(\theta + \omega_2 t - \omega_1 t) + X\omega_1 \cos(\omega_1 t) \end{cases}, \quad (10)$$

则点 p 的合成相对速度为

$$v = \sqrt{\varphi(\omega_2 - \omega_1) + (X\omega_1)^2}, \quad (11)$$

$$\varphi(\omega_2 - \omega_1) = r_p^2(\omega_2 - \omega_1)^2 + 2Xr_p\omega_1(\omega_2 - \omega_1) \cos(\theta + \omega_2 t). \quad (12)$$

同理,对式(8)进行求导,得到点 p' 的合成相对速度为

$$v' = \sqrt{\varphi'(\omega_3 - \omega_1) + (X'\omega_1)^2}, \quad (13)$$

$$\varphi'(\omega_3 - \omega_1) = r_p'^2(\omega_3 - \omega_1)^2 - 2X'\omega_1 r_p'(\omega_3 - \omega_1) \cos(\theta' + \omega_3 t). \quad (14)$$

由式(9)~(12)可知,当 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ 时,点 p 和点 p' 的合成相对速度可化简为

$$\begin{cases} v = X\omega_1 \\ v' = X'\omega_1 \end{cases}. \quad (15)$$

当上、下抛光盘转速等于元件转速时,其元件上各点的相对速度仅由中心距与转速决定,依据 Preston 方程,抛光去除量的决定性因素为元件上各点处的驻留时间,即此时抛光去除均匀性效果最好。这与文献[15-16]中转速比相等时,磨粒轨迹最均匀的结论一致。

2.3 预测模型验证

根据 Preston 方程,考虑抛光压力与抛光常数为一个定值,根据得到的速度场分布和磨粒抛光时间分布即可得到抛光去除量分布。在元件上采用有限元法构建若干个方格,统计每个方格内磨粒划过的相对速度和抛光时间,即可得到元件表面的去除量分布情况。

$$\Delta W = \sum_{0 \leq i \leq n} CPV(i)T(i)/\Delta S, \quad (16)$$

式中: ΔW 表示平均去除量; i 为第 i 个磨粒; $V(i)$ 为抛

光时第 i 个磨粒经过该方格的平均速度; $T(i)$ 为抛光时第 i 个磨粒经过该方格的抛光时间; ΔS 为每个微小方格面积。使用平均去除量来表示该方格内的去除量可减少异常值干扰和计算量。

为方便直观地得到抛光仿真去除量结果, 本文通过引入抛光去除非均匀性热图直观得到抛光仿真过程中去除量分布。通过基于磨粒轨迹运动的环摆式双面抛光加工预测模型, 得到元件上、下表面去除量分布并

进行叠加, 将结果导入元件初始面型数据, 输出元件在该组加工参数下的预测面型。

选取加工完毕的 3 组初始面型不同、加工参数不同的透光熔石英元件进行预测模型验证, 将各元件加工参数不同的部分列出, 如表 1 所示。将各元件的初始面型导入环摆式双面抛光加工预测模型后, 得到的仿真结果与实际结果如图 4 所示, 其中每个分图的左图为实际加工结果, 右图为仿真加工结果。

表 1 仿真加工参数配置

Table 1 Configuration of simulation machining parameters

Workpiece number	Center eccentricity distance of upper disk /mm	Radial swing distance of upper disk /mm	Radial swing velocity of upper disk /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1#	40	10	1
2#	20	30	3
3#	30	20	6

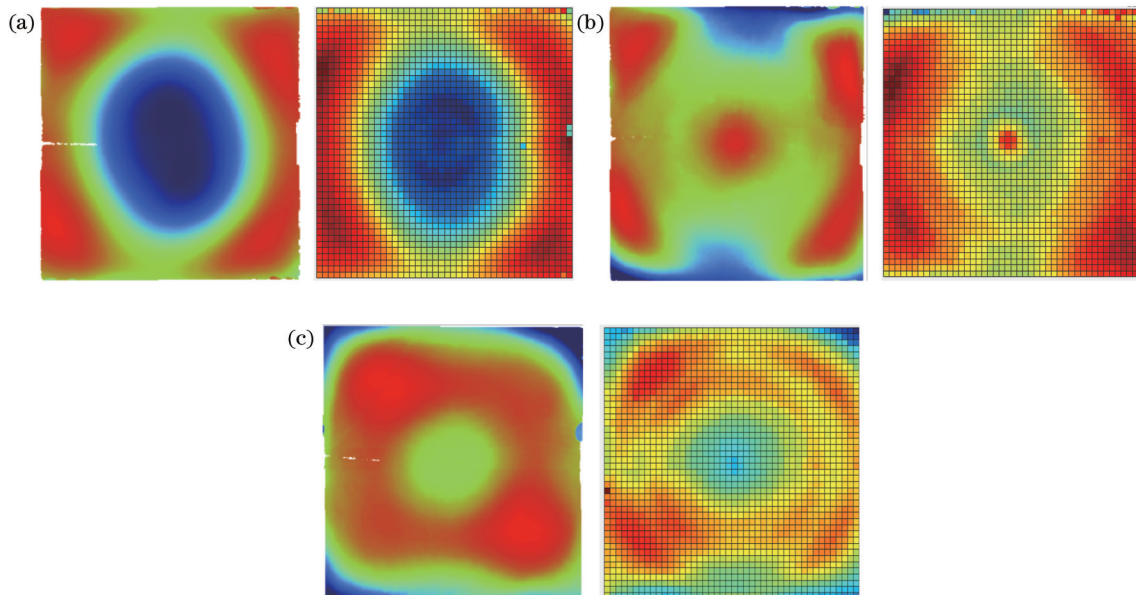


图 4 元件检测结果。(a) 1#元件实际加工与仿真结果对比; (b) 2#元件实际加工与仿真结果对比; (c) 3#元件实际加工与仿真结果对比

Fig. 4 Inspection results of components. (a) Comparison of actual machining and simulation results of 1# workpiece; (b) comparison of actual machining and simulation results of 2# workpiece; (c) comparison of actual machining and simulation results of 3# workpiece

预测模型仿真结果与实际加工结果基本吻合, 其面型去除特征相同, 本文提出的环摆式双面抛光加工预测模型能较好地预测元件真实加工结果。

3 环摆式双面抛光去除均匀性分析

3.1 元件上、下表面去除均匀性分析

针对环摆式双面抛光可对双面同时进行加工的特点, 对元件上、下表面去除均匀性进行分析。根据环摆式双面抛光设备的参数及特性, 下抛光盘与元件的中心偏心距(径向摆动中点到元件中心的距离)总是远大于上抛光盘与元件的中心偏心距, 在加工预测模型中需要额外考虑此区别。使用环摆式双面抛光加工预测

模型进行仿真, 得到元件上、下表面去除量分布热图如图 5 所示, 分别计算 5 组不同参数下元件上、下表面去除量平均值及去除量均方差, 如图 6、图 7 所示。

由元件上、下表面去除量平均值可知, 下抛光盘对元件下表面的去除量远大于上抛光盘对元件上表面的去除量, 这与理论一致, 下抛光盘具有较大的偏心距, 导致元件下表面磨粒的相对线速度大于元件上表面磨粒, 从而直接影响元件上下表面去除量分布。因此, 本文后续针对抛光去除均匀性进行分析, 仅考虑上抛光盘对元件上表面的影响。

3.2 抛光均匀性影响因素分析

为实现均匀性抛光, 需要磨粒抛光运动轨迹分布

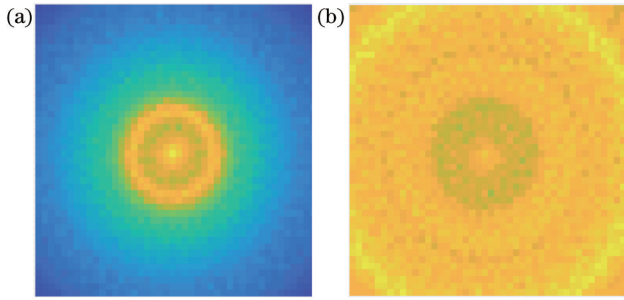


图 5 元件上下表面去除量分布图。(a)上表面去除量分布；(b)下表面去除量分布

Fig. 5 Distributions of removal amount from upper and lower surfaces of workpiece. (a) Distribution of removal amount on upper surface; (b) distribution of removal amount on lower surface

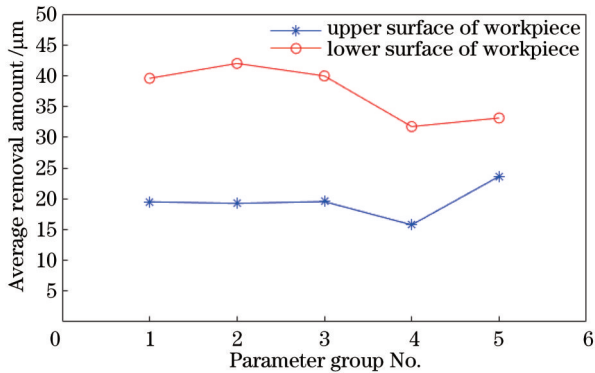


图 6 不同组参数下元件上下表面平均去除量

Fig. 6 Average removal amount of upper and lower surfaces of workpiece under different groups of parameters

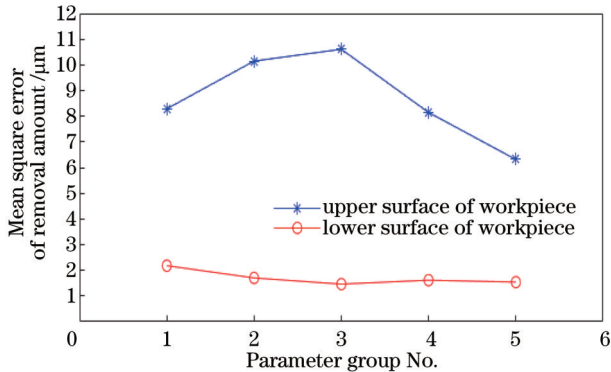


图 7 不同组参数下元件上下表面去除量均方差

Fig. 7 Mean square error of removal amount of upper and lower surfaces under different groups of parameters

均匀且随机,有研究表明:若设定上抛光盘转速与元件盘转速之比(即转速比)的小数部分为无限不循环小数,则仿真的抛光轨迹分布更加随机,抛光覆盖范围更广^[16-17]。因此,本文将在上抛光盘转速与元件转速之比为无理数的情况下,讨论中心偏心距、径向摆动距离、径向变速运动等情况对抛光均匀性的影响。

根据环摆式双面抛光设备参数,设定上抛光盘直径为 590 mm,上抛光盘中心小孔直径为 60 mm,元件

盘直径为 780 mm,元件边长为 430 mm,上抛光盘转速为 15 rad/min,转速比为 $\sqrt{5}/2$,仿真磨粒数量为 1000 颗,仿真时间为 1000 s。

3.2.1 中心偏心距的影响

依据实际加工情况,默认磨粒的位置随机分布并且磨粒嵌入上抛光盘上,径向摆动距离 L 为 30 mm,上抛光盘径向摆动速度为 1 mm/s,选取中心偏心距 X 为 0、15、30、45、60 mm,其仿真结果如图 8 所示,其中:每个分图左侧为 1000 颗磨粒在给定参数下的轨迹叠加后的图像,反映着磨粒轨迹的分布规律;每个分图右侧为 1000 颗磨粒按速度场分布与驻留时间分布叠加后的热图,反映着磨粒轨迹去除量分布规律。

从图 8 可以看出,中心偏心距为 0 mm 时,上抛光盘中心存在一个半径为 30 mm 的圆孔,导致元件中心附近无磨粒轨迹,中心没有被去除,这反映在热图上就是此处去除量最低,且元件中心附近出现一圈高去除量环带。随着中心偏心距的增大,元件中心区域去除空洞不断缩小直至变为高去除中心,元件上表面去除均匀性逐渐变好。这一结果表明在不同的中心偏心距下,加工前后的元件表面面型会发生变化。若元件初始面型中间高四周低,使用较大的中心偏心距可以使抛光过程中元件中心去除量增大,四周去除量减小;反之,若元件初始面型中心低四周高,使用较小的中心偏心距可以使元件四周去除量增大,中心去除量减小。

3.2.2 径向摆动距离的影响

依据实际加工情况,默认磨粒位置随机分布并嵌入在上抛光盘上,中心偏心距 X 为 30 mm,上抛光盘径向摆动速度为 1 mm/s,选取径向摆动距离 $L=0、15、30、45、60$ mm,保持其他参数不变,其仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,径向摆动距离为 0 mm 时,同样由于半径为 30 mm 的圆孔的存在,元件中心附近无磨粒轨迹,中心没有去除,随着径向摆动距离的增大,中心逐渐被磨粒轨迹覆盖,但与增大中心偏心距不同,随着径向摆动距离继续增大,元件中心附近去除量增加,但高去除环带依旧存在于元件四周,继续增大径向摆动距离,元件上表面去除非均匀性逐渐减弱。这一结果表明较小径向摆动距离比较适合加工初始面型四周高中心低的元件。

3.2.3 径向摆动速度的影响

依据实际加工情况,默认磨粒位置随机分布并嵌入在上抛光盘上,径向摆动距离 L 为 30 mm,中心偏心距 X 为 15 mm,选取上抛光盘径向摆动速度 V 为 1、3、5、7、9 mm/s,保持其他参数不变,其仿真结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出,当径向摆动速度较小时,元件中心同样由于圆孔的存在表现出较小的去除量,增加

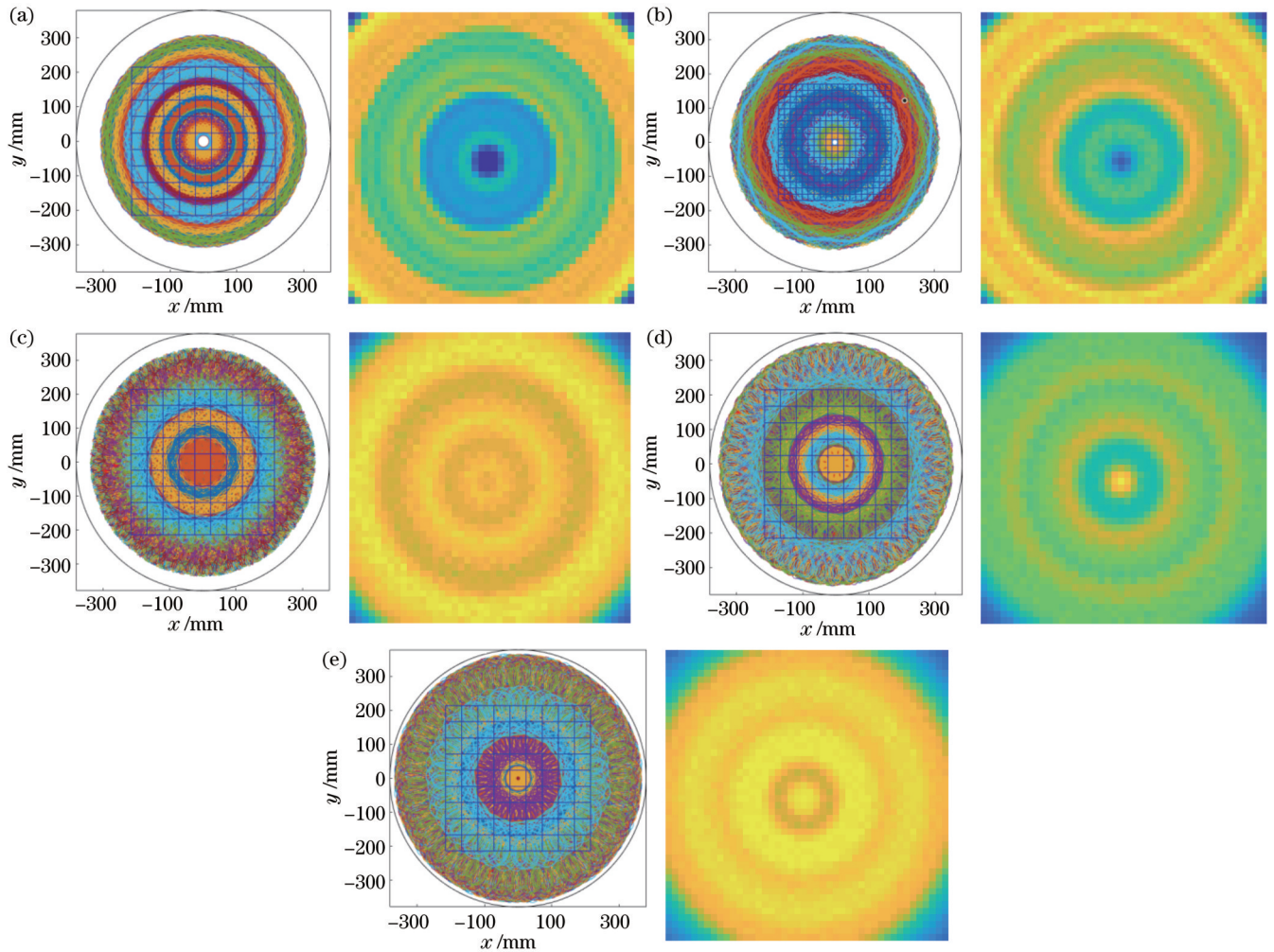


图 8 不同中心偏心距下抛光磨粒轨迹分布。(a)中心偏心距为 0 mm;(b)中心偏心距为 15 mm;(c)中心偏心距为 30 mm;(d)中心偏心距为 45 mm;(e)中心偏心距为 60 mm

Fig. 8 Trajectory distributions of polishing abrasive particles under different center eccentricity. (a) Center eccentricity is 0 mm; (b) center eccentricity is 15 mm; (c) center eccentricity is 30 mm; (d) center eccentricity is 45 mm; (e) center eccentricity is 60 mm

大径向摆动速度后,元件中心的空洞逐渐消失,但中心始终存在一个较低去除量区域。这一结果表明增大径向摆动速度也能增大元件中心去除量,但是改变效果不如改变中心偏心距与径向摆动距离明显,另外增大径向摆动速度对提高元件上表面去除均匀性具有明显效果。

在对元件上表面去除量热图进行分析后发现:对上述参数进行仿真时,元件表面总出现元件四周去除量多、中心去除量少这一特征,通过修整局部抛光垫的厚度或者更换上抛光盘尺寸可以改变这一特征,从而实现元件表面特定区域的可控去除,为提高环摆式双面抛光效率提供可靠手段。

4 实验及结果

实验过程中采用 $430\text{ mm} \times 430\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的熔石英材料作为实验件,使用环摆式双面抛光机床作为实验设备,使用粒度为 200 的金刚石修整盘作为修整由图 12 可知,1#元件加工后的检测面型 PV 值为

器,实验结束后,使用相移式激光干涉仪检测元件表面透射面型。

4.1 实验

选取初始面型不同的 2 块透光熔石英编号并进行工艺实验,元件初始透射面型如图 11 所示。

根据 3.3 节分析,需要去除元件表面高点,1#元件四周较高而中心较低,适合使用较小的中心偏心距、径向摆动距离以及较大的径向摆动速度。2#元件四周较低而中心较高,适合使用较大的中心偏心距、径向摆动距离以及较小的径向摆动速度。加工参数如表 2 所示,加工时长为 2 h。加工过程中使用 GeO_2 抛光液,抛光液中磨粒的平均直径约为 $0.5\ \mu\text{m}$,维持抛光液 pH 值为 7.0~7.5,质量浓度为 20~40 g/L,温度为 21~22 °C,流量为 0.3~0.7 L/min。

4.2 实验结果

将加工结束后的元件进行清洗并送去检测后,所得元件面型如图 12 所示。

1. 28λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 2#元件加工后的检测面型 PV

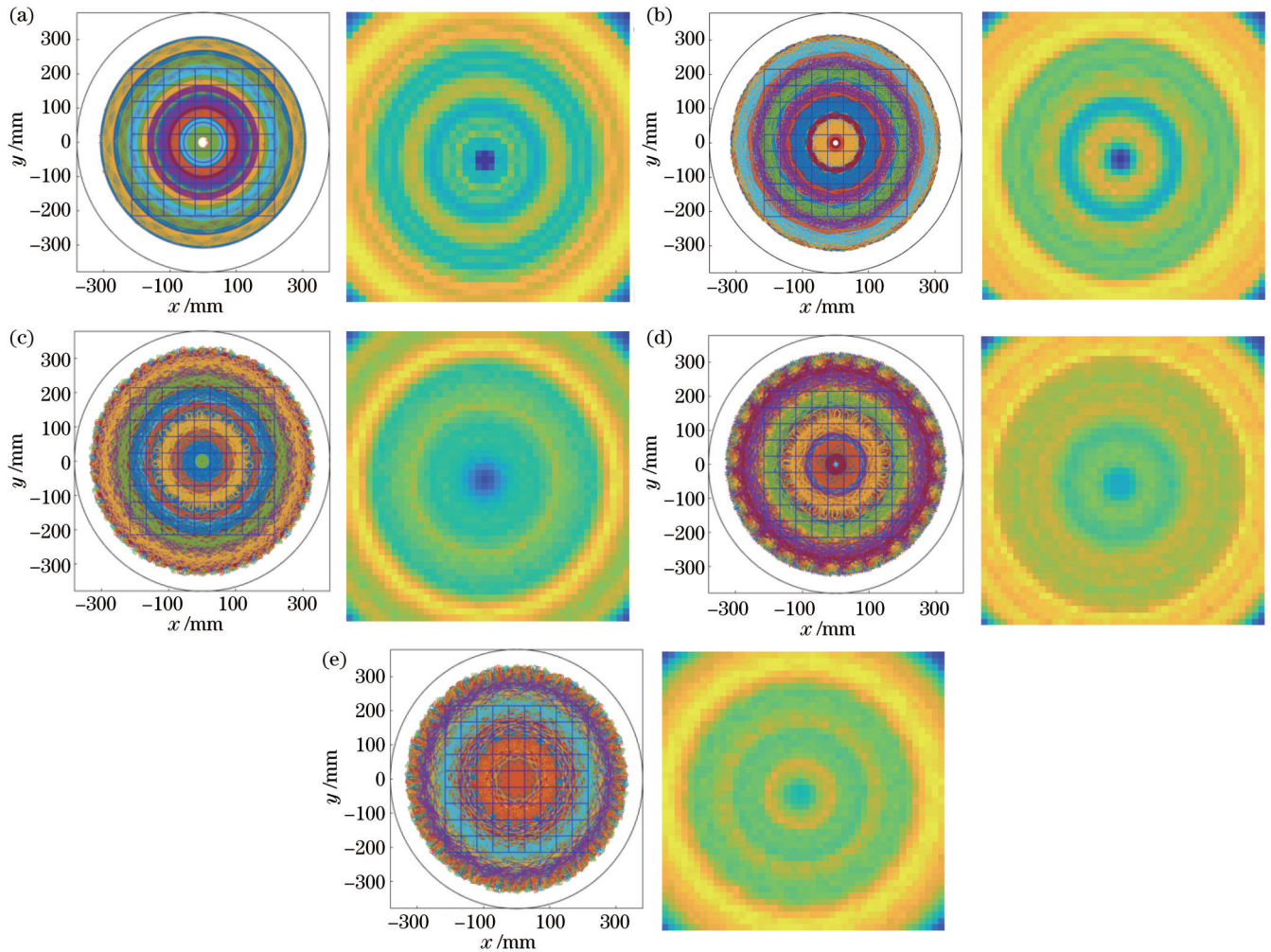


图9 不同径向摆动距离下抛光磨粒轨迹分布。(a)径向摆动距离为0 mm;(b)径向摆动距离为15 mm;(c)径向摆动距离为30 mm;(d)径向摆动距离为45 mm;(e)径向摆动距离为60 mm

Fig. 9 Trajectory distributions of polishing abrasive particles under different radial swing distances. (a) Radial swing distance is 0 mm; (b) radial swing distance is 15 mm; (c) radial swing distance is 30 mm; (d) radial swing distance is 45 mm; (e) radial swing distance is 60 mm

值为 1.05λ 。1#元件四周去除量明显,中心去除量少于元件四周。由于上抛光盘与元件边缘的应力发生变化,使用该类型参数容易引起塌边,不宜长时间使用该参数进行加工。2#元件中心区域的不均匀性得到明显去除,而四周去除量较少,这与模型分析结论一致。另外,经过多次抛光工艺实验发现,实际加工后面型特征基本无变化,修整上、下抛光垫后元件面型变化明显,因此,抛光垫平整度、釉化程度也影响元件表面去除均匀性。

5 结 论

本文针对环摆式双面抛光工艺,建立了基于磨粒运动学的环摆式双面抛光加工预测模型,并进行了理论分析和实验验证,得到以下结论:

1)通过针对3组初始面型不同的熔石英的加工仿真与加工实验结果对比,验证了环摆式双面抛光加工预测模型能正确映射不同工艺参数对元件加工结果的

影响;

2)利用预测模型分析元件上、下表面去除均匀性,发现元件上表面的去除不均匀程度是元件下表面的3~5倍,元件上表面是元件去除不均匀的主要来源;

3)通过不断调整中心偏心距、径向摆动距离、径向摆动速度等参数,获得元件上表面去除均匀性规律,这为实际加工中设定、调整加工参数提供理论基础;

4)根据去除均匀性影响因素分析,使用优化相应去除特征后的工艺参数加工2 h,检测得到其中1#元件的PV值为 1.28λ ,2#元件的PV值为 1.05λ 。结果表明:预测模型指导下的环摆式双面抛光能够达到较好的面型精度,为后续环摆式双面抛光高效率加工提供可靠的解决方法。

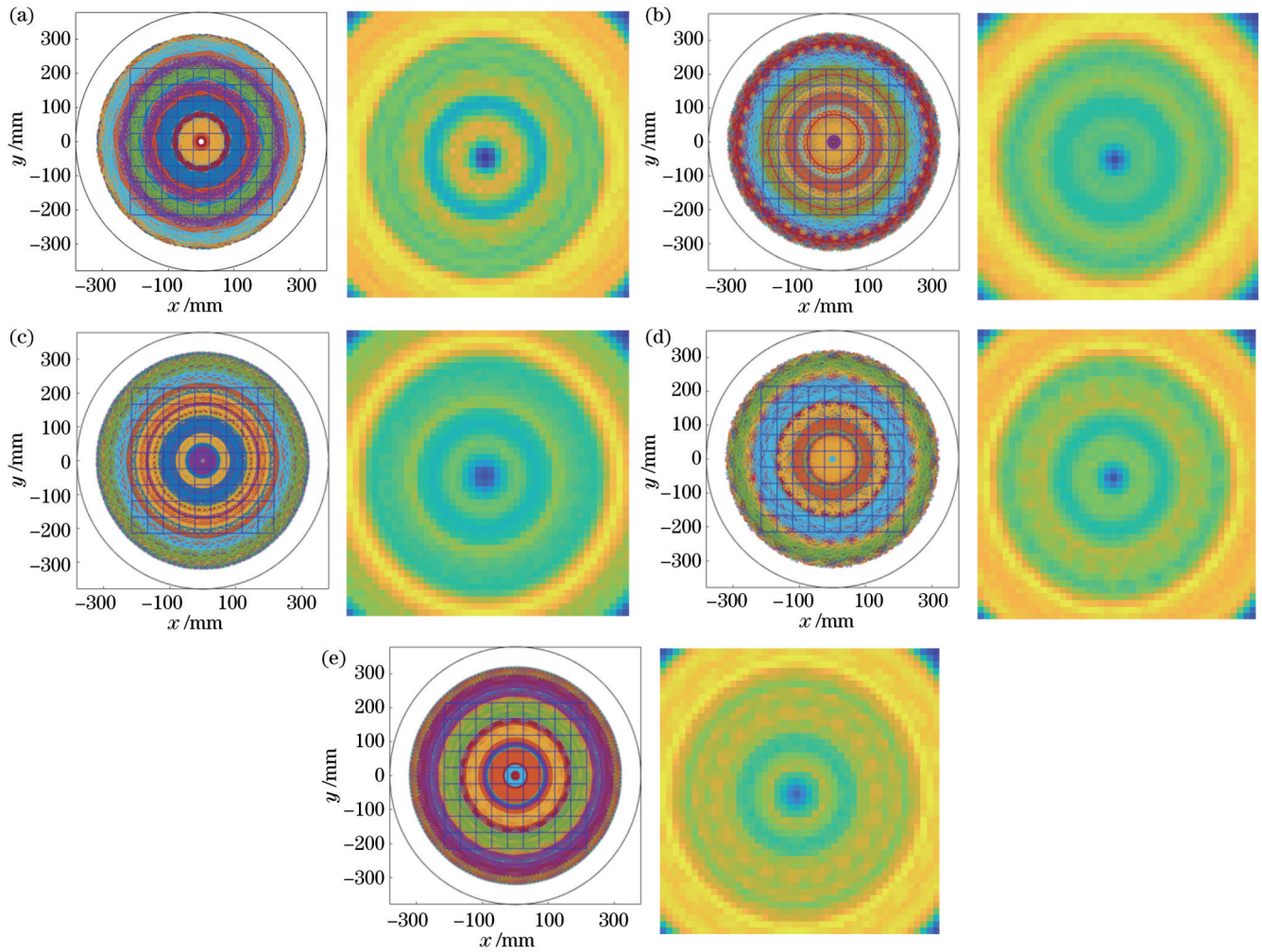


图 10 不同径向摆动速度下抛光磨粒轨迹分布。(a)径向摆动速度为 1 mm/s;(b)径向摆动速度为 3 mm/s;(c)径向摆动速度为 5 mm/s;(d)径向摆动速度为 7 mm/s;(e)径向摆动速度为 9 mm/s

Fig. 10 Trajectory distributions of polishing abrasive particles under different radial swing speed. (a) Radial swing speed is 1 mm/s; (b) radial swing speed is 3 mm/s; (c) radial swing speed is 5 mm/s; (d) radial swing speed is 7 mm/s; (e) radial swing speed is 9 mm/s

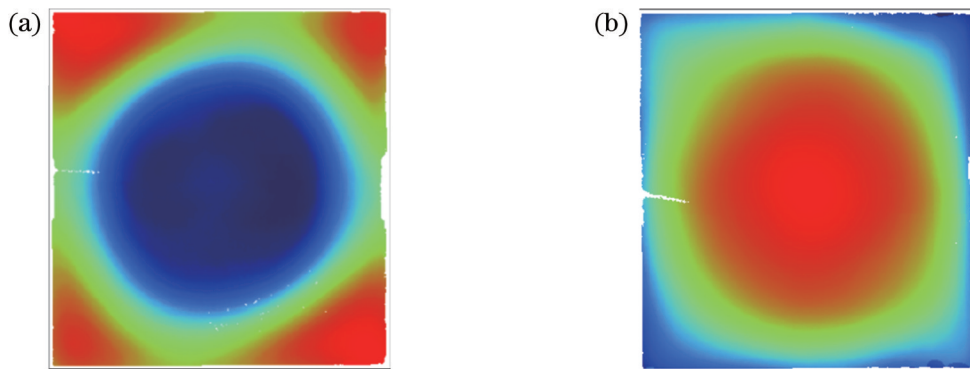


图 11 不同元件的初始面型。(a) 1#元件初始面型;(b) 2#元件初始面型

Fig. 11 Initial surfaces of different workpieces. (a) Initial surface of 1# workpiece; (b) initial surface of 2# workpiece

表 2 实验加工参数配置

Table 2 Configuration of experimental processing parameters

Workpiece number	Center eccentricity distance of upper disk /mm	Radial swing distance of upper disk /mm	Radial swing velocity of upper disk /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1#	15	15	7
2#	30	60	1

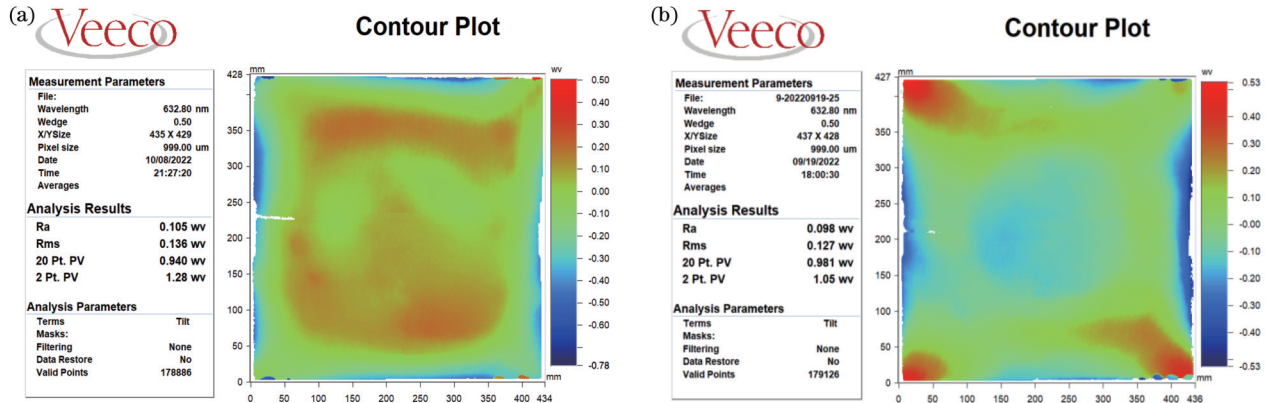


图 12 实验元件的检测结果。(a) 1#元件加工后面型;(b) 2#元件加工后面型

Fig. 12 Inspection results of experimental components. (a) Machined surface of 1# workpiece; (b) machined surface of 2# workpiece

参 考 文 献

- [1] 夏菁菁, 余俊, 王占山, 等. 单晶硅化学机械抛光划痕演变研究[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0912002.
Xia J J, Yu J, Wang Z S, et al. Scratch evolution for monocrystalline silicon during chemical-mechanical polishing[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0912002.
- [2] 孙国斌, 蒋世磊, 张余豪, 等. 离轴抛物面镜离子束抛光工艺研究[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0922003.
Sun G B, Jiang S L, Zhang Y H, et al. Ion beam polishing process of off-axis parabolic mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0922003.
- [3] 王振忠, 施晨淳, 张鹏飞, 等. 先进光学制造技术最新进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 23-56.
Wang Z Z, Shi C C, Zhang P F, et al. Recent progress of advanced optical manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 23-56.
- [4] 陈博文, 孙树峰, 王茜, 等. 材料表面激光抛光技术研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 74-89.
Chen B W, Sun S F, Wang X, et al. Research progress of laser polishing technology for material surface[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 74-89.
- [5] 李强, 刘清磊, 杜玉晶, 等. 结构化表面优化设计及应用的研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 59-73.
Li Q, Liu Q L, Du Y J, et al. Advances in optimization design and application of textured surfaces[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 59-73.
- [6] 林泽文, 王振忠, 黄雪鹏, 等. 机器人气囊抛光去除函数稳定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(5): 24-32.
Lin Z W, Wang Z Z, Huang X P, et al. Influence of robotic structural deformation on bonnet polishing removal function[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(5): 24-32.
- [7] Cao M C, Zhao H Y, Xie R Q, et al. Multiparameter optimization design of chemical mechanical polishing for planar optics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(7): 2153-2162.
- [8] Liao D F, Zhang F H, Xie R Q, et al. Deterministic control of material removal distribution to converge surface figure in full-aperture polishing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 144-152.
- [9] 何曼泽, 王琳, 周佩璠, 等. 采用环摆抛的双面抛光技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1526-1529.
He M Z, Wang L, Zhou P F, et al. Technique of double-sided polishing based on ring-pendulum polishing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1526-1529.
- [10] 何曼泽, 王琳, 周佩璠, 等. 3 mm厚大口径超薄元件双面抛光工艺[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3315-3317.
He M Z, Wang L, Zhou P F, et al. Double-side polishing of 3 mm large-aperture ultra-thin component[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3315-3317.
- [11] 何曼泽, 周佩璠, 黄颖. 非固定环带随机双面抛光技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(12): 38-42.
He M Z, Zhou P F, Huang Y. Research on non-fixed ring belt double-side polishing technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(12): 38-42.
- [12] 张洋, 黄永刚, 刘辉, 等. 微通道板双面抛光过程材料去除特性研究[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 336-342.
Zhang Y, Huang Y G, Liu H, et al. Material removal property in double-sided polishing process for microchannel plates[J]. Infrared Technology, 2014, 36(4): 336-342.
- [13] Zhao D W, Wang T Q, He Y Y, et al. Kinematic optimization for chemical mechanical polishing based on statistical analysis of particle trajectories[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2013, 26(4): 556-563.
- [14] Huang T, Zhao D, Cao Z C. Trajectory planning of optical polishing based on optimized implementation of dwell time[J]. Precision Engineering, 2020, 62: 223-231.
- [15] 杨金双, 朱祥龙. 行星式双面研磨轨迹均匀性研究[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(6): 41-43.
Yang J S, Zhu X L. Research on uniformity of trajectory in planetary double-side lapping process[J]. Mechanical Research & Application, 2015, 28(6): 41-43.
- [16] 姬孟托. 基于无理数转速比的平面研磨抛光均匀性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
Ji M T. Study on uniformity of particle trajectories with irrational rotational ratio in lapping and polishing[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.

- [17] 钟敏, 袁任江, 李小兵, 等. 磨粒和抛光垫特性对蓝宝石超声化学机械抛光的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 125-132. Zhong M, Yuan R J, Li X B, et al. Effects of abrasive particles

and pads' characteristics on ultrasonic assisted chemical mechanical polishing for sapphire[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 125-132.

Uniformity Removal Based on Processing Prediction Model of Ring-Pendulum Double-Sided Polishing Method

Wang Chunyang^{1,2}, Shuai Wen², Xiao Bo^{3*}, Huang Siling⁴, Wang Dasen⁴

¹*Xi'an Key Laboratory of Active Photoelectric Imaging Detection Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;*

²*School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

³*School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;*

⁴*Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, Zhejiang, China*

Abstract

Objective With the further development of precision optical systems such as space telescopes and high-power solid-state laser devices, high-efficiency and batch processing requirements for medium- and large-aperture optical planar elements are put forward. For common deterministic polishing methods such as small tool polishing and ion beam polishing, which have high machining accuracy and positive removal effect, there are still some shortcomings such as low removal efficiency and long processing period, and thus they fail to meet the urgent needs of the market for precise optical components. The ring-pendulum double-sided polishing has been a promising method due to its high convergence rate, short processing cycle, and easy batch production. However, during the process of ring-pendulum double-sided polishing, it is difficult to establish a stable removal function to predict the surface profile due to the constant changes in the contact area between the polishing disc and the workpiece surface, which thus makes it impossible to provide sufficient guidance for the polishing process. In order to solve this problem, a prediction model for the uniformity removal of ring-pendulum double-sided polishing based on the kinematics of abrasive particles is proposed, and it can be used to analyze the element surface uniformity removal under the influence of different process parameters and provide the optimization strategy of process parameters, so as to improve the convergence efficiency and controllability of surface accuracy.

Methods A prediction model for the uniformity removal of ring-pendulum double-sided polishing based on abrasive particle kinematics is built. Firstly, the main factors influencing the removal distribution in the ring-pendulum double-sided polishing are explored according to the polishing mechanism and removal law following the Preston equation. Then the kinematic models of abrasive particles on the upper and lower surfaces of a workpiece are established respectively, in view of the differences in polishing methods between the upper and lower surfaces of the workpiece with ring-pendulum double-sided polishing. A prediction model for the uniformity removal of ring-pendulum double-sided polishing based on abrasive particle kinematics is presented, and its reliability is verified by simulation and actual machining results. Based on the machining prediction model, the distributions of removal amount and uniformity removal on the upper and lower surfaces of the workpiece are studied, and the abrasive track and the uniformity distribution of polishing removal under different polishing homogeneity influencing factors are analyzed. By changing parameters such as center eccentricity, radial swing distance, and radial swing speed, virtual machining experiments are carried out to find the mapping rules of surface removal distribution and these parameters. Finally, experiments are designed to verify that the ring-pendulum double-sided polishing uniformity removal method presented in this paper can achieve fast convergence of the surface pattern of optical elements.

Results and Discussions The presented prediction model of ring-pendulum double-sided polishing can reflect the mapping of process parameters to the surface profile of the workpiece. Three groups of transparent fused quartz workpieces with different initial surface shapes and process parameters are selected to verify the processing prediction model. The prediction results are basically consistent with the actual machining results, which have the same removal characteristics of the surface (Fig. 4). The results have shown that the removal amount of the lower polishing plate is about 2-3 times that of the upper polishing plate, while the degree of removal irregularity of the upper polishing plate is 3-5 times that of the

lower polishing plate (Fig. 6 & Fig. 7). Through simulation analysis, it is found that changes in parameters such as center eccentricity, radial swing distance, and radial swing speed will affect the homogeneity of workpiece surface removal. Experiments are designed according to the mapping between different process parameters and workpiece surface patterns. Finally, the experimental results show that the PV of 1# workpiece is 1.28λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), and that of 2# workpiece is 1.05 after machining (Fig. 12).

Conclusions Based on the kinematic model of abrasive particles, a prediction model of the ring-pendulum double-sided polishing process is established. The simulation and actual machining experiments have verified that the model can correctly reflect the real machining surface profile results under different machining parameters. With the presented prediction model, the removal distributions of the upper and lower surfaces of the workpiece are studied. The simulation results show that although the removal amount of the lower surface is much larger than that of the upper surface of the workpiece, the non-uniform distribution of removal from the upper surface of the workpiece is the main source of the overall removal of the non-uniform distribution of the workpiece. By changing parameters such as center eccentricity, radial swing distance, and radial swing speed, the mapping of different process parameters to uniformity removal of the workpiece surface can be obtained, and then the purpose of even material removal of the workpiece surface can be achieved by combining the information of initial workpiece profile. The actual machining experiments show that the machining parameters are optimized under the guidance of the prediction model presented in this paper, which thus elevates the surface processing accuracy and provides a reliable solution for the machining efficiency of ring-pendulum double-sided polishing.

Key words optical design; ring pendulum; double-sided polishing; uniformity removal; processing prediction