

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1055-04

连续激光辐照下光学材料损伤阈值的光斑效应*

郭少锋 陆启生 程湘爱 江厚满 马厉克

(国防科技大学理学院,长沙 410073)

摘要: 实验发现,光学材料的激光损伤阈值对激光光斑大小有强烈的依赖关系。研究了连续激光和匀质材料相互作用的机制,针对小光斑情形的材料响应和大光斑情形的结构响应分别提出各自不同的物理模型来解释光斑效应。研究表明,材料响应中的光斑效应基于热传导引起的光斑区热弥散,而在结构响应中,边界条件不同,破坏阈值与光斑大小的依赖关系也不尽相同。

关键词: 光学材料;激光损伤阈值;材料响应;结构响应;光斑效应

中图分类号: O437 文献标识码: A

1 引 言

光学材料的激光损伤阈值是衡量其抗激光能力强弱的标志。损伤阈值不仅和材料本身的各种性质有关,和激光参数也有非常密切的关系,其中激光光斑大小就是重要的一项。在高功率密度的短激光脉冲作用下光学材料的热力学响应,由于在作用期间光斑区域向外扩散的能量微乎其微,光斑效应应该基于杂质缺陷吸收引起的热爆模型^[1]。而在连续激光的辐照下,杂质有足够的时间和周围基质材料达到热平衡,杂质吸收对材料破坏的影响不象脉冲情况下那样严重,光斑效应基于热传导效应。如果光斑大小和样品尺寸在同一量级,则边界条件不可忽视,激光辐照下的材料响应也就变成了结构响应。

国内外已经开展了不少有关光斑效应的实验性工作^[1~4],但在理论研究方面,没有注意到连续激光和脉冲激光作用机理的不同,没有注意到边界条件对光斑效应规律性的影响。本文建立了连续激光辐照下光学材料断裂的热弹性力学模型,首先研究小光斑情形下的材料响应,然后计及边界的影响进一步讨论结构响应,从而完整地给出匀质材料破坏阈值与光斑大小的关系。

2 材料响应中的光斑效应

在检测光学材料抗激光能力时,一般都是将激

光束聚焦成很小的圆形光斑,照射在半径远大于光斑半径的圆盘形靶材上,力学边界条件的影响可以忽略,这种情形被称作材料响应。

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。我们研究的光学材料样品的厚度远小于直径,且在厚度方向温度基本无变化,可以采用平面模型。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的情况。热传导定解问题为^[5]:

$$\left. \begin{aligned} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} - K \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) &= \frac{\eta I(r, t)}{h}, \\ T(r \rightarrow \infty) = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow \infty} &= 0, \\ T(r, 0) &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, T 为温升, ρ 、 C 和 K 分别为材料的质量热容、热容量和热传导系数, h 为平板靶材的厚度, η 为材料对激光的吸收率。均匀光斑情形下,设光斑半径为 a , 则功率密度

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

通过积分变换的方法可以对该问题进行解析求解^[5]。易得

$$T(r, t) = \frac{\eta I_0 a}{Kh} \int_0^\infty J_0(\beta r) J_1(a\beta) [1 - \exp(-\kappa t \beta^2)] \frac{1}{\beta^2} d\beta, (2)$$

这里, κ 为热扩散系数, J_0 、 J_1 分别为零阶和一阶贝塞尔函数, β 为积分过程中引入变量[$r J_0(\beta r)$ 是正变换的核]

* 国家 863 激光技术领域(863-410-5)资助课题。

E-mail: guoshaofeng@163.net

收稿日期: 2001-09-24; 收到修改稿日期: 2001-12-03

平面应力情况下,环向应力场为^[6]

$$\sigma_{\theta}(r, t) = \alpha E \left[\frac{1}{r^2} \int_0^r T(r, t) r dr - T(r, t) \right]. \quad (3)$$

将(2)式代入得

$$\sigma_{\theta}(r, t) = \alpha E \frac{\eta I_0 a}{Kh} [G(a, r, \kappa, t) - H(a, r, \kappa, t)], \quad (4)$$

其中,

$$G(a, r, \kappa, t) = \int_0^{\infty} r J_1(r\beta) Y_1(a\beta) [1 - \exp(-\kappa t \beta^2)] \frac{1}{\beta^3} d\beta,$$

$$H(a, r, \kappa, t) = \int_0^{\infty} r J_0(r\beta) Y_0(a\beta) [1 - \exp(-\kappa t \beta^2)] \frac{1}{\beta^2} d\beta,$$

研究破坏阈值问题,关心的是材料在激光结束时刻的最高温升和最大拉应力。热熔融的破坏阈值对应于最高温升,而热断裂的破坏阈值对应于最大拉应力。这里,只考虑热断裂的情况。

理论研究表明^[7],对于均匀圆形光斑辐照薄靶材的情况,在激光辐照时间为 $t = \tau_0$ 时,最大拉应力发生在 $r_m = a + \chi(\kappa\tau_0)^{1/2}$ 处,即

$$\sigma_m(\tau_0) = \sigma_{\theta}(r_m, \tau_0) = \alpha E \frac{\eta I_0 a}{Kh} [G(a, r_m, \kappa, \tau_0) - H(a, r_m, \kappa, \tau_0)]. \quad (5)$$

设材料的抗拉强度为 σ_t ,则导致材料应力场达到抗拉强度而破坏的功率密度阈值为

$$I_{th} = \frac{\sigma_t Kh}{\alpha E \eta a} [G(a, r_m, \kappa, \tau_0) - H(a, r_m, \kappa, \tau_0)]^{-1}. \quad (6)$$

功率阈值为

$$P_{th} = \pi a^2 I_{th} = \frac{\pi \sigma_t K h a}{\alpha E \eta} [G(a, r_m, \kappa, \tau_0) - H(a, r_m, \kappa, \tau_0)]^{-1}. \quad (7)$$

以常见的 K_9 玻璃为例,研究以上两种破坏阈值与激光光斑半径 a 的关系。 K_9 的材料参数如下:

热膨胀系数 $\alpha = 8.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,杨氏模量 $E = 80 \times 10^9 \text{ Pa}$,质量热容 $C = 710 \text{ J/(kg} \cdot ^{\circ}\text{C)}$,密度 $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,热传导系数 $K = 1.207 \text{ W/(m} \cdot ^{\circ}\text{C)}$,热扩散系数 $\kappa = 6.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,抗拉强度 $\sigma_t = 4.9 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。计算中取 a 的范围为 $100 \mu\text{m} \sim 1 \text{ cm}$,辐照时间 τ_0 为 1 s , $\eta = 0.15$ 。由(6)式、(7)式的计算结果如图1、图2所示。

由图1可知,当 a 较小时, I_{th} 随 a 的增加急剧减

小,而当 a 较大时, I_{th} 的变化曲线趋于平缓,这与龚辉等^[5]的实验情况一致,说明了该模型的合理性。文献[5]中提出的基于缺陷密度的模型在光斑很小时理论与实验不符,而我们的模型解决了这一问题,说明基于热传导模型的光斑效应更能反映问题的实质。

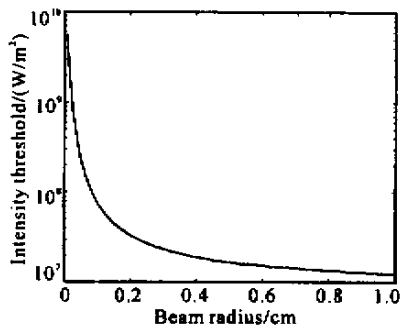


Fig.1 Spot size effect of intensity thresholds in material response

由图2可知,和 I_{th} 相反, P_{th} 正比于光斑尺寸 a ,且当 a 较小时, P_{th} 几乎为一恒定值,当 $a > 1 \text{ mm}$ 时, P_{th} 开始随 a 的增加而有大幅度提升。在激光作用时间确定的前提下, P_{th} 实际代表着激光器输出的总能量,从 P_{th} 的光斑效应看,通过聚焦的方法来降低破坏材料所需的能量是有一个限度的,当聚焦光斑的半径小于一定程度后,破坏所需的能量维持为一恒定值。

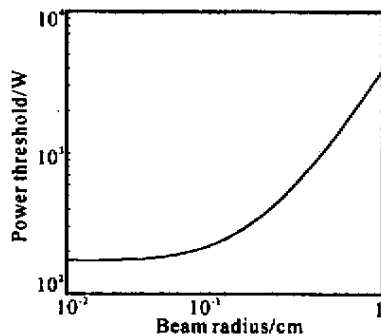


Fig.2 Spot size effect of power thresholds in material response

3 结构响应中的光斑效应

研究结构响应时,我们认为光斑半径和样品半径之比大于 $1/3$,且热扩散长度 $\delta = \chi(\kappa\tau_0)^{1/2}$ 远小于光斑尺寸,热传导效应可忽略,只研究热学边界为绝热的情形,则温升的时空分布为:

$$T(r, t) = \begin{cases} \frac{\eta \kappa I_0}{Kh} t, & r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases} \quad (8)$$

这时,不同的力学边界条件对应的光斑效应有实质性

的差异。分别考虑自由和固定两种边界,它们对应的最大拉应力分别为:

$$\sigma_{m1} = \frac{1}{2} \frac{\alpha E \kappa \eta I_0 \tau_0}{Kh} \left[1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$\sigma_{m2} = \frac{1}{2} \frac{\alpha E \kappa \eta I_0 \tau_0}{Kh} \left[1 - \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right], \quad (10)$$

这里, b 为圆盘形样品的半径, μ 为泊松比。则自由边界对应的功率密度阈值和功率阈值为:

$$I_{th1} = \frac{2\sigma_c Kh}{\alpha E \kappa \eta \tau_0} \left[1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (11)$$

$$P_{th1} = \frac{2\pi\sigma_c Kha^2}{\alpha E \kappa \eta \tau_0} \left[1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (12)$$

固定边界对应的功率密度阈值和功率阈值为:

$$I_{th2} = \frac{2\sigma_c Kh}{\alpha E \kappa \eta \tau_0} \left[1 - \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (13)$$

$$P_{th2} = \frac{2\pi\sigma_c Kha^2}{\alpha E \kappa \eta \tau_0} \left[1 - \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (14)$$

仍以 K_9 玻璃为例,另取 $\mu = 0.206$, $b = 10$ cm, a 的取值范围为 $b/3 \sim b$, τ_0 仍取为 1 s。自由边界的计算结果见图 3、图 4,固定边界的计算结果见图 5、图 6。

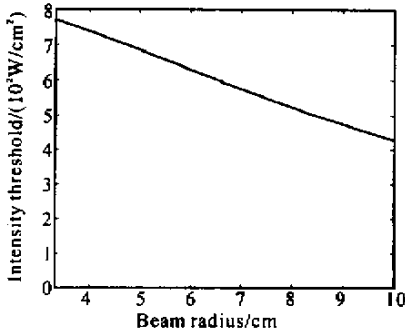


Fig.3 Spot size effect of intensity threshold under free boundary condition

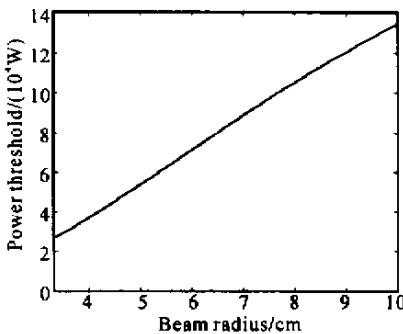


Fig.4 Spot size effect of power thresholds under free boundary condition

自由边界条件下,功率密度阈值与光斑大小成反比,而在固定边界条件下,功率密度阈值与光斑大小成正比,且当 a 取值在 $(1 - \mu)(1 + \mu)]^{1/2} b$ 附近时,

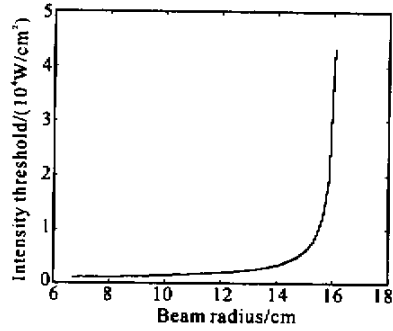


Fig.5 Spot size effect of intensity thresholds under fixed boundary condition

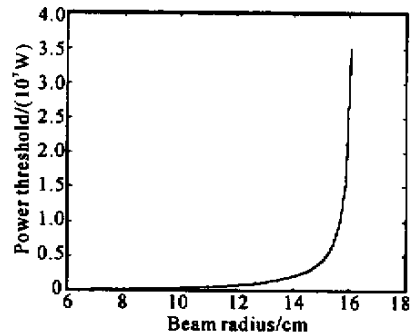


Fig.6 Spot size effect of power thresholds under fixed boundary condition

功率密度阈值陡然增加,这是因为当 a 趋近于 $[(1 - \mu)b(1 + \mu)]^{1/2} b$ 时,由(10)式知最大拉应力趋于零,也就是说,消除了材料中的拉应力。事实上,当 a 的取值在 $(1 - \mu)(1 + \mu)]^{1/2} b$ 附近以及大于 $[(1 - \mu)b(1 + \mu)]^{1/2} b$ 时,破坏阈值将由材料的抗压强度决定。由于材料的抗压强度一般都远大于其抗拉强度,所以应该有这样的结论:在固定边界条件下,当激光光斑大于 $[(1 - \mu)(1 + \mu)]^{1/2}$ 倍的样品半径时,热断裂的破坏阈值将有大幅度地提升。

结语 本文利用热弹性理论建立了激光与光学材料相互作用的材料响应和结构响应的模型,研究破坏阈值的光斑尺寸效应,结论和某些实验结果在函数关系上一致。需要指出的是,本文采用的是二维平面模型,计算中未考虑材料参量的温度效应,且所考虑的破坏阈值是针对热断裂的破坏,更细致的工作应该在获取详细的热力学参量的基础上,利用数值计算的方法,全面求解三维的、多种破坏形态的问题。尽管如此,本文的许多结论是很有意义的,为靶目标的破坏及光学元件的加固提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Foltyn S R. Spotsize Effects in Laser Damage Testing,

- Damage in Laser Materials : *Nat. Bur. Stand.* US : Spec. Publ. 1984 , **669** : 368 ~ 377
- [2] Bettis J R , House R A , Guenther A H *et al.* . Spot Size and Pulse Duration Dependence of Laser-Induce Damage , Damage in Laser Materials : *Nat. Bur. Stand.* US : Spec. Publ. , 1976 , **462** : **338** ~ **345**
- [3] Xia Jinjun , Gong Hui , Cheng Lei *et al.* . CW laser induced thermal and mechanical damage in optical window materials. *Acta Optica Sinica*(光学学报) , **1997** , **17**(1) : 20 ~ 23(in Chinese)
- [4] Gong Hui , Li Chengfu. CW CO₂ laser induced damage to infrared window materials. *Acta Optica Sinica*(光学学报) , 1996 , **16**(3) 332 ~ 335(in Chinese)
- [5] Ozisik M. *Heat Conduction*(热传导). Translated by Yu Changming. Beijing : High Education Press , 1983(in Chinese)
- [6] Wang Honggang. *Thermal-Elastic Mechanics*(热弹性力学概论). Beijing : Tsinghua University Press , 1989(in Chinese)
- [7] Guo Shaofeng , Lu Qisheng , Cheng Xiangai *et al.* . Study on laser induced damage morphology in optical materials. *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束) , 2002 , **14**(2) 238 ~ 243(in Chinese)

Spot Size Effect of CW Laser Induced Damage Threshold in Optical Materials

Guo Shaofeng Lu Qisheng Cheng Xiangai Jiang Houman Ma Like
 (*Institute of Science , National University of Defense Technology , Changsha 410073*)
 (Received 24 September 2001 ; revised 3 December 2001)

Abstract : Experimental research shows that laser induced damage thresholds (LIDT) are strongly dependent on the beam radius. The thermo-elastic model describing the interaction of CW laser with uniform optical materials is established , and material response and structure response are studied independently. Study shows that spot size effect in material response results from the energy loss of the irradiated area. As for structure response , different mechanical boundaries result in different relationships of LIDT with radius of laser beam.

Key words : optical materials ; laser induced damage threshold ; material response ; structure response ; spot size