

基于荧光共聚焦技术熔石英亚表层损伤检测方法

王景贺 张 磊 王洪祥 郭海涛

哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 熔石英光学材料是一种高新技术产品,在现代各领域的应用越来越广泛,特别是航天航空等领域具有大量应用需求。由于其产品的制造难度较大,因此其成品质量的高低就成为人们最为关注的问题,其中尤以亚表层损伤的问题至关重要。论述了几种常用的亚表层损伤检测方法和原理,分析了其优缺点。在此基础上说明了使用荧光共聚焦显微技术来检测光学元件亚表层损伤的可行性和准确性。使用共聚焦激光扫描显微镜对熔石英玻璃试件的亚表层损伤进行了检测实验。对比了角度抛光法所得到的两种荧光量子点亚表层损伤深度,可以明确在一定的加工条件下亚表层损伤的分布情况。使用图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 分析了亚表层损伤的分布图像及分布密度,定量的给出了亚表层损伤的基本规律。

关键词 光学制造; 熔石英; 亚表层损伤; 共聚焦显微技术

中图分类号 TG356.28 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0406004

Fused Quartz Subsurface Damage Detecting Method Based on Confocal Fluorescence Microscopy

Wang Jinghe Zhang Lei Wang Hongxiang Guo Haitao

School of Mechatronics and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Fused quartz optical material is a kind of new and high technology products, which has important applications both in aerospace and in daily life. The manufacturing cost and the complexity of manufacturing process are far more than other similar products because of its manufacturing difficulty. So the quality of finished products becomes the problem that people take the most attention to, in which subsurface damage detection is of special importance. Organize several commonly used surface damage detection methods and principles. The advantages and disadvantages of several methods are analyzed. And on this basis, this paper discusses the feasibility and accuracy of using confocal fluorescence microscopy to detect the optical element and dart layer damage. Using confocal laser scanning microscopy to detect fused quartz glass specimen surface damage is carried out. Using two kinds of fluorescent quantum dots respectively, the surface damage of the specimens tomographic images is obtained. Through testing the specimens we obtain distribution images of the surface damage. Using Image-Pro Plus 6.0 software processing, the scope of distribution density is got. Basic rules of sub-surface damage are concluded quantitatively.

Key words optical fabrication; fused quartz; subsurface damage; confocal microscopy; Parameter optimization

OCIS codes 160.6030; 140.3330; 180.1790; 190.4975

1 引 言

在接触式加工过程中,由于人为因素或工具误差等原因使光学元件的表面在受力不均匀的情况下出现损伤,并且加工过程中产生的杂质也会深入到试件的表面。虽然试件经过研抛加工后,工件的大部分缺陷能够去除掉,但最终仍会有少量的微裂纹存在,这些裂纹中包括有试件基体的本征微裂纹,也包括在研抛过

收稿日期: 2014-12-03; 收到修改稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51475106)、国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1230110)、中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室开放基金(KF14007)

作者简介: 王景贺(1963—),女,博士,研究员,硕士生导师,主要从事研究超精密加工及检测技术等方面的研究。

E-mail: wjhh@hit.edu.cn

程中不可避免的加工微裂纹存在^[1]。这些缺陷在光学产品的使用过程中严重影响了其使用寿命和成像精度,而且将直接导致激光损伤阈值的降低及光学元器件的损坏。

通常光学元件在经过加工后其表面会形成一层抛光重积层,而亚表层损伤被掩盖沉积层之下,对其检测非常困难。光学材料的加工过程主要有:磨削、研磨、抛光等过程,这些过程都会引起试件表面裂纹及亚表层损伤,以及残余应力^[2]等。从形成的原因来说,亚表层损伤大致分为两种类型^[3]:第一种类型是材料本身性质决定的,在加工的过程中,由于施加作用力及化学元素造成其内在的化学构成不均匀,在内部形成了气泡或者参入了其他杂质。第二种类型则是在对材料进行处理时由于工具和参数的不同而产生的损伤,其中包括了裂纹和残余应力等,还有就是在抛光的过程中形成杂质颗粒重新进入到沉积层内^[4]。若光学产品中缺陷较多将会导致激光损伤阈值(LIDT)的降低^[5]。

目前,常用的检测亚表层方法主要有破坏性检测和非破坏性检测两种方式。其中,破坏性检测方法有角度抛光法、化学腐蚀法、磁流变抛光技术和截面显微法等;而非破坏性检测方法是在不破坏试件表面的前提下检测内部损伤结构,主要包括光学相干层析技术、全内反射法和激光散射线法等。以上几种方法只能定性的给出损伤程度,无法在具体的分布程度上予以量化的表征。近年来,有学者提出了一种非破坏性的亚表层损伤评估方法,即在研磨过程中使用加入了量子点(纳米级的半导体石英晶体)的研磨液,然后使用共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)对工件进行观测,就能够较准确的标定出亚表层损伤及工件缺陷点。

与有机荧光染料相比,量子点具有更广泛的吸收光谱、窄带可调的发射波长、更高的量子产率等特性^[6],其中广泛的吸收光谱使量子点可以被多种波长的激光激发。其窄带可调的发射光谱可以精确调节、过滤并排除来自干扰源的噪声信号^[7],能够实现在一系列相似的光谱范围内,同时分辨出不同种量子点的特征^[8]。在光学元件的加工过程中,使用具有特定波长的荧光量子点可以较快速的表征光学元件的亚表层损伤^[9]。主要原因是在研磨过程中,研磨粒的直径一般在450 nm左右,而量子点的直径不大于8 nm,普遍在3.2~5.8 nm之间^[10],相对来说远远小于研磨粒直径,使得它们在相互作用力下进入到试件的表面以及亚表层损伤裂纹内。

美国北卡罗来纳大学夏洛特分校的Williams^[11]提出了利用荧光检测法对光学材料的亚表层损伤进行评估,并且与使用轮廓仪、原子力显微镜和白光干涉仪的检测结果进行了对比。结果显示使用激光共聚焦荧光显微镜技术能够较准确地表明光学材料的亚表层损伤程度。为了更好的利用量子点,Chan等^[12]在实验中提出了运用基烯酸(MUA)对其表面进行修饰,从而得到的量子点完全具备了水溶性。对于微小粒子来说,当液体流过试件表面时要去除附着在试件表面的粒子,必须符合以下条件:当前流体对试件表面粒子产生的拖拽力与粒子直径70%的积要大于当前粒子受到的范德华力与粒子接触半径的积^[13]。本文利用荧光量子点法,观察熔石英光学元件亚表层损伤的结构和分布情况,计算出层析图像每层的荧光强度分布和平均荧光密度,形成了一套较为全面和准确的亚表层损伤荧光测试实验理论和方法。

2 亚表层损伤的结构

光学元件的亚表层损伤一般分为4层,如图1所示,从传统抛光加工以后的亚表面损伤模型可以看出,在试件表面由外至内的分布情况是:

- 1) 抛光层:距表面大约在0.1~1 μm之间,主要形成于试件的抛光阶段。
- 2) 缺陷层:在抛光层以下,距表面1~100 μm之间,主要形成于试件的研磨过程,缺陷层中损伤和裂纹非常明显,利用光学显微镜即可观测到大致的形貌。

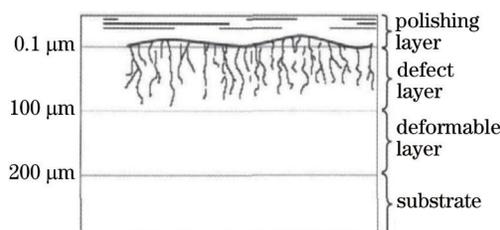


图1 亚表层损伤结构示意图

Fig.1 Structure diagram of subsurface damage

3) 变形层:位于缺陷层下,距表面 100~200 μm 之间,主要形成于在加工初期各种工艺的综合作用结果。

4) 光学材料基体

根据不同的加工工艺和方法,光学材料的表面缺陷和亚表层损伤均有所差异,加工过程中的加工时间、研抛具的转速以及加工过程中的试件压力等均影响到最终的加工结果。

3 使用荧光量子点表征亚表层损伤程度

3.1 量子点介绍

量子点(QD),其直径一般介于 1~100 nm 之间,主要特性是一种能够通过接收激光的激发从而产生荧光现象的纳米颗粒。基本的构成是由 II~VI 族或 III~V 族的元素组成,例如硫化镉-硫化锌(CdS/ZnS)、硫化镉-硫化汞(CdS/HgS)和硒化镉-硫化锌(CdSe/ZnS)等。实验中使用的量子点试剂是由 CdSe/ZnS 结构组成的。

由于单独的荧光量子点颗粒在使用时容易受到杂质和晶格缺陷等本身性质的影响,其荧光量子的产率通常也难以达到实验所需的要求,从而使量子点形成壳-核的组合结构,如图 2 所示。以硒化镉(CdSe)为核心同时使用硫化锌(ZnS)为外壳组成的壳-核结构。其使用了两种不同的发射波长(600 nm 和 500 nm),发射光谱范围如图 3 所示。

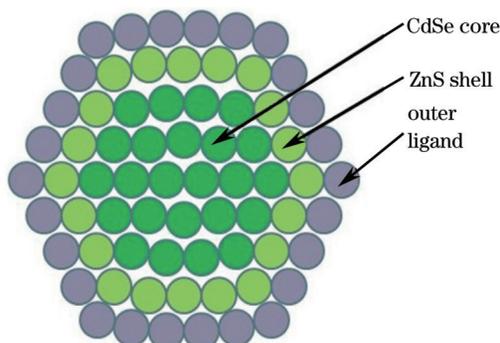


图 2 ZnSe/CdSe 量子点壳-核结构示意图

Fig.2 ZnSe/CdSe quantum dot shell-core structure

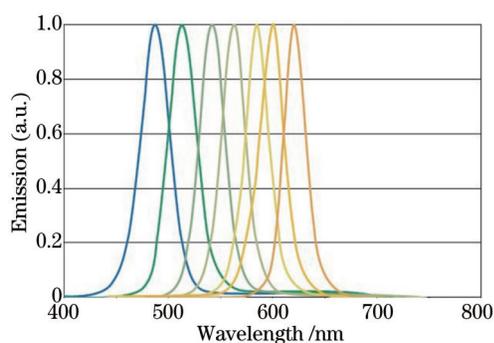


图 3 CdS/ZnS 量子点发射光谱范围图

Fig.3 CdS/ZnS quantum dots emission spectrum range

这种 ZnSe/CdSe 的壳-核结构主要特点是荧光强度高、稳定性好、对抗光漂白的阈值高,并且能够通过改变其核心成分的类型和数量,使量子点适应不同的荧光强度和类型。新型的水溶性的量子点分子量更小更利于量子点渗透到亚表面损伤的微细裂纹中。

量子点荧光现象的产生主要分为三个阶段:受激、释放和发射(荧光现象),如图 4 所示。

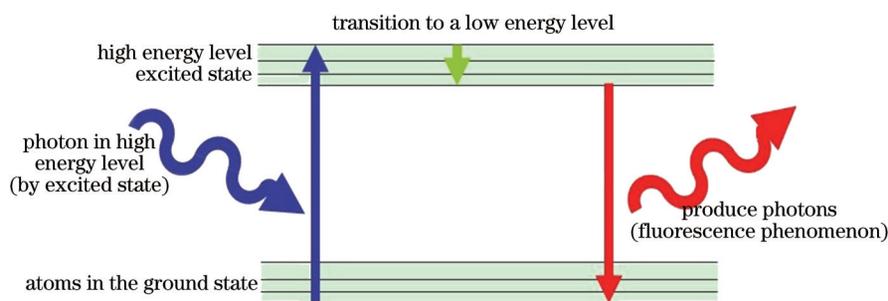


图 4 原子荧光现象示意图

Fig.4 Atomic fluorescence phenomenon schematic

首先是受激过程,受激状态也就是原子吸收能量的过程,原子从一个能量较高的光子中吸取能量,同时移动原子的电子从一个基态跃迁到一个活跃的受激的高能量状态。其次,在释放过程中,电子从活跃状态重新回落到能量较低的平稳状态,在此期间释放出能量。最后在荧光发射过程中,电子由于回到最初的平稳基态而释放能量,在这个过程中形成了新的光子,它的发射产生了波长更长的光,于是就产生了荧光现象。一般来说荧光物质能够经历以上过程成千上万次,这个时间周期依据不同的物质而定,最后荧光性因光漂白而彻底消失。

3.2 量子点与试件表面的相互作用

研磨和抛光过程中,将荧光量子点掺入抛光剂中,在量子点与试件表面裂纹之间产生的交互作用下,荧光量子点受到力的作用,嵌入到了试件亚表层的各个深度,如图5所示。在激光的照射下,如果被测件存在微小缺陷,那么直径足够小的荧光量子点就能够嵌入到缺陷点中,而量子点的高度荧光性使得缺陷点很容易被检测到。

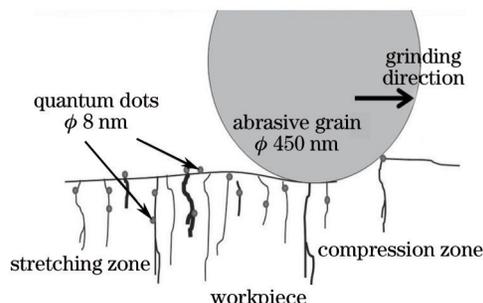


图5 研抛过程中量子点与试件表面相互作用示意图

Fig.5 Quantum dots with the specimen surface interaction during polishing process

当光线进入到试件内部,将会以缺陷为中心,发生光线的散射,利用共聚焦显微镜测试熔石英亚表层损伤,根据荧光强度的强弱反应亚表层损伤分布情况。

荧光量子点法有两种主要作用力同时作用在试件表面的量子点上^[3-4]。这两种力占主导地位,使其能够牢固地粘附在试件表面缺陷和亚表层损伤裂纹内部。第一种力就是试件表面与量子点之间的吸引力,这种力使得试件经过表面清洗以后仍然有足够的量子点附着在试件的缺陷表面。第二种力就是当研磨液流过试件表面时产生的流体作用力,这个力的作用效果是去除试件表面量子点的。在以上两个力的共同作用下,荧光量子点镶嵌进入到试件表面的缺陷里。量子点与工件表面之间的吸引力即范德华力 F_{VDW} ,在粒子的半径足够小时($D \leq 50 \mu\text{m}$)起到主导作用,而其他吸引力则可忽略不计。研磨液在试件表面流动时对量子点所产生的拖拽力 F_D 使得量子点不断地脱离试件表面。在满足 $F_{VDW} > F_D$ 时,量子点就能够依附在试件表面和各类缺陷内:

$$F_{VDW} = \frac{AD}{12r^2}, \quad (1)$$

$$F_D = C_D \rho \frac{v^2}{2} A_p, \quad (2)$$

式中 A 为哈梅克常数(Nm), D 为粒子的直径(m), r 为粒子距工件表面的距离(m), C_D 为拖拽力阻力系数, ρ 为研磨液密度, v 为速率, A_p 为粒子的横截面积。

$$C_D = \frac{24}{R_c}, \quad (3)$$

$$R_c = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (4)$$

式中 μ 是流体粘性, v 是流体的平均流速, D 是粒子的直径。 F_D 的大小就主要取决于速率,而在研磨盘上取速率最快的点为极限,即是在研磨盘边缘的点, v_{max} 即研磨盘边缘的线速度(m/s),如(5)式所示。量子点的速率与研磨粒的速率之间的关系为1:56.25,那么根据(1)、(2)式所计算的结果, $M_{VDW} > M_{hydro}$ 确保了量子点与工件表面之间相互作用而不脱离表面。(1)式中所采用的范德华力公式为离子-偶极子之间的关系式,距离取 r^2 。离子偶极相互作用,即是离子与一个极性物质之间的作用,这样的结构可以增加量子点配位层的稳定性,离子-偶极作用力使溶质可以溶解在水溶液中:

$$v_{max} = \omega R, \quad (5)$$

那么量子点的平均速度可表示为

$$v = v_{max} \frac{D}{D_{abrasive}}. \quad (6)$$

在粒子与试件表面的作用中还有另外一种扩散现象,在试件没有抛光前,量子点是通过以上这种方式

进入到试件表面的缺陷和亚表层损伤内。当发生扩散时,量子点原子按顺序移动进入了现有原子晶格内,或者扩散的量子点原子随机移动进入其余原子晶格的空洞内。在高温的条件下将加剧这种现象的发生,而且原子晶格内的空间越大,那么原子移动时的能量就越高。量子点体积远小于试件原子晶格的空间大小,所以能够顺利地进入到试件表面缺陷和亚表层损伤裂纹中。

3.3 熔石英光学玻璃亚表层损伤荧光检测实验

为了表明荧光物质分布的不同位置,可以通过检测不同荧光强度的之间的对比来描述,荧光强度为

$$I = I_0 \exp \left[-2 \left(x^2 - y^2 - \frac{z^2}{K^2} \right) / w^2 \right], \quad (7)$$

式中 I_0 为激光束峰值强度, w 为光束在 $1/e^2$ 峰值强度时的宽度, K 为比例系数。

使用共聚焦显微镜观测的最大优势在于层析成像技术。该技术主要是通过阻止聚焦平面以外的离焦光在焦平面上形成干扰,通过改变聚焦平面的位置来得到被观测试件不同深度的光学切片图像。影响层析成像能力的因素主要是显微镜的横向分辨率。

通过分析系统的各个组成部分以及研究共聚焦扫描显微镜的分辨能力可知,激光器在聚焦平面上生成的聚焦小亮点的直径大小决定了成像点的大小,而亮点的大小则直接影响到显微镜的横向分辨率。实验中在形成图像时系统按照预先设定好的间隔距离,得到了关于亚表层损伤结构的一组层析图像。

3.3.1 实验所用仪器和试件介绍

实验中主要使用的仪器是ZYP300旋转摆动重力式研抛机,使用的共聚焦激光扫描显微镜是Leica TCS SP5 II型和Zeiss LSM 510型,如图6所示。



图6 实验主要使用仪器

Fig.6 Main instruments used in experiments

所用试件是熔石英玻璃,直径50 mm,厚度为6 mm。研磨采用三种不同粒径规格的碳化硅粒子,320#、600#、1200#,分别研磨30 min,抛光采用500#的氧化铈粒子,抛光时间为1 h,研磨抛光的运动轨迹为周摆线式。荧光剂为CdSe/ZnS水溶性核壳结构纳米晶体,激发波长为450 nm,发射波长为600 nm,直径7~10 nm。

3.3.2 亚表层损伤程度检测实验

通过共聚焦显微镜观测试件,试件在经过加入荧光剂的研抛以后,实验表明能够清晰看到在元件表面上遍布着大量划痕和表面凹凸,这些结构容纳了大量的量子点,形成了量子点集群。荧光信号通过光电倍增管转化为电信号对荧光信号进行相对定量测定。

在实验中,使用的分析软件为:Image-Pro Plus 6.0,同时使用2种荧光量子点用于检测。其中一种激发波长450 nm发射波长600 nm用于检测亚表层损伤程度。另外一种激发波长450 nm发射波长500 nm的则用来标定试件表面,两种量子点的荧光图像如图7所示。

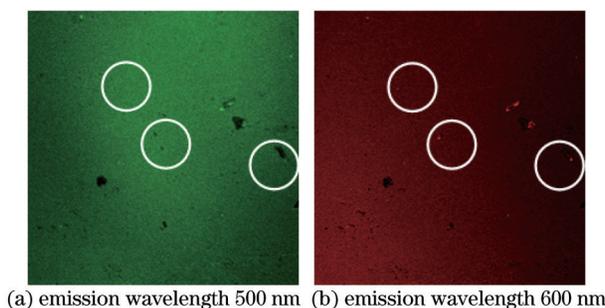


图7 试件表面的两种激发波长量子点对比图

Fig.7 Comparison of two excitation wavelengths quantum dots on specimen surface

使用共聚焦荧光显微镜对加工的试件进行观测,分析图像时,计算机以全部图像为扫描范围,从这些图像中积累荧光强度扫描数据。通过观察这些荧光强度的变化就确定聚焦平面的深度,如图8所示。

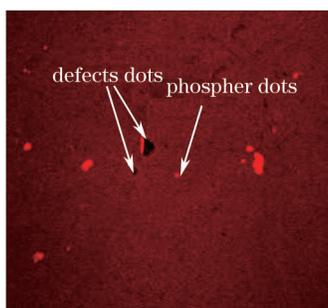
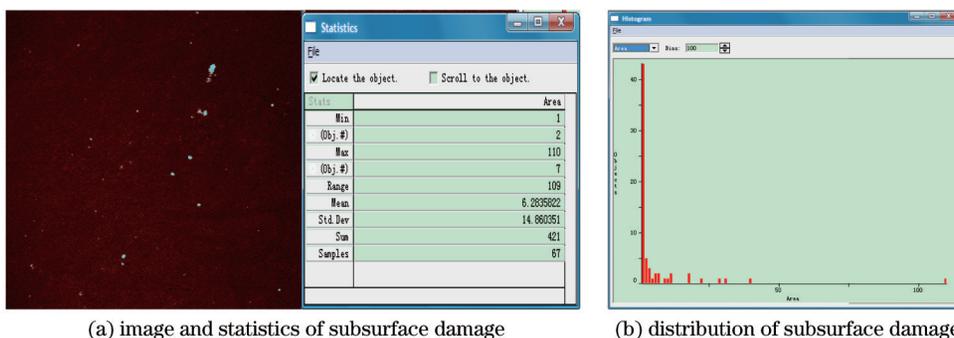


图8 缺陷点和荧光点

Fig.8 Defects dots and phosphor dots

实验中取已加工好的两个试件,加工条件为抛光3.4 h,加工速度50 r/m。最后使用共聚焦显微镜进行观测,在距表面13.5 μm的聚焦平面进行观测。其中图9是研抛后的熔石英玻璃,图10是研抛后经过HF腐蚀,扩大亚表层损伤裂纹后的熔石英玻璃。从中对比可以看出,在第一个试件中共检测到67处缺陷,其中最小为0.153 μm²,最大16.83 μm²的损伤,平均损伤程度为0.961 μm²,其分布情况如图9(b)所示,此时的亚表层损伤主要分布在1.91 μm²以下。

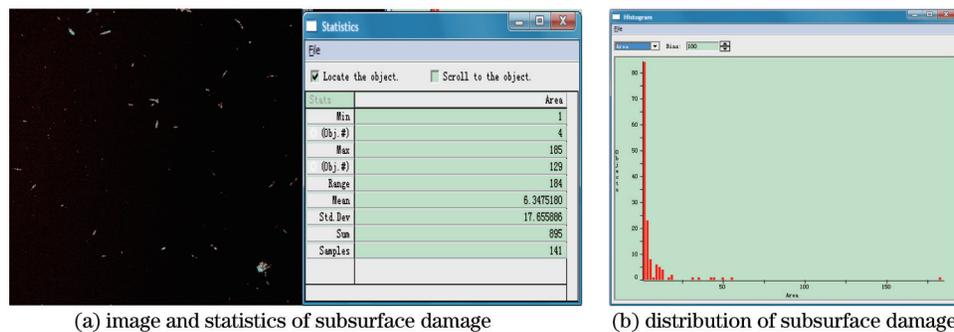


(a) image and statistics of subsurface damage

(b) distribution of subsurface damage

图9 研抛的熔石英玻璃亚表层损伤观测图

Fig.9 Observation image of polished fused quartz subsurface damage



(a) image and statistics of subsurface damage

(b) distribution of subsurface damage

图10 研抛后经过HF腐蚀的熔石英玻璃亚表层损伤观测图

Fig.10 Observations image after polishing and HF etching of fused quartz subsurface damage

取第二个经过研抛的熔石英玻璃试件,在HF 1%(体积分数)的溶液中浸泡7 min,使其亚表层损伤裂纹和缺陷充分打开,再使用共聚焦显微镜进行观测。这时可得数据如下:试件中共检测到141处缺陷,其中最小为0.153 μm²,最大28.31 μm²的损伤,平均损伤程度为6.34 pixel,即0.97 μm²,其分布情况如图10(b)所示,此时的亚表层损伤也主要分布在1.91 μm²以下。损伤程度与未经过腐蚀的试件差别不大,表明在距离表面13.5 μm左右亚表层损伤基本达到一个稳定的值,再向试件内部深入观测则会发现,亚表层损伤程度呈下降趋势。

综上所述,在一定的加工条件下,从以上两种情况下观测到的亚表层损伤程度,在距离试件表面13.5 μm处分布情况基本相同,平均损伤在2 μm,最大为64.75 μm。

同理根据熔石英玻璃亚表层损伤的形成机理,对单个试件的亚表层损伤情况进行纵向的连续观测如图 11 所示。在加工这个试件时加入了浓度较大的量子点溶液,在这组图片中明显可以看出亚表层损伤分布的大致规律,直观的反应出了亚表层损伤的程度。但仅通过光学观测还不足以得到足够的数据来分析其内在的分布和损伤的量化结果。

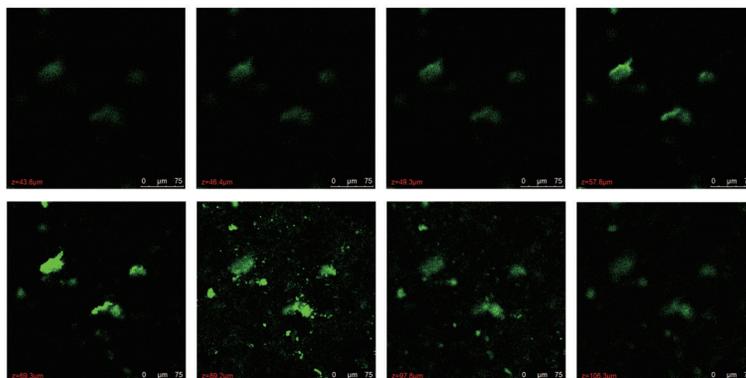


图 11 使用 Leica TCS SP5 II 型共聚焦显微镜观测的亚表层损伤层析图片

Fig.11 Tomography images of subsurface damage by using Leica TCS SP5 II confocal microscope

通过对得到的图像进行分析和比较,可以得到不同试件之间的亚表层损伤的深度和在损伤区域内的平均损伤程度。通过软件计算可得出较为具体的量化结果,如图 12 所示。对熔石英玻璃在距离表面 0.5~13.5 μm 的范围内对亚表层损伤进行观测分析。

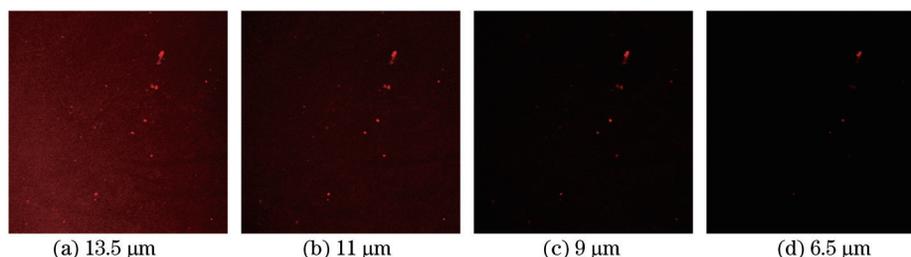


图 12 熔石英玻璃单体试件亚表层损伤示意图

Fig.12 Schematic of fused quartz glass single specimen subsurface damage

为了更好地表述亚表层损伤的程度,利用光密度^[14](OD)对层析图像进行分析。当分析一系列荧光图像时,光密度的具体含义为光线在经过透光物质时,其入射光(I_a)与透射光(I_b)之间强度的比值:

$$V_{OD} = \log(I_a / I_b). \quad (10)$$

实验中利用光密度反应在图像上黑白图像上灰度的变化或在彩色图像上的色彩变化,通过图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 收集层析图像上的平均光密度(AOD)。平均光密度为整个图像范围内的每个像素点的光密度叠加与总点数之和的比值:

$$V_{AOD} = \frac{\sum A}{N}. \quad (11)$$

通过对比 AOD 描述亚表层损伤的程度,即使用 V_{AOD} 来表征亚表层损伤在每个聚焦平面之间的平均损伤程度。

根据观测到的数据可以分析出距试件表面 5~11 μm 的范围内,亚表层荧光强度的分布情况,如图 13 所示。从图中可以看出最大损伤和平均光密度随表面深度变化的关系,随着距离的深入,亚表层损伤呈上升趋势。这是因为经过抛光过后,试件表面有一层抛光沉积层,内部的损伤不很明显。进一步测试,亚表层损伤开始增加明显,损伤的平均密度分布变化为 $2 < V_{AOD} < 5$ 。通过平均密度分布情况可以定量的分析说明试件亚表层损伤的情况,也可知分层表征在各聚焦平面上损伤的分布信息。

3.4 角度抛光法检测亚表层损伤深度

角度抛光法,如图 14 所示,是目前检测光学元件亚表层损伤较为普遍的一种方法。检测的基本过程是

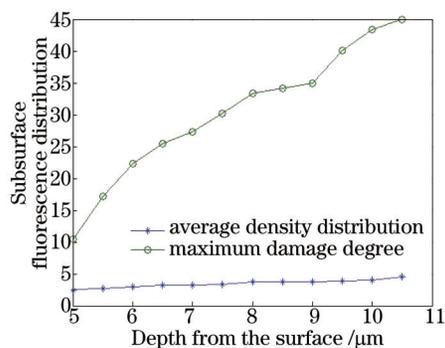


图 13 亚表层密度分布图

Fig.13 Subsurface density distribution

在加工好的试件表面抛光一个微小角度 α 的斜面,然后在这个斜面上使用 HF 溶液进行腐蚀,腐蚀后的试件呈现出了点状蚀刻和裂纹,这些缺陷图像在腐蚀前是无法清晰分辨的^[15]。同时,亚表层损伤的信息也相应的在斜面上得以显示,通过测量裂纹的分布长度 L ,计算得到亚表层损伤的深度 d 。角度抛光法中选用 5° 角其特点是:既能显示完整的亚表层损伤信息且还能放大显示损伤信息,又能保证良好的加工效率和加工的便捷性。

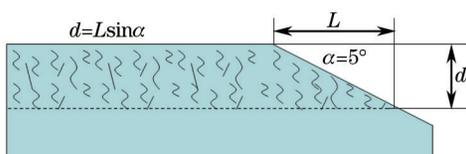


图 14 角度抛光法示意图

Fig.14 Schematic of taper polishing

采取角度抛光法,验证荧光显微镜法测量的准确性,实验中使用 ZYP300 旋转摆动重力式研抛机[如图 6 (a)],其抛光角度 α 为 5° ,使用游离磨料进行研抛。最后在对试件进行角度抛光时采用 500# 的氧化铈粒子,抛光 2 h,然后在 1% 的 HF 溶液中浸泡 5~7 min。通过超景深光学显微镜对亚表层损伤进行观测。从观测熔石英玻璃的亚表层损伤的结果,可以看出裂纹和划痕是亚表层缺陷的主要形态,如图 15 所示。

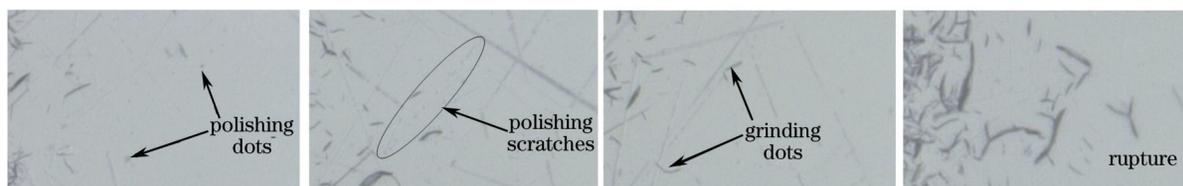


图 15 亚表层损伤类型

Fig.15 Type of subsurface damage

根据角度抛光法亚表层深度计算公式 $d=L\sin\alpha$,以三组试件为实验对象,进行角度抛光后在超景深光学显微镜下可观测并计算大致的亚表层损伤分布情况,如图 16 所示。

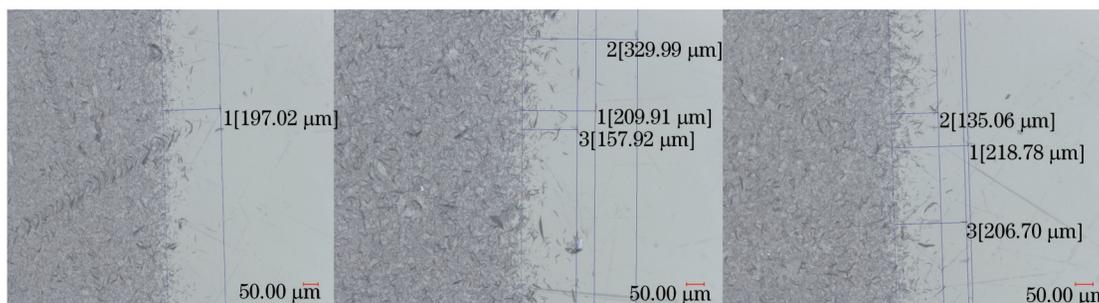


图 16 角度抛光后亚表层深度观测示意图

Fig.16 Subsurface depth observation schematic after angle polishing

通过观察发现,在对试件抛光 2 h 候进行角度抛光实验,通过在 HF 溶液内打开裂纹后,亚表层损伤普遍的深度 L 集中在 $200\ \mu\text{m}$ 左右,同时计算分别得到: $d_1=19.0679\ \mu\text{m}$, $d_2=18.2948\ \mu\text{m}$, $d_3=17.1714\ \mu\text{m}$ 。最终取平

均值,亚表层损伤深度 d 约为 $18.178\ \mu\text{m}$ 。

4 结 论

分析了量子点与试件表面之间的受力关系,以及量子点进入到试件表面缺陷以及亚表层损伤的微裂纹的过程。使用角度抛光法对加工过的试件进行观测,获得了熔石英玻璃亚表层损伤的微观形貌图,并通过计算得到亚表层损伤在 $20\ \mu\text{m}$ 左右。使用共聚焦激光显微镜,利用荧光量子点法,观察熔石英光学元件亚表层损伤的结构和分布情况,计算出层析图像每层的荧光强度分布和平均荧光密度,形成了一套较为全面和准确的亚表层损伤荧光测试实验理论和方法。

参 考 文 献

- 1 Song Bo, Luo Lin, Wang Yufen. Research of whetting and polishing characteristic of high pure quartz glass[J]. Optic Technique, 2008, 34(s1): 278-279.
宋 波, 罗 琳, 王玉芬. 高纯石英玻璃研抛特性的研究[J]. 光学技术, 2008, 34(s1): 278-279.
- 2 H P paul, D F Edwards, J B Davis. Subsurface damage in optical materials: origin measurement & removal[C]. SPIE, 1988. 113-118.
- 3 Wang Chunhui. Study on Optical Sub-Surface Damage Evaluation Technology[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2010. 45-46.
王春慧. 光学表面亚表层损伤检测技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2010. 45-46.
- 4 Li Gailing. Theoretical and Experimental Research on the Measurement of Grinding Subsurface Damage for Optical Materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 15-16.
李改灵. 光学材料磨削加工亚表面损伤测量的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2006. 15-16.
- 5 Genin F Y, Salleo A, Pistor T V, *et al.*. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces[J]. JOSA A, 2001, 18 (10): 2607-2616.
- 6 Davis T. Biography of louis E. brus[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102 (5): 1277-1279.
- 7 Jamieson T, Bakhshi R, Petrova D, *et al.*. Biological applications of quantum dots[J]. Biomaterials, 2007, 28(31): 4717-4732.
- 8 Wu X, Liu H, Liu J, *et al.*. Immunofluorescent labeling of cancer marker Her2 and other cellular targets with semiconductor quantum dots[J]. Nature Biotechnology, 2002, 21(4): 41-46.
- 9 Lindquist, S D Jacobs, A Feltz. Surface preparations for rapid measurement of sub-surface damage depth[C]. Science of Optical Finishing Topical Meeting, 1990. 57-61.
- 10 Bourlinos A B, Stassinopoulos A, Anglos D, *et al.*. Surface functionalized carbogenic quantum dots[J]. Small, 2008, 4(4): 455-458.
- 11 Williams W B. A Novel Fluorescence Based Method of Assessing Subsurface Damage in Optical Materials[D]. Charlotte: The University of North Carolina at Charlotte, 2009. 45-47.
- 12 Chan W C W, Nie S. Quantum dot bioconjugates for ultrasensitive nonisotopic detection[J]. Science, 1998, 281(5385): 2016-2018.
- 13 Williams W B, Mullany B A, Parker W C, *et al.*. Using quantum dots to tag subsurface damage in lapped and polished glass samples [J]. Appl Opt, 2009, 48(27): 5155-5163.
- 14 Li Feng. Image analysis in optical density parameters of the physical significance of proper understanding and use[J]. Chinese Journal of Anatomy, 2009, 32(2): 271-274.
李 枫. 图像分析中光密度参数物理意义的正确理解和使用[J]. 解剖学杂志, 2009, 32(2): 271-274.
- 15 Williams W B, Mullany B A, Parker W C, *et al.*. Using quantum dots to tag subsurface damage in lapped and polished glass samples [J]. Appl Opt, 2009, 48(27): 5155-5163.

栏目编辑: 韩 峰