

## 重频脉冲 CO<sub>2</sub> 激光损伤 K9 玻璃的实验

王 玺, 卞进田, 李 华, 聂劲松, 孙晓泉, 尹学忠, 雷 鹏

(脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 对脉冲 CO<sub>2</sub> 激光在不同重频模式下损伤 K9 玻璃进行了实验研究。采用输出能量为 10 J, 脉宽为 90 ns, 重复频率在 100 Hz 至 300 Hz 之间连续可调的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器, 对 K9 玻璃样品进行了激光损伤实验, 观察到两次不同重频条件下样品的损伤形貌。实验结果表明, 重频越高, 对样品的损伤程度就越严重; 应力损伤成为 K9 玻璃激光损伤的最主要的原因, 在重频强激光的辐照下, K9 玻璃表面出现强烈的等离子体闪光, 伴随明显的熔融气化破坏, 并形成等离子体爆轰波。爆轰波对玻璃材料产生了严重的力学冲击作用, 这种应力作用足以对 K9 玻璃造成毁灭性破坏。运用有限元分析对激光辐照 K9 玻璃的温度与应力分布进行仿真, 其计算结果与实验基本吻合。

**关键词:** 激光技术; 损伤; 重频; 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光; K9 玻璃; 损伤形貌

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1204-04

## Experiment on damage in K9 glass due to repetition rate pulsed CO<sub>2</sub> laser radiation

Wang Xi, Bian Jintian, Li Hua, Nie Jinsong, Sun Xiaoquan, Yin Xuezhong, Lei Peng

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China)

**Abstract:** In this paper, the experiment on damage in K9 glass induced by pulsed CO<sub>2</sub> laser under different repetition rates was carried out, which had a pulse width of 90 ns. The laser pulse energy was 10 J and the repetition rate was kept within the range of 100 Hz to 300 Hz. The damage morphologies of two kind repetition rates after laser irradiation were characterized. The experimental results indicate that the effect of laser irradiation on samples can be affected considerably by the change of laser repetition rate, and the intensity of damage morphology on the sample increases with the laser repetition rate, and the damage in K9 glass induced by pulsed CO<sub>2</sub> laser is dominated by stress. As a result, the plasma detonation wave induced by laser occurred, the material was broken result from the melting and evaporation of K9 glass. It is shown that the plasma detonation wave affected stress damage considerably, and this mechanical effect almost destroyed K9 glass sample. A numerical simulation was performed to calculate temperature and stress distributions in K9 glass sample irradiated by pulsed CO<sub>2</sub> laser using finite element method. The model prediction was in line with the experiment data.

**Key words:** laser technique; damage; repetition rate; pulsed CO<sub>2</sub> laser; K9 glass; damage morphology

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-03

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金

作者简介: 王玺(1981-), 男, 工程师, 硕士, 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: 聂劲松(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电对抗技术方面的研究。Email: njs7001@sina.com

## 0 引 言

K9 玻璃是一种常见的光学材料,由于在可见光、近红外波段具有较高的透过率,因此被广泛地用于光学仪器的窗口、棱镜、反射镜以及滤光片的基体<sup>[1]</sup>。关于 K9 玻璃性质的理论及实验研究相当多,而激光损伤的研究是其中一个重要方面。国内外众多学者对 K9 玻璃的远红外 CO<sub>2</sub> 激光损伤做了大量的工作,但大多集中在连续 CO<sub>2</sub> 激光对其的损伤研究上<sup>[2-7]</sup>。连续 CO<sub>2</sub> 激光在工业上较为常用<sup>[8-9]</sup>,但在军事应用中脉冲 CO<sub>2</sub> 激光则是优先选择对象。研究脉冲 CO<sub>2</sub> 激光对 K9 玻璃的损伤在激光攻防领域有着重要的应用参考价值。

关于脉冲 CO<sub>2</sub> 激光对 K9 玻璃的损伤研究尤其是实验研究,很少见到公开发表的文献。参考文献[10]报道了作者较早前完成的单脉冲模式下 CO<sub>2</sub> 激光对 K9 玻璃的损伤实验。文中主要报道采用重频 CO<sub>2</sub> 强激光器输出固定脉宽、频率可调的多脉冲激光损伤 K9 玻璃的相关实验结果,同时运用有限元分析对激光辐照 K9 玻璃的温升模型进行计算,计算结果与实验具有较好的一致性。

## 1 实验装置

实验装置主要由脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器、无氧铜反射镜、无氧铜凹面反射镜和若干 K9 玻璃样品组成。实验所用到的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器可(如图 1 所示)在 10.6 μm 处提供脉冲能量为 10 J、脉冲宽度为 90 ns 的高质量脉冲激光束,其重复频率在 100~300 Hz 之间连续可调。激光器出光口光斑尺寸为 36 mm×35 mm,光束发散角小于 3×5 mrad。无氧铜反射镜  $\Phi=70$  mm,无氧铜凹面反射镜 R=500 mm,采用无氧铜反射镜,可以



图 1 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器  
Fig.1 Pulsed CO<sub>2</sub> laser

有效抵御脉冲强激光的冲压,其对 CO<sub>2</sub> 激光反射效果也较好。无氧铜平面反射镜距激光器出光口为 74 cm。K9 玻璃样品尺寸为  $\Phi 45$  mm×5 mm,样品两面抛光。

重频 CO<sub>2</sub> 强激光损伤 K9 玻璃的实验光路如图 2 所示。

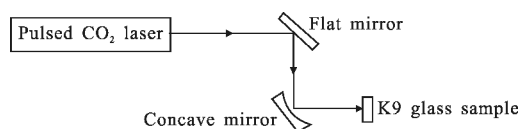


图 2 实验光路示意图

Fig.2 Schematic of the experimental setup

出于人眼安全性的考虑,脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器输出的激光首先经过无氧铜平面反射镜的反射,再由无氧铜凹面反射镜反射聚焦在样品表面上。

## 2 实验过程

调整样品位置,使之处于凹面反射镜的子午面焦点和弧矢面交点之间,并使脉冲 CO<sub>2</sub> 激光能垂直入射到样品表面。

实验分两组进行,第一组将激光器重频设定为 150 Hz,输出激光脉冲串的时间设定为 1 s,记录样品损伤结果;第二组将激光器的重频设定为 100 Hz,输出激光脉冲串的时间仍为 1 s,记录样品损伤结果。两组实验中,激光器均能稳定输出能量为 10 J,脉宽为 90 ns 的脉冲激光。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 激光光斑

图 3 为由热敏纸反映出的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器输出的激光光斑,光斑呈矩形状,尺寸为 36 mm×35 mm。聚焦后的光斑大小为 14 mm×12 mm,仍然呈矩形状。

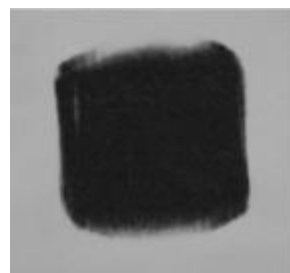


图 3 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器输出的激光光斑  
Fig.3 Facula of laser output by pulsed CO<sub>2</sub> laser

### 3.2 样品损伤形貌及分析

第一组实验中,在重频为 150 Hz 的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光辐照下,在不到 1 s 的时间内,K9 玻璃样品已经产生严重的炸裂。图 4 为样品在重频为 150 Hz、作用时间为 1 s、脉冲能量为 1 J 时的 CO<sub>2</sub> 激光辐照下的损伤照片。第二组实验中,在重频为 100 Hz 的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光辐照下,作用时间为 1 s 内,样品虽然没有炸裂,但同样产生了严重的损伤。图 5 为样品在重频为 100 Hz、作用时间为 1 s、脉冲能量为 10 J 时的 CO<sub>2</sub> 激光辐照下的损伤照片。



图 4 第一组实验中样品的损伤照片

Fig.4 Photograph of damaged sample in the first experiment

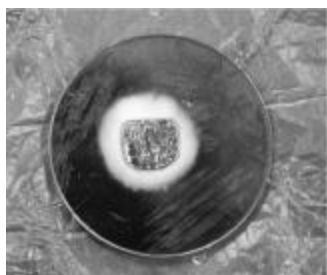


图 5 第二组实验中样品的损伤照片

Fig.5 Photograph of damaged sample in the second experiment

在两组实验中,样品表面均出现明显的熔融气化破坏,并产生非常强烈的等离子体闪光。产生等离子体闪光的原因是由于脉冲激光能量很高,且脉冲作用时间很短,样品表面吸收热量来不及发生热传导,从而辐照位置处迅速升温,产生气化,进而材料蒸气中的分子被电离,形成等离子体闪光。从图 4、图 5 中可以看到在光斑外围有一圈白色物质,就是材料蒸气遇冷后附着上去的。同时,等离子体进一步吸收激光能量后,沿激光入射方向形成爆轰波,对玻璃产生强烈的冲击作用。受其影响,在光斑区域内产生了严重的应力损伤,从两组图片中可以看到,这种力学损伤足以将样品迅速破坏,甚至发生炸裂(如图 4 所示)。可见对于 K9 玻璃来说,应力作用是其造成

损伤的最重要的原因,这与参考文献[11]的理论计算结果基本一致。

对比两组图片可以看到,在激光重频为 150 Hz 时,样品已经发生了炸裂,且损伤程度远远大于激光重频为 100 Hz 时的样品。可见,在激光脉冲能量、作用时间都相同的条件下,重频越高,样品的损伤程度就越严重。因此,就达成有效损伤效果而言,在无法实现更高激光能量输出时,可以采用较高重频形式对目标进行照射,以达到预期效果。

### 4 理论计算

建模相关理论参见参考文献 [10],K9 玻璃尺寸为  $\Phi 45 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,激光光斑半径为  $\Phi 12 \text{ mm}$ ,当入射激光脉冲能量为 10 J,重频为 100 Hz,作用时间为 0.14 s 时,K9 玻璃的温度分布云图如图 6 所示,从图中可以看出在光斑区域内,温度最高为 1 628.7 K,出现在 K9 玻璃表面的光斑区域内。

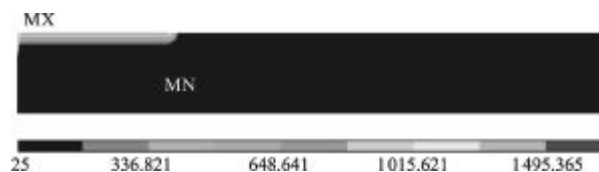


图 6 K9 玻璃的温度分布等值云图

Fig.6 Equivalence nephogram of temperature on the surface of K9 glass

K9 玻璃表面的温度以及应力分布如图 7-8 所示,光斑区域内温度上升到 1 628.7 K,已经超过了熔点,在光斑区域外温度迅速下降为 25 K。轴向应力  $\sigma_z$  基本为 0,径向应力  $\sigma_r$  在光斑区域内表现为压缩应力,其值在 1 100 MPa 左右,远远大于 K9 玻璃压缩断裂强度 (690 MPa),在光斑外沿, $\sigma_r$  迅速减小至 100 MPa 左右,随着半径的增大逐渐减小趋于零。环向应力  $\sigma_\theta$  在光斑区域内也表现为 1 000 MPa 以上的压缩应力,在光斑边缘外侧则跳变为拉伸应力,最大为 90 MPa,也随着半径的增大逐渐减小趋于零。

由计算结果可知,光斑区域内的 K9 玻璃在熔融之前其表面就已经达到了应力损伤的条件,而在光斑边缘外侧附近的环向拉伸应力也超过了 K9 玻璃的拉伸断裂强度 (30 MPa),这部分区域也会发生应力损伤。以上计算是在 K9 玻璃熔融的临界条件下进行的,随着激光辐照的增加,K9 玻璃表面温度超

过了熔融阈值,产生气化,使应力损伤的痕迹被掩盖了,但是在参考文献[10]中,可以清楚地看见应力损伤留下的痕迹。

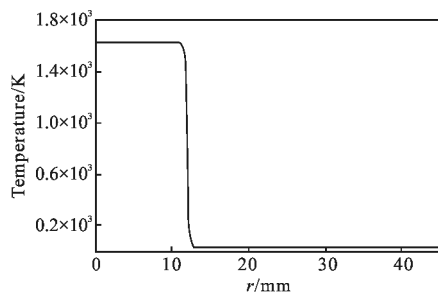


图 7 K9 玻璃表面的温度分布

Fig.7 Temperature distribution on the surface of K9 glass

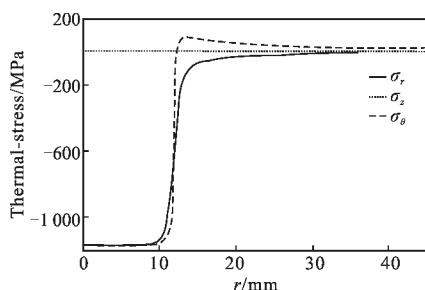


图 8 K9 玻璃表面上的应力分布

Fig.8 Stress distribution on the surface of K9 glass

## 5 结论

利用脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器,输出脉冲能量为 10 J、脉冲宽度为 90 ns 的脉冲激光,分别选择了 100 Hz、150 Hz 两种重频对 K9 玻璃进行了损伤实验,研究表明:

(1) 重频越高,对样品的损伤程度就越严重。就达成有效损伤效果而言,在无法实现更高激光能量输出的情况下,可以采用较高重频形式对目标进行照射,以达到预期效果。

(2) 在重频强激光的辐照下,K9 玻璃表面出现强烈的等离子体闪光,伴随明显的熔融气化破坏,并形成等离子体爆轰波。激光辐照区域内材料受热升温迅速气化,材料蒸气遇冷结晶在激光光斑外围,与此同时在光斑区域内,爆轰波对玻璃材料产生了严重的力学冲击作用,这种应力作用足以对 K9 玻璃进行毁灭性破坏,应力损伤成为 K9 玻璃损伤的最主要的原因。

(3) 计算得知,当激光脉冲能量为 10 J,重频为 100 Hz,作用时间为 0.14 s 时,K9 玻璃的表面温度

已经达到熔融阈值,而在此之前 K9 玻璃表面已经达到了应力损伤的条件,继续进行辐照,温度进一步升高,就会产生气化现象,理论计算结果与实验研究吻合良好。

## 参考文献:

- [1] Luo Fu, Du Xiangwan, Sun Chengwei. Near-infrared laser beam diameter effect on damage threshold in K9 glass [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1): 62-65. (in Chinese)
- [2] Zhao Jianjun, Song Chunrong, Niu Yanxiong. Study of thermal and mechanical damage in optical material induced by high-power laser[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 31-34. (in Chinese)
- [3] Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiangai, et al. Study on laser induced damage morphology in optical materials [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14 (2): 238-242. (in Chinese)
- [4] Xia Jinjun, Gong Hui, Cheng Lei, et al. CW laser induced thermal and mechanical damage in optical window materials [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(1): 20-23. (in Chinese)
- [5] Duan Xiaofeng, Wang Yuefeng, Niu Yanxiong, et al. Analytic calculation and evaluation of thermal mechanical damage in optical materials induced by laser [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(12): 1455-1459. (in Chinese)
- [6] Sun Chengwei. Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002, 32-33. (in Chinese)
- [7] Cheng Faliang. Analytical solution for laser-induced heating and thermal stress crack of optical material targets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1996, 8(4): 595-601. (in Chinese)
- [8] Wu Qiang, Cheng Genyu, Wang Gui et al. CO<sub>2</sub> laser welding of zinc coated high strength steel [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1133-1138. (in Chinese)
- [9] Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu et al. Shielding gas method of CO<sub>2</sub> laser-TIG hybrid welding [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1422-1427. (in Chinese)
- [10] Wang Xi, Li Hua, Nie Jinsong. Simulation and Experimental Research on Damage in K9 glass due to Pulsed CO<sub>2</sub> Laser Radiation[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1760-1765. (in Chinese)
- [11] Wang Xi, Li Hua, Nie Jinsong. Thermal and Mechanical Damage in K9 Glass Irradiated by Pulse CO<sub>2</sub> Laser [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 49-52. (in Chinese)