

抛光粉颗粒度对高功率激光玻璃材料抛光效率和粗糙度的影响

张宝安 包 蕾 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 磷酸盐钕玻璃、熔石英和 BK7 是 3 类用于激光惯性约束聚变(ICF)装置主要光学元件材料。实验中采用不同平均粒径的氧化铈抛光粉对上述 3 类材料分别进行抛光,对特定材料抛光去除量和抛光粉平均粒径的关系进行了研究。实验表明:由于材料的物理和化学特性不同,特定的材料需选用相应平均粒径大小的抛光粉才能达到最佳的抛光效率。实验还就上述 3 类高功率激光玻璃材料抛光中各个阶段的抛光粗糙度与抛光粉平均粒径的关系进行了研究,结果表明:某一规格抛光粉的粒径对不同特性材料抛光后的表面粗糙度影响表征情况不同。

关键词 高功率; 激光玻璃; 光学加工; 抛光粉

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.1905

Influence of Slurry Particle Size on Materials Removal Rate and Roughness in High Power Laser Glass Material Polishing

Zhang Baoan Bao Lei Zhu Jianqiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Machinics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Nd-doped phosphate glass, quartz and BK7 are the main optical material used in laser inertial confinement fusion(ICF)equipment. In Experiment, these three type glass were separately polished used polishing slurry with different average particle size. The relation of material removal rate and average particle size was studied. Experiment indicates that special glass, for its typical physical and chemical property, need corresponding average particle size of polishing slurry to get optimal polishing material removal rate. The influence on roughness of different slurry particle size for these three type glass is studied in experiment. Experiment data shows that the influences on roughness caused by slurry particle size are different for different glasses.

Key words high power; laser glass; optical manufacture; polishing slurry

1 引 言

磷酸盐钕玻璃、熔石英和 BK7 是激光惯性约束聚变(ICF)装置中用的最多的光学材料,其中磷酸盐钕玻璃是激光的增益介质, BK7 和熔石英用于空间滤波聚焦透镜和各类反射镜,这里统称为高功率激光玻璃材料^[1~3]。由于这类光学元件运行于高功率的激光光束中,其表面粗糙度越大则元件的激光损伤阈值就越小^[4],从而其表面加工质量成为影响

装置经济性的重要指标,因此在 ICF 装置对这类光学元件抛光的粗糙度指标要求都非常高。近年来,随着国内外各大高功率激光装置发展的驱动,对这类强激光光学元件加工的需求量愈来愈大,这就需要从事光学加工的人员能够在满足指标和保证效率方面寻求一个平衡。抛光粉的颗粒度选择是影响玻璃材料抛光效率和表面质量的重要方面,国外对此也开展了比较深入的理论研究和实验论证工作^[5~8]。

收稿日期: 2008-10-14; 收到修改稿日期: 2008-11-21

作者简介: 张宝安(1977—),男,博士研究生,主要从事激光玻璃的精密加工和先进光学测试技术方向的研究。

E-mail: zhangbaoan@sohu.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、强激光光学元件精密加工与检测技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

抛光剂在强激光玻璃材料的抛光过程是介于抛光盘和工件之间一层流动介质,其中的抛光颗粒在抛光盘负荷的积压下通过对工件加工面相对滑动刮擦实现对被加工件的材料去除和实现“平坦化”的镜面。抛光剂的成分,浓度,颗粒度大小、分布、和添加剂等对抛光的效率和抛光的粗糙度有影响^[9~11]。

本文就 3 类高功率激光玻璃材料抛光中抛光剂中的抛光粉颗粒度对抛光效率和抛光粗糙度的影响进行了深入研究。采用不同平均粒径的氧化铈抛光粉配成的抛光剂分别对磷酸盐钕玻璃、熔石英和 BK7 3 类激光材料的抛光过程进行了实验。通过实验表明:不同的激光玻璃材料由于硬度不同,应选择适宜的抛光粉颗粒度才能在达到一定的抛光效率的同时获得最佳的抛光粗糙度。实验也为抛光上述激光玻璃材料时选择抛光粉的规格提供了工艺指导。

2 强激光玻璃材料的抛光实验

实验工件分别选用了石英玻璃、BK7 和国产 N31 型磷酸盐钕玻璃 3 类激光玻璃材料作为基片。基片的外径 $\Phi 40$ mm,初始厚度 8 mm。所有的基片在同样的工艺条件下,用 W14 金刚砂精磨表面。抛光去除率是通过精度为 1 mg 的电子天平称其重量去除率 ΔW ,最终转化为厚度去除率 Δd ,两者的关系为:
$$\Delta d = \frac{4\Delta W}{\pi\phi^2\rho}。$$

其中 ρ 为材料的密度, ϕ 为工件直径。抛光机床为四轴抛光机,抛光压力、转速和摆速可调。采用分轴均匀滴液的方式添加抛光剂,因此可以在一台机床上同时完成一种材料采用不同颗粒度抛光剂的实验。实验条件如下:主轴转速:50 revolution/min,摆速:30 revolution/min,抛光压力:9363 Pa,环境温度:21±0.5 °C,相对湿度:65±2%RH。实验选用了 4 种不同规格的稀土抛光粉与纯水配置成抛光剂,配比质量浓度 100 g/L。4 种型号抛光粉的氧化铈含量、平均粒径和最大粒径见表 1。图 1 给出了实验用的几种抛光粉的电镜形貌图和粒径分布图。

表 1 实验用稀土抛光粉

Table 1 Polishing powder used in experiment

Product mark	CeO ₂ content	Average particle size D50 / μm	Largest particle size D100 / μm
R1308	>99	0.7~0.9	<2.89
R1318	>99	1.6~2.0	<10
R1326	>99	2.2~3.0	<12
R115	>99	14~18	<43.67

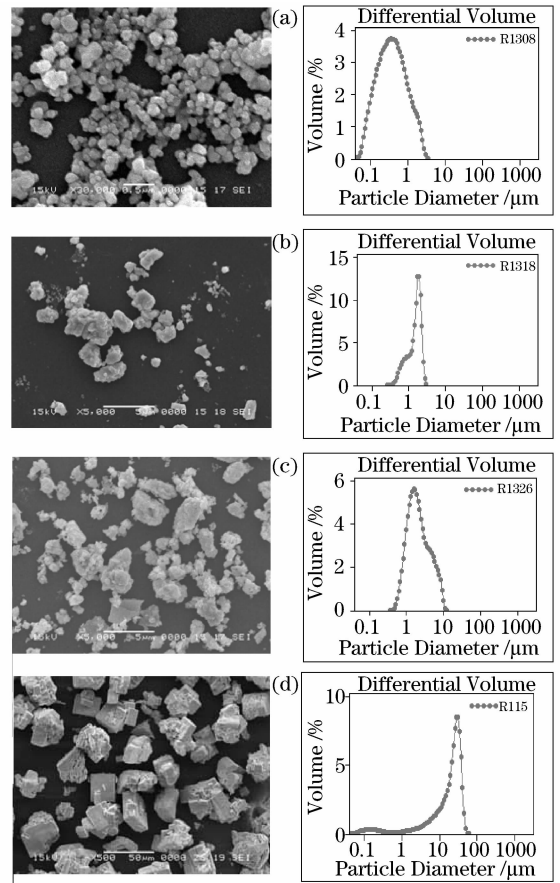


图 1 实验用抛光粉形貌和粒径分布(a) R1308 抛光粉形貌和粒径分布 (b) R1318 抛光粉形貌和粒径分布 (c) R1326 抛光粉形貌和粒径分布 (d) R115 抛光粉形貌和粒径分布

Fig. 1 The microstructure and particle distribution of polishing powder used in experiment (a) R1308 powder shape and distribution of particle size (b) R1318 powder shape and distribution of particle size (c) R1326 powder shape and distribution of particle (d) R115 Powder shape and distribution of particle size

在上述实验条件下,分别对石英玻璃、BK7 玻璃和国产 N31 型钕玻璃基片进行抛光。实验中每隔 0.5 h 下盘测试工件的材料抛除量和表面粗糙度。

实验结果如下:石英玻璃各个阶段的抛光去除量和表面粗糙度分别如表 2、图 2 和表 3、图 3 所示;BK7 玻璃各个阶段的抛光去除量和表面粗糙度分别如表 4、图 4 和表 5、图 5 所示;N31 型钕玻璃各个阶段的抛光去除量和表面粗糙度分别如表 6、图 6 和表 7、图 7 所示。

表 2 不同平均粒径抛光粉抛光石英玻璃去除量

Table 2 Material removal quantity of quartz in different slurry particles size

Polishing slurry	Material removal quantity /g				
	0 h	0.5 h	1.5 h	2.5 h	3.5 h
R1308	0	0.002	0.004	0.004	0.004
R1318	0	0.002	0.004	0.004	0.005
R1326	0	0.002	0.004	0.004	0.004
R115	0	0.002	0.003	0.004	0.004

表 3 不同平均粒径抛光粉抛光石英玻璃过程中粗糙度的变化情况

Table 3 The roughness with different slurry particle size in quartz polishing

Polishing slurry	Roughness RMS /nm				
	0 h	0.5 h	1.5 h	2.5 h	3.5 h
R1308	230	2.296	0.734	0.500	0.397
R1318	230	1.978	0.635	0.455	0.507
R1326	230	2.776	1.042	0.715	0.608
R115	230	34.363	1.907	1.495	0.936

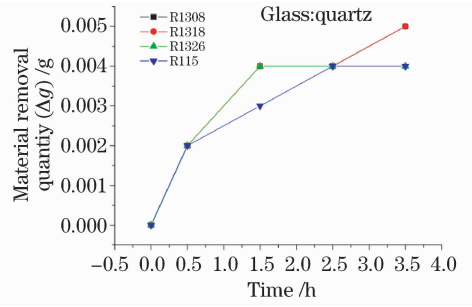


图 2 不同平均粒径抛光粉抛光石英玻璃的材料去除率
Fig. 2 Material removal rate of quartz in different slurry particles size

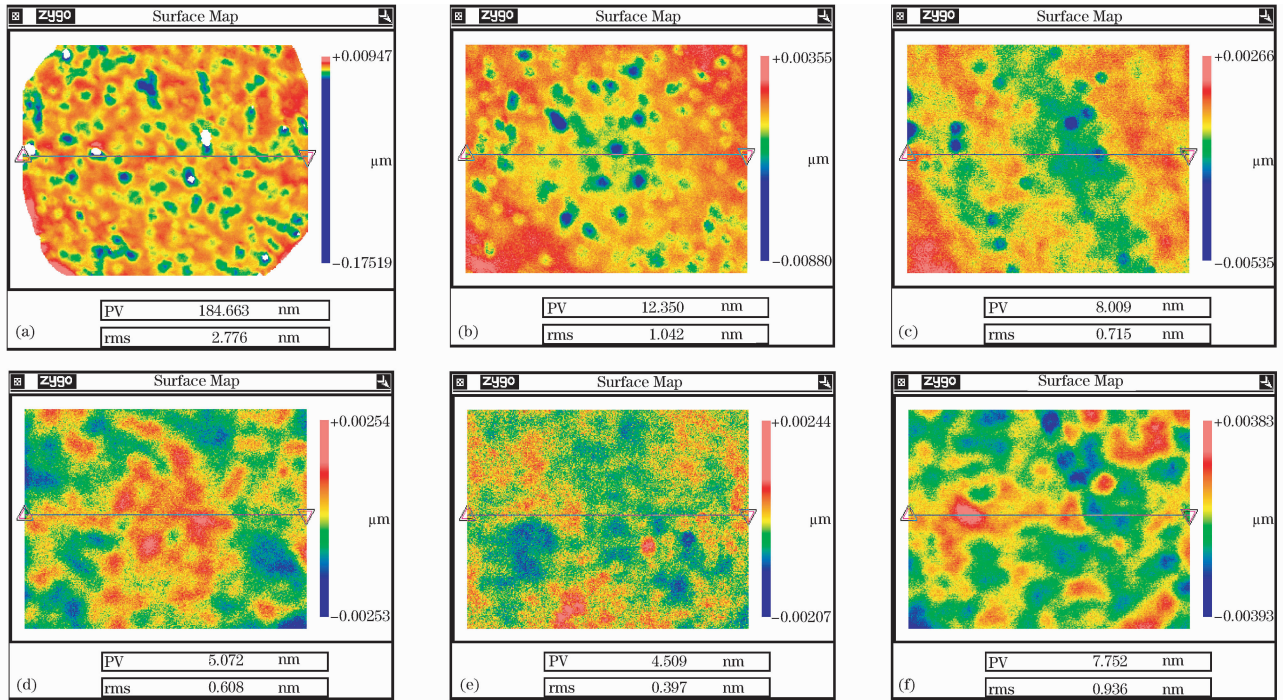


图 3 不同平均粒径抛光粉抛光石英玻璃后的表面粗糙度(a) 石英玻璃 R1326 抛光 0.5 h (b) 石英玻璃 R1326 抛光 1.5 h (c) 石英玻璃 R1326 抛光 2.5 h (d) 石英玻璃 R1326 抛光 3.5 h (e) 石英玻璃 R1308 抛光 3.5 h (f) 石英玻璃 R115 抛光 3.5 h 后

Fig. 3 The surface roughness of polished quartz with different slurry particle size in different period (a) quartz polishing 0.5 h with R1326 (b) quartz polishing 1.5 h with R1326 (c) quartz polishing 2.5 h with R1326 (d) quartz polishing 3.5 h with R1326 (e) quartz polishing 3.5 h with R1308 (f) quartz polishing 3.5 h with R115

表 4 不同平均粒径抛光粉抛光 BK7 玻璃去除量

Table 4 Material removal quantity of BK7 in different slurry particles size

Polishing slurry	Material removal quantity /g				
	0 h	0.5 h	1.5 h	2.5 h	3.5 h
R1308	0	0.006	0.012	0.010	0.010
R1318	0	0.007	0.014	0.014	0.013
R1326	0	0.006	0.010	0.011	0.010
R115	0	0.005	0.007	0.002	0.002

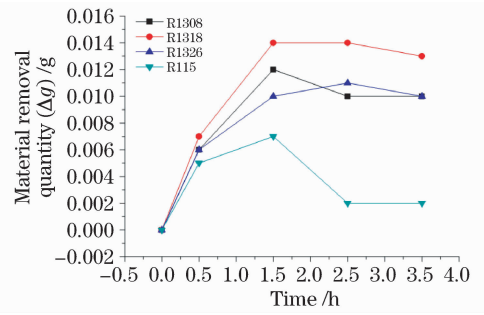


图 4 不同平均粒径抛光粉抛光 BK7 玻璃的材料去除率
Fig. 4 Material removal rate of BK7 in different slurry particles size

表 5 不同平均粒径抛光粉抛光 BK7 玻璃过程中粗糙度的变化情况

Table 5 The roughness with different slurry particle size in BK7 polishing

Polishing slurry	Roughness RMS /nm				
	0 h	0.5 h	1.5 h	2.5 h	3.5 h
R1308	350	1.106	0.530	0.492	0.403
R1318	350	1.034	0.774	0.591	0.436
R1326	350	1.230	0.752	0.553	0.544
R115	350	4.786	2.746	1.561	1.309

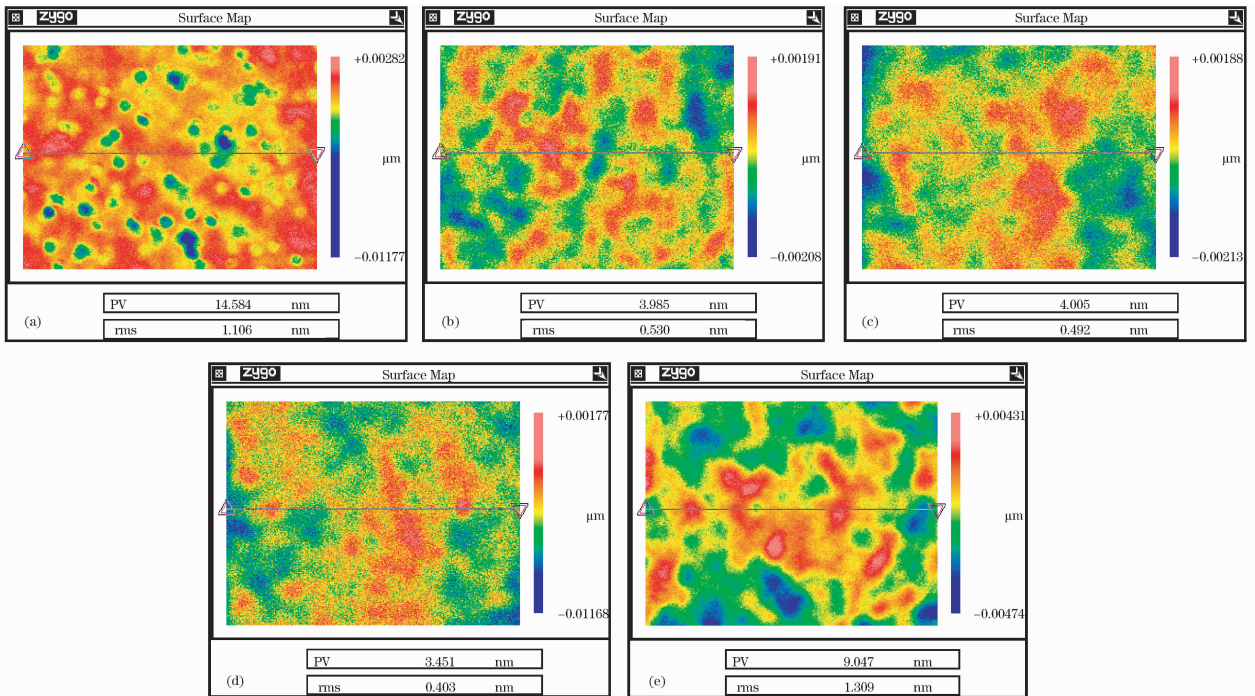


图 5 不同平均粒径抛光粉抛光 BK7 在不同抛光阶段的玻璃表面粗糙度 (a) BK7 玻璃 R1308 抛光 0.5 h (b) BK7 玻璃 R1308 抛光 1.5 h (c) BK7 玻璃 R1308 抛光 2.5 h (d) BK7 玻璃 R1308 抛光 3.5 h (e) BK7 玻璃 R115 抛光 3.5 h 面粗糙度

Fig. 5 The surface roughness of polished BK7 with different slurry particle size in different period (a) BK7 polishing 0.5 h with R1308 (b) BK7 polishing 1.5 h with R1308 (c) BK7 polishing 2.5 h with R1308 (d) BK7 polishing 3.5 h with R1308 (e) BK7 polishing 3.5 h with R115

表 6 不同平均粒径抛光粉抛光 N31 玻璃去除量
 Table 6 Polishing removal quantity of N31 in different slurry

Polishing slurry	Material removal quantity /g				
	0 h	0.5 h	1.5 h	2.5 h	3.5 h
R1308	0	0.006	0.021	0.019	0.022
R1318	0	0.006	0.019	0.020	0.021
R1326	0	0.009	0.022	0.023	0.025
R115	0	0.007	0.015	0.014	0.010

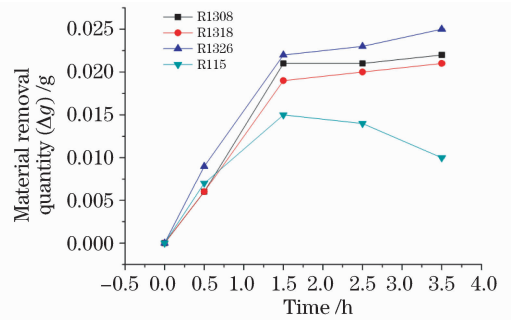


图 6 不同平均粒径抛光粉抛光 N31 玻璃的材料去除率
 Fig. 6 Material removal rate of N31 in different slurry particles size

表 7 不同平均粒径抛光粉抛光 N31 磷酸盐钹玻璃过程中粗糙度的变化情况
 Table 1 The roughness with differen slurry particle size in N31 polishing

Polishing slurry	Roughness RMS /nm				
	0 h	0.5 h	1.5 h	2.5 h	3.5 h
R1308	530	0.851	0.679	0.628	0.460
R1318	550	0.873	0.763	0.501	0.511
R1326	530	0.792	0.683	0.669	0.625
R115	530	3.640	2.154	1.520	1.003

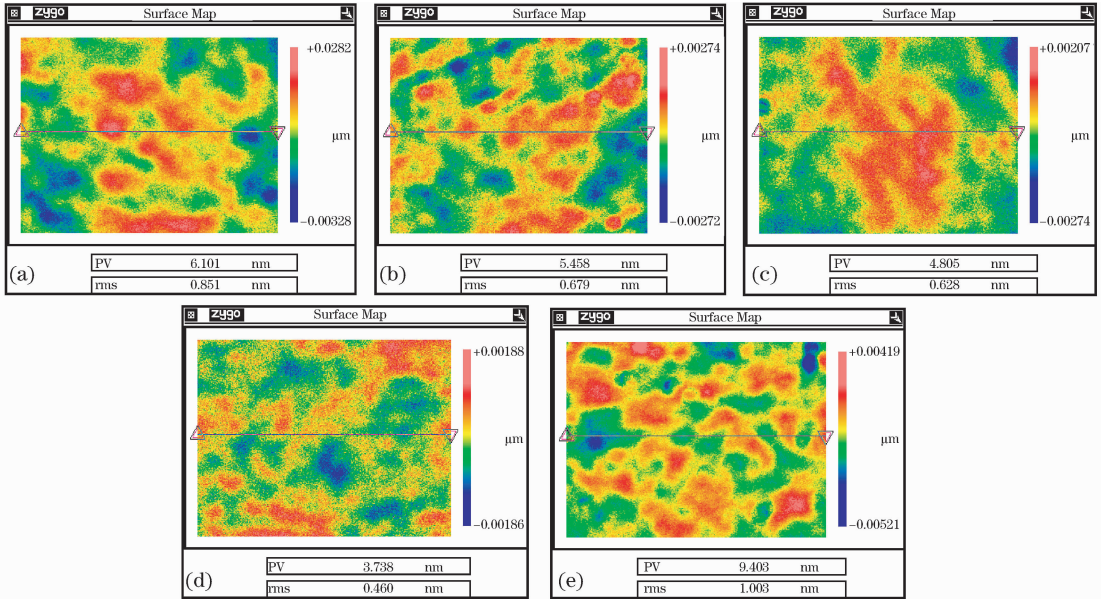


图 7 不同平均粒径抛光粉抛光 N31 玻璃后的表面粗糙度 (a) N31 玻璃 R1308 抛光 0.5 h (b) BK7 玻璃 R1308 抛光 1.5 h (c) N31 玻璃 R1308 抛光 2.5 h (d) N31 玻璃 R1308 抛光 3.5 h (e) N31 玻璃 R1308 抛光 3.5 h

Fig. 7 The surface roughness of polished N31 with different slurry particle size in different period (a) N31 polishing 0.5 h with R1308 (b) BK7 polishing 1.5 h with R1308 (c) N31 polishing 2.5 h with R1308 (d) N31 polishing 3.5 h with R1308 (e) N31 polishing 3.5 h with R1308

3 实验结果分析和讨论

3.1 抛光粉的粒径和抛光效率

对与特定的强激光光学玻璃材料，在抛光的初

始阶段，抛光剂中抛光粉的平均粒径在一定范围内对抛光效率的影响不明显。但是，当抛光一段时间后(2.5 h)，平均粒径较大的抛光剂的抛光效率会减

低较为明显,如图 2、图 4 和图 6 所示。这是因为,抛光的初始阶段在一定的抛光压力下,即使是粗一些的抛光颗粒也迅速的被研磨和压碎成较细的抛光颗粒,抛光的效率主要由这些细颗粒的成分、形状和坚韧程度来决定,同一种材料和制备方式的抛光粉,其差异不大^[12]。在抛光进行一段时间后抛光粉的粒径分布趋于更加均匀和保持一定的抗压性后达到最佳的抛光效率,在文献[13]中有所论述。平均颗粒度大的抛光粉抛光 2.5 h 后都表现出不同程度的抛光效率下降是由于抛光粉颗粒被压碎后仍有部分的大颗粒存在使得工件与抛光粉贴合的有效面积减少,降低了抛光粉作用工件表面的几率所造成。

对某一种玻璃材料由其本身的机械物理特性决定了对其抛光效率最好的平均粒径,如对于 BK7 玻璃,R1318 型抛光粉达到了最佳抛光效率,而 N31 玻璃则更适合用 R1326 型抛光粉来抛,如图 5 和图 7 所示,这与 Jianfeng Luo 在文献[9]中的理论分析有所差别,这是因为该理论并未将抛光粉和基体材料的相对硬度考虑在内,而实际情况则不同。由于石英玻璃硬度最大,在抛光压力较大的情况下,更容易将抛光粉很短时间内磨细,所体现由于平均粒径不同引起的抛光效率的不同并不明显,如图 2 所示。

从实验中可以看出:用同一种规格的抛光粉,相同浓度下配置的抛光剂在同等条件下进行抛光,摩氏硬度越大的玻璃材料,单位时间的磨损率也越小,这符合一般的认识(实验中 3 类种材料的摩氏硬度从大到小依次是石英、BK7 和 N31 钹玻璃)。3 类强激光玻璃材料,同用 R1326 型抛光粉进行抛光的抛光效率比较如图 8 所示。

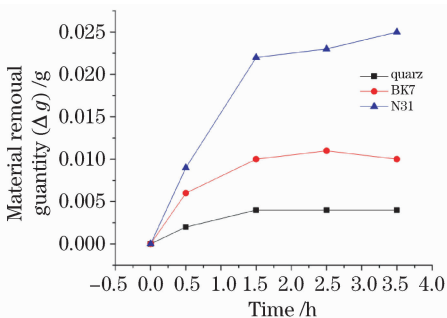


图 8 R1326 型抛光粉抛光 3 类不同强激光玻璃的材料去除量比较

Fig. 8 Material removal rate of different glass with R1326 polishing slurry

3.2 抛光粉的粒径和抛光表面粗糙度

虽然 3 类材料均表现出平均粒径越大的抛光粉,抛光后的的表面粗糙度越大,但是同一规格的抛

光粉对不同材料抛光后的粗糙度的表征却不同。具体的:从图 3、图 5 和图 8 可以看出,采用某种抛光粉抛光特定的材料都是一个慢慢“光滑”的过程,但是由于不材料的物理、机械和化学特性不同,其到达“光滑”的时间不同。硬度大的玻璃(石英)到达光滑的时间较硬度软的玻璃到达光滑的时间要长,如图 3(b)所示,抛光 1.5 h 后,石英玻璃表面仍有明显的“砂眼”,而抛光 0.5 h 后,N31 型磷酸盐玻璃则已经很光滑,粗糙度均方根达到 0.851 nm,如图 7(a)所示。这从玻璃的机械化学抛光理论来分析是由于硬度小和化学稳定性差的玻璃材料更容易在短时间内被有一定磨削能力的抛光剂作用下形成“凝胶层”覆盖掉较深的“砂眼”使得表面变的光滑,而硬度大和化学稳定好的玻璃不容易在短时间内被磨平和形成“凝胶层”。

从图 3(e),(f),图 5(d),(e)和图 7(d),(e)的对比,看出用平均粒径小的抛光粉和平均粒径大的抛光粉抛光特定的材料 3.5 h 后表面形貌的差别,图 3(e)、图 5(d)和图 7(d)中表面致密,无大尺度(10 μm 以上)的斑状形貌分布,而图 3(f)、图 5(e)和图 7(e)中有明显的大尺度斑状分布,这些大尺度的斑状形状是未被磨碎的大颗粒在抛光的玻璃表面先压出一个大坑而有不能被有效的掩盖而形成,这样的尺度相貌还会对短波长的激光形成衍射和调制作用,对激光传输极为不利。如果要求在保持一定的抛光效率情况下达到规定的粗糙度要求,就要根据不同的玻璃材质选取不同的颗粒度大小的抛光粉或者抛光粉组合来进行抛光。

4 结 论

在高功率激光玻璃材料抛光过程中,合理地选择抛光粉规格和平均粒径,不仅影响抛光效率而且影响抛光的表面粗糙度。不同玻璃材料采用同等规格抛光粉,达到“光滑”程度的时间不同。在实际加工中应根据所抛光的材料选择合适粒径的抛光粉,才能在提高效率的同时提高抛光表面质量。

参 考 文 献

- 1 J. H. Campbell, R. A. Hawley-Fedder, C. J. Stolz *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: An overview[C]. *SPIE*, 2004, **5341**:81~101
- 2 Jiang Zhonghong. ICF Laser Glasses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1265~1276
- 3 姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1265~1276
- 3 Liu Hongjie, Liu Lanqin, Su Jingqin *et al.*. Lens design based on

ghost image and aberration analysis in high-power laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 976~980

刘红婕, 刘兰琴, 栗敬钦 等. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 976~980

4 W. Howard Lowdermilk, David Milam. Laser-Induced Surface and Coating Damage[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, **QE-17**(9):1988~1903

5 H. Carchnov. *Flat Glass Grinding and Polishing Technology* [M]. Mao Wenjie, Yang Yingfang Transl. Beijing: China Industry Press, 1965. 84~225

H. 卡恰洛夫. 平板玻璃研磨抛光工艺学[M]. 毛文杰 杨映芳译. 北京: 中国工业出版社, 1965. 84~225

6 M. J. Cumbo, D. Fairhurs, S. D. Jacobs *et al.*. Slurry particle size evolution during the polishing of optical glass[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(19): 3743~3755

7 C. Wang, P. Sherman, A. Chandra *et al.*. Pad surface roughness and slurry particle size distribution effects on material removal rate in chemical mechanical planarization [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2005, **54**(1): 309~312

8 G. Bahar Basim, Brij M. Moudgil. Effect of soft agglomerates on CMP slurry performance[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, **256**:137~142

9 Y. Xie, B. Bhushan. Effects of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing[J]. *Wear*, 1996, **200**: 281~295

10 C. J. Evansa, E. Paulb, D. Dornfeldc *et al.*. Material removal mechanisms in lapping and polishing [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, **52**(2):611~633

11 Jianfeng Luo, David A. Dornfeld. Effects of abrasive size distribution in chemical mechanical planarization: modeling and verification [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2003, **16**(3): 469~476

12 Zheng Wucheng. The relationship of physics-chemics characteristic and polishing ability for rareearths polishing powder [J]. *Journal of RareEarths*, 1981, (01):46~55

郑武成. 稀土抛光粉的物化性能与抛光能力之间的关系[J]. *稀土*, 1981, (01):46~55

13 Han Jinghua, Yang Liming, Liu Mincai *et al.*. Parameter change law of polishing power and its influence on the polishing effect during the optical manufacture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):196~199

韩敬华, 杨李铭, 刘民才 等. 光学加工过程中抛光粉参量的变化规律及其抛光效果的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(Suppl.): 196~199

更 正

《光学学报》2009 年 29 卷 5 期中文目次 1328 页,经核实有误,需按如下修改。

• 医用光学与生物技术 •

癌细胞细胞周期自体荧光光谱特征 林晓钢 潘英俊 郭永彩 1328

特此声明更改。

《光学学报》编辑部

2009-07-05