

文章编号: 1003-501X(2008)11-0139-06

光学元件聚氨酯抛光特性研究

李亚国¹, 王健¹, 许乔¹, 杨炜², 周治鑫¹, 郭隐彪²

(1. 成都精密光学工程研究中心, 成都 610041;

2. 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 本文研究了应用于平面光学元件的快速抛光技术, 从材料去除率、元件面形和表面粗糙度出发, 对快速抛光技术应用于平面大口径元件的加工效果进行了探讨。研究了在快速抛光技术中压力和主轴转速对材料去除率的影响, 验证了 Preston 公式在快速抛光中的适用性, 快速抛光技术的去除效率可达 10 $\mu\text{m}/\text{h}$; 其次, 研究了聚氨酯抛光元件面形的精度, 对于 330 mm \times 330 mm 元件可达 $\sim 1.0\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm); 最后, 对快速抛光系统中抛光粉颗粒大小及形态随使用时间的变化进行了观测, 并测量了使用 300 目和 500 目抛光粉时快速抛光元件表面粗糙度以及其随抛光粉使用时间的变化。

关键词: 聚氨酯; 材料去除率; 元件表面面形; 表面粗糙度

中图分类号: TQ171.73+4

文献标志码: A

Investigation of Optical Components Polished with Polyurethane Pad

LI Ya-guo¹, WANG Jian¹, XU Qiao¹, YANG Wei², ZHOU Zhi-xin¹, GUO Yin-biao²

(1. Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China;

2. School of Mechanical Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China)

Abstract: The effect of high speed polishing process was investigated, which was applied to polish large optical flatware. Material removal rate as well as surface roughness was measured, which was used to evaluate the quality of optical component. The effect of pressure and spindle speed on material removal rate was researched, which was up to 10 $\mu\text{m}/\text{h}$ in our experiments. The results of experiments coincided with Preston formula. Moreover, the surface form of optical components polished by high speed polishing is $\sim 1.0\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm). Last, surface roughness induced by high speed polishing with different size polishing agents (300 and 500 mesh size) was also observed. Our results show that the surface roughness is proportional to the size of polishing agent which decreases with the time of use.

Key words: polyurethane; material removal rate; surface form; surface roughness

1 引言

平面光学元件的数量在强激光系统装置中占有很大比重, 其作用也是举足轻重的, 如美国的强激光系统 NIF(National Ignition Facility)装置使用 7 500 余件大口径光学元件^[1], 计划用 5 年时间生产完成, 这给光学加工界带来了极大的挑战, 因此高精度大批量平面元件的生产就成为亟待解决的问题。在传统的光学加工中, 往往会通过增加人力、物力等方式来提高元件的产量, 但是在元件需求数量极其庞大的情况下, 这种办法就会显得捉襟见肘; 同时, 增加人力物力等会使加工成本急剧增加, 带来一系列不可预知的问题。因此, 通过改进加工理念、加工原理、加工工艺因素等来提高加工效率就迫在眉睫。平面快速抛光技术即是为了解决中高精度大口径平面光学元件的批量加工而提出的。

收稿日期: 2008-03-10; 收到修改稿日期: 2008-07-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863-804 项目资助

作者简介: 李亚国(1983-), 男(汉族), 陕西咸阳人, 助理工程师, 主要从事光学加工方面的研究。E-mail: riyyg@163.com

传统的光学加工一般是经过单轴机粗磨、磨砂、初抛光和环抛等阶段,加工出符合要求的平面光学元件^[2]。在此加工工序中,初抛光和环抛所需时间最长,是光学加工的瓶颈,而初抛光阶段的加工质量对环抛阶段的加工时间、加工效率以及加工结果都有很大影响。因此平面快速抛光技术即从初抛光阶段着手,结合超精密磨削和机械化学抛光工艺,使初抛光阶段的加工时间显著缩短,极大地提高了加工效率。

2 实验方法

实验使用 PPS100(北京诺斯泰格精密技术公司)快速抛光机,其原理如图 1。元件通过真空橡胶膜吸附于夹具上,压力经工件盘传递至元件,而且压力的大小可以通过计算机控制器精确控制;下面是抛光盘,表面贴有一层薄的聚氨酯抛光模(~1.2 mm 厚);右边为聚氨酯修整器,表面粘有金刚石丸片,用于修正聚氨酯抛光模;抛光液由恒温系统封闭回路供给。

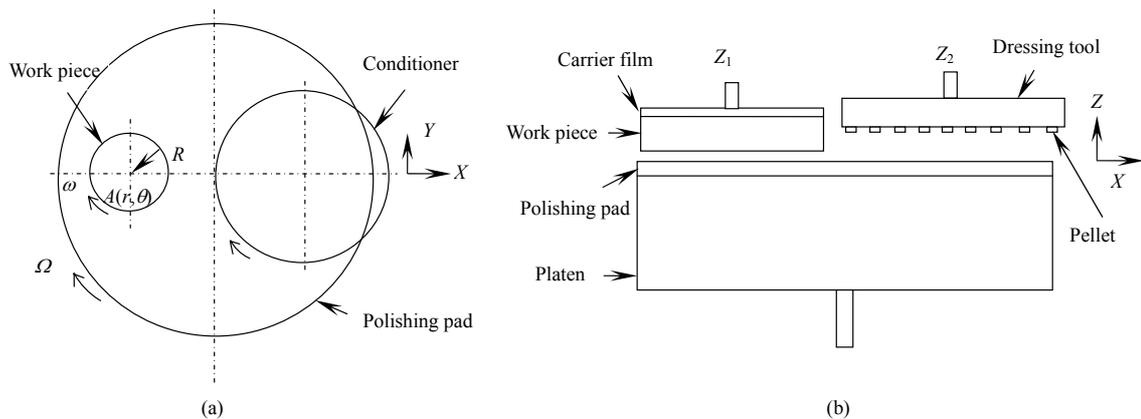


图 1 PPS100 原理图。(a)俯视图,(b)侧视图

Fig.1 Sketch of PPS100 (a) top view (b) lateral view

相比于传统抛光所使用的沥青,快速抛光使用的聚氨酯抛光垫具有以下优良的物理性质^[2-3, 15]:多孔性,可以存留大量的抛光粉颗粒,从而提高抛光效率,同时可以减少光学元件与抛光垫的实际接触面积,利于抛光液的流动,加快抛光过程中摩擦热量的散失,从而有利于稳定光学元件加工面形;高的弹性模量使高转速成、大压力为可能,从极大提高材料去除率;聚氨酯耐磨且保形性好,一旦面形修整之后,可以在很长时间内不需要再次修整面形,而且加工出来的批量元件面形基本一致。

实验使用 330 mm × 330 mm × 35 mm 的 BK7 方形元件和 330 mm × 330 mm × 10 mm 的熔石英元件,实验中抛光盘转速始终等于元件转速。

材料去除率的测量采用千分表(Mitsutoyo, 精度 1 μm)进行测量。测量时,千分表固定于 Z₂ 轴,通过控制 Z₂ 轴的运动(精度为 1 μm)进行测量,分别测量方形元件的四个角和各边中点。每抛光一小时测量一次,整个测量过程中,千分表始终固定于 Z₂ 轴不动。

元件表面的粗糙度采用粗糙度仪(RST plus, WYKO)进行测量,测量使用 20×倍率,测量范围约为 300 μm × 300 μm,每次对元件的九个点位置进行测量,四个角和四条边中点以及中心附近位置。

3 快速抛光的去除效率

对于玻璃的抛光, Preston 在上世纪提出了经典的 Preston 公式^[4]:

$$MRR = kPv \quad (1)$$

其中: MRR 为材料去除效率; k 是比例常数,称为 Preston 系数,由速度和压力以外的其它所有因素决定; v 为玻璃表面与抛光模接触的点相对于抛光模的瞬时速率; P 为该点的瞬时压力。参考图 1(a),抛光盘和工件均可主动转动,设其转速分别为 Ω 和 ω ,抛光盘中心和工件中心的偏心距为 R ,那么工件上一点 A (其在工件坐标系中的坐标为 (r, θ))相对于抛光盘的线速度可以由下式给出^[4]:

$$v(r, \theta) = \frac{ds(r, \theta)}{dt} = \sqrt{R^2\Omega^2 + r^2(\Omega - \omega)^2 + 2rR\Omega(\Omega - \omega)\cos\theta} \quad (2)$$

将其代入式(1)可得

$$MRR = kPv = kP \frac{ds}{dt} = kP \sqrt{R^2\Omega^2 + r^2(\Omega - \omega)^2 + 2rR\Omega(\Omega - \omega)\cos\theta} \quad (3)$$

在对元件进行快速抛光时，抛光盘转速和工件转速相同($\Omega = \omega$)，那么

$$MRR = kPR\Omega \quad (4)$$

假设其他因素在加工中始终一致，变化可以忽略，那么影响加工效率的因素主要为压力 P 和转速 Ω 以及偏心距 R 。如果假设压力均匀分布于元件与抛光模所接触的整个区域，那么可以通过控制加工的压力和转速以及偏心控制加工效率；通过调节偏心距 R 的大小来控制元件表面上不同环带之间的去除率，从而达到修正元件表面面形。

实验对影响抛光效率的两个主要因素进行了试验，得到了如下的压力和转速与平均去除效率之间的函数曲线(图 2)，由于元件的厚度问题，因此对于石英元件，压力相对较小。

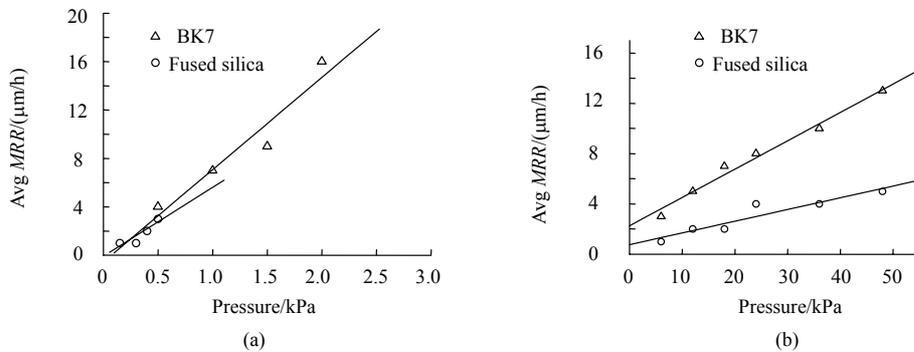


图 2 MRR 与(a)压力(b)转速之关系

Fig.2 Relationship among MRR, (a) normal load and (b) rotation rate

实验结果与式(4)吻合，随着压力以及转速的增大，去除效率逐渐增大。至于 Preston 系数 k ，其与很多因素相关，理论上的计算非常繁难，因此我们通过实验数据对其进行了计算(表 1)。所得到的结果与已有报道接近^[5-6]。由计算结果以及实验结果可以看出，对于石英玻璃其 Preston 系数 k 小于 BK7 玻璃。从理论上可以从玻璃抛光的机械学说和化学学说两方面来解释^[7-8]。

表 1 Preston 系数的计算

Table 1 Estimation of Preston coefficient

	Calculating according to normal load ($\Omega=36 \text{ rpm}, R=300 \text{ mm}$)							Calculating according to rotation rate ($P=1.0 \text{ kPa}, R=450 \text{ mm}$)						
	P/kPa	0.15	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	Ω/rpm	48	36	24	18	12
$k_{\text{BK7}}/(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})$	-	-	-	2.0	1.7	1.5	2.0	$k_{\text{BK7}}/(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})$	1.6	1.6	2.0	2.3	2.5	2.9
$K_{\text{FS}}/(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})$	1.6	0.8	1.2	1.5	-	-	-	$K_{\text{FS}}/(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})$	0.6	0.7	1.0	0.7	1.0	1.0

3.1 抛光的机械去除学说

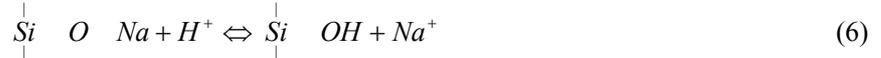
根据玻璃去除的机械学说，玻璃的除去可以认为是抛光粉颗粒在受到一定的压力后，于玻璃表面进行划擦，进而产生材料的去除。其去除去除率的大小与玻璃的硬度成反比，即

$$k = MRR / PR\Omega \propto 1 / H \quad (5)$$

当其他条件保持不变时，可以肯定 Preston 系数将随光学元件材料硬度的增大而减小。对于石英玻璃其硬度(8~10 GPa)大于 BK7 材料的硬度(5~6 GPa)^[9-10]，因此在同样的条件下，去除率要比 BK7 玻璃小，在图 2 中表现为熔石英的 $MRR \sim \text{Pressure/Rotation Rate}$ 的拟合曲线的斜率小于 BK7 的。假定抛光过程中其他因素的影响忽略不计，那么根据式(5)可得 $k_{\text{BK7}} / k_{\text{FS}} = H_{\text{FS}} / H_{\text{BK7}}$ ，由材料硬度计算出的 k 比值约为 2，与由表 1 实验计算出的大约相等。我们的实验结果也在一定程度上确认了玻璃抛光机械学说的正确性。

3.2 玻璃抛光的化学理论

利用抛光的化学理论也可以解释实验结果。化学理论认为,玻璃的去除与化学作用密切相关,化学作用越强,去除率相对越大^[7-8]。对比 BK7 与熔石英材料的化学成分,可以发现, BK7 玻璃中含有较多的氧化钠和氧化钾,而玻璃在抛光时,钠、钾离子将会与水中的氢离子发生交换如下反应^[8,11]:



反应产物会在玻璃表面形成一层硅胶凝胶层,硅胶层的硬度远小于玻璃的体材料,抛光粉颗粒以及抛光垫对玻璃材料的去除变得更加容易,从而使得 MRR 增大。而对于石英材料而言,其成分为氧化硅,硅氧键键能大于钠氧键键能,因此较难发生此类反应。所以在相同的条件下,石英玻璃的去除率和 Preston 系数较 BK7 小。相对而言石英玻璃的抛光更近似于机械磨削。

从图 2 我们还可以看出,对于 BK7 和石英玻璃的 MRR 拟合直线,在图 2(a)中,当 P 达到一定的压力值之后, MRR 才不为零。在集成电路制造程序中,硅、金属及电介质材料的化学机械抛光中也出现了类似的实验结果, Zhao 和 Shi^[12]引入阈值压力 P_{th} 来解释,当压力大于阈值压力($P > P_{th}$)时,抛光粉颗粒镶嵌在抛光垫中,其在玻璃表面产生滑动,材料有较大的去除;当 $P < P_{th}$ 时,抛光粉颗粒在玻璃表面产生滚动,由此所引起的材料去除很少,玻璃材料的去除率可以忽略,因此,当压力达到一定值时, MRR 才不为零。对于图 2(b)转速拟合曲线,其截距为正,当转速为零时, MRR 不为零。此结果貌似难以理解,但如果我们考虑到玻璃抛光的化学效应,那么当转速为零,但压力不为零时,抛光液会与玻璃表面材料中的原子和分子会与发生交换而造成侵蚀溶解现象,但这种效应所引起的 MRR 比较小,拟合曲线中转速为零时, MRR 比较大,误差较大,不过趋势是正确的,而且在转速为零时 BK7 的 MRR 大于石英材料的,因为 BK7 的化学作用强于石英的,这也再次证实了当转速为零而压力不为零时,化学作用是使 MRR 不为零的原因。至于压力对化学作用的影响,则需要进一步实验确定。

4 快速抛光加工元件的面形和表面粗糙度

4.1 快速抛光加工元件的面形

快速抛光加工的面形可以在数小时内达到 1λ 左右($\lambda=632.8\text{ nm}$)(图 3),其对面形的修正可以通过两方面控制:1) 元件的面形主要受聚氨酯面形的影响;反过来,聚氨酯的面形可以通过元件的面形大体反映出来,因此控制聚氨酯面形是非常必要的,聚氨酯的面形可以通过聚氨酯修整盘来控制。2) 加工的工艺因素也可以影响元件的加工面形,比如压力分布,线速度分布(转速),元件中心相对于抛光盘中心的位置,元件相对抛光盘的运动方式以及抛光液的喷涂方式等等都会对元件的加工面形造成一定影响。这些影响因素将在以后的实验中继续加以研究。

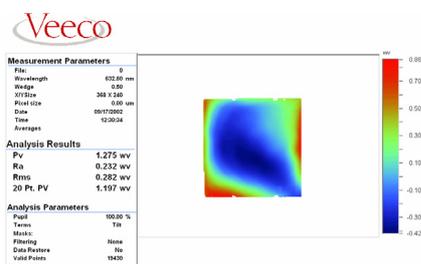


图 3 BK7 元件表面面形

Fig.3 Surface form (BK7 specimen)

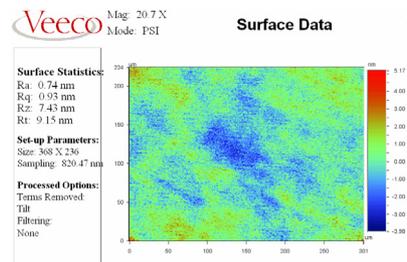


图 4 BK7 元件表面粗糙度

Fig.4 Surface roughness (BK7 specimen)

4.2 快速抛光加工元件的表面粗糙度

在粗糙度方面快速抛光也表现出色。实验使用 300 目抛光粉,得到的表面粗糙度值在 1 nm 左右(图 4),符合精密加工的要求;而且随着抛光粉循环使用时间的加长, RMS 值逐渐减小;对于 BK7 元件,在循环

使用 10 h 后 RMS 值为 1.3 nm，循环使用 30 h RMS 为 0.9 nm，而对于石英元件循环使用 10 h，粗糙度为 1.0 nm，循环使用 30 h 后，降低至 0.7 nm。粗糙度降低是因为抛光粉粒度随着抛光的进行而逐渐减小，随着抛光粉使用时间的加长，抛光粉会由于压力、化学作用等各种因素，其粒度逐渐破碎、减小(图 5、图 6)，而且由片状、棒状为主变为近似球形，这对减小 RMS 是有利的。

图 5、图 6 分别为抛光粉使用前和使用 30 小时后的 SEM 照片和粒度分析，原本颗粒大于 1 μm 且呈棒状片状的颗粒在循环使用 30 h 后，颗粒基本变成了球状，颗粒明显变小，由粒度分析结果可以明显看出，抛光粉粒径变小，同时出现了小于 1 μm 的颗粒，但其也出现了团聚，有大于 100 μm 的颗粒出现。

关于表面粗糙度和抛光粉颗粒尺度的关系，可以由机械磨削理论给出近似关系^[9-10,13]。假设抛光粉呈球形，那么表面粗糙度与抛光粉颗粒尺寸的关系可以写成

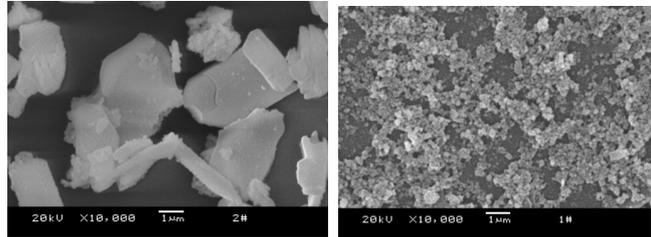


图 5 抛光粉形貌 (a)使用前; (b)使用 30 h

Fig.5 SEM images of slurry particles (a) before using (b) being used for 30-hour

$$R_a = CE_p^{2/3} P^{1/3} \frac{d}{H_w} \tag{7}$$

其中： R_a 为元件抛光后的平均表面粗糙度值， E_p 是抛光垫的杨氏模量， P 为施于元件的压力， H_w 为被抛光元件的硬度， d 是抛光粉平均粒径尺度， C 为与抛光液等有关的常数。可以看出，元件的表面粗糙度在一定程度上与抛光粉的粒径成正比，因此当随着抛光粉循环使用时间的加长，元件表面粗糙度值会逐渐减小，但其加工效率在一定范围亦会逐渐降低，而且抛光粉粒度过小，容易出现团聚，等效粒径增大^[4,14]，反而会使 RMS 值变大，而且大颗粒有可能造成元件表面的划伤，因此抛光粉不宜使用过长时间。根据(7)式，可以通过实验结果来估算 BK7 和石英玻璃的 C 值(表 2)。

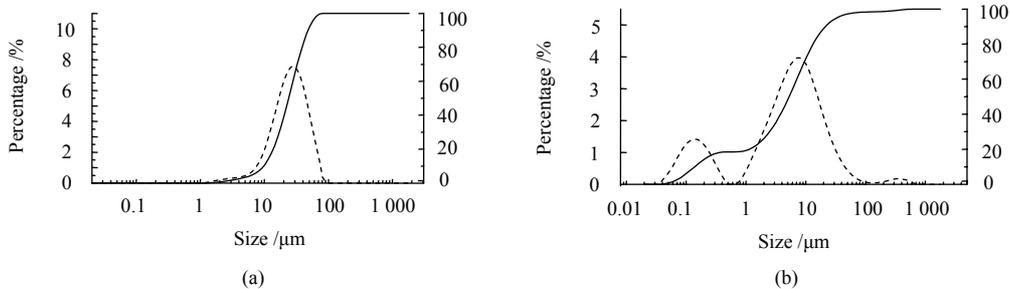


图 6 抛光粉粒度分布 (a)使用前; (b)使用 30 h

Fig.6 Distribution of particle size (a) before using (b) being used for 30-hour

表 2 中， d_{10} 、 d_{30} 和 R_{a-10} 、 R_{a-30} 以及 C_{10} 、 C_{30} 分别表示抛光粉循环使用 10 h 和 30 h 后的粒径和相应的粗糙度以及计算出的系数。由表 2 可以看出，对于石英，其粗糙度比相同条件下的 BK7 要小，这可以结合式(7)来理解，因为石英的硬度比 BK7 要大；其次可以从表中看出，无论是 BK7 还是石英，其粗糙度均随抛光粉使用时间的增加而减小，式(7)也可以来解释此现象；最后，系数 C 是变化的，与被抛光材料，抛光粉以及抛光过程有关。

表 2 BK7 和石英玻璃的 C 值估算 ($P=1.0$ kPa, $E_p=3.5$ GPa)

Table 2 Calculations of coefficients C for BK7 and fused silica ($P=1.0$ kPa, $E_p=3.5$ GPa)

	H_w /GPa	d_{10} / μm	d_{30} / μm	R_{a-10} /nm	R_{a-30} /nm	C_{10}	C_{30}
BK7	5	5	0.2	1.3	0.9	0.056	0.98
Fused silica	8	5	0.2	1.0	0.7	0.069	1.2

5 结 论

快速抛光技术是为解决平面大批量元件的快速加工而提出的,融合了精密磨削的精度控制和化学机械抛光的去除原理,利用超精密机床对大口径光学元件进行抛光。玻璃抛光的效率在一定范围内随着压力和转速的增大而增大,对于传统的沥青抛光,由于增大压力会使抛光盘的面型破坏,而提高转速又会产生大量的热量使沥青软化而导致抛光盘面型变差,从而沥青抛光的效率被限制;而快速抛光使用聚氨酯作为抛光材料,其去除效率可高达 $10\ \mu\text{m}/\text{h}$,如此高的效率可以大大缩短将元件抛光到光学表面所需的时间,快速的去除元件的表面及亚表面缺陷,使元件达到精抛的要求。快速抛光的效率亦符合 Preston 规律,其效率与施于元件的压力和元件相对于抛光盘的速率呈线性关系,随着压力及速率的增大而增大;对于不同材料,快速抛光的去除效率与元件的硬度有关,硬度愈大,去除效率愈小。快速抛光的元件表面面形可以在数小时内达到 1λ ,且表面粗糙度可以与沥青抛光相媲美,可达 $1.0\ \text{nm}$,快速抛光元件的表面粗糙度与抛光液循环使用时间有关,循环使用时间加长,抛光粉颗粒变小,加工后的元件表面粗糙度越小,但当粒度小于 $1\ \mu\text{m}$ 时,易出现团聚而划伤元件表面,因此抛光粉不宜过长时间循环使用。聚氨酯快速抛光循环使用抛光粉以及其高效性,也使得元件的加工成本大大降低。

参考文献:

- [1] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, *et al.* NIF Optical Materials and Fabrication Technologies: An Overview [J]. **SPIE**, 2004, **5341**: 84-101.
- [2] 蔡立, 耿素杰, 付秀华. 光学零件加工技术 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 112-116.
- [3] Mark J E. **Polymer Data Handbook** [M]. UK: Oxford University Press, 1999.
- [4] Cumbo M J. Chemo-mechanical Interactions in Optical Polishing [D]. New York: University of Rochester, 1993.
- [5] Tesar A A, Fuchs B A. Removal Rates of Fused Silica with Cerium Oxide/Pitch Polishing [J]. **SPIE**, 1992, **1531**: 80-90.
- [6] Berggren R R, Schmell R A. Pad Polishing for Rapid Production of Large Flats [J]. **SPIE**, 1997, **3134**: 252-257.
- [7] Horne D F. **Optical Production Technology, Second Edition** [M]. London: Adam Hilger Ltd, 1983: 6-7.
- [8] 查立豫. 光学材料与辅料 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 143-152.
- [9] Marinescu I D. **Handbook of Advanced Ceramics Machining** [M]. CRC Press: Taylor & Francis Group, 2007: 11-12.
- [10] Fischer-Cripps A C. **Introduction to Contact Mechanics, Second Edition** [M]. New York: Springer, 2007: 216-217.
- [11] 土桥正二. 玻璃的表面物理化学 [M]. 黄占杰, 松野静代, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 60-63, 166-211.
- [12] Zhao Bin, Shi F G. Threshold pressure and its influence in chemical mechanical polishing for IC fabrication [J]. **IEEE**, 1998, **IEDM-98**: 341-344.
- [13] Luo Jianfeng, Dornfeld D A. Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling [J]. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, 2001, **14**(2): 112-133.
- [14] Cumbo M J, Fairhurst D, Jacobs S D, *et al.* Slurry particle size evolution during the polishing of optical glass [J]. **Applied Optics**, 1995, **34**(19): 3743-3755.
- [15] Bower D I. **An Introduction to Polymer Physics** [M]. UK: Cambridge University Press, 2002: 162-164.

本期组稿: 陈伟明

责任编辑: 谢小平

英文编辑: 庞洪

标引: 曹强