

# K9 和熔石英玻璃纳秒基频激光损伤特性的实验对比研究\*

刘红婕 王凤蕊 罗青 张振 黄进 周信达 蒋晓东<sup>†</sup> 吴卫东 郑万国

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011年7月11日收到; 2011年8月19日收到修改稿)

利用光学元件基频激光损伤测试平台, 通过实验测试相同条件下 K9 和熔石英两类常用光学元件的初始损伤阈值、损伤增长阈值和损伤增长规律, 对比研究了两类光学元件的基频激光损伤特性. 结果表明, K9 和熔石英光学元件的初始损伤阈值基本相同, 损伤面积增长都遵循指数性增长规律, 损伤深度成线性增长. 但两者损伤增长特性仍有很大的差别, 与熔石英相比, K9 激光损伤增长阈值较低, 并且相同通量下的激光损伤增长更为迅速, 通过两类光学材料抗压性能的巨大差异很好地解释了这一现象. 该研究结果对国内高功率激光装置的透射光学材料工程应用有非常重要的参考价值.

**关键词:** 激光损伤, 熔石英玻璃, K9 玻璃, 基频

**PACS:** 61.80.-x, 42.70.-a, 78.20.-e

## 1 引言

大型高功率激光装置, 如美国的国家点火装置 (NIF)<sup>[1,2]</sup>, 法国的兆焦耳激光装置 (LMJ)<sup>[3]</sup> 和中国的神光系列装置<sup>[4,5]</sup>, 光学元件寿命是其设计和建造的重要工程参数. 高功率激光装置中应用的光学元件主要是暴露于基频 (1064 nm) 和三倍频 (355 nm) 激光辐照下, 并在接近于光学元件损伤阈值的通量下运行. 光学元件的疲劳效应或者是偶然发次的高通量输出都可能导致光学元件激光初始损伤<sup>[6,7]</sup>, 随着后继发次激光的辐照, 损伤快速增长, 超过临界尺寸将会导致光学元件毁灭性的失败<sup>[8,9]</sup>. 光学元件使用寿命主要依赖于光学元件的初始损伤阈值和重复辐照下的增长速率, 因此研究光学元件的损伤特性对高功率激光装置的正常运行是非常有意义的.

由于熔石英光学材料的优良特性, 国外大型高功率激光装置的透射材料基本都选用熔石英材料, 而国内大型高功率激光装置为了降低建造价格, 基频光透射材料大部分使用 K9, 三倍频透射材料使

用熔石英. 但随着激光器输出通量的提高, 由于 K9 的非线性折射率系数较高, 不利于高功率激光系统 B 积分的控制<sup>[10]</sup>, 部分位于高通量基频光位置的透射材料改为熔石英. 国外关于熔石英光学材料激光损伤特性的研究有很多<sup>[6-9,11-13]</sup>, 并得到一些很重要的结果, 使得光学材料的抗损伤性能逐步提高, 以满足 NIF 高通量运行的要求. 国内相关研究的水平与国际还有相当大的差距, 近几年主要着重于三倍频激光损伤特性研究<sup>[14-16]</sup>, 对于熔石英和 K9 材料的基频激光损伤特性研究较少. 本文通过 K9 和熔石英光学元件的初始损伤阈值、损伤增长阈值和损伤增长实验测试, 实验研究并比较了两种高功率透射材料的损伤特性, 研究结果将为高功率激光装置透射光学材料的选取提供重要的技术资料.

## 2 实验系统

损伤测试所用的激光器为 INNOLAS 公司

\* 国家自然科学基金 (批准号: 20903083) 和中国工程物理研究院科学基金 (批准号: 2011B0401065) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jiangxdong@163.com

的 spotlight 600 激光器, 它的输出波长为 1064 nm、输出脉宽为 7 ns, 输出光束为  $\Phi 6$  mm 的平顶高斯光束, 最大输出能量为 600 mJ. 基频光损伤特性测试光路示意图如图 1 示, 劈板取出部分光用于能量测试, 透镜汇聚主激光, 损伤测试位置在焦点近焦斑位置处, 面积约为  $0.85 \text{ mm}^2$ , 测试位置光场分布为近高斯分布. 由于样品的后表面更容易损伤, 整个实验都是研究后表面损伤特性. 被测样品后用光学显微镜对激光作用点状态进行实时监测, 并测试横向尺度的损伤增长, 用 HeNe 激光器从侧面入射侧面抛光的样品, 通过 CCD 成像系统测试纵向尺度的损伤增长. 为了避免加工抛光引入缺陷对光学材料损伤造成影响, 所用样品的加工抛光都选用同一厂家.

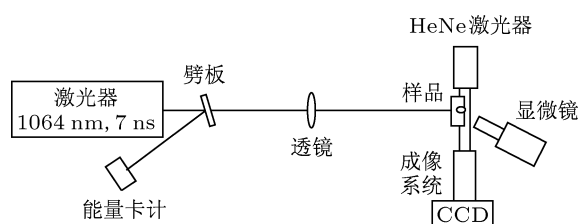


图 1 基频激光损伤特性实验研究示意光路图

### 3 实验结果

#### 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 1. K9 和熔石英光学元件后表面的基频激光初始损伤阈值基本相同.

表 1 K9 和熔石英的初始损伤阈值和损伤增长阈值

	K9	熔石英
初始损伤阈值/( $\text{J}/\text{cm}^2$ )	25.23	25.29
损伤增长阈值/( $\text{J}/\text{cm}^2$ )	4.3	6.3

#### 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.

本实验在初始损伤阈值的基础上, 进行了损伤增长阈值测试, 每个测试了 10 个点, 为了避免个别因素的影响, 我们对每个区域的损伤增长阈值进行平均, 结果如表 1. K9 的基频激光损伤增长阈值很低, 为  $4.3 \text{ J}/\text{cm}^2$ , 熔石英的基频激光损伤增长阈值比 K9 高, 为  $6.3 \text{ J}/\text{cm}^2$ .

#### 3.3 损伤增长

为了有效评价光学元件的使用寿命, 光学元件的损伤面积增长系数是一个非常重要的评价因子. 文献结果表明<sup>[17]</sup>: 损伤面积的尺寸随发次的增加呈指数规律增长,  $L = L_0 e^{\alpha N}$ ,  $L_0$  为损伤初始面积,  $N$  为发次,  $\alpha$  为损伤增长系数. 我们分别对 K9 和熔石英光学元件进行了相同通量下损伤面积随发次变化的实验, 研究基频激光辐照下两种光学材料的损伤面积增长特性, 实验结果如图 2. 图中标记点为实验数据, 其中实心标记为 K9 材料, 空心标记为熔石英材料(下同), 曲线是利用公式  $L = L_0 e^{\alpha N}$  根据实验数据拟和得到的. 可以看出, 指数规律的拟和曲线与我们的实验结果符合得相当好, 根据该公式可以得到每个能量下损伤面积的增长系数.

对于可比较的同一通量数据用相同的符号标记, 如图 2 中的实心圆 ( $7.22 \text{ J}/\text{cm}^2$ ) 和空心圆 ( $7.35 \text{ J}/\text{cm}^2$ )、实心三角 ( $9.71 \text{ J}/\text{cm}^2$ ) 和空心三角 ( $9.61 \text{ J}/\text{cm}^2$ )、实心倒三角 ( $12.19 \text{ J}/\text{cm}^2$ ) 和空心倒三角 ( $12.67 \text{ J}/\text{cm}^2$ )、实心五星 ( $16.37 \text{ J}/\text{cm}^2$ ) 和空心五星 ( $16.1 \text{ J}/\text{cm}^2$ ), 分别为基频激光通量基本相同的情况下两种材料的损伤面积增长情况, 比较可知 K9 材料的基频激光损伤面积增长远高于熔石英材料. K9 和熔石英光学材料的基频激光损伤增长系数随通量变化的关系曲线如图 3, 相同通量下 K9 材料损伤增长系数远高于熔石英材料, 同时两种光学材料的损伤增长系数都随着通量的增加呈线性增长, K9 材料的损伤增长系数增加得更快.

本次实验还获得了各个通量下损伤深度随发次变化的数据, 研究基频激光辐照下两种光学材料的损伤深度增长特性. 图 4 为不同通量的基频激光辐照下 K9 和熔石英材料损伤深度随辐照发次的变化情况, 由图可知, 基频激光辐照下 K9 和熔石英材料损伤深度都基本随辐照发次成线性增长, 同样通量下 K9 损伤深度增长略快. 从图中可以看出损伤深度增长速率有明显的转折点, 损伤面积增长也同样有这个转折点, 并且互相对应, 如图 5 和图 6, 分别为同通量激光辐照下 K9 和熔石英材料损伤面积

和损伤深度的增长. 该转折点前损伤面积增长遵循指数性增长规律, 损伤深度以一定的速率增长; 转折点后的损伤面积增长变缓, 第二阶段开始, 在稳定的通量下损伤深度将以稳定的速率增长. 由于只有转折点前的损伤面积增长符合指数性增长规律, 图 2 的损伤面积增长数据并不是我们实验中的全部数据, 而是转折点前的数据.

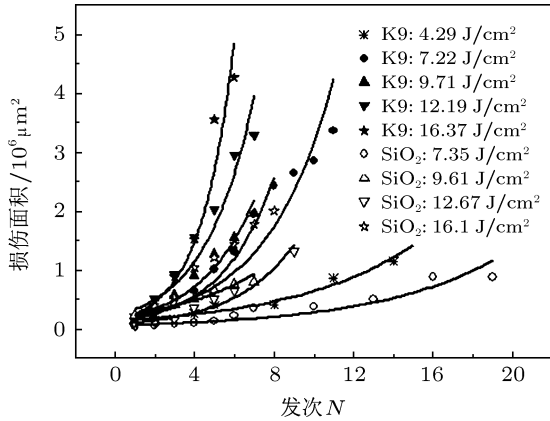


图 2 不同通量的基频激光辐照下 K9 和熔石英光学材料损伤面积随辐照发次的变化情况

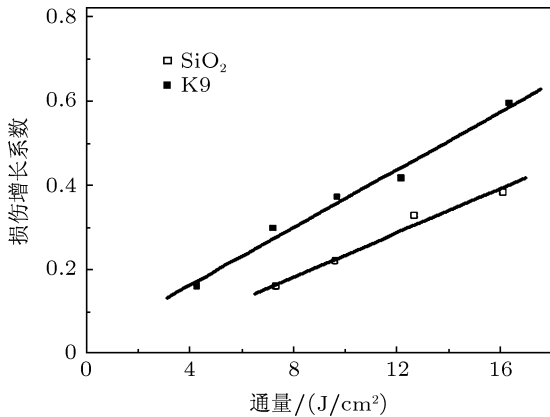


图 3 K9 和熔石英光学材料的基频激光损伤增长系数随通量的变化

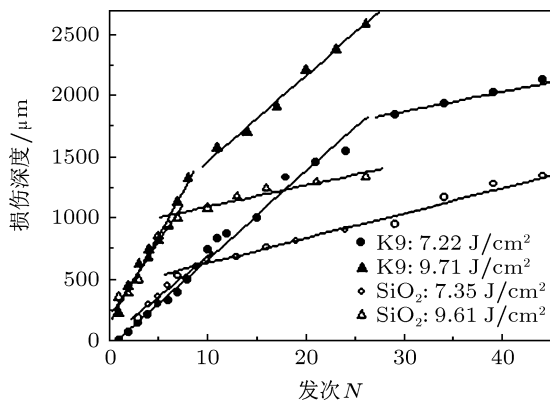


图 4 不同通量的基频激光辐照下 K9 和熔石英材料损伤深度随辐照发次的变化情况

## 4 分析讨论

从上面分析可以看出, K9 和熔石英光学元件的初始损伤阈值基本是一致的, 而两者的损伤增长阈值和损伤增长特性差别却很大. 初始损伤阈值一致, 是因为两类光学元件选用相同的表面抛光技术, 因此引入同类的加工缺陷, 这些缺陷可能会导致光学元件损伤阈值降低至数分之一甚至数十分之一 [18-20], 是诱发激光损伤的主导因素, 因此尽管材料不同, 初始损伤阈值也一样.

损伤一旦开始, 后继发次的损伤主要决定于损伤区对激光能量的吸收和材料的抗高温高压能力. 由于光学元件损伤区域更容易耦合激光能量, 因此损伤增长阈值远远低于光学元件的初始损伤阈值. 后继发次到来时, 首先是激光损伤区吸收激光能量形成局部高温, 达到一定温度产生等离子体, 这个时间约几十个 ps. 此后是激光余脉冲与等离子体和冲击波的作用, 对后表面来说, 由于等离子体对激光的反射作用, 光学元件后表面沉积的能量增加, 同时等离子体吸收余脉冲能量膨胀在后表面引起更强的压力波, 最终导致光学元件损伤的呈指数规律快速增长.

由于 K9 材料和熔石英材料的膨胀系数分别为  $7.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  和  $5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  [21], 直接导致了两类光学材料的抗压性能有巨大的差异, 石英玻璃的抗压强度约 3 GPa, 抗拉强度约 0.5 GPa [22], 而 K9 玻璃的抗拉强度只有 0.028 GPa, 抗压强度只有 0.69 GPa [23]. 正是这个差异, 导致 K9 材料损伤增长阈值比熔石英更低, 并且损伤增长更为迅速. 可以预见在连续脉冲激光辐照下, K9 光学材料的寿命要远低于熔石英材料, 由于高功率激光装置中损伤光学元件的替换需要大量的时间和金钱, 这可能是国外大功率激光装置不选择 K9 这类光学材料作为基频光透射元件的原因之一.

由图 5 和图 6 可以看出, 两类光学元件的损伤增长都有一个明显的转折点, 该点前损伤面积呈指数性增长, 该点后损伤面积增长快速下降, 损伤深度增长速率也变缓慢. 形成这个转折点的原因在于实验所用激光具有一定口径, 当损伤区域超过激光作用区域, 光学元件的损伤面积增长将逐步变小, 直至停止, 而损伤深度将以恒定速率增长. 对高斯光束来说, 特定通量 (能损伤光学元件) 的区域范围将随着峰值通量的增长而增加, 因此, 峰值通量增加会引起损伤面积的增加. 由于 K9 材料的断裂应

力较小,因此相同的多次激光辐照下,K9 损伤坑面积远大于熔石英(见图 2 中的数据).

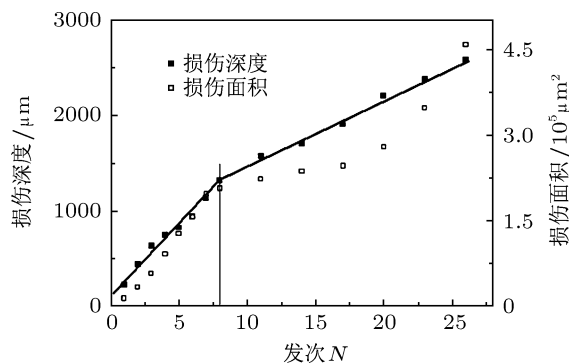


图 5 9.71 J/cm<sup>2</sup> 基频激光辐照下 K9 材料损伤面积和损伤深度随辐照发次的变化情况

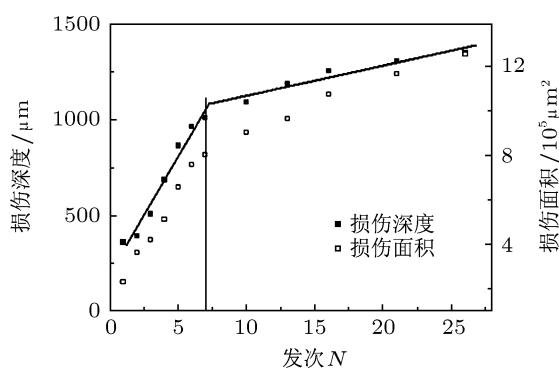


图 6 9.61 J/cm<sup>2</sup> 基频激光辐照下熔石英材料损伤面积和损伤深度随辐照发次的变化情况

## 5 结论

K9 和熔石英两类高功率透射光学元件损伤特性的对比研究表明,两类光学元件的初始损伤阈值基本相同(约为 25 J/cm<sup>2</sup>),损伤增长阈值差别较大,K9 和熔石英分别为 4.3 J/cm<sup>2</sup> 和 6.3 J/cm<sup>2</sup>. 在测试激光的有效面积内,两类光学元件的损伤面积都遵循指数性增长规律,损伤深度呈线性增长,但相同通量下 K9 的激光损伤增长更为迅速,我们通过两类光学材料抗压性能的差异解释了这一现象. 由于测试激光面积的有限性,激光损伤面积达到一定面积后将不再增长,损伤发展过程将有一个转折,此后的损伤主要体现在损伤深度上,在稳定通量下损伤深度将以一定速率稳定增长.

由于高功率激光装置的传输光束为大尺寸的平顶高斯光束,损伤坑的尺寸远小于光束,因此折点前的数据可被用于预见装置中大口径光学元件的损伤增长. 本文的研究结果表明一旦发生损伤,在后继发次脉冲激光辐照下,K9 光学元件的寿命要远低于熔石英材料,这些数据将对高功率激光装置透射光学材料的工程应用有着重要的参考价值.

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心钟华和周秀文在材料损伤显微镜图像测试过程中给予的帮助.

- [1] Moses E I, Campbell J H, Stolz C J, Wuest C R 2003 *Proc. of SPIE* **5001** 1
- [2] Moses E I 2004 *Proc. of SPIE* **5341** 13
- [3] André M L, Decroisette M 1998 *Europhysics News* **6** 235
- [4] 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. of SPIE* **4424** 98
- [5] 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. of SPIE* **3492** 890
- [6] Salleo A, Genin F, Yoshiyama J, Stolz C J, Kozlowski M 1998 *Proc of SPIE* **3244** 341
- [7] Miller P, Suratwala T, Bude J, Laurence T A, Shen N, Steele W A, Feit M, Menapace J, Wong L 2009 LLNL-PROC-420439
- [8] Bercegol H, Bouchut P, Lemaignère L, LeGarrec B, Razé G 2004 *Proc of SPIE* **5273** 312
- [9] Negres R A, Norton M A, Cross D A, Carr C W 2010 *Opt. Exp.* **18** 19966
- [10] Fleck J A, Morris J R, Bliss E S 1978 *IEEE J. Quant Elec.* **QE-14** 353
- [11] Miller P E, Suratwala T I, Wong L L, Feit M D, Menapace J A, Davis P J 2005 *Proc of SPIE* **5991** 599101-1
- [12] Bien-Aimé K, Néauport J, Tovenca-Pecault I, Fargin E, Labrugère C, Belin C, Couzi M 2009 *Appl. Opt.* **48** 2228
- [13] Smith A V, Do B T 2008 *Proc of SPIE* **7132** 71321E-1
- [14] Liu H J, Huang J, Wang F R, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1308 (in Chinese) [刘红婕, 黄进, 王凤蕊, 周信达, 蒋晓东, 吴卫东 2010 物理学报 **59** 1308]
- [15] Liu H J, Zhou X D, Huang J, Wang F R, Jiang X D, Huang J, Wu W D, Zheng W G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 065202 (in Chinese) [刘红婕, 周信达, 黄进, 王凤蕊, 蒋晓东, 黄竞, 吴卫东, 郑万国 2011 物理学报 **60** 065202]
- [16] Huang J, Jiang X D, Liu H J, Lv H B, Wang H J, Yuan X D, Zheng W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4677 (in Chinese) [黄进, 蒋晓东, 刘红婕, 吕海滨, 王海军, 袁晓东, 郑万国 2010 物理学报 **59** 4677]
- [17] Norton M A, Donohue E E, Hollingsworth W G, Feit M D, Rubenchik A M, Hackel R P 2004 *Proc. of SPIE* **5647** 197
- [18] Wang F R, Huang J, Liu H J, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D, Zhen W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5122 (in Chinese) [王凤蕊, 黄进, 刘红婕, 周信达, 蒋晓东, 吴卫东, 郑万国 2010 物理学报 **59** 5122]
- [19] Bercegol H, Grua P, Hébert D, Morreeuw J D 2007 *Proc. of SPIE* **6720** 672003-1
- [20] Ge'nin F A, Salleo A, Pistor T V, Chase L L 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 2607
- [21] Iida S, Sinzen H, Ono K 1979 *Physics Common Datasheet* (Bei-

ing : Science Press) (in Chinese) [饭田修一, 大野和郎, 神前熙  
1979 物理学常用数表 (北京: 科学出版社)]  
[22] Bonneau F, Combis P, Rullier J 2004 *Appl. Phys. B* **78** 447

[23] Luo F, Sun C W, Du X W 2001 *High Power Laser and Particle  
Beams* **13** 19 (in Chinese) [罗福, 孙承伟, 杜祥琬 2001 强激光与  
粒子束 **13** 19]

# Experimental comparison of damage performance induced by nanosecond $1\omega$ laser between K9 and fused silica optics\*

Liu Hong-Jie Wang Feng-Rui Luo Qing Zhang Zhen Huang Jin Zhou Xin-Da  
Jiang Xiao-Dong<sup>†</sup> Wu Wei-Dong Zheng Wan-Guo

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

(Received 11 July 2011; revised manuscript received 19 August 2011)

## Abstract

The initial damage threshold, the damage growth threshold and the damage growth laws of K9 glass and fused silica glass are tested respectively in the same experimental condition with  $1\omega$  nanosecond laser. The comparison of the laser induced damage performance between the two glass materials is performed. The results show that the initial damage thresholds of the two glass materials are the same, the damage area growths both obey the exponential increase rule and their damage depth growths obey the linear increase rule. However, there is apparent difference in the rule of damage growth. For example, the damage growth threshold is lower and the damage growth coefficient is higher for K9 glass. This can be explained by the difference in the material mechanical strength between the two glass materials. The present research is very important for choosing transparent optical materials used in high power laser.

**Keywords:** laser damage, fused silica glass, K9 glass,  $1\omega$

**PACS:** 61.80.-x, 42.70.-a, 78.20.-e

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 20903083), and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics, China Grant No. 2011B0401065).

<sup>†</sup> E-mail: jiangxdong@163.com