

熔石英元件修复点交联分布对光传输影响的数值模拟

白阳, 蒋晓龙, 蒋一岚, 张丽娟, 张传超, 廖威, 陈静*, 周海, 袁晓东

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 建立了熔石英元件修复点交联分布数值模拟模型, 利用标量衍射理论结合快速傅里叶变换算法, 分析了 351 nm 激光辐照下修复区域对下游光传输的调制影响。研究表明, 交联修复区域对下游光传输的调制主要受修复点间交联程度的影响, 随着交联程度的增大, 调制光场极大值迅速增大后快速减小, 其分布位置先逐渐靠近后迅速远离修复元件出光面。光场调制随着传输距离的增大先快速增大后迅速减小。优化交联修复区域形貌结构参数可有效避免下游元件发生级联损伤。

关键词 激光光学; 熔石英; 光传输; CO₂ 激光损伤修复; 标量衍射理论

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0602004

Numerical Simulation of Effect of Cross-Linked Distribution of Mitigated Pits in Fused Silica Elements on Light Transport

Bai Yang, Jiang Xiaolong, Jiang Yilan, Zhang Lijuan, Zhang Chuanchao,
Liao Wei, Chen Jing, Zhou Hai, Yuan Xiaodong

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract A numerical simulation model based on the cross-linked distribution of mitigated pits in the fused silica elements is proposed. The modulation effect of the mitigation area on the downstream light transport under the 351 nm laser irradiation is studied by the scalar diffraction theory and the fast Fourier transform algorithm. The results indicate that the modulation of the cross-linked mitigation area on the downstream light transport is mainly determined by the cross-linking degree of mitigated pits. With the increase of cross-linking degree, the local maximum of light modulation first increases rapidly and then decreases very fast, and the corresponding location first approaches and then is far away from the output surface of the mitigated element. With the increase of propagation distance, the light modulation first increases rapidly and then decreases very fast. The parameter optimization of the morphological structure of the mitigation area can avoid effectively the cascading damages among the downstream elements.

Key words laser optics; fused silica; light transport; damage repair by CO₂ laser; scalar diffraction theory

OCIS codes 140.3325; 160.6030; 140.3390; 190.2640

1 引 言

在大型高功率固体激光装置的建设与运行维护过程中, 如美国国家点火(NIF)装置, 法国兆焦耳激光器(LMJ)装置, 以及中国神光(SG)系列装置, 工作在紫外波段的大口径熔石英元件极易发生损伤^[1-3]。由于此类装置的平均运行通量高于熔石英

的损伤增长阈值, 初始损伤一旦形成, 损伤增长将不可避免^[4], 当损伤点面积总和超过一定比例后, 熔石英光学元件将视为彻底损坏而不能被继续使用。

熔石英元件激光损伤区域中存在大量的尖峰结构, 这会导致损伤区域在后续激光辐照中由于光调制作用而产生激光能量吸收增强, 从而造成进一步损伤。二氧化碳(CO₂)激光单点修复技术作为目前

收稿日期: 2017-11-27; 收到修改稿日期: 2018-01-08

作者简介: 白阳(1990—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事光与物质相互作用、光传输方面的研究。

E-mail: by201106@163.com

* 通信联系人。E-mail: chenjing_19901102@163.com

成熟的熔石英元件损伤修复工艺技术之一,能有效抑制损伤增长,避免修复区域的再损伤。根据激光参数和修复原理的不同,该技术可分为蒸发式和非蒸发式两种方式。蒸发式修复主要针对数百微米的损伤点,利用聚焦的小尺寸激光光斑扫描损伤区域,以蒸发式气化的方式直接去除损伤材料^[5];非蒸发式修复则主要针对小于 100 μm 的损伤点,利用大尺寸激光光斑(约 2 mm)辐照损伤区域,以加热熔融的方式去除损伤区域的尖峰结构^[6]。以上两种修复方式均会获得光滑的修复形貌,使得原有损伤区域对入射光束的能量吸收大幅度减弱,对激光的高频调制效应也相应减弱,最终有效抑制了损伤点尺寸的增长,并使得修复区域的抗损伤能力得到有效的提高。但是两种修复方式均会在元件表面留下修复凹坑,对透射波前产生扰动,导致修复点下游不同位置出现光场的调制增强点,从而引起下游元件的级联损伤^[7-11]。针对不同类型的(包括典型的带有边缘凸起的高斯型修复形貌^[12-15]及标准高斯型^[16]、锥形和抛物形等修复点形貌^[17-19])单点修复形貌及缺陷点^[19]对下游光传输的调制影响,国内外研究人员已进行了大量数值模拟仿真和实验研究。然而,在装置实际运行过程中,熔石英元件极易出现小尺寸损伤点密集分布的情况,为了减少大尺寸单点修复对元件通光面积的影响,可以采取小尺寸交联修

复的方式来抑制损伤区域的进一步恶化。此外,针对元件表面的划痕损伤,也可通过小尺寸交联修复方式去除损伤材料,抑制损伤增长。然而,该修复方式会导致修复区域形貌结构不再是单一的光滑修复点结构,关于此类修复区域对下游光传输的影响研究还鲜有报道。

本文利用标量衍射理论^[20-22],建立了修复点交联分布数值模型,研究了修复点交联分布对下游光传输的影响。研究结果为减小修复区域对光传输的影响,避免调制增强效应对下游元件的级联损伤的研究提供了参考。

2 修复点交联分布数值模型

以位于元件出光面的典型的锥形修复点为例,利用修复点深度 H 和底面直径 D 表征单个修复点形貌,利用修复点中心之间的相对距离 L 表征其分布的交联情况。对于中心位置位于 (x, y, z) 的单个修复点,有

$$z = H - \frac{2H}{D} \sqrt{(x^2 + y^2)}. \quad (1)$$

图 1 所示为修复点交联分布数值模型流程图,其中 c_{ix} 和 c_{iy} 分别表示第 i 个修复点的中心位置的坐标 (x, y) 。建立修复点交联分布模型,如图 2 所示。

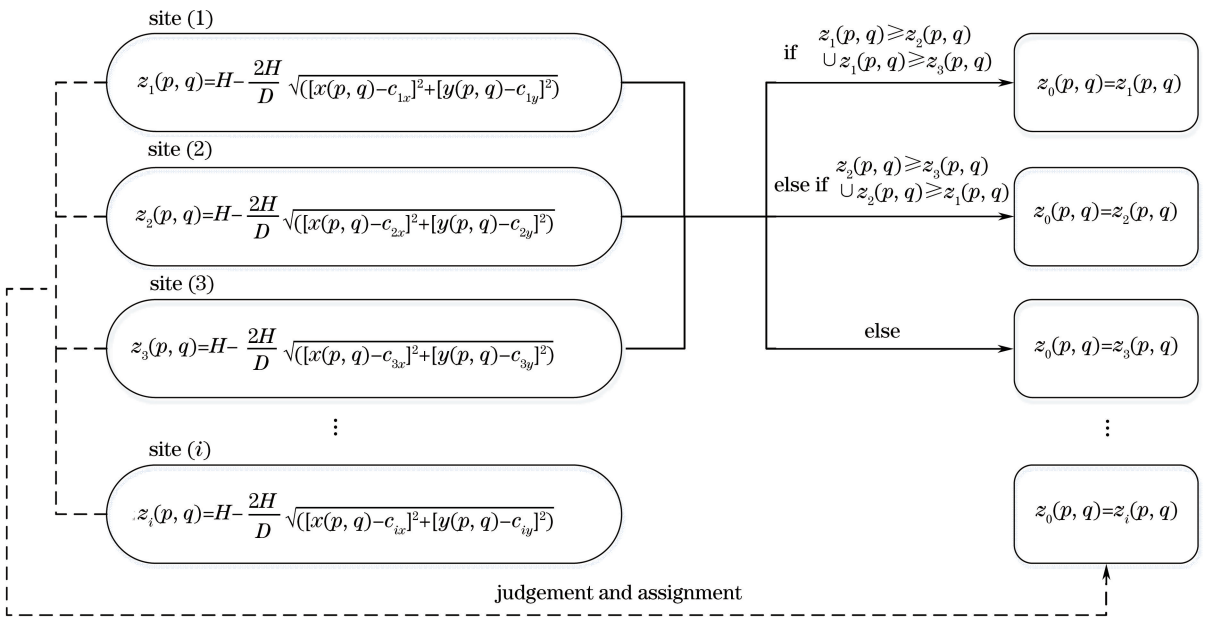


图 1 修复点交联分布数值模型流程图

Fig. 1 Flow chart of numerical simulation model of cross-linked distribution of mitigated pits

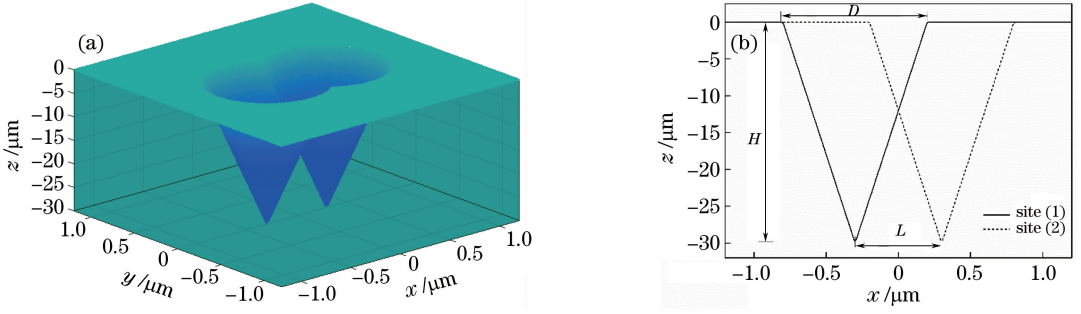


图 2 修复点交联分布的(a)三维模型和(b)二维结构

Fig. 2 (a) Three-dimensional model and (b) two-dimensional structure of cross-linked distribution of mitigated pits

结合图 1 和图 2 可以看出,当忽略单个修复点参数变化的影响时,修复点交联分布区域结构主要受修复点交联程度 τ 和交联修复点数目 i 的影响,其中 $\tau = 1 - \sigma$, $\sigma = d_{\text{interval}}/D$, d_{interval} 表示独立修复点中心之间的距离。图 3 所示为双修复点交联分布下的光场分布。可以看出,随着传输距离的增大,双修

复点对下游光传输产生的调制影响存在明显的叠加效应。为了深入研究修复点交联分布对光传输产生的调制影响规律,利用标量衍射理论,对比研究了修复区域形貌结构参数 τ 和 i 对下游调制光场分布的影响,并以调制极大值变化表征修复区域形貌结构参数对下游光传输的影响。

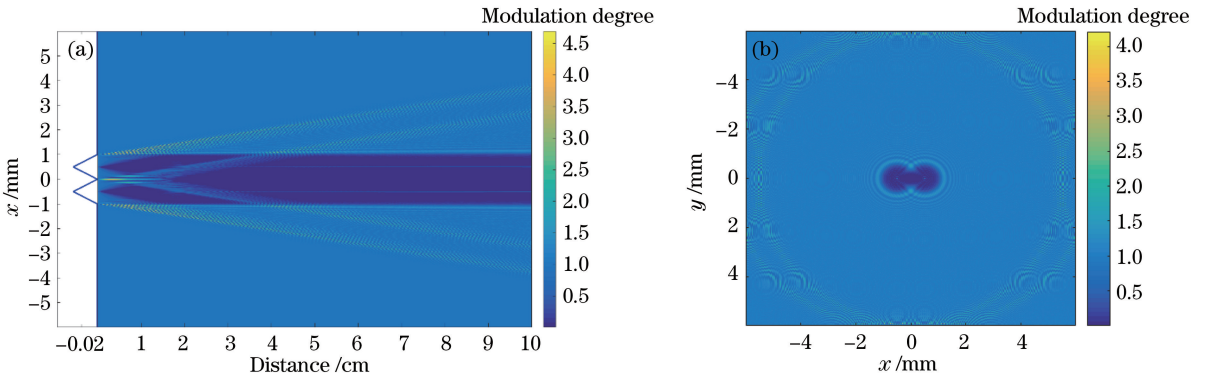


图 3 双修复点交联结构对下游光传输的影响。(a) x - z 平面光场分布;(b) x - y 平面光场分布

Fig. 3 Effect of cross-linking structure of two mitigated pits on downstream light transport.

(a) Light distribution in x - z plane; (b) light distribution in x - y plane

3 数值模拟结果与分析

为了研究不同交联程度对下游光传输的调制影响规律,在单个修复点尺寸确定的情况下($H = 30 \mu\text{m}$, $D = 1 \text{ mm}$),对比研究了在不同交联程度下,修复区域下游调制光场的极大值及其分布位置的演化规律,如图 4 所示。可以看出,当 $\tau < 0.5$ 时,随着交联程度的增大,调制光场极大值迅速增大,其分布位置逐渐靠近修复元件出光面;当 $\tau > 0.5$ 时,随着交联程度的继续增大,调制光场迅速减小,其分布位置逐渐远离修复元件出光面。图 5 所示为调制度随传输距离的变化曲线。结合图 4 和图 5 可以看出,当控制修复点交联程度 $\tau = 0.5$ 时,交联修复区域对下游光传输产生的调制影响趋势与单个修复对下游光传输的调制影响趋势一致,均是随着传输距

离的增大先快速增大,继而迅速减小。因此,尽管双修复点交联分布会导致下游调制光场的极大值高于单点修复数倍,但仍可以通过优化控制交联修复区域的结构参数,有效避免调制极大值光场分布落在下游元件表面,进而达到修复大尺寸损伤点或划痕损伤的目的。

在相同交联程度下,不同数目修复点($i = 2, 3, 4$)的交联修复区域对下游调制光场的影响如图 6 所示,可以看出,随着传输距离的增大,修复区域下游调制光场均表现出先快速增大后逐渐减小的趋势,交联区域修复点数目的增加会使得调制光场的衰减速率降低。图 7 所示为交联修复区域形貌结构变化对下游光场分布调制极大值的影响。结合图 6 和图 7 可以看出,多点交联修复区域对下游光传输的调制影响主要受交联程度的影响。与双交联修复区域

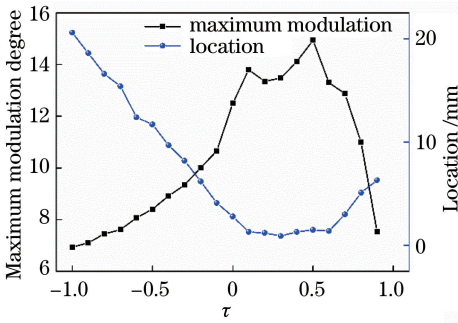


图4 交联程度对下游调制光场的影响
Fig. 4 Effect of cross-linking degree on downstream light modulation

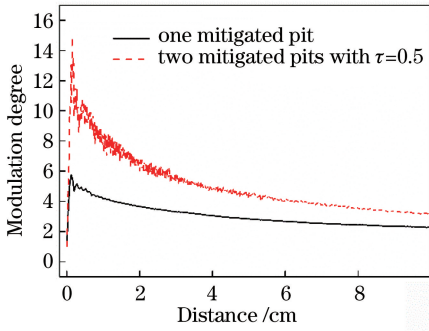


图5 调制度随传输距离的变化曲线
Fig. 5 Modulation degree versus propagation distance

对下游光传输的影响一致,当调制光场强度不能有效减小时,为了避免调制增强区域对下游元件造成级联损伤,应当控制调制增强区的分布,使其尽量靠近元件出光面。因此,多点交联修复时应当控制其交联程度 τ 在 0.4~0.5 之间。

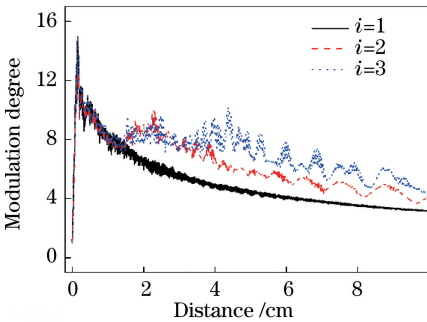


图6 不同数目修复点的交联修复区域对下游调制光场的影响
Fig. 6 Effect of cross-linked mitigation area with different numbers of mitigated pits on downstream light modulation

以上分析结果表明,修复点交联分布会导致修复区域下游调制光场进一步增强;但无论是双修复点交联还是多点交联分布,修复区域下游调制光场随着传输距离的增大均呈先快速增大后又迅速减小的趋势,通过优化修复区域形貌结构参数 τ ,可以有

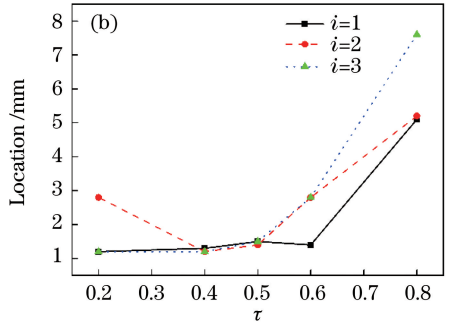
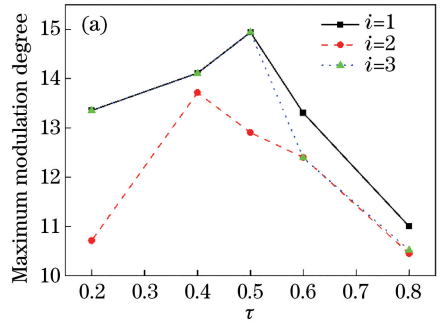


图7 交联修复区域形貌结构对调制光场 (a)极大值和(b)分布的影响

Fig. 7 Effect of morphological structure of cross-linked mitigation area on (a) maximum and (b) distribution of light modulation

效控制调制增强的影响范围,进而避免下游光学元件的级联损伤。

4 结 论

为了有效解决熔石英元件损伤点密集分布或元件表面划痕损伤引起的损伤增长问题,基于小尺寸交联修复方式,建立了修复点交联分布模型,利用标量衍射理论结合快速傅里叶变换算法,研究分析了交联修复区域对下游光传输的调制影响规律,并通过优化交联修复区域的结构参数 τ ,避免了修复区域对下游光学元件的级联损伤威胁,得到如下结论。

1) 无论是双修复点交联还是多点交联分布,交联修复区域下游调制光场的分布主要受修复区域交联程度的影响,随着交联程度的增大,调制光场极大值先迅速增大后又迅速减小,其分布位置先逐渐靠近修复元件出光面继而迅速远离出光面。

2) 尽管交联修复区域下游调制光场极大值相比单个修复点出现数倍的增长,但由于其调制光场随着传输距离的增大表现出迅速减小的趋势,通过优化交联修复区域形貌结构参数(取 $\tau = 0.4 \sim 0.5$),可以有效避免下游元件的级联损伤。

参 考 文 献

- [1] Rubenchik A M, Feit M D. Initiation, growth and mitigation of UV laser induced damage in fused silica [C]. SPIE, 2002, 4679: 79-95.
- [2] Merkle L D, Kitriotis D. Temperature dependence of laser-induced bulk damage in SiO₂ and borosilicate glass [J]. Physical Review B, 1988, 38(6): 1473-1482.
- [3] Feit M D, Rubenchik A M. Intrinsic laser-induced breakdown of silicate glasses [C]. SPIE, 2002, 4679(10): 321-330.
- [4] Bercegol H, Bouchut P, Lamaignère L, *et al.* The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion lasers[C]. SPIE, 2004, 5273: 312-324.
- [5] Bass I L, Draggoo V G, Guss G M, *et al.* Mitigation of laser damage growth in fused silica NIF optics with a galvanometer scanned CO₂ laser[C]. SPIE, 2006, 6261: 62612A.
- [6] Bass I L, Guss G M, Nostrand M J, *et al.* An improved method of mitigating laser induced surface damage growth in fused silica using a rastered, pulsed CO₂ laser[C]. SPIE, 2010, 7842: 784220.
- [7] Adams J J, Bolourchi M, Bude J D, *et al.* Results of applying a non-evaporative mitigation technique to laser-initiated surface damage on fused-silica [C]. SPIE, 2010, 7842: 784223.
- [8] Feit M D, Rubenchik A M. Laser intensity modulation by nonabsorbing defects [C]. SPIE, 1997, 3047: 971-977.
- [9] Brusasco R M, Penetrante B M, Butler J A, *et al.* Localized CO₂ laser treatment for mitigation of 351 nm damage growth on fused silica [C]. SPIE, 2002, 4679: 40-47.
- [10] Guss G, Bass I, Draggoo V, *et al.* Mitigation of growth of laser initiated surface damage in fused silica using a 4.6 μm wavelength laser[C]. SPIE, 2006, 6403: 64030M.
- [11] Runkel M, Hawley-Fedder R, Widmayer C, *et al.* A system for measuring defect induced beam modulation on inertial confinement fusion-class laser optics[C]. SPIE, 2005, 5991: 59912H.
- [12] Matthews M J, Bass I L, Guss G M, *et al.* Downstream intensification effects associated with CO₂ laser mitigation of fused silica[C]. SPIE, 2007, 6720: 67200A.
- [13] Li L, Xiang X, Zu X T, *et al.* Incident laser modulation of a repaired damage site with a rim in fused silica rear subsurface[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(4): 044212.
- [14] Bai Y, Zhang L J, Liao W, *et al.* Study of downstream light intensity modulation induced by mitigated damage pits of fused silica using numerical simulation and experimental measurements[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 024205.
白阳, 张丽娟, 廖威, 等. 熔石英损伤修复坑下游光场调制的数值模拟与实验研究[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 024205.
- [15] Jiang Y, Liu C M, Luo C S, *et al.* Mitigation of laser damage growth in fused silica by using a non-evaporative technique[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(5): 054216.
- [16] Bourgeade A, Donval T, Gallais L, *et al.* Modeling surface defects in fused silica optics for laser wave propagation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(4): 655-663.
- [17] Bai Y, Liao W, Zhang L J, *et al.* Effects of different kinds of mitigated pits on transport of laser beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(5): 051002.
白阳, 廖威, 张丽娟, 等. 不同类型修复坑形貌对光传输产生的影响[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(5): 051002.
- [18] Cormont P, Gallais L, Lamaignere L, *et al.* Impact of two CO₂ laser heatings for damage repairing on fused silica surface [J]. Optics Express, 2010, 18(25): 26068-26076.
- [19] You K W, Zhang Y L, Zhang X J, *et al.* Analysis of near-field modulations caused by defects in high power laser system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0302002.
尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 高功率激光系统中缺陷引起的近场调制分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302002.
- [20] Sun C, Chen P Z, Wu F T. Discrete Fourier method analyses Bessel beam generated by lens-annular slit [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0407001.
孙川, 陈培宗, 吴逢铁. 离散傅里叶方法分析环缝透镜产生无衍射光束[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0407001.
- [21] Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation[M]. [S.l.]: SPIE Press, 2010.
- [22] Lü N G. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.