

快速抛光技术接触压力建模与仿真

陈 真, 杨 炜*, 郭隐彪

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 快速抛光技术不但可提高加工速度, 还能保证抛光精度, 是实现超精密平面光学元件批量化加工的最有效加工方式. 通过对快速抛光原理的分析, 建立了工件与抛光垫之间的弹性力学模型, 分析了载荷条件和边界位移条件, 并以此为基础建立了工件与抛光垫的有限元模型. 通过仿真分析得出了接触压力的分布情况, 并通过抛光实验验证了仿真结果, 为研究快速抛光技术提供了实验理论依据.

关键词: 快速抛光; 接触压力; 弹性力学模型

中图分类号: TH 164

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2012)02-0215-04

惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)是一种非常有前景的聚变方式, 它通过持续、缓慢地实现氢核的聚变反应, 释放出巨大的能量. 激光聚变又是目前 ICF 中普遍采用的驱动方式. 2009 年 3 月, 美国成功演示了利用国家点火装置(national ignition facility, NIF)输出 1 MJ 激光能量, 从而引起了世界各国的广泛关注. 法国、日本、英国、德国等发达国家先后展开了对大型激光装置的研制, 我国也正在研制高功率激光装置. ICF 所使用的高功率激光装置, 是一项庞大而复杂的巨型光学工程, 它对光学元件的要求无论在质量上, 数量上还是尺寸上都是空前的. 例如美国的 NIF 装置中, 仅第 1 期工程就使用了 3 000 块 $800 \text{ mm} \times 460 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的光学玻璃元件. 这些光学元件在空间频域上, 对高频、中频和低频有不一样的评价标准^[1-3]. 因此, 如何实现超精密大尺寸光学元件的快速加工是当前我国光学制造领域的一个重要课题.

传统平面光学元件需要经过粗抛、环形抛光和精抛, 才能提高工件表面面型精度, 降低表面粗糙度和亚表面缺陷. 整个抛光流程耗时长, 不能满足大型光学工程的需求. 为此, 快速抛光技术应运而生, 它可以全面取代初抛, 部分取代环形抛光, 而且还能减少抛光加工时间, 实现光学元件的批量生产. 快速抛光过程中, 工件与抛光垫接触过程中压力场的分布情况是保证工件表面面型精度的关键因素, 但是在实际加工过程中, 压力场分布难以测量及控制, 因此, 本文通过对工件与抛

光垫的接触情况进行分析, 建立了工件与抛光垫的有限元模型, 并仿真了压力场分布, 为后续研究提供了实验理论依据.

1 快速抛光接触力学模型及边界条件的建立

1.1 快速抛光原理

快速抛光原理如图 1 所示, 是将光学元件置于表面贴有抛光垫的旋转抛光盘之上, 工件在运动控制轴的控制下可独立旋转, 运动控制轴可以上下移动, 以此对工件施加不同的压力; 抛光液通过喷管喷射到抛光垫表面, 并通过抛光盘的旋转, 均匀散布到工件和抛光垫表面. 工件相对于抛光垫运动, 在机械磨削与化学侵蚀两种材料去除机制的交互作用下, 完成平坦化制作.

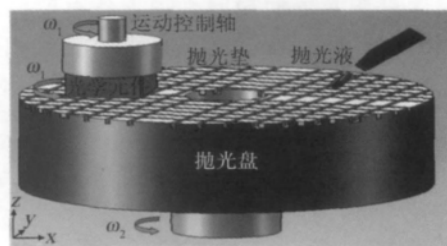


图 1 快速抛光原理图

Fig. 1 An illustratio of fast polishing principle

快速抛光时, 工件抛光表面的材料去除率满足 Preston 方程:

$$h = K \cdot P \cdot v, \quad (1)$$

其中 h 是材料去除率, 即材料去除厚度随时间的变化

收稿日期: 2011-05-31

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2010J05122)

* 通信作者: oncefly@126.com

率; P 是抛光压力; v 是相对速度; K 代表 Preston 系数, 是一个比例常数, 由速度和压强以外的因素决定, 如抛光盘的性质、抛光液、抛光颗粒和工件材料等.

1.2 快速抛光接触力学模型的建立

工件与抛光垫上的相对运动情况如图 2 所示. 抛光垫以角速度 $\vec{\omega}_p$ 旋转, 工件以角速度 $\vec{\omega}_c$ 旋转, 抛光盘中心 O_1 到工件中心 O_2 的距离为 \vec{R} , 工件中心 O_2 到工件上任一点 A 的距离为 \vec{r} , \vec{R} 与 \vec{r} 之间的夹角为 θ , 通过运动学分析及公式 (1), 可得在 t 时刻, A 点处的材料去除率 h_A 为

$$h_A = K \cdot P(r) \cdot (R^2 \omega_p^2 + r^2 (\omega_p - \omega_c)^2 - 2rR\omega_p(\omega_p - \omega_c) \cos(\pi - \omega_c t))^{1/2}. \quad (2)$$

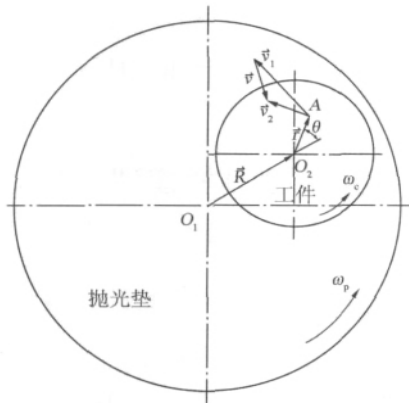


图 2 工件与抛光垫的相对运动情况
Fig. 2 Relative motion for fast polishing process

公式 (2) 说明了在瞬时状态下, 工件抛光表面各点由于运动形式不同, 工件表面各点的材料去除率是不同的. 但是工件在加工过程中作旋转运动, 在一个旋转周期内, 工件抛光表面相同半径上各点的经历和平均状态是相同的. 而压强与速度相对独立, 是由外界负载, 接触材料的物理特性、几何特性决定的轴对称量. 因而, 快速抛光的平均材料去除率为

$$H = K \cdot P(r) \cdot \int_0^{2\pi} (R^2 \omega_p^2 + r^2 (\omega_p - \omega_c)^2 - 2rR\omega_p(\omega_p - \omega_c) \cos(\pi - \omega_c t))^{1/2} dt. \quad (3)$$

由公式 (3) 可知, 当抛光盘角速度 ω_p 与工件角速度 ω_c 相同时,

$$H = K \cdot 2\pi \cdot R \cdot \frac{\omega_p}{\omega_c} P(r). \quad (4)$$

公式 (4) 说明了工件表面的材料去除量分布取决于抛光表面接触压力的径向分布状态. 又根据快速抛光的实际加工情况和接触特点, 可以把工件的抛光接

触状态视为弹性力学的层状材料无粘着轴对称接触问题, 因此快速抛光的物理模型可简化为图 3^[4-5].

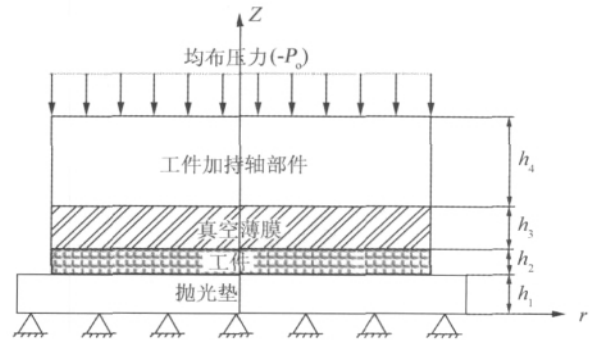


图 3 快速抛光接触力学模型
Fig. 3 An axisymmetric contact model for fast polishing process

图 3 的模型中假设:

- 1) 工件加持轴部件、真空薄膜、工件、抛光垫表面都是平的.
- 2) 工件加持轴部件、真空薄膜、工件、抛光垫表面都是均匀和各向同性的, 即认为它们内部各点及各方向上的介质相同, 它们的物理、力学特性相同.
- 3) 所有介质都是连续介质, 即材料内部无空隙, 因此材料中每点处的应力、应变、位移等量都是连续的, 可以用坐标的连续函数表示. 这样, 不仅避免了计算上的困难, 更重要的是根据这一假设作出的力学分析, 与大量的工程实践和实验的结论是一致的^[6].

1.3 载荷条件和位移边界条件

由于快速抛光的接触模型涉及滑动及摩擦情况, 属于非 Hertz 接触, 难以用封闭的解析解表达, 而解决非 Hertz 接触的最有效的计算方法是有限元法^[7], 因此本文选用有限元法对工件的接触压强进行计算. 负载条件和边界条件是有限元计算的依据条件, 所以需要图 3 所示的模型进行负载和边界位移条件分析.

设 σ_r 、 σ_z 和 τ_{rz} 分别为径向应力、轴向应力和剪切应力, u_r 、 u_z 分别为径向和轴向的变形位移.

对工件加持轴部件的上表面有

$$\begin{cases} \sigma_z|_{w-c} = -P_0, \sigma_r|_{w-c} = \tau_{rz}|_{w-c} = 0 \\ u_r|_{w-c} = 0 \\ u_z|_{w-c} = C, z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \end{cases} \quad (C \text{ 为加持轴的向下位移量})$$

对工件加持轴与真空薄膜的接触界面有

$$\begin{cases} \sigma_z|_{w-c} = \sigma_z|_{c-f}, \sigma_r|_{w-f} = \sigma_r|_{c-f} \\ \tau_{rz}|_{w-f} = \tau_{rz}|_{c-f}, u_r|_{w-f} = u_r|_{c-f} \\ u_z|_{w-f} = u_z|_{c-f}, z = h_1 + h_2 + h_3 \end{cases}$$

对真空薄膜和工件的接触界面有

$$\begin{cases} \sigma_z|_{c-f} = \sigma_z|_w, \sigma_r|_{c-f} = \sigma_r|_w \\ \tau_{rz}|_{c-f} = \tau_{rz}|_w, u_r|_{c-f} = u_r|_w \\ u_z|_{c-f} = u_z|_w, z = h_1 + h_2 \end{cases}$$

对工件与抛光垫的接触界面有

$$\begin{cases} \sigma_z|_w = \sigma_z|_p, \sigma_r|_w = \sigma_r|_p \\ \tau_{rz}|_w = \tau_{rz}|_p, u_r|_w = u_r|_p \\ u_z|_w = u_z|_p, z = h_1 \end{cases}$$

抛光垫下表面是紧密粘附在抛光盘上,因此对抛光垫下表面有

$$\begin{cases} \sigma_z|_p = 0, \sigma_r|_p = 0 \\ \tau_{rz}|_p = 0, u_z|_p = u_r|_p = 0 \\ z = 0 \end{cases}$$

工件抛光面的接触压强 P 为

$$P = -\sigma_z|_w = -\sigma_z|_p.$$

2 快速抛光接触压力的有限元分析

本文以方形大口径光学元件为研究对象,利用 ANSYS 软件分析快速抛光过程中工件和抛光垫接触面的应力分布.分析过程^[8]如下:

1) 建立抛方形光学元件快速抛光有限元模型.

综合考虑模型结构及计算结果的直观性,在 ANSYS 中直接建立 3-D 模型,并将模型简化为光学元件与抛光垫的接触模型.模型选用 8 节点六面体结构的 Solid-Brick 8node45 单元作为整体离散化后的单元形式,符合计算要求.

2) 定义接触对.

定义方形玻璃的下表面和抛光垫的上表面为接触对,接触单元设置为 TAGER170 和 CONT174.

3) 施加负载及边界条件.

根据上节的负载及边界条件的分析,对抛光垫及光学元件的各面按实际的加工情况进行约束.

4) 求解及查看结果.

解得方形光学元件抛光面接触压力分布情况,如图 4 所示:工件加工面应力呈对称分布,工件加工面的边缘,出现应力突变的现象,尤其是在方形大口径光学元件的四角处,显示明显的边缘效应.

读取工件抛光面对称轴上的节点数据描绘应力曲线,如图 5 所示.由应力曲线可知,应力中心区分布均匀,在边缘处略为下降而后急剧增大,在边缘处达到最大值.

上述结果说明了工件抛光的接触压力从工件的旋转中心沿半径增大方向仅有微小的增加趋势,而在工

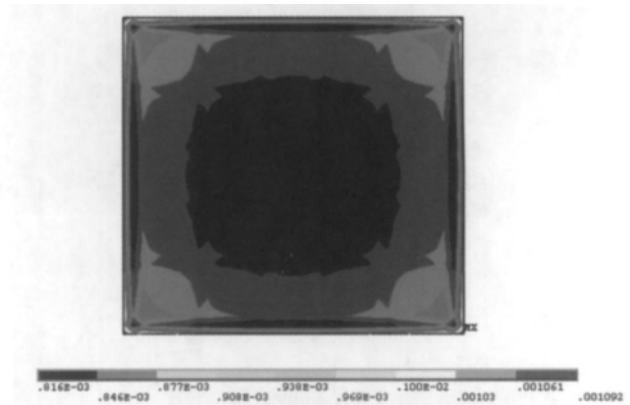


图 4 工件加工面接触应力云图
Fig. 4 Contact stress distributions for polished surface square optical components

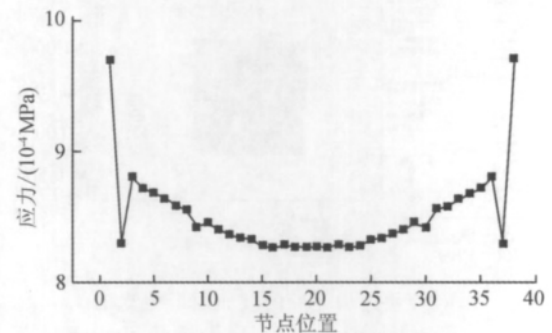


图 5 节点数据描绘应力曲线
Fig. 5 Contact pressure distributions on the polished surface

件边缘,压力急剧变化并形成边界峰值的现象.这样的压力分布情况会造成工件边缘的材料去除量大于中心部分,从而造成面型精度误差及塌边现象.

3 抛光实验

接触模型和有限元计算结果是否符合实际加工情况,还需进行快速抛光实验.但是材料去除率无法通过实验直接测量,只能通过对抛光表面的面型精度检测间接测量,所以,实验主要针对抛光面的面型精度展开.快速抛光前玻璃表面经过单轴研磨机研磨,研磨盘选用铸铁盘,磨粒选用 Al_2O_3 磨粒.经过铸铁盘研磨后,玻璃经面形检测,结果得出:研磨后的方形 BK7 玻璃的 4 个角上均有明显的翘边现象,面形精度约为 $4 \mu m$.玻璃的面型检测图如图 6 所示.

快抛时,设置工件与抛光盘以相同转速旋转,抛光后进行测量,测量结果如图 7 所示.从检测结果可看出,快速抛光后玻璃面形精度提高了约 $2 \mu m$,边缘翘边现象略有缓解.该结果说明了,在快速抛光时,边缘的材料去除率大于中心区域的材料去除率,因此证实

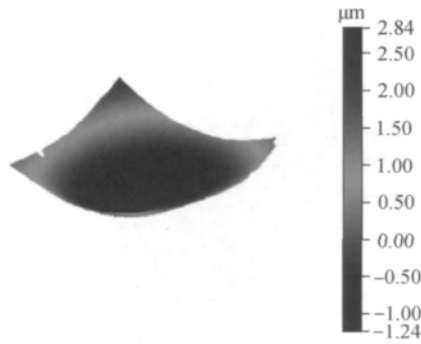


图 6 经铸铁盘研磨后, BK7 玻璃的面型检测 3D 显示图
Fig. 6 The 3D plot for morphology of BK7 glass grinded by cast iron disc

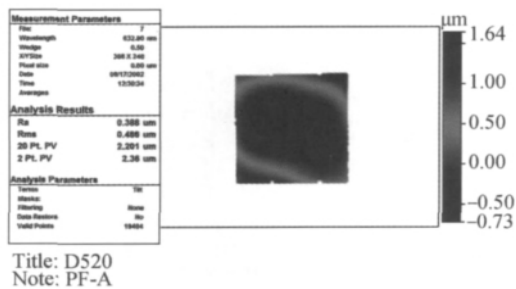


图 7 快速抛光后的玻璃面形检测图
Fig. 7 The topography after fast polishing process

了仿真结果.

4 结 论

本文针对快速抛光中压力的分布情况展开了一些

基础研究工作, 得到以下结论:

- 1) 经过理论分析快速抛光时工件与抛光盘的相对运动情况, 证实了在不考虑压强分布的情况下, 当工件与抛光盘转速相等时, 可实现均匀磨削.
- 2) 建立了快速抛光系统弹性力学模型, 利用有限元软件求得抛光面的应力分布情况.
- 3) 通过快速抛光实验证实了仿真结果.

参考文献:

- [1] 朱海波. 大口径平面光学元件的数控抛光技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [2] 王大森, 刘卫国. 超精密光学元件制造技术[J]. 国防制造技术, 2010, 5: 5-10.
- [3] 杨福兴. 大口径平面光学元件超精密加工技术的研究[J]. 光学技术, 2004, 30(1): 27-29.
- [4] Lin Y Y, Lo S P. A study on the stress and nonuniformity of the wafer surface for the chemical-mechanical polishing process[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2004, 22: 401-409.
- [5] Lin Y Y, Lo S P. A study of a finite element model for the chemical mechanical polish process[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2004, 23: 644-650.
- [6] 赵均海, 汪梦甫. 弹性力学及有限元[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2008: 103-189.
- [7] 吕玉山, 张辽远, 王军, 等. 化学机械抛光中背垫对硅片表面接触压强分布及宏观表面形貌的影响[J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 495-499.
- [8] 段进, 倪栋, 王国业. ANSYS10.0 结构分析从入门到精通[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 328-335.

Modeling and Simulation for Contact Pressure of Fast Polishing Process

CHEN Zhen, YANG Wei*, GUO Yin-biao

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Fast polishing process(FPP) not only improve the processing speed, but also guarantee the polishing precision, which is the most effective method to achieve batch processing of ultra-precision optical components. Based on the principle of FPP, the paper establishes the elastic mechanics model between the workpiece and the polishing pad, analyzes the displacement of the load and boundary displacement conditions. And then finite element model of the workpiece and polishing pad was established. The distribution of contact pressure was obtained by simulation, and experimented by polishing experiments. The study provides an theoretical basis of experimental for fast polishing process.

Key words: fast polishing process; contact stress; elasticity mechanical model