

# DF 激光辐照对熔石英表面温度与应力分布的理论模拟

江 天<sup>1,2</sup> 程湘爱<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup> 中国人民解放军 95844 部队, 甘肃 酒泉 735018)

**摘要** 在广泛调研相关文献的基础上, 基于热弹性理论, 计算了熔石英在 DF 激光辐照下的温升曲线和热应力场分布曲线, 分析了熔石英的激光破坏机理。研究表明, 激光辐照下的熔石英的温度场分布和应力场分布与辐照激光的光场分布、激光功率密度以及激光的辐照时间等因素有关。

**关键词** 材料; 熔石英; 温度场; 应力场; DF 激光

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s106001

## Theoretical Simulation of Surface Temperature and Stress Distribution of Fused Silica under DF Laser Irradiation

Jiang Tian<sup>1,2</sup> Cheng Xiang'ai<sup>1</sup>

*(<sup>1</sup> College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>2</sup> 95844 Unit of People's Liberation Army, Jiuquan, Gansu 735018, China)*

**Abstract** Based on the extensive research of thermoelasticity, the temperature and thermal stress-field distribution curves of the fused silica are studied under irradiation of DF laser. It can be shown that the temperature field distribution and thermal stress field distribution of the fused silica irradiated by DF laser depend on the field distribution, power density and irradiation time of lasers.

**Key words** materials; fused silica; temperature field; thermal stress field; DF laser

**OCIS codes** 060.2310; 060.2320; 060.3510

### 1 引 言

熔石英是非常有用的光学材料, 它有优良的光学和化学稳定性, 可以做各种光学元件, 在光学及激光系统中有广泛的应用。光学熔石英具有低的膨胀系数、良好的热稳定性、机械力学性质及光学加工性能而在空间光学系统中得到广泛应用, 是制作主反射镜、光学透镜和光学窗口的主要材料。其优良的透射性是紫外和中红外理想的窗口材料。近几年有关熔石英的研究报道很多<sup>[1~6]</sup>, 本文对熔石英在 DF 激光照射下的破坏阈值进行了测试, 并建立了理论模型, 计算出温度场的分布和破坏阈值, 对熔石英的

激光破坏机理做了相关分析。

### 2 温度场和应力场的解析表达式

研究光学材料的热力学响应问题, 通常采用热传导和热弹性力学理论<sup>[5]</sup>。考虑到所研究的光学元件的厚度远小于直径, 在连续激光作用期间, 厚度方向温度很快趋于均匀, 可采用平面模型。设激光光斑为能量均匀分布的圆形光斑, 由于考虑的是材料的响应, 认为光斑大小远小于样品尺寸, 这样, 研究的问题就简化为无限大平面情况。

设激光辐照光斑为圆形均匀分布, 因此在柱坐

**收稿日期**: 2011-08-15; **收到修改稿日期**: 2011-09-01

**作者简介**: 江 天(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: jiangtian198611@163.com

**导师简介**: 程湘爱(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: Xiang\_ai\_cheng@126.com(通信联系人)

标系下,研究二维有限光斑对材料辐照效应,可假设材料的边界为绝热状态,半径为  $a$  的圆形光斑照射在半径为  $b$ ,厚度为  $h$  的圆形靶材上。首先求解温度场。热传导定解方程为<sup>[7~10]</sup>

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - K \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \frac{\eta I(r)}{h}, \\ \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0, T(r,0) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $T$  为温升; $\rho, c$  和  $K$  分别为材料的密度、比热容和热传导系数; $\eta$  为材料对激光的吸收率; $I(r)$  为光斑的功率密度分布,这里

$$I(r) = \begin{cases} I_0 & r \leq a, \\ 0 & r > a \end{cases}, \quad (2)$$

通过积分变换的方法可以对该问题进行解析求

解。在柱坐标系下,积分变换式为

$$\bar{T}(\beta_m, r') = \int_0^b r' R_0(\beta_m, r') T(r', t) dr', \quad (3)$$

逆变换公式为

$$T(r, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} \bar{T}(\beta_m, t). \quad (4)$$

在绝热边界条件下,特征函数

$$R_0(\beta_m, r) = \begin{cases} J_0(\beta_m, r), & m \neq 0 \\ 1, & m = 0 \end{cases},$$

特征值  $\beta_m$  在  $m = 0$  时为 0, 当  $m \neq 0$ ,  $J_1(\beta_m b) = 0$ 。当  $m = 0$  时,  $N(\beta_m r) = 2/b^2$ , 当  $m \neq 0$  时,  $N(\beta_m b) = 2/b^2 J_0^2(\beta_m b)$ 。得到温度场的解析式

$$T(r, t) = \frac{\eta I_0 b^2}{Kh} \left[ \frac{a^2 Dt}{b^4} + 2 \frac{a}{b} \sum_{m=1}^{\infty} J_0 \left( \frac{\mu_m r}{b} \right) \omega_m s_m(t) \right], \quad (5)$$

式中  $s_m(t) = 1 - \exp\left(-\frac{\mu_m^2 Dt}{b^2}\right)$ ;  $\omega_m = \frac{J_1(\mu_m a/b)}{\mu^3 [J_0(\mu_m)]^2}$ ;  $\mu_m$  是一阶 Bessel 函数的正零点; $D$  热扩散系数; $D = K/\rho C$ 。根据热弹性力学方程组,可解得环向应力场为

$$\sigma_{\theta} = \alpha E \frac{\eta I_0 b^2}{Kh} 2 \left( \frac{a}{b} \right) \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{J_1(\mu_m r/b)}{\mu_m r/b} - J_0 \left( \frac{\mu_m r}{b} \right) \right] \omega_m s_m(t), \quad (6)$$

式中  $\alpha$  为热膨胀系数等于  $0.51 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ , 杨氏模量  $E = 7.26 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 。

研究破坏阈值的问题,关键在于得到光斑照射时刻  $t$ , 材料的最高温度和最大拉应力值。显然,在激光停止照射时刻  $t$ , 最高温升出现在中心点 ( $r=0$ ), 其值为

$$T_{\max} = \frac{\eta I_0 b^2}{Kh} \left[ \frac{a^2 Dt}{b^4} + 2 \frac{a}{b} \sum_{m=1}^{\infty} \omega_m s_m(t) \right], \quad (7)$$

最大应力应出现在热区和冷区交界区域。引入扩散长度  $\delta = 2 \sqrt{Dt}$ , 应力最大值就出现在  $r = a + \delta$  处:

$$\sigma_{\max} = \alpha E \frac{\eta I_0 [(a + \delta), t] b^2}{Kh} 2 \left( \frac{a}{b} \right) \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{J_1[\mu_m (a + \delta)/b]}{\mu_m (a + \delta)/b} - J_0 \left( \frac{\mu_m (a + \delta)}{b} \right) \right\} \omega_m s_m(t). \quad (8)$$

设熔石英的熔点温度  $T_{\text{melt}} = 1700 \text{ }^\circ\text{C}$ , 抗拉强度为  $\sigma_0 = 4.9 \times 10^7 \text{ Pa}$ , 两种破坏形态对应的功率密度值为

$$I_{\text{th}} = \frac{T_{\text{melt}} kh}{\eta b^2} \left[ \frac{a^2 Dt}{b^4} + 2 \frac{a}{b} \sum_{m=1}^{\infty} \omega_m s_m(t) \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$I'_{\text{th}} = \frac{\sigma_{\max} Kh}{2\alpha E \eta b^2} \left\{ \frac{a}{b} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{J_1[\mu_m (a + \delta)/b]}{\mu_m (a + \delta)/b} - J_0 \left[ \frac{\mu_m (a + \delta)}{b} \right] \right\} \omega_m s_m(t) \right\}^{-1}, \quad (10)$$

(9)式为熔融破坏功率密度的表达式;(10)式为热应力破坏功率密度的表达式。

### 3 温度场和应力场的计算结果

设半径  $b = 25 \text{ cm}$ ; 厚度  $h = 1 \text{ mm}$ 。DF 激光器输出连续激光波长为  $3.8 \text{ } \mu\text{m}$ , 功率为  $P = 30 \text{ W}$ , 光斑半径为  $a = 0.1 \text{ cm}$ , 中心光强  $I_0 = 3 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。取材料的初时温度为  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。熔石英材料密度  $\rho = 2.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 导热系数  $K = 1.38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 定压比热容  $C = 749 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 熔点  $T_{\text{melt}} = 1700 \text{ }^\circ\text{C}$ , 热扩散系数  $D = 8.37 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。采

用经典的菲涅耳公式进行估算,反射系数为

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}, \quad (11)$$

式中  $n$  为折射率,  $\kappa$  为消光系数。  $n = 1.426$ 。设吸收系数为  $a_1$ ,  $a_1 = 4\pi\kappa/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长。由于  $\kappa \leq 1$ , 所以  $R \approx (n-1)^2/(n+1)^2 = 3.08\%$ 。总透射比  $T$  和吸收率  $\eta$  分别为

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha_1 d)}{1-R^2 \exp(-2\alpha_1 d)} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{(1-R)[1-\exp(-\alpha_1 d)]}{1-R \exp(-\alpha_1 d)}$$

式中  $d$  为平板的厚度。样品的透射比为  $T = 78.3\%$ , 厚度  $d = 1 \text{ mm}$ , 代入(12)式  $\alpha_1 = 1.8 \text{ cm}^{-1}$ , 则  $\eta = 0.17$ 。

根据上述分析,对 DF ( $3.8 \mu\text{m}$ ) 辐照熔石英材料进行了研究。熔石英是常用的光学窗口材料,对红外波段有很高的透射率。由(5)式计算分析出熔石英材料的温度场分布图(图1)。

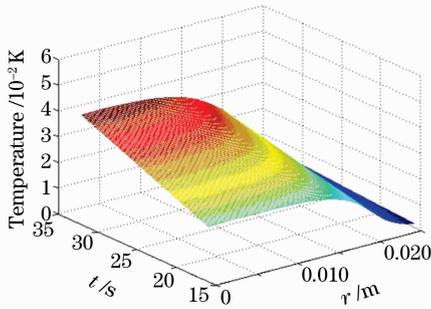


图1 熔石英的表面温度场分布

Fig. 1 Temperature-field distribution of the fused silica surface

为了进一步讨论熔石英的表面温度径向分布的特性,分别讨论在光斑半径  $a$  相同时,不同辐照时间  $t$ ,温升值的变化规律;相同辐射时间  $t$ ,不同光斑半径  $a$ ,温升值的变化规律。如图2所示,点画线为  $a = 2 \text{ cm}$ ,  $t = 32 \text{ s}$  时的温升变化曲线;粗线为  $a = 1 \text{ cm}$ ,  $t = 32 \text{ s}$  时的温升变化曲线;细线为  $a = 2 \text{ cm}$ ,  $t = 16 \text{ s}$  时的温升变化曲线。由图2可知当光斑半径  $a$  相同时,辐射时间  $t$  较长的引起的温升值较高,当辐照时间相同,光斑半径越大引起的温度值越高。

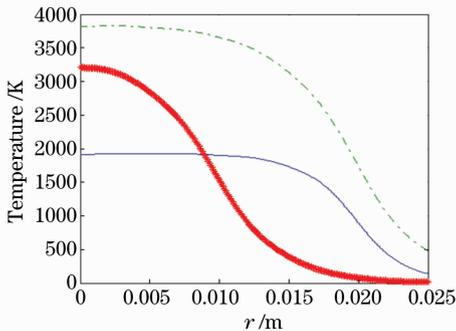


图2 熔石英表面温度径向分量分布

Fig. 2 Radial temperature distribution of the fused silica surface

由(6)式计算分析出熔石英的环向应力场分布图,如图3所示。为了进一步讨论熔石英的环向应

力径向分布的特性,分别讨论在光斑半径  $a$  相同时,不同辐照时间  $t$ ,应力场的变化规律;相同辐射时间  $t$ ,不同光斑半径  $a$ ,应力值的变化规律。如图4所示,点画线为  $a = 2 \text{ cm}$ ,  $t = 16 \text{ s}$  时的温升变化曲线;粗线为  $a = 1 \text{ cm}$ ,  $t = 32 \text{ s}$  时的应力变化曲线;细线为  $a = 2 \text{ cm}$ ,  $t = 32 \text{ s}$  时的应力变化曲线。由图4可知,当光斑半径  $a$  相同时,辐射时间  $t$  较长的热应力最大值较大,辐射时间相同时,较大光斑引起的拉应力最大值较大。

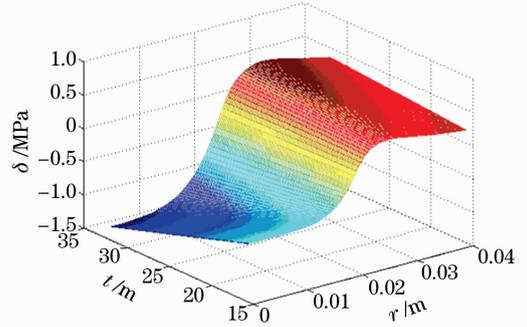


图3 熔石英的表面环向应力场分布

Fig. 3 Circumferential stress-field distribution of the fused silica surface

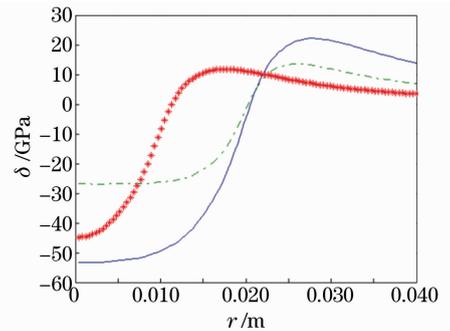


图4 熔石英表面环向应力径向分量分布

Fig. 4 Radial circumferential stress distribution of the fused silica surface

## 4 两种破坏机理功率密度破坏阈值分布图

(9)式和(10)式在同一幅图中比较相同情况下,熔石英材料的熔融破坏功率密度曲线和热应力破坏功率密度曲线的关系。图5给出了熔融破坏功率密度及应力破坏功率密度与时间关系曲线。图5中,点线为应力破坏功率密度与时间的关系曲线,细线为熔融破坏功率密度于时间的关系曲线。由图5可知,辐射时间越长,相应的破坏功率密度阈值越小,这是由于累计相同的能量,激光功率密度越大,所需要的时间越短。从图中还可以看出,熔融破坏功率

密度曲线比应力破坏功率密度曲线低,可以从理论上预测在相同作用时间,熔石英的破坏机理应该是熔融破坏,这是由于熔融破坏所需的功率破坏密度比应力破坏功率密度要低,所以在 DF 连续激光辐照下,损伤形态应该表现为超过材料熔点而形成的熔融破坏。

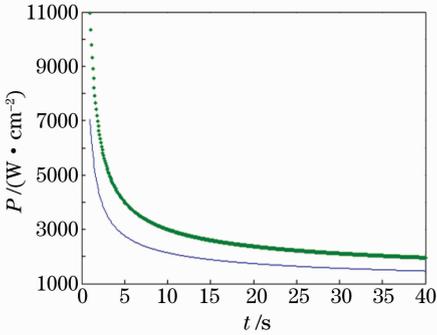


图 5 熔石英两种破坏机理损伤阈值功率比较图

Fig. 5 Contrast map of the damage threshold by the two fused silica destruction mechanisms

根据上述分析,当辐照时间  $t = 16$  s,材料受激光辐照区域入射面与出射面的温度均已超过熔融温度  $T_{\text{melt}}$  (1700 °C),将造成熔融穿孔。而此时熔石英内部沿环向方向的热应力最大值均未超过材料的抗拉强度或抗压强度(熔石英的抗压强度大于  $4.6 \times 10^6$  Pa)。这是因为熔石英材料的热稳定性好,材料温度变化产生的热应力不足以使其产生炸裂或解理,由此可知 DF 光对熔石英的破坏主要是激光辐照导致材料的温度超过材料的熔融温度  $T_{\text{melt}}$  从而造成熔融烧蚀甚至穿孔。

郭少锋等<sup>[11]</sup>提出,光学材料的激光损伤阈值与光斑半径有强烈的依赖关系,为了弄清楚这种关系,在(10)式中令光斑半径为变量,得出破坏损伤阈值功率密度与光斑半径的关系,如图 6 所示。由图 6 可知,当光斑半径  $a$  较小时,功率密度破坏阈值随光

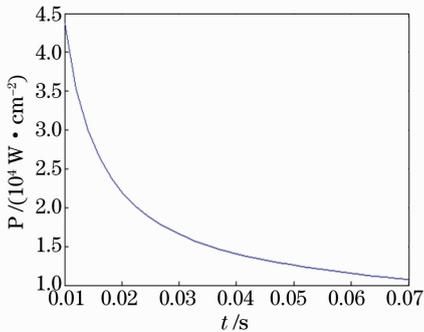


图 6 光斑半径与破坏功率密度关系图

Fig. 6 Relation between Spot radius and destructive power density

斑半径  $a$  的增加而急剧减小,当光斑半径  $a$  较大时,功率密度破坏阈值的变化趋于平缓,这与龚辉等<sup>[7]</sup>的实验是一致的,说明模型的合理性。

## 5 结 论

激光辐照下的熔石英的温度场分布和应力场分布与辐照激光的光场分布、激光功率以及激光的辐照时间等因素有关。且熔石英熔融破坏的阈值曲线比应力破坏阈值曲线低,所以熔石英发生熔融破坏所需要的温度比应力破坏所要求的温度低。

## 参 考 文 献

- Li Xibin, Wang Haijun, Yuan Xiaodong *et al.*. Effects of CO<sub>2</sub> laser irradiation on surface morphology and stress distribution of fused silica[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0903002
- 李熙斌, 王海军, 袁晓东 等. CO<sub>2</sub> 激光辐照对熔石英表面形貌与应力分布的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0903002
- Dou Hongqiang, Chen Zhenxing, Xu Shizhen. Effects of 10.6 μm laser irradiation on α-quartz crystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 061401
- 窦红强, 陈贞兴, 徐世珍. 10.6 μm 激光对石英晶体的辐照效应 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 061401
- Huang Jin, Zhao Songnan, Wang Haijun *et al.*. Local CO<sub>2</sub> laser treatment for repair surface defect in fused silica[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1282~1286
- 黄 进, 赵松楠, 王海军 等. 熔石英表面缺陷的 CO<sub>2</sub> 激光局部修复技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1282~1286
- Laurent Gallais, Philippe Cormont, Jean-Luc Rullier. Investigation of stress induced by CO<sub>2</sub> laser processing of fused silica optics for laser damage growth mitigation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(28): 23488~23501
- W. Dai, X. Xiang, Y. Jiang *et al.*. Surface evolution and laser damage resistance of CO<sub>2</sub> laser irradiated area of fused silica[J]. *Opt. Laser Engng.*, 2011, **49**(2): 273~280
- M. J. Matthews, J. S. Stolken, R. M. Vignes *et al.*. Residual stress and damage-induced critical fracture on CO<sub>2</sub> laser treated fused silica[C]. *SPIE*, 2009, **7504**: 750410
- Wang Honggang. *Thermal-Elastic Mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998, 162~165
- 王洪纲. *热弹性力学概论* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989, 162~165
- Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiang'ai *et al.*. Study on laser induced damage morphology in optical materials[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2002, **14**(2): 238~242
- 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
- M. J. Matthews, I. L. Bass, G. M. Guss *et al.*. Downstream intensification effects associated with CO<sub>2</sub> laser mitigation of fused silica[C]. *SPIE*, 2007, **6720**: 67200A
- E. Mendez, K. M. Nowak, H. J. Baker *et al.*. Localized CO<sub>2</sub> laser damage repair of fused silica optics[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5358~5367
- Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiang'ai *et al.*. Spot size effect of CW laser induced damage threshold in optical materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1054~1058
- 郭少锋, 陆启生, 程湘爱 等. 连续激光辐照下光学材料损伤阈值的光斑效应[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1054~1058