

文章编号: 0258-7025(2008)11-1760-06

# 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光损伤 K9 玻璃的实验与仿真

王 玺<sup>1,2</sup> 李 化<sup>1</sup> 聂劲松<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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;

<sup>2</sup> 中国人民解放军 61251 部队,河北 秦皇岛 066102)

**摘要** 对脉冲 CO<sub>2</sub> 激光损伤 K9 玻璃进行了实验与仿真研究。采用输出脉宽为 10 μs 的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器对 K9 玻璃样品进行激光损伤实验,并且建立了脉冲 CO<sub>2</sub> 激光损伤 K9 玻璃的理论模型,利用有限元法对 K9 玻璃样品中的温度和应力分布进行数值分析。研究表明, K9 玻璃的损伤阈值为 6.533 J/cm<sup>2</sup>;入射激光能量密度越高,样品的损伤程度就越大,并且多脉冲对样品的损伤程度明显大于单脉冲;在激光能量较强的情况下, K9 玻璃表面在光斑区域内形成熔融损伤和由压缩应力造成的应力损伤,在光斑区域外围则形成由环向拉伸应力造成的应力损伤,仿真分析结果与实验结果吻合良好。

**关键词** 激光技术;激光损伤阈值;损伤;脉冲 CO<sub>2</sub> 激光;K9 玻璃

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083511.1760

## Simulation and Experimental Research on Damage in K9 Glass due to Pulsed CO<sub>2</sub> Laser Radiation

Wang Xi<sup>1,2</sup> Li Hua<sup>1</sup> Nie Jinsong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China;  
<sup>2</sup> 61251 Army Unit of PLA, Qinhuangdao, Hebei 066102, China

**Abstract** The experiment research on damage in K9 glass induced by pulsed CO<sub>2</sub> laser is carried out, which has a pulse width of 10 μs. The theoretical model of K9 glass irradiated by pulsed CO<sub>2</sub> laser is developed and a numerical simulation is performed to calculate temperature and stress distributions in K9 glass sample irradiated by pulsed CO<sub>2</sub> laser using finite element method. The simulation and experimental results indicate that the damage-threshold of K9 glass irradiated by single pulse is 6.533J/cm<sup>2</sup>, and the effect of laser irradiation on samples can be affected considerably by the change of laser energy density. The damage mechanism of K9 glass induced by pulsed CO<sub>2</sub> laser are melting damage and compress stress damage in irradiated zone, and the damage mechanism of K9 glass induced by pulsed CO<sub>2</sub> laser is circular tensile stress damage in the periphery of irradiated zone when the laser energy is high. The model prediction agrees well with the experiment data.

**Key words** laser technique; laser induced damage threshold; damage; pulsed CO<sub>2</sub> laser; K9 glass

## 1 引 言

K9 玻璃是一种性能优异的光学材料,它在可见光、近红外波段具有高透过率,被广泛用作光学仪器的窗口、棱镜、反射镜以及滤光片的基体<sup>[1]</sup>。因此,关于 K9 玻璃性质的研究相当多,而激光损伤是其

中一个重要方面。许多学者对 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> 激光在工业上有着广泛的应用<sup>[8,9]</sup>,但在军事上主要应用的是脉冲 CO<sub>2</sub> 激光。研究脉冲 CO<sub>2</sub> 激光对 K9

收稿日期:2008-03-13;收到修改稿日期:2008-04-14

作者简介:王 玺(1981—),男,甘肃人,硕士研究生,目前从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: eastangus@126.com

导师简介:聂劲松(1970—),男,安徽人,教授,目前从事激光技术方面的研究。E-mail: njs7001@sina.com

玻璃的损伤具有重要的军事价值。

本文报道了采用脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器输出固定脉宽的单脉冲激光损伤 K9 玻璃的实验结果。根据等离子体闪光法测量得到了 K9 玻璃的损伤阈值, 利用功率计测量了样品在损伤前后透射过的半导体激光功率, 分析不同脉冲能量下样品的损伤程度。根据样品的损伤情况, 分析了 K9 玻璃的激光损伤机制。最后建立理论模型, 利用 ANSYS 有限元分析软件对损伤样品表面的温度和应力分布进行了仿真计算, 实验结果和模拟分析的结果吻合良好。

## 2 实验装置

脉冲 CO<sub>2</sub> 激光损伤 K9 玻璃的实验光路如图 1 所示。

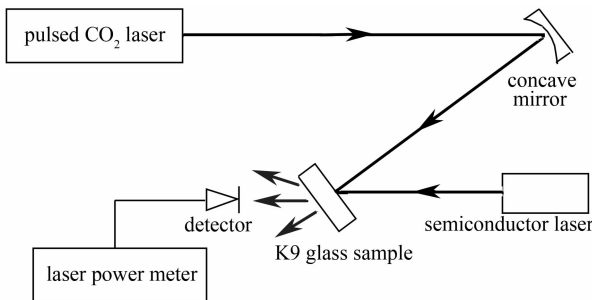


图 1 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光损伤 K9 玻璃的实验光路示意图

Fig. 1 Experimental setup of damage of K9 glass induced by pulsed CO<sub>2</sub> laser

脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器输出的激光首先经过平凹反射镜的反射聚焦在样品表面上, 半导体激光器输出的激光始终辐照在样品的损伤位置处, 激光功率计用来实时测量样品损伤前后透射过样品的半导体激光的功率。

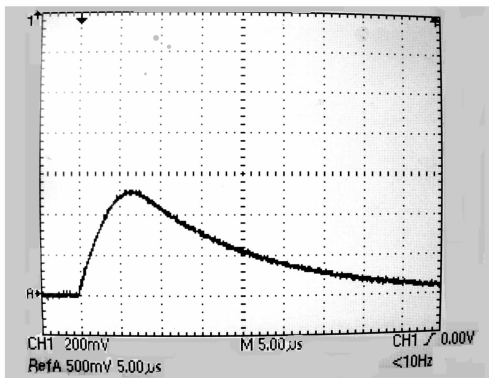


图 2 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器输出脉冲波形

Fig. 2 Pulse temporal profile of CO<sub>2</sub> laser

实验装置主要由脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器, 半导体激光器, 镀金膜平凹反射镜, JG2 型激光功率计和若干

K9 玻璃样品组成。实验所用的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器的腔内气压为  $0.245 \times 10^5$  Pa, 通过调节电压来控制激光器的输出能量, 输出能量在 3 ~ 17.2 J 之间。该激光器为多模输出, 且只能手动触发单脉冲激光, 输出脉冲波形如图 2 所示, 其脉宽固定为 10 μs。平凹反射镜  $\varphi=60$  mm,  $R=1.5$  m, 对于 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光器, 反射率大于 99%, 反射镜距激光器出光口为 2.85 m。检测光源为半导体激光器, 波长 650 nm, 光斑半径为 6 mm, 探测器距样品表面 10 cm, 光敏面直径 10 mm, K9 玻璃样品尺寸为  $\varphi 30\text{mm} \times 3\text{mm}$ , 样品两面抛光。

## 3 实验过程

调整平凹反射镜的反射角度和与样品之间的距离, 使脉冲 CO<sub>2</sub> 激光垂直入射到样品表面, 聚焦后的激光光斑面积控制在 0.75 cm<sup>2</sup> 左右。

实验分两组进行, 第一组对样品损伤实验采用“1-on-1”方式, 即样品上只允许作用一次脉冲, 每当一次脉冲作用后, 则更换新的样品。选择不同的入射能量对样品进行辐照, 记录损伤结果。阈值的测量采用目前比较简便的等离子体闪光法, 考虑到样品尺寸及测量误差, 相同的激光能量对样品的损伤点取了 4 个, 如果 4 个损伤点均产生等离子体闪光, 则可以判定样品表面产生了确切的损伤。功率计测量每块样品损伤前后的透射光功率。

第二组对样品损伤实验采用“N-on-1”方式, 即对样品同一点进行多次激光脉冲辐照。由于激光器只能手动触发单脉冲激光, 所以一次脉冲结束到下次脉冲时间间隔大约为 1 min, 实验在入射激光能量 13.7 J 的条件下对样品同一损伤点共进行了 4 次脉冲能量不变的激光辐照。用激光功率计测量样品损伤点在损伤前后的透射光功率。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 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, 面积约为 15 cm<sup>2</sup>。图 4 为经过平凹反射镜反射聚焦后的激光光斑, 从图中可看出, 由于聚焦后的光斑能量密度很高, 在光斑区域内, 热敏纸表面已经被激光损伤, 并且呈现出穿孔的现象, 所以在光斑区域内热敏纸无法正常显现出黑色。而在光斑边缘处能量密度较低, 热敏纸仍可以显现出黑色痕迹, 因此可以观察到聚焦光斑

的形状,光斑呈矩形,光斑面积约为  $0.75 \text{ cm}^2$ ,此时平凹反射镜与样品之间的距离为  $90 \text{ cm}$ 。



图 3 脉冲  $\text{CO}_2$  激光器输出的激光光斑

Fig. 3 Facula of pulsed  $\text{CO}_2$  laser output

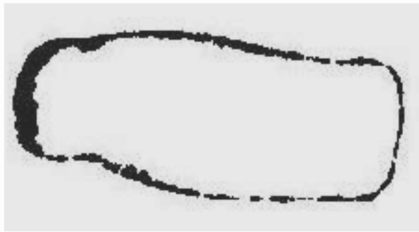


图 4 聚焦后的激光光斑

Fig. 4 Focusing spot of laser

#### 4.2 激光损伤阈值

在第一组实验中,激光能量为  $4.1 \text{ J}$  时,在 4 次激光辐照下样品表面均没有出现等离子体闪光,但当激光能量达到  $4.9 \text{ J}$  时,每次脉冲激光辐照,样品表面均产生了等离子体闪光,而且随着激光能量的增大,闪光程度越来越强,在激光能量增大到  $10.9 \text{ J}$  时样品表面产生了等离子体火花。产生等离子体闪光的原因是由于脉冲激光能量密度很高,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。目前,常以等离子体闪光作为判断损伤的标准,这种标准把人为干扰的因素减小到了尽可能低的程度,是比较通用的判别损伤的方法<sup>[10]</sup>。因此,按照等离子体闪光法,当入射激光能量为  $4.9 \text{ J}$  时,相对应的能量密度为  $6.533 \text{ J/cm}^2$ ,这就是由等离子体闪光法测得的损伤阈值。

#### 4.3 样品损伤形貌及分析

实验中,激光器的输出能量从  $3 \sim 17.2 \text{ J}$  的范围内变化,相应的能量密度从  $4 \sim 22.93 \text{ J/cm}^2$  变化。图 5(a)为激光能量密度为  $22.93 \text{ J/cm}^2$  时样品的损伤形貌,(b)为入射激光能量密度为  $4 \text{ J/cm}^2$  时样品的损伤形貌,(c)为入射激光能量密度为  $18.27$

$\text{J/cm}^2$  的单脉冲激光对样品同一损伤点进行 4 次辐照后的损伤形貌。

通过肉眼观察 K9 玻璃样品的损伤情况,发现损伤点均在样品的迎光面,背面没有损伤发生。由图 5 可以看出,由于玻璃材料强烈地吸收激光能量进而导致温度升高超过熔点,所以在样品表面的光斑区域内均产生了熔融损伤。

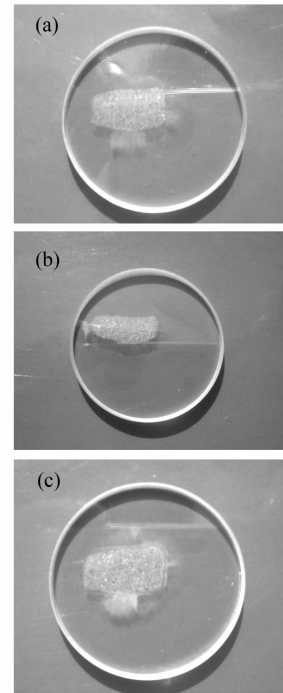


图 5 三种不同激光能量密度下的样品损伤照片

(a)单脉冲,入射激光能量密度为  $22.93 \text{ J/cm}^2$ ;

(b)单脉冲,入射激光能量密度为  $4 \text{ J/cm}^2$ ;

(c)4 次脉冲,入射激光能量密度为  $18.27 \text{ J/cm}^2$ ;

Fig. 5 Photographs under three different laser energies

(a) single pulse  $22.93 \text{ J/cm}^2$ ; (b) single pulse  $4 \text{ J/cm}^2$ ;

(c) four pulse  $18.27 \text{ J/cm}^2$

由于样品表面均发生了熔融损伤,无法看清样品内部的损伤情况,因此只能根据表面损伤情况来分析。由图 5(a)可以看到,在光斑区域外围一圈,有明显裂纹产生,此为应力损伤。由图 5(b)所示,由于入射激光能量密度为  $4 \text{ J/cm}^2$ ,没有图 5(a)的入射激光能量密度高,产生的环向应力没有前者大,所以在光斑区域外围产生的裂纹较少,且没有象图 5(a)呈现得清晰。而对于多脉冲的情况,由图 5(c)可以看出,虽然入射脉冲能量密度  $18.27 \text{ J/cm}^2$  不如图高,但是由于 4 次脉冲激光辐照引起的热累积,使得多脉冲的损伤效果比单脉冲损伤效果要强,所以图 5(c)的样品损伤程度明显大于图 5(a)中的样品损伤程度,在光斑区域外围产生的裂纹更为清晰

明显。

#### 4.4 不同激光入射条件下样品的损伤程度

利用功率计测量了样品在损伤前后透射过的半导体激光功率  $P_1$  和  $P_2$ ，不同激光入射条件下的透射光功率损失率  $P_L$  为

$$P_L = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100\% , \quad (1)$$

这样就可以定量地反映出样品的损伤程度。由于第一组对样品损伤实验采用“1-on-1”方式，相同的入射能量密度下总共做了 4 次损伤实验，因此这一入射能量密度下的透射光功率损失率  $P_L$  为四次实验中计算得到的透射光功率损失率取平均值。

图 6 为不同激光入射条件下透射光功率损失率  $P_L$  与激光能量密度之间的关系。如图所示，入射激光能量密度越高，透射光功率损失越大，样品的损伤程度就越严重。而且，在同一入射能量密度下，经过 4 次激光脉冲作用后的透射光功率损失率大于单脉冲作用时的损失率，甚至远远大于本实验最高入射能量密度时的功率损失率。说明多脉冲对样品的损伤程度大于单脉冲入射，在无法实现更高激光能量输出时，可以采用多脉冲的形式对目标进行损伤。

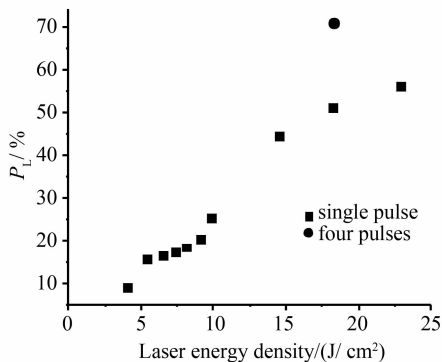


图 6 不同激光入射条件下的透射光功率损失率

Fig. 6  $P_L$  versus laser energy density

## 5 对 K9 玻璃激光损伤的仿真计算

### 5.1 理论模型

考虑一圆盘状 K9 玻璃样品，半径为  $r_s = 15$  mm，厚为  $h = 3$  mm，取柱坐标系，脉冲激光垂直入射到 K9 玻璃表面 ( $z = 0$ )， $z$  轴与激光照射方向一致，脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器聚焦后的激光光斑是个不规则的矩形，且能量在光斑范围内也不是完全均匀分布，给建立理论模型带来了困难。为了便于建模，假定激光光斑为圆型光斑，能量在光斑范围内均匀分布，光斑面积与实际光斑面积大小基本一致，因此设定光斑半径为  $R$ ，且光束中心与样品中心重合。激光

光强在光斑范围内均匀分布为  $I_0$ 。由于样品及入射光强分布具有轴对称性，因此系统选用二维平面物理模型，如图 7 所示。

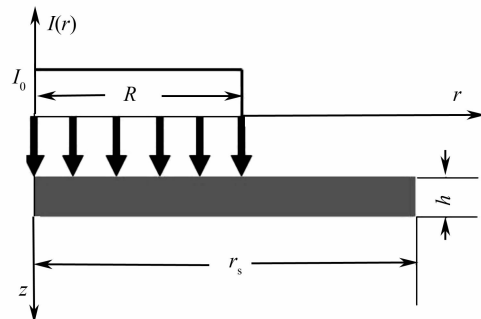


图 7 脉冲激光辐照 K9 玻璃样品的物理模型

Fig. 7 Physical model of K9 glass irradiated by pulsed CO<sub>2</sub> laser

激光辐照样时产生的温度及应力分布也具有轴对称性，所以在柱坐标下，样品内部的温度场  $T(r, z, t)$  满足轴对称的热传导方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (2)$$

式中  $\rho$ 、 $c$  和  $k$  分别为材料的密度、比热容及热导率， $Q$  为激光束深层吸收的体热源。

对于体吸收材料，由文献[6]得

$$Q = I_0 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \exp(-\beta z) = \frac{E}{\pi R^2 \cdot \tau} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \exp(-\beta z), \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为材料表面对入射光的吸收率， $\beta$  为材料对激光的体吸收系数， $E$  为单脉冲能量， $\tau$  为激光脉宽。

由于脉冲作用时间极短，空气是热的不良导体，设整个系统处于真空的环境下，无对流换热，且热辐射能量损失相比吸收激光能量很小，对温度场的影响可忽略不计，因此在计算中认为上下表面和侧面 ( $r = r_s$ ) 是绝热的。初始条件和边界条件可写为

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad (4)$$

$$\text{bottom: } -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{z=h} = 0, \quad (5)$$

$$\text{side: } -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=r_s} = 0. \quad (6)$$

利用 ANSYS 有限元分析软件进行数值模拟分析。选用热-力耦合二维轴对称分析单元计算 K9 玻璃的温度场及应力场分布，应力计算只涉及热弹性模型而不考虑材料的塑性变形。计算中认为 K9 玻璃样品的初始温度分布均匀， $T_0 = 25$  °C。力学边界条件取为轴线上所有质点的水平位移为零。

计算中所需 K9 玻璃的热物理和力学参数为<sup>[11]</sup>: $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ ,  $c=0.71 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$ ,  $k=1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , 熔点  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ , 弹性模量  $E_s=78 \text{ GPa}$ , 热膨胀系数  $\alpha=8.6\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 泊松比  $\nu=0.208$ , K9 玻璃的压缩断裂强度(抗压强度)  $\sigma_c=690 \text{ MPa}$ , 拉伸断裂强度(抗拉强度)  $\sigma_T=30 \text{ MPa}$ , 材料表面对  $\text{CO}_2$  激光的吸收率  $\alpha=0.85$ . K9 玻璃对  $\text{CO}_2$  激光的体吸收系数由文献[12]得  $\beta=166700 \text{ m}^{-1}$ .

## 5.2 计算结果与分析

选择入射激光能量  $3 \text{ J}$ , 光斑半径  $5 \text{ mm}$ , 脉宽  $10 \text{ }\mu\text{s}$ , 经过计算得到了样品表面的温度及应力分布如图 8,9 所示, 压缩应力表示为负值, 拉伸应力表示为正值。由图所示, 样品表面温度在光斑范围内为  $1541 \text{ }^\circ\text{C}$ , 已经超过了熔点。轴向应力  $\sigma_z$  基本为 0。径向应力  $\sigma_r$  由最大压缩应力( $1160 \text{ MPa}$ )逐渐趋于零, 远远大于 K9 玻璃压缩断裂强度( $690 \text{ MPa}$ )。环向应力  $\sigma_\theta$  在样品中心为压缩应力, 沿半径向外逐渐变为拉伸应力, 约在光斑半径外边缘处达到最大值, 约为  $37 \text{ MPa}$ , 然后逐渐减小趋于 0。

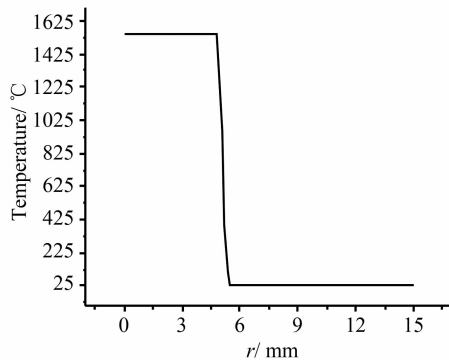


图 8 样品表面上的温度分布。 $t=10 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $E=3 \text{ J}$

Fig. 8 Temperature distribution on surface at  $t=10 \text{ }\mu\text{s}$  and  $E=3 \text{ J}$

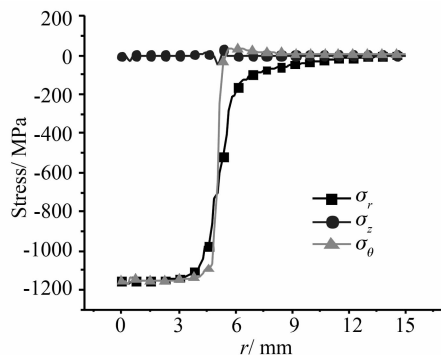


图 9 样品表面上的应力分布。 $t=10 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $E=3 \text{ J}$

Fig. 9 Stress distribution on surface at  $t=10 \text{ }\mu\text{s}$  and  $E=3 \text{ J}$

因此, 由计算结果可得, 样品在光斑范围之内是压缩应力所造成的应力损伤与熔融损伤共同作用,

而在光斑半径外边缘附近, 有一部分区域内的环向拉伸应力已经超过了 K9 玻璃的拉伸断裂强度( $30 \text{ MPa}$ ), 这部分区域就会发生应力损伤, 从而在光斑区域外围产生裂纹。对照图 5(b)所示的损伤样品照片, 样品的损伤情况与理论计算结果吻合良好, 只不过光斑区域外围存在的裂纹不容易被清晰看到, 如果入射能量密度增大, 比如增加到  $22.93 \text{ J/cm}^2$  (如图 5(a))时, 外围裂纹就会清晰可见。

同时, 计算得到了以表面温度达到材料熔点为判断依据的熔融损伤阈值, K9 玻璃的熔融损伤阈值为  $3.629 \text{ J/cm}^2$ 。

## 6 结 论

用等离子体闪光法测量得到了 K9 玻璃的损伤阈值为  $6.533 \text{ J/cm}^2$ , 相关实验结果以及仿真计算结果表明, 在激光能量密度已经超过 K9 玻璃的熔融阈值时, K9 玻璃表面在光斑区域内形成熔融损伤和由压缩应力造成的应力损伤, 在光斑区域外围则形成由环向拉伸应力造成的应力损伤; 入射激光能量密度越高, 样品的损伤程度就越厉害, 并且多脉冲对样品的损伤程度比单脉冲时要厉害得多。在无法实现更高激光能量输出时, 可以采用多脉冲的形式对目标进行损伤, 以达到预期效果。仿真分析结果与实验结果吻合良好, 说明了理论模型的科学性。

## 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
- 2 罗 福, 杜祥琬, 孙承纬. 光斑尺寸对 K9 玻璃近红外激光损伤阈值的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2002, **22**(1): 62~65
- 3 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
- 4 赵建军, 宋春荣, 牛燕雄. 强激光辐照光学材料的热力效应研究[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(1): 31~34
- 5 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
- 6 郭少锋, 陆启生, 程湘爱等. 光学材料的激光损伤形态研究[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2): 238~242
- 7 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
- 8 夏晋军, 龚 辉, 程 雷等. 光学材料连续波激光热-力破坏效应[J]. *光学学报*, 1997, **17**(1): 20~23
- 9 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
- 10 段晓峰, 汪岳峰, 牛燕雄等. 激光辐照光学材料热力效应的解析计算和损伤评估[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1455~1459

- 6 Sun Chengwei. Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 32~33  
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002. 32~33
- 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  
陈发良. 强激光辐照下窗口材料靶传热及热应力破裂的解析分析[J]. *强激光与粒子束*,1996,**8**(4):595~601
- 8 Wu Qiang, Chen 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  
伍 强,陈根余,王 贵等. 高强度镀锌钢的 CO<sub>2</sub> 激光焊接 [J]. *中国激光*, 2006,**33**(8):1133~1138
- 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  
高 明,曾晓雁,胡乾午等. CO<sub>2</sub> 激光-TIG 复合焊接气体的保护方式[J]. *中国激光*, 2006,**33**(10):1422~1427
- 10 Liu Qiang, Lin Libin, Zu Xiaotao *et al.*. Studies on the methods to determine the damage irradiated by high-laser [J]. *Laser Journal*, 2002,**23**(4):3~5  
刘 强,林理彬,祖小涛等. 强激光辐照损伤判别方法[J]. *激光杂志*, 2002,**23**(4):3~5
- 11 Wang Xi, Li Hua, Nie Jinsong. Application of ANSYS in simulation process of pulse CO<sub>2</sub> laser damage of K9 glass [J]. *Applied Laser*, 2008,**28**(1):53~56  
王 玺,李 化,聂劲松. ANSYS 在脉冲 CO<sub>2</sub> 激光对 K9 玻璃损伤过程模拟中的应用研究[J]. *应用激光*, 2008,**28**(1):53~56
- 12 Luo Fu, Sun Chengwei, Du Xiangwan. Stress relaxation damage in K9 glass plate irradiated by 1.06 μm CW laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001,**13**(1):19~23  
罗 福,孙承伟,杜祥琬. 1.06 μm 连续激光照射下 K9 玻璃板的应力松弛破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2001,**13**(1):19~23