

# 环形抛光中倾覆力矩对工件面形的影响及解决方法

焦 翔<sup>1,2</sup> 朱健强<sup>1</sup> 樊全堂<sup>1</sup> 李养帅<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 对环形抛光法加工大小口径工件面形不一致的问题进行了研究。在0.69 m环形抛光机上发现,  $\phi 100$  mm工件面形微凹时,  $\phi 48$  mm工件为峰谷(PV)值 $0.336 \lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm)的凸面形。利用Winkler假定和Preston方程对工件的面形进行了研究,发现倾覆力矩是引起面形不一致的主要原因。对于圆形工件的理论计算结果表明,当工件和抛光盘之间的摩擦系数与分离器对工件的作用力合力的高度的乘积大于工件直径0.125倍时,工件将会变凸。对工件进行了加压、润滑和降低工件支撑位置等实验,发现加压不能改善工件面形一致性;在抛光液中添加润滑剂后一致性有了一定的改善,  $\phi 48$  mm工件PV值降为 $0.128 \lambda$ ;而降低工件支持位置后,大小口径工件面形不一致性问题得到了解决,  $\phi 48$  mm工件PV值降为 $0.058 \lambda$ ,且变为微凹面。此结果表明抛光盘与工件的摩擦系数不能太大,且分离器对工件的支持位置应尽量靠进盘面。

**关键词** 光学制造; 面形一致性; 环形抛光; 倾覆力矩; 润滑

中图分类号 TG356.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0608003

## Influence of Overturning Moment to Workpiece Surface Figure in Continuous Polishing and the Solutions

Jiao Xiang<sup>1,2</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup> Fan Quantang<sup>1</sup> Li Yangshuai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The problem that the workpieces with different sizes have different surface figures is studied in the continuous polishing process. The surface shape is a little concave and the peak valley (PV) value is  $0.336 \lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm) for the  $\phi 100$  mm workpiece when polished in the 0.69 m continuous polishing machine. However, the  $\phi 48$  mm workpiece is convex and the PV value is  $0.336 \lambda$ . The Winkler's hypothesis and the Preston equation are applied to study the surface shape of the workpiece, then the overturning moment of the workpiece is found to be the main reason for the surface inconformity. The theoretical analysis results show that to the round workpiece, when the product of the friction coefficient between the workpiece and the polishing pad and the resultant force from the separator to the workpiece is larger than 0.125 times diameter of the workpiece, the workpiece will turn to convex. The experiments of workpiece pressing, lubrication and moving down the supporting position of the separator is done. The results show that the consistency isn't been improved by applying pressure on the workpiece; by adding lubricant to the polishing slurry, the consistency is improved as the surface PV of the  $\phi 48$  mm workpiece is reduced to  $0.128 \lambda$ ; and the inconsistency problem is solved as the surface PV of the  $\phi 48$  mm workpiece is reduced to  $0.058 \lambda$  and the shape is slightly concave when moving down the supporting position. The results indicate that the friction coefficient between the polishing pad and the workpiece shouldn't be to large and

收稿日期: 2014-12-29; 收到修改稿日期: 2015-02-02

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究(2010DFB70490)

作者简介: 焦翔(1987—),男,博士研究生,主要从事光学元件抛光工艺方面的研究。E-mail: ziyoudeyunduo@126.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,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

the supporting position of the separator to the workpiece should as near to the polishing surface as possible in the continuous polishing process.

**Key words** optical fabrication; surface shape consistency; continuous polishing machine; overturning moment; lubrication

**OCIS codes** 120.6780; 140.3390; 240.5450

## 1 引 言

环形抛光法是获得高精度面形与低粗糙度表面的重要方法<sup>[1]</sup>,在光学加工领域有广泛应用。在一台环形抛光机上通常会加工不同尺寸工件,理论上不同尺寸工件的面形应满足口径平方比关系。实际在加工过程中,由于非理想的受力情况,大小口径的工件面形往往不对应。尤其是使用多孔分离器抛光多块小尺寸工件时,和一整块大口径工件面形一致性很差。根据加工经验,小口径工件往往倾向于变凸,所以要将大口径工件调成凹球面,这样补偿之后加工出的小口径工件才是平面。大小口径工件在同一台环形抛光机上抛光却得到不同的面形给加工带来了极大的麻烦,因为这意味着不能同时获得高精度面形,或在更换不同尺寸工件后必须对抛光盘面形进行调整。Zhou Yiyang等<sup>[2]</sup>在研究抛光盘面形修整时指出了倾覆力矩对抛光盘面形的影响,Suratwala T I等<sup>[3-4]</sup>在研究抛光过程中面形变化时指出倾覆力矩会对工件和抛光盘之间的接触压强产生影响,但都没有深入分析倾覆力矩对工件的作用。本文从理论上分析了工件在抛光时的受力情况,发现倾覆力矩是引起面形不一致的主要原因。为减小倾覆力矩的影响,对工件进行了加压、减小摩擦系数和降低支撑位置等实验,结果表明对工件加压无益;减小摩擦系数后面形不一致问题有了一定的改善;而降低支撑位置后问题得到了解决。这些对实际生产具有重要的指导意义。

## 2 工件面形的不一致问题分析

环形抛光中工件会受到抛光盘摩擦力和分离器或支撑滚轮在水平方向的推力,通常这两个作用力不在同一平面内,会对工件产生力矩,使工件有向运动方向倾斜的趋势,这种趋势影响了工件与抛光盘接触压强的均匀性。假设抛光盘和工件均为理想平面,忽略工件的变形、流体力学效应与抛光粉以及抛光盘粗糙表面和开槽对接触压力的影响,根据 Winkler 假定<sup>[5]</sup>,工件与抛光盘的接触压强将存在线性分布趋势。Winkler 假定表达式为:

$$P = k \cdot z, \quad (1)$$

式中  $P$  为接触压强,  $k$  为抛光盘弹性系数,为杨氏模量和厚度的比值,  $z$  为抛光盘厚度方向的压缩量,为长度量。在工件不变形且工件和抛光盘为理想平面的假设下,压缩量  $z$  为线性分布,所以接触压强  $P$  为线性分布,如图 1 所示。图中,  $F_f$  为摩擦力,  $G$  为工件重力,  $F_N$  为分离器对工件的等效合力,  $h$  为合力作用线与盘面的距离,  $U$  为工件相对盘面的运动方向。

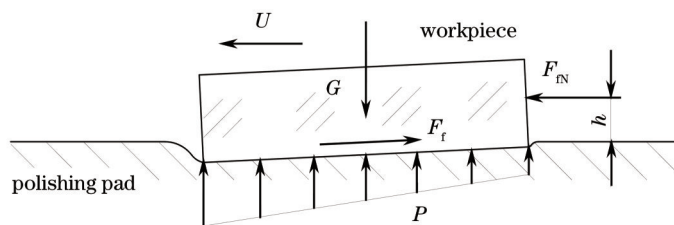


图 1 工件受力示意图

Fig.1 Schematic diagram of workpiece force analysis

倾覆力矩与摩擦力  $F_f$  和支持高度  $h$  有关。抛光过程中分离器与工件在高度方向上通常为均匀接触,所以支持位置固定,但工件与抛光盘之间的摩擦系数未知并且是变量<sup>[6-7]</sup>,摩擦系数越大,工件所受的倾覆力矩越大,考虑到工件的受力平衡,接触压强分布将变得更不均匀,这样才能产生足够的力矩平衡由摩擦力  $F_f$  和分离器支持力  $F_N$  所产生的倾覆力矩。当倾覆力矩大到一定程度时,工件与抛光盘之间会出现接触压强为零的区域<sup>[8]</sup>,此时利用 Preston<sup>[9]</sup>方程对工件不同径向位置根据压强进行圆周积分计算材料去除量,不同径向位置去除量将

不同。在工件不存在沿抛光盘径向运动的情况下,环形抛光进入稳态后,工件自转均匀,且与抛光盘之间的接触压强分布不再发生变化,根据 Preston 方程,工件任意径向位置在每个转动周期内的材料去除量为:

$$M_{RA}(r) = C \cdot \int_{T_n}^{T_{n+1}} P(r,t) \cdot V(t) \cdot dt, \quad (2)$$

式中  $M_{RA}$  为每个转动周期内工件材料的去除量,是工件径向位置  $r$  的函数,  $C$  为工件材料去除的 Preston 常数,从  $T_n$  到  $T_{n+1}$  为一个转动周期,  $P$  为工件与抛光盘的接触压强,为径向位置  $r$  和时间  $t$  的函数,  $V$  为工件与抛光盘的相对运动速度,一般工件和抛光盘同向同速旋转,此时工件任一点与抛光盘相对运动速度相同,即  $V$  为常数,  $dt$  为时间微元。另外有:

$$dt = \frac{d\theta}{\omega}, \quad (3)$$

$$V = \omega \cdot e, \quad (4)$$

(3)式中,  $\theta$  为工件转动的角度,  $d\theta$  为微元时间  $dt$  内工件转动的角度,  $\omega$  为工件和抛光盘转动的角速度;(4)式中  $e$  为工件轴线与抛光盘轴线的距离。由于每一周期工件面形变化很小,可以假设接触压强分布不变,所以(2)式又可表达为:

$$M_{RA}(r) = C \cdot e \cdot \oint_{l(r)} P(r,\theta) \cdot d\theta, \quad (5)$$

式中  $l$  为以工件中心为圆心、半径为  $r$  的圆。(5)式表明,工件径向位置  $r$  的材料去除量与这一圆周上的平均压强成正比。所以,当压强  $P$  在工件抛光面上沿一个方向线性分布且不存在压强为零的位置时,不同径向位置  $r$  处的材料去除量相同;如果始终假设整个工件抛光面上接触压强线性分布,当线性分布系数过大时,会使压强小的一侧出现压强为负的区域,但由于接触压强不能为负,所以此时出现的是接触压强为零的区域。出现零区域的径向位置处材料去除量变大,工件变凸。可以这样理解:将接触压强为零的区域按照接触压强非零区域的线性分布趋势补成接触压强为负的区域,此时由于工件整个抛光面接触压强在某一方向上为线性分布,所以对于不同的径向位置  $r$ ,圆  $l$  上的平均压强相等,当把负压强恢复为零时,相当于边缘处的平均压强变大,边缘材料去除量多,所以工件会变凸。

假设抛光盘面形为理想平面且保持不变,即使与工件之间出现了接触压强为零的区域,初始时工件会变凸,但工件面形最终会稳定下来。因为材料去除速率高的部分接触压强会减小,使这部分去除速率逐渐减小,最终工件整个抛光面上材料会均匀去除。为计算工件最终的面形,可采用迭代方法,设定工件初始面形为理想平面,根据(1)式和工件抛光时的受力平衡计算接触压强分布,然后按照(5)式计算这一旋转周期结束后工件的面形,得到面形后重复根据(1)式和(5)式计算每一旋转周期接触压强和每一旋转周期结束后工件面形的过程,直至稳定。图2是计算结果。图2(a)是工件面形为理想平面的初始接触压强分布,计算所用工件尺寸为  $\phi 48 \times 15$ ,支持高度  $h$  为 7.5 mm,摩擦系数  $\mu$  从 0 增大到 1.8。当  $\mu$  增大到 1.0 时,出现接触压力为零的区域。图2(b)为根据上述迭代方法得到的工件最终面形,计算中设定抛光盘为理想平面,抛光盘杨氏模量为 2 GPa,厚度为 20 mm,弹性系数取为杨氏模量与厚度的比值。计算结果表明当倾覆力矩增大到一定值时,工件开始变凸,之后倾覆力矩越大,工件变得越凸。

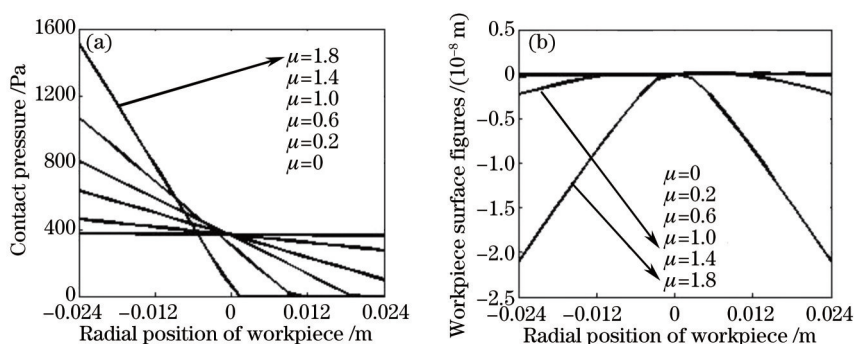


图2 工件与盘面的接触压强与工件面形。(a)不同摩擦系数  $\mu$  下的压强分布;(b)对应面形

Fig.2 Contact pressure between the workpiece and the polishing pad and the workpiece surface figures. (a) Pressure distribution with different friction coefficients  $\mu$ ; (b) corresponding surface figures

对于圆形工件,理论计算的保证工件不变凸的条件是:

$$\mu \cdot h \leq 0.125D, \quad (6)$$

式中  $D$  为工件直径,系数 0.125 为数值积分的结果,其他参数已做说明。满足此式可保证工件不与抛光盘出现部分脱离,从而在压力线性分布的假设下,保证工件在自转一周后各点材料去除量相等。根据单海洋等<sup>[6]</sup>的测量结果,工件与抛光盘之间的摩擦系数远大于 1,约为 3~5;而根据腾霖等<sup>[7]</sup>的结果,摩擦系数甚至可达 8~10,如此大的摩擦系数在不降低工件支撑位置的情况下,倾覆力矩很容易造成工件向凸球面变化。由于小口径工件的厚度直径比通常大于大口径工件的厚度直径比,所以小口径工件受到的影响更大。图 3 为在同一环形抛光机上同时抛光两块不同尺寸工件的面形测量结果,测量设备为 ZYGO 干涉仪。环形抛光机和工件参数见表 1。大小工件均放在具有适当孔径的分离器内进行抛光,分离器对工件在高度方向上均为均匀支撑,孔内粘贴了弹性薄片。抛光盘转速为 2 r/min,实测盘面与环境温差很小。多次重复测量均得到同样的结果,大小工件面形差异很明显,  $\phi 100$  mm 工件面形微凹时,  $\phi 48$  mm 工件为峰谷(PV)值 0.336 $\lambda$  的凸面形。大口径工件与校正板面形较吻合。

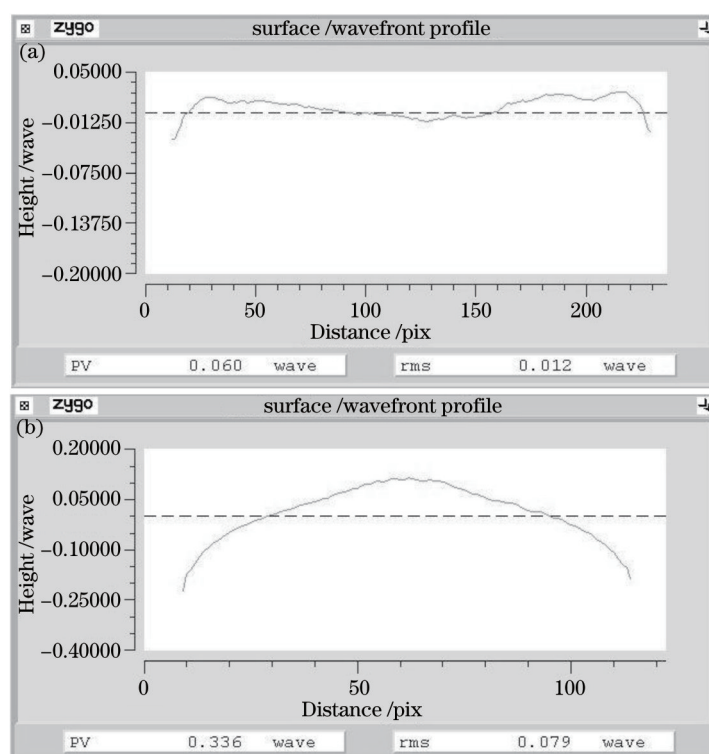


图 3 不同直径工件面形对比。(a)  $\phi 100$  mm ; (b)  $\phi 48$  mm

Fig.3 Comparison of the surface figures of the workpieces with different diameters. (a)  $\phi 100$  mm ; (b)  $\phi 48$  mm

表 1 实验参数

Table 1 Parameters for experiment

Parts	OD /mm	ID /mm	Thickness /mm	Material
Polishing pad	690	220	20	Pitch
Conditioning plate	350	—	30	Moorstone
Large workpiece	100	—	15	Fused silica
Small workpiece	48	—	15	Fused silica

### 3 解决方案

根据(6)式可知,改善面形一致性的措施包括减小工件与抛光盘的摩擦系数  $\mu$  和高度  $h$ 。通常情况摩擦系数不是固定的,变化规律很复杂,会受到抛光盘转速、性质、抛光液性质和添加量等的影响。摩擦系数另一可能的影响因素是压力,且对工件加压也常采用,所以对小口径工件进行了加压抛光实验观察面形一致

性是否有所改善。所用工件与图 1 中相同,在小工件中心粘结一质量 130 g 的圆柱形铁块进行抛光,其他参数不变,工件一致性并未得到改善。实验结果见图 4,  $\phi 48$  mm 工件为 PV 值  $0.385\lambda$  的凸面形。

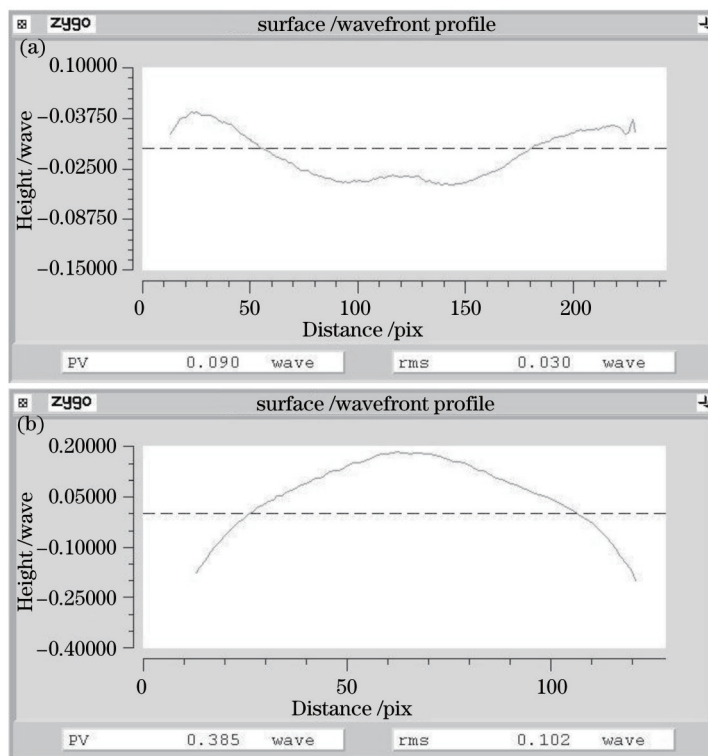


图 4 不同直径工件面形对比。(a)  $\phi 100$  mm ;(b)  $\phi 48$  mm ,中心加压

Fig.4 Comparison of the surface figures of the workpieces with different diameters. (a)  $\phi 100$  mm ; (b)  $\phi 48$  mm , pressure applied in the center

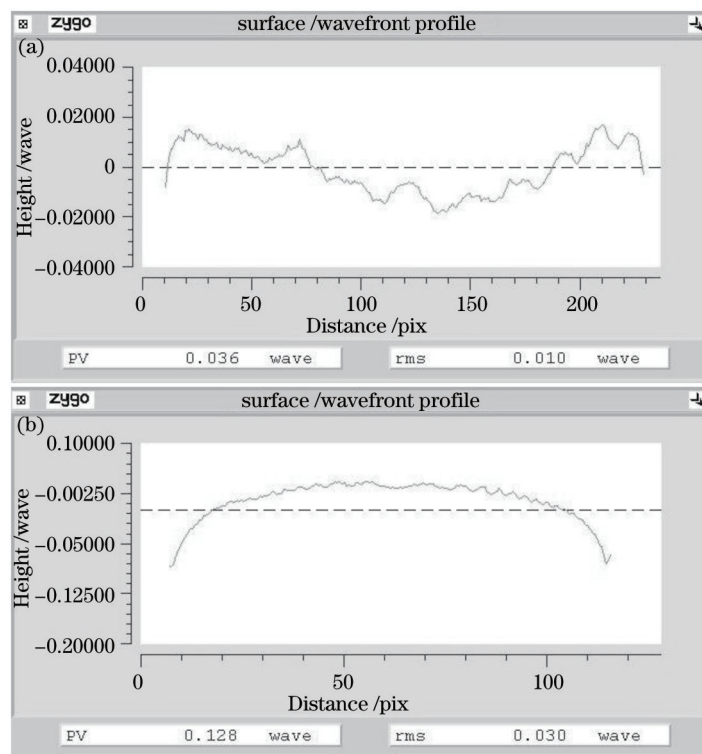


图 5 添加润滑剂后不同直径工件面形对比。(a)  $\phi 100$  mm ;(b)  $\phi 48$  mm

Fig.5 Comparison of the surface figures of the workpieces with different diameters after adding lubricant. (a)  $\phi 100$  mm ; (b)  $\phi 48$  mm

为了验证降低摩擦系数的效果,在抛光液中添加润滑剂进行了实验。工件处于分离器孔内,在盘面上的移动轨迹为螺旋线,摩擦系数很难测量。且添加润滑剂后,摩擦系数存在极为明显的波动。甚至于工件有时已经浮在了盘面上,摩擦系数非常小,接近于零,但有时又受到了非常大的摩擦力。所以只能粗略调整摩擦系数大小。降低摩擦系数并长时间进行抛光后,不同尺寸工件面形如图5所示。

由实验结果可见,添加润滑剂后大小工件面形一致性有了一定的改善,比较一条直径上的轮廓PV值,差异有所减小, $\phi 48\text{ mm}$ 工件PV值降为 $0.128\lambda$ ,但问题没有得到根本解决。原因一是由于摩擦系数难以稳定控制,即使大部分时间摩擦系数很小,仍然会出现摩擦系数很大的情况,这和抛光液的流体力学效应有关;二是当摩擦系数很小时,工件容易出现不规则转动,根据Preston方程,此时工件抛光面越接近边缘,材料去除速率越大,所以也容易出现凸球面。另外通过润滑实验发现,减小摩擦系数后工件的塌边现象有所改善,这是由于减小摩擦系数后改善了工件边缘与抛光盘之间的局部接触压力过强问题。作为解决塌边这一普遍问题的线索,这一信息有重要的意义,将展开后续研究。

此后进行了降低分离器对工件支持位置的实验。分离器孔内侧均匀粘贴了弹性薄片,所以之前对工件柱面在高度方向为均匀支撑。现在改为对工件被抛光面的那一端支撑,支撑位置非常接近抛光面,在摩擦系数较大的情况下同样能保证(6)式成立。除换回无润滑剂的抛光液和将盘面清洗干净外,其他参数不变。图6为实验结果。不同口径工件的一致性有了明显好转, $\phi 48\text{ mm}$ 工件PV值降为 $0.058\lambda$ ,且与大口径工件中心类似,变为了微凹面。这表明工件分离器孔内粘贴的弹性元件应尽量窄,并且应尽量靠近抛光面,这对实际加工有重要的指导意义。

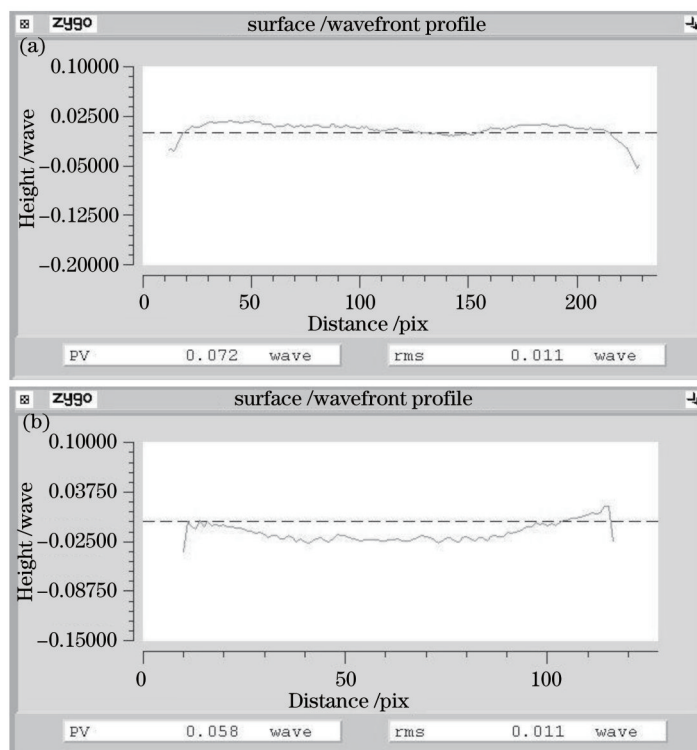


图6 不同直径工件面形对比。(a)  $\phi 100\text{ mm}$ ; (b)  $\phi 48\text{ mm}$ , 支撑位置降低

Fig.6 Comparison of the surface figures of the workpieces with different diameters. (a)  $\phi 100\text{ mm}$ ; (b)  $\phi 48\text{ mm}$ , supporting position is moved down

#### 4 结 论

在环形抛光机上抛光不同口径的工件,得到的面形往往不一致,尤其是抛光多块小尺寸工件时,和一整体的大口径工件面形明显不一致,原因是小尺寸工件受倾覆力矩的影响很大。理论分析得出面形不一致和工件与抛光盘之间的摩擦系数、分离器对工件的支撑高度有关。对于圆形工件的理论计算结果表明,当工

件和抛光盘之间的摩擦系数与分离器对工件的等效支撑高度的乘积大于工件直径的0.125倍时,工件将会变凸。降低摩擦系数进行实验,面形一致性有所改善,但由于摩擦系数难以稳定控制,问题没有得到根本解决;而通过降低支撑位置很好地解决了大小工件面形不一致的问题:实验中 $\phi 100$  mm工件中心微凹,PV值为 $0.072\lambda$ 时, $\phi 48$  mm工件同样为微凹面,PV值为 $0.058\lambda$ 。这些说明抛光盘和工件之间的摩擦系数不能过大,且分离器孔内粘贴的弹性元件应尽量窄,并且应尽量靠近抛光面,这对实际加工有重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Cooke F, Brown N, Prochnow E. Annular lapping of precision optical flatware[J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(5): 407-415.
- 2 Zhou Yiyang, Davis E C. Variation of polish pad shape during pad dressing [J]. *Materials Science and Engineering B*, 1999, 62(2): 91-98.
- 3 Suratwala T I, Feit M D, Steele W A. Toward deterministic material removal and surface figure during pad polishing of fused silica[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 93(5): 1326 - 1340.
- 4 Suratwala T, Steele R, Feit M, *et al.*. Convergent pad polishing of amorphous silica[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2012, 3(1): 14-28.
- 5 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.
- 6 Shan Haiyang, Xu Xueke, He Hongbo, *et al.*. Friction properties between phosphate laser glass and optical polishing pitch[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0406001.  
单海洋, 徐学科, 贺洪波, 等. 磷酸盐激光玻璃与光学沥青抛光胶的摩擦特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0406001.
- 7 Teng Lin, Song Shaozhong, Ren Jingxin. The study on shear laws of polishing pitch[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1997, 4: 1-3.  
滕霖, 宋绍忠, 任敬心. 抛光沥青的剪切应变规律[J]. *航空精密制造技术*, 1997, 4: 1-3.
- 8 Luna-Aguilar E, Cordero-Dávila A, Garcia J G, *et al.*. Edge effects with Preston equation[C]. *SPIE*, 2003, 4840: 598-603.
- 9 Preston F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. *Journal of the Society of Glass Technology*, 1927, 9: 214-256.

栏目编辑: 韩 峰