

# 光学薄片点胶的数值分析及优化

吴伦哲, 高文兰, 顿爱欢, 杨明红, 魏朝阳, 徐学科\*, 劭建达

中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

**摘要** 采用热弹性模型,对光学薄片点胶过程进行了有限元分析。对点胶后影响工件面形变化( $\Delta p$ )的工艺参数进行了优化。研究表明,对于光学薄片(直径为100 mm,厚度为2 mm),宜选择具有高弹性模量和低热膨胀系数的薄底板材料,且胶点的半径、个数及弹性模量越小, $\Delta p$ 越小;胶点位置应该避开高 $\Delta p$ 区域;胶点的热膨胀系数对 $\Delta p$ 的影响较小。

**关键词** 材料;抛光;点胶过程;数值模拟

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0803001

## Numerical Simulation and Optimization of Dispensing for Optical Slices

Wu Lunzhe, Gao Wenlan, Dun Aihuan, Yang Minghong, Wei Chaoyang,

Xu Xueke, Shao Jianda

Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** By using the thermoelastic model, the finite element analysis of dispensing process of optical slices is performed. The process parameters which influence the surface deformation of workpieces ( $\Delta p$ ) after dispensing are optimized. For an optical slice with a diameter of 100 mm and a thickness of 2 mm, a thin base plate with high elastic modulus and low thermal expansion coefficient is the optimal selection.  $\Delta p$  decreases with the decreases of radius, number and elastic modulus of glue dots. The glue dot position should avoid the high  $\Delta p$  zones. The thermal expansion coefficient of glue dots has little influence on  $\Delta p$ .

**Key words** materials; polishing; dispensing process; numerical simulation

**OCIS codes** 160.4670; 220.4610; 220.5450

## 1 引言

抛光沥青加工的表面质量好,加工效率高,故其广泛应用于光学元件加工领域<sup>[1]</sup>。抛光沥青的质量、黏度、软化点、硬度<sup>[2]</sup>、微观结构、热学特性<sup>[3-5]</sup>及实际加工效果<sup>[6]</sup>均先后得到了研究。

在光学薄片加工中,为了便于加工,同时提供足够的加工压力,常使用沥青胶点将光学薄片固定在硬质底板上。点胶过程通常会使光学薄片承受应力并发生变形<sup>[1,7]</sup>。为更好完成点胶,沥青胶点要保证无杂质,对光学元件及底板有很好的黏着力,同时在抛光过程中有较小的蠕变变形<sup>[8-9]</sup>。为避免胶点在点胶过程中产生较大的变形,Feit等<sup>[9]</sup>采用热应力的有限元分析法对点胶过程进行了研究,对工件的材料、加工温度以及工件被胶点附着的范围进行了相关的理论分析,提出了优化点胶过程的经验公式。

本文采用瞬态间接耦合的有限元分析法,对包含底板、胶点和光学元件的模型进行了热应力有限元分析。研究了底板材料、厚度,胶点半径、分布和数量等因素对点胶后光学薄片面形变化量的影响。

收稿日期: 2017-01-10; 收到修改稿日期: 2017-02-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605228)

作者简介: 吴伦哲(1990—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学加工方面的研究。E-mail: wulunzhe@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: xuxk@siom.ac.cn

## 2 点胶过程的热弹性模型

传统的点胶方式为手工点胶,上盘后元件面形非常不均匀,不利于理论分析。本文采用一种改进的光学薄片点胶流程,如图 1 所示。按照一定的分布将胶点覆盖在底板表面上,之后将光学元件覆盖在胶点上,光学元件的加工面朝上,将整体温度冷却到室温后进行后续的加工流程。

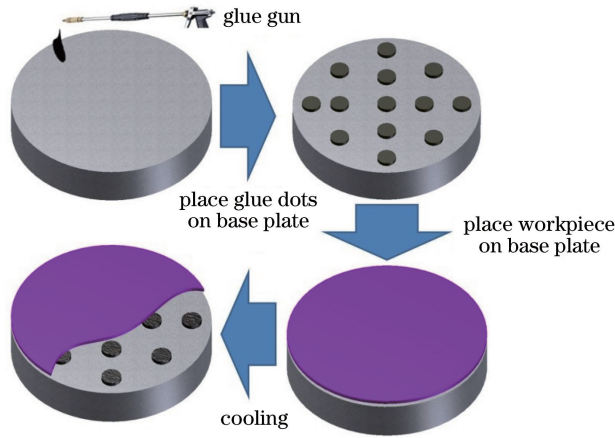


图 1 点胶流程示意图

Fig. 1 Schematic of dispensing process

为了便于分析,系统整体初始温度设为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,边界条件设为环境温度( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),系统整体温度由初始温度冷却到环境温度。根据上述条件,计算工件加工面产生的热应变,并转换为工件的面形变化。整个分析过程包括热传递过程和冷却产生热应力的过程。分析热传递过程使用非稳态导热方程:

$$\rho c \frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi}, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为密度,  $K$  为热导率,  $c$  为比热容,  $t$  为温度,  $\tau$  为时间,  $x, y, z$  为三个坐标值,  $\dot{\Phi}$  为单位时间内单位体积中内热源的生成热。这里讨论  $\dot{\Phi} = 0$  的情况。

使用热弹性力学平衡微分方程分析温度变化产生的热应力:

$$(\lambda + 2G) \nabla^2 e - \beta \nabla^2 t = 0, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为 Lamé 常数,  $G$  为剪切模量,  $e$  为体应变,  $\beta$  为热应力系数。

加工薄片的面形变化采用点胶前后面形峰谷差值的变化量( $\Delta p$ )表示,为了便于计算,点胶前工件的面形设为理想平面,计算参数如见表 1。为了进行对比,底板采用三种不同材料:不锈钢,零膨胀系数材料(U),光学薄片材料(Nd 玻璃)。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

Parameter	Nd:glass	Glue dot	Stainless steel	U
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2830	1060	8000	2210
Elastic modulus $E / \text{GPa}$	56.40	0.22	200.00	67.60
Poisson ratio $\nu$	0.27	0.20	0.28	0.17
Heat conductivity $K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.56	0.14	20.00	1.31
Specific heat capacity $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	750	2260	500	767
Thermal expansion coefficient $\alpha / (\mu\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$	10.70	2.40	10.20	0.03

图 2 所示为分析过程中的胶点分布,模型尺寸见表 2。抛光胶属于黏弹性体,在受热过程中会有一定变形,但元件尺寸、重量较小,因此忽略点胶过程中由此引起的元件变形。为了简化计算,将抛光胶假设为弹性体。

由于模型复杂,因此不易采用解析法进行求解,因此采用有限元的方式进行分析。分析分为两部分:热传导分析和热应力分析。热传导分析的结果作为热应力分析的条件,由热应力分析得到光学薄片的  $\Delta p$ 。

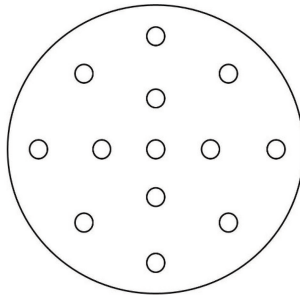


图 2 胶点分布

Fig. 2 Distribution of glue dots

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

Parameter	Workpiece	Glue dot	Base plate
Radius /mm	50	2	50
Height /mm	2	2	20

### 3 计算结果与分析

实际加工经验表明,底板对工件(光学薄片)点胶前后的  $\Delta p$  影响很大,不同底板材料或厚度下的  $\Delta p$  差别很大。不同的底板材料(不锈钢、U、Nd 玻璃)点胶后光学薄片的面形如图 3 所示。三者的  $\Delta p$  分别为 2.612, 1.449, 4.051  $\mu\text{m}$ 。因此,底板材料的弹性模量越大、热膨胀系数越小,  $\Delta p$  越小。

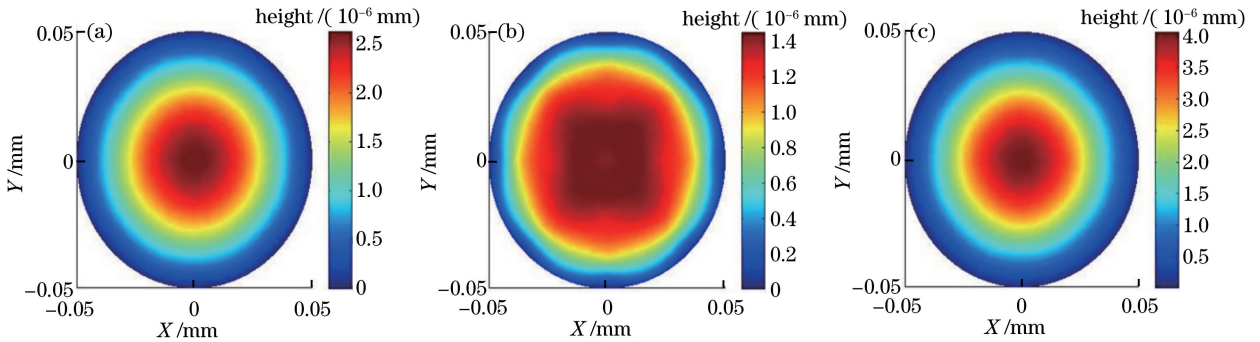


图 3 点胶后基于不同底板材料的工件面形。(a)不锈钢;(b) U;(c) Nd 玻璃

Fig. 3 Surface shape of workpieces after dispensing based on different base plate materials.

(a) Stainless steel; (b) U; (c) Nd:glass

底板厚度对工件  $\Delta p$  的影响如图 4 所示。由图 4 可知,随着底板厚度的增加,光学薄片点胶后的  $\Delta p$  增大。但如果底板材料的热膨胀系数很小,则  $\Delta p$  基本不变。

点胶过程中胶点的几何尺寸、性质以及分布都会对工件的  $\Delta p$  产生影响。胶点半径对  $\Delta p$  的影响如图 5 所示。随着胶点半径的增加,  $\Delta p$  逐渐增加。因此,为了得到较好的点胶效果,应尽量减小胶点大小,但是过小的胶点半径会使工件与底板之间的粘贴不牢固,在加工过程中容易脱落。因此要综合考虑面形变化量和工件粘贴情况,采用合适的胶点半径。

胶点的性质对工件的  $\Delta p$  也有一定影响,如图 6 所示。由图 6 可知,  $\Delta p$  会随着胶点弹性模量的增加而增加,而胶点热膨胀系数对  $\Delta p$  的影响不大。胶点成分一般为沥青和松香,松香含量增加会增加抛光胶的弹性模量,故适当增加胶点中的沥青含量可以减小点胶后工件的  $\Delta p$ 。

胶点分布对  $\Delta p$  也有一定的影响。假设胶点分布如图 7 所示,其中 8 个胶点为对称分布,且距薄片中心的距离  $d$  相等。不同圆心距  $d$  的工件在点胶后的  $\Delta p$  如图 8 所示。由图 8 可知,当胶点的圆心距约为工件半径的 1/2 时,存在一个  $\Delta p$  明显增高的区域(高  $\Delta p$  区)。因此,对于圆形光学薄片,点胶过程中胶点分布要避免该区域。

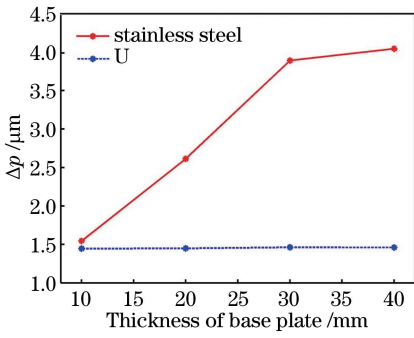


图 4 点胶后工件  $\Delta p$  随底板厚度的变化  
Fig. 4  $\Delta p$  of workpieces after dispensing versus thickness of base plate

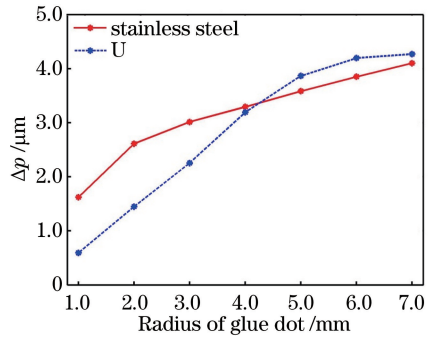


图 5 点胶后工件  $\Delta p$  随胶点半径的变化  
Fig. 5  $\Delta p$  of workpieces after dispensing versus glue dot radius

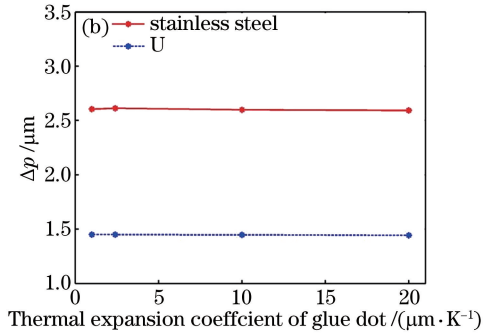
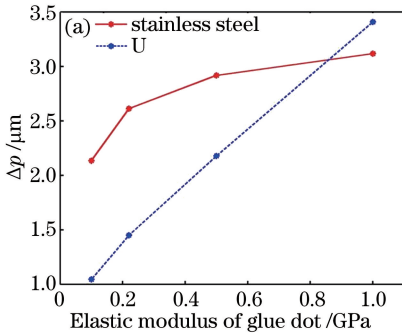


图 6 点胶后工件  $\Delta p$  随胶点(a)弹性模量和(b)热膨胀系数的变化

Fig. 6  $\Delta p$  of workpieces after dispensing versus (a) elasticity modulus and (b) thermal expansion coefficient of glue dots

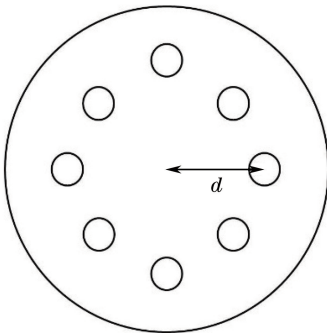


图 7 等圆心距的胶点分布

Fig. 7 Distribution of glue dots with equal distance to circle center

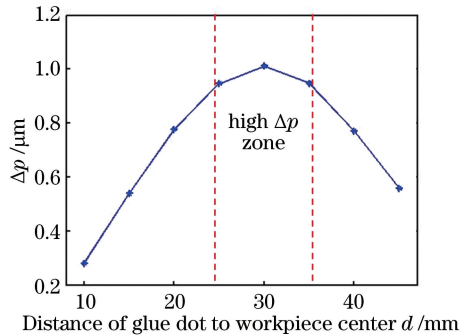


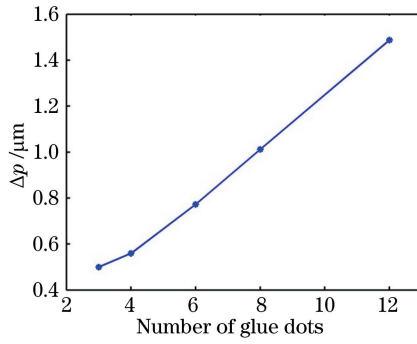
图 8 点胶后工件  $\Delta p$  随胶点圆心距的变化

Fig. 8  $\Delta p$  of workpieces after dispensing versus distance of glue dot to workpiece center

相同圆心距分布下的胶点数量越少,工件点胶后的  $\Delta p$  也相对越小,如图 9 所示。当圆心距为 30 mm 时,工件  $\Delta p$  随胶点数量的变化规律与 Feit 等<sup>[9]</sup>提出的经验公式相符。

## 5 结 论

对光学薄片点胶前后的面形变化量进行了有限元分析,计算讨论了底板材料、底板厚度、胶点半径、胶点弹性模量和热膨胀系数、胶点分布及胶点数量对光学薄片面形变化量的影响。结果显示,选择高弹性模量和低热膨胀系数的底板材料,减小底板厚度,减小胶点半径,减小胶点弹性模量和胶点的数量,点胶后的面形变化量更小。同时对于圆形光学薄片,点胶时还应该避开高  $\Delta p$  区域。

图 9 点胶后工件  $\Delta p$  随胶点数量的变化Fig. 9  $\Delta p$  of workpieces after dispensing versus number of glue dots

## 参 考 文 献

- [1] Twyman F. Prism and lens making: A textbook for optical glassworkers[M]. London: Hilger & Watts, 1988: 90-93.
- [2] Gillman B E, Tinker F. Fun facts about pitch and the pitfalls of ignorance[C]. SPIE, 1999, 3782: 72-79.
- [3] Shan Haiyang. Continuous polishing technics of Nd-doped phosphate laser glass[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 73-96.  
单海洋. 磷酸盐激光钕玻璃环形抛光工艺研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2014: 73-96.
- [4] Cumbo M J. Chemo-mechanical interactions in optical polishing[D]. Rochester: University of Rochester, 1993.
- [5] Degroote J E, Gregg L L. Quantitative characterization of optical polishing pitch[C]. SPIE, 2001, 4451: 209-221.
- [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] Horne D F, Smith F D. Optical production technology[M]. London: Adam Higler, 1972: 743-744.
- [8] Kingslake R. Applied optics and optical engineering[M]. New York: Academic Press, 1965.
- [9] Feit M D, Desjardin R P, Steele W A, *et al.* Optimized pitch button blocking for polishing high-aspect-ratio optics[J]. Applied Optics, 2012, 51(35): 8350-8359.