

连续 CO₂ 激光对红外窗口材料损伤研究

龚 辉 李成富

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 研究了连续 CO₂ 激光对几种红外窗口材料的表面损伤特性, 研究表明, 损伤机制在于杂质缺陷吸收造成的热冲击应力破坏。深入研究了杂质缺陷密度、焦斑与材料损伤阈值的关系, 并建立了一个损伤模型。同时分析了热冲击应力破坏方式。

关键词 连续 CO₂ 激光, 红外窗口材料, 激光损伤, 缺陷, 热冲击应力。

1 引 言

目前, 高功率 CO₂ 连续(CW)激光的应用十分广阔, 但由于光学元件的抗激光损伤能力有限, 使其在一些领域的应用受到制约, 为了进一步提高 CW CO₂ 激光的输出功率, 有必要深入研究连续激光对光学元件的损伤特性以及损伤规律。本文研究了连续 CO₂ 激光对几种红外窗口材料(K₂、F₃、ZF₂、红外玻璃(WH₃₀)和 BaF₂、CaF₂、Al₂O₃ 晶体)的表面损伤特性, 分别研究了晶体和玻璃材料的损伤形式。

2 实验结果与分析

将连续 CO₂ 激光通过焦距为 300 mm 的透镜聚焦在样品表面, 进行面损伤实验。激光输出为多模。实验采用 1-on-1 的方式, 一次一秒时间, 损伤阈值定义在损伤几率 50% 处。实验材料为 K₂、F₃、ZF₂ 玻璃、红外玻璃(WH₃₀)和 CaF₂、BaF₂、Al₂O₃ 晶体。

通过透镜聚焦, 测试了不同焦斑下的材料面损伤阈值, 如图 1(a)、图 1(b)、图 1(c)中的实线所示。从图中可以看到, 随着辐照激光束光斑的变小(变大), 玻璃样品的激光损伤阈值单调提高(降低), 但当光斑大到一定程度时, 损伤阈值趋向一定值。而晶体材料损伤阈值随焦斑变化不大。玻璃材料表面损伤产生龟裂, 其损伤形貌如图 2(a)所示。在实验中观察到玻璃样品损伤往往发生在激光停照一段时间以后, 说明冲击热应力是造成玻璃材料损伤最重要的原因。对于晶体材料, 由于结构特点, 损伤方式以解理为主, 只要表面上某一位置热应力达到一定程度, 即会造成严重解理损伤。

2.1 焦斑效应

通过分析认为焦斑效应源于样品中随机分布的杂质缺陷。由于材料在制备和加工过程中总存在杂质和缺陷, 当光入射到样品表面时, 在杂质和缺陷处具有比材料本征吸收大得多的

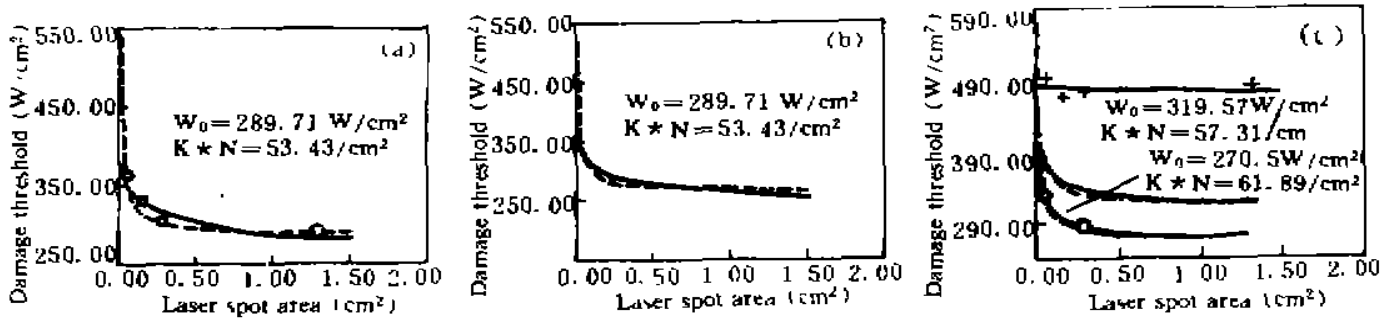


Fig. 1 (a) Damage threshold as a function of laser spot area in K₂glass, (b) Damage threshold as a function of laser spot area in ZF₂glass, (c) Damage threshold as a function of laser spot area □: F₃glass, * : WHe30 glass, > : CaF₂ crystal



Fig. 2 (a) A surface damage morphology in F₁glass, (b) A surface damage morphology in CaF₂ crystal

吸收率^[1], 杂质缺陷吸收可在材料表面形成局部高温, 局部高温达到一定程度就会造成材料表面的熔化、炸裂等宏观损伤。从样品的损伤形貌进一步表明, CO₂ 连续激光对材料的损伤机制在于杂质缺陷吸收。进一步观察玻璃样品表面龟裂状的损伤形貌, 可发现局部有缺陷炸裂点, 这正是杂质缺陷吸收产生损伤的表征。晶体材料损伤以解理为主, 但从损伤形貌(图 2 (b))中可看出, 解理总以材料表面随机一点为中心而产生, 说明该处吸收大, 产生的热应力强, 表明晶体材料损伤也是杂质吸收造成的。图 3(a) (b)分别为玻璃、晶体表面缺陷分布图。



Fig. 3 (a) A surface defect morphology in F₁glass, (b) A surface defect morphology in CaF₂ crystal

改变光斑尺寸, 将改变杂质缺陷落入激光辐照区域的几率, 从而改变损伤阈值。光斑越大, 杂质缺陷落入辐照区域的几率越高, 阈值就越低。因此可以建立一个简单的模型对光斑效应进行解释。由于激光输出为多模, 经过聚焦可以认为光斑区域光强分布均匀。因此可知道缺陷吸收引起的材料表面激光损伤几率为:

$$P = \begin{cases} 0 & W_t < W_0 \\ 1 - (W_t/W_0)^{-K\pi R^2 N} & W_t \geq W_0 \end{cases} \quad (1)$$

W_t 为入射激光的功率密度, W_0 为零损伤几率(即最小的损伤功率)下的功率密度, 定义 K 为材料损伤特性参数, 与材料本身性质和损伤方式有关。 R 为激光光斑半径(峰值功率 $1/e^2$ 处), N 为材料表面缺陷密度。由此可得损伤几率为 50% 的阈值为:

$$W_{th} = W_0 \exp [0.693 / (K\pi R^2 N)] \quad (2)$$

利用上式拟合了实验数据, 如图 1(a)(b)(c) 虚线为理论计算值, 可见该模型能很好吻合实验结果, 但在焦斑很小时理论计算与实验将不符合, 这是由于焦斑过小, 在激光辐照区域缺陷个数将很少, 其它因素对损伤的影响增大。从实验中还可看到玻璃材料焦斑效应明显, 晶体材料不明显, 这是由于它们的损伤方式不同。对于玻璃材料损伤发生在全部光斑区域, 所有缺陷对损伤都有贡献, 而晶体材料只要表面上某一位置热应力大到一定程度, 即会造成解理损伤, 各个缺陷对损伤的影响不同。因此抗激光损伤能力的评价仅仅用损伤阈值衡量是不足的, 还应看到材料缺陷密度、焦斑和损伤方式的不同对材料损伤的影响。通过该模型可以确定零损伤几率阈值, 从式(2)中可知, 零损伤几率阈值与焦斑大小无关, 这与文献[2, 3]的报道是一致的。因此利用零损伤几率定义损伤阈值更合理。

2.2 热应力破坏分析

上面已谈到 CO_2 连续激光对玻璃样品损伤主要是杂质缺陷吸收产生热应力, 从而产生龟裂损伤。在实验中, 观察到玻璃样品损伤往往发生在激光停照一段时间以后, 说明冲击热应力是造成玻璃材料损伤的最重要的原因。

下面无量纲的计算 CO_2 激光照射引起的表面热冲击应力。由于材料是表面损伤, 因此可以分析样品表面一层(厚度为 $2d$) 的热应力情况。用最容易分析的板的一维非正常热应力来分析。玻璃样品在激光停照后, 可看作是将玻璃样品突然放入温度为 T_0 (室温) 的空气中, 根据热应力计算公式^[4], 玻璃样品表面厚度为 $(2d)$ 的热应力近似地为:

$$F = \frac{E\alpha}{1-\nu} (T_n - T_1) \quad (3)$$

式中 T_1 为激光停照前样品表面的温度, T_n 为激光停照后样品表面层的平均温度, 即

$$T_n = \frac{1}{2d} \int_{-d}^{+d} T(z) dz$$

ν 为泊松比, E 为材料杨氏弹性模量, α 为热膨胀系数。 $T(z)$ 为入射光 Z 方向的温度分布, 利用热传导的分离变量法求出:

$$T(z) = T_0 - 2(T_0 - T_1) \sum_{p_s=1}^{\infty} \frac{\sin(p_s) \exp(-\eta P_s^2 t/d^2) \cos(p_s z/d)}{P_s + \sin(p_s) \cos(p_s)} \quad (4)$$

P_s 可由 $P_s = hd \operatorname{ctg}(P_s)$ 正根给出。为了简化计算, 引入无量纲的应力 F^* , 即

$$F^* = \frac{T_n - T_1}{T_0} = \frac{(1-\nu)F}{E\alpha T_0} \quad (5)$$

它是实际应力与热膨胀完全受到约束时板的热应力 $E\alpha T_0/(1-\nu)$ 的比; 并引入二种无量纲的放热系数, 比奥(Biot)数 Bi 和无量纲时间 t' 。其中: $Bi = dh$, $t' = \eta t/d^2$, 上式中 h 为相对放热系数, η 为导温系数。

根据(4)、(5)式, 求得表面应力 F^* 与时间的关系如图 4 所示, 可以看出, 玻璃表面热冲

击应力为收缩应力，经过一段时间后玻璃表面的应力到达最大 $(F^*)_{\max}$ ，此后随时间的延续而减少，在相当长的时间后，应力消失。这正与实验结果相符，激光停照射一段时间后玻璃表面发生损伤，产生龟裂。

由于晶体材料结构上的特点，损伤发生解理，并具有一定的方向，只要表面上某一点热应力大到一定程度，即会造成严重的解理损伤，损伤形貌如图 3(b) 所示。晶体材料实验中也观察到损伤往往发生在激光停照以后。

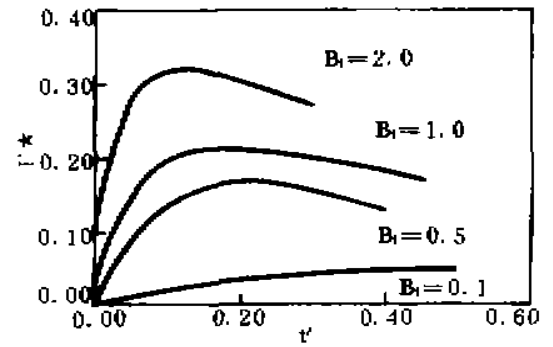


Fig. 4 Thermal shock stress F^* versus time

结 论 CO₂ 连续激光对材料的损伤机制在于杂质缺陷吸收引起的热冲击应力破坏。杂质缺陷密度与损伤阈值的关系可用 $W_{th} = E_0 \exp [0.693 / (K\pi R^2 N)]$ 来表示，材料缺陷密度和损伤方式对材料的激光损伤有很大影响。

参 考 文 献

- [1] N. Bloembergen, Role of cracks, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surfaces of transparent dielectrics. *Appl. Opt.*, 1973, 12(4): 661~664
- [2] S. R. Foltyn, Spot size effects in laser damage testing. *Natl. Bur. Stand., U. S. Spec. Publ.*, 1984, 889: 368~371
- [3] S. C. Seitel, J. O. Porteus, Laser damage round-robin testing (1.06 μm) with 13 ns pulse duration and 40 μm spot size. *Appl. Opt.*, 1984, 23(21): 3767~3773
- [4] 竹内洋一朗, 热应力. 北京, 科学出版社, (第一版), 1977: 121~139

CW CO₂ Laser Induced Damage to Infrared Window Materials

Gong Hui Li Chengfu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 26 January 1995; revised 10 May 1995)

Abstract CW CO₂ laser induced damage to several kinds of infrared window materials has been investigated. It has shown that the damage mechanism is attributed to thermal shock stress caused by the absorption of impurities and defects in the materials. We have established a model concerning the defect intensity and focus spot with damage threshold, and the damage modes of thermal shock stress are analyzed.

Key words CW CO₂ laser, infrared window materials, laser damage, defect, thermal shock stress.