

基于环形抛光的稳态确定性抛光方法

尹进^{1,2}, 朱健强¹, 焦翔¹, 冉钰庭^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对环形抛光中抛光盘的面形难以精确控制的问题,以 Preston 方程和 Winkler 假定为基础,建立光学元件抛光的基本模型,通过理论分析和计算机模拟与实验,深入研究环形抛光的系统特性。结果表明,系统存在一个保持盘面面形不变的状态,此时的状态为系统的平衡状态,在平衡状态下抛光工件时无需调整校正板位置即可连续获得高精度平面;在不同的工况下,系统平衡状态对应的校正板位置不相同,应用建立的模型定量研究平衡状态下校正板位置与工件尺寸的关系。实验证明在平衡状态下抛光工件时工件的面形精度和加工效率都得到了提高。

关键词 激光制造; 环形抛光; 平衡位置; 面形变化速率; 平衡状态

中图分类号 TG356.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1102001

Method of Steady-State Deterministic Polishing Based on Continuous Polishing

Yin Jin^{1,2}, Zhu Jianqiang¹, Jiao Xiang¹, Ran Yuting^{1,2}

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aiming at the problem that the surface shape of polishing pad in continuous polishing is difficult to control precisely, the basic model of optical element polishing is established based on Preston equation and Winkler assumption. Through theoretical analysis, computer simulation and experiment, system characteristics of the continuous polishing is studied further. The result shows that the system has a state that can keep the surface shape of the disk unchanged. The state of this situation is the equilibrium state of the system. It is possible to obtain the high precision plane continuously without adjusting the position of conditioning plate when the workpiece is polished in the equilibrium state. Under different working conditions, the position of the conditioning plate is different in the equilibrium state of the system. The relationship between the position of the conditioning plate and the size of the workpiece in the equilibrium state is quantitatively studied by using established model. The experiments prove that the accuracy of workpiece surface shape and processing efficiency are improved when the workpiece is polished in equilibrium state.

Key words laser manufacturing; continuous polishing; equilibrium position; surface shape change rate; equilibrium state

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.5450

1 引言

环形抛光(环抛)是加工高精度激光光学元件的关键工序,其加工结果直接决定了光学元件的质量。传统的动态抛光方式通常需要多个迭代周期,操作者在加工过程中需要频繁检测、调整抛光参数,并且需要在

收稿日期: 2017-06-12; 收到修改稿日期: 2017-07-04

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究(2010DFB70490)

作者简介: 尹进(1979—),男,博士研究生,主要从事环形抛光加工工件面形在线检测与控制方面的研究。

E-mail: cziyinjin@163.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

合适的时机取下工件,否则面形会反向恶化,造成反复加工,工件面形不能稳定收敛。而工件面形的抛光收敛效率直接影响到工件的批量生产效率,随着光学元件口径的增大及对面形精度要求的提高,传统工艺难以控制工件面形精度稳定收敛的问题更加突出,限制了加工效率的提高^[1-2]。

很多学者对确定性抛光的问题进行研究并提出了相应模型,研究主要是从工件与盘面的接触压强分布和相对磨削路程两方面进行的。Cooke F 等^[3]认为校正板和盘面间的接触压强分布为线性分布,随着校正板在盘面径向位置的改变,压强线性分布的梯度发生相应的变化。Wagner R E 等^[4]认为抛光工具没有超出工件边缘时,压力均匀分布,超出工件边缘时,压力线性分布。虽然压强线性分布的模型能定性预测盘面面形的变化趋势,但不能定量地预测盘面面形的变化,其实质上是回避了工件与抛光盘接触时由于面形问题引起的接触压力分布不均匀问题。Suratwala T I 等^[5-6]从工件的变形、工件和抛光盘接触的不匹配及相对磨削路程的不均匀等方面,研究了材料不均匀去除的原因,通过多种手段来减轻导致不均匀去除的因素,并提出了利用特定形状的补偿元件来补偿盘面磨削不均匀的收敛抛光技术。该技术的使用可以在不需要多次改变加工参数的情况下,将工件面形收敛到所需的面形上,取得了较好的实验结果。但其中的很多理论基于近似的假设,且利用补偿元件会产生很多问题,最根本的是补偿元件与抛光盘不满足球面磨合原理,容易出现多个环带,并且加工不同规格的工件时需要设计不同形状的补偿元件,给实际加工带来不便。

本文以 Preston 方程和 Winkler 假定为基础,考虑了因面形导致的抛光压力分布不均匀问题,建立了光学元件抛光的基本模型。通过理论模拟与实验相结合的方法,定量研究了环形抛光的系统特性,讨论了动态抛光和平衡态抛光两种工作方式。研究结果表明在平衡态下加工工件有利于工件面形的稳定收敛,提出了平衡态的获得和加工不同规格工件时平衡态的保持方法,对环形抛光效率和面形精度的提高具有指导意义。

2 环形抛光的基本模型

环形抛光机通常由带有环形沥青抛光盘的转台和圆形花岗岩校正板组成。工作时,抛光盘在电机驱动下以稳定的速度转动,校正板和工件在主动驱动电机的作用下以一定的速度自转。抛光盘的面形是由校正板修整的,由于校正板硬度很大,故不考虑校正板的变形。为了研究校正板对盘面面形的控制作用,先考虑未放工件时的情况,其示意图如图 1 所示。

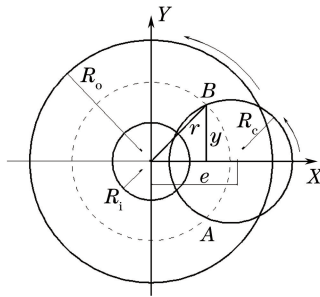


图 1 未放工件时的环形抛光原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous polishing without workpiece

环抛工艺的工作原理满足 Preston 方程,抛光时在每个周期内的材料去除量可描述为

$$M(r) = c \cdot \int_{T_n}^{T_{n+1}} P(r)V dt = c \cdot \int_{T_n}^{T_{n+1}} P(r) ds, \quad (1)$$

式中 $M(r)$ 为一个周期内材料去除量的径向分布; $P(r)$ 表示接触压强的径向分布; V 表示接触面上该点的相对速度,设定工件、校正板、抛光盘同速旋转,此时接触面上任意一点的相对速度相同; c 表示除了 P 、 V 之外的,且取决于其他所有的工艺参数的一个常数;从 T_n 到 T_{n+1} 为一个转动周期。由于在每一周期内面形变化极小,故可认为该周期内接触压强分布不变。所以(1)式又可表述为

$$M(r) = c \cdot P(r) \cdot s(r), \quad (2)$$

式中 $S(r)$ 表示抛光盘与校正板之间的相对磨削路程的径向分布。当抛光盘和校正板以相同的转速逆时针

旋转时,盘面上径向距离为 r 的点从 A 点进入接触区域,从 B 点离开接触区域。以抛光盘中心为原点,建立坐标系 XOY 。在此过程中,校正板和盘面间的相对磨削的路程可由以下的方程组^[6-7]求出

$$\begin{cases} s = 2 \cdot \alpha \cdot r \\ x^2 + y^2 = r^2 \\ (x - e)^2 + y^2 = R_c^2, \\ \sin \alpha = \frac{y}{r} \end{cases} \quad (3)$$

式中 S 为在一个周期内盘面与校正板之间的相对磨削路程, 2α 为 AB 弧所对应的圆心角, e 为偏心距,即校正板中心到抛光盘中心的距离, R_c 为校正板的半径。

根据表 1 中的参数以及上述模型进行计算,图 2(a)为在不同的偏心距下,抛光盘与校正板之间的相对磨削路程的径向分布。

表 1 实验装置及样品的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of experiment device and sample

	Outside diameter /mm	Inside diameter /mm	Thickness /mm	Density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Polishing pad	690	220	20	1800
Conditioning plate	350	—	45	3070
Workpiece 1	200	—	20	2500
Workpiece 2	150	—	15	2500

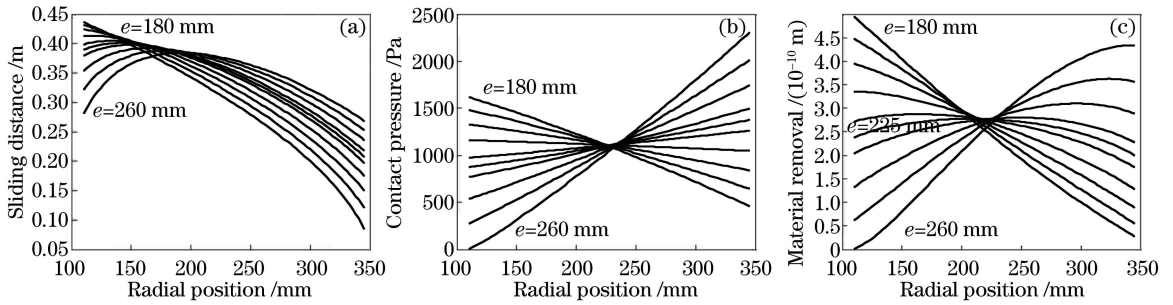


图 2 (a)相对磨削路程分布图;(b)接触压强分布图;(c)径向不同位置处的材料去除量分布

Fig. 2 (a) Distribution diagram of relative grinding length; (b) distribution diagram of contact pressure; (c) distribution of material removal quantity at different radial locations

对于接触压强的确定,可采用 Winkler 假定^[8-9]。在环抛系统中,抛光盘的沥青在一定的条件下可视为线性弹性体,其下表面是坚硬的花岗岩石,同时沥青表面开槽,增加了局部独立性,较好地满足 Winkler 假定的成立条件。其具体表达式为

$$P = k \cdot Z, \quad (4)$$

式中 P 为校正板与抛光盘之间的接触压强, k 为沥青抛光盘的弹性系数,为杨氏模量与盘面厚度的比值, Z 为抛光盘厚度方向的压缩量。

假设校正板和抛光盘的初始面形均为理想平面,盘面的压缩量为线性分布,初始接触压强也为线性分布,同时考虑校正板的受力平衡条件和力矩平衡条件。图 2(b)为校正板在不同位置时接触压强的分布,计算中取 $c = 7 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ ^[10],校正板参数如表 1 所示。图 2(c)为在第一个周期内不同径向位置的材料去除量的计算结果。由图 2 可见,在校正板和抛光盘初始面形为理想平面的情况下,无论校正板置于何处,总会对盘面产生不均匀的去除,即盘面的面形不能稳定保持理想平面,接触压强也不能稳定保持线性分布。为了计算出校正板和盘面的接触压强分布,采用迭代算法,根据(1)式计算出这一周期结束后的盘面面形,再根据(4)式更新接触压强。重复(1)式和(4)式计算每一周期的压强分布,计算发现最终接触压强趋于图 3(a)所示的稳定分布。

由图 3 可见, e 较小时,即校正板在内侧时,内侧压强较大;校正板向外侧移动,则外侧边缘压强较大,但稳定时的压强分布是非线性分布。实际加工时,为了避免出现校正板和抛光盘接触压强为零的区域,校正板

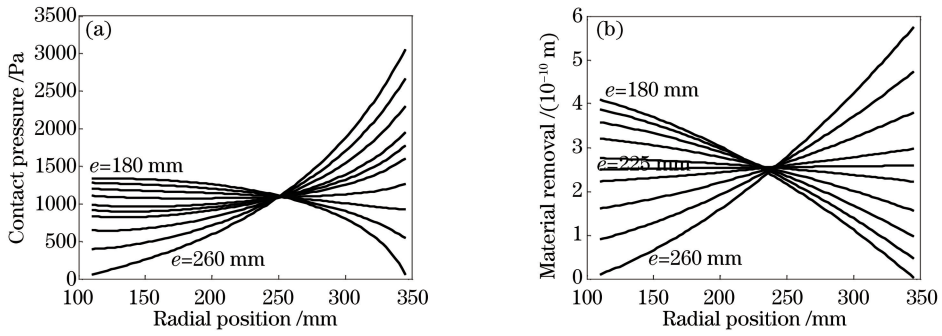


图 3 (a) 稳定时的接触压强分布; (b) 径向不同位置处的材料去除量分布

Fig. 3 (a) Distribution diagram of contact pressure in steady state; (b) distribution of material removal quantity at different radial locations

的中心应在抛光盘面上距环带内侧边缘约 $1/4 \sim 3/5$ 环带宽度范围内移动。图 3(b) 为稳定时, 校正板在不同位置处的抛光盘径向各点的材料去除量分布图。校正板在内侧时, 内侧去除量大于外侧去除量, 盘面表现为凹球面, 且会越来越凹, 校正板位置越靠近内侧, 盘面变凹的速率越快; 校正板在外侧时, 外侧的去除量大于内侧的去除量, 盘面表现为凸球面, 且会越来越凸, 校正板位置越靠近外侧, 盘面变凸的速率越快。当校正板置于抛光盘环带的中央附近时, 整个盘面近似均匀去除, 如图中 $e = 225$ mm 时, 盘面的面形保持不变, 此时系统所处的状态即为系统的平衡状态, 此时校正板所处的位置为系统的平衡位置。

3 工件对盘面的破坏及校正板对盘面的修复

一般地, 工件面形是抛光盘面形的“复制”, 抛光盘的面形依靠校正板进行修整。盘面修整到较理想的平面后, 将校正板推至平衡位置, 使盘面获得的理想面形能够保持, 放上待加工的工件进行抛光。初始面形较差的工件会破坏抛光盘的面形, 即使工件面形为理想平面, 由于工件并没有覆盖整个环带, 且工件对抛光盘径向不同位置的磨削长度不同, 也会对抛光盘的面形产生破坏。假设抛光盘的初始面形为平面, 在环带中央放置一块直径为 200 mm、厚度为 20 mm、初始面形为凹球面[峰谷值(PV) $f_{PV} = 1\lambda, \lambda = 632.8$ nm]的工件, 图 4 为抛光 1000 圈后对盘面的破坏结果。进一步模拟发现, 初始面形为凸球面的工件对盘面会产生几乎相同的破坏结果。

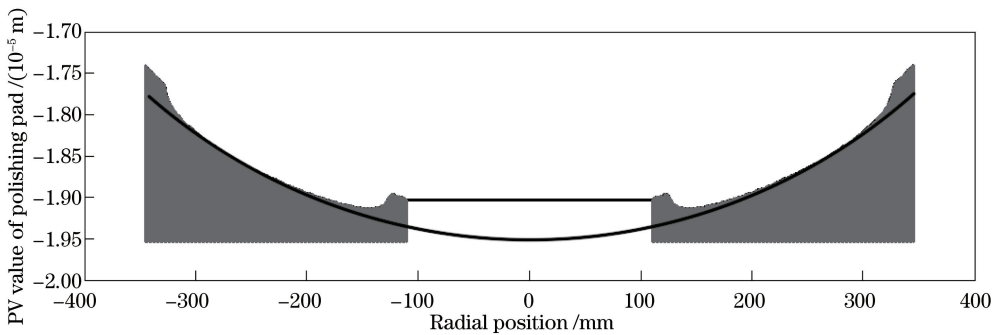


图 4 工件对盘面的破坏示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the destruction of polishing pad caused by workpiece

由图 4 可见, 工件对抛光盘的破坏可分两部分: 一部分是由于工件未覆盖整个抛光盘盘面, 而在环带中心压出的凹坑造成的局部破坏; 另一部分是由于工件对盘面径向不同位置的材料去除量不同, 而引起凹坑底部偏离了平面的整体破坏。由于校正板覆盖着整个盘面, 盘面上凹坑区域与校正板的接触压强小, 其他区域接触压强大, 材料去除速率也较大。当工件的厚度小于校正板厚度时, 工件对盘面的破坏作用小于校正板对盘面的修复作用, 随着抛光盘的转动, 被工件破坏的盘面面形紧接着会被校正板修复, 但是整体破坏不能被修复, 最终盘面面形趋于一个球面。随着时间的推移, 盘面的面形会变得越差。不同面形的工件会对盘面产生几乎相

同的破坏结果,但不同规格的工件对盘面会产生不同的破坏结果。即导致盘面的面形变化的主要原因不是工件的初始面形,而是工件的引入破坏了原先系统的平衡状态,使整个盘面不能实现均匀去除。

传统的动态抛光方法是:出现上述现象时,操作者推动校正板使工件面形向反方向变化,频繁检测工件直到满足要求后将工件取下。该方法成功的关键在于频繁检测,操作者需在工件面形达到最佳时将工件取下,超出时间后将使面形反向恶化,出现反复加工,加工效率很低。为了补偿工件引入导致的盘面不均匀去除,确保在修整好的盘面上放置工件后盘面仍能够实现均匀去除,就需要在放置工件的同时调整校正板的位置,使系统达到新的平衡状态。平衡态抛光工件时,由于校正板覆盖着整个抛光环带,初始面形较差的工件(无论初始面形是凸面或凹面)对抛光盘表面产生的局部破坏会自然地修复。同时由于放置工件时准确调整了校正板的位置,补偿了盘面的径向不均匀去除,实现了盘面的均匀去除,修复了整体破坏。即在平衡态下加工工件时,盘面对工件的初始面形是不敏感的,最终能够稳定收敛于最佳面形,这正是高精度抛光工件的理想状态。该方法成功的关键是放置工件后系统新的平衡位置的确定。

为了准确地确定引入不同规格工件后系统新的平衡位置,需要对盘面的面形变化特性进行深入研究。未放置工件时,根据图 3(b)的计算结果可知,系统稳定后,校正板置于某一位置时,在一个周期内,抛光盘径向不同位置处的材料去除量的差值是一定的,盘面的面形以某一固定的速率变化,但盘面的面形是不断变化的,即真正能反应系统固有特性的是盘面面形的变化速率,而非具体面形。应用表 1 的系统参数,设定抛光盘、工件和校正板以 2.4 r/min 同速旋转。具体的面形变化速率随校正板位置的变化如图 5(a)中黑色曲线所示。

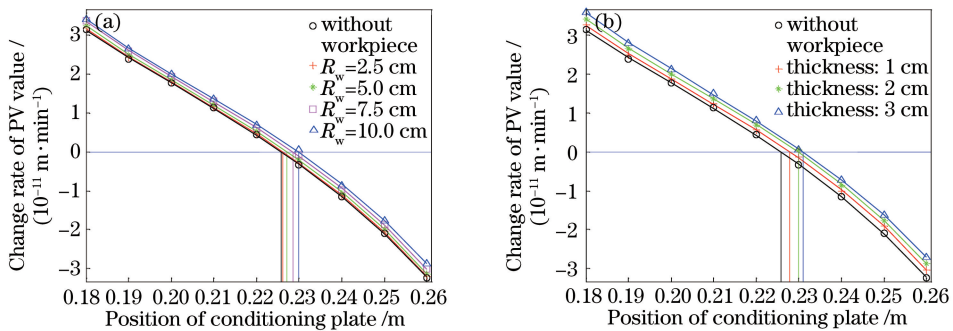


图 5 盘面面形变化速率与校正板偏心距的关系。(a)厚度同为 2 cm,半径不同的工件;(b)半径同为 10 cm,厚度不同的工件
Fig. 5 Relationship between pad surface shape change rate and the eccentric distance of conditioning plate. (a) Workpiece with same thickness of 2 cm and different radiuses; (b) workpiece with same radius of 10 cm and different thicknesses

图 5 中规定盘面面形变化速率为正表示盘面变凹,为负表示盘面变凸(下同),曲线的过零点即系统的平衡位置。校正板置于此位置时,盘面的面形可长期稳定保持,此时盘面的面形可以为平面也可以为小曲率的球面^[11-12]。在加工不同规格的工件时,即使校正板置于同一位置,待加工工件规格的变化,盘面不同径向位置的磨损情况不相同,从而导致盘面的面形变化速率也不相同。将工件置于抛光盘环带中央,图 5(a)中另外三条曲线分别模拟了在抛光盘上引入厚度相同、半径不同的工件时盘面面形变化速率随校正板位置的变化关系;图 5(b)中分别模拟了未引入工件时和引入半径相同、厚度不同的工件时盘面面形变化速率随校正板位置的变化关系。从图中可看出,不同的工况下,系统的特性曲线形状保持不变,只是沿纵坐标方向上发生一段平移,系统的平衡位置发生改变。

上述分析表明系统工况改变后,校正板必须移至特定的位置才能补偿不同的径向磨损量差,实现均匀去除,即在加工不同规格工件时,系统的平衡位置不相同。以上只讨论了加工一个工件的情况,在实际加工过程中,盘面上往往有两个或两个以上的工位。计算结果表明,若多个相同尺寸的工件同时置于盘面上相同的径向位置,这几个工件对盘面的共同作用可等效为一个厚度为这几个工件厚度之和的工件的作用。图 5 表明,在保持其他工艺参数不变的情况下,系统的平衡位置与待加工工件的半径、厚度有关。图 6 为系统的平衡位置随工件半径、厚度变化的关系图。

从图 6 可以看出,系统的平衡位置随 r^2h 的关系基本上线性的,即系统的平衡位置随工件质量的关系

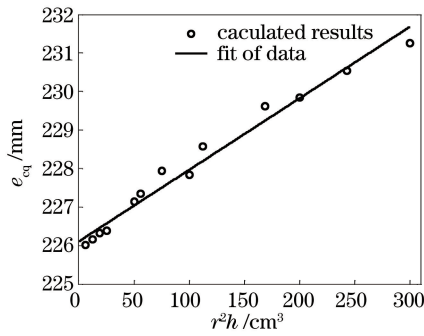


图 6 系统平衡位置与工件半径、厚度的关系

Fig. 6 Relationship between equilibrium position and radius, thickness of workpiece

基本是线性的,并有近似表达式

$$e_{cq} = 0.01856r^2h + 226.1, \quad (5)$$

式中 e_{cq} 为校正板平衡位置, r 为工件半径, h 为工件厚度。传统的环形抛光机内环开孔尺寸约占盘面的 $1/3$, 校正板的直径约为盘面直径的 $1/2$, 校正板的厚度直径比为 $1/8 \sim 1/6$ 。不同尺寸的环抛机基本都是满足该比例关系的。根据建立的模型计算可知:在抛光盘、校正板和工件的尺寸均等比例缩放的前提下,系统的平衡位置也将等比例缩放。按照线性拟合结果,在修整好的处于平衡态的盘面上加工半径为 100 mm , 厚度为 30 mm 的工件时,即 $r^2h = 300 \text{ cm}^3$ 时,校正板应沿径向向外推至 231.55 mm 处,计算结果应推至 231.25 mm 处,线性拟合的最大误差不超过 6% 。当工件的质量较小时,抛光盘盘面径向去除量的不均匀性较小,平衡位置的改变量很小;当工件质量较大时,抛光盘盘面径向去除量的不均匀性比较明显,平衡位置的改变量较大,所以加工大口径工件时,放置工件的同时准确移动校正板至新的平衡位置显得尤其重要。该结论对于加工不同规格工件时系统平衡位置的确定具有重要的指导意义。

在实际加工过程中,加工设备条件的限制以及温度、湿度等环境因素的变化对系统的影响,使得环抛系统保持绝对的平衡非常困难^[13]。若环境和加工工艺参数稳定,在以上理论的指导下,当校正板位置偏离理论平衡位置不超过 0.1 mm 时,盘面的面形变化速率非常缓慢,1 天内盘面面形的变化不超过 0.02λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 下同),校正板的位置改变一般通过丝杠系统来控制, 0.1 mm 的距离实现起来较为容易。因此,只要控制校正板位置在理论平衡位置附近 0.1 mm 的区间范围内,即可认为系统在准平衡状态正常工作,抛光盘的面形也能够长期保持在比较理想的面形。值得注意的是,准平衡态的范围是与盘面的硬度有关的,当盘面较软时,虽然盘面的面形容易调节,但需要更加精确地调节校正板的位置。

4 实验结果

采用参数如表 1 所示的环形抛光机进行抛光实验,实验所用抛光盘为沥青混合料抛光盘,主要成分为西安 #66 号抛光胶,另外添加了适量的蜂蜡和塑料粉,抛光盘厚度为 18 mm , 盘面均匀开方形槽,槽间距为 30 mm ,槽宽和槽深均为 3 mm ;校正板为济南青花岗岩(尺寸如表 1 所示),具有结构均匀、热膨胀系数低的优点;抛光液为二氧化铈水基溶液,浓度为 1% ,采用间歇式注液每 5 min 添加 30 ml ;抛光盘、校正板、工件三者转速相同,设定为 2.4 r/min ;环境保持恒温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度维持在 60% ;每天固定时间手工刮盘。

加工直径为 200 mm ,厚度为 20 mm 的熔石英玻璃,同时利用该元件作为监控元件来监控盘面的面形,监控元件置于环带中心。根据上述理论模型的计算可知,系统的平衡位置在抛光盘的中央附近,因此在抛光盘中央附近区域内均匀选取 6 个点,对应校正板偏心距分别为 $190, 200, 210, 220, 230, 240 \text{ mm}$ 。移动校正板的位置,每次移动校正板后从第二天开始记录数据(根据长期加工经验此环抛机一天的时间已足够完成状态改变),用 Zygo 干涉仪测量监控元件,测出校正板在不同位置时盘面面形的变化速率,每个位置连续记录三天,取三天内的平均变化速率作为校正板在该位置时盘面面形的变化速率。测量结果如图 7(a)所示,图中正表示盘面向凹球面变化,负表示盘面向凸球面变化,拟合曲线的过零点得到此工况下的系统的平衡位置为 $e_{cq1} = 222.51 \text{ mm}$ 。为了检验系统在平衡状态下抛光盘盘面的面形保持特性,保持实验参数和环境参数不

变,将校正板推至此平衡位置,每天测量监控元件的面形,连续记录 10 天,测量结果如图 7(b)所示,负值表示监控元件的面形为凹球面,监控元件的面形波动范围在 0.14λ 以内。结果表明在平衡状态下,盘面的面形是基本能稳定保持的。

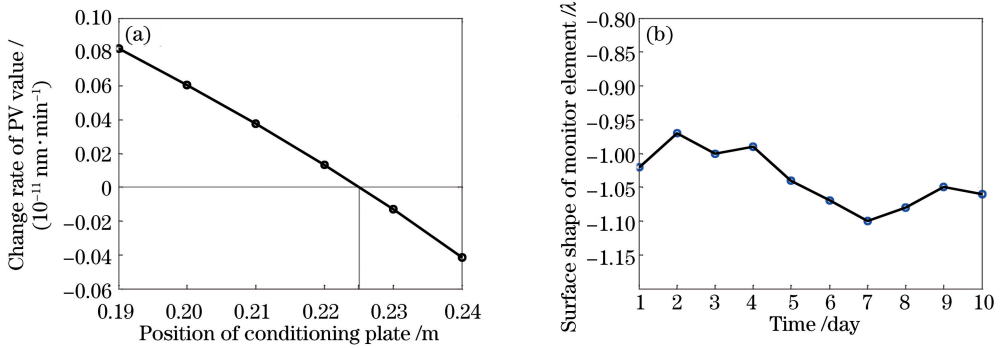


图 7 (a)实验所测的盘面面形变化速率随校正板偏心距的关系;(b)平衡状态下的面形保持

Fig. 7 (a) Relationship between pad surface shape change rate and the eccentric distance of conditioning plate in experiment; (b) surface shape preservation in equilibrium state

第 10 天结束时,监控元件的面形为 -1.06λ 。为了修整为平面,将校正板沿盘面径向向里推至 190 mm 处。由图 7(a)的实验数据可知,此时工件面形变化速率约为 0.08 nm/min ,即每天变化 0.182λ ,经计算得到所需天数约为 6 天。6 天后推至平衡位置,稳定后监控元件的面形达到 0.067λ 。取下原来的直径为 200 mm 的工件,连续加工一批经过单轴机粗抛过的直径为 150 mm,厚度为 20 mm 的熔石英玻璃,工件的初始面形为 $f_{\text{PV}} = 1\lambda$ 左右。实验结果表明,虽然工件尺寸的改变影响了系统原先的平衡状态,但是盘面面形的恶化需要一段时间,所以在没有改变校正板位置的情况下,仍然能加工出三块面形 PV 值小于 0.1λ 的工件。随着时间的推移,盘面的理想面形不能长期稳定保持,从而不能连续加工出面形优良的工件。

为了得到平衡位置与工件尺寸的关系曲线,同时加工两块相同的直径为 200 mm,厚度为 20 mm 的熔石英玻璃(相当于厚度为 40 mm),根据上述同样的方法得到平衡位置为 $e_{\text{eq}2} = 226.22 \text{ mm}$ 。得到系统的平衡位置与工件尺寸的关系如图 8 所示。

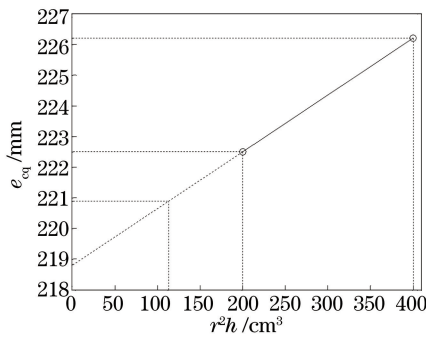


图 8 实验测得的平衡位置与工件尺寸的关系

Fig. 8 Relationship between equilibrium position and the size of workpiece in experiment

根据图 8 可得,对于直径为 150 mm、厚度为 20 mm 的熔石英玻璃,此时系统对应的平衡位置为 $e_{\text{eq}} = 220.89 \text{ mm}$ 。根据计算的结果,在改变工件尺寸的同时,将校正板推至相应的平衡位置。连续加工 10 块经过单轴机粗抛过的直径为 150 mm,厚度为 20 mm 的熔石英玻璃,工件的初始面形为 $f_{\text{PV}} = 1\lambda$ 左右,每块工件经过 8 h 抛光后,面形 PV 值均能达到小于 0.1λ ,图 9 为第 10 块工件加工前后的面形图(测试范围取中心 100 mm 口径)。结果表明,在平衡态抛光工件时,抛光盘的面形能长时间保持不变,工件面形最终稳定收敛于平面状态,10 块工件的面形 PV 值均小于 0.1λ ,这种加工方式是环形抛光的理想工作状态。

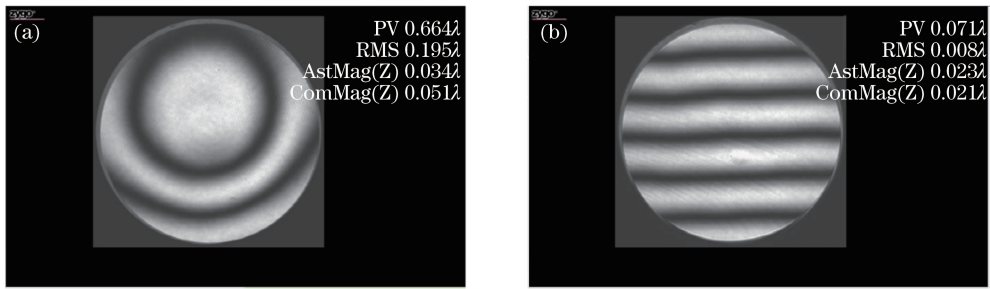


图9 连续抛光第10块工件的面形。(a)初始面形;(b)抛光8小时后的面形

Fig. 9 Surface shape of the 10th workpiece for continuous polishing. (a) Initial surface shape; (b) surface shape after polishing for 8 hours

5 结 论

针对环形抛光中抛光盘的面形难以控制的问题,根据 Preston 方程和 Winkler 假定建立了环形抛光的简化模型,利用该模型对盘面的面形随校正板位置的变化关系进行仿真分析。结果表明校正板置于盘面上不同位置时,盘面的面形以不同的速率变化,即环抛系统的固有特征是抛光盘的面形变化速率,而非盘面的具体面形。在修整好的盘面上放上工件后,为了补偿工件对盘面面形产生的破坏,需要通过改变校正板的位置来补偿工件对盘面的不均匀去除,使系统处于新的平衡状态下加工工件。不同尺寸的工件对应于不同的平衡位置,当工件置于环带中央时,系统的平衡位置与待加工工件的质量近似成线性关系,工件质量越大,平衡位置越向盘面外侧。实验结果表明,在平衡状态加工工件时,盘面对工件的初始面形不敏感,被工件破坏的抛光盘能够完全被校正板修复,无需调整校正板位置,最终工件能稳定收敛于最佳面形,这对实际加工具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Xie Ruiqing, Li Yaguo, Chen Xianhua, *et al.* Fast correcting technique of polishing surface form by pressure compensation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 423-427.
谢瑞清, 李亚国, 陈贤华, 等. 基于压力补偿原理的抛光面形快速收敛技术[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 423-427.
- [2] Ji Shiming, Du Xueshan, Chen Guoda, *et al.* Review on deterministic polishing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2010, 46(6): 1-5.
计时鸣, 杜学山, 陈国达, 等. 确定性抛光综述[J]. *航空精密制造技术*, 2010, 46(6): 1-5.
- [3] Cooke F, Brown N, Prochnow E. Annular lapping of precision optical flatware[J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(5): 407-415.
- [4] Wanger R E, Shannon R R. Fabrication of aspherics using a mathematical model for material removal[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(7): 1683-1689.
- [5] Suratwala T I, Steele W A, Feit M D, *et al.* Convergent pad polishing of amorphous silica[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2012, 3(1): 14-28.
- [6] Suratwala T I, Feit M D, Steele W A. Toward deterministic material removal and surface figure during fused silica pad polishing[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 93(5): 1326-1340.
- [7] Zhou Y Y, Davis E C. Variation of polish pad shape during pad dressing[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 1999, 68(2): 91-98.
- [8] Long Yuqiu. Calculation for beam on elastic foundation[M]. Beijing: People's Education Press, 1981.
龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [9] Jiao Xiang, Zhu Jianqiang, Fan Quantang, *et al.* Influence of overturning moment to workpiece surface figure in continuous polishing and the solutions[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0608003.
焦翔, 朱健强, 樊全堂, 等. 环形抛光中倾覆力矩对工件面形的影响及解决方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608003.

-
- [10] Berggren R R, Schmell R A. Pad polishing for rapid production of large flats[C]. SPIE, 1997, 3134: 252-257.
- [11] Jiao Xiang, Zhu Jianqiang, Fan Quantang, *et al.* Application of continuous polishing technology to manufacturing of a lens array[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708011.
焦翔, 朱健强, 樊全堂, 等. 环形抛光技术在列阵透镜制造中的应用[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708011.
- [12] Jiao X, Zhu J Q, Fan Q T, *et al.* Mechanistic study of continuous polishing [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3(2): 1-7.
- [13] Evans C J, Paul E, Dornfeld D, *et al.* Material removal mechanisms in lapping and polishing [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, 52(2): 611-633.