

大口径熔石英光学元件紫外损伤机制

刘红婕 周信达 黄 进 王凤蕊 蒋晓东* 吴卫东 郑万国

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了提高高功率激光装置光学元件的抗损伤能力,通过分析经历了上百发次高通量 351 nm 激光辐照的熔石英光学元件损伤的微观形貌,结合光束传输理论研究了大口径熔石英元件的紫外损伤机理。研究表明,目前加工工艺条件下引起紫外损伤的最主要原因是光学元件亚表面划痕,它能导致光学元件初始损伤阈值降低数倍甚至数十倍;损伤污染和衍射效应将导致损伤进一步加剧;小尺度自聚焦是处于终端组件后端 40 mm 厚度透镜体损伤的主要损伤机理,前期光学元件损伤形成的毫米和亚毫米衍射点引入的调制是导致小尺度自聚焦的根源,而输出光束的近场不均匀性导致局部光强过大,将大大增加光学元件损伤的风险。因此,改进光学元件表面加工质量,降低亚表面缺陷,对光学元件抗损伤能力的提高是非常必要的。

关键词 激光光学;紫外损伤;划痕;熔石英光学元件;衍射;小尺度自聚焦

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s2.0010

Ultraviolet-Damage Mechanism of Fused-Quartz Optics in High-Power Laser

Liu Hongjie Zhou Xinda Huang Jin Wang Fengrui

Jiang Xiaodong Wu Weidong Zheng Wanguo

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

Abstract To improve the ultraviolet-damage threshold of the fused-quartz optics in the high-power laser facility, damage mechanism of the fused-quartz optics is investigated with the beam-transmission theory by analyzing the microscopic configuration of damage which was irradiated hundreds of times with a high-power 351 nm laser. The results show that the subsurface scratch is the mostly important factor that induces ultraviolet damage. It can lower initial damage threshold of fused-quartz optics by several times, even tens of times. The effect of beam diffraction accelerates the damage. Small-scale nonlinear self-focusing is the mostly important body damage mechanism of lens with 40 mm thickness at the end of the final optics. Modulation in the near field of the beam results in high intensity in local area and raises the risk of optics damage. Therefore, it is necessary to reform the processing technologies for the improvement of the damage threshold in the ultraviolet waveband.

Key words laser optics; ultraviolet damage; scratch; fused-quartz optics; diffraction; small-scale self-focusing

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],法国的兆焦耳激光装置(LMJ)^[3]和中国的神光系列装置^[4,5]都在接近光学元件损伤阈值的通量下运行,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,是各国高功率激光器研究人员孜孜不倦追求的目标。而位于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,是目前限制高功率激光器输出能力进一步提高的瓶颈^[6,7]。

紫外元件材料包括磷酸二氘钾(DKDP)和熔石英,两种材料具有各自的损伤特性,本文主要考虑熔石英材料的激光损伤机理。导致熔石英光学元件损伤的机理有很多方面^[8~13],表面缺陷和体缺陷是导致熔石英发生激光初始损伤的最为重要的原因之一,引发的初始损伤在恒定能量作用下,随脉冲发次增加而增长^[10,14~16]。同时由于损伤点及其引入的污染物对入射光的调制作用^[11,17],进一步引发后继光学元件的激光损伤,并由于高通量运行下的非线性传输,这种损伤情况更为严重^[13,18]。通过分析经历了上百发次高通量 351 nm 激光辐照的大口径熔石英光学元件损

基金项目: 国家 863 计划(2008AA8040508)资助课题。

作者简介: 刘红婕(1978—),女,助理研究员,主要从事光学材料损伤方面的研究。E-mail: hongjie3713@163.com

* 通信联系人。E-mail: jiangxdong @163.com

伤的微观形貌,通过理论模拟并结合文献调研,分析了损伤形成的主要机理,并针对如何提高光学元件抗紫外损伤能力给出了一定的建议。

2 熔石英元件损伤形貌分析及损伤机理

利用显微镜对经历高通量运行上百发次的终端组件熔石英光学元件进行了微观观测,从显微镜微观形貌可以看出,熔石英光学元件紫外损伤最多的是划痕损伤;材料体内杂质在强激光辐照下吸收能量而爆裂,在表面也会形成坑状损伤;小尺度自聚焦成丝损伤是终端组件后端厚度为 40 mm 打靶透镜的主要损伤原因之一。

2.1 划痕

微型划痕是在加工过程中引入的,是熔石英材料在切割、研磨和抛光过程中发生的破裂现象。损伤引发通常与微型划痕相关,图 1 为显微镜下观测到的不同形态的划痕损伤,分别代表了划痕损伤的不同阶段。图 1(a)为损伤刚刚开始,在弯月形小裂

纹处可以观测到由于内部结构损伤导致的应力;图 1(b)整条划痕都有明显损伤,但损伤基本还在划痕的区域;图 1(c),(d)中可以看出,划痕处损伤已经增大到划痕外的区域,并且随着发次的增加,损伤区域将会进一步增长,直至光学元件寿命结束。目前对划痕处容易导致光学元件损伤的原因解释的比较简单,首先是小的划痕微裂纹可以有效地俘获并保护杂质颗粒,在激光辐照下这些杂质颗粒吸收激光能量,从而产生局部应力导致光学元件损伤。其次是静电增强的作用,以及小裂纹中光场的反射或散射,将会导致光强的局部增加(如表 1 所示)为不同裂缝形态和照明条件下局部光强增强因子^[10],每个数据的含义如图 2 所示。从表 1 中看出局部光强增强因子与入射光的偏振态、裂缝与光学元件表面的角度、裂缝的深度和宽度以及裂缝的形状都有很大的关系,最大增强可达到两个数量级。除此之外,划痕的存在会削弱材料的强度,在受到削弱的材料中沉积同样多的能量将会导致更加严重的损伤。

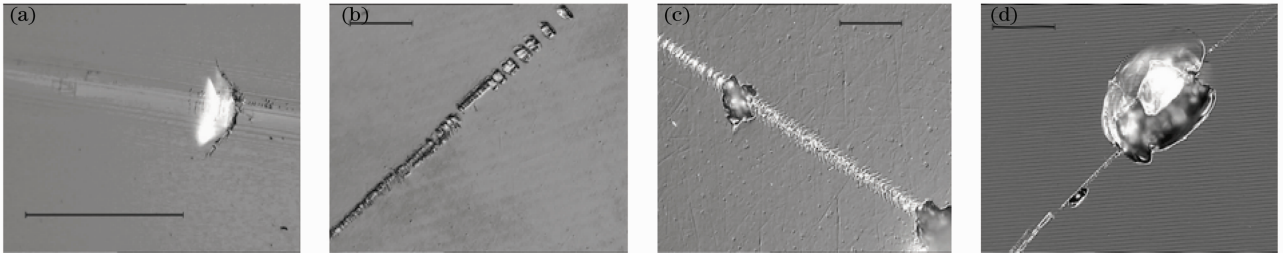


图 1 不同形态的划痕损伤(标尺尺寸为 50 μm)

Fig. 1 Micrographs of scratches with different damage pattern (the scale is 50 μm)

表 1 不同裂缝形态和照明条件下的局部光强增强因子

Table 1 Summary of the peak light intensity enhancement factor (LIEF) for the various scratches and illumination conditions

Scratch type	Scratch angle $\theta/(\text{°})$	Width /nm	Depth /nm	Mode	LIEF
Planar	0	50	2	TE	2.7
	0	50	2	TM	4.9
	0	120	2	TE	2.7
	0	120	2	TM	3.9
	20	50	2	TE	5.3
	20	120	2	TE	6.5
	30	25	2	TE	3.3
	30	50	2	TE	4.7
	30	75	2	TE	6.1
	30	100	2	TE	7.6
	30	120	2	TE	9.1
	30	120	2	TM	6.5
	30	200	2	TE	10.7
	30	250	2	TE	10.7
	40	50	2	TE	5.5
	40	120	2	TE	3.9

(续表)

Scratch type	Scratch angle $\theta/(\circ)$	Width /nm	Depth /nm	Mode	LIEF
Cone	30	120	1.5		20.6
	30	50	1		102
	60	50	0.5		5

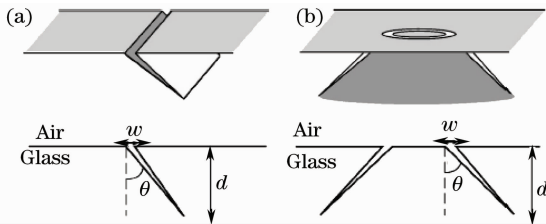


图2 表1中划痕的模型。(a)平面型,(b)锥型

Fig. 2 Schematic of the scratch models: (a) planar, (b) cone

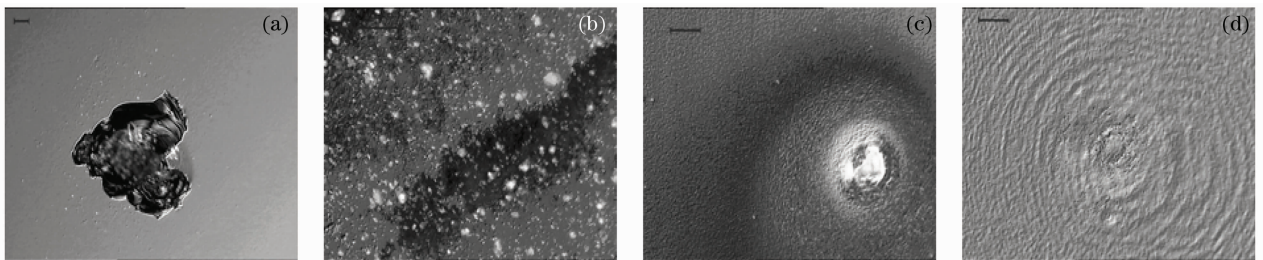
划痕的形态由弹性张应力场决定,主要依赖于抛光材料的机械特性、抛光剂和负载装置。因此,采用更加轻柔的抛光技术,减小微型划痕的数目,将大大降低光学元件初始损伤的风险,是延长光学元件使用寿命的关键。

2.2 光束衍射

高通量运行后的光学元件表面不可避免地存在一定的损伤,损伤过程中喷发的熔石英粉尘以及鬼激光打在终端组件的金属壁上喷溅的金属颗粒,都

可能溅射到光学元件表面并覆盖在上面,形成形态各异、大小不等的衍射点,如图3(a)~(c)。光束经过这些光学元件时会形成各种各样的衍射条纹,使得原本就不是很均匀的光束变得更加不均匀,光束调制度进一步增加。对于本来就接近于光学元件损伤阈值运行的光学元件来说,由于损伤的可能性随着接近损伤阈值通量的入射光通量的增长快速增长,这个增加的调制将起到毁灭性的作用。图3(d)为衍射光束导致熔石英损伤的显微镜图像,图中可以清晰地看出衍射条纹的形状,这是因为光强调制导致熔石英表面局部裂缝、熔化或消融,强度越大产生的消融弹坑越凉。

实际上衍射形成强区对光学元件的破坏作用并不一定如图3(d)这个样子,最有可能的是强区通量刚好处于光学元件的缺陷位置而引发损伤,并随着发次的增加损伤进一步加剧,形成如图1和图3(a)中显示的损伤点。

图3 衍射物:(a)损伤点,(b)熔石英粉尘,(c)金属喷溅物及(d)衍射导致光学元件损伤的显微镜图像(标尺尺寸为 $50\ \mu\text{m}$)Fig. 3 Microscopic image of diffraction particle: (a) damage spot, (b) fused silica dust, (c) metal eject and (d) image of damage spot induced by diffraction (scale is $50\ \mu\text{m}$)

由污染颗粒和其它障碍物缺陷引起的菲涅耳数 F 与传输光束波长 λ 、障碍物尺寸 a 和传输距离 z 有关,这几个量可用菲涅耳数表达: $F = a^2/\lambda z$, 相同的菲涅耳数衍射引起的调制程度是一样的。通过计算各种形状和尺寸的障碍物引起的强度分布,模拟了障碍物的衍射效应。图4为光束通过半径为 $0.1\ \text{mm}$ 的圆形障碍物衍射引起的调制随传输距离的变化,从图中可以看出调制最大值约为 1.6 。另外,还模拟了光学元件前表面的衍射物对其后表面的影响,图5为光束经过不同大小衍射物传输 $10\ \text{mm}$ 的光场分布[终端组件的晶体、光束采样光栅(BSG)和真空隔离片的厚度都在 $10\ \text{mm}$ 左右]。由

图分析知,这些光学元件前表面亚毫米量级的衍射点在后表面的调制比较大,最容易导致后表面损伤。因此在光学元件加工处理阶段最应该避免这部分缺陷。

衍射理论增加了损伤预见的可能性,这些预见能够提供一些关键的信息,来帮助制定光学元件洁净规格,以降低光学元件损伤初始者易感性。

2.3 非线性自聚焦

对于输出通量很高的高功率激光装置来说,非线性传输是不可避免的。若光学元件洁净、无缺陷、面形较好,光束经过这些元件传输时不会引入亚毫

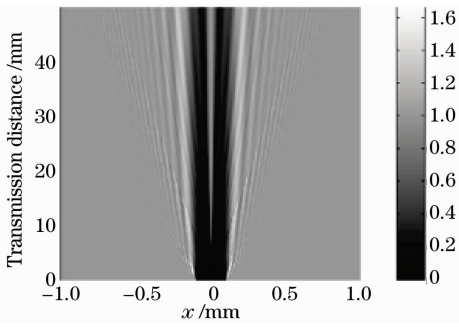


图 4 数值模拟圆形衍射点引起的光强调制随传输距离的变化

Fig. 4 Simulated light-intensity modulation as a function of distance from a circular obscuration on the input surface

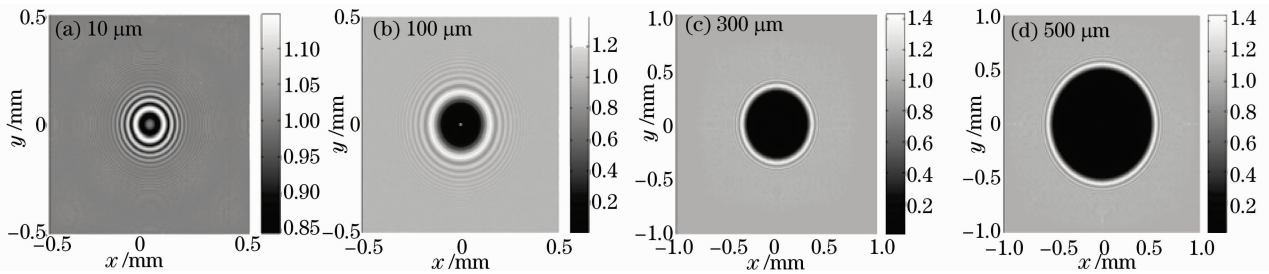


图 5 数值模拟光束通过不同大小衍射物传输 10 mm 的光场分布

Fig. 5 Simulated light-field distribution at the output surface caused by obscurations with different sizes on the input surface

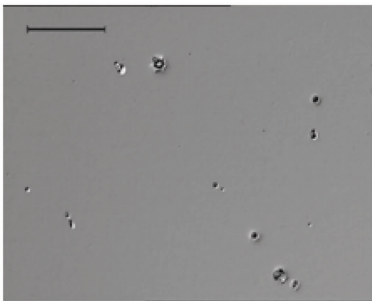


图 6 小尺度自聚焦损伤在光学元件后表面处的显微镜图像(标尺尺寸为 50 μm)

Fig. 6 Microscope image of damage spot induced by small-scale self-focusing at rear surface of optics (scale is 50 μm)

非线性自聚焦是处于终端组件后端 40 mm 厚度透镜体损伤的主要损伤机理;输出光束的近场不均匀性导致局部光强过大,前端光路中光学元件损伤导致毫米和亚毫米量级调制的增加,都大大增加了非线性自聚焦损伤的风险。因此改善输出光束的质量,降低终端组件各元件表面的毫米和亚毫米缺陷和损伤,是降低透镜自聚焦成丝破坏风险的关键。

米量级的纹波,就不会有非线性自聚焦的风险。而实际上,光学元件缺陷不可避免,尤其是高通量运行下光学元件表面不可避免地会有毫米和亚毫米损伤,这些缺陷和损伤点将调制传输光束,在非线性介质中传输具有比较高的非线性增益,聚焦成丝导致终端组件后端光学元件损伤。一般来说,非线性自聚焦从非线性材料体内开始损伤,根据强弱的不同,可能一直延伸到光学元件的后表面,从而损伤光学元件后表面。图 6 为非线性自聚焦损伤在透镜后表面处的显微镜图像,为细小的圆形坑状。一般来说坑状损伤的密集程度与非线性自聚焦严重程度有关,非线性自聚焦越严重,丝的数量和面积都会增大。

3 结 论

综上所述,目前加工工艺条件下引起紫外损伤的最主要原因之一是光学元件亚表面划痕,它能导致光学元件初始损伤阈值降低数倍甚至数十倍,是诱发初始损伤的关键因素。当损伤已经开始,融化的材料沉积到洁净的未被损伤的光学元件表面,由于光束的衍射效应以及其它复杂作用,在下一发激光脉冲到来时将产生新的损伤点。在重复辐照下,原有损伤点将持续增长,同时新的损伤点将不断增加,最终导致灾难性损伤,光学元件寿命结束。而这些损伤点经过衍射产生的高频调制,同时又成为导致非线性自聚焦破坏的种子,是导致处于终端组件后端 40 mm 厚度透镜体损伤的主要损伤机理。因此,要想提高高功率激光器终端组件熔石英光学元件的使用寿命,改进光学元件加工技术以降低亚表面缺陷,改善输出光束的质量都是非常必要的,是进一步提高激光装置运行通量的关键。

致谢 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!

参 考 文 献

- 1 E. I. Moses, J. H. Campbell, C. J. Stolz *et al.*. The national ignition facility: the world's largest optics and laser system[C]. *SPIE*, 2003, **5001**: 1~15
- 2 E. I. Moses. National ignition facility: 1.8 MJ, 750 TW ultraviolet laser[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 13~22
- 3 S. Mainguy, I. T. Pecault, B. L. Garree *et al.*. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles[C]. *SPIE*, 2005, **5991**: G9910~G9910
- 4 H. S. Peng, X. M. Zhang, X. F. Wei. Design of 60-kJ SG-III laser facility and related technology development [C]. *SPIE*, 2001, **4424**: 98~103
- 5 Xiao Gangyao, Fan Dianyuan, Wang Shiji *et al.*. SG-II solid-state laser ICF system[C]. *SPIE*, 1998, **3492**: 890~895
- 6 J. T. Hunt. National ignition facility performance review 1998 [R]. UCRL-ID-138120-98, 1999
- 7 J. Y. Hunt. National ignition facility performance review 1999 [R]. UCRL-ID-138120-99, 2000
- 8 Chen Fei, Meng Shaoxian. Damage mechanism of optical materials [J]. *Progress in Physics*, 1998, **18**(2): 187~206
陈 飞, 孟绍贤. 光学材料破坏机理[J]. *物理学进展*, 1998, **18**(2): 187~206
- 9 Chen Fei, Meng Shaoxian. Damage of optical glass materials with 2 ns large aperture high power laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1362~1365
陈 飞, 孟绍贤. 2 ns 大口径高功率激光对光学玻璃材料破坏研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1362~1365
- 10 F. Y. Genin, A. Salleo, T. V. Pistor *et al.*. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(10): 2607~2616
- 11 F. Y. Genin, M. D. Feit, M. R. Kozlowski *et al.*. Rear-surface laser damage on 355-nm silica optics owing to fresnel diffraction on front-surface contamination particles[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21): 3654~3663
- 12 J. Neauport, L. Lameignere, H. Bercegol *et al.*. Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10163~10171
- 13 M. T. Michael, Y. R. Shen. Study of self-focusing and small-scale filaments of light in nonlinear media[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1973, **9**(3): 409~422
- 14 A. Salleo, R. Chinsio, F. Y. Genin. Crack propagation in fused silica during UV and IR ns-laser illumination[C]. *SPIE*, 1998, **3578**: 456~471
- 15 A. Salleo, F. Y. Genin, J. Yoshiyama *et al.*. Laser-induced damage of fused silica at 355 nm initiated at scratches[C]. *SPIE*, 1998, **3244**: 341~347
- 16 M. A. Norton, E. E. Donohue, M. D. Feit *et al.*. Growth of laser damage in SiO₂ under multiple wavelength irradiation[R]. UCRL-PROC-216742, 2005
- 17 G. E. Sommargren, H. J. Weaver. Diffraction of light by an opaque sphere 1: description and properties of the diffraction pattern[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(31): 4646~4657
- 18 W. H. Williams, P. A. Renard, K. R. Manes *et al.*. Modeling of self-focusing experiments by beam propagation codes [R]. UCRL-LR-105821-96-1, 1997