

文章编号 1004-924X(2011)06-1256-09

提高玻璃表面强度的材料去除模式

陈晓苹^{1,2}, 谢京江^{1*}, 宋淑梅¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林, 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京)

摘要: 为了增强玻璃质材料的表面强度, 研究了表面强度变化的主要工艺阶段, 根据所得表面强度值绘出了工艺变化曲线。分析了表面强度降低的主要原因, 提出了相应的解决办法。阐述了用腐蚀法去除应力集中及最大压应力增强玻璃表面强度的理论, 并分析了不同去除模式对脆性材料表面强度的影响。最后, 介绍了柔性研磨方式, 给出柔性研磨方式的工艺控制条件。总结出不同非成像表面相应粗糙度基本要求, 并提出了相应的加工工艺办法。实验结果表明, 应用去除速率 $\leq 25 \mu\text{m}/\text{h}$ 及磨料粒度 $\leq 15 \mu\text{m}$ 的柔性研磨可以得到类似抛光的表面。柔性研磨方式使表面最大压应力增大, 并能够避免危害表面强质的纵向显微裂纹产生, 从而提高玻璃的表面强度。

关键词: 玻璃质材料; 表面强度; 柔性研磨; 表面最大压应力; 表面破坏层; 非成像表面粗糙度

中图分类号: TQ171.684 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1256

Material removal modes in strengthening glass surfaces

CHEN Xiao-ping^{1,2}, XIE Jing-jiang^{1*}, SONG Shu-mei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: jjxie@ciomp.ac.cn*

Abstract: This paper studied how to improve the glass surface strength. The manufacture process in which the surface strength of glass changes was explored. According to the values of surface strength variation and the strength curves under different grinding processes, the reasons that the surface strength decreased and the related measures were given. Then, the etching method for releasing stress concentration and the max surface compressive stress strengthening theory were described, and the effects of different material removal modes on the surface strength of brittle materials were analyzed. A ductile grinding mode was introduced and its main manufacture requirements were given. The roughness ranges for different non-imaging surfaces were summarized, and corresponding solutions were advanced. The experiments show that as the material removal rate is set to be less than or equal to $25 \mu\text{m}/\text{h}$ and the abrasive size less than or equal to $15 \mu\text{m}$, the polishing-similar surface will be achieved for several materials. The ductile grinding can induce an increase of the max surface compressive stress.

收稿日期: 2010-09-03; 修订日期: 2010-09-24.

基金项目: 国防预研基金资助项目 (No. 050A1SJ060)

sive stress and avoid longitudinal micro-cracks which reduce the glass surface strength, so it is a reasonable grinding mode for glass surface strength improvement.

Key words: glass material; surface strength; ductile grinding; max surface compressive stress; surface destroy layer; non-imaging surface roughness

1 引言

光学玻璃是最常用的光学材料,在光学领域应用极为广泛,尤其在制造光学仪器的精密光学元件方面应用甚多。光学玻璃是一种硬脆材料,硬度及脆性都很高,透明性好,在航空航天、天文、军事、光学的相关领域发挥着十分重要的作用,如空间天文仪器中的反射镜,高分辨率相机等。在这些应用中涉及的成像质量、使用寿命以及制造或发射成本等因素,对光学元件的加工精度和表面质量提出了非常高的要求,包括面形精度、表面光洁度、工作寿命、工作性能稳定性等,而它的工作寿命和工作性能稳定性,取决于光学元件的表面强度。因此,进行玻璃表面强度的系统性研究不仅可以有效地解决光学元件在加工及应用上遇到的一些问题,同时可以提高光学仪器的综合性能,对光学仪器的发展和应用具有重要的意义。目前与表面强度提高相关的研究,主要有针对抛光工艺的磁流变技术研究^[1-2];针对特定材料的表面改性研究,如碳化硅表面改性^[3]技术;针对化学机械结合作用对材料的分子去除^[4]等,但是针对表面研磨工艺的系统研究仍显不足。

玻璃质材料的特点是脆性很高,断裂韧性低,材料的弹性极限和强度非常接近。其加工过程既不同于高脆性材料(金刚石)的纯断裂过程,又不同于金属材料的塑性剪切过程,而且在材料加工过程中,表现出了较典型的与其加工工艺方式有关的表面强度变化。玻璃的高强度特性需应用较高强度的材料去除成形工艺,才能得到所需面形,如固着磨料铣磨、散粒磨料粗磨等,这类加工工艺在脆性材料表面会形成复杂的表面破坏层,产生纵向生长趋势的显微裂纹,生成应力的空间和时间效应^[5],造成显微裂纹尖端应力集中现象^[6-7],进而严重降低光学元件的表面强度。如不彻底去除纵向生长趋势的显微裂纹,就会给光学元

件的应用留下隐患。本文通过研究表面强度变化的研磨工艺,分析了导致表面强度降低的主要因素,提出相应的解决办法。进行了提高表面强度的理论分析,从工艺角度寻求办法,做了有关脆性研磨及柔性研磨的对比实验,得到了理想的结果。

2 表面强度

2.1 玻璃表面强度的基本定义

玻璃表面强度是指玻璃质材料表面抵抗破坏或失效的能力。当材料所承受的载荷超过弹性极限时就会发生断裂破坏,在已加工表面形成裂纹和凹坑,此时在外力与环境介质作用下极易发生裂纹扩展,从而严重影响表面质量和性能。当玻璃表面强度提高,其断裂强度值就会增大,拉开与弹性极限差距,从而可以承受更高的载荷,在加工表面形成较小的破坏层。

2.2 玻璃表面强度降低的主要原因

影响玻璃表面强度的因素很多:如存放环境(温度、湿度、气氛等)、存放的时间、样品尺寸、表面微裂纹、表面加工工艺、加载速度、机械划伤以及内部不均匀性(气泡、结石)等,其中表面纵向显微裂纹的存在对玻璃表面强度影响最大,这一缺陷主要是由表面加工工艺造成的。表1列出了不同工艺状态下的表面强度变化实验数据^[8],根据此表列出的数据绘制的表面强度在工艺加工过程中的变化趋势曲线,如图1。

表1 玻璃表面强度

Tab.1 Glass surface strength

表面加工情况	抗弯情况/MPa
未加工	66.0
粗磨后	47.0
细磨后	76.0
抛光后	84.5
HF酸处理后细磨	117.8

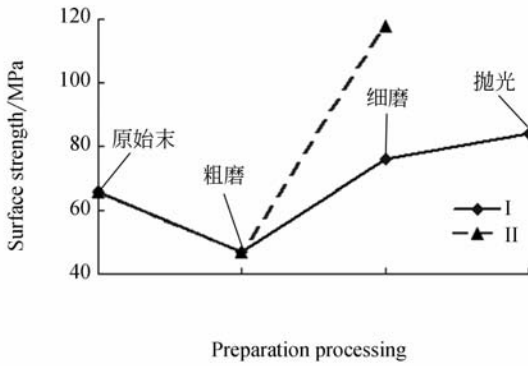
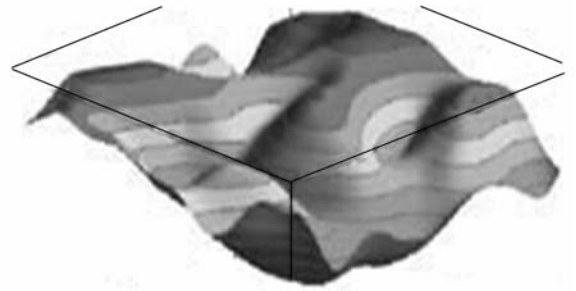


图 1 表面强度变化曲线

Fig.1 Variation of surface strength



(b) 腐蚀后的微裂纹

(b) Etched micro-cracks

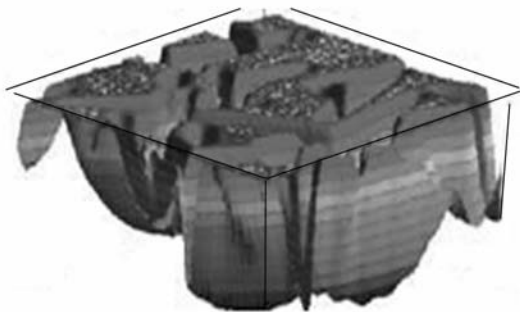
图 2 3D 仿真模型

Fig.2 3D simulation model

从图 1 可以看到,表面强度迅速下降现象发生于固着磨料铣磨成形或粗磨(粒度 $>100\ \mu\text{m}$)成形工艺。显微镜观察显示,此时形成的表面较粗糙,其波峰与波谷均具有一定锐性,形成了不透明的与玻璃本体完全不同的表面层,定义其为失效层。此失效层下为破坏层,包含有纵向显微裂纹,并存在微裂纹尖端应力集中现象。可以认为表面失效层与微裂纹尖端应力集中共同造成了玻璃表面强度的迅速下降。

2.3 HF 酸腐蚀法去除表面失效层及解除裂纹尖端应力集中

应用 HF 酸腐蚀法处理铣磨或粗磨后的初成形表面,可以去除失效层,解除微裂纹尖端的应力集中现象。通过表 1 中的数据及图 1 中曲线 II 可以看到腐蚀法对表面强度的改变;而图 2 用 3D 模型表现粗磨后和酸蚀后的玻璃表面^[4],可以看到波峰-波谷(PV)形貌的改变。未腐蚀前的微裂纹图 2(a)具有尖端锐性,彼此互不连接,空间分布相隔断;腐蚀后的微裂纹图 2(b)尖端锐性消失,裂纹彼此相交及联合,PV 减小,应力得到释放。



(a) 未腐蚀的微裂纹

(a) Un-etched micro-cracks

2.4 玻璃表面强度提高的主要原因

如图 1 所示,玻璃表面强度的提高主要发生在研磨工艺过程。研磨参数如磨盘压力、磨盘强度、相对转速、磨料粒度、研磨剂等均在不同研磨阶段对表面强度起着重要的作用。但研磨阶段产生的表面压应力却是提高表面强度的主要原因。

2.4.1 玻璃表面压应力的产生

1905 年, Twyman^[9-10] 描述了研磨后的玻璃表面压应力状态的形成过程,随后 Preston^[11] 将这一发现进一步证实并命名为 Twyman 效应。Twyman 这样描述其观点:“对于一块薄玻璃,两面都经过散粒磨料研磨,如果现在将一面抛光,则此抛光面内应力消失,玻璃呈弓形;再将另一面抛光,玻璃两表面恢复平行状态,此时应力完全消失。”而且在一定条件下,表面压应力会使玻璃表面分子结构发生永久变形^[12]。

Dalladay^[13] 和 Preston 则分别做过关于研磨过程中的表面压应力形成的实验。Dalladay 选择抛光过的硬质冕玻璃(厚度为 3.25 mm),分别使用 SiC(400 和 150 μm)、 Al_2O_3 (110 μm)、naxos 金刚砂(15~50 μm)研磨其中一面,发现玻璃出现了类似延展式的纯弯曲现象。研磨一面形成凸面,处于压应力状态,并认为这种表面残余压应力是由于研磨后表面的整体挤压状态所致。Preston 得出存在表面压应力结论,并提出表面压应力的形成就是由于表面微裂纹尖端的显微生长及玻璃的微小破碎方式导致的,研磨表面破坏层底部包含着向内生长的纵向显微裂纹。

以上实验尽管都是以薄玻璃作为实验对象,并以研究 Twyman 常数为最终的目的,但其实验

过程及实验结果却都证明了表面压应力的产生。本文通过实际加工检测及力学理论分析后认为,对于材料脆性去除方式,磨料与玻璃直接作用力会产生两个分力:水平分力 F_k 可去除玻璃表面材料,而纵向分力 F_n 会向玻璃内部延伸并破坏分子间微观稳定结构,形成显微裂纹层。此时在极微小区域内,玻璃具有微观塑性,即玻璃的局部塑性会增大分子间的结合力来抵抗此破坏力,因而产生了表面压应力。

2.4.2 表面最大压应力与磨料粒度、表面强度的关系

根据 Twyman 效应,研磨过程中伴随着表面压应力的产生,存在相应深度的压应力层。此表面压应力与研磨过程参数如磨盘压力、磨盘强度、磨料粒度、研磨剂及相对转速等有着不同程度的关联。本文所述的研究采用 Twyman 假设,即不考虑磨盘压力及相对转速对表面压应力值的影响,而着重于磨盘强度、磨料粒度及研磨速度对玻璃表面强度影响的研究。

图 3 为 Podzimek^[14]得出的最大压应力及应力层深度分别和磨料粒度 L 间的比例曲线图,公式(1)是最大压应力定义公式。

$$\sigma_0 = p_0 / d_s, \quad (1)$$

式中 σ_0 为最大表面压应力, d_s 为理论应力层深度, p_0 为表面残余压应力。

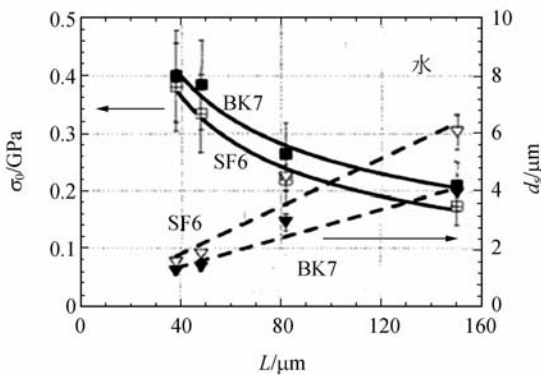


图 3 最大压应力、应力层深度与磨料粒度的关系
Fig. 3 Relation among max surface stress, stress layer and abrasive size

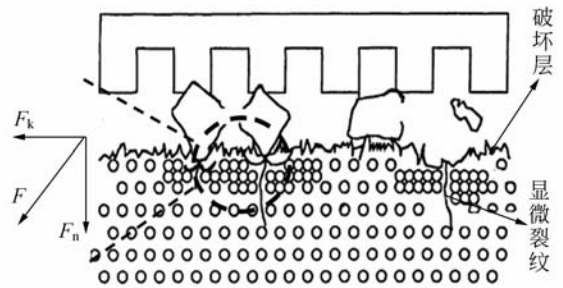
从图 3 可以了解到最大表面压应力与应力层深度变化相反,表面最大压应力随磨料粒度减小而增大,应力层深度随粒度减小而减小。此时,将图 1 与图 3 的变化过程对比,可以得出以下结论:玻璃表面强度与磨料粒度和应力层深度成反

比,但却与表面最大应力成正比。即表面最大压应力对玻璃表面强度变化影响是正面的,而磨料粒度的减小会增大表面最大压应力。

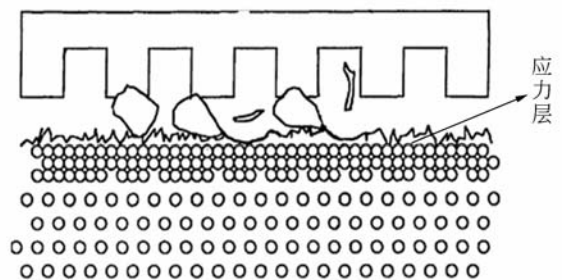
3 材料去除方式对表面强度的影响

3.1 材料脆性去除

材料脆性去除方式,是传统散粒磨料研磨的主要方式,主要应用于玻璃表面的初成形阶段。在研磨过程中,产生的大部分能量用于表面材料的破碎过程。随着磨料粒度的减小,应力层深度随之减小,粗糙度减小,而最大压应力增大。加工过程的显著特点是产生纵向生长显微裂纹,向材料内部生长破坏其分子结构。图 4(a)为材料脆性去除方式的显微图。此时作用力可以分解为切向力 F_k 和法向力 F_n ,法向力 F_n 生成显微裂纹,破坏玻璃网络结构,而切向力 F_k 则引起玻璃表面材料的去除,使表面材料以破碎方式去除,形成具有纵向显微裂纹的表面。



(a) 脆性去除
(a) Brittle removal



(b) 柔性去除
(b) Ductile removal

图 4 材料去除模式
图 4 Removal modes

3.2 材料柔性去除

材料柔性去除方式是利用磨料与工件表面接触产生的切向力 F_k 在玻璃表面进行柔性的分子剪切作用,用以避免产生纵向生长的显微裂纹,目的在于降低玻璃的表面粗糙度,得到类似抛光的表面。与材料脆性去除方式不同的是其能量虽不足以引起玻璃的表面破碎去除,但足够引起研磨后玻璃表面分子结构的永久变形,并引起表面最大压应力急剧增长。图 4(b)是材料柔性去除显微模型图。

4 柔性研磨

4.1 柔性研磨的定义

通过对上述两种材料去除方式的对比可知,材料柔性去除方式是通过减小表面粗糙度及纵向生长的显微裂纹,得到类似于抛光后的光滑表面,可以应用傅科阴影法进行表面面形过程检测的加工方法。柔性研磨指完全采用材料柔性去除的方式或以其为主要材料去除手段的研磨工艺来得到无纵向显微生长裂纹的表面。

4.2 柔性研磨表面

根据 Preston 的表面压应力理论描述,表面压应力是由表面微裂纹尖端的显微生长以及玻璃的微小破碎方式导致的。而结合材料柔性去除方式下的力学分析,柔性研磨表面下无纵向显微生长型微裂纹,研磨能量不足以引起玻璃的破碎去除,但能引起表面的永久变形。更重要的是,经柔性研磨方式后的表面压应力表现出急剧增加现象。对于硬脆材料而言,此时原子键得到加强,表面破坏所需克服的固体内聚力增加,即表现为在一定载荷下发生破坏时所需的最大应力值增加,即表面强度得到增强,而玻璃表面分子结构永久变形使提高的强度更加稳定。同时,有研究表明,当柔性研磨完全充分时,同种玻璃表面的应力层深度及应力幅值会表现为定值,而永久变形会达到最大,这一现象可以在工艺加工过程中被充分利用,从而得到最稳定的玻璃表面最大压应力,而保持住所取得的表面强度优势。从工艺加工来

讲,根据式(1), σ_0 增大时, d_s 必定减小,这标志着表面粗糙度的下降,会产生更小的表面破坏层,为之后的抛光工艺留下更好的加工优势。

5 相关实验结果

5.1 实验安排

运用上述理论分析结果,进行了不同材料去除模式的研磨加工试验。

采用 Twyman 假设条件作为实验前提,即在磨料粒度较小($\leq 50 \mu\text{m}$)时,研磨施加于工件表面的压力及相对转速对表面压应力的产生及变化没有影响,对表面微观形貌的影响可以忽略。而针对其他影响材料去除方式的因素,如磨盘强度、磨料粒度、研磨速率将分别进行研究。

实验一:在室温下,采用 K4, K7 玻璃各两块,两面均为平面,将玻璃工件固定在单轴研磨机上,采用 K9 玻璃和铸铁材料两种不同强度的磨盘进行研磨,其口径为 $\Phi 20$,与玻璃工件口径比为 $2/3$,大于 $1/2$;分别使用 W40 与 W28SiC 磨料,研磨时间为 15 min,记录厚度减小值,得到表面 500 倍放大显微对比如图 6(a);使用 W20 和 W14SiC 磨料,研磨 15 min,记录厚度减小值;使用表面探针式探针扫描仪,针尖尺寸-角度为 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$,探针压力为 1 mg,横向分辨率为 25 nm,测量 K4 玻璃表面粗糙度 R_a ,所得数据见表 2。

实验二:采用两块口径 $\Phi 140$ 石英玻璃。在研磨阶段,1 号试验件采用玻璃和铸铁磨盘、W20 及 W14 的两种粒度磨料修正表面,即进行脆性及柔性研磨结合,记录时间和厚度减小值;2 号试验件采用玻璃磨盘, W14 粒度磨料修正表面,严格控制研磨速率 $\leq 25 \mu\text{m/h}$,记录时间和厚度减小值,得到 500 倍显微对比图片如图 6(b)。

5.2 实验结果

表 2 得到的是以铸铁研磨盘、在不同磨料粒度、研磨速率 $< 25 \mu\text{m/h}$ 研磨方式下得到的表面粗糙度值。

表 2 研磨表面粗糙度

Tab. 2 Grinding surface roughness (nm)

K4	R_a			平均值
W28	1 673.07	1 395.35	1 247.35	1 438.59
W20	610.002	510.025	495.732	538.536
W14	393.420	424.805	456.531	424.919

从表 2 可知,柔性研磨方式下研磨表面粗糙度可以达到 $0.4 \mu\text{m}$ 。

将玻璃磨盘和铸铁磨盘在不同磨料粒度下研磨后的表面放大 500 倍后进行对比,结果显示 W40、W28 的显微表面无明显差别;而 W20 粒度研磨表面时,玻璃磨盘作用下的表面产生了较少的反光亮纹,所以,对于 W14 粒度磨料均采用玻璃磨盘。

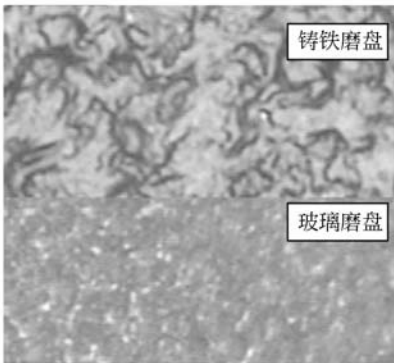


图 5 显微对比图片(不同磨盘强度)

Fig. 5 Micro-surfaces (with different pad strengths)

图 5 给出的是石英玻璃表面在不同强度磨盘、W20 粒度磨料下的微观表面 500 倍放大图,可以得知,使用与玻璃工件强度差别小的磨盘能够形成更理想的研磨表面。

研磨速率的测定是根据记录的最初抛光实验件厚度用不同磨料粒度研磨后,使用厚度千分尺测量其厚度并记录得到的,研磨速率用厚度差与时间的比值表示,速率值如表 3 所示。

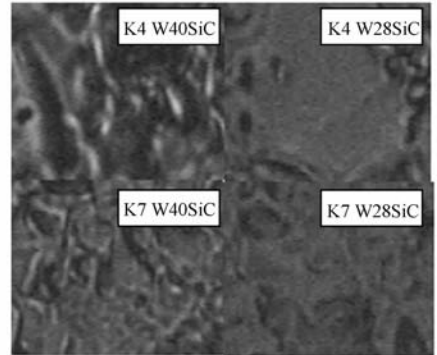
表 3 研磨速率

Tab. 3 Removal rate ($\mu\text{m}/\text{h}$)

	K4	K7	石英
W40	80	75	58
W28	60	58	42
W20	35	36	26
W14	23	24	17

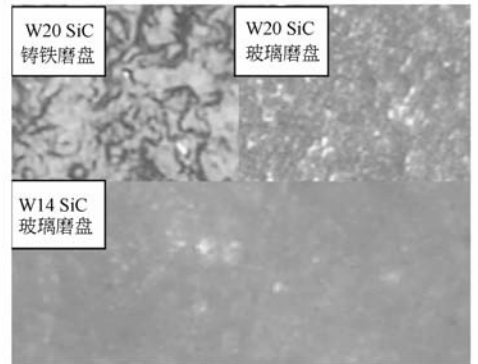
从表 3 可得柔性研磨方式工艺条件(a):研磨去除速率 $\leq 25 \mu\text{m}/\text{h}$ 。

针对熔石英玻璃材质 2 号实验件进行的柔性研磨方式实验得到了类似抛光后的表面,如图 6 (b),其已达到傅科阴影面形检测的表面粗糙度要求。



(a) 脆性研磨表面显微图

(a) Micro-surfaces of brittle grinding



(b)脆性-柔性表面对比图

(b) Contrast of brittle-ductile micro-surfaces

图 6 显微对比图片(不同磨料粒度)

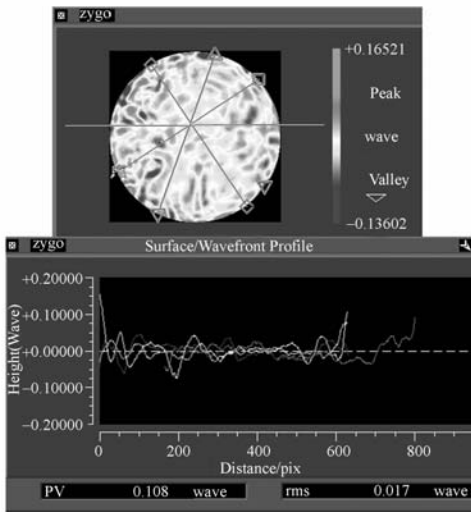
Fig. 6 Micro-surfaces (with different abrasive sizes)

从图 6(a)中可观察到脆性研磨方式产生的纵向显微裂纹(反光的亮纹);图 6(b)为脆性研磨及柔性研磨后表面的显微图片对比,可以看出柔性表面没有亮纹反射区,横向裂纹痕迹很小,表面类似抛光后的表面结构。

由此可得到柔性研磨方式工艺条件(b):磨料粒度 $L \leq 15 \mu\text{m}$ 。

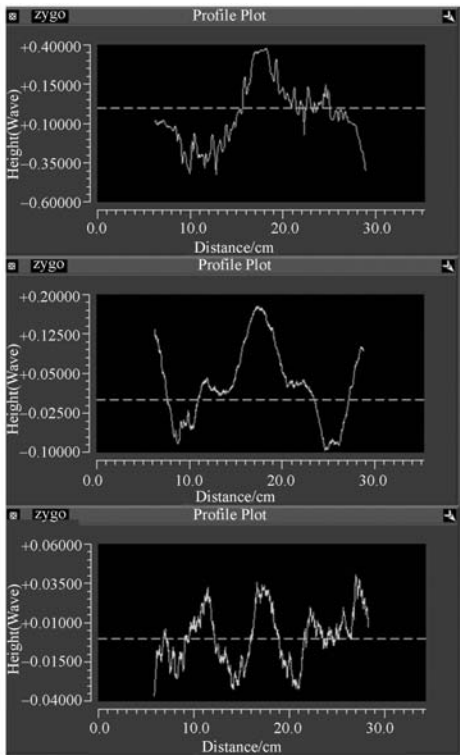
5.3 抛光表面面形验证

对实验二的 2 号实验件进行抛光及面形修正后,得到表面形貌如图 7。图 7(a) 显示,除边缘



(a) 表面形貌图

(a) Surface/wavefront profile



(b) 脆性-柔性-抛光表面对比图

(b) Contrast of brittle-ductile-polish profile

图 7 表面轮廓图

Fig. 7 Surface profiles

外,表面无较大峰值出现。图 7(b) 则展示了脆性—柔性—抛光 3 个阶段的表面轮廓变化图。柔性研磨表面的 P-V 频率高于脆性研磨表面,抛光后的表面 P-V 较小。

5.4 非成像表面粗糙度基本要求

针对光学元件的不同应用,采用相对应的研磨方式,可以达到其对表面强度的不同要求,同时也得到不同的表面粗糙度。根据表 2 所得试验数据,针对精密光学元件的非成像表面粗糙度的工艺设计,给出了相对应的基本要求。外边缘表面粗糙度应达到 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$,其他研磨表面粗糙度应为 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 。

与抛光表面相邻的外边缘表面,考虑到其对表面面形边缘的影响,研磨表面粗糙度需达到 $0.8 \mu\text{m}$ 以内,此粗糙度要求可以应用柔性研磨方式得到;对于其他的研磨表面,如果没有特殊的使用要求,则应用脆性研磨方式,粗糙度可在 $2.0 \mu\text{m}$ 以内;对于应用于空间光学仪器中的光学元件,基于安全性、可靠性方面的考虑,其非成像表面的粗糙度一般要控制在小于 $0.8 \mu\text{m}$,对于诸如窗口玻璃等特殊元件,则要求其小于 $0.4 \mu\text{m}$ 。

6 结 论

本文开展了玻璃材料表面强度的研究,研究表明,玻璃材料在表面研磨加工过程中产生的表面压应力是增大其表面强度的主要原因,而表面最大压应力和应力层深度、磨料粒度呈反比例变化,与表面强度变化趋势一致。对磨盘、磨料与玻璃表面之间的作用方式的分析显示,在脆性研磨方式下产生的纵向显微生长裂纹是表面强度降低的主要原因之一。柔性研磨方式能够引起表面最大压应力的增大,利用柔性材料去除模式可得到基本无纵向显微裂纹生长的表面,是玻璃表面增强的有效方法。非成像表面粗糙度的基本设计要

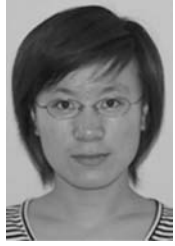
求给工艺设计提供了较明确的范围。针对 K4、K7、石英材料得到了柔性研磨工艺控制条件,即

去除速率 $\leq 25 \mu\text{m/h}$ 和磨料粒度 $L \leq 15 \mu\text{m}$,这为研究其他玻璃材料柔性研磨条件奠定了基础。

参考文献:

- [1] 石峰,戴一帆,彭小强,等. 高精度光学表面磁流变修形[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1859-1864.
SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Magneto-rheological finishing for high-precision optical surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1859-1864. (in Chinese)
- [2] 王慧军,张飞虎,赵航,等. 超声波磁流变复合抛光中几种工艺参数对材料去除率的影响[J]. 光学精密工程,2007,15(10):1583-1588.
WANG H J, ZHANG F H, ZHAO H, *et al.*. Effect of several processing parameters on material removal ratio in ultrasonic-magnetorheological compound finishing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1583-1588. (in Chinese)
- [3] WANG Y G, ZHAO Y W, JIANG J ZH, *et al.*. Modeling effect of chemical-mechanical synergy on material removal at molecular scale in chemical mechanical polishing[J]. *WEAR* 2008, 265:721-728.
- [4] WANG Y W, YANG J, QIU Y, *et al.*. Space and time effects of stress on cracking of glass [J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, A512:45-52.
- [5] 张峰,徐领娣,范镛,等. 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2480-2484.
ZHANG F, XU L D, FAN D, *et al.*. Fabrication of surface modification aspheric SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2480-2484. (in Chinese)
- [6] WONG L, SURATWALA T, FEIT M D, *et al.*. The effect of HF/NH₄F etching on the morphology of surface fractures on fused silica[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, 355:797-810.
- [7] CHEN X P, XUAN B, WANG P, *et al.*. Study on the influence and disposal method of the micro-cracks of optical components [J]. *SPIE*, 2009, 7282:72820D.
- [8] 付静. 玻璃表面微缺陷与离子交换表面改性的研究[D]. 北京:中国建筑材料科学研究院,2001.
FU J. *Analysis of Micro-cracks of Glass Surface and Ion-exchanged Surface Modification* [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2001. (in Chinese)
- [9] TWYMAN F. Polishing of glass surfaces[C]. In *Proceedings of the Optical Convention, London: Northgate & Williams*, 1905:78.
- [10] TWYMAN F. *Prism and Lens Making* [M]. London: Hilger & Watts, 1952.
- [11] PRESTON F W. The structure of abraded glass surfaces [J]. *Trans. Opt. Soc.*, 1921-1922, 23:141-164.
- [12] GOLINI D, JACOBS S D. Physics of loose abrasive microgrinding[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(19):2761-2777.
- [13] DALLADAY A J. Some measurements of the stresses produced at the surfaces of glass by grinding with loose abrasives [J]. *Trans. Opt. Soc. London*, 1922, 23:170-173.
- [14] PODZIMEK O. Residual stress and deformation energy under ground surfaces of brittle solids [J]. *Ann. CIRP*, 1986, 35:397-400.

作者简介:



陈晓苹(1983—),女,吉林四平人,博士研究生,2006年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学元件表面强化技术的研究。E-mail: chenxiaoping0605@163.com



宋淑梅(1963—),女,吉林人,研究员,硕士生导师,1984年于长春光机学院获得学士学位,主要从事大口径非球面先进加工与检测技术方面的研究。E-mail: smsong@ciomp.ac.cn

导师(通信作者)简介:



谢京江(1954—),男,北京人,研究员,博士生导师,1981年于长春光机学院获得学士学位,主要从事先进光学精密加工与检测方面的研究。E-mail: jjxie@ciomp.ac.cn

●下期预告

对称双屏 Butterworth 型频率选择表面研究

徐念喜^{1,2},冯晓国¹,梁凤超¹,王岩松¹,高劲松¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,
中国科学院 光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院 北京 100039)

为了分析对称双屏频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS)结构如何实现 Butterworth 型 FSS,达到“平顶”和“陡截止”的“矩形化”滤波特性。根据频率选择表面导纳与互导纳等特征参数,采用了平面波展开与互导纳相结合的方法,以 Y 形单元为例,依据上述分析法进行数值计算并分析了 FSS 屏与中间电介质对 Butterworth 型 FSS 影响,在 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 聚酰亚胺基底镀 $15\text{ }\mu\text{m}$ 铜膜,然后制作出 Y 孔型 FSS 并精密对准粘贴于介质两侧。自由空间法测试其传输特性,测试结果与仿真结果基本一致,当中间电介质电厚度为 2.15 mm ,单元周期为 $7.2\text{ mm} \times 6.2352\text{ mm}$ 、臂长 $L=3.6\text{ mm}$ 、臂宽 $W=0.8\text{ mm}$ 时,双屏 FSS 的互导纳 $Y_{1,2}$ 与单屏 FSS 导纳实部 Y_{Ore} 相等,得到 Butterworth 型 FSS; 当 FSS 单元周期增加 0.6 mm , -3 dB 带宽由 3.5 GHz 缩减为 2.1 GHz ,截止度增加。对称双屏 Butterworth 型 FSS 设计应当遵循:在满足谐振尺寸的前提下采用无加载孔径型单元且单元周期小于 0.4λ 、缝隙长宽比小于 5.5 ; 中间电介质电厚度约为 0.1λ 的原则。