

熔石英元件小尺寸集群损伤修复及检测技术 (特邀)

石峰¹, 乔硕¹, 邓明杰¹, 宋辞¹, 铁贵鹏¹, 田野¹, 郝群²,
王姗姗², 周海峰³, 陈坚³, 孙国燕¹, 申箫¹

- (1. 国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073;
2. 北京理工大学光电学院, 北京 100081;
3. 合肥知常光电科技有限公司, 安徽合肥 230000)

摘要: 针对现有小尺寸集群损伤修复及检测技术仍不完善的问题, 重点研究亚表面缺陷多模态原位检测方法, 从损伤样件表面损伤数量和尺寸、典型小尺寸损伤的形貌、光热吸收、荧光面积等多项指标进行了系统测量和分析, 并开展了磁流变修复研究。研究表明: 熔石英小尺寸损伤内部的吸收性杂质是影响元件性能的主要因素, 在磁流变缎带接触到损伤底部前, 损伤的整体吸收和荧光分布呈上升趋势; 高重频激光对磁流变修复后的损伤辐照过程是一个由慢变快、由杂质到本体、由边缘逐渐向外扩张的过程, 能够有效对磁流变修复后的表面进一步起到修复作用, 可作为组合修复工艺的第三道工序。研究结果对光学元件检测表征体系的构建提供参考。

关键词: 光学工程; 熔石英; 集群损伤; 损伤修复; 多模态检测

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220539

Small-scale cluster damage mitigation and detection on fused silica surface (*invited*)

Shi Feng¹, Qiao Shuo¹, Deng Mingjie¹, Song Ci¹, Tie Guipeng¹, Tian Ye¹, Hao Qun²,
Wang Shanshan², Zhou Haifeng³, Chen Jian³, Sun Guoyan¹, Shen Xiao¹

- (1. College of Intelligence Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. ZC Optoelectronic Technologies, LTD, Hefei 230000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing small-scale cluster damage mitigation and detection technology is still imperfect, it focuses on the multi-modal in-situ detection method of sub surface defects, and systematically measures and analyzes the number and size of surface damage of damaged samples, the morphology of typical small-scale damage, light and heat absorption, fluorescent area and other indicators, and carries out magnetorheological repair research. The results show that the absorbent impurities inside the small-scale damage of fused silica are the main factors affecting the performance of the components. Before the magnetorheological ribbon contacts the bottom of the damage, the overall absorption and fluorescence distribution of the damage show an upward trend. The damage irradiation process of high repetition rate laser after magnetorheological repair is a process from slow to fast, from impurity to body, and gradually expanding outward from the edge. It can effectively repair the surface after magnetorheological repair, and can be used as the

收稿日期: 2022-08-02; 修订日期: 2022-09-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2202403-2, 2020YFB2007504); 国家自然科学基金 (62175259)

作者简介: 石峰, 男, 研究员, 博士, 主要从事光学元件超精密加工方面的研究。

third process of combined repair process. The research results provide a reference for the construction of optical element detection and characterization system.

Key words: optical engineering; fused silica; cluster damage; damage mitigation; multi-modal detection

0 引言

随着高能量高功率激光系统的发展,对光学元件激光性能的要求也日益提高。熔石英材料由于具有机械强度高、化学稳定性好、光谱透过宽、抗热冲击、耐高温变形、耐射线辐照和电绝缘等诸多优良性能,被广泛应用于各类大型激光器中^[1-4]。目前,熔石英元件的紫外激光损伤问题是制约激光系统发展的瓶颈。在熔石英元件制造、抛光及后处理过程中可能会引入各种缺陷和污染,这些损伤前驱体是导致熔石英元件抗激光损伤性能下降的主要因素,其中表面及亚表面缺陷诱导形成的激光损伤危害最为严重^[5-8]。此外,针对熔石英元件供不应求的现状,对熔石英损伤元件修复再利用的技术开始登上舞台,然而现有的小尺寸集群损伤修复及检测技术存在很大提升空间,对其表面修复过程的研究仍不完善。

为了提升高功率激光系统中强光元件的负载能力,解决大口径熔石英元件面临的制造难、精度低、易损伤等问题,国内外研究者以检测为牵引,在制造和修复领域开展了大量的研究,并取得了突破性进展^[9-14]。美国北卡罗莱纳大学威廉姆斯使用带有荧光颗粒的磨料对熔石英样品进行抛光,使用共聚焦显微镜对亚表面缺陷进行检测,并与超景深显微镜、白光干涉仪、原子力显微镜等其它手段的检测结果进行对比,结果验证了共聚焦显微镜对亚表面缺陷检测的可行性和准确性^[15]。浙江大学张健浦使用共聚焦激光扫描显微镜对熔石英元件进行层析扫描实验,并通过三维重建算法和缺陷测量结果得到了熔石英亚表面缺陷的具体三维信息^[16]。中国科学院上海光学精密机械研究所徐俊海等人使用表面热透镜技术测量了不同工艺条件下镀制的 TiO₂ 单层膜样品在 1064 nm 处的弱吸收值,通过激光打靶设备测量了样品的抗激光损伤阈值特性,根据吸收值的变化情况反映了不同镀制工艺对损伤性能的影响^[17]。中国工程物理研究院激光聚变研究中心刘红婕等人开展了光学元件亚表面缺陷的荧光成像技术研究,通过系统优化激发波

长、成像光谱、成像光路及探测器等影响探测精度和探测灵敏度的参数,研制出小口径荧光缺陷检测样机^[18]。美国 Corning 公司使用光斑尺寸为 10.6 μm 的 CO₂ 激光对熔石英元件进行单脉冲和多脉冲激光打靶实验,使用 Zeiss 公司生产的荧光共聚焦显微镜对损伤坑的深度、直径和体积进行检测,并与数值模拟的预测结果进行了比较,模拟结果精确地预测了损伤坑的深度和体积,模型与实验的误差小于 10%^[19]。美国利弗莫尔国家实验室 R. A. Negres 等人结合荧光共聚焦显微技术和红外热成像技术绘制了激光改性熔石英在连续紫外激光辐照下局部损伤表面的温度和荧光强度动态图,并基于热扩散模型估算出通过线性吸收机制沉积的能量,导出了改性材料的线性吸收系数^[20]。现有的检测手段对各项指标参数几乎达到全覆盖,并已发展到一定的精度水平,能够满足研究者对熔石英元件微米甚至亚微米级别的缺陷研究,但是对于更小尺寸的纳米级损伤前驱体的观测和认知手段仍然有限,难以系统地开展纳米损伤前驱体的检测和工艺研究。

综上所述,目前针对熔石英元件亚表面缺陷的检测与表征方法已取得了一定进展,但其与缺陷诱导的激光损伤特性还难以构成直接关联,且针对小尺寸集群损伤修复及检测技术还有待完善。文中围绕目前熔石英元件评价表征体系所存在的问题,引入亚表面缺陷多模态原位检测方法,从损伤样件表面损伤数量和尺寸、典型小尺寸损伤的形貌、光热吸收、荧光面积等多项指标进行了系统测量和分析,深入探究了制造与修复过程中熔石英元件缺陷和损伤的演变规律,有助于优化制造修复工艺流程,抑制元件亚表面缺陷,提升元件激光负载能力。

1 实验装置

1.1 磁流变均匀去除装置

如图 1 所示为笔者课题组自主搭建的激光损伤阈值测试平台。为了得到与实际强光系统中损伤水

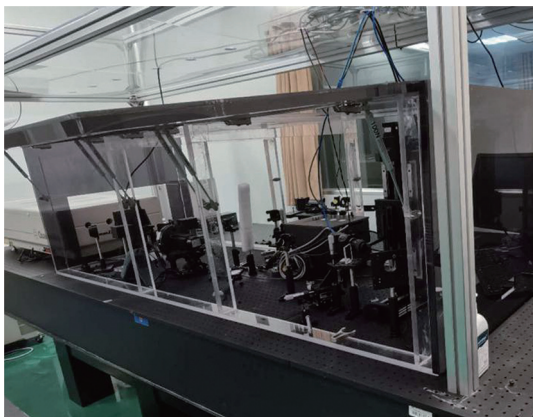


图 1 激光损伤阈值测试平台

Fig.1 Laser damage threshold test platform

平相当的熔石英损伤元件,使用该装置对熔石英元件进行强光打靶处理。选取一块材料为 Heraeus 312、规格为 50 mm×50 mm×10 mm 的熔石英元件作为实验样品,元件表面粗糙度为 0.975 nm,满足实际系统要求的表面粗糙度小于 1 nm 指标。使用波长为 355 nm、调 Q 后脉宽为 7 ns 的脉冲激光通过光栅扫描路径辐照熔石英元件,制备损伤样品。激光输出能量均值 65 mJ, 1/e² 光斑半径为 0.5 cm, 计算所得能量密度值约为 8.28 J/cm²。

图 2 所示为磁流变修复光学元件过程。为深入

揭示磁流变对熔石英元件小尺寸损伤的修复机理,使用自主研发的 KDMRF-1000 F 磁流变机床对熔石英损伤元件进行逐层修复实验,每次修复深度为 1 μm,表 1 为磁流变其余工艺参数。实验中,磁流变修复损伤表面会产生明显的拖尾现象,破坏样品表面质量,因此在逐层去除过程中始终保持加工方向不变,以最大程度降低损伤向外扩散。在均匀去除实验中,直接观察样品可发现其表面有少量大尺寸损伤点,但无法观察到密集的小尺寸损伤点,使用超光滑表面激光散射缺陷检测仪检测,可观察到大量小尺寸损伤点。



图 2 磁流变修复损伤实物图

Fig.2 Magnetorheological repair damage

表 1 磁流变工艺参数

Tab.1 Magnetorheological process parameters

Parameter	Rotation number/r·min ⁻¹	Rate of flow/L·min ⁻¹	Field current/A	Indentation depth/mm
Value	260	120	8	0.2

1.2 多模态原位检测装置

多模态原位检测法是指针对同一位置同一对象的不同性能指标进行多项检测,相比传统的检测手段和思路,多模态检测法的相关性更强,检测更高效,评估更全面。多模态原位检测装置总体硬件结构设计如图 3 所示。多模态原位检测装置基于光热弱吸收检测、激光共聚焦显微检测、荧光显微检测和激光损伤测试四种检测表征技术组成,通过高精度运动平台对表面微区的固定位置进行原位检测。该装置设计引入激光损伤测试功能,但现阶段由于时间关系该功能暂未实装。该设备包括四个检测子系统和两个相关控制系统,分别为:光热显微成像子系统,激光共聚

焦显微成像子系统,荧光显微成像子系统,激光损伤检测子系统,电控及信号采集子系统和软件子系统。基于逆向哈特曼和“以小拼大”的子孔径拼接测量原理,提出了一种逆向哈特曼阵列拼接测量新方法,如图 4 所示。首先将被测元件划分为若干相互重叠的子孔径,而后采用逆向哈特曼阵列测头分别测量各子孔径的斜率误差,最后利用各子孔径重叠区的冗余数据进行数据拼接,得到全口径斜率误差,并重构出三维面形。与现有测量方法相比较,逆向哈特曼阵列拼接测量方法能够在实现纳弧度斜率测量精度的同时,大幅提高测量分辨率和测量口径范围,显著提高测量效率。

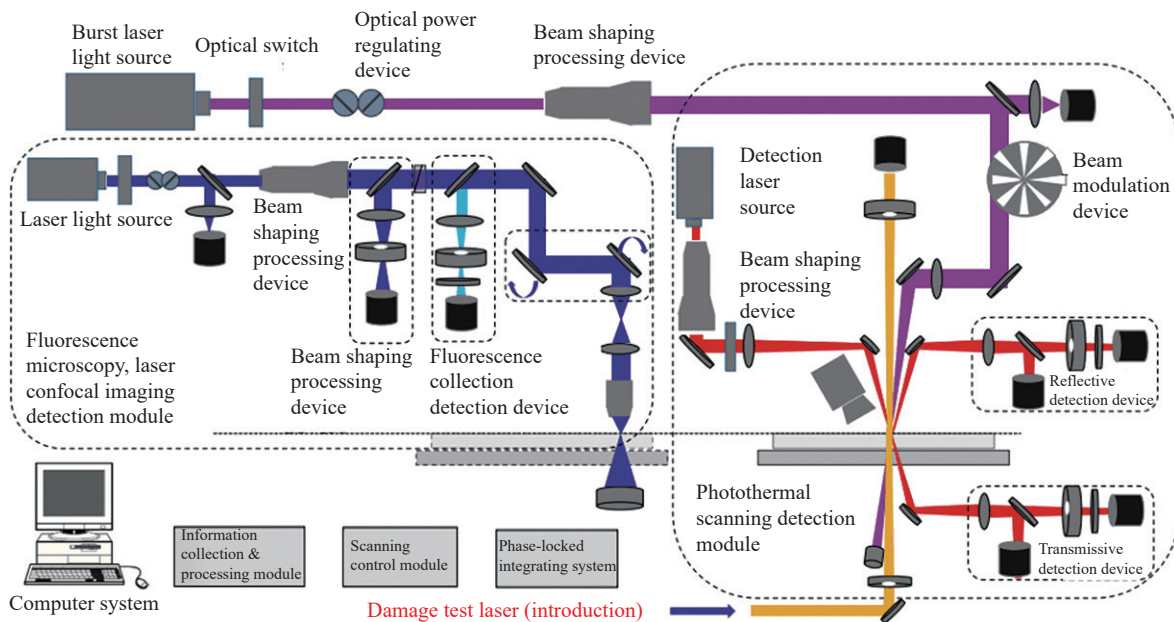


图 3 多模态原位检测装置硬件结构图

Fig.3 Hardware structure diagram of multi-mode in-situ detection device

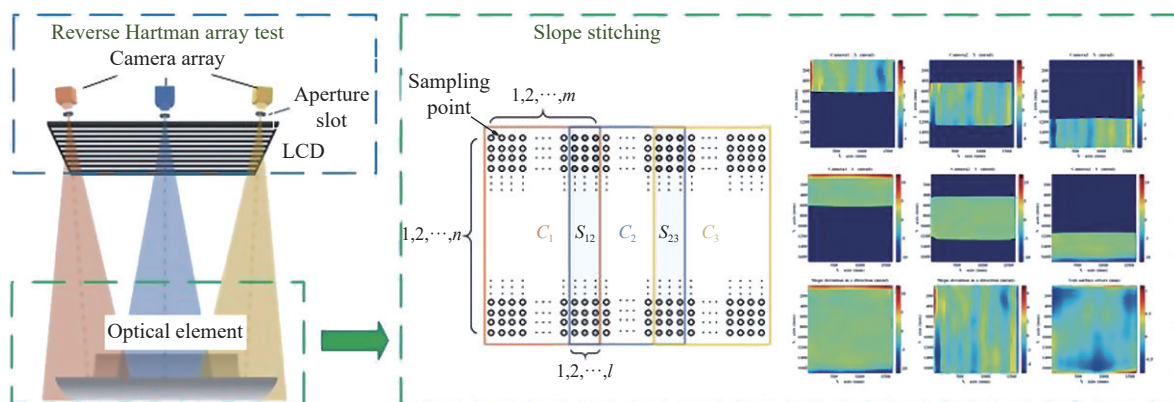


图 4 逆向哈特曼阵列拼接测量原理图

Fig.4 Principle of Reverse Hartman array splicing measurement

2 集群损伤修复及多模态检测

2.1 拖尾现象

磁流变在加工损伤表面时，一方面磁流变会对损伤表面产生足够的剪切去除作用；另一方面，由于可塑性的存在，磁流变液会充满损伤凹陷区域，在表面去除的同时为了保持磁性颗粒的链条结构，损伤内部也会受到较大的切削力，从而在剪切去除方向形成一种新的拖尾现象。图 5 为磁流变去除损伤过程中形成拖尾结构的剖面图。

磁流变加工损伤表面时由于去除效率不均匀产生的拖尾被称为“彗尾”缺陷。这种缺陷的产生会影

响元件表面质量，增加磁流变整体去除量。图 6 为磁流变修复损伤过程中“彗尾”缺陷从产生到去除整体变化情况。可以看到，当损伤被磁流变去除后“彗尾”缺陷仍然存在，需要进一步分配去除量才能将其完全消除。此外，当“彗尾”缺陷的来源是大尺寸损伤时，甚至可能出现无法彻底消除的情况。磁场强度和单次驻留时间是影响“彗尾”缺陷产生的主要原因。磁场强度越大，损伤内部磁性颗粒形成的直链结构越稳定，切削力越强；单次驻留时间越长，去除量越大，“彗尾”缺陷出现的概率也越大。因此，在实际设计抛光工艺时，应尽可能少量多次进行磁流变加工，可以有效缓解“彗尾”缺陷的产生。

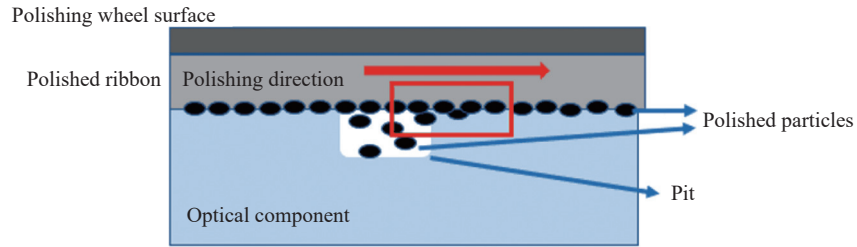


图 5 磁流变去除损伤剖面图

Fig.5 Magnetorheological damage removal profile

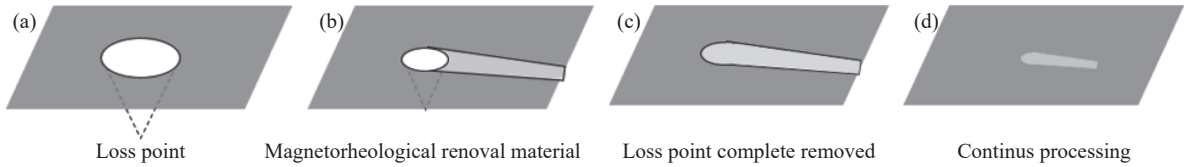


图 6 磁流变去除拖尾整体流程图

Fig.6 The overall flow chart of magnetorheological removal of tailing

2.2 修复过程中小尺寸损伤多模态检测

2.2.1 损伤尺寸及数量分析

使用超光滑表面激光散射缺陷检测仪对磁流变逐层修复样件表面进行观察,不同修复深度下熔石英表面损伤的暗场显微散射图像如图 7 所示。基于散射图像,对不同修复深度下熔石英表面损伤的尺寸和数量进行统计分析,发现 50 μm 以下损伤数量随修复

深度增加整体呈下降趋势,对比修复前损伤数和修复深度 5 μm 后损伤数,如图 8 所示,在磁流变修复前,样件中 50 μm 以下损伤数占总损伤数的 62%。在修复深度达到 5 μm 后,50 μm 以下损伤占总损伤数的 59%,损伤总数由 2 600 多个降低至 1 500 余个,减少了约 42%。结果表明 50 μm 以下损伤能够有效被磁流变修复。

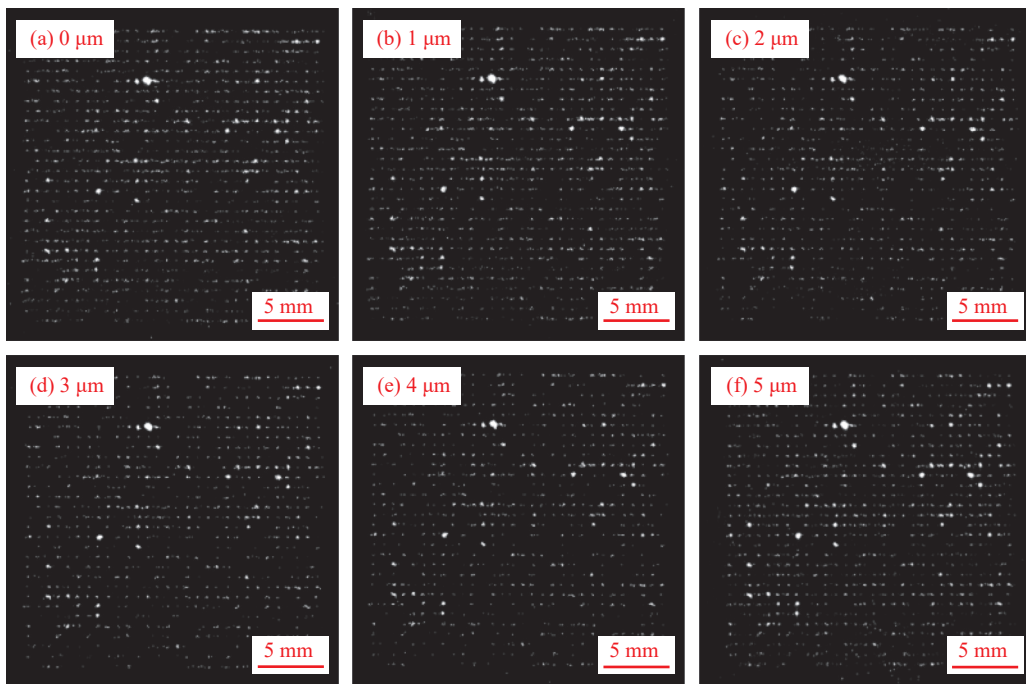


图 7 不同修复深度下损伤暗场成像图^[21]

Fig.7 Dark field imaging of damage at different repair depths^[21]

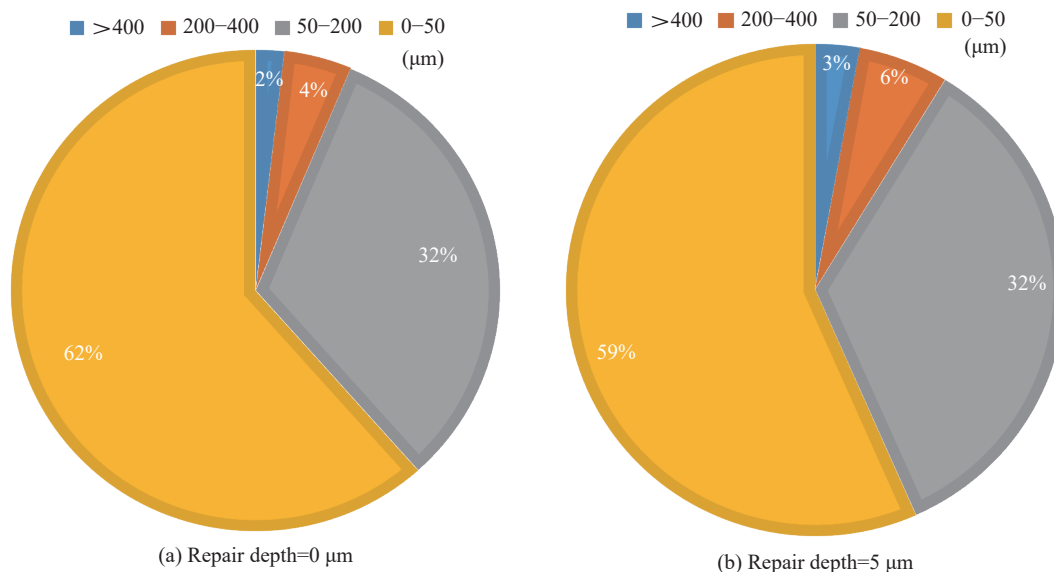


图 8 损伤尺寸与数量随修复深度演变规律

Fig.8 Evolution of damage size and number with repair depth

2.2.2 损伤形貌分析

选取一个横向尺寸 50 μm 以下的典型损伤, 使用原子力显微镜对该损伤进行了多次原位测量, 分析其形貌演变过程, 测量结果如图 9 所示, 损伤的剖面深度如图 10 所示。根据损伤形貌和轮廓变化, 损伤修复过程可划分为 3 个阶段: 未接触损伤内部阶段、初始接触阶段、损伤修复完成阶段。在未接触损伤内部

阶段, 修复深度为 0~2 μm , 此时除损伤横向尺寸减小, 未见其他变化, 主要是由于磁流变胶带厚度不足, 接触不到损伤内部。初始接触阶段, 其修复深度为 2~4 μm , 磁流变既对损伤表面进行去除, 同时也开始与内部接触, 此时横向尺寸减小, 内部轮廓逐渐变化, 但由于压深不同, 此时的表面去除速率高于内部去除速率, 修复过程仍在继续。在损伤修复完成阶段, 其

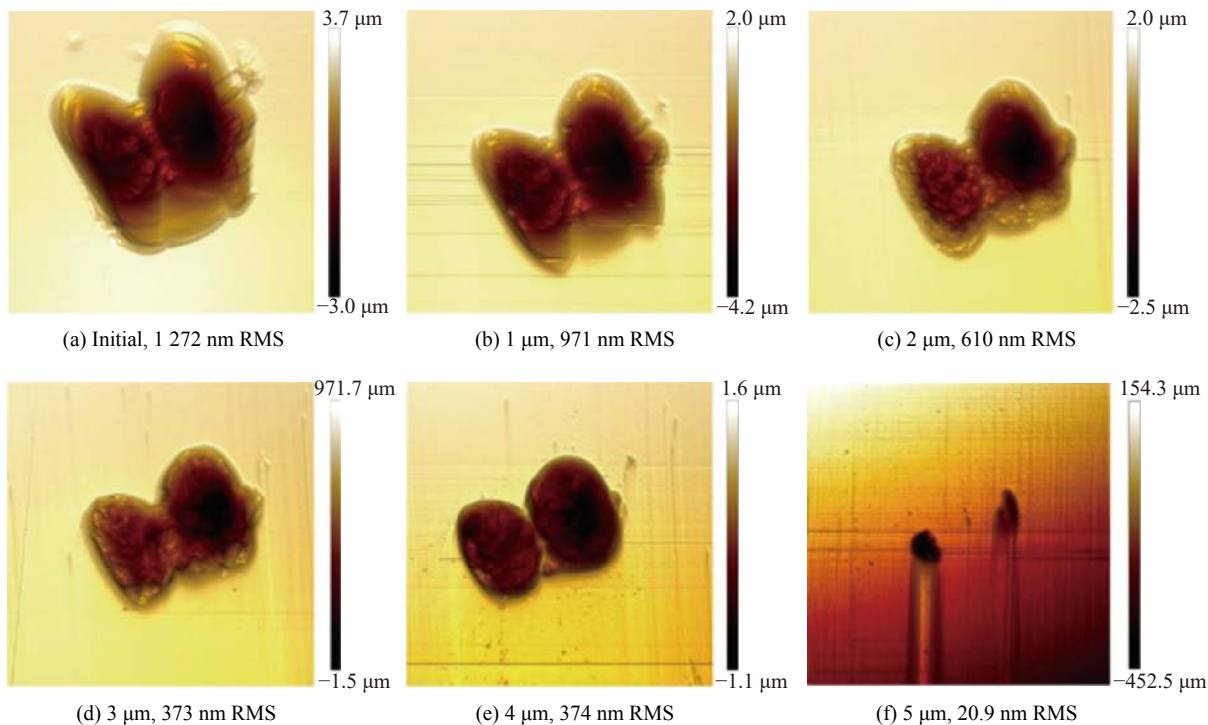


图 9 损伤的微观形貌演变^[21]

Fig.9 Microstructure evolution of damage^[21]

修复深度为 4~5 μm , 此时修复深度已经超过损伤深度, 基本完成了整个小尺寸损伤的修复过程。

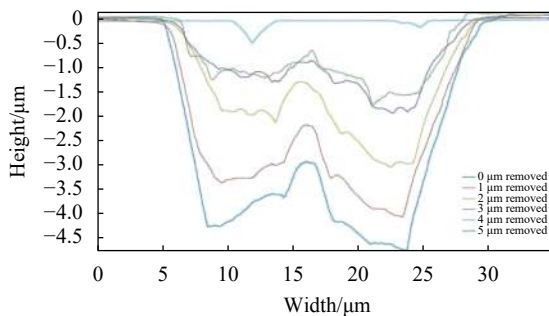


图 10 损伤的剖面结构曲线^[21]

Fig.10 Damaged section structure curve^[21]

2.2.3 荧光面积分析

激光诱导荧光成像是激光照射样品后荧光发射的检测方法, 采用该方法原位测试了熔石英典型损伤内部荧光分布情况, 结果如图 11 所示。对检测结果图像预处理, 其损伤的荧光面积百分比如图 12 所示。分析可知, 在损伤修复前, 熔石英损伤内部已存在荧光物质。在修复深度为 0~2 μm 时, 其损伤荧光面积逐渐增大至峰值, 在修复深度为 2~5 μm 时, 其损伤荧光面积逐渐减小至最小值, 这是由于在 0~2 μm 时, 熔石英损伤内部基本不受影响, 由于磁流变液引入的荧光性杂质导致荧光面积增大。在修复深度 2~5 μm 时, 处于损伤修复阶段, 磁流变对损伤内部修复效果明显, 因此荧光面积大幅降低。

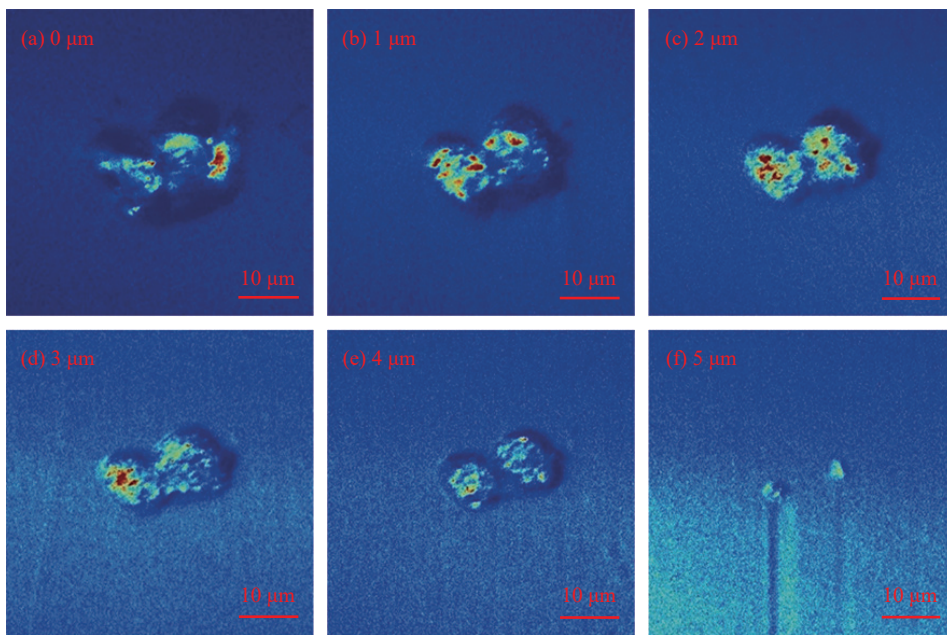


图 11 损伤荧光分布图^[21]

Fig.11 Damage fluorescence distribution^[21]

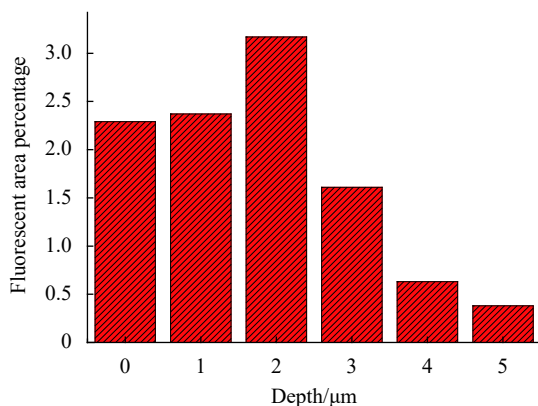


图 12 损伤荧光面积百分比

Fig.12 Percentage of damaged fluorescence area

2.2.4 光热吸收分析

使用多模态原位检测装置对损伤光热吸收性能进行检测, 测试区域为 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$, 对测试结果计算其吸收平均值代表损伤的吸收平均水平, 计算吸收最大值代表损伤的吸收最高水平。图 13、图 14 分别为不同修复深度下光热吸收平均值和最大值的定量统计结果。由图可知, 损伤的光热吸收值呈现出先增大后减小的趋势, 在修复深度为 0~2 μm 时, 损伤的光热吸收值迅速增大, 此时正是未接触损伤内部阶段, 此时磁流变给损伤内部引入大量污染。在修复深度 3 μm 时, 其光热吸收值最大, 但总体来看, 在修复深度为

2~4 μm 时,此时处于损伤内部初始接触阶段,既存在对损伤内部的修复,也存在引入污染物的过程,吸收基本维持稳定。在修复深度为 4~5 μm 时,磁流变缎带已经能够对整个损伤内部起到修复作用,此时吸收值急剧下降。在损伤完全修复后,其吸收值降至最低。

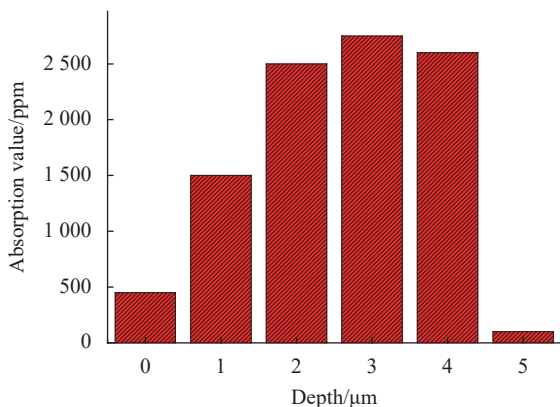


图 13 损伤的吸收峰值

Fig.13 Peak value of damage absorption

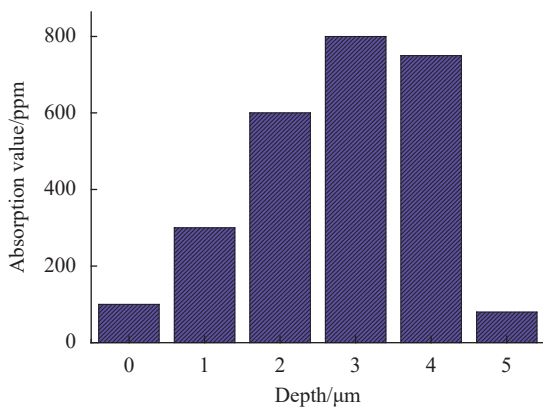


图 14 损伤的吸收平均值

Fig.14 Average value of damage absorption

3 修复后小尺寸损伤激光辐照实验

3.1 共聚焦显微成像检测

使用平均功率为 0.23 W 的 50 kHz 紫外脉冲激光对损伤长时多次辐照,每次辐照结束后静置一晚进行冷却处理。使用激光共聚焦显微镜观察得到了初始、辐照 12 h 后以及辐照 16 h 后的损伤形貌如图 15 所示,损伤深度如图 16 所示。

图 15(a) 所示为该缺陷的初始形貌,发现其横向尺寸为 15 μm,边缘形状极不规则,周边存在一圈明显的亮圈,说明损伤周边存在一些吸收性杂质,这是在

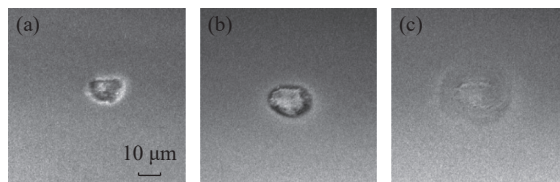


图 15 损伤激光共聚焦成像图

Fig.15 Damage laser confocal imaging

损伤修复过程中可能有少量的磁流变抛光液残留在损伤内部。图 16(a) 所示为该损伤的初始深度,该损伤深度为 7 μm,计算得到损伤的宽深比为 2.14。

经过 12 h 的平均功率为 0.23 W 的高重频紫外激光辐照后损伤的形貌如图 15(b) 所示,可以看出此时损伤的整体轮廓增大,经测量,此时损伤的横向尺寸增大为 21 μm。损伤的边缘形状在经过激光处理后逐渐变得规则,形成一个类圆状损伤坑,原本在损伤周边的一圈杂质也被激光熔融消失。此时损伤深度如图 16(b) 所示,为 6.5 μm,宽深比为 3.23,说明经过 12 h 辐照后损伤的深度基本没有发生较大的变化。

经过 16 h 的平均功率为 0.23 W 的高重频紫外激光辐照后损伤的形貌如图 15(c) 所示,从横截面来看,此时原本的损伤形状在正中间依稀可见,而整体轮廓则迅速增大。经测量损伤的横向尺寸迅速增大为 32.8 μm,但从纵向上看,损伤边缘被激光辐照后发生熔融而变得平滑,这是由于光场调制作用,损伤边缘会受到更多的激光辐照能量,从而优先达到熔石英熔融界限。该损伤深度图像如图 16(c) 所示,从深度图像上分析,损伤宽度增大的同时深度也随之减小,此时的损伤深度为 2.5 μm,宽深比为 13.12,推测这是因为熔石英边缘结构物质受到熔融作用后沉底造成的。

对整个辐照过程中损伤整体形貌演变情况进行分析,图 17 刻画出了损伤横向尺寸及深度演变曲线。可以看出,高重频紫外弱光对磁流变修复后的损伤辐照是一个由慢变快、由杂质到本体、由边缘逐渐向外扩张的过程。由于损伤初始具有非常不光滑的边缘,并存在很多抛光中残留的杂质污染,因此损伤初始的光场调制作用以及杂质吸收作用非常明显,这会极大程度地降低熔石英的抗损伤性能。从图 15(b) 可以看到缺陷边缘部分由亮变暗,说明前期高重频激光的主要过程是将损伤周边的吸收性杂质熔融消灭,并且这一过程耗时较长。而在后期主要存在光场调

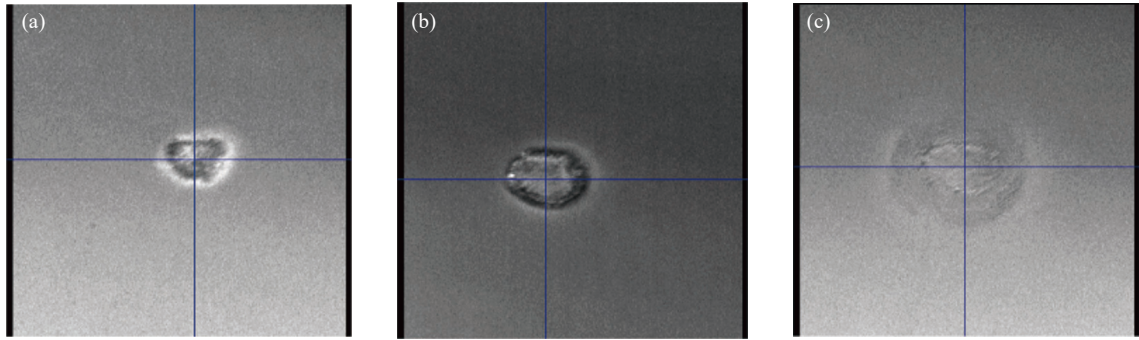


图 16 损伤三维测量图

Fig.16 Three-dimensional measurement of damage

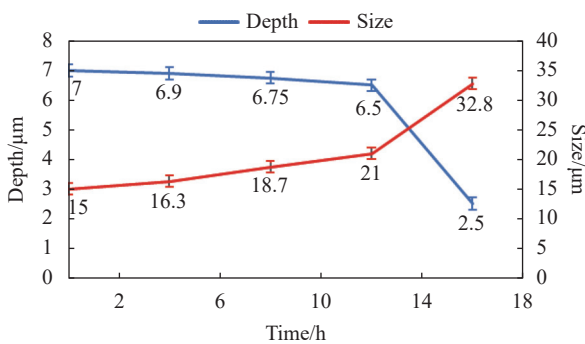


图 17 损伤横向尺寸及深度演变曲线

Fig.17 Transverse size and depth evolution curve of damage

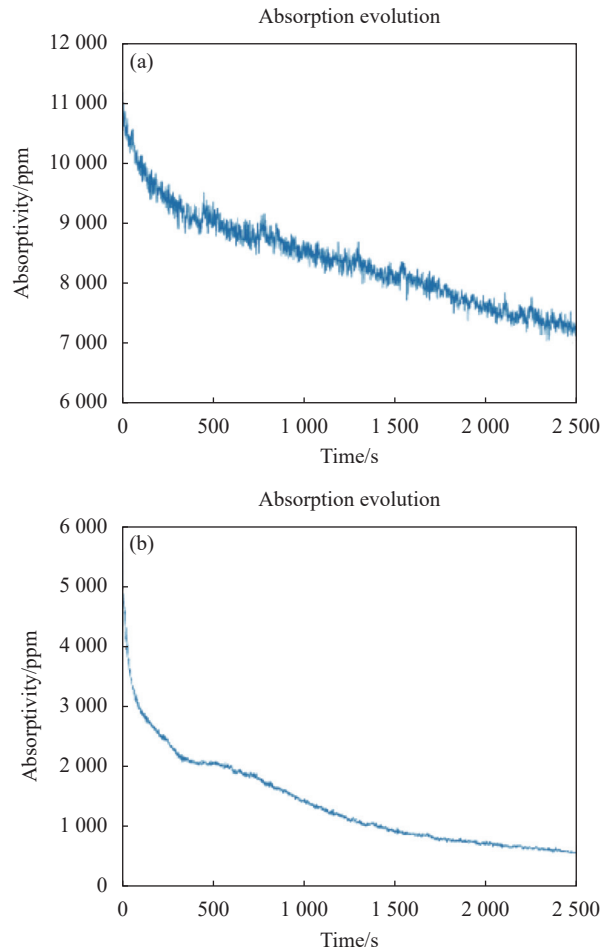
制作用,并且由于损伤边缘的调制效应更为明显,会优先达到熔石英材料的熔融界限,因此整个辐照过程表现出的是损伤的宽深比迅速增大。

3.2 光热吸收定点检测

使用平均功率为 0.23 W 的 50 kHz、355 nm 紫外脉冲激光对损伤进行三次原位辐照,每次辐照时间为 2500 s,并测得在此期间损伤吸收率随辐照时间的变化情况,吸收演变结果如图 16 所示。对曲线变化趋势进行分析可以看出,在功率为 0.23 W 的高重频紫外激光辐照下,损伤的吸收值随辐照时间整体呈下降趋势,这说明在高重频激光的长时辐照下,致使损伤吸收性的因素正在不断失去作用,结合上节对损伤的共聚焦成像分析,此时损伤内部吸收性杂质不断减少,损伤整体结构逐渐规则。这也验证了前面关于损伤形貌的演变分析结论,说明在该阶段损伤的吸收性杂质首先因激光辐照作用消失,其后由于损伤的宽深比增大,光场调制作用下降。

对图 18(a)~(c)进行横向对比分析,三幅图像都呈现出了一种相同的下降趋势,大致可以 500 s 为界分

为前后两部分:在激光辐照的前 500 s 内,损伤的吸收率水平下降极快,但很快下降速率就逐渐变缓;在激光辐照 500 s 后,损伤的吸收率大致以同等速率线性下降。并且可以明显看出,在激光辐照 500 s 的一段时间前后,缺陷的吸收率下降趋势会出现突变,说明在该阶段熔石英缺陷确实发生了一些特异性的变化,与前述分析相吻合。



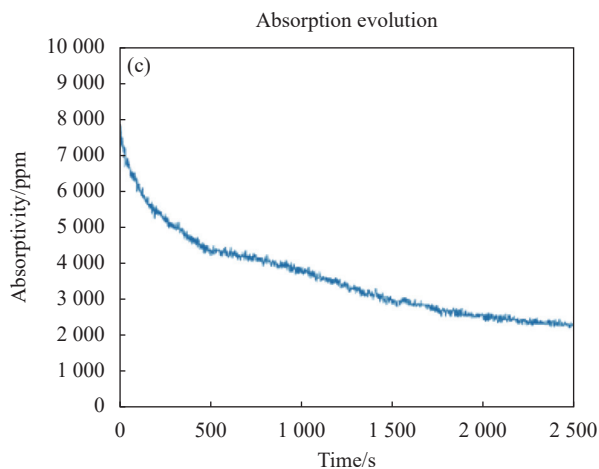


图 18 吸收率随辐照时间的演变曲线

Fig.18 Evolution curve of absorptivity with irradiation time

4 结 论

文中使用磁流变技术对熔石英损伤样件进行了逐层修复,并系统测量了磁流变修复过程中损伤样件整体数量和尺寸变化情况以及典型小尺寸损伤的形貌深度、光热吸收值、荧光分布的演变规律,对磁流变修复熔石英小尺寸损伤的机理进行深入研究,开展了高重频激光长时辐照熔石英损伤实验。得到的主要结论如下:

(1) 通过对磁流变逐层修复熔石英小尺寸损伤过程的深入研究,发现熔石英小尺寸损伤内部的吸收性杂质是影响元件性能的主要因素。在磁流变缎带接触到损伤底部前,损伤的整体吸收和荧光分布呈上升趋势,这是因为磁流变会引入金属性杂质。

(2) 在磁流变缎带接触到损伤底部后,损伤的整体吸收和荧光分布迅速降低,修复效果极为明显,磁流变修复熔石英小尺寸损伤的关键在于磁流变必须对损伤内部进行有效修复,即修复后的损伤深度必须低于磁流变缎带的厚度。

(3) 高重频激光对磁流变修复后的损伤辐照过程是一个由慢变快、由杂质到本体、由边缘逐渐向外扩张的过程。在整个辐照过程中,损伤内部金属性污染物首先熔融消失,随之损伤宽深比迅速增大,损伤形状逐渐规则,并且损伤的吸收值也伴随着辐照过程不断降低。高重频激光能够有效对磁流变修复后的表面进一步起到修复作用,可以作为组合修复工艺的第

三道工序。

参考文献:

- [1] Gao X, Qiu R, Zhou G R, et al. Effect of subsurface impurities of fused silica on laser induced damage probability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0406002. (in Chinese)
- [2] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [3] Nasiri Z, Fallah H, Hajimahmoodzadeh M, et al. Investigation of the laser induced damage thresholds of all-dielectric and metal-dielectric mirrors for a continuous wave at 10.6 μm [J]. *Optical Materials*, 2021, 114: 110936.
- [4] Li C H, Kang X, Luan D, et al. Laser-irradiation-driven formation of oxygen-related defects and performance degradation in fused silica with nanosecond pulsed laser at 355 nm [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 111: 727-733.
- [5] Chen Q, Wang H, Dai R, et al. Correlation between photoluminescence properties of surface defects and laser-induced damage threshold of fused silica [J]. *Laser and Particle Beams*, 2021, 2021(2): 1-6.
- [6] Li Yangliang, Shen Chao, Shao Li, et al. Automatic acquisition of dynamic characteristics of fused silicon particle ejection induced by laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0305003. (in Chinese)
- [7] Zhu Jingguo, Xu Zhenyuan, Tian Ye, et al. Effect of external stress on laser damage properties of fused silica[J/OL]. Chinese Journal of Lasers, [2022-07-16]. <http://kns.cnki.Net/kcms/detail/31.1339.TN.20220713.1924.250.html>.
- [8] Huang Jin, Wang Fengrui, Liu Hongjie, et al. Non-destructive evaluation of UV pulse laser-induced damage performance of fused silica optics [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16239.
- [9] Cheng J, Yang Z, Wang C, et al. Effect of scratches on the damage characteristics of fused silica optics under extremely-high impact load [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 219: 107099.
- [10] Zhao Linjie, Cheng Jian, Chen Mingjun, et al. New progress of CO₂ laser processing techniques for fused silica optics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(11): 202-218. (in Chinese)
- [11] Zhang Lijuan, Zhang Chuanchao, Chen Jing, et al. Formation and control of bubbles during the mitigation of laser-induced damage on fused silica surface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 016103. (in Chinese)

- [12] Bude J, Carr C W, Miller P E, et al. Particle damage sources for fused silica optics and their mitigation on high energy laser systems [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11414-11435.
- [13] He Yuhang, Li Qiang, Gao Bo, et al. Measurement of the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens based on computer-generated hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 021202. (in Chinese)
- [14] Zhong Bo, Chen Xianhua, Wang Jian, et al. Fabrication and test of high-precision off-axis aspheric lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0718003. (in Chinese)
- [15] Williams W B. A novel fluorescence based method of assessing subsurface damage in optical materials[D]. North Carolina: The University of North Carolina at Charlotte, 2009.
- [16] Zhang Jianpu, Sun Huanyu, Wang Shiling, et al. Three-dimensional reconstruction technology of subsurface defects in fused silica optical components [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0216001. (in Chinese)
- [17] Xu Junhai, Zhao Yuanan, Shao Jianda, et al. Absorption and laser induced damage threshold of TiO₂ single films under different process conditions [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0407001. (in Chinese)
- [18] Liu Hongjie, Wang Fengrui, Geng Feng, et al. Nondestructive detection of optics subsurface defects by fluorescence image technique [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 50-59. (in Chinese)
- [19] Nayak B K. Experimental and theoretical investigation of CO₂ laser drilling of fused silica [J]. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2014, 9(1): 79-82.
- [20] Negres R A, Burke M W, Demange P, et al. Thermal imaging investigation of modified fused silica at surface damage sites for understanding the underlying mechanisms of damage growth [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2007, 6403: 640306.
- [21] Deng M, Song C, Shi F, et al. Layer-by-layer repair of small-scale damage of fused silica based on the magnetorheological method [J]. *Micromachines*, 2021, 12(10): 1233.