

KrF 激光和脉冲 CO₂ 激光损伤 K9 玻璃的实验对比与分析

王 玺^{1,2,3}, 方晓东¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230029;
3. 解放军电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 对 KrF 准分子激光辐照 K9 玻璃进行了损伤实验, 并与脉冲 CO₂ 激光损伤 K9 玻璃进行了对比分析, 研究了紫外和远红外两种激光系统对同种光学材料的损伤特性。实验结果表明, KrF 准分子激光和脉冲 CO₂ 激光对 K9 玻璃的损伤形貌基本相同, 损伤主要是热力耦合损伤机制, 但是两者在损伤阈值和损伤时间等方面仍有很大差别。与脉冲 CO₂ 激光相比, K9 玻璃的 KrF 准分子激光损伤阈值更低, 并且损伤持续时间更短。通过两类激光在波长和光子能量上的巨大差异可以很好地解释这一现象。该研究结果对准分子激光在空间工程应用上有着非常重要的参考价值。

关键词: 准分子激光; 激光损伤; 损伤形貌; K9 玻璃

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1206009

Experimental comparison and analysis on damage performance of K9 glass irradiated by KrF excimer laser and pulse CO₂ laser

Wang Xi^{1,2,3}, Fang Xiaodong¹

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;
3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: It has very important application value to investigate the damage performance of K9 glass irradiated by ultraviolet excimer laser. In this paper, the experiment research on damage in K9 glass irradiated by 248 nm KrF excimer laser was carried out, the sample damage threshold and damage morphology were analyzed by means of metallurgical microscope and scanning electron microscope. The comparison of laser induced damage performance between KrF excimer laser and pulse CO₂ laser were investigated. The experimental results indicate that the damage mechanism of K9 glass irradiated by KrF excimer laser and pulse CO₂ laser mainly follow the thermal-mechanical coupling mechanism. However, there is apparent difference in damage threshold and damage time. For example, the damage threshold is lower and the damage time is shorter for KrF excimer laser. This can be explained by the difference in wavelength and photon energy between the KrF excimer laser and pulse CO₂ laser. The research presented in this paper is helpful for further exploring the ultraviolet excimer laser damage mechanism of optical materials.

Key words: excimer laser; laser damage; damage morphology; K9 glass

收稿日期: 2016-04-16; 修订日期: 2016-05-21

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金项目(SKL2014ZR03)

作者简介: 王玺(1981-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: eastangus@126.com

通讯作者: 方晓东(1963-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光技术应用方面的研究。Email: xdfang@aiofm.ac.cn

0 引言

K9 玻璃在可见光、近红外波段具有很高的透过率,是激光系统和光电探测装置中使用的最为广泛的光学材料之一,在军事上有着广泛的应用。目前,对 K9 玻璃的损伤效应研究主要集中在近红外波段 1.06 μm 及远红外波段 10.6 μm 上的激光损伤^[1-6]。而对于紫外波段的激光损伤,尤其是准分子激光的损伤效应,公开发表的文献较少^[7-13]。随着新型激光武器的发展,用于军事上的各种探测器几乎都面临着高功率激光武器的严重威胁。K9 玻璃对紫外激光不透明,即紫外激光处于 K9 玻璃工作波段外,研究工作波段外激光对光学材料的损伤具有重要的军事价值。参考文献[14-15]主要报道了作者较早完成的脉冲 CO₂ 激光对 K9 玻璃的损伤实验及理论分析。区别于脉冲 CO₂ 激光,准分子激光器所发出的激光为紫外短脉冲激光,具有波长短、光子能量高、峰值功率高、靶耦合效率高等特点,在激光精密加工以及军事领域中,特别是空间应用上,高功率的准分子激光器有着很大的应用前景。分析准分子激光和脉冲 CO₂ 激光对 K9 玻璃的损伤效应,对比它们的特点和区别,在激光攻防领域有着重要的应用参考价值。

文中主要报道了 KrF 准分子激光损伤 K9 玻璃的相关实验结果,从损伤阈值、损伤形貌以及损伤时间等方面与文献[14-15]中脉冲 CO₂ 激光对 K9 玻璃的实验数据进行了对比分析,研究了紫外和远红外两种激光系统对同种光学材料的损伤特性和规律,研究结果将有助于进一步深入理解激光与物质的相互作用,而且为激光加工和激光攻防领域提供重要的理论依据和参考数据。

1 准分子激光损伤 K9 玻璃的实验系统

KrF 准分子激光损伤 K9 玻璃实验光路如图 1

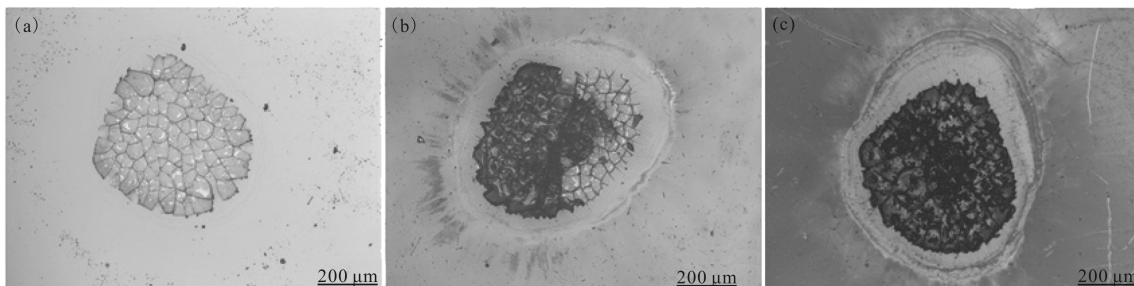


图 2 金相显微镜观察的多脉冲损伤形貌(6.5 J/cm²)

Fig.2 Metallurgical microscope micrographs of damage morphology irradiated by KrF laser with laser fluence 6.5 J/cm²

所示。实验装置主要由 KrF 准分子激光器、He-Ne 激光器、衰减系统、镀膜全反镜、分束镜、石英平凸聚焦透镜、二维可移动光学平台、紫外激光能量计、激光功率计和若干 K9 玻璃样品组成。KrF 准分子激光器可在 248 nm 处提供频率可调、脉宽 20 ns 的高质量脉冲激光束。紫外激光能量计采用的是 OPHIR 公司 L30A-10MM 型能量计,K9 玻璃样品尺寸为 $\Phi 30 \times 30 \times 3$ mm,样品两面抛光,聚焦后的光斑有效面积控制为 0.02 cm²。利用金相显微镜和扫描电子显微镜对样品损伤形貌观察、分析。利用激光功率计测量损伤前后透过样品的 He-Ne 激光的功率 P_T ,以分析不同脉冲能量下样品的损伤程度。检测光源为 He-Ne 激光器,波长 632.8 nm,输出功率 ≥ 2.0 mW,距离样品表面约 50 cm。激光功率计采用 OPHIR 公司 3A-P 型功率计,探测器距样品表面约 10 cm,光敏面直径 16 mm。

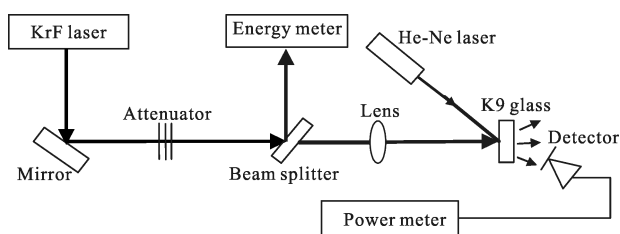


图 1 实验光路示意图

Fig.1 Schematic of the experimental setup

2 准分子激光损伤 K9 玻璃的实验结果及分析

2.1 多脉冲损伤形貌

用金相显微镜观察多脉冲损伤形貌,如图 2 所示。由于玻璃本身的脆性,随着更多激光能量的吸收,材料局部升温引起的热膨胀在辐照点产生极大的应力,当相应的热应力超过材料的极限强度时,首先在结构薄弱的位置发生脆性断裂,就会出现图中

的裂纹。从图 2 中可以看出,随着脉冲数的增多,辐照区内损伤程度加重,先前已经形成的裂纹,在后续脉冲的作用下发生进一步的碎裂;并且在辐照区边缘和外围出现了明显的辐射状径向裂纹和环向裂纹。可见,在多脉冲激光的作用下,K9 玻璃损伤的累积效应明显。

2.2 单脉冲损伤形貌

图 3 (a)~(d) 为激光脉冲能量密度分别为 0.86、1.8、6.5、7.5 J/cm² 时样品的单脉冲损伤形貌。当激光能量密度为 0.86 J/cm² 时,K9 玻璃表面开始出现颜色变化,损伤形貌如图 3(a)所示;当激光能量密度为 1.8 J/cm² 时,观察到 K9 玻璃表面出现明显的熔融损伤,并伴有等离子体闪光,损伤形貌如图 3(b)所示。通过金相显微镜,可以明显看到,在单脉冲激光的作用下,K9 玻璃表面出现了热应力造成的明显裂纹,由于脉冲作用后,熔融物质温度下降,凝固和沉积在玻璃表面,在整个激光辐照区域,形成了凹陷、隆起的粗糙形貌。损伤的这些特征说明熔融和应力的这种热损伤是 K9 玻璃的主要损伤机制。实验结果还表明,K9 玻璃的激光损伤极为迅速,随着脉冲能量的增加,损伤从点状损伤发展成区域损伤,裂纹逐渐增长,损伤面积逐渐增大,但是达到一定面积后将不

再增长,此后的损伤将体现在损伤深度上,使区域内的裂纹进一步碎裂。

图 4(a)~(c)为单脉冲能量密度为 8.0 J/cm² 时的损伤形貌扫描电镜图。从图 4(a)、(b)中可以看到一些明显的熔融烧蚀现象,如液滴、液泡破裂留下的坑洞,和辐照区边缘液体溅射现象,同时从图 4(c)中可以看到材料出现裂纹、断裂、剥离等力学损伤。另外,在实验过程中,观察到明显的等离子体闪光和火花飞溅。出现这种力学损伤形貌,可以由以下几种机制来解释:(1)由非均匀的温度场形成的热应力。这种热应力在表面处最大。(2)激光支持爆轰波的冲击压力。当高能激光束聚焦到 K9 玻璃表面时,由激光引起的等离子体爆轰波就会产生,并伴随着出现等离子体闪光现象。形成的等离子体吸收激光能量,在激光束的方向形成爆轰波,这种高速气流冲击材料表面的液态区域,并导致产生垂直于表面的巨大冲击压力,这种冲压能够对材料表面造成严重的力学损伤。(3)材料受热蒸发形成的蒸汽波对表面的反冲压力。但是这种反冲压力与激光支持等离子体爆轰波的冲击压力相比要小很多。正是在这几种力学效应共同作用下,就出现了图 4(c)中的裂纹、断裂以及剥离等严重的力学损伤形貌。

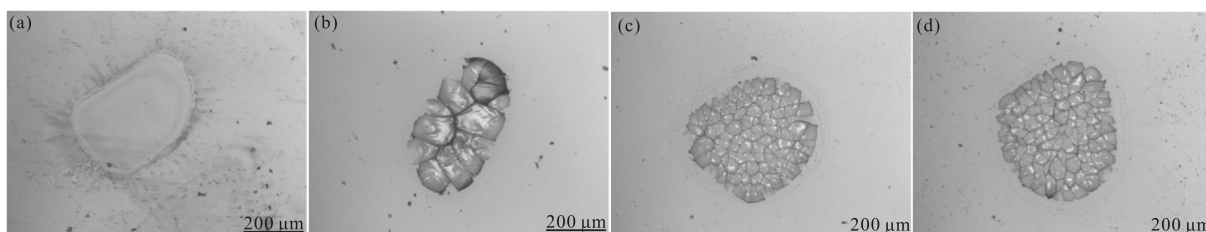


图 3 金相显微镜观察到的样品的单脉冲激光损伤形貌 (a) 0.86 J/cm²; (b) 1.8 J/cm²; (c) 6.5 J/cm²; (d) 7.5 J/cm²

Fig.3 Metallurgical microscope micrographs of damage morphology irradiated by KrF laser with laser fluence (a)0.86 J/cm²; (b)1.8 J/cm²; (c)6.5 J/cm²; (d)7.5 J/cm²

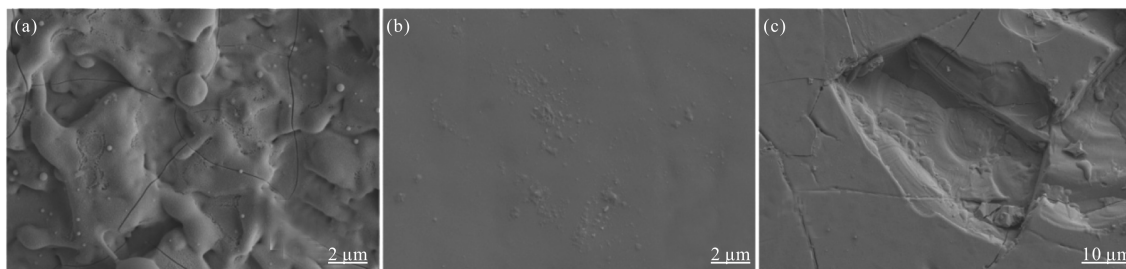


图 4 SEM 观察到的损伤形貌(激光能量密度 8.0 J/cm²)

Fig.4 SEM micrographs of damage morphology irradiated by KrF excimer laser with laser fluence 8.0 J/cm²

因此,从以上损伤形貌中我们可以推断,248 nm KrF 准分子激光对 K9 玻璃的损伤主要是热力耦合的损伤机制。

2.3 损伤时间

在单脉冲激光辐照下,从辐照开始计时直到透射光功率计读数不再减小,这段时间可以认为是样品的损伤时间,通过实验测得样品的损伤时间均在 10 s 左右。如图 5 所示为单脉冲激光能量分别为 150、86.4 mJ 时,透过样品的 He-Ne 激光功率 P_T 与时间的变化关系。从图 5 中可以看出,入射激光能量越高,则透过样品的激光功率 P_T 越低,说明损伤程度越高,透过率 P_T 与入射激光能量 E_m 成反比。在 15 s 左右的计时中,透射光功率始终在下降,并且在激光脉冲作用后的 10 s 内有一个大幅下降的过程,然后逐渐缓慢减小趋于稳定。损伤持续一定的时间,笔者认为主要是因为冷却应力损伤的发展以及样品表面熔融后的冷却结晶过程。

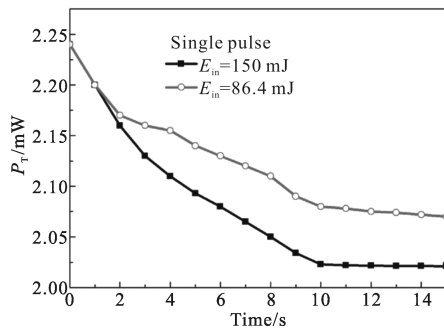


图 5 透射激光功率与时间的变化关系

Fig.5 Transmission laser power vs time

3 准分子激光和脉冲 CO₂ 激光损伤实验结果对比分析

3.1 损伤阈值与损伤持续时间对比

在 KrF 准分子激光和脉冲 CO₂ 激光损伤 K9 玻璃的实验过程中都出现了明亮的等离子体闪光,参考文献[14]中根据等离子体闪光法测量得到的损伤阈值为 6.533 J/cm²,样品受单脉冲 CO₂ 激光辐照后的损伤持续时间约为 1 min 以上;而在 KrF 准分子激光损伤 K9 玻璃的实验中,测得的损伤阈值为 1.8J/cm²,样品受单脉冲 KrF 激光辐照后的损伤持续时间约为 10 s 左右。可见,KrF 准分子激光对 K9 玻璃不仅损伤时间短,而且更容易对其造成损伤。

从对比分析中可以看出,波长的变化对损伤效果有着至关重要的影响,笔者认为这种关系与激光的光子能量有关。对于禁带宽度为 4.7 eV 的 K9 玻璃,248 nm KrF 准分子激光单光子能量为 5.0 eV,略高于 K9 玻璃的禁带宽度。单光子能量就可以使材料价带中的电子吸收光子能量直接跃迁至导带,产生更多的自由电子,较为容易形成等离子体闪光,所以在辐照区内出现熔融和热应力造成龟甲状裂纹。而对于远红外的 CO₂ 激光,其单光子能量为 0.12 eV,远远小于 K9 玻璃的禁带宽度,很难产生多光子电离,要想产生等离子体只有通过很高的脉冲能量密度,使得辐照区迅速升温、气化,进而材料蒸气中的分子在高温下被电离,形成等离子体闪光。所以 CO₂ 激光的损伤阈值比 KrF 准分子激光的要高。

3.2 损伤形貌对比

损伤形貌是损伤机制的外在表现,利用金相显微镜对远红外 CO₂ 激光辐照 K9 玻璃的损伤样品与 KrF 准分子激光辐照 K9 玻璃的损伤样品进行了对比观察,如图 6 所示。发现其损伤形貌基本相同,光斑区域内都形成了热应力造成的裂纹,并且在整个激光辐照区域内都呈现出熔融物质冷却沉积后造成的波纹。这说明,KrF 准分子激光对 K9 玻璃的损伤与 CO₂ 激光对 K9 玻璃的损伤机理相同,均为热损伤机制。

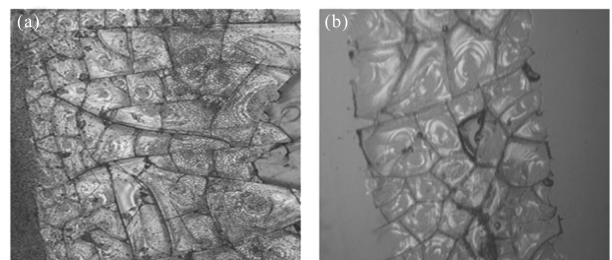


图 6 损伤形貌对比(a)CO₂ 激光辐照 K9 玻璃的损伤形貌;(b)KrF 激光辐照 K9 玻璃的损伤形貌

Fig.6 Damage morphology of K9 glass irradiated by different lasers : (a)pulse CO₂ laser ; (b)KrF excimer laser

4 结论

通过开展 KrF 准分子激光对 K9 玻璃的损伤实验,从损伤阈值、损伤形貌以及损伤时间等方面与脉冲 CO₂ 激光对 K9 玻璃的实验数据进行了对比分

析,研究了紫外和远红外两种激光系统对同种光学材料的损伤特性和规律。研究表明:KrF 准分子激光和脉冲 CO₂ 激光对 K9 玻璃损伤形貌相同,最主要的损伤机制都是热力耦合损伤机制。但区别于远红外的脉冲 CO₂ 激光,短波长的准分子激光对同种光学材料的损伤效果更好。可见,波长对损伤效果有着重要影响。特别是在紫外波段,随着波长的变短,光子能量逐渐增大,多光子电离(包括单光子、双光子)的作用会越来越明显,直接体现在损伤阈值的降低上。

参考文献:

- [1] Carr C W, Bude J D, De M P. Laser-supported solid-state absorption fronts in silica[J]. *Physical Review B*, 2010, 82(18): 184304.
- [2] Pan Y X. Effect of inclusion matrix model on temperature and thermal stress fields of K9-glass damaged by long-pulse laser[J]. *Opt Eng*, 2013, 53(4): 044302.
- [3] Jones S C. Recent progress on laser-induced modifications and intrinsic bulk damage of wide-gap optical materials[J]. *Opt Eng*, 1989, 28(10): 1039-1068.
- [4] Gallais L, Natoli J Y, Amra C. Statistical study of single and multiple pulse laser-induced damage in glasses [J]. *Opt Express*, 2002, 10(25): 1465-1474.
- [5] Miller P E, Suratwala T I, Wong L L. The distribution of subsurface damage in fused silica[C]//SPIE, 2005, 5991: 599101.
- [6] Pan Yunxiang, Shen Zhonghua, Lu Jian, et al. Analysis of temperature and thermal stress fields of K9 glass damaged by 1064nm nanosecond pulse laser [C]//SPIE, 2013, 8603: 860308.
- [7] Zhang H B, Yuan Z J, Zhou J, et al. Effects of prism beam expander and slits on excimer laser linewidth narrowing modules[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(04): 041405.
- [8] Joly P, Petrarca M, Vogel A, et al. Laser-induced condensation by ultrashort laser pulses at 248 nm[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(9): 091112.
- [9] Schutz-Kuchly T, Slaoui A, Zelgowski J, et al. UV and IR laser induced ablation of Al₂O₃/SiN: H and a-Si: H/SiN: H [J]. *EPJ Photovoltaics*, 2013, 5: 55201.
- [10] Ihlemann J, Weichenhain-Schriever R. Pulsed laser-induced formation of silica nanogrids[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2014, 9(1): 102.
- [11] Rosen D I. Coupling of pulsed 0.35 μm laser radiation to aluminum alloys[J]. *Appl Phys*, 1982, 53(10): 3190.
- [12] Brusasco R M, Penetrante B M, Peterson J E. UV-laser conditioning for reduction of 351nm damage initiation in fused silica[C]//SPIE, 2002, 4679: 48-55.
- [13] Liu Hongjie, Wang Fengrui, Luo Qing, et al. Experimental comparison of damage performance induced by nanosecond laser between K9 glass and fused silica optics [J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(7): 076103. (in Chinese)
刘红婕, 王凤蕊, 罗青, 等. K9 玻璃和熔石英玻璃纳秒基频激光损伤特性的实验对比研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(7): 076103.
- [14] Wang Xi, Li Hua, Nie Jinsong. Simulation and experimental research on damage in K9 glass due to pulsed CO₂ laser radiation[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1760-1765. (in Chinese)
王玺, 李化, 聂劲松. 脉冲 CO₂ 激光损伤 K9 玻璃的实验研究与仿真[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1760-1765.
- [15] Wang Xi, Bian Jintian, Li Hua, et al. Experiment on damage in K9 glass due to repetition rate pulsed CO₂ laser radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1204-1207. (in Chinese)
王玺, 卞进田, 李化, 等. 重频脉冲 CO₂ 激光损伤 K9 玻璃的实验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1204-1207.