

1.06 μm 连续激光照射下 K9 玻璃板的应力松弛破坏*

罗 福¹, 孙承纬¹, 杜祥琬²

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 基于一维应力松弛模型和粘弹性本构关系, 对 1.06 μm 连续激光照射下 K9 玻璃板中的温升和应力作了计算, 结果表明, 由于应力松弛效应, 激光停照后的冷却过程中产生的残余拉伸应力可达到玻璃的拉伸断裂强度阈值, 而激光加热期间的最大压缩应力却小于压缩断裂强度要求。对 3mm 厚的 K9 玻璃板, 由应力松弛引起破坏所要求的激光参数为 946kW/cm² 作用 0.2s, 因而应力松弛可能为 1.06 μm 连续激光大光斑照射下 K9 玻璃窗口损伤的主要模式。

关键词: K9 玻璃; 激光; 热应力; 应力松弛

中图分类号: TN249; O343.6

文献标识码: A

光学玻璃作为光学元器件的基本材料广泛用于各种光学器件如光学窗口、棱镜、透镜、各种膜层的基片中, 因而其损伤机理受到人们的特别关注, 并开展了多方面的研究^[1~6], 从 1969 年开始的美国 Boulder 损伤年会开辟有材料效应专栏, 报导各种应用条件下光学材料的损伤机制及控制研究的进展。

由于光学玻璃在高温和常温下有着不同的性质, 在激光作用下的破坏模式与常温下的力学破坏有重大的差别, 1.06 μm 激光照射下, 曾观察到熔融与裂纹并存的现象, 在常温下其力学行为可由弹性应力理论和线性弹性断裂力学理论描述, 而高温下表现出热软化、蠕变、塑性流动, 会发生应力松弛。激光作用时玻璃经历了常温—高温—常温的变化过程, 如果在激光加热时产生的压缩应力不足以造成材料的破坏, 高温时的应力松弛会在其后的冷却收缩过程中产生残余拉伸应力, 如果此残余应力超过材料的拉伸断裂阈值, 会产生拉伸断裂。这两种应力的大小由激光参数和玻璃性质决定。

K9 玻璃对 CO₂ 激光为强吸收(吸收系数为 1667cm⁻¹), 应力主要集中于表面层, 而对 $\lambda=1.06\mu\text{m}$ 激光则因吸收较弱(0.01cm⁻¹), 应力分布范围较大。强吸收时热传导对样品冷却起重要作用, 而弱吸收时样品冷却主要靠辐射和对流, 这有利于样品内部的应力松弛, 但因吸收少, 需要较高的入射激光能量。本文描述了计算用的模型, 给出了几种光强下的温度和应力变化计算结果, 以及断裂发生时间与入射激光功率密度的关系。

1 理论模型

连续激光照射到玻璃板上, 玻璃吸收激光能量后产生温升, 由此引起的热膨胀将在玻璃中产生压缩热应力, 如果此应力的最大值超过玻璃的压缩断裂强度 σ_c , 则将发生断裂。压缩应力不足以造成断裂破坏时, 进一步的温升将引起玻璃粘度(绝对粘滞系数)的显著降低, 在热应力的作用下玻璃发生塑性流动, 使玻璃中的热应力部分甚至全部释放, 应力下降的程度是温度分布的函数。在激光停止照射后的冷却过程中, 由于对流和热辐射, 玻璃的粘度增加, 压缩应力将减小, 在温度降低到室温过程中进一步的收缩使玻璃中的应力从压缩应力转变为拉伸应力, 并逐渐增加。如果拉伸应力达到玻璃的拉伸断裂强度 σ_T , 样品即发生断裂。

* 收稿日期: 2000-08-18; 修订日期: 2000-11-10

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-5-6)

作者简介: 罗 福(1965-), 男, 在读博士生, 主要从事激光效应应用研究; 绵阳 919-113 信箱。

模型中假定激光光斑远大于样品厚度,照射是一维平面的,不考虑光斑边缘的应力分布,即只考虑平面应变情况。材料各参数除粘度外都不随温度变化。

考虑一厚为 l 的玻璃板受到光强为 I 的连续激光照射,照射时间为 t_L ,玻璃对该激光的吸收系数为 β ,则玻璃中的温升 T 满足导热微分方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{(1-R)I\beta}{k} [H(t) - H(t-t_L)] e^{-\beta z} \quad (1)$$

边界条件为

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = hT(0,t) + \mu\sigma_s T^4(0,t), \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l} = hT(l,t) + \mu\sigma_s T^4(l,t) \quad (2)$$

其中 $H(t)$ 为单位阶跃函数, t 为时间, z 为样品中厚度方向的位置坐标, 设入射面处为 $z=0$, T 为玻璃材料温度与室温(290K)的差值温度, k 为热导率, κ 为热扩散率。 β 为吸收系数, h 为对流换热系数, μ 为材料的黑度, σ_s 为 Stefan-Boltzmann 常数。在吸收系数较小的情况下,玻璃样品后表面的温度也有显著增加,激光停止照射后的冷却要靠热辐射和对流。

在较大温度变化范围内,玻璃的力学性质表现为 Maxwell 粘弹性体^[5,6],材料本构方程可表示为

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial t} + \frac{\epsilon_i}{\tau} = 2G \frac{\partial e_i}{\partial t} \quad (3)$$

其中 $s_i, e_i (i=x, y, z)$ 分别为应力和应变的偏量分量,剪切模量 G 、松弛时间 τ 与玻璃的粘度 η 之间满足 $\tau = \eta/G$, η 与温度 T 有如下关系

$$\eta = \eta_b \exp[-E_a(1/T - 1/T_b)/R_g] \quad (4)$$

其中, E_a 为粘性流激活能, T_b 为某一参考温度, η_b 为 T_b 温度下的粘度, R_g 为普适气体常数。

在平面应变情况下, $s_x = s_y = \sigma_x/3$, $s_z = -2\sigma_x/3$, $e_x = e_y = -\epsilon_x/3$, $e_z = 2\epsilon_x/3$ 。热弹性本构关系为

$$\theta = \frac{\sigma}{K} + \alpha T \quad (5)$$

其中 ϵ, σ 分别为体应变和平均应力, σ_x, ϵ_x 分别为其在 x, z 方向的分量, α 和 K 分别是线性膨胀系数和体积模量。利用(3)~(5)式,得一维应变条件下应力温升关系

$$\frac{d\sigma_x}{dt} + \frac{E}{6(1-\nu)\eta} \sigma_x = -\frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

式中, ν 为玻璃材料的波松比, E 为杨氏模量。

由式(1)、(2)、(6)即可算出样品中的温升与应力随时间的变化,如果加热过程中的压缩应力超过材料的压缩断裂强度,则发生压缩破坏;如果冷却时的拉伸应力超过材料的拉伸断裂强度,则发生拉伸破坏。

3 计算结果

K9 玻璃样品的材料参数如表 1 所示^[5,7]。对 3mm 厚度的 K9 玻璃样品,以不同光强的激光束照射 0.2s,初始温度为 290K,图 1~图 3 给出了样品前表面和深度 0.9mm 处温度和应力的计算结果。

表 1 K9 玻璃的材料性质
Table 1 Properties of K9 glass

k	κ	β	T_b	η_b	E	α	ν	σ_c	σ_T	E_a
/(W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	/(cm ² ·s ⁻¹)	/cm ⁻¹	/K	/(Pa·s)	/GPa	/K ⁻¹		/GPa	/GPa	/(MJ·mol ⁻¹)
0.015	5.13×10 ⁻³	0.01	801	10 ^{14.5}	81	8.6×10 ⁻⁶	0.208	0.69	0.028	0.66

干燥空气的对流换热系数 h 通常小于 100W/(m²·K),水的对流换热系数比空气高约 100 倍,计算中取对流换热系数为 $h=1000$ W/(m²·K)。计算表明,在所取激光参数范围内对流换热系数只影响温度回复至室温的快慢和残余应力趋于稳态值的快慢,对冷却到室温时的残余应力大小的影响可以忽略不计。样品对激光的反射率 r 取 0.08,黑度 μ 近似取 0.81。玻璃的拉伸断裂强度 σ_T 一般在 20~80MPa 之间,并且缺陷、微裂纹等对它的影响很大,为便于比较,计算中 σ_T 取 28MPa。当入射光强 I 为 1MW/

cm^2 时, 样品前表面及 0.9mm 深处的温度、应力变化如图 1 所示。

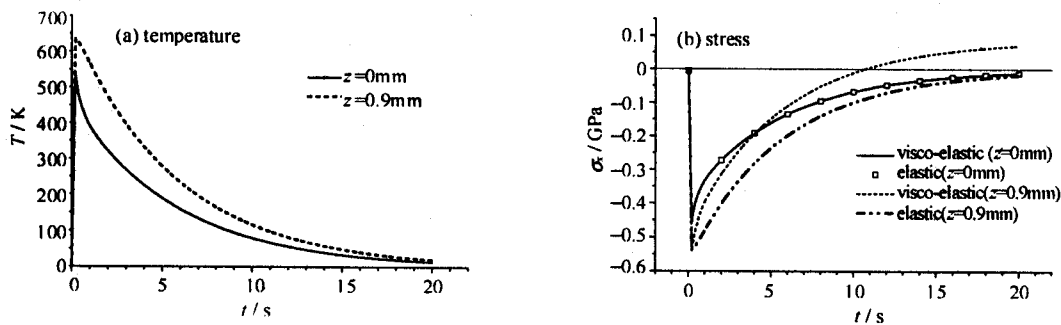


Fig. 1 Temperature and stress histories in the K9 glass sample irradiated by a laser beam

图 1 功率密度 $I=1\text{MW}/\text{cm}^2$ 的激光照射下 K9 玻璃样品中的温度和应力随时间的变化

从上图可见, 此时用弹性模型或粘弹性模型计算出的表面处的应力没有差别, 样品中最大温度为 925K, 低于软化点温度, 高出应变点温度, 内部已发生粘度变化, 冷却后样品内部出现的拉伸应力超过拉伸断裂强度, 达到拉伸应力破坏阈值为激光停止后 12.6s。最大压应力为 0.54GPa, 未达到压应力断裂强度, 故将发生应力松弛破坏。

图 2 为功率密度 $I=0.9\text{MW}/\text{cm}^2$, $t_L=0.2\text{s}$, $\lambda=1.06\mu\text{m}$ 的激光照射时, 样品中的温度和应力随时间的变化。此时粘弹性模型计算出的表面应力与弹性理论所得值无差别, 样品中最大温度为 862K, 低于软化点温度, 略高于应变点温度, 内部刚开始发生粘度变化, 冷却后内部出现的拉伸应力仅 8.9MPa, 最大压应力为 0.479GPa, 均未达到应力断裂强度, 不会发生破坏。计算表明, $I=0.95\text{MW}/\text{cm}^2$ 时样品中最大温度 894K, 达到拉伸应力破坏阈值为激光停止后 30.4s。与稳态值恰等于拉伸断裂强度情况对应的激光束功率密度阈值为 $I=0.946\text{MW}/\text{cm}^2$, 此时样品中最大温度为 891K, 最大压应力为 0.51GPa。

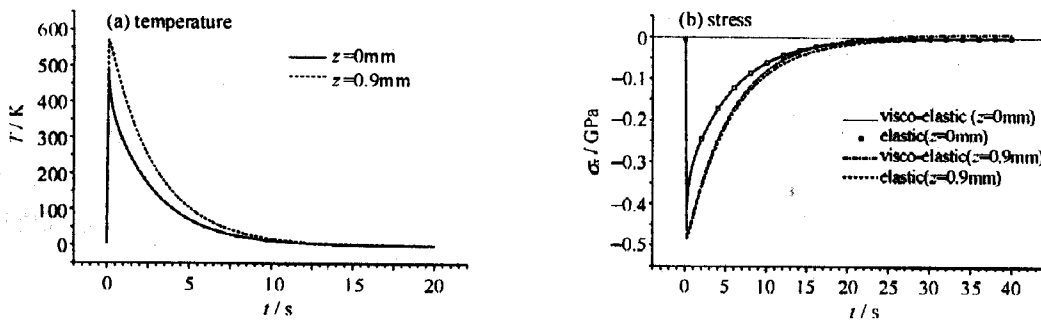


Fig. 2 Temperature and stress histories in the K9 glass sample irradiated by a laser beam

图 2 功率密度 $I=0.9\text{MW}/\text{cm}^2$, $t_L=0.2\text{s}$, $\lambda=1.06\mu\text{m}$ 激光照射时 K9 玻璃样品中的温度和应力随时间的变化

图 3 为功率密度 $I=1.5\text{MW}/\text{cm}^2$ 激光照射时样品中的温度和应力随时间的变化。此时样品中最大温度 1243K, 冷却后出现的拉伸应力为 0.578GPa, 达到拉伸应力破坏强度的时间为激光停止后 0.26s。最大压应力为 0.51GPa, 未达到压缩断裂强度, 只发生应力松弛破坏。若依弹性理论, 此时压应力达 0.81GPa, 应发生压应力破坏, 而按粘弹性关系则不会发生压应力破坏。

在吹风条件下, 不同激光功率密度下拉伸断裂发生的时间见表 2。可见, 破坏发生的时间在接近阈值时变得很长, 此时断裂源于样品内部的拉伸断裂, 高于阈值后所需时间很快缩短, 但激光功率进一步增加会使发生破坏的时间略微增长, 这是由从更高温度冷却下来需要更多的时间所造成的。

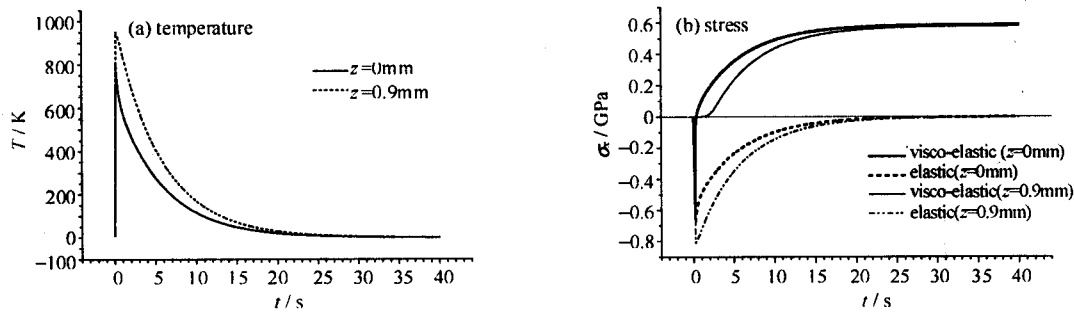


Fig. 3 Temperature and stress histories in the K9 glass sample irradiated by a laser beam

图3 功率密度 $I=1.5\text{MW}/\text{cm}^2$ 激光照射时 K9 玻璃样品中的温度和应力随时间的变化

表2 拉伸断裂发生的时间与入射激光功率密度的关系 ($t_L=0.2\text{s}$, $h=0.1\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

Table 2 Fracture time at different incident laser intensities

$I/(\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2})$	0.95	1.0	1.1	1.2	1.5	1.8	2.0
t/s	30.4	12.6	2.6	0.85	0.26	0.75	1.2

4 结论

从上面的计算结果可以看到,由于高温时玻璃粘度降低,热应力释放(应力松弛),K9 玻璃在 $1.06\mu\text{m}$ 激光作用下不会发生热弹性断裂,而是发生软化变形(光强偏低时)和激光作用后冷却过程中的拉伸断裂破坏(光强较高时)。若不考虑玻璃在高温下的粘性变化,激光在玻璃中产生较高温度时会引起压缩应力断裂(见图3),由于高温时粘度的显著降低,此现象就不会发生,可见粘度在玻璃的激光破坏中起重要作用。在激光作用停止后样品的冷却过程中,随着温度的降低,玻璃的粘度又逐渐恢复到室温值,但样品中的应力却不再像弹性体那样恢复到零,而是转变为拉伸应力,其大小由高温期间应力释放的多少决定。可见,温度及伴随的材料粘度变化是诱因,高温期间的应力释放是引起冷却断裂的原因。由于应力松弛引起玻璃拉伸断裂对应的入射激光强度低于激光加热过程中压缩破坏机制对激光强度的要求,在光学窗口或薄膜基板的设计等大光斑应用场合应予以考虑。

在接近破坏阈值光强照射条件下应力松弛引起的拉伸破坏发生的时间变得很长,这是因为这种情况下最高加热温度较低,热应力释放很慢,需要冷却到接近室温时产生的拉伸应力才能达到拉伸断裂阈值。此时断裂源于样品内部,因为最高温度出现于内部,那里应力释放最甚。激光强度高于阈值后玻璃断裂所需时间很快缩短,首先断裂的位置随辐照激光增强逐渐向表面移动。

参考文献:

- [1] Camp D W, Kozlowski M R, Sheehan L M, et al. Subsurface damage and polishing compound affect the 355nm laser damage threshold of fused silica surfaces[A]. SPIE[C], 1998, 3244:356-364.
- [2] Kitriotis D, Merkle L D, Dodson A. Multiple pulse damage studies of BK₇, KCl, and SiO₂ at 532nm[A]. Damage in laser materials, 1985[C]. 1987, 746:138-145.
- [3] Campbell J H, Hurst P A, Heggins D D, et al. Laser induced damage and fracture in fused silica vacuum windows[A]. SPIE[C], 1997, 2966:106-125.
- [4] Guignard F, Autric M, Baodinaud V. Damage mechanisms and transparency changes in CO₂ laser irradiated glass[A]. SPIE[C], 1998, 3244:176-187.
- [5] Guignard F, Autric M, Baodinaud V. Damage thresholds in laser irradiated optical material[A]. SPIE[C], 1997, 2966:80-87.
- [6] Allcock G, Dyer P E, Elliner G, et al. Experimental observations and analysis of CO₂ laser-induced microcracking of glass[J]. *J Appl Phys*, 1995, 78(12):7295-7303.
- [7] Battah J H. Damage thresholds in laser-irradiated glass[J]. *J Appl Phys*, 1982, 53(11):7537-7544.

Stress relaxation damage in K9 glass plate irradiated by 1.06 μm CW laser

LUO Fu¹, SUN Cheng-wei¹, DU Xiang-wan²

(Institute of Fluid Physics, CAEP P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the stress relaxation model in 1D planar geometry and the visco-elastic constitutive equation, the temperature and stress histories in the K9 glass samples irradiated by CW laser beams ($\lambda=1.06\mu\text{m}$) have been calculated. The results indicate that the residual tensile stress due to the stress relaxation effect during cooling after the laser radiation may be greater than the tensile fracture strength of samples, while the maximum compression stress during the laser heating is less than the requirement for compression damage. For a K9 glass window of 3mm thickness, its damage due to the stress relaxation may be induced by a laser radiation of 0.946MW/cm² for 0.2s. Therefore, the stress relaxation should be regarded as the main mechanism of damage in K9 glass windows while a CW laser beam ($\lambda=1.06\mu\text{m}$) irradiates it with large spot.

Key words: K9 glass; laser; thermal stress; stress relaxation