

引用格式:段珊,姜淑华,王春阳.光学元件亚表面损伤散射特性仿真研究[J].电光与控制,2018,25(9):75-77,105. DUAN S, JIANG S H, WANG C Y. Simulation study on sub-surface damage scattering characteristics of optical elements [J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(9):75-77, 105.

光学元件亚表面损伤散射特性仿真研究

段珊, 姜淑华, 王春阳
(长春理工大学电子信息工程学院, 长春 130022)

摘要: 光学元件在研抛过程中不可避免地引入亚表层损伤缺陷,会破坏基底材料的均匀性,使入射的光波发生散射现象,严重影响产品光学性能。损伤隐蔽复杂的特点使得对其散射信号的研究变得十分困难。一种基于光散射法的亚表面无损检测方法——激光共焦显微检测方法,利用亚表面损伤对入射光的散射调制信号分析光学元件的亚表面损伤信息,具有快速、准确的特点。针对损伤的散射特性,结合时域有限差分法(FDTD),对颗粒状和微裂纹两类特殊损伤建立电磁仿真模型,研究聚焦光入射的散射光场分布,以及不同深度下探测得到光强变化曲线,得出损伤光强探测曲线能够反映出颗粒尺寸与深度及微裂纹宽度与深度的信息。研究结果对亚表面损伤无损探测方法的探索具有一定的理论指导价值。

关键词: 光学元件; 亚表面损伤; 聚焦光; 时域有限差分法; 光散射

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.09.016

Simulation Study on Sub-surface Damage Scattering Characteristics of Optical Elements

DUAN Shan, JIANG Shu-hua, WANG Chun-yang

(Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The sub-surface damage of the optical elements due to grinding and polishing may destroy the uniformity of the base material, result in the scattering of incident light, and seriously affect the optical properties of the product. It is very difficult to study the scattered signal due to the complex characteristics of the damage. The laser confocal microscopy testing based on the light scattering method is a fast and accurate sub-surface nondestructive testing method. It uses the sub-surface damage to the incident light scattering modulation signal to analyze the sub-surface damage information of the optical component. Aiming at the scattering characteristics of the damage, the Finite Difference Time Domain (FDTD) method is used to establish the electromagnetic simulation model for the special damage of particles and microcracks. The scattering field distribution of the incident light is studied, and the curve of the light intensity is detected at different depths. The damage light intensity detection curve can reflect the information of the size and depth of the particles and the width and depth of the microcracks. The results of the study have important theoretical significance for the study on nondestructive detection of sub-surface damage of optical elements.

Key words: optical element; sub-surface damage; focused light; FDTD; light scattering

0 引言

光学元件亚表面损伤指的是在其近表面区域由于机械加工产生的裂纹、变形和杂质等内部缺陷,它的存在严重影响了光学元件的使用性能和成像精度,直接

导致抗激光损伤阈值的下降和光学元件寿命的缩短^[1-3]。目前光学元件的亚表面损伤检测研究侧重于非破坏性检测技术的发展,主要有激光散射法、全内反射法、X射线衍射法和光学相干层析技术等^[4-5]。其中,激光散射法对检测微/纳尺度的缺陷最具发展潜力,其本质是利用材料缺陷对入射光的散射调制特性来反映缺陷的位置和大小等信息^[6]。然而,由于光学元件亚表面缺陷位置隐蔽,类型及大小较复杂,因此对亚表面损伤的散射特性研究显得非常困难,目前还鲜见报道^[7-8]。

收稿日期:2017-10-10

修回日期:2018-06-27

基金项目:吉林省科技厅重点科研攻关项目(20170204058GX)

作者简介:段珊(1992—),女,河北保定人,硕士生,研究方向为光学检测、光电测试等。

本文采用时域有限差分法(FDTD),在合理假设的基础上建立亚表面损伤模型并对散射光场进行数值计算,得到聚焦光斑到达损伤后的散射光场分布,以及不同深度下共聚焦探测得到的光强变化。

1 散射条件假设

以会聚波形式入射到某颗粒上的光路,如图1所示。到目前为止还无法得到严格的散射解,但是共聚焦测量恰恰要求入射光是会聚光,也就意味着使用该测量方法无法得出准确的散射光强分布。为了利用现有的理论来解释亚表面损伤的散射问题,对入射条件做出如下假设:首先将入射的会聚光等角度间隔分割成 N 个环带,将每个环带再分割成 M 等份,认为每一份入射光都是理想平面波^[9-11],这样就可以利用平面波的散射结论来研究每一个子光束入射到亚表面损伤中某一点的散射问题。

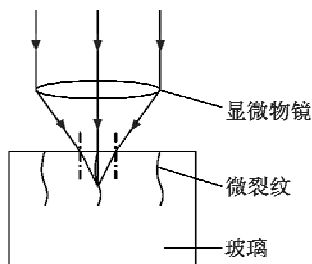


图1 聚焦光入射亚表面损伤

Fig. 1 Focused light incident sub-surface damage

2 损伤散射模型建立

FDTD算法是一种基于有限差分原理的时域算法,该算法从Maxwell旋度方程出发,在空间和时间上对电场 E 和磁场 H 分量交替抽样离散、计算,而电磁场在空间中也是电场和磁场交替向前传播的^[12],所以FDTD算法能合理地描述电磁场在特定空间中的传播特性。实验采用完美匹配层(PML)边界获得FDTD计算区域,来等效模拟无限大区域的损伤散射特性,结果证明吸收效果良好。

实验采用颗粒和微裂纹损伤作为仿真研究对象。选取大小为 $20\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ 的矩形作为光波散射区域,基底材料主要成分为二氧化硅(SiO_2)。图2所示为共聚焦显微测量剖面示意图和二维散射模型,其中,外层边界为PML,三角形 $\triangle abc$ 为积分区域,表示能被探测器接收到信号的区域。介质的交界面上不存在自由电荷和传导电荷,计算中不考虑其他杂质对光场分布的影响以及材料吸收的影响。

网格剖分是FDTD离散的第一步,其结果直接影响最终的计算精度和运算时间^[13]。在一定计算区域内,随

着剖分网格单元数量增加,计算结果将逐渐接近精确解,但同时也需要更多的存储容量和运算时间^[14]。经过多次实验研究表明,取最大单元尺寸 $0.08\ \mu\text{m}$,最小单元尺寸 $0.0003\ \mu\text{m}$,可以获得稳定精确的计算结果。图3为网格剖分前后微裂纹示意图。

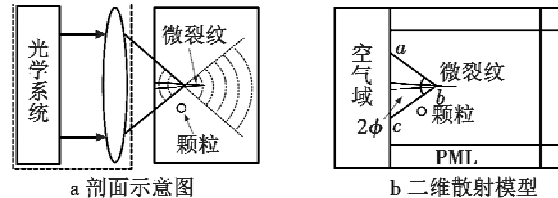


图2 共聚焦显微测量剖面示意图和二维散射模型

Fig. 2 Confocal microscopy profile and two-dimensional scattering model

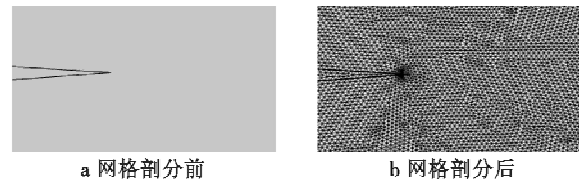


图3 微裂纹的网格剖分前后示意图

Fig. 3 Microcracks before and after the mesh generation

3 损伤探测仿真实验

仿真实验中加载的电磁场为

$$E(x, y, z=0) = U(x, y, 0) \exp(-ik_0 \cdot (x^2 + y^2)/2f) \quad (1)$$

式中: $U(x, y, 0)$ 为聚焦前的光波; f 为焦距。

聚焦光束从矩形的左边界垂直入射,逐渐向右移动,即聚焦点沿深度方向进行探测,聚焦光斑直径为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。仿真中,缺陷的折射率设为1,入射光源的中心波长为 $475\ \text{nm}$,入射波电场强度幅值为 $1.0\ \text{V/m}$ 。对多组不同参数的缺陷进行仿真实验,所得结果趋势相同,本文选取其中一种结果给出。

3.1 颗粒缺陷的探测

图4所示为聚焦光点到达颗粒不同位置上的光场强度分布情况,其中,颗粒粒径为 $0.5\ \mu\text{m}$,深度为 $10\ \mu\text{m}$ 。

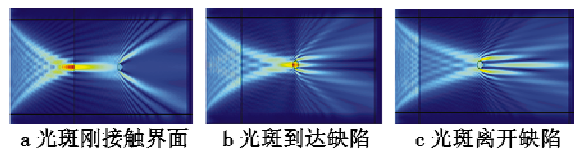


图4 颗粒在不同探测深度下的总场分布情况

Fig. 4 The total field distribution at different depths of detection

由图4可以看出,聚焦光在接触到颗粒界面后光束向两侧发散,再穿过颗粒内部时,光能聚集在颗粒后边缘,最后离开颗粒光束慢慢汇聚。

散射光强曲线峰值位置与损伤尺寸和深度有关系,假设颗粒深度和尺寸范围分别在 $2 \sim 10\ \mu\text{m}$, $0.2 \sim 1.0$

μm 之间变化,经仿真实验分析得出不同深度与尺寸的颗粒散射光强探测曲线峰值位置数据如表 1 所示。

表 1 散射光强探测曲线峰值位置
Table 1 Peak position of scattered light intensity detection curve

深度	尺寸								
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2	1.6	1.8	1.8	4.9	5.3	5.3	5.4	5.7	5.7
4	3.7	3.7	3.8	6.8	7.1	7.0	7.3	7.4	7.6
6	6.3	6.4	6.6	8.5	8.6	8.6	8.7	8.7	8.8
8	8.2	8.3	8.4	10.0	10.1	10.3	10.4	10.5	10.7
10	10.2	10.2	10.3	12.1	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3

选取深度为 6 μm,尺寸分别为 0.2 μm,0.5 μm 和 1.0 μm 的颗粒,给出存在单一颗粒缺陷时散射光强探测曲线,如图 5 所示。

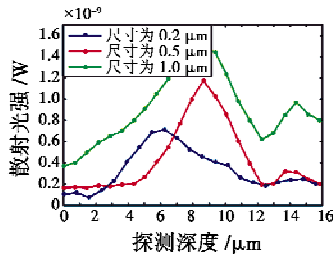


图 5 不同颗粒尺寸的散射光强探测曲线
Fig. 5 Scattered-light intensity detection curves for different particle sizes

可以发现:当颗粒尺寸小于聚焦光斑尺寸时,颗粒所在深度位置对应探测曲线峰值位置;而当颗粒尺寸大于等于聚焦光斑尺寸时,颗粒所在深度位置比探测曲线的峰值稍浅一些,这是由于聚焦光线在颗粒与基底介质的分界面处发生多次折射与反射造成的。另外,所有曲线在最大波峰之后,还出现逐渐减小的波峰。这是受共焦探测轴向响应特性曲线的影响,如图 6 所示,光强曲线具有 Sinc 函数曲线的特点,因此会出现次波峰。

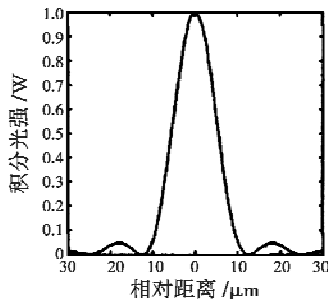


图 6 轴向响应特性曲线
Fig. 6 Axial response characteristic curve

3.2 微裂纹的探测

图 7 所示为聚焦光点到达微裂纹不同位置时的光场强度分布,其中,微裂纹宽度为 1 μm,深度为 5 μm。

由图 7 可以看出,聚焦光刚接触微裂纹时被分散成两束光分布于微裂纹两侧,随着探测深度增加,两侧

光束能量逐渐向裂纹尾端汇聚,直至光斑离开微裂纹。

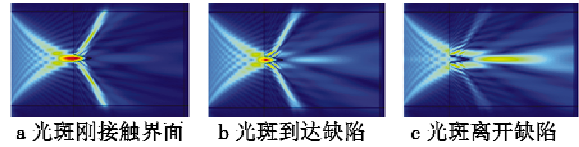


图 7 微裂纹在不同探测深度下的总场分布情况
Fig. 7 Total field distribution of microcracks at different detection depths

假设微裂纹的宽度和深度的范围分别为 0.2 ~ 2.0 μm,5 ~ 15 μm。图 8a 为微裂纹宽度与散射光强探测曲线峰值的变化规律,表明随着微裂纹宽度的增加,散射光强逐渐增大。结合颗粒计算结果可以得出,缺陷横向宽度越大,其背向散射光越强。这里给出宽度为 1 μm,深度分别为 5 μm 和 15 μm,存在单一微裂纹时散射光强探测曲线,如图 8b 和图 8c 所示。两条微裂纹探测曲线并无明显差别,这说明裂纹深度对亚表面微裂纹散射光强度的影响很微弱。而且无论聚焦光斑在裂纹内部还是在外部介质时,随着探测聚焦光沿深度方向移动,进入到裂纹内部参与散射的光强度始终逐渐减小,所以光强探测曲线无法直观地反映出裂纹的深度,该结论已被共焦探测实验证实。

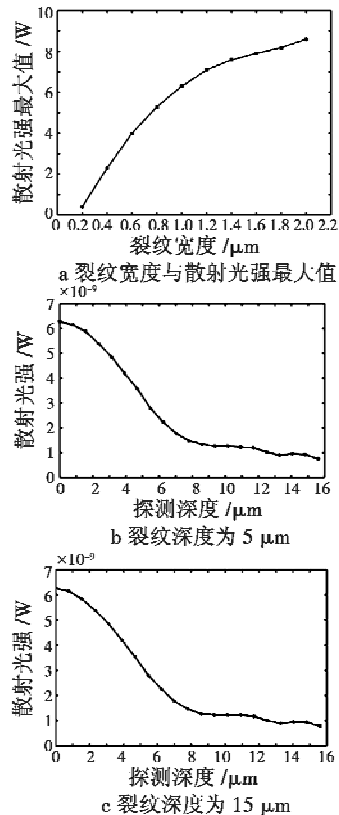


图 8 裂纹宽度和深度对散射光强探测曲线的影响
Fig. 8 Effect of crack width and depth on the detection curve of scattered light intensity

(下转第 105 页)

有较明显的指导意义;

3) 实验表明,被测弹载星敏感器的主要误差项为载体运动及 CCD 旋转引起的误差,考虑到星敏感器的实际工况,不考虑载体运动产生的误差是不全面、不准确的。

参考文献

- [1] 何家维. 高精度全天时星敏感器关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
- [2] QIAN H M, SUN L, CAI J N, et al. A starlight refraction scheme with single star sensor used in autonomous satellite navigation system [J]. *Acta Astronautica*, 2014 (96): 45-52.
- [3] JIANG F, WU Q W, WANG Z S, et al. Thermal design and analysis of high power star sensors[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015(6): 52-60.
- [4] 伍雁雄. 高精度星敏感器若干关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [5] 郝雪涛,张广军,江洁. 星敏感器模型参数分析与校准方法研究[J]. *光电工程*, 2005, 32(3): 5-8.
- [6] 王永胜,王宏力,刘洁梁,等. 星敏感器误差模型及参数分析[J]. *光电与控制*, 2014, 21(2): 85-89.
- [7] 郑循江,张广军,毛晓楠. 一种甚高精度星敏感器精度测试方法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1605-1609.
- [8] 孙亚辉. 星敏感器应用中的误差分析与校正[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [9] 朱华征,范大鹏,马东玺,等. 载体运动对光电成像系统性能的影响分析[J]. *红外技术*, 2008, 30(10): 586-590.
- [10] 王宏力,陆敬辉,崔祥祥. 大视场星敏感器星光制导技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [11] 张智永,周晓尧,范大鹏. 光电探测系统指向误差分析、建模与修正[J]. *航空学报*, 2011, 32(11): 2042-2054.

(上接第 77 页)

4 结论

本文基于一定的散射条件假设,建立了散射测量仿真模型,模拟了聚焦光束对亚表面损伤的探测过程,结合 FDTD 算法对损伤缺陷调制后的光场分布及散射光强进行计算,得到了颗粒光强散射探测曲线。研究表明,颗粒尺寸和深度对散射光强探测曲线峰值位置的影响有一定的规律,微裂纹的宽度增加会使散射光增强,裂纹深度对散射光强探测曲线影响微弱。损伤缺陷的散射光强探测曲线包含了其位置和大小信息,只要提取到亚表面损伤的散射光强信号,就可以结合这些规律及光场分布的特点来分析损伤信息,为亚表层损伤光散射检测技术的深入研究提供了重要的理论支持。

参考文献

- [1] 伍秀玘,高万荣,张运旭,等. 非破坏性玻璃亚表面缺陷定量检测新方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 157-164.
- [2] 王景贺,张磊,王洪祥,等. 基于荧光共聚焦技术熔石英亚表层损伤检测方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 186-194.
- [3] 田爱玲,王会婷,党娟娟,等. 抛光表面的亚表层损伤检测方法研究[J]. *光子学报*, 2013, 42(2): 214-218.
- [4] 王华东,张泰华. 光学材料亚表面损伤的表征与检测技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 25-36.
- [5] TROST M, HERFFURTH T, SCHMITZ D, et al. Evaluation of subsurface damage by light scattering techniques [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(26): 6579-6588.
- [6] 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.
- [7] 王辉. 基于层析成像法的亚表层损伤散射特性研究[D]. 西安:西安工业大学,2013.
- [8] 田爱玲,田玉珺,王春慧,等. 聚焦光在亚表面损伤介质中的散射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 121-127.
- [9] 张磊,黄利,陈伟,等. 熔石英和磷酸盐铍玻璃表面三角形微裂纹对入射光的散射分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 381-386.
- [10] 田玉珺. 光在亚表面损伤介质中的传播特性研究[D]. 西安:西安工业大学,2015.
- [11] WANG C G, CUI D L, YAN Z Y, et al. Finite element triangle mesh generation in planar area[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(2): 256-260.
- [12] 李长侑. 电磁散射问题的 FDTD 分析和仿真软件实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [13] 贺晋芝. 适用于 FDTD 方法的目标电磁建模研究与应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [14] 苏倩倩,张国文,陶华,等. 非线性介质表面缺陷对激光光场的调制[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2585-2590.