

光学材料连续波激光热-力破坏效应

夏晋军 龚 辉 程 雷 李成富

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 着重研究连续波激光对光学窗口材料的热-力破坏, 由于激光对光学材料的不均匀加热, 造成材料内部产生热应力, 而加热的进一步发展, 可诱发材料宏观破坏(熔融、炸裂), 热-力破坏与激光辐照功率和材料本身热性质有关。文中还研究了玻璃钢化对材料抗激光损伤的影响。

关键词 热应力, 激光破坏。

1 引 言

高功率连续激光是当前世界激光应用中重点研究和项目之一, 然而在高功率激光系统中, 强大的激光能量, 极易产生热能沉积, 从而在光学元件内及约束边界上产生不均匀热效应, 致使元件产生炸裂, 激光对光学元件的破坏已成为发展高功率激光技术的“瓶颈”, 世界各国都很重视这个问题的研究。本文利用氧碘化学连续激光与 CO₂ 连续激光对红外窗口材料进行了损伤研究, 分析了激光与材料热-力耦合规律及耦合过程中的热、力学、光学效应, 深入探讨了连续激光对材料的破坏机理。并初步研究了玻璃钢化对材料抗激光损伤的影响。

2 氧碘化学连续激光与 CO₂ 连续激光对光学元件的损伤实验

氧碘化学激光波长为 1.315 μm, 它的输出功率大, 是新型的高功率中红外激光器, 其理论功率输出可达兆瓦; CO₂ 连续激光, 目前输出功率已到万瓦量级, 在激光对抗和工业加工中有着重要作用, 针对这两种激光对光学材料的损伤研究具有非常重要的意义。

2.1 损伤阈值测试

实验选用 K₉ 玻璃、石英玻璃和 MgF₂ 晶体, 它们的有关参数如表 1 所列。利用氧碘化学激光与 CO₂ 连续激光进行体损伤实验, 样品中的激光损伤测试结果如表 2、3 所列。

Table 1. Parameters of the optical material

sample	specific gravity (g/cm ³)	melting point (°C)	coefficient of expansion (/°C)	specific heat (Cal/g · °C)	heat conductance (Cal/s · cm · °C)	elasticity coefficient (Psi)
fused glass	2.21	1700	5.8×10^{-7}	0.188	8.43×10^{-3}	10.6×10^6
K ₉ glass	2.51	1400	7.6×10^{-6}	0.205	2.66×10^{-3}	11.6×10^6
MgF ₂ crystal	3.18	1255	8.8×10^{-6}	0.204	7.51×10^{-3}	9.0×10^6

Table 2. Experimental results of CW laser damage

sample	irradiation time (s)	power (W)	focal area (cm ²)	power density (W/cm ²)	damage state
MgF ₂ crystal	1	84	7.85×10^{-3}	1.07×10^4	bulk split
	6	200	0.785	254.78	bulk split
K ₉ glass	1	97	7.85×10^{-3}	1.24×10^4	bulk burst
	6	215	0.785	273.89	bulk burst
fused glass	1	360	7.85×10^{-3}	4.59×10^4	bore a hole
	15	495	0.785	630.57	surface soften

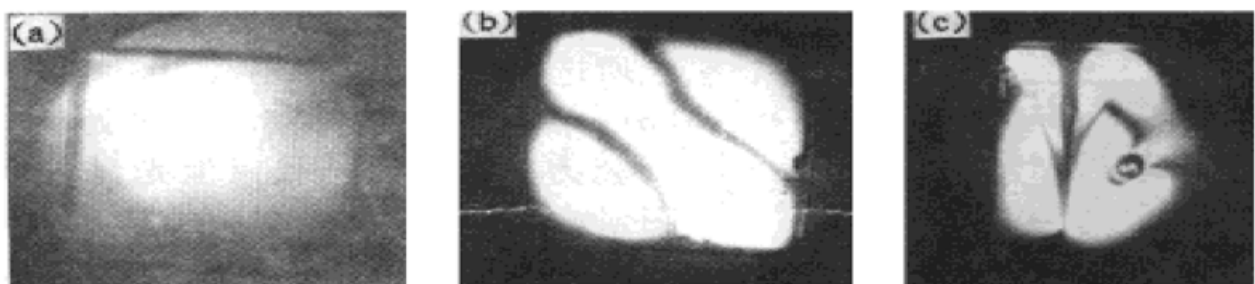
Table 3. Oxygen-Iodine chemical laser induced damage

sample	irradiation power (W)	focal area (cm ²)	power density (W/cm ²)	damage state
K ₉ glass	~ 5731	0.078	7.35×10^4	burst
antireflective film coating on quartz	~ 8887	0.0113	7.86×10^5	bore a hole
MgF ₂ crystal	~ 7618	0.0113	6.74×10^5	split
fused glass	~ 14453	0.0113	1.28×10^6	no damage

2.2 结果分析

1) 对于连续激光的损伤, 认为是热-力破坏起主导作用, 损伤过程如下: 激光照射材料后, 材料表面吸收, 使其温度升高, 此时, 由于材料的热稳定性不同, 将出现两种破坏形态。

一是材料热稳定性好, 由于材料温度变化产生的热应力不能使其产生炸裂或解理, 而是材料升温, 发生熔融破坏。图 1 为石英玻璃在 CO₂ 激光照射下的损伤全过程, a 为材料未受激光照射时的情况; b 为激光作用初期, 使石英内部产生热应力; c 为随着激光作用时间加长, 发生熔化, 并在石英中穿孔。

Fig. 1 CO₂ laser induced damage of fused silica

二是材料热稳定性差, 激光在材料中产生的热应力达到一定程度就会使其发生炸裂或解理, 材料本身温升并未达到软化或熔融温度。从表 1 中可以看到 K₉、MgF₂ 晶体的热稳定性差, 实验中观察到材料损伤时发生炸裂或解理。

影响材料热稳定性的具体因素有材料的抗张强度, 杨氏弹性系数, 热导率, 比热, 比重及热膨胀系数, 以热膨胀系数影响最大。热膨胀系数愈大, 热稳定性愈差。

为了进一步观察材料在连续激光下的损伤全过程, 本文利用高速摄影(250 frame/s)拍下了氧碘化学激光对石英全反膜与 MgF₂ 晶体损伤全过程, 如表 4 所示, 石英+ 全反膜, 在激

光照射 0.726 s 后, 表面开始出现熔融烧蚀, 在 1.2 s 时材料熔融穿孔。MgF₂ 晶体在照射 0.248 s 后出现解理, 在 0.6 s 时材料完全解理。这进一步可以看到连续激光对材料损伤的热-力破坏机制。

Table 4. Process of Oxygen-Iodine chemical laser induced damage in antireflective coating on quartz and MgF₂ crystal

sample	quartz+ antireflective coating		MgF ₂ crystal	
time (s)	0.726	0.726~ 1.2	0.248	0.248~ 0.6
damage state	melting and burning at surface, appearing lights	melting and burning a hole, giving out glaring lights	appearing split and light	split and light becoming stronger at last, the whole material is splited

2) 从表 3 可以看到, 石英玻璃镀了全反膜后比石英玻璃的损伤阈值低许多, 这是因为石英玻璃镀了全反膜后, 增加了界面吸收, 而且薄膜的抗激光损伤能力要比基底材料差许多, 在激光照射时, 薄膜首先发生破坏, 这将增加对后续激光的吸收, 从而造成石英基底破坏。

3) 实验结果表明, 对上述三种光学材料 CO₂ 连续激光比氧碘化学激光易产生破坏, 这主要是材料对激光的吸收不同造成的。

4) 从表 1 和表 3 可以看到, 石英玻璃具有耐辐射, 特别小的膨胀系数, 比重小, 强度高, 是性能非常好的光学材料, 可以作为氧碘化学激光器的光学窗口材料使用。

5) 从图 1 中可以看到, 石英玻璃在发生熔融前, 体内已产生很强应力, 达到 40 μm/cm, 这将造成折射系数变化和材料变形, 从而使光束弥散、偏转、波阵面畸变、象差畸变、双折射和热透镜效应等, 它将严重影响光学系统成像质量。在实际应用中是需要非常注意的。

3 K₉ 玻璃钢化处理^[3]

K₉ 玻璃采用低温离子交换法处理, 离子交换介质为 KNO₃ 和 NaNO₃ 的混合盐溶液, 本实

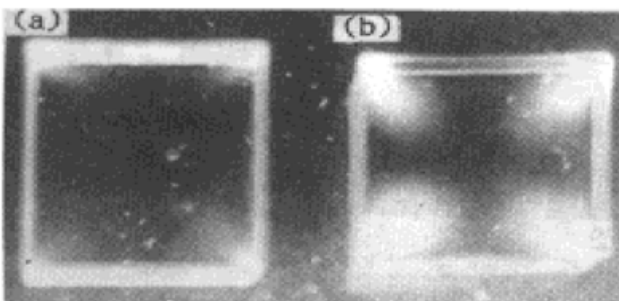


Fig. 2 Residual strain present on K₉ glass surface after ion exchange treatment
(a) Original, (b) Ion exchange treatment

验所选用的离子交换参数为: KNO₃/NaNO₃=75/25(wt%); 320℃; 24h。经过处理玻璃表面形成压应力薄层。实验利用偏光显微镜拍摄了应力图, 如图 2 所示。实验测试了 K₉ 玻璃在钢化处理前后的透射光谱, 光谱没发生变化, 表明钢化处理并不影响材料的光谱性能。利用连续 CO₂ 激光对 K₉ 玻璃样品进行表面损伤阈值测量, 激光辐照时间为 0.5 s, 样品表面发生龟裂。损伤阈值结果如表 5 所列, 可以看到样品在钢化处理前后表面损伤阈值提高。

利用原子力显微镜测试了样品钢化前后的微观结构变化如图 3 所示, 发现裂纹消失, 表面凹凸粗糙明显减少, 表面最大粗糙度从钢化前的 14.235 nm, 降到钢化后的 1.885 nm, 平均粗糙度从 10.603 nm 降到 1.094 nm。进一步的实验和分析准备以后进行。但是, 初步认为钢化

处理对于提高材料抗连续激光损伤是有效的。

Table 5. Damage threshold on K₉ glass surface before and after ion exchange treatment

sample	before (W/cm ²)	after (W/cm ²)
K ₉	292.6	418.4

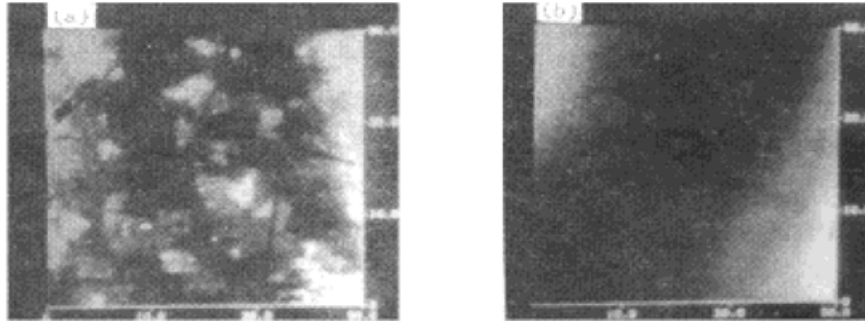


Fig. 3 AFM topographic image of K₉

(a) Original topographic image of K₉ glass; (b) Topographic image of K₉ glass after ion exchange treatment

结 论 氧碘化学激光和 CO₂ 连续激光对光学材料破坏的机制为: 热-力破坏。并且, 根据材料的热性质不同而呈现两种损伤形式, 一是热稳定性好的材料, 破坏以热效应为主, 发生熔融破坏; 二是热稳定性差的材料, 破坏以力学效应为主, 发生炸裂或解理。另外, 钢化处理是提高光学材料抗激光损伤的有效方法。

参 考 文 献

- [1] S. S. Ballard, State of the Art Report, Optical Materials for Infrared Instrumentation, The University of Michigan Willow Run Laboratories, Ann Arbor, MI, 1959
- [2] W. L. Wolfe Editors, The Infrared Handbook, Environmental Research Institute, Ann Arbor Michigan, 1978, 1985
- [3] Zhu Congshan, *et al.*, Ion exchange strengthening of neodymium phosphate laser glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1989, **112**(1~ 3) : 368~ 372

CW Laser Induced Thermal and Mechanical Damage in Optical Window Materials

Xia Jinjun Gong Hui Cheng Lei Li Chengfu

(Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Science, Shanghai 201800)

(Received 18 September 1996)

Abstract CW Laser induced thermal and mechanical damage in optical window materials are investigated. Inhomogenous absorptance will result in thermal stress in optical materials, which seriously induced macrodamage, fusion or fracture. Thermal and mechanical damage are related to laser power and thermal properties of materials. Ion exchange treatment was used to strengthen glass surface.

Key words thermal stress, laser damage.