陈兆翔 刘剑锋 (西安交通大学 陕西 西安 710049)

摘要:在光学玻璃的研磨加工中不可避免地会产生亚表面损伤,这会对元件的寿命及性能产生影响。在光学元件加工工艺优化过程中,HF化学蚀刻法是检测亚表面损伤的常用方法,然而对于腐蚀后的显微镜图像鲜有处理及数据分析方法。 本文通过对腐蚀图像进行平滑处理、阈值化处理和轮廓边缘检测,实现亚表面损伤形貌图的特征清晰提取及绘制,图像 处理后的图片可用于亚表面损伤的进一步分析,例如裂纹周长等特征信息提取。

关键词:光学元件;亚表面损伤;图像处理;化学蚀刻

0 引言

高精度光学系统被广泛应用在大型天文望远镜、高功 率激光核聚变装置及精学测量装置。光学元件在研磨加工 中,受到磨粒施加的外力作用和材料本身硬脆特性,不可避 免会产生划痕、裂纹、凹坑等损伤。其中在加工表面下产生 亚表面损伤,会影响元件的激光损伤阈值、成像质量等性能。 准确及有效的亚表面损伤形貌获取方法,对加工工艺优化及 元件性能评价具有重要作用。

亚表面损伤的检测方法分为破坏性检测和非破坏性检 测,区别在于是否对待测样品构成损坏。破坏性检测方法 是将元件借助某些方法进行一定程度的破坏,将裂纹、坑 点等信息展现出来,借助某些仪器或者数学公式直接或间 接计算得出损伤深度,是最基础、直观和有效的一种方法。 与非破坏性检测方法相比,该技术更加成熟、技术局限性小、 直观性强、操作简便、经济性好。常用的破坏性检测方法有 氢氟酸 (Hydrofluoric Acid, HF) 的 BOE (Buffer oxide etch, BOE)差动腐蚀法、截面显微法、角度抛光法、磁流变抛光 斑点法、Balling Dimpling 法、纳米压痕法和聚焦离子束轰 击法等。破坏性检测方法的局限性即仅能用于定性的评价, 非常规的准确检测。

非破坏性检测方法是利用电子束、光学、热、声技术、 磁等技术在不破坏元件的情况下利用光学玻璃中的介质传 输特性得到物理现象的反馈来获得相关信息,据此利用相关 的理论公式对亚表面损伤深度进行计算。非破坏性检测方法 主要有显微拉曼光谱法、激光散射法、X射线衍射法、光学 相干层析法、全内反射强度检测法和共聚焦激光扫描法等。

在以上现有的检测方法中,非破坏性方法由于测量精 度有限仅能用于定性评价,非破坏性方法更常用于工艺的优 化,然而却对于破坏性方法检测中表面损伤的图像鲜有处理 及分析方法,本文针对亚表面损伤形貌图进行图像处理研 究。

1 亚表面损伤图像处理方法

为获得真实、准确的亚表面损伤形貌,对图像分别进 行平滑处理、阈值化处理和轮廓边缘检测。

1.1 图像平滑处理

对于数字图像,存在或大或小的极值构成的噪声,这

些极值在灰度图像上与真实像素上相加减,从而在图像上产 生亮、暗点干扰现象,降低图像质量,对后续的图像处理产 生影响。平滑处理就是为了有效地去除图像中的噪声和干扰 并同时保留图像的原始的几何和拓扑结构特征等信息。滤波 作为图像平滑处理的处理形式,将目标区域与处理核进行乘 积消除掉噪声影响。与一般意义的平滑处理应用不同,本文 选用图像的平滑处理是为了去除腐蚀图像中的玻璃本身形 状的干扰信息,如图1所示。对腐蚀图像的干扰信息的判断 主要是依据图像中与深色的细线状轮廓是否有着明显颜色 深浅的几何形状。



图1 原始腐蚀图像中的干扰信息

通过以下滤波方法对图像进行平滑处理,根据效果和 对信息的要求选择最合适的一种处理方法。

(1)均值滤波:以待改像素点为中心点,取其周围 N×N个像素值的均值对其进行替换,在实际应用中,M和 N是相等的,比较常用的有3×3、5×5和7×7等,模型越 大,图像的失真越严重。

(2)方框滤波:与均值滤波原理相似,区别在于可以 自由选择是否对滤波后的结果归一化。

(3)高斯滤波:与均值滤波和方框滤波不同的是,高 斯滤波会引入权值降低图像的模糊化,提高清晰度,权值大 小与当前像素点与待修改位置的像素点的位置距离成反比, 然后将权值与对应像素点的像素值相乘并将该区域的所有 值求和,然后再选择进行归一化处理。

(4) 中值滤波: 取当前像素点及其周围临近像素点(一

共奇数个像素点)的像素值,然后对这些点处的像素值进行 排序,取中间处的像素值作为处理像素点的结果。

(5) 双边滤波:对处在边缘的信息根据色彩差值赋予 不同的权值进行处理,可以得到与原始图像的边缘信息更接 近的处理图像。

(6) 2D 卷积: 主要区别在于处理核可以自定义, 但 始终包含均值滤波的处理核。

采用以上六种滤波方式分别对粒径 23μm 磨粒研磨后 腐蚀时间为 40min 的图像进行处理,如图 2 所示。从图中 发现,(b)、(c)、(e) 图中的图像与原始图像相比,对整体进 行了模糊化处理,(f) 图双边滤波对原始图像中的不相关的 斑点进行了模糊,突出了裂纹、沟槽等目标轮廓,(d) 图中 的高斯滤波最完整的表达出了图像的细节。为了对目标轮廓 进行完整呈现,选取高斯滤波方式进行图像处理。

1.2 阈值处理

数字图像的阈值处理是去除图像内高于或者低于一定 值的像素点,将其转化为统一值的方法,是实现轮廓检测的 前提。通过阈值处理可以获得目标轮廓的二值图像。常用的 阈值处理方式有二值化阈值处理、截断化阈值处理、超阈值 零处理、低阈值零处理、自适应阈值处理和 Otsu(大津法) 处理。

(1) 二值化阈值处理:将原始图像中高于设定值的像 素点归零,小于设定值的像素点统一定为最大值,从而获得 二值图像的方法。

$$dst(x,y)$$
 $\begin{cases} maxval, src(x,y) > thresh \\ 0, 其他情况 \end{cases}$ (1)

(2) 低阈值零处理:通过将图像中小于或等于阈值的 像素点设置为0,大于阈值的像素点的值保持不变获得二值 图像的处理方法。

$$dst(x,y) \begin{cases} src(x,y), & src(x,y) > thresh\\ 0, & 其他情况 \end{cases}$$
(2)

(3) 截断化阈值处理:将图像中大于阈值的像素点的 值设定为阈值,小于或等于该阈值的像素点的值保持不变的 处理方法。

$$dst(x,y) \begin{cases} thresh, src(x,y) > thresh \\ 0, 其他情况 \end{cases} (3)$$

(4) 自适应阈值处理:通过使用不断变化的设定值不断处理目标区域像素点的方法,与普通阈值处理方法相比,能够更好地处理明暗差异较大的图像。

(5) 超阈值零处理: 与低阈值处理原理正好相反。

$$dst(x,y)$$
 $\begin{cases} 0, & src(x,y) > thresh \\ thresh, 其他情况 \end{cases}$ (4)

(6) Otsu 处理:通过将图像根据阈值分为前景和背景 两部分,根据灰度将阈值从 0 ~ 255 遍历一遍,通过计算前 景和背景的类间方差的最大值确定最佳阈值。

从图 3 可以看出, (a) 图中二值化方法能够大程度将原 始图像的大部分轮廓呈现出来, (b)、(e) 图中对细节处理效 果比 (a) 图全面,能够将原始图像中划痕之外玻璃的基体轮 廓呈现出来, (c) 图截断化使图像整体颜色变暗,造成基体 图像与目标轮廓分辨度不高, (d)、(f) 图中能最完整地呈现 出原始图像,细节表达得更完全。但是基于本研究的目标轮 廓主要是长裂纹、划痕,对细小的压痕和玻璃基体的形貌忽 略,因此二值化阈值处理作为较好的阈值处理方法。

1.3 轮廓边缘检测

图像的边缘是构成图像最基本的要素,在数字图像中 是某一位置像素值与周围相比有明显的跃升和下降构成的

> 所有位置。边缘是图像局部强度变 化最明显的地方,它主要存在于目 标与目标、目标与背景、区域与 区域之间,是图像进行轮廓检测的 前提。图像的梯度则是描述图像 变化的速度的物理量,因此边缘可 通过图像的梯度计算确定。采用 Laplacian算子对图像进行边缘检测 处理。Laplacian算子是一种二阶 导数算子,可以满足不同方向的边 缘检测要求,其3×3的滤波核如 公式5所示。

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \circ src \quad (5)$$

通过轮廓边缘检测处理后得到 图 4 的清晰的亚表面损伤轮廓重绘 制图。

2 结语

通过对比了六种图像平滑处理



图 2 图像平滑处理结果



图 3 阈值化处理结果



图4 轮廓重绘制图

及六种阈值方法后,最后确定采用了高斯滤波、二值化阈值, 以及 Laplacian 算子轮廓边缘处理的图像处理方式得到了清 晰的亚表面损伤图,该图可为亚表面损伤特征的进一步提取 提供有效的数据来源,可用于提取特征裂纹的大小、位置、 角度、形状和区域裂纹分布特征划分等。

参考文献:

[1] Miller PE, Suratwala TI, Wong LL, et al. The distribution of subsurface damage in fused silica[J]. The International Society for Optical Engineering.Proceedings of SPIE, 2005, 5991:1-25.

[2] Shen J, Liu SH, Yi K, et al. Subsurface damage in optical substrates[J]. Optik International Journal for Light & Electron Optics, 2005, 116(6): 288-294.

[3] Suratwala T, Wong L, Miller P, et al. Subsurface mechanical damage distributions during grinding of fused silica[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 2006, 352(52-54): 0-5617.

[4] 李改灵, 吴宇列, 王卓等.光学材料亚表 面损伤深度破坏性测量技术的实验研究[J]. 航空精密制造技术,2006,042(006):19-22.

[5] 王洪祥,李成福,朱本温等.光学元件亚表面缺陷的损伤 性检测方法 [J]. 强激光与粒子束,2014,26(12):129-133.

[6] Trost M, Herffurth T, Schmitz D, et al. Evaluation of subsurface damage by light scattering techniques[J]. Applied Optics, 2013,52(26): 6579-6588.

[7] 张银霞,李大磊,郜伟等.硅片加工表面层损伤检测技术的试验研究[J].人工晶体学报,2011(02):75-80.

[8] 文东辉,洪滔,张克华等.蓝宝石晶体的双面研磨加工[J]. 光学精密工程,2009,017(010):2493-2498.

[9] 王宁昌,姜峰,黄辉等. 脆性材料亚表面损伤检测研究现 状和发展趋势[J]. 机械工程学报,2017,53(9):170-179.

[10] Lucca DA, Brinksmeier E, Goch G. Progress in Assessing Surface and Subsurface Integrity[J]. Cirp Annals Manufacturing Technology, 1998, 47(2): 669-693.

[11] Chen JB, Fang QH, Li P. Effect of grinding wheel spindle vibration on surface roughness and subsurface damage in brittle material grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 91: 12-23.

[12] 谢偎凡,朱宗玖.基于灰度变化的数字图像降噪方法[J]. 黑龙江科技信息,2017,000(001):97-98.

[13] 曹宇. 基于数字图像处理的零件表面裂纹检测研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学,2014.

作者简介: 陈兆翔 (1988.01-), 男, 汉族, 陕西西安人, 本科, 工程师, 研究方向: 精密测量与精密加工。