

环形抛光技术在列阵透镜制造中的应用

焦 翔^{1,2} 朱健强¹ 樊全堂¹ 李养帅^{1,2}

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

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对传统方法抛光高功率激光实验中使用的长焦距列阵透镜单元遇到的检测困难、一致性差等问题, 提出了采用环形抛光的新方法。对环形抛光系统的理论分析表明, 抛光盘面形可以稳定在球面状态。利用这种特性, 环形抛光法可以抛光小曲率球面。阐述了抛光盘面形的调节方法。利用0.69 m环形抛光机对口径45 mm、曲率半径57207 mm的列阵透镜单元进行了抛光, 结果表明面形精度和一致性均优于平面摆动式抛光法。最后对环形抛光机可抛光的球面曲率半径范围进行了探讨, 发现盘面尺寸越小球面抛光能力越强, 直径0.8 m的盘面可抛光的曲率半径可低至10 m。

关键词 光学制造; 环形抛光; 列阵透镜; 面形控制; 大曲率半径

中图分类号 TG356.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0608008

Application of Continuous Polishing Technology to Manufacturing of a Lens Array

Jiao Xiang^{1,2} Zhu Jianqiang¹ Fan Quantang¹ Li Yangshuai^{1,2}

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

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

Abstract Aiming at the problems such as difficult to measure and bad consistency of the surfaces in polishing long-focus lens array elements by conventional method, the new way using continuous polishing machine is proposed. According to the theoretical research of the continuous polishing system, the surface of the polishing pad can keep spherical. The workpieces with small curvature spherical surfaces can be polished with the character. The adjusting methods of the polishing pad surface curvature are elaborated. According to the experiments of polishing lens array elements with aperture of 45 mm and curvature radius of 57207 mm in 0.69 m continuous polishing machine, the element surface accuracy and consistency are both better than using conventional oscillating polishing method. At last, the range of the curvature radius that can be polished in the continuous polishing machine is discussed and find that the smaller the polishing pad is, the stronger the ability of polishing spherical surface is. The radius of curvature which is polished in 0.8 m diameter can be as small as 10 m.

Key words optical fabrication; continuous polishing; lens array; surface shape control; large curvature radius

OCIS codes 120.6780; 140.3390; 240.5450

1 引言

在高功率激光实验中, 列阵透镜用来实现对靶面的均匀辐照, 能使二维多光束干涉斑纹更密, 均匀性更好^[1-6]。高功率激光实验中的列阵透镜由很多相同的小尺寸、大曲率半径的球面透镜单元胶合而成, 要求加

收稿日期: 2014-12-29; 收到修改稿日期: 2015-01-28

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.shenc.ac.cn

工精度高,光洁度好。这种元件一般难以采用数控抛光等先进方法加工,通常在单轴机或多轴机上采用摆动式抛光。但采用这种抛光方式存在工序繁琐、检测困难和一致性差等缺点。工序繁琐是因为需要拼盘等工作,需要一定曲率的粘结模和玻璃样板等;检测困难是因为多个元件拼成一盘,对单个元件面形难以检测;一致性差表现在同一盘工件面形存在差别,不同盘工件之间的差别更明显。环形抛光技术通常用于获得高精度和低粗糙度平面,但根据环形抛光系统的特性,同样可以抛光曲率半径很大的球面,并且克服了摆动式抛光的缺点。用环形抛光法抛光球面,关键在于抛光盘面形能否稳定在所需要的曲率半径上及如何获得此稳定状态。本文从理论上研究了环形抛光系统面形调节特性,研究结果表明抛光盘面形可以稳定在大曲率半径的球面上,阐述了获得特定曲率半径的方法,并揭示了工件对系统状态的影响等规律。通过对比实验表明,在环形抛光机上抛光对角线45 mm、曲率半径(R)57207 mm的正六边形平凸透镜单元,其面形精度和一致性等均优于传统的平面摆动式抛光。最后对环形抛光机可以抛光的工件曲率半径范围进行了探讨。

2 环形抛光系统面形调整特性研究

环形抛光系统由转台、抛光盘、校正板和工件组成,将整个系统简化为理想磨削模型,做如下假设:

- 1) 抛光盘为沿厚度方向的一维 Maxwell 流体;
- 2) 抛光盘盘面开槽不影响工件和抛光盘的接触压力;
- 3) 忽略流体动力学效应,即抛光盘表面的液膜不影响接触状态;
- 4) 工件和校正板对抛光盘的摩擦力不影响抛光盘厚度方向的变形;
- 5) 工件和校正板为不变形的刚体,抛光盘下表面不变形。
- 6) 工件、校正板和抛光盘面形都是旋转对称的。

根据以上假设,环形抛光系统可用 Preston 方程^[7]和 Winkler 假定^[8]描述。考虑工件和校正板的受力平衡,可计算抛光盘与工件和校正板之间的接触压强分布,进而计算抛光盘、工件和校正板的面形变化。限定工件、校正板和抛光盘同速转动。为简化计算,假设每一圈中接触压强分布不变,在每一圈结束时修正面形。采用计算机辅助计算,程序流程图见图 1。其中 H 和 θ 分别反应工件或校正板在竖直方向与抛光盘的相对位置和它们的轴线与竖直方向的夹角。 F_N 和 M_o 分别是根据 H 和 θ 确定的抛光盘对校正板或工件的支持力和支持力矩。 G 为校正板或工件的重力。 e_N 与 e_M 为设定的允许计算误差,为接近零的正数。误差判据如下:

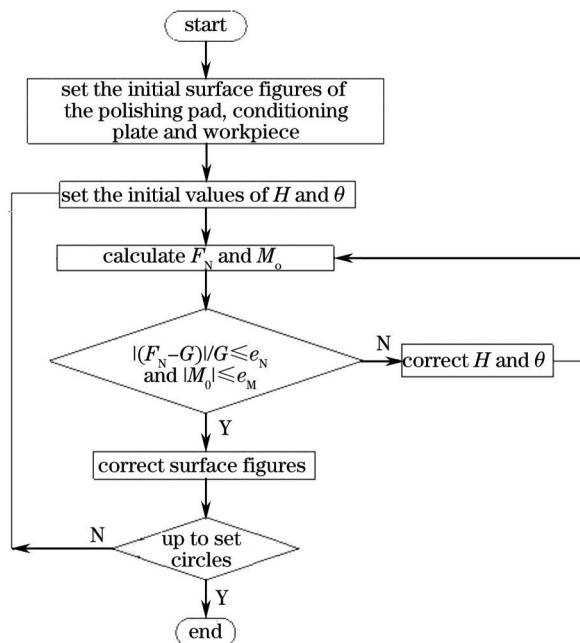


图 1 面形计算程序流程图

Fig.1 Program flow chart for surface calculation

$$\frac{|F_N - G|}{G} \leq e_N, |M_o| \leq e_M. \quad (1)$$

根据以上模型可得出环形抛光系统如下基本特性：

1) 校正板位置不变,则工件和抛光盘、校正板和抛光盘面形贴合后,三者面形将以固定的速率变化,变化速率是校正板位置的连续函数。

2) 对于某个特定的校正板位置,系统可以进入平衡态,处于平衡态后抛光盘、工件和校正板面形将保持不变,可以保持为平面或小曲率球面。

这些特性说明系统的固有特征是面形的变化速率,而非具体的面形;平面和大曲率半径球面本质上并无差别,原因是相互贴合的两个面,如果一个叠加大曲率半径的凸球面,另一个叠加相同曲率半径的凹球面,并不影响接触状态。根据这两条特性,可总结出更有效的面形调整方法：

- 1) 找到校正板平衡位置；
- 2) 采用正确的方法调节抛光盘面形；
- 3) 根据抛光工件情况变化的同时调整校正板位置。

表 1 计算和实验所用参数

Table 1 Parameters for calculation and experiment

	OD /mm	ID /mm	Thickness /mm	Density /(kg/m ³)
Polishing pad	690	220	20	1800
Conditioning plate	350	—	30	3070
Workpiece	150	—	20	2500

图 2 描述了根据工件面形峰谷(PV)值确定平衡位置的方法。将校正板置于不同位置,记录监测元件面形变化速率,拟合曲线的过零点即为平衡位置。图 2 中变化速率为正表明向凸球面变化,为负表明向凹球面变化。所用参数见表 1,工件材料为熔石英。根据长期加工经验和文献资料,设定的校正板、工件与抛光盘 Preston 常数均为 $0.7 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1 [9-10]}$ 。系统转速为 2 r/min。计算的平衡位置与实验结果相差 17 mm,存在偏差是不能避免的。通常平衡位置在环带的中三分之一范围内,可在此范围内进行实验。需要强调的是平衡位置不受面形曲率半径的影响。另外环境温湿度必须保持稳定。

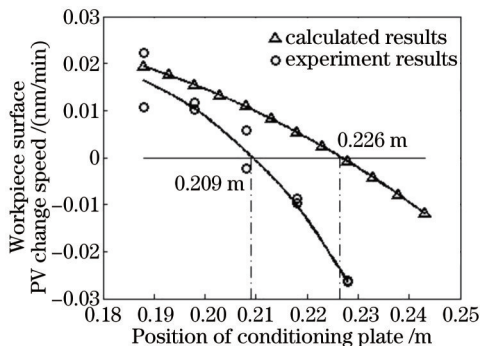


图 2 工件面形 PV 值变化速率

Fig.2 Workpiece surface PV value change speed

事实上校正板平衡位置并不固定,会根据抛光的工件情况发生变化。所以需要针对要抛光的工件情况进行实验。抛光小尺寸列阵透镜单元需要使用多孔分离器,分离器厚度最好和工件厚度相当,每个孔不要太大,防止工件的自由晃动影响加工精度。每个孔都放入工件后,整体相当于一个大的工件,那么会遇到的情况就是分离器在盘面径向位置的调整和在盘面上使用了几个工位。针对这两种情况进行了分析。为了更容易观察到面形变化,使用了整体的大工件代替分离器和多个小工件。图 3 是工件位置移动的情况,初始时工件放在环带中心,表明工件向里移动后面形向凸球面变化。系统参数见表 1,工件材料为熔石英,计算用 Preston 常数为 $0.7 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 。图 4 是改变工件数量引起面形变化的情况,初始时工件放在环带中心。第十天时在抛光盘另一个工位添加一材料、尺寸和面形均相同的工件,之后工件面形向凸球面变化。说明若工件在抛光盘上的径向位置改变了,校正板要反向移动才能保持系统平衡;工件放在环带中心时,若同时抛

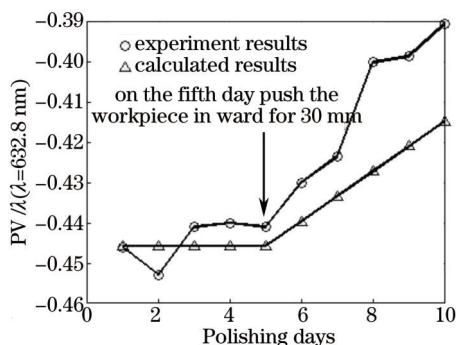


图3 工件位置移动引起面形PV值变化

Fig.3 Workpiece surface PV value change caused by the moving in radial direction of the polishing pad

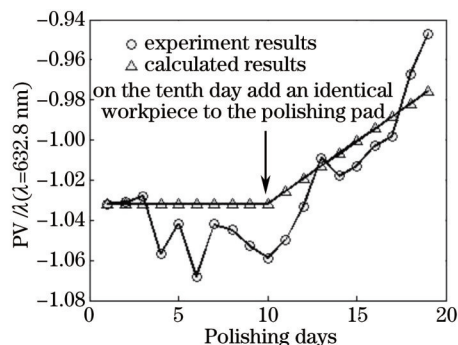


图4 工件数量改变引起面形PV值变化

Fig.4 Workpiece surface PV value change caused by the change of quantity

光的数量越多,校正板平衡位置越向外。

产生平衡位置移动这一现象的根本原因是工件对抛光盘在径向位置上并非均匀磨损^[1]。若工件放在环带中心,则工件对抛光盘内侧的磨损量大于外侧,校正板只有放在特定位置才能补偿这种磨损量差,此位置就是这种工件情况下的平衡位置。若之后工件位置或数量变化了,则工件对抛光盘内外侧磨损量差就发生了变化,若校正板继续放在同一个位置,将不能补偿工件对抛光盘内外侧的磨损量差,从而引起抛光盘面形球面曲率的变化。

由于抛光盘面形改变对校正板的移动存在反应延迟,在非平衡位置测得的工件面形不能代表系统真实面形,所以正确的面形调节方法是在平衡位置检测工件面形,根据此面形与理想面形的偏差量和测得的面形变化速率与校正板位置的依赖关系计算校正板移动位置与修整时间。修整时间到后将校正板推回平衡位置便可获得所需平衡态,但前提是环境保持稳定。根据计算和实验结果,平衡状态抛光盘面形对工件面形误差不敏感,意味着每次调整之后可以连续抛光很多工件,但要注意的是,在改变工件位置和抛光数量时要调整校正板位置,这样才能保持系统稳定。

3 实验结果

在0.69 m 环形抛光机和双轴抛光机上进行了对比实验,抛光口径45 mm、 $R=57207$ mm的正六边形平凸透镜单元。环形抛光机从平面调整至凹球面,调整量较大,首先采用磨砂工艺。由于校正板较小,便于测量,直接使用球径仪测量其矢高,以此监测系统面形。接近所需曲率半径后,改用抛光工艺。此后按上述方法调整并保持抛光盘面形,最终工件面形长期稳定在了需要的曲率上。抛光时采用多孔分离器。由于所需面形球面半径很大,不必进行预抛光。单个透镜的加工时间取决于所需的球面曲率半径,曲率半径越小,材料去除量越大,所需时间越长。工件从平面到曲率半径57207 mm的球面变化量较大,为提高抛光效率,在初始抛光时可提高转速,抛光液浓一些,并配合中心加压等操作;抛光快结束时,降低转速和抛光液浓度,且不再加压,以提高面形精度和光洁度。实验中采用2 r/min的系统转速,使用二氧化铈水基抛光液,并对工件中心加载130 g的负载,48 h可使工件面形与抛光盘贴合。此效率虽然比在双轴机上抛光慢,但结果表明工件平行度保持的很好,从而省去了之后压平行度的时间。且对于较大的环形抛光机,可以同时抛光多盘工件,并且可连续作业,大大提高加工效率。由于分离器对元件支持力在抛光面上方,对于小尺寸元件,倾覆效应^[12]更明显,面形容易变凸。为解决此问题,将分离器孔内的弹性接触层粘贴在偏下位置,使支持位置最大限度接近抛光面,减小倾覆力矩,实验表明获得了很好的效果。

环形抛光机上使用的分离器为七孔分离器,摆动式抛光中透镜单元7个拼成一盘。图5为环形抛光机抛光阵列透镜照片。图6和图7为两种加工方式各一批次元件的对比结果。图6为PV值一致性比较。面形在理想球面上的波动反应了加工精度,图7为去除波前的最佳拟合球面矢高(Power)后面形PV值的部分检测结果,图7(a)和(b)分别为在双轴机和环抛机上的抛光结果;图8为各一批次7个元件的比较结果。可见在面形一致性和加工精度方面,环形抛光方式均优于传统的摆动式抛光。

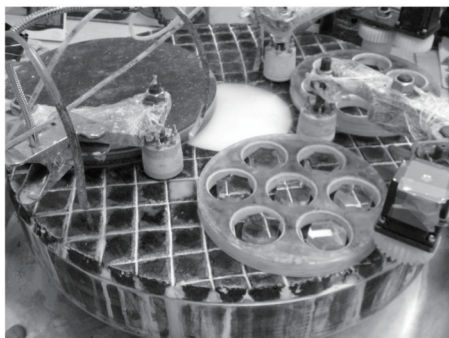


图5 环形抛光机抛光阵列透镜照片

Fig.5 Photograph of polishing lens array elements in continuous polishing machine

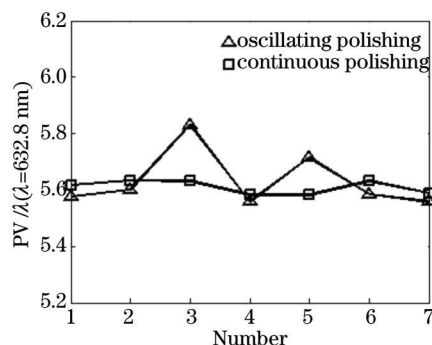


图6 两种加工方式PV值一致性比较

Fig.6 Comparison of the PV values of the element surfaces of two methods

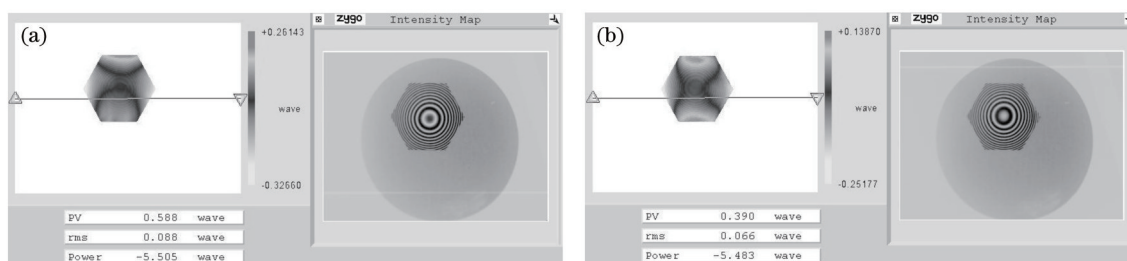


图7 部分检测结果(去除Power)。(a) 双轴机抛光; (b) 环形抛光

Fig.7 Parts of test results (Power removed). (a) Polished in two-axis machine; (b) polished in continuous polishing machine

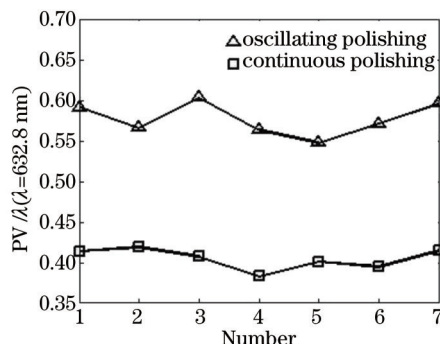


图8 两种加工方式去除Power后面形PV值比较

Fig.8 Comparison of the PV values without Power of the element surfaces of two methods

大曲率凹球面的加工与凸球面类似,也可用环形抛光机很好的进行抛光,此时抛光盘需要被调节为凸球面。用凸的抛光盘抛光初始面形为平面的工件,工件会浮在盘面上,抛光效率低,可配合加压操作提高效率。

4 关于可抛光工件曲率半径范围的探讨

考虑质点位于抛光盘边缘所受的盘面支持力与重力的偏差为判据,因为这是抛光平面与抛光球面之间唯一的区别:

$$\frac{G - F_N}{G} \leq \varepsilon, \quad (2)$$

式中 G 为工件重力, F_N 为所受的法向支持力,见图9。 ε 为设定的允许偏差量,为接近零的正数,其值越小,越接近平面。计算得出能抛光的球面半径下限为

$$R_{\min} = \frac{R_p}{\sqrt{1 - (1 - \varepsilon)^2}}, \quad (3)$$

式中 R_{\min} 为能抛光的球面半径下限, R_p 为抛光盘半径。表明环形抛光机尺寸越小,抛光球面的能力越强。表2为部分计算结果,表明用环形抛光机抛光曲率半径从十米左右到上百米的球面没有问题。

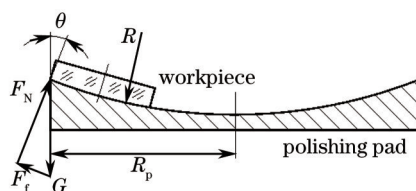


图9 曲率半径计算示意图

Fig.9 Schematic diagram for curvature radius calculation

表2 不同尺寸抛光盘可抛光的曲率半径

Table 2 Grindable curvature radius for different diameters of polishing pad

Diameter of polishing pad /m	ε	R_{min} /m	$\theta /(^{\circ})$
0.8	0.001	8.947	2.5626
0.8	0.01	2.836	8.1096
1.6	0.001	17.89	2.5626
1.6	0.01	5.672	8.1096

5 结 论

在理论上对环形抛光系统进行了分析,表明环形抛光机抛光盘面形可以稳定在小曲率球面,为抛光小曲率球面工件奠定了理论基础。并阐述了通过寻找平衡位置等更有效的调整和保持抛光盘面形的方法。通过对比实验表明,用环形抛光法抛光口径45 mm,球面半径57207 mm的列阵透镜单元,在加工精度和一致性等方面均优于传统的摆动式抛光。对球面环形抛光的理论分析表明,盘面越小球面抛光能力越强。采用0.8 m的盘面,抛光工件球面半径可低至约10 m。

参 考 文 献

- Ouyang Xiaoping, Zhu Qingchun, Zhu Baoqiang, *et al.*. Analysis about affection of lens array on energy measurement[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(8): 1110-1112.
 欧阳小平, 竺庆春, 朱宝强, 等. 列阵透镜对能量测量影响的分析[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1110-1112.
- Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun, *et al.*. Uniform illumination of large focal targets using a lens array[J]. Chinese J Lasers, 1985, 12(5): 257-260.
 邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊, 等. 用列阵透镜实现大焦斑面的均匀照射[J]. 中国激光, 1985, 12(5): 257-260.
- Chen Zezun, Liang Xiangchun, Deng Ximing. Computer analysis by lens array for uniform illumination[J]. Chinese J Lasers, 1986, 13(2): 65-70.
 陈泽尊, 梁向春, 邓锡铭. 用透镜阵聚焦实现均匀辐照的计算机分析[J]. 中国激光, 1986, 13(2): 65-70.
- Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi, *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(1): 27-31.
 丘悦, 钱列加, 黄宏一, 等. 用消衍射方法改善透镜列阵的辐照均匀性[J]. 中国激光, 1995, 22(1): 27-31.
- Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiuguang, *et al.*. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of "Shenguang- II" facility[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 129-133.
 傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光, 等. "神光 II"装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 129-133.
- Fu Sizu, Huang Xiuguang, Wu Jiang. Planarity and stability of shock driven directly by multi-beam laser from "Shenguang- II" laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(6): 570-574.
 傅思祖, 黄秀光, 吴江, 等. 利用"神光- II"激光装置多路光束叠加直接驱动下的冲击波平面性及稳定性[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(6): 570-574.
- Cooke F, Brown N, Prochnow E. Annular lapping of precision optical flatware[J]. Optical Engineering, 1976, 15(5): 407-415.
- 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.
- Berggren R R, Schmell R A. Pad polishing for rapid production of large flats[C]. SPIE, 1997, 3134: 252-257.
- Tesar A A, Fuchs B A. Removal rates of fused silica with cerium oxide/pitch polishing[C]. SPIE, 1991, 1531: 80-90.
- Onemooon Chang, Hyoungjae Kim, Kihyun Park, *et al.*. Mathematical modeling of CMP conditioning process[J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84(4): 577-583.
- Yi-yang Zhou, Eugene C Davis. Variation of polish pad shape during pad dressing[J]. Materials Science and Engineering, 1999, 68(2): 91-98.

栏目编辑: 韩峰