

纳秒激光诱导熔石英玻璃损伤的超快诊断

周 强 王俊波 邱 荣 田润妮 杨永佳 蒋 勇

(西南科技大学极端条件物质特性实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要 采用超快时间分辨的光学诊断技术,研究了 Nd:YAG 脉冲激光分别烧蚀熔石英样品后表面和体内的动态过程,获得了冲击波和等离子体演化过程的时间分辨图像。结果表明,在样品后表面,激光与材料作用产生了多个在体内传输的冲击波,冲击波传播到样品前表面时会发生反射;在样品体内,激光与材料作用产生了等离子通道,在激光焦点处和自聚焦处产生了较强的微爆点。实验还发现,冲击波在界面的反射波和反射剪切波强度与冲击波入射角有关,不同冲击波的传播速度不同。

关键词 超快光学; 冲击波; 超快诊断; 等离子体

中图分类号 O434.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0303003

Ultra-Fast Diagnosis of Nanosecond Laser Induced Fused Silica Damage

Zhou Qiang Wang Junbo Qiu Rong Tian Runni
Yang Yongjia Jiang Yong

(Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract The dynamic processes of Nd:YAG pulse laser ablation fused silica on the rear surface and inside are investigated by ultrafast time-resolved optical diagnosis. The evolution processes of time-resolved optical images of plasmas expansion and shock wave propagations are obtained. The results show that the multi-shock waves are emerged when the focused laser irradiates the rear surface of sample. Moreover, the reflection waves will be yielded when the generated shock wave arrives at the front surface of sample. Plasma channel is gained and the intense micro-explored damage sites will come into being when the laser focuses inside the sample. Meanwhile, it is found that the intensity of reflection and reflection shear waves at interface are determined by the incident angle of shock wave. The propagation velocities are different for different shock waves.

Key words ultrafast optics; shock wave; ultra-fast diagnosis; plasma

OCIS codes 140.3330; 140.3440; 120.5700

1 引 言

激光对透明光学材料的损伤机理是激光技术领域的重要研究对象。当高功率密度激光束(大于 10^8 W/cm²)辐照到材料表面时会使材料表面发生相爆炸形成等离子体,在材料中形成冲击波,即激光诱导冲击波^[1]。强激光产生的这种高温高压等

离子体和冲击波已成为动高压技术研究的重要方向,并已应用于惯性约束聚变和激光冲击处理等多种基础研究和工程应用领域。对于激光驱动冲击波表征方法,目前主要有光干涉法和多普勒测速法^[2],但是缺乏对冲击波平面性和空间完整性的表征。

收稿日期: 2013-09-12; **收到修改稿日期**: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(10976025)

作者简介: 周 强(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: zhouqiang694212428@qq.com

导师简介: 邱 荣(1978—),男,博士,副教授,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: qiurong@swust.edu.cn(通信联系人)

目前较多的研究是在激光与材料表面作用的损伤机制^[3-4]、损伤形貌^[5]等方面。刘红婕等^[6]研究了 355 nm 纳秒激光诱导熔石英前后表面的损伤, 研究表明纳秒紫外激光对熔石英前后表面损伤的物理机理不同; Proneala 等^[7]对纳秒激光烧蚀铝靶材的过程进行了研究, 认为相爆炸在烧蚀过程中起着重要作用; Hu 等^[8]对飞秒激光烧蚀熔石英的超快动力学行为进行了研究, 认为飞秒激光与熔石英作用产生的冲击波为热弹力波和机械波。因此, 研究激光在材料表面的能量沉积以及等离子体和冲击波的传输, 对理解激光损伤材料的过程是非常有意义的。

本文利用 Pump-probe 系统研究纳秒激光作用下熔石英玻璃产生冲击波和等离子体的动态过程, 在时间和空间上表征了离子体和冲击波的演化过程和传播过程, 探究了冲击波在材料体内的传播和界面的反射特点。研究内容对揭示激光诱导光学元件表面损伤的物理机制有重要意义。

2 实验细节

实验光路如图 1 所示。采用掺钛蓝宝石飞秒激光放大系统(单脉冲最大输出能量 35 mJ, 脉宽 50 fs, 重复频率 10 Hz, 中心波长 800 nm)作为探测光光源; Nd: YAG 激光器的基频光及二次谐波(532 nm, 10 Hz)作为抽运光; 使用 PI 公司生产的 ES3200 工业 CCD 作为记录相机; 采用型号为 WaveSurfer 104Xs 的示波器采集脉冲信号; 用 DG645 控制飞秒和纳秒激光器触发信号, 同时控制机械快门和 CCD 快门开启时间。在探测光和抽运光光路中放置机械快门, 快门开启时间为 0.085 s, 保证探测光和激发光同时以单脉冲通过。飞秒激光器输出的激光脉冲经 BBO(β -BaB₂O₄)晶体倍频得到 400 nm 的探测光, CCD 前放置衰减片和 400 nm 窄带通滤光片, 防止基频光和等离子体激发光进入 CCD。透镜焦距 f 为 60 mm, 尺寸为 70 mm×10 mm×2 mm 的高纯熔石英玻璃经抛光后作为实验样品。

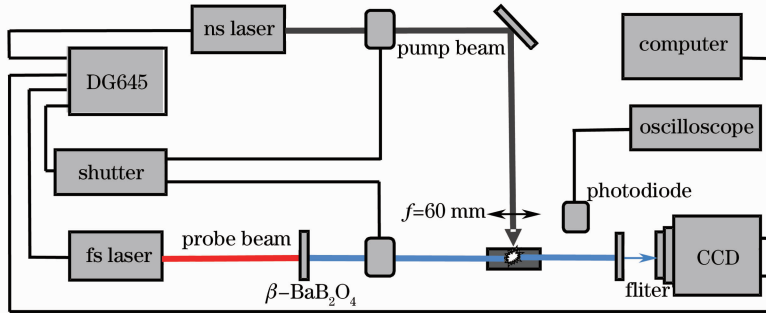


图 1 实验光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

3 结果及讨论

3.1 纳秒激光作用于熔石英后表面

图 2 为波长 532 nm, 脉宽 15 ns, 能量密度 32 J/cm² 的激光作用于熔石英后表面的时间分辨图像, 设激光入射方向为正方向, 材料在短时间内吸收激光能量后, 其温度急剧升高, 在周围产生温度梯度并引起热膨胀, 从而产生热弹力波^[9], 热应力超过熔石英材料的抗压强度($P \approx 3$ GPa)会使材料辐照区发生破裂。图 2(a)中 C 区域为高温等离子体区, 在熔石英内部形成冲击波 1, 体外等离子体不断膨胀, 压缩空气形成冲击波前端 5。图 2(b)为延迟时间 70 ns 时, 在 S 区域出现了物质喷发, 在体内出现了冲击波 2。延迟时间为 176 ns 时, 体内分别出现了冲击波 3 和冲击波 4, 由于冲击波 1 为压缩波, 其前

端挤压材料最强, 以致材料的密度极高, 从而改变材料的折射率。图 2(e)为延迟时间 395 ns 时, 冲击波 1 到达石英玻璃前表面之后会在界面发生反射, 形成反射波 n。当延迟时间为 617 ns 时, 如图 2(f)所示, 冲击波 1 和冲击波 2 被前表面反射, 都分别出现了标识为 m_1, m_2 与 n_1, n_2 的两个反射波。

对于图 2(c)中熔石英内部出现的 4 个冲击波, 冲击波 1 应该是激光加热靶材引起热膨胀造成的热弹力波^[9], 冲击波 2 和冲击波 3 可能分别是冲击波 1(即热弹力波)在玻璃和空气界面(激光出射面)反射之后, 形成的反射波和反射剪切波^[10]。在激光辐照过程中, 被激光加热物质将受到热膨胀产生的压力, 导致分子间距离减小, 从而使分子间斥力急剧增加, 当斥力增加至足以克服压力时, 材料将通过机械膨胀向内部和外部释放, 向外的斥力释放会导致物

质喷射^[8], 因此冲击波 4 被认为是由物质喷发导致的机械波。

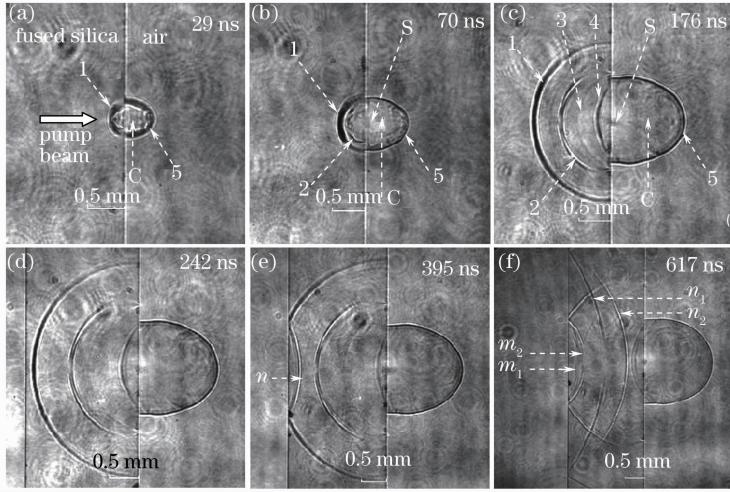


图 2 532 nm 激光诱导融石英后表面的时间分辨图像

Fig. 2 Time-resolved shadowgraphs of 532 nm laser pulse ablation exit surface

根据能量守恒和动量守恒可以求得冲击波(应力波)波阵面上应力大小, 入射波波阵面上的应力和质点运动速度应该保持连续, 因此,

$$\sigma_i + \sigma_j = \sigma_k, \quad (1)$$

$$v_i + v_j = v_k, \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可以求出 σ_j 和 σ_k :

$$\sigma_j = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \sigma_i, \quad (3)$$

$$\sigma_k = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \sigma_i = \left(1 + \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1}\right) \sigma_i, \quad (4)$$

式中 $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ 分别表示入射波应力、反射波应力、透射波应力; v_i, v_j, v_k 分别表示对应的应力波波阵面上质点速度; ρ_1 和 ρ_2 分别表示熔石英和空气密度; C_1 和 C_2 表示应力波在熔石英和空气中的传播速度。当 $\rho_1 C_1 > \rho_2 C_2$ 时, 透射入空气中的应力波是入射波的一部分, 且阻抗 $\rho_1 C_1$ 越大时, 透射波强度越小^[11]。因此, 透射波的强度取决于空气与熔石英的阻抗大小。

为更好地解释实验现象, 图 3 给出了冲击波在空气与熔石英界面传播时的反射和折射过程。图 3 中 ψ_1 为含有膨胀波(纵波)和剪切波(横波)的入射球面波, $\psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5$ 则分别为反射剪切波、反射波、折射波、折射剪切波^[12]。反射角和折射角分别为 $\alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$, 由斯涅耳定理可得

$$\frac{\sin \alpha_1}{c_{p1}} = \frac{\sin \alpha_2}{c_{p1}} = \frac{\sin \alpha_3}{c_{s1}} = \frac{\sin \beta_1}{c_{p2}} = \frac{\sin \beta_2}{c_{s2}}, \quad (5)$$

式中 c_{p1} 和 c_{s1} 分别为熔石英玻璃中纵波和横波的传播速度, c_{p2} 和 c_{s2} 分别为空气中纵波和横波的传播速度。空气的阻抗 Z_1 比熔石英的阻抗 Z_2 要小 5 个数

量级, 因此空气的阻抗可以忽略不计, 冲击波在玻璃和空气界面可以认为是自由端面反射。

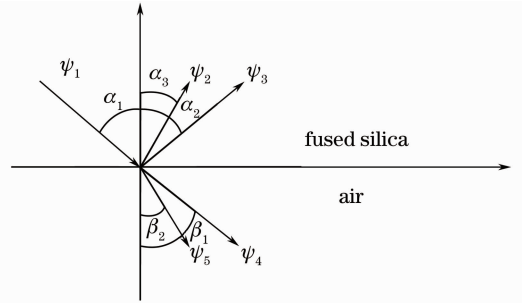


图 3 球面波的反射和折射

Fig. 3 Reflection and refraction of spherical wave

平行激光方向的冲击波部分可以认为是垂直入射到玻璃与空气界面, 有 $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = 0, |\psi_3| = |\psi_4| = 0$, 此时只产生反射纵波 ψ_2 和透射纵波 ψ_5 。由(4)式可以推断出图 2(f) 中沿激光方向, 冲击波 1 透射入空气中的应力部分较小, 还不足以诱导空气产生较强的应力波, 同时观察到反射剪切波 n_1 沿激光传输方向有一段缺失, 这是因为没有反射剪切波部分。因此冲击波 1 沿激光传输方向在前表面的反射只有反射波 n_2 。

当非平行激光方向的冲击波到达界面时, 有 $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \beta_1 \neq \beta_2 \neq 0, |\psi_2| \neq |\psi_3| \neq |\psi_4| \neq |\psi_5| \neq 0$ 。因入射波透射入空气中的应力部分极小, 所以冲击波 1 在前表面只能观察到反射波 n_2 和反射剪切波 n_1 。当 ψ_1 的入射角 α_1 越大时, 冲击波的剪切波强度越大, 反射波强度减小。如图 2(f) 中 n_1, n_2 所示, 反射剪切波 n_1 在远离激光传输方向的强度逐渐增大, 而反射波 n_2 在远离激光方向时逐渐

减小至消失。

从图 2(f) 可以看到冲击波在空气与熔石英玻璃界面的反射强度分布, 反射波和反射剪切波的强度与冲击波的入射角有关, 且它们是互不干扰的独立波传播^[11]。

经过线性拟合计算得到冲击波 1 和冲击波 2 的平均传播速度大小分别为 5.6×10^3 m/s 和 3.8×10^3 m/s, 冲击波 1 接近于应力波在熔石英内的传播速度 (5.7×10^3 m/s)。图 4 为沿激光方向等离子体冲击波前端位移随时间的变化。实验中激光脉宽为 20 ns, 而观察到的最小延迟时间为 29 ns, 因此等离子体正处于绝热膨胀过程。在膨胀过程中温度降低, 体积不断增大^[1]。驱使等离子体冲击波前端的能量可以根据 Sedov 的点爆炸理论^[13] 估计:

$$R = C \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/5} t^{2/5}, \quad (6)$$

式中 R 为等离子半径, C 为常量, E 为驱使等离子体膨胀的能量, ρ 为空气质量密度, t 为延迟时间。等离子体冲击波的扩张半径 R 近似符合上述关系式, 随着

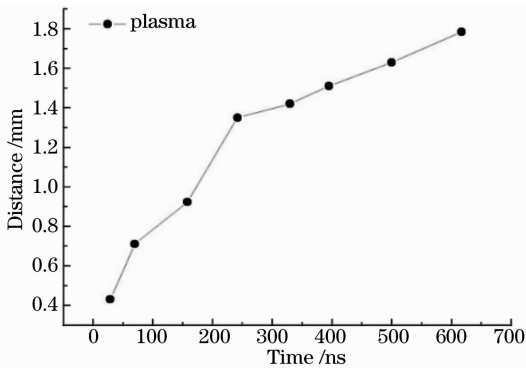


图 4 等离子体冲击波前端位移随时间的变化

Fig. 4 Shock wave front of plasma as a function of time

R 的逐渐增大, 单位空间内驱使等离子体冲击波前端的能量也逐渐减小, 且受到空气力的影响, 可以看出 R 减小得非常快, 且冲击波最终衰减成为声波。

3.2 纳秒激光作用于熔石英体内

图 5 为波长 1064 nm, 脉宽 15 ns, 能量密度 56 J/cm² 的激光作用于熔石英体内产生冲击波和损伤形貌图像。当激光功率密度 ($P \geq 10^9$ W/cm²) 超过熔石英材料的破坏阈值时, 位于焦点附近的杂质或缺陷将成为损伤先驱, 吸收激光能量形成高温 ($T > 10^4$ K)、高压 ($P > \text{GPa}$) 等离子体, 等离子体强烈吸收激光能量后发生爆炸。图 5(a) 为延迟时间为 28 ns 时, 在激光方向形成一个丝状的等离子通道, 如图中形成的黑色丝状 III, 在等离子体通道周围产生与激光方向平行的柱面型热弹力波 C, 同时由于非线性效应将引起自聚焦^[5], 在激光方向产生较强的微爆点 I 和 II, 以及在传输方向产生没有规律的小损伤微爆点。图 5(c) 为延迟时间 110 ns 时, 微爆点周围出现的冲击波为热弹力波 A, 随后产生的为破坏波 B, 热弹力波 A 的速度大于破坏波 B 的速度, 都以球面波形式逐渐膨胀远离损伤区域, 并且热弹力波 A 中覆盖了部分由等离子体产生的非平行于激光方向的热弹力波 C。从图 5(d) ~ (f) 可以看出, 微爆点损伤区域的范围远大于聚焦光斑的大小, 在入射激光方向出现明显向周围发散的裂纹, 且左端的破坏范围远大于右端。

如图 5(a) 中所示, 强损伤点 I 应处于激光聚焦功率最大的焦点上, 第二个强损伤点 II 应是激光的自聚焦效应所致, 其余损伤点应该是材料的缺陷或杂质吸收激光能量导致。由曲线线性拟合可以得到损伤点 I 处热弹力波 A 与 C, 以及破坏波 B 的传

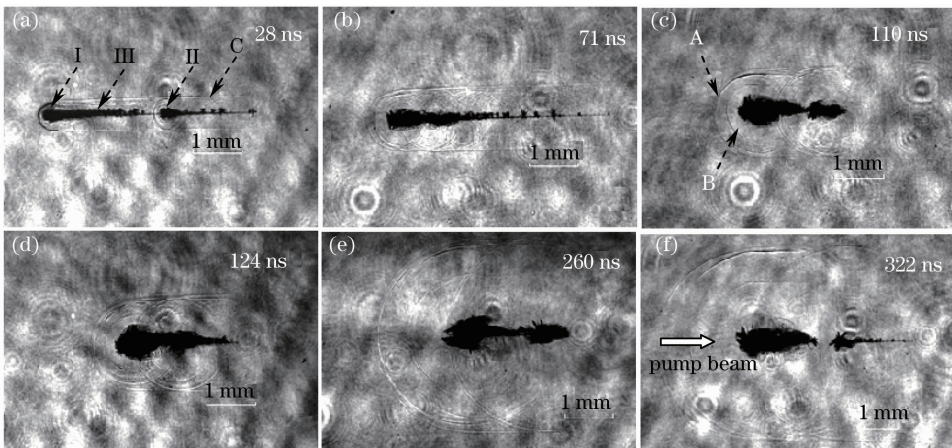


图 5 1064 nm 激光诱导融石英内部的时间分辨图像

Fig. 5 Time-resolved shadowgraphs of 1064 nm laser pulse ablation inside of fused silica

播平均速度分别为 7.0×10^3 m/s、 7.0×10^3 m/s 和 4.6×10^3 m/s,即在损伤点处,热弹力波的传播速度约为破坏波速度的 1.5 倍,且热弹力波 A 与 C 的传播速度大小一样。

4 结 论

实验得到了纳秒激光作用于熔石英材料后表面和体内时的动态过程图像。获得了纳秒激光作用于熔石英过后产生等离子体和冲击波演化过程的超快时间分辨图像,以及冲击波的传播速度。研究结果表明,532 nm 激光作用于熔石英后表面后,会在体内产生多个冲击波,含有热弹力波和机械波;当 1064 nm 激光作用于熔石英玻璃体内后,会在体内形成等离子通道,在激光聚焦点和自聚焦处产生比激光传输方向上其他损伤点更强的微爆点,同时还会在微爆点处产生热弹力波和破坏波。从实验结果观察到冲击波在激光入射面产生的反射波和反射剪切波,这对研究球面波在介质界面的传播和反射有很大的意义。

参 考 文 献

- 1 Zhang Duanming. Dynamics Principle of Pulsed Laser Deposition [D]. Beijing: Science Press, 2011. 65—70.
张端明. 脉冲激光沉积动力学原理[D]. 北京: 科学出版社, 2011. 65—70.
- 2 Jia Tianqing, Chen Hong, Wang Jue, *et al.*. Mechanism of laser-induced damage in fused silica[J]. High Power Laser and Particle Beam, 1998, 10(3): 375—376.
贾天卿, 陈 鸿, 王 珏, 等. 激光照射下石英玻璃的损伤机理研究[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(3): 375—376.
- 3 Wu Lizhi, Shen Ruiqi, Xu Jiao, *et al.*. Research advance in laser-driven flyer technology[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(2): 219—228.
吴立志, 沈瑞琪, 徐 姣, 等. 激光驱动飞片技术的研究进展

- [J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 219—228.
- 4 Nan Zhang, Xiaonong Zhu, Jianjun Yang, *et al.*. Time-resolved shadowgraphs of material ejection in intense femtosecond laser ablation of aluminum [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99 (16): 167602.
- 5 Zeng Xianzhong, Mao Xianglei, Wen Sy-Bor, *et al.*. Energy deposition and shock wave propagation during pulsed laser ablation in fused silica cavities [J]. Appl Phys, 2004, 37(7): 1132—1136.
- 6 Liu Hongjie, Zhou Xinda, Huang Jin, *et al.*. Comparison of damage between front and rear surfaces under nanosecond 355 nm laser irradiation on fused silica [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 065202.
刘红婕, 周信达, 黄 进, 等. 355 nm 纳紫外激光辐照下熔石英前后表面损伤的对比研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 065202.
- 7 C D Porneala, A Willis. Observation of nanosecond laser-induced phase explosion in aluminum [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(21): 211121.
- 8 H Hu, X Wang, H Zhai, *et al.*. High-fluence femtosecond laser ablation of silica glass; effects of laser-induced pressure [J]. J Phys D: Appl Phys, 2011, 44(13): 135202.
- 9 X Wang, X Xu. Thermoelastic wave induced by pulsed laser heating [J]. Appl Phys A, 2001, 73(1): 107—114.
- 10 Liu Lisheng, Zhang Qingjie. Propagation characteristics of impact waves across a planar interface between a ceramic layer and a composite graded layer of ceramic /metal graded materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(8): 1—4.
刘立胜, 张清杰. 冲击波在陶瓷与梯度材料界面上的传播特性 [J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(8): 1—4.
- 11 Gai Jingbo, Wang Shan, Yang Shiquan. Promulgation of impact wave in multilayer structure [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(3): 12—13.
盖京波, 王 善, 杨世全. 冲击波在多层结构中的传播 [J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(3): 12—13.
- 12 J R Furlong, Catherine F Westbury, E A Phillips, *et al.*. A method for predicting the reflection and refraction of spherical waves across a planar interface [J]. J Appl Phys, 1994, 76(1): 25—32.
- 13 M Aden, E W Kreutz, H Schluter, *et al.*. The applicability of the Sedov-Taylor scaling during material removal of metals and oxide layers with pulsed CO₂ and excimer laser radiation [J]. Appl Phys, 1997, 30(6): 980—989.

栏目编辑: 宋梅梅