光学元件亚表面损伤图像处理方法

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。

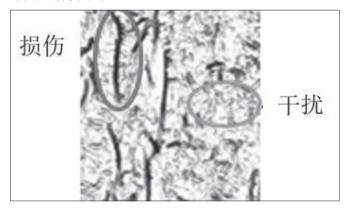


图 1 原始腐蚀图像中的干扰信息

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 23 μm 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。

$$dst(x,y)$$
 { thresh, $src(x,y) > thresh$ 0, 其他情况

- (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。

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

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

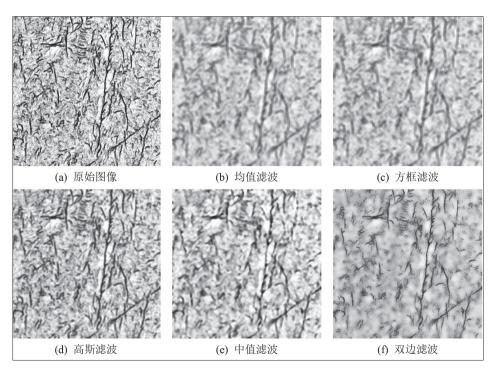


图 2 图像平滑处理结果

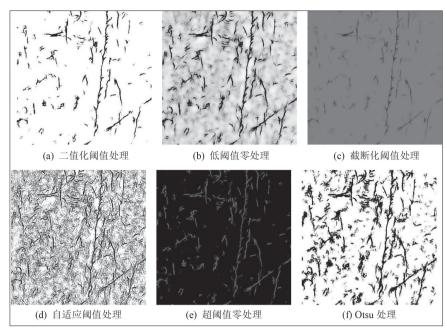


图 3 阈值化处理结果

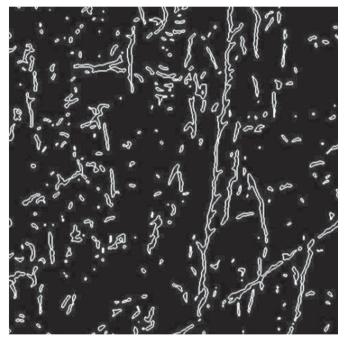


图 4 轮廓重绘制图

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。