

熔石英表面热致应力对激光损伤行为影响的研究^{*}

刘红婕 黄 进 王凤蕊 周信达 蒋晓东[†] 吴卫东

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009 年 3 月 4 日收到; 2009 年 6 月 4 日收到修改稿)

为了研究热致应力对光学元件损伤特性的影响, 通过实验测试退火处理消除热应力和未消热应力石英基片的激光损伤特性, 研究了热致应力对石英元件初始损伤阈值、损伤增长阈值以及损伤增长规律的影响. 结果表明, 热致应力对熔石英光学元件的初始损伤阈值有影响, 初始损伤阈值随着热致应力增大而降低; 热致应力会加剧激光引发的损伤增长, 相同的激光通量下, 表面应力越大的区域拥有越高的损伤增长因子, 但损伤增长仍遵从指数增长规律. 热致应力对损伤增长阈值没有明显的影响. 本文的研究将为 CO₂ 激光预处理工艺能否被应用于大口径光学元件提供一个必要的技术参考.

关键词: 应力, 激光损伤, 熔石英, CO₂ 激光预处理

PACC: 7820, 4270E, 6220M

1. 引 言

为了得到尽可能大的输出能量, 大型高功率固体激光装置, 如美国的国家点火装置 (NIF)^[1,2] 和中国的神光系列装置^[3,4], 都在接近光学元件损伤阈值的激光通量下运行. 因此, 提高光学元件的损伤阈值是提高高功率固体激光装置输出能力的关键. 而终端组件的紫外损伤是目前高功率激光装置中光学元件损伤问题中最为严重的部分, 是限制激光器输出能量的瓶颈^[5,6].

熔石英光学元件是终端组件中的主要组成部分, 也是目前损伤最为严重的光学元件. 为了提高三倍频激光下熔石英材料的抗损伤能力, 减少因材料表面物理结构缺陷带来的损伤, NIF 的研究人员提出了一种有效的方法, 即利用 CO₂ 激光对元件表面进行缺陷融覆预处理^[7-9], 该方法可以将光学元件的损伤阈值提高 2—3 倍, 在提高聚变激光装置的输出能力方面有着巨大的潜力. 但事实上, 在处理过程中 CO₂ 激光在石英材料表面被强烈吸收, 在激光作用区域与未作用区域之间形成上千度的温差, 从而产生热致应力^[10-13], 这种热致应力虽然可通过

高温退火的方式减弱^[14], 但对于较大口径的光学元件, 高温退火过程会引起面形畸变等负面效应, 从而严重影响传输光束的质量; 另一方面, 热致应力的存在必然会影响到处理后熔石英元件抗损伤能力的提升, 从而直接影响激光预处理的工程化应用. 因此, 研究熔石英表面热致应力对光学元件激光损伤规律的影响非常必要, 将为 CO₂ 激光预处理工艺能否应用于大口径光学元件提供一个必要的技术参考.

2. 实验测试平台

本实验利用 CO₂ 激光器对石英光学元件进行缺陷融覆预处理, 在石英元件表面产生融覆热应力. 实验所用的 CO₂ 激光器是一台功率线性可调、最高输出功率为 120 W 的连续激光器, 输出光束口径为 4 mm, 近场为高斯型分布. CO₂ 激光器输出频率为 400 Hz, 通过调节占空比的方式调节激光器的输出功率.

损伤测试所用的激光器为 SAGA-YAG 激光器, 它的输出波长为 355 nm, 输出脉宽为 6.5 ns, 输出近场为近高斯分布. 损伤测试位置在近焦斑位置处, 面积约为 0.45 mm², 测试光路如图 1 所示. 激光

^{*} 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AA8040508)、国家自然科学基金 (批准号: 20903083) 和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金 (批准号: 9140c6803010803) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jiangxdong@163.com

器的输出光束经过像传递系统进行缩束,被测样品放置在透镜后 1/5 焦距处,准直光源由劈板注入,与测试光路同轴,用于标定测试激光在被测样品上的

位置.劈板取出部分光用于能量测试,光电管和示波器用于测试主激光的脉冲形状,被测样品后用显微镜对激光作用点状态进行实时监测.

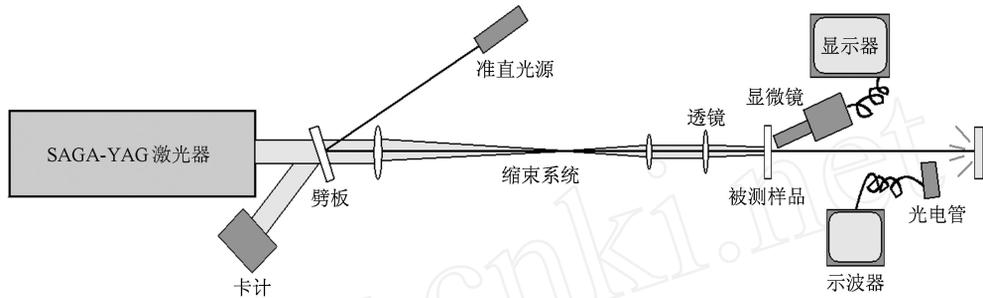


图 1 损伤阈值测试光路图

3. 实验结果

采用光栅刻线式路线的扫描方式,分别对两块加工工艺相同、尺寸为 40 mm × 40 mm × 5 mm 的石英基片 (1#和 2#)进行了三个区域的 CO₂ 激光扫描,通过改变每个区域的处理功率获得三种不同大小的热应力.如表 1 为三个区域对应的应力双折射引入的光程差,分别代表了三种不同大小的热致应力.然后将 1#石英基片放置到 1000 °C 高温的烤炉里进行退火处理,从表 1 可以看出退火后石英片表面的热致应力基本消失.由于 1#和 2#两块石英基片对应区域的 CO₂ 激光预处理条件一致,因此对应的热致应力基本相同,并且预处理对其表面质量的改善情况也应一致.通过比较退火处理后消应力的 1#和没有退火处理未消应力的 2#石英基片对应区域的损伤情况,就可以得到融覆热致应力对光学元件损伤特性的影响.

表 1 石英基片三个区域对应的应力双折射引入的光程差

石英基片	光程差		
	区域一 /nm	区域二 /nm	区域三 /nm
1#	20	4	40
1#(退火后)	2	0	2
2#	20	4	40

由于激光脉冲作用在前表面时形成等离子体保护层,阻碍能量沉积而减少材料破坏;而后表面吸收激光能量,产生的高压等离子体会加速材料破坏,因此熔石英后表面更容易发生损伤.基于这一点本次实验都是对光学元件后表面进行测试的.

3.1. 初始损伤阈值

由于光学元件本身的不均匀性和光束传输特性的起伏,损伤发生具有一定的概率,本文对损伤阈值的定义是能够使光学元件损伤的最小能量密度值.用 N_1 测试方式进行激光的初始损伤阈值测试,每个区域测试 10 个点,为了避免个别因素的影响,我们对每个区域的初始损伤阈值进行平均,结果如表 2 所示.从表 2 可以看出,应力双折射引入的光程差为 4 nm 的热致应力区域,两块基片的平均激光损伤初始阈值基本没有区别;光程差为 20 nm 的热致应力区域,1#基片的平均初始损伤阈值比 2#基片高约 5%;光程差为 40 nm 的热致应力区域,1#基片的平均初始损伤阈值比 2#基片高约 9%.因此,热致应力对初始损伤阈值有影响,热致应力增大会导致初始损伤阈值降低.

表 2 两块基片不同热致应力区域的平均初始损伤阈值

光程差 /nm	平均初始损伤阈值 /J · cm ⁻²	
	1#	2#
4	7.364	7.360
20	9.028	8.596
40	9.274	8.488

3.2. 损伤增长阈值

光学材料发生损伤后,随着脉冲数目的增加,损伤面积将不断增大.损伤增长阈值是指光学元件发生损伤增长的最低能量密度.本实验在初始损伤的基础上,进行了损伤增长阈值测试,每个应力区域测试了 3 到 4 个点,结果如表 3 所示.由表 3 可以看出,损伤增长阈值与应力并没有特定的关系.同

期实验测试的同类别的其他光学元件,其损伤增长阈值约为 2.8 J/cm^2 . 考虑个别因素的影响, CO_2 激光预处理和未处理光学元件,有应力和无应力区域,初始增长阈值变化并不大. 因此,损伤增长阈值基本与热致应力无关.

表 3 两块基片不同热致应力区域的平均损伤增长阈值

光程差 /nm	平均损伤增长阈值 / $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	
	1#	2#
4	3.123	3.379
20	2.892	2.942
40	3.146	3.481

3.3. 损伤增长

为了有效评价光学元件的使用寿命,光学元件的损伤增长系数是一个非常重要的评价因子. 文献 [15] 的结果表明:损伤面积的尺寸随发次的增加呈指数规律增长, $L = L_0 e^N$, 其中 L_0 为损伤初始面积, N 为发次, e 为损伤增长系数. 我们对每个区域进行了相同激光通量下损伤面积随发次变化的实验,研究热致应力对损伤增长的影响,实验结果如图 2—4 所示. 图中标记点为实验数据,其中实心标记为 1# 石英基片的,空心标记为 2# 石英基片的(下同),曲线是利用公式 $L = L_0 e^N$, 根据实验数据拟合得到的. 可以看出,指数规律的拟合曲线与我们的实验结果符合得相当好,表明热致应力并不会改变光学元件损伤增长的规律. 根据该公式还可以得到每个激光通量下的损伤增长系数.

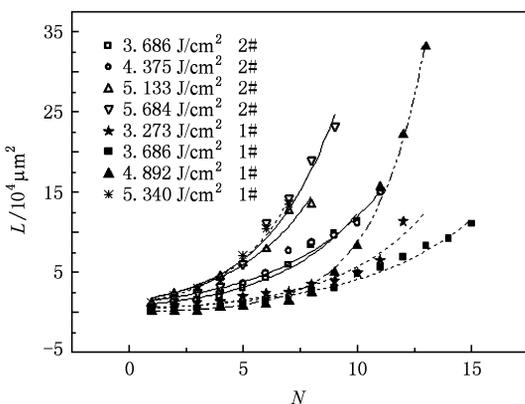


图 2 应力双折射引入的光程差为 4 nm 的热致应力区域,不同激光通量下 1#和 2#石英基片的损伤面积随损伤发次的变化

对于可比较的同一激光通量数据用相同符号的标记,如图 2 中的空心方块和实心方块,空心三角

和实心三角,分别为激光通量基本相同的情况下 1# 和 2#基片的损伤增长情况. 由于热致应力比较小,热致应力对石英基片的损伤增长速度影响较小,而激光通量的影响较大. 由图 3 和图 4 中可比较的同一激光通量数据上看,2#基片的损伤增长速度远大于 1#基片的数值(较低通量的一发数据除外,有应力的石英基片在损伤增长初期损伤增长停滞),并且热致应力越大的区域损伤面积增长得越快.

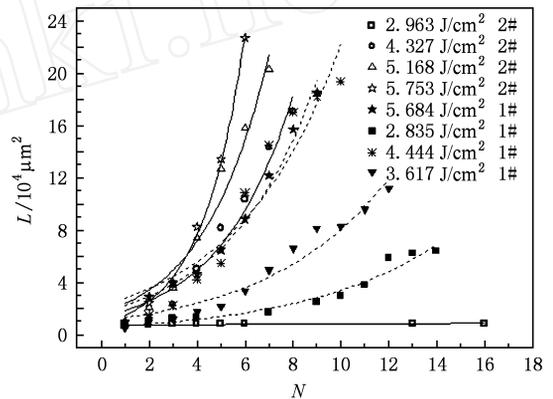


图 3 应力双折射引入的光程差为 20 nm 的热致应力区域,不同激光通量下 1#和 2#石英基片的损伤面积随损伤发次的变化

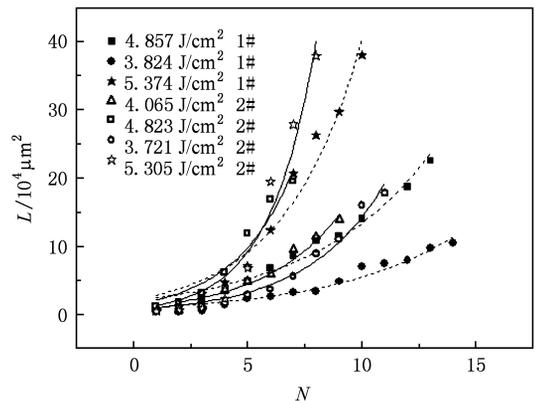


图 4 应力双折射引入的光程差为 40 nm 的热致应力区域,不同激光通量下 1#和 2#石英基片的损伤面积随损伤发次的变化

图 5 为两块基片的损伤增长系数与激光通量的关系曲线. 可以看出,应力双折射引入的光程差为 4 nm 的区域,2#基片的损伤增长系数略高于 1#基片; 20 nm 区域,2#基片的损伤增长系数明显高于 1#基片; 40 nm 区域,2#基片的损伤增长系数远高于 1#基片. 由上面的结果可以看出,相同的激光通量下,石英基片表面的热致应力会加剧激光引发的损伤增长,并且热致应力越大,损伤增长速度越快.

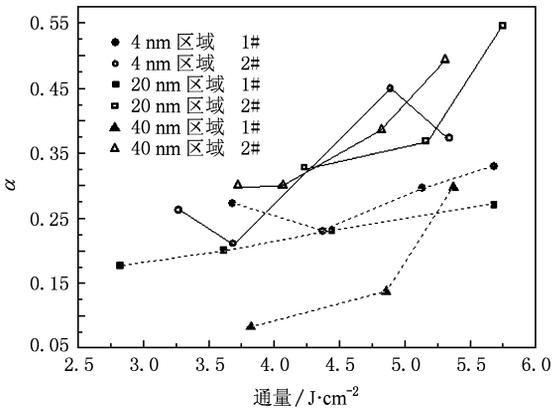


图 5 每个热致应力区域, 1#和 2#石英基片的损伤增长系数随激光通量的变化

4. 分析讨论

CO₂ 激光预处理从两个方面影响石英基片. 一方面, 由于高温熔融的作用使许多小缺陷变得光滑, 这会降低由缺陷导致的光学元件损伤. 如表 2 所示, 低功率处理的光学元件初始损伤阈值约为 7.4 J/cm², 而高功率处理的光学元件初始损伤阈值可达 9 J/cm² 以上. 另一方面, CO₂ 激光照射到材料上时将产生空间非均匀的温度场, 使不同区域材料的热膨胀量不同, 从而导致热致应力^[16]. 当停止激光辐照时, 由于光学元件表面冷却较快而内部冷却较慢, 将在元件表面形成永久的张应力. 这种应力会降低光学元件的机械强度和热稳定性, 影响光学元

件的光学均一性, 因此会改变光学元件的激光损伤特性. 若应力超过光学元件的极限强度, 还会导致光学元件的破裂. 因此同时考虑提升阈值和降低预处理引起的应力, 选择合适的预处理参数是必要的, 这需要一个经验积累的过程.

由表 3 可以看出, 热致应力对损伤增长阈值几乎没有影响, 这可由激光初始损伤点的扫描电镜图来解释 (见图 6). 从图 6 可以看出, 损伤点内部有很多细微结构的裂缝, 激光继续辐照损伤点时, 造成光学元件继续损伤的主要因素不再是应力, 而是损伤斑痕处的光吸收. 首先, 熔融石英受热会导致氧元素的损失, 而氧缺失材料能够更有效地吸收紫外辐射^[17]. 其次, 激光吸收产生的高压会使熔融石英密度增加, 结构发生变化而发生改性^[18], 经过改性的材料会发生紫外吸收. Wong 等^[19]发现, 在损伤斑痕处密度增加 20% 的材料厚度有数微米. 将改性材料的电子结构变化加以模拟研究, 发现吸收谱边缘向长波方向发生移动, 这一结果至少显示了经冲击波改性的材料具有发生强吸收的可能性. 最后, 损伤斑痕中被压碎的小颗粒能够强烈散射传输光束, 散射光的干涉会导致局部光强极强, 发生进一步损伤, 点燃等离子体. 因此, 对于同样的熔石英材料和激发脉冲, 形成的初始损伤结构和材料特性基本一致, 其损伤增长阈值也是一样的, 与表面应力没有太大关系.

从表 3 中还可以看出损伤增长阈值的不确定性, 这是由于损伤增长对初始损伤坑结构极端敏感. 若初始损伤坑尺寸较大, 且其周围的材料已经

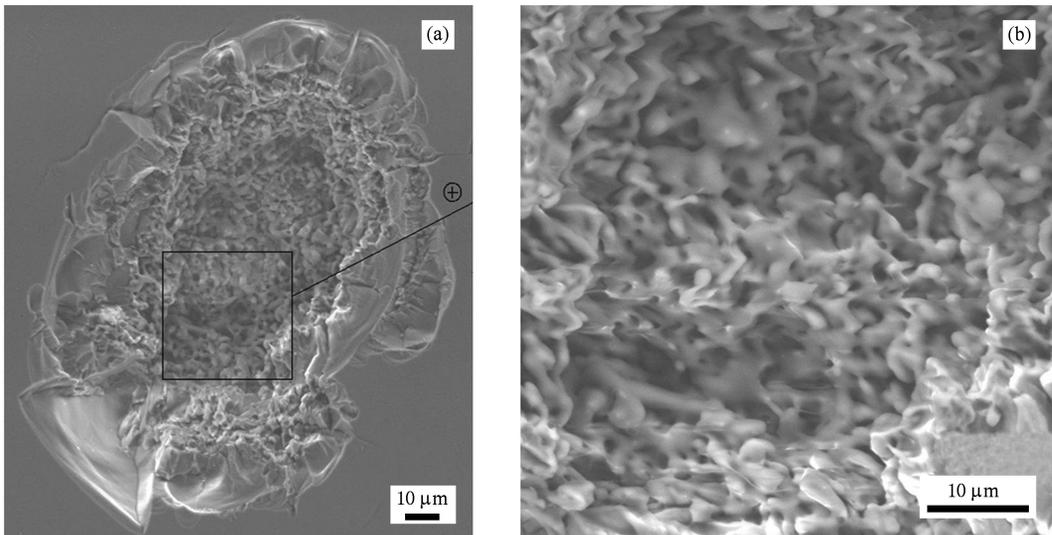


图 6 激光初始损伤点的扫描电镜图 (a)初始损伤点的全貌; (b) (a)中标示部分的放大

被削弱,则很容易形成新裂纹,且损伤将以指数形式增长.反之,若初始损伤坑的尺度较小,周围材料未被破坏,则很难形成新裂纹,裂纹快速增加的阶段得以延缓.

从图 2—5可以看出,热致应力对损伤增长影响尤为明显.这是由于应力降低了熔石英材料的强度,因此形成相同尺寸的凹坑需要沉积较少的能量,也就是说相同激光通量下损伤增长得更快.对光学器件来说,少量损伤并不会影响光学系统的性能,但随着发次的增加损伤坑将会增长到光学系统不可承受的程度.损伤增长是光学元件使用寿命的关键因素,从这一方面考虑,要想使 CO_2 激光预处理工艺工程化应用于光学元件抛光处理,必须消除熔石英表面融覆热应力.

5. 结 论

本文通过对两块石英基片激光损伤规律的对

比测试,实验研究了激光预处理产生的热致应力对熔石英光学元件损伤特性的影响.研究结果表明:热致应力对熔石英光学元件的初始损伤阈值有明显影响,初始损伤阈值随热致应力增大而降低;热致应力会加剧激光引发的损伤增长,但损伤增长仍服从指数增长规律,并且在相同的激光通量下,表面应力越大的区域拥有越高的损伤增长因子.由此, CO_2 激光预处理后的大口径光学元件必须通过退火消除应力,而退火方式又会使大口径光学元件产生热畸变,从而会影响经过其传输的光束质量.综合考虑来看,目前使用的 CO_2 激光预处理方法还不能工程化应用于大口径光学元件的抛光处理,需要提出一种更为合适的处理方法.

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心王海军和李熙斌在实验调试过程中给予的帮助!

-
- [1] Moses E I, Campbell J H, Stolz C J, Wuest C R 2003 *Proc SPIE* **5001** 1
- [2] Moses E I 2004 *Proc SPIE* **5341** 13
- [3] Peng H S, Zhang X M, Wei X F, Zheng W G, Jing F, Sui Z, Zhao Q, Fan D Y, Ling Z Q, Zhou J Q 2001 *Proc SPIE* **4424** 98
- [4] Xiao G Y, Fan D Y, Wang S J, Lin Z Q, Gu Y, Zhu J Q, Zhen Y X, Zhu J, Liu F Q, Chen S C, Chen Q H, Huang G L, Deng X M 1998 *Proc SPIE* **3492** 890
- [5] Hunt J T 1999 *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-ID-138120-98*
- [6] Hunt J T 2000 *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-ID-138120-99*
- [7] Temple P A, Lowdemilk W H, Milan D 1982 *Appl Opt* **21** 3249
- [8] Mendez E, Nowak K M, Baker H J, Villarreal F J, Hall D R 2006 *Appl Opt* **45** 5358
- [9] Laurent L, Bercego H, Bouchut P, During A, N éauport J, Pimbinini H, Raze1 G 2004 *Proc SPIE* **5448** 952
- [10] Feit M D, Rubenchik A M, Boley C D, Rotter M D 2003 *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-CONF-155673*
- [11] B loembergen N 1973 *Appl Opt* **12** 661
- [12] Duan X F, Wang Y F, Niu Y X, Zhang C 2004 *Chin. J. Lasers* **31** 1456 (in Chinese) [段晓峰、汪岳峰、牛燕雄、张 维 2004 中国激光 **31** 1456]
- [13] Hu P, Chen F L 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 961 (in Chinese) [胡 鹏、陈发良 2005 中国激光 **17** 961]
- [14] Xiao Y M, Bass M 1983 *Appl Opt* **22** 2933
- [15] Norton M A, Donohue E E, Hollingsworth W G, Feit M D, Rubenchik A M, Hackel R P 2004 *Proc SPIE* **5647** 197
- [16] Ping X E 1984 *Thermal Stress and Thermal Fatigue* (Beijing: National Defence Industry Press) p12 (in Chinese) [平修二 1984 热应力与热疲劳 (北京: 国防工业出版社) 第 12 页]
- [17] Bumham A K, Runkel M, Demos S, Kozłowski M R, Wegner P 2000 *Proc SPIE* **4134** 243
- [18] Boume N, Millet J, Field J E 1999 *Proc R Soc Lond A* **455** 1275
- [19] Wong J, Haupt D, Kinney J, Ferriere J, Hutcheon I, Demos S, Kozłowski M 2000 *Proc SPIE* **4347** 666

Effect of the thermal stresses on fused silica surface on the laser induced damage^{*}

Liu Hong-Jie Huang Jin Wang Feng-Rui Zhou Xin-Da Jiang Xiao-Dong[†] Wu Wei-Dong

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

(Received 4 March 2009; revised manuscript received 4 June 2009)

Abstract

To study the effect of the thermal stresses on the optics, experiment is performed to measure the damage threshold of the two fused silica samples with one annealed to eliminate thermal stresses while the other not. The measurement includes the effects of the thermal stresses on the initial damage threshold of the fused silica, the damage growth threshold, and the damage growth laws. The results show that the damage threshold decreases as the thermal stresses increase, and the damage induced by the laser is accelerated by the thermal stresses. For the same laser intensity, the damage growth factor is higher for the area with higher thermal stresses, but the damage growth still obeys the exponential increase rule and no obvious effect of the thermal stresses is found on the damage growth threshold. The study here will determine to some extent whether the technology of the CO₂ laser pretreatment can be applied to the large-aperture optics or not.

Keywords: stresses, laser damage, fused quartz, CO₂ laser pretreatment

PACC: 7820, 4270E, 6220M

* Project supported by the High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA8040508), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 20903083), and the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of High Temperature and Density Plasma Physics, China (Grant No. 9140c6803010803).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangxdong@163.com