

多脉冲激光对胶合透镜热破坏效应研究*

牛燕雄¹⁾²⁾³⁾ 禹 焯¹⁾ 段晓峰¹⁾ 张 鹏¹⁾ 武东生¹⁾ 王秀生¹⁾

1) 解放军军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

2) 清华大学精密仪器测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

3) 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2005 年 8 月 28 日收到 2005 年 12 月 23 日收到修改稿)

具有一定强度的激光辐照胶合透镜时可造成透镜的破坏. 建立了多脉冲激光与材料相互作用的一维非稳态温度场模型, 计算了瞬态温度场分布, 并对胶合透镜前表面的熔融和胶合材料的软化进行了数值模拟研究. 利用频率为 10Hz, 脉冲宽度为 200ns, 峰值功率为 20MW 的 CO₂ 激光对胶合透镜进行辐照实验研究. 实验表明, 当激光辐照时间为 12s 时, 胶合透镜前表面发生熔融破坏; 当照射时间为 30s 时, 胶合材料发生软化并出现彩色斑纹, 透镜完全破坏. 理论分析与实验结果相符.

关键词: 胶合透镜, 激光辐照, 激光破坏

PACC: 0768, 6180B, 6180

1. 引 言

随着光电技术的迅猛发展及其在武器装备上的广泛应用, 光学或光电系统已成为现代武器系统重要的组成部分. 然而, 为了消除色差等, 系统中普遍采用了胶合透镜. 当具有一定强度的激光辐照光学或光电系统时, 可造成胶合透镜的破坏, 并导致整个系统无法正常工作. 因此, 开展激光对胶合透镜的破坏效应研究具有重要意义.

当激光辐照时, 材料因吸收激光能量而形成一个非均匀的温度场, 进而产生热应力场. 当激光的能量或功率密度达到一定值时, 材料的温度超过熔融温度阈值或热应力超过材料的应力破坏阈值时, 材料发生破坏; 当激光能量或功率密度足够高时, 沉积的激光能量引起材料的温度迅速上升, 造成材料的膨胀、熔融、汽化, 甚至形成等离子体, 并产生极高压力的激光冲击波, 造成材料的破坏. 一般来说, 不同激光功率密度下材料破坏的物理效应是不一样的, 在 10³—10⁴ W/cm² 范围内材料发生温升现象, 在 10⁴—10⁶ W/cm² 范围内材料发生熔融现象, 在 10⁶—10⁸ W/cm² 范围内材料发生汽化现象, 在 10⁸—10¹⁰ W/cm² 范围内材料发生等离子体现象^[1].

国内外在强激光与物质相互作用方面已开展了

大量的研究工作^[1-8], 但涉及到多脉冲激光对胶合透镜的破坏研究未见报道. 本文对多脉冲 CO₂ 激光对胶合透镜的破坏进行了理论和实验研究, 建立了多脉冲激光与材料相互作用的一维非稳态温度场模型, 计算了瞬态温度场分布, 对胶合透镜前表面的熔融和胶合材料的软化进行了数值模拟研究. 同时, 进行了 CO₂ 激光辐照下胶合透镜的破坏性实验研究, 实验和理论分析结果相符.

2. 理论模型

当激光辐照材料时, 激光能量将被反射、吸收和透过, 而吸收的能量转化为热能. 该热量通过热传导在材料内扩散并形成温度场. 当激光的功率密度不是很高的情况下, 材料吸收激光能量, 引起材料表面温度上升, 此时激光对材料的辐照表现为材料的温升效应.

对于各向同性的均匀材料, 热传导偏微分方程表示为^[9]

$$\rho c_t \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t), \quad (1)$$

式中 ρ 为材料密度, c_t 为比热容, T 为温度, t 为时

* 军械工程学院重点基金(批准号: YJXM05002)资助的课题.

间 λ_1 为材料热导率, Q 为材料单位时间单位体积的发热量.

设脉冲宽度为 t_e , 脉冲间隔为 t_0 . 当多脉冲激光辐照靶材时, 基模高斯分布的脉冲激光辐照靶材时温度场分布为^[9]

$$T_N(x, y, z, t) = T_0 + \frac{2\rho\sqrt{\alpha_1}}{\lambda_1\pi^{3/2}} \times \sum_{n=0}^{N-1} \int_{m_0}^{m_0+t_e} \left\{ \frac{p}{\sqrt{t-t'}[8\alpha_1(t-t')+\omega^2]} \times \exp\left[-2\frac{(x-x_n)^2+(y-y_n)^2}{8\alpha_1(t-t')+\omega^2} - \frac{z^2}{4\alpha_1(t-t')}\right] \right\} dt' \quad (2)$$

式中 $(x_n, y_n, 0)$ 为第 n 个脉冲的作用点, T_0 为靶材的初始温度, α_1 为热扩散系数, p 为峰值功率, ω 为激光辐照到材料表面的光束半径.

设激光光斑的中心位置为坐标原点, 则靶材表面的温度场分布表示为

$$T_N(t) = T_0 + \frac{\sqrt{2}\rho p}{\lambda_1\omega\pi^{3/2}} \sum_{n=0}^{N-1} \left(a \tan\left(\frac{\sqrt{8\alpha_1(t-nt_0)}}{\omega}\right) - a \tan\left(\frac{\sqrt{8\alpha_1(t-nt_0-t_e)}}{\omega}\right) \right) \quad (3)$$

当激光辐照对激光不透明的介质时, 材料对光能的吸收系数很大, 激光的穿透深度很浅, 激光辐照材料的热效应可近似为一维分布. 设 $t=0$ 时刻在半无限大体表面有一功率为 P 的热源, 且将介质表面近似为绝热界面, 则介质内部在 t 时刻的温度分布为^[10]

$$T(z, t) = T_0 + \frac{2P\sqrt{\alpha_1 t}}{\lambda_1} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha_1 t}\right) - \frac{z}{\sqrt{4\alpha_1 t}} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha_1 t}}\right)\right) \right] \quad (4)$$

3. 计算结果与讨论

假定胶合透镜前透镜(即激光直接作用的凸透镜)和胶合材料的交界面为理想接触面, 介质内部温度沿激光照射方向上呈连续分布. 取胶合透镜初始温度为 20°C , 胶合材料的软化温度为 170°C .

K9 玻璃材料的物理参数如表 1 所示^[7,8].

频率为 10Hz, 峰值功率为 20MW 的多脉冲 CO_2 激光辐照胶合透镜, 在激光光斑半径为 8mm 时, 透

镜前表面温度随辐照时间的变化曲线如图 1 所示. 由曲线可知, 当辐照时间为 10.1s 时, 前表面温度达到 1400°C , 前表面发生熔融现象. 在距透镜前表面距离 $z=8.25\text{mm}$ 处(胶合透镜胶合面处), 温度随时间变化曲线如图 2 所示; 由曲线可知, 在激光辐照胶合透镜 5s 时间范围内, 胶合层温度变化很小, 主要原因是由于 K9 玻璃对 CO_2 激光的吸收系数很大, 光能量的传输深度很浅, 胶合面的温升主要是通过材料的热传导引起的. 另外, 由曲线可以得知, 随着辐照时间的增加, 作用脉冲的增多, 胶合面的温升逐渐加快, 最终接近于线形变化. 当辐照时间为 26.2s 时, 后表面温度达到 170°C (如图中星号所示), 即达到胶合材料的软化温度.

表 1 K9 玻璃材料的物理参数

密度	热传导系数	热容	热扩散系数	熔融温度
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda_1/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}$	$c_1/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$a_1/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$T_{\text{melt}}/^\circ\text{C}$
2.5×10^3	1.207	710	6.8×10^{-7}	1400

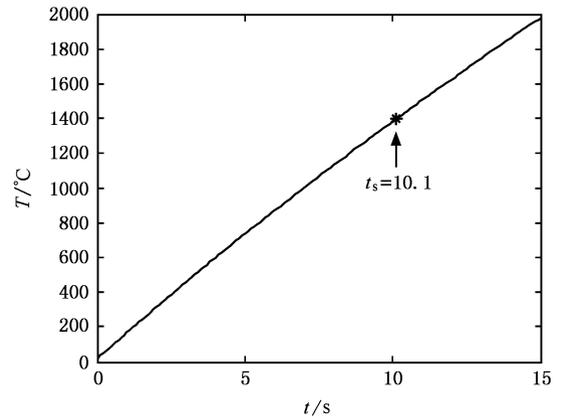


图 1 $z=0\text{mm}$ 处温度随辐照时间变化曲线

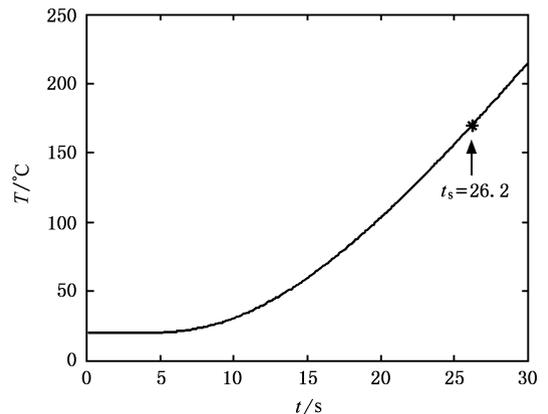


图 2 $z=8.25\text{mm}$ 处温度随辐照时间变化曲线

图 3 为胶合材料软化时胶合透镜的前透镜的温

度分布曲线,从图中关系曲线可以得知:当胶合透镜胶合层达到软化温度时,距透镜前表面 1.8mm 范围内温度均超过 1400°C ,该区域内的材料将发生熔融现象.随着辐照时间的增长,热量的不断积累,熔融破坏的深度在不断增加.

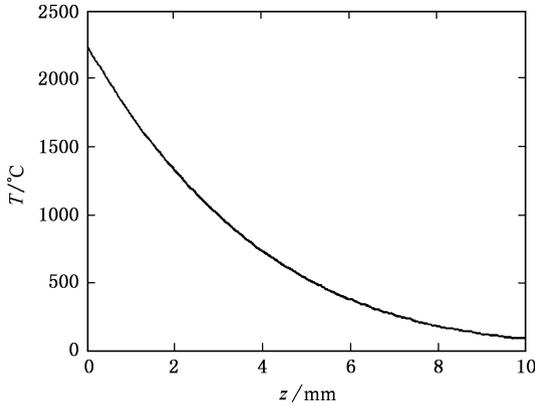


图 3 $t = 26.2\text{s}$ 介质内部温度分布曲线

4. 实 验

4.1. 实验条件

实验装置原理图如图 4 所示.激光光源为重复频率可调的 TEACO₂ 激光器,示波器为 TDS220 型数字示波器.胶合透镜的前表面到胶合面的距离为 8.25mm,透镜材料为 K9 玻璃,胶合材料为甲醇胶. CO₂ 激光的频率为 10Hz,单脉冲能量为 4J,脉宽

为 200ns,激光辐射材料表面的光束半径为 8mm.示波器显示的单脉冲波形如图 5 所示.

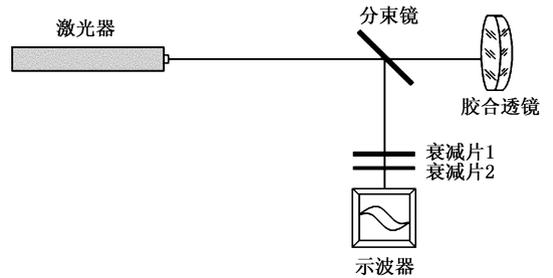


图 4 实验装置示意图

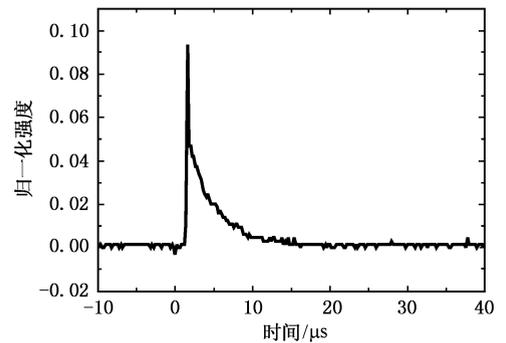


图 5 CO₂ 激光脉冲波形

4.2. 实验结果及分析

实验中的实验样品为三组,分别辐照 12s,25s 和 30s,观察样品的激光辐照破坏情况,用偏光显微镜拍摄的实验样品的照片如图 6 所示.

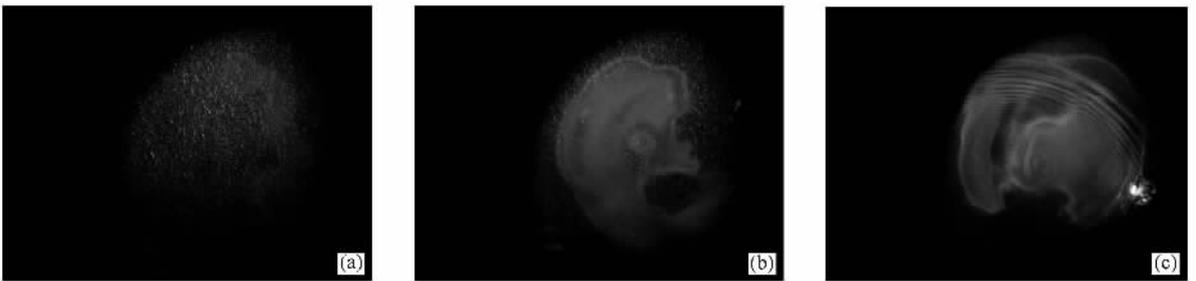


图 6 (a) 照射 12s 时胶合透镜破坏情况 (b) 照射 25s 时胶合透镜破坏情况 (c) 照射 30s 时胶合透镜破坏情况

当频率为 10Hz,峰值功率为 20MW 的多脉冲 CO₂ 激光对样品辐照时间达为 12s 时,由于 K9 玻璃对 CO₂ 激光的强吸收,经过一段时间的热量累积,前表面达到熔融破坏,使胶合透镜的前表面出现轻微的灰斑,如图 6(a) 所示.随着辐照时间的增长,热量的积累不断增加,破坏的面积进一步增大,当照射

时间达到 25s 时,透镜前表面出现了近似为半圆形的灰斑,如图 6(b) 所示;当辐照时间达到 30s 时,前表面吸收的热量逐渐扩散到胶合层而使胶合层温度逐渐升高,达到一定温度时发生软化,此时胶合层内部应力分布不均匀,发生形变,在局部形成光楔,并出现牛顿环,如图 6(c) 所示.

实验表明,采用频率为 10Hz,脉冲宽度为 200nsCO₂ 激光辐照,当入射到材料的光斑半径为 8mm,照射 12s 时前表面出现灰斑,照射 30s 时胶合材料发生软化.由理论分析可知,在同样性能参数的激光辐照胶合透镜时,胶合透镜的前表面达到熔融温度时所需要的辐照时间为 10.1s,达到胶合材料软化温度所需的辐照时间为 26.2s.理论分析和实验结果的相对误差分别为 17.8% 和 14.5%.误差产生的主要原因是实验不能满足真空绝热条件,样品的前表面通过热对流和辐射对流会损失一部分能量,另外胶合透镜第一透镜和胶合材料交界面并非为理想接触,因此实验中胶合透镜被破坏所用的时间比理论上长一些.通过以上分析,理论分析和实验结果基

本符合,证明了上述理论模型的合理性和正确性.

5. 结 论

本文基于热传导理论建立了多脉冲激光与胶合透镜相互作用的非稳态温度场模型,解析计算了胶合透镜的瞬态温度场分布,计算了前表面的熔融时间和胶合面的软化时间,并进行了实验.研究结果表明,多脉冲 CO₂ 激光对胶合透镜的完全破坏主要有表面的熔融破坏和胶合材料软化破坏.

感谢中国科学院电子研究所柯常军博士在实验过程中给予的指点和帮助.

-
- [1] Chen T 2004 *Research on Numerical Simulation of the Thermal Interaction Process of the Laser and Material* (Nanjing : Nanjing University of Science & Technology)(in Chinese)[陈 陶 2004 激光与物质热作用过程的数值模拟研究(南京 : 南京理工大学)]
- [2] Guignard F , Autric M , Baudinaud V 1998 *Proc . SPIE* **3244** 176
- [3] Guignard F , Autric M , Baudinaud V 1997 *Proc . SPIE* **2966** 80
- [4] Puttick K , Holm R , Ristau D *et al* 1998 *Proc . SPIE* **3244** 188
- [5] Deng Y P , Jia T Q , Leng Y X *et al* 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 2216 (in Chinese)[邓蕴沛、贾天卿、冷雨欣等 2004 物理学报 **53** 2216]
- [6] Guo S F , Lu Q S , Deng S Y *et al* 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 817 (in Chinese)[郭少锋、陆启生、邓少永等 2004 强激光与粒子束 **16** 817]
- [7] Luo F , Sun C W , Du X W 2001 *High Power Las . and Part . Be .* **13** 20 (in Chinese)[罗 福、孙承纬、杜祥琬 2001 强激光与粒子束 **13** 20]
- [8] Duan X F , Wang Y F , Niu Y X *et al* 2004 *Chin . J . Las .* **31** 1455 (in Chinese)[段晓峰、汪岳峰、牛燕雄等 2004 中国激光 **31** 1455]
- [9] Lu J , Ni X W , He A Z 1996 *Interaction Physics of Laser with Materials* (Beijing : Mechanical Industry Press)(in Chinese) [陆 建、倪晓武、贺安之 1996 激光与材料相互作用物理学 (北京 : 机械工业出版社)]
- [10] Li J C 2003 *Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Action* (Beijing : Science Press)(in Chinese)[李俊昌 2003 激光的衍射及热作用计算 (北京 : 科学出版社)]

Study on thermal damage to balsaming lens induced by multi-pulse laser^{*}

Niu Yan-Xiong¹⁾²⁾³⁾ Yu Ye¹⁾ Duan Xiao-Feng¹⁾ Zhang Peng¹⁾ Wu Dong-Sheng¹⁾ Wang Xiu-Sheng¹⁾

1) (*Optics & Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China*)

2) (*The State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

3) (*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 28 August 2005 ; revised manuscript received 23 December 2005)

Abstract

Balsaming lens will be damaged when irradiated by laser of certain power. The model of one-dimension unstable temperature field during the interaction between multiple-pulse laser and material is established, and the transient temperature distribution of glass material of balsaming lens is calculated. The fusion moment and the moment when cementing material melts are researched by means of numerical calculation. Experiments about damage in several balsaming lenses of the same kind irradiated by multiple-pulse CO₂ laser, the parameters of which are 10Hz, 200ns and 20WM, are carried out. It is found that when the irradiation time reaches 12s, the front surface of balsaming lens is molten. When the irradiation time reaches 30s, colored dapples are suddenly formed in the cementing layer of samples. It indicates that cementing material is intenerated and balsaming lens is thoroughly damaged. The result of theoretical analysis exhibits good agreement with the experimental result.

Keywords : balsaming lens, laser irradiating, laser damage

PACC : 0768, 6180B, 6180

^{*} Project supported by the Ordnance Engineering College Key Fund Task(Grant No. YJJXM05002).