

毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的温度场应力场数值分析

夏盛强, 蔡继兴*, 张潇允, 辛 潮, 李婧祎, 金光勇

(长春理工大学 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了研究毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的温度场和应力场特征, 基于热传导理论和弹塑性力学理论建立了二维轴对称几何模型, 利用有限元分析软件对毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的过程进行了数值分析, 得到了熔石英表面及内部的瞬态温度场和应力场的时空分布与变化规律。结果表明: 组合脉冲激光中, 毫秒激光脉宽为 1 ms、能量为 120 J, 纳秒激光脉宽为 10 ns、能量为 80 mJ, $\Delta t=1.0$ ms 条件下毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英出现温度最佳延时。观察总能量相同的组合脉冲激光与毫秒脉冲激光致熔石英的热损伤结果, 得到最佳能量配比。研究结果表明, 组合脉冲激光中, 毫秒脉冲激光对熔石英产生热效应, 纳秒脉冲激光对熔石英产生应力效应。

关键词: 组合激光; 数值分析; 激光损伤; 熔石英

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200415

Numerical analysis of temperature field and stress field of fused silica irradiated by millisecond-nanosecond combined pulse laser

Xia Shengqiang, Cai Jixing*, Zhang Xiaoyun, Xin Chao, Li Jingyi, Jin Guangyong

(Jilin Key Laboratory of Solid-State Laser Technology and Application, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to study the characteristics of temperature field and stress field of fused silica irradiated by millisecond-nanosecond combined pulse laser, based on the theory of heat conduction and elastic-plastic mechanics, two dimensional axisymmetric geometric model was established, the numerical simulation software was used to analyze the process that fused silica irradiated by millisecond-nanosecond combined pulse laser. The temporal and spatial distribution and variation of the transient temperature field and stress field on the surface and inside of fused silica were obtained. The result shows, in the combined pulse laser, the millisecond pulse width is 1 ms, the energy is 120 J, the nanosecond laser pulse width is 10 ns, the energy is 80 mJ, $\Delta t=1.0$ ms, the best time delay for the temperature of fused silica irradiated by millisecond-nanosecond combined pulse laser, according to the different energy ratio of millisecond and nanosecond, the thermal effect of millisecond pulse laser on fused quartz and the stress effect of nanosecond pulse laser on fused quartz are obtained.

Key words: combined laser; numerical analysis; laser damage; fused quartz

收稿日期: 2020-10-30; 修订日期: 2021-02-09

基金项目: 国家自然科学基金 (62005023)

作者简介: 夏盛强, 男, 硕士生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 蔡继兴, 男, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

0 引言

熔石英材料已大量应用于高能量固体激光系统,如透镜、光栅、晶体、窗口片等光学元件大多由熔石英材料构成^[1],激光与熔石英相互作用时会发生热应力损伤等一系列剧烈且复杂的过程,最终光学元件遭到破坏以至于不能工作,光学元件的抗激光破坏能力成为激光功率提升的关键。近年来,激光与光学材料相互作用的研究十分活跃。大多数研究都集中在不同脉冲宽度的单脉冲激光器和连续激光器上^[2-5]。例如:冯国英等人研究了纳秒激光脉冲在 K9 玻璃内部产生损伤的形貌特征,整个损伤形貌前端较大,后端逐渐减小,呈纺锤形^[6];刘红婕等人利用纳秒高频激光对熔石英光学元件的初始损伤阈值进行研究,发现损伤面积增长都遵循指数性增长规律,损伤深度成线性增长^[7];罗福等人对 1.06 μm 连续激光照射下 K9 玻璃板中的温升和应力进行了理论分析,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^[8];Wang Bin 利用脉宽为 1 ms 波长为 1064 nm 的 Nd³⁺:YAG 毫秒脉冲激光器分别与增透膜和高反膜相互作用,发现除了薄膜外,K9 玻璃(基底材料)的上下表面也出现了大小为毫米量级的锥形坑^[9]。

随着人们对激光与物质相互作用损伤效果及加工效率的关注,组合激光这一概念被学者们提出,它是指由两种或多种不同特征参数的激光组合成的激光束。目前人们在组合激光与物质相互作用领域已展开损伤特性研究,并取得了有价值的研究成果。例如:潘云香等人研究了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照 K9 玻璃的损伤形貌,同时研究了脉冲延时对改性尺寸和加工效率的影响^[10];张明鑫等人利用有限元分析法,研究了组合激光与连续激光平均功率密度相同的条件下,组合激光与连续激光辐照单晶硅的温度及应力场,结果表明,组合激光比连续激光更容易对单晶硅造成损伤^[11];Xueming Lv 等人对毫秒-纳秒组合脉冲辐照硅展开损伤形貌及数值分析研究,在硅表面发现了明显的烧蚀区与褶皱区^[12];苑博识开展了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照铝合金损伤形貌及等离子体研究,揭示激光加工铝合金的物理机制^[13]。文中建立了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的理论模型,

利用有限元分析方法对毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的温度场和应力场进行研究。分析了不同时间延时条件下毫秒-纳秒组合脉冲激光对熔石英的热应力损伤效果。通过毫秒-纳秒组合脉冲激光与单一毫秒脉冲激光对比,发现毫秒脉冲激光和纳秒脉冲激光的组合方式可以提高熔石英热应力损伤效果,因此开展毫秒-纳秒组合脉冲激光致熔石英损伤的热应力仿真研究具有很重要的意义。

1 基本原理

1.1 几何模型

毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照到熔石英表面,熔石英吸收激光光能,光能转化为热能,在宏观上体现熔石英的温度升高及体积的局部膨胀。假设熔石英是各向同性的连续介质,激光能量的吸收采用体吸收,则激光辐照熔石英的二维轴对称模型如图 1 所示,图中 z 为对称轴, r 为径向方向。入射光束为高斯光束,延 z 轴垂直入射到熔石英上表面,熔石英的厚度 $d=4$ mm,半径 $l=12$ mm^[14-16]。

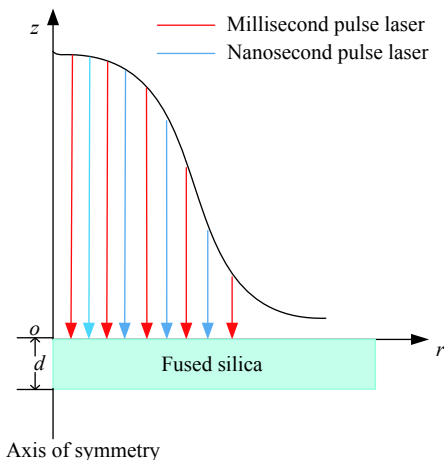


图 1 毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的几何模型

Fig.1 Geometric model of fused silica irradiated by millisecond-nanosecond pulse laser

1.2 理论模型

1.2.1 温度场分析

毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英进行能量交换的过程中,激光能量被熔石英所吸收,激光与熔石英相互作用的主要过程是热传导过程,忽略熔石英与外界的对流和辐射效应,可理解为熔石英的热传递方式为固体传热,流体传热与辐射电磁波传热不列入计

算模型中^[17-20]。结合毫秒脉冲激光与纳秒脉冲激光辐照熔石英的热传导特性,建立了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的热传导模型。

当毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英致其温度超过自身熔点,靶材会发生熔融相变物理现象,不包含熔融相变和包含熔融相变的热传导方程可分别写为:

$$\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial z^2} + \frac{q(r,z,t)}{k} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z,t)}{\partial z^2} + \frac{\rho c L}{k} \frac{\partial f_s}{\partial t} + \frac{q(r,z,t)}{k} \right) \quad (2)$$

式中: $T(r, z, t)$ 表示在时间 t 时的温度分布; ρ 、 c 和 k 分别表示熔石英的密度、比热容和热传导系数; f_s 和 L 分别表示材料的固相率和熔融相变潜热。其中固相率对时间的导数可表示如下:

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

当固相率 $f_s=0$ 时,熔石英的物理状态为液态;当固相率 $f_s=1$ 时,熔石英的物理状态为固态。由公式(3)可知,固相率对时间的导数为 δ 函数,该函数在熔石英的熔点附近会出现奇异性变化,这将导致材料计算求解过程中出现不收敛的情况,因此,将近似 δ 函数的 e 指数代替了公式(3)中固相率对时间的导数,具体表达式如下:

$$\frac{\partial f_s}{\partial T} = \frac{1}{\sqrt{\pi} d T} \exp(-(T - T_m)^2 / d T^2) \quad (4)$$

式中: T_m 表示熔石英材料的熔点。当靶材发生熔融相变时,用等效比热容 c_p 代替 c , 二者关系可表示为:

$$c_p = c - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \quad (5)$$

在毫秒-纳秒组合脉冲激光与熔石英相互作用过程中,熔石英吸收激光能量的热源可表示为:

$$q(r,z,t) = q_{ms} + q_{ns} \quad (6)$$

$$q(r,z,t) = \alpha(1-R)m(z)[I_{ms}f_{ms}(r)g_{ms}(t) + I_{ns}f_{ns}(r)g_{ns}(t)] \quad (7)$$

$$f_{ms}(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{r_{ms}^2}\right) \quad (8)$$

$$f_{ns}(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{r_{ns}^2}\right) \quad (9)$$

式中: $q(r, z, t)$ 为毫秒-纳秒组合激光热源; q_{ms} 为毫秒激光热源; q_{ns} 为纳秒激光热源; α 为熔石英的吸收系数; R 为熔石英的反射率; I_{ms} 和 I_{ns} 分别为毫秒脉冲激光和纳秒脉冲激光的辐照中心能量密度; r_{ms} 和 r_{ns} 分别为毫秒脉冲激光和纳秒脉冲激光的光斑半径; $f_{ms}(r)$ 和 $f_{ns}(r)$ 分别为毫秒脉冲激光和纳秒脉冲激光的空间分布; r, z 分别为轴对称坐标系中的径向和轴向位置。

$$g_{ms}(t) = \begin{cases} 1, \Delta t_{ms} \leq t \leq \Delta t_{ms} + \tau_{ms} \\ 0, t < \Delta t_{ms} \text{ 或 } t > \Delta t_{ms} + \tau_{ms} \end{cases} \quad (10)$$

$$g_{ns}(t) = \begin{cases} 1, \Delta t_{ns} \leq t \leq \Delta t_{ns} + \tau_{ns} \\ 0, t < \Delta t_{ns} \text{ 或 } t > \Delta t_{ns} + \tau_{ns} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $g_{ms}(t)$ 和 $g_{ns}(t)$ 分别为毫秒脉冲激光和纳秒脉冲激光的时间分布; Δt_{ms} 为毫秒脉冲激光相对于初始时间的延时; Δt_{ns} 为纳秒脉冲激光相对于初始时间的延时; τ_{ms} 为毫秒脉冲宽度; τ_{ns} 为纳秒脉冲宽度。

上下表面边界条件为:

$$-k \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (12)$$

$$-k \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} \Big|_{z=d} = 0 \quad (13)$$

侧面边界条件为:

$$k \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} \Big|_{r=l} = 0 \quad (14)$$

初始条件为:

$$T(r,z,t)|_{t=0} = 300 \text{ K} \quad (15)$$

1.2.2 应力场分析

熔石英热应力的产生与温度变化有关,熔石英温度发生改变,其体内任何一个单元的收缩和膨胀都会受到相邻单元的作用,致使其形变无法自由发生,这种束缚作用称为热应力。熔石英应力损伤模型需要联立热弹性平衡微分方程、几何方程及虎克定律,在轴对称坐标系下,与热传导方程相耦合的平衡微分方程可以表示为^[21-22]:

$$\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{u_z}{\partial z} \quad (18)$$

式中： u_r 、 u_z 分别表示位移在 r 、 z 方向上的分量； ε 、 μ 、 β 分别表示材料的体应变、泊松比和热应力系数^[23]。文中针对上述弹塑性力学方程，采用初始时刻位移为 0、速度为 0 的初始条件和除底面边界沿 z 方向位移为 0 外其余边界都为自由边界的边界条件。

通过径向位移 u 和轴向位移 w 可以确定物体的应变状态，几何方程可表示为：

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{zr}]^T = \left[\frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial r}, \frac{u}{r}, \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right]^T \quad (19)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\left(u + \frac{\partial u}{\partial r} dr - u \right)}{dr} = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (20)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (21)$$

式中： ε_r 和 ε_z 分别表示材料的径向应变与轴向应变。

依据广义虎克定律可得：

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - u(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - u(\sigma_\theta + \sigma_r)] \end{cases} \quad (22)$$

由应变分量可得应力分量的函数可表示为：

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{(1+u)(1-2u)} [(1-u)\varepsilon_r + u(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z)] \\ \sigma_\theta = \frac{E}{(1+u)(1-2u)} [(1-u)\varepsilon_\theta + u(\varepsilon_r + \varepsilon_z)] \\ \sigma_z = \frac{E}{(1+u)(1-2u)} [(1-u)\varepsilon_z + u(\varepsilon_\theta + \varepsilon_r)] \end{cases} \quad (23)$$

式中： E 表示弹性模量； u 表示泊松比。

1.3 模型参数设置

基于对毫秒-纳秒组合脉冲激光作用熔石英的理论，采用 COMSOL Mutiphysics 有限元软件对物理过程进行仿真研究，在仿真模型中，熔石英的材料仿真参数如表 1 所示，激光参数如表 2 所示。

表 1 熔石英仿真热力学参数

Tab.1 Simulation thermodynamic parameters of fused quartz

Parameter	Value
Young modulus/GPa	72.60
Poisson ratio	0.17
density/g·cm ⁻³	2.21
Thermal expansion coefficient/K ⁻¹	5.4×10 ⁻⁷
Thermal conductivity/W·(m·K) ⁻¹	1.38
Heat capacity/J·(kg·K) ⁻¹	703
Absorption coefficient/m ⁻¹	1.9×10 ⁻²

表 2 毫秒-纳秒组合脉冲激光仿真参数

Tab.2 Simulation parameters of millisecond-nano-second pulse laser

Parameter	Value
Millisecond pulse energy/J	100-150
Millisecond pulse width/ms	1
Millisecond pulse spot radius/mm	1
Nanosecond pulse energy/mJ	80-220
Nanosecond pulse width/ns	10
Nanosecond pulse spot radius/mm	1
Δt /ms	0.25-1.25

2 计算结果与讨论

在组合激光中， Δt 定义为：纳秒激光信号相对于毫秒激光信号的滞后时间。毫秒脉冲激光能量为 120 J，纳秒脉冲激光能量为 80 mJ， $\Delta t=1.0$ ms，在组合脉冲辐照结束时刻，熔石英的温度分布如图 2 所示。可见在熔石英轴心处存在最高温度 2203.6 K，在光斑半径附近的等温线比较密集，在靶材中以中心轴为中心向外衰减温度。根据熔石英熔点特征可知，热熔融损伤半径为 4.67 mm，体积为 184.18 mm³，熔融损伤区域贯穿熔石英上下表面。

以下开展了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英不同延时条件下，熔石英上表面中心点温度随时间变化研究。在组合激光中，毫秒脉冲激光能量为 120 J，纳秒脉冲激光能量为 80 mJ。如图 3(a) 所示，温升曲线在纳秒脉冲辐照阶段出现温升尖峰，在温度衰减到熔融温度 1730 K 前发现有温度突变的拐点，且随着

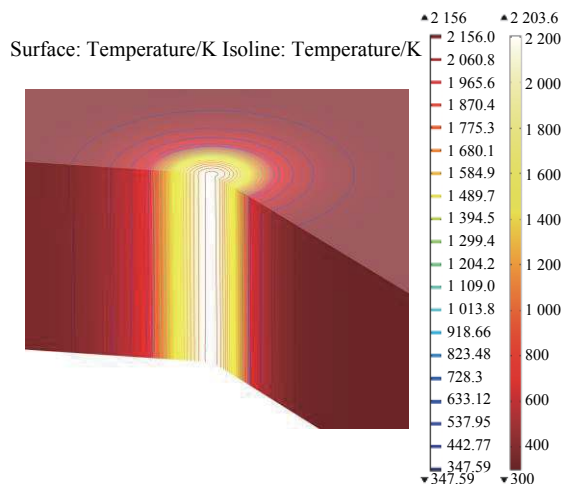
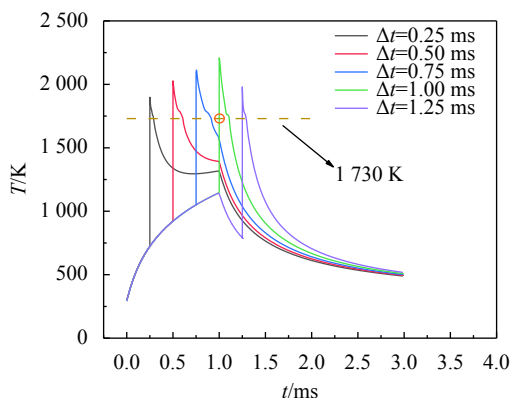
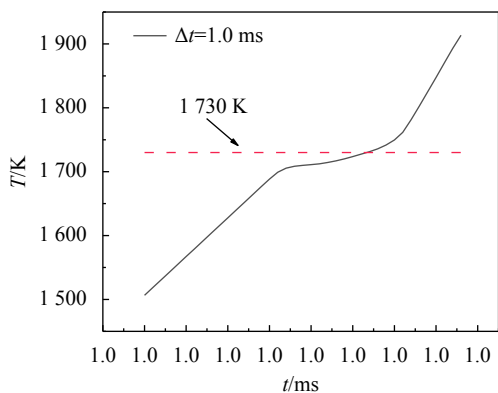


图 2 毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英温度云图

Fig.2 Temperature nephogram of fused quartz irradiated by millisecond-nanosecond pulse laser



(a) 不同延时条件下, 材料表面中心点温度随时间变化关系
(a) Under different delay time conditions, the temperature of the center point of the material surface changes with time



(b) $\Delta t=1$ ms 条件下, 升温局部放大图
(b) Under the condition of $\Delta t=1$ ms, local enlarged view of temperature rise

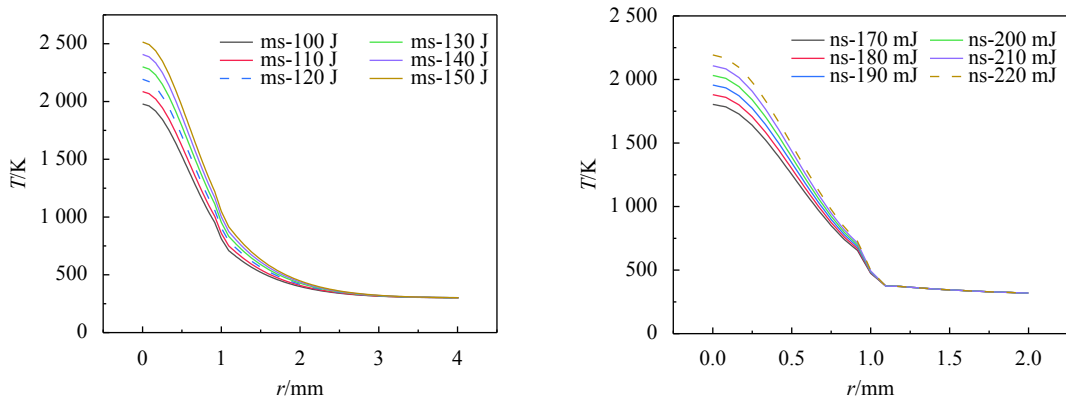
图 3 材料上表面中心点温度随时间变化图

Fig.3 Center on material surface temperature changes with time

延时的增大, 温度突变拐点演化成平台期, 称为凝固

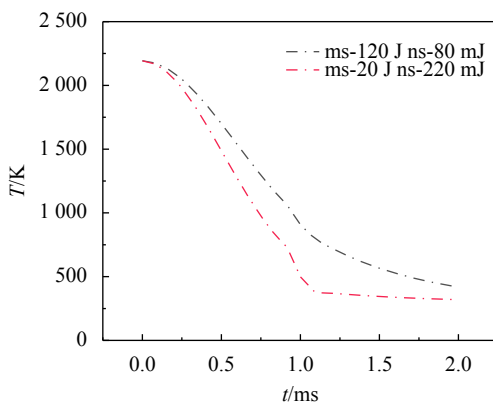
平台期。当 $\Delta t=1.0$ ms, 温升到达 1730 K 前的温度演化过程如图 3(b) 所示, 同样发现有温度突变的平台期, 称为熔融平台期。两种平台期的出现都是因为熔石英存在相变潜热, 即熔石英上表面中心点温度达到相变潜热期热焓值, 熔石英吸收率下降, 使得熔石英吸收的激光能量锐减, 导致温升出现平台期。随着延时的增大, 熔石英吸收能量增多, 温度更高, 所需凝固的时间也更长, 凝固平台期越明显。材料的吸收率与温度正相关, 在 $\Delta t=1.0$ ms 的组合脉冲中吸收了较多的毫秒脉冲能量, 靶材初始温度越高, 对应的吸收率越高。在这个延时过程中, 毫秒脉冲激光的预辐照使熔石英的初始温度升高, 随后纳秒脉冲激光的介入会在熔石英吸收率升高的条件下对熔石英造成更明显的热损伤, 这是 $\Delta t=1.0$ ms 条件下温度最大值为最高的原因。

图 4 所示为 $\Delta t=1.0$ ms 条件下, 在组合脉冲激光辐照结束时刻, 熔石英上表面径向温度随着毫秒-纳秒组合脉冲激光不同激光能量的变化关系。由图 4(a) 可知, 上表面中心点存在最高温度, 随着毫秒激光能量的增加, 径向温度也随之增加, 径向温度的分布类似于高斯分布, 随着径向距离的增加温度逐渐降低, 根据熔石英的熔点 1730 K, 六条曲线的熔融半径分别为 3.50、4.17、4.67、5.34、5.67、6.17 mm, 随着毫秒激光能量的增加, 熔石英上表面径向熔融半径也随之增加。如图 4(b) 可知, 随着纳秒激光能量的增加, 径向温度也随之增加, 根据熔石英的熔点, 六条曲线的熔融半径分别为 1.69、2.16、2.67、3.17、3.50、3.83 mm, 随着纳秒激光能量的增加, 熔石英上表面径向熔融半径也随之增加。如图 4(c) 所示, 熔石英上表面中心点温度均为 2193 K, 两条曲线分别为毫秒脉冲主导的毫秒-纳秒组合脉冲激光和纳秒脉冲主导的毫秒-纳秒组合脉冲激光, 分别对应的熔融半径为 4.67、3.83 mm, 温度衰减半径为 2.95、2.00 mm。可知毫秒脉冲主导的毫秒-纳秒组合脉冲激光对熔石英的熔融损伤与径向温度传递效果较为明显, 可知毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英 $\Delta t=1.0$ ms 条件下, 组合脉冲辐照结束时刻, 毫秒脉冲激光、纳秒脉冲激光不同能量占比会影响熔石英的熔融半径与温度衰减半径, 最终通过数据研究得出在毫秒-纳秒组合脉冲激光中, 毫秒脉冲激光对熔石英的热损伤有着很重要的作用。



(a) 纳秒激光能量为80 mJ条件下, 材料表面径向温度随毫秒激光能量变化趋势
 (b) Under the condition of nanosecond laser energy of 80 mJ, the radial temperature of the material surface changes with millisecond laser energy

(b) 毫秒激光能量为20 J条件下, 材料表面径向温度随纳秒激光能量变化趋势
 (a) Under the condition of 20 J millisecond laser energy, the radial temperature of the material surface changes with nanosecond laser energy



(c) 毫秒激光主导、纳秒激光主导的组合脉冲激光辐照材料的径向温度趋势
 (c) Radial temperature trends of materials irradiated by combined pulse laser dominated by millisecond laser and nanosecond laser

图 4 不同激光能量条件下, 材料表面径向温度变化

Fig.4 Under different laser energy conditions, the radial temperature change of the material surface

为了研究不同激光能量的组合脉冲激光对熔石英热作用效果的影响, 将总能量相等的组合脉冲激光与毫秒脉冲激光的热作用效果进行比较。图 5 所示为组合脉冲激光和毫秒脉冲激光致熔石英损伤的熔融半径与总能量的关系, 在组合脉冲激光中, 固定 $\Delta t=1.0$ ms, 毫秒脉冲激光能量为 150 J, 纳秒脉冲激光能量变化范围为 1~10 J; 在毫秒脉冲激光中, 毫秒脉冲激光能量变化范围为 151~160 J。可知随着激光总能量的增大, 组合脉冲激光致熔石英损伤的熔融半径随之增大, 总能量相同的条件下, 组合脉冲激光对熔石英的热影响高于毫秒激光。图 6 所示为改变纳秒激光能量, 组合脉冲激光与相同能量的毫秒脉冲激光致熔石英损伤的熔融半径比值, 可知熔融半径比值先

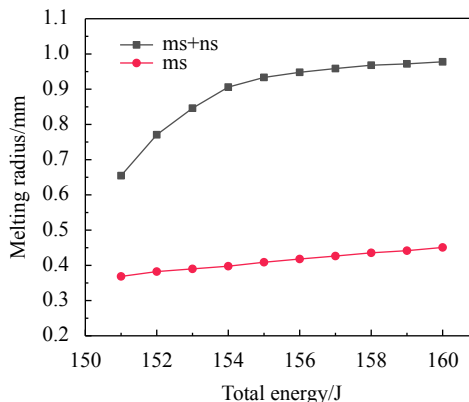


图 5 熔石英熔融半径与总能量的关系

Fig.5 Relationship between melting radius and total energy of fused silica

增大后减小,且始终大于 1。在组合脉冲激光中,毫秒激光能量与纳秒激光能量的比值为 30 : 1 时,存在最大比值 2.283。由此可知,适当增加纳秒激光能量可以明显地增强组合脉冲激光的热作用效果,且在熔融损伤半径方面,毫秒激光能量与纳秒激光能量存在最佳配比。

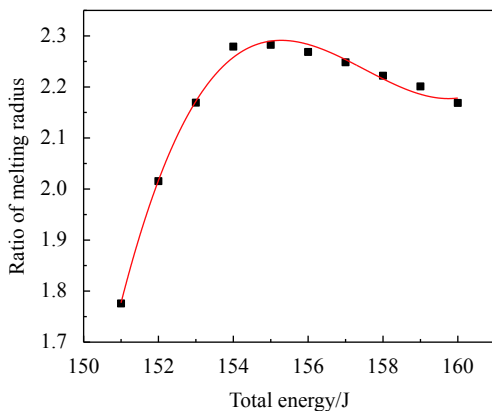


图 6 组合脉冲激光与毫秒脉冲激光致熔石英损伤的熔融半径比值变化关系

Fig.6 Relationship between the ratio of melting radius irradiated by combined pulse laser and millisecond pulse laser

如图 7 所示,单独毫秒脉冲激光能量为 100 J, $\Delta t=1.0$ ms 条件下组合脉冲激光的能量总和为 100 J, 三条曲线的监测时间均为激光辐照结束时刻。观察单独毫秒脉冲辐照熔石英的径向应力曲线可知材料中心点表现为拉应力,随着径向距离增加,拉应力逐渐转换为压应力,且在光斑边缘附近压应力达到最大值 13.0 MPa,随着监测点向靶材边缘靠近,径向应力趋近于 0。观察组合脉冲辐照熔石英的径向温度曲线可知材料中心点表现为压应力 (34.2~71.0 MPa),随着径向距离增加压应力逐渐降低,这将导致材料锥状损伤形貌的出现。且在辐照边界区出现 (1.10 mm < r < 1.41 mm) 压应力回升现象,该区域出现 1.0 MPa 应力差值,将导致上表面出现应力损伤裂纹,单独毫秒激光与组合脉冲对辐照边界区造成径向应力损伤的作用原理不同,前者是由于作用相对较长毫秒脉冲激光导致材料产生温度梯度,从而造成的应力变化。后者由于毫秒脉冲激光辐照后纳秒脉冲激光作用在辐照区导致辐照区损伤阈值降低^[24],但辐照边界区材料损伤阈值不变,这将导致径向应力在径向两个区域表现不同的应力效果,应力变化趋势发生改变,产生明显

的应力梯度,从而形成了应力损伤裂纹。对比三条曲线可知,在相同能量注入的条件下,组合脉冲可明显提升激光作用熔石英的径向应力损伤效果。

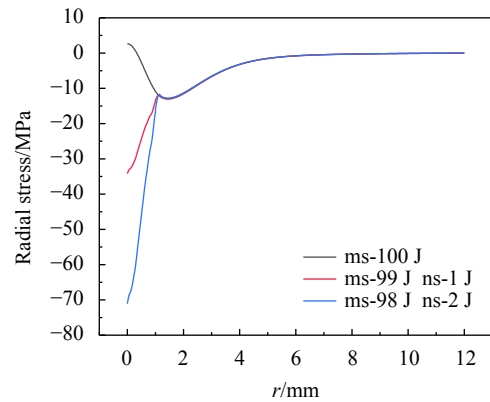


图 7 毫秒激光与组合脉冲激光径向应力趋势

Fig.7 Radial stress trend of millisecond laser and combined pulse laser

如图 8 所示,单独毫秒脉冲激光能量为 100 J, $\Delta t=1.0$ ms 条件下组合脉冲激光的能量总和为 100 J, 其中三条曲线监测时间均为激光辐照结束时刻。观察单独毫秒脉冲辐照熔石英的轴向应力曲线可知轴向应力整体表现为压应力,材料表面应力值趋近于 0,轴向应力趋势呈高斯分布,在轴线中点存在最大的应力值 27.5 MPa。观察组合脉冲激光辐照熔石英产生的轴向应力图像可知,轴向应力整体表现为压应力,在轴向应力曲线中,熔石英内部邻近上下表面处 ($z=0.09, 3.91$ mm) 出现应力回弹,在不同纳秒脉冲能量条件下,这两个位置表现出最大的压应力 (52.8~105.0 MPa),其轴线中点同样存在最大的应力值 (73.0~118.3 MPa)。对比单独毫秒脉冲激光与组合脉冲激光对熔石英径向应力的影响,可以发现在相同能量输入的条件下,组合脉冲激光不仅在轴线中点对轴向应力进行了应力增幅,同时在熔石英前后表面附近表现出新的轴向应力损伤区域。组合脉冲激光对应的轴向应力在轴向出现应力差异性结果会导致熔石英上下表面附近出现锥状损伤,损伤区域由熔石英上下表面延伸至内部,当能量密度达到一定值时,上下表面损伤区域将连接在一起从而形成损伤通道,造成该损伤结果是由于毫秒脉冲激光辐照时间长,能量累计延伸至材料轴心处,纳秒脉冲激光辐照时间段较短,但其功率密度极高,导致热应力发生在材料表面。在毫秒-纳秒组合脉冲激光中,纳秒脉冲激光对

熔石英的轴应力有重要影响。总之,纳秒脉冲激光在毫秒-纳秒组合脉冲激光中的力学效应表现优异。

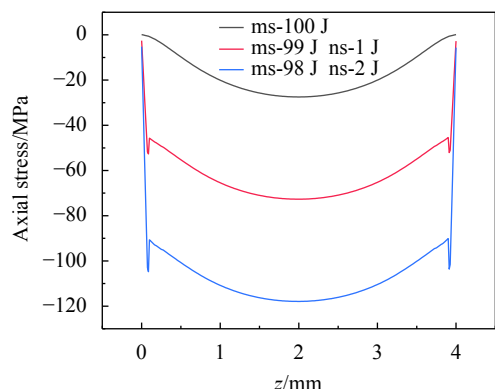


图 8 毫秒激光与组合脉冲激光轴向应力趋势

Fig.8 Axial stress trend of millisecond laser and combined pulse laser

3 结论

文中研究了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英过程中,熔石英表面及内部的瞬态温度场与应力场的时间和空间的变化规律。研究表明:(1) $\Delta t=1.0$ ms 为毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英对其造成热损伤的最佳延时,毫秒脉冲激光预辐照会提高熔石英吸收率,随后纳秒脉冲激光的输入会对熔石英造成优异的热损伤,且发现熔石英的熔融潜热是影响组合脉冲辐照熔石英温度变化的影响因素。(2) 通过改变毫秒-纳秒组合脉冲激光中毫秒脉冲激光能量和纳秒脉冲激光能量的配比,利用等温对比法发现毫秒脉冲主导的组合脉冲激光对熔石英的熔融半径影响较为严重。即在毫秒-纳秒组合脉冲激光中,毫秒脉冲激光对熔石英的热损伤与热传递有着很重要的作用。同时通过对比总能量相同的组合脉冲激光与毫秒脉冲激光致熔石英损伤的熔融半径,发现毫秒脉冲激光与纳秒脉冲激光存在最佳能量配比。(3) 在相同能量输入条件下,对比毫秒脉冲激光与组合脉冲激光辐照熔石英的应力空间变化,发现组合脉冲激光会明显提高熔石英径向应力辐照区域损伤效果,毫秒脉冲辐照后纳秒脉冲的输入会降低熔石英损伤阈值,导致材料辐照边界区出现径向应力回升现象。同时,组合脉冲激光会明显提高熔石英轴向应力损伤效果,不仅增加了轴向中心位置的应力强度,材料上下表面的应力值也影响了熔石英前后表面的损伤效果。可知组合脉冲

激光可以提高熔石英热应力损伤效率,论文研究结果阐述了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的热应力损伤机理,为毫秒-纳秒组合脉冲激光致熔石英的热应力损伤研究奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] Kasaai M R, Kacham V, Theberge F, et al. The interaction of femtosecond and nanosecond laser pulses with the surface of glass [J]. *J Non-Cryst Solids*, 2003, 319(1-2): 129-135.
- [2] Gong Hui, Wang Mingli, Cheng Lei, et al. CW CO₂ laser strengthening of fused silica surfaces [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(3): 255-258. (in Chinese)
- [3] Huang Feng, Niu Yanxiong, Wang Yuefeng, et al. Calculation of thermal and mechanical effect induced by laser in optical window materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): 576-580. (in Chinese)
- [4] Hamam K A, Gamal E D. Numerical analysis of breakdown dynamics dependence on pulse width in laser-induced damage in fused silica: Role of optical system [J]. *Results in Physics*, 2018(9): 725-733.
- [5] Wu Zhuji, Pan Yunxiang, Zhao Jingyuan, et al. Research on laser-induced damage of K9 glass irradiated by millisecond laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0805005. (in Chinese)
- [6] Feng Guoying, Zhang Qiuwei, Zhou Shouhuan, et al. Study on the morphology of laser induced damage in K9 glass by focused nanosecond pulse [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(9): 5558-5564.
- [7] Liu Hongjie, Wang Fengrui, Luo Qing, et al. Experimental comparison of damage performance induced by nanosecond 1 laser between K9 and fused silica optics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(97): 076103. (in Chinese)
- [8] Luo Fu, Sun Chengwei, Du Xiangwan. Stress relaxation damage in K9 glass plate irradiated by 1.06 m m CW laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(1): 19-23. (in Chinese)
- [9] Wang Bin, Qin Yuan, Ni Xiaowu, et al. Effect of defects on long-pulse laser-induced damage of two kinds of optical thin films [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(29): 5537-5544.
- [10] Pan Yunxiang, Lv Xueming, Zhang Hongchao, et al. Millisecond laser machining of transparent materials assisted by a nanosecond laser with different delays [J]. *Opt Lett*, 2016, 41: 2807-2810.
- [11] Zhang Mingxin, Nie Jinsong, Sun Ke, et al. Numerical analysis

- on thermal function of single crystal silicon irradiated by combined laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1106011. (in Chinese)
- [12] Lv Xueming, Pan Yunxiang, Jia Zhichao, et al. Surface damage induced by a combined millisecond and nanosecond laser [J]. *Appl Opt*, 2017, 56: 5060-5067.
- [13] Yuan Boshi, Wang Di, Dong Yuan, et al. Experimental study of the morphological evolution of the millisecond-nanosecond combined-pulse laser ablation of aluminum alloy [J]. *Appl Opt*, 2018, 57: 5743-5748.
- [14] Norton M A, Carr A V, Carr C W, et al. Laser damage growth in fused silica with simultaneous 351 nm and 1053 nm irradiation [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2008, 7132: 71321H.
- [15] Negres R A, Norton M A, Cross D A, et al. Growth behavior of laser-induced damage on fused silica optics under UV, ns laser irradiation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19966-19976.
- [16] Karimelahi S, Abolghasemi L, Herman P R. Rapid micromachining of high aspect ratio holes in fused silica glass by high repetition rate picosecond laser [J]. *Appl Phys A*, 2014, 114(1): 91-111.
- [17] Pan Y, Wang B, Shen Z, et al. Effect of inclusion matrix model on temperature and thermal stress fields of K9-glass damaged by long-pulse laser [J]. *Opt Eng*, 2013, 52(4): 044302.
- [18] Dai G, Chen Y B, Shen Z H, et al. Analysis of laser induced thermal mechanical relationship of HfO₂/SiO₂ high reflective optical thin film at 1064 nm [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(7): 601-604.
- [19] Wang B, Zhang H, Qin Y, et al. Temperature field analysis of single layer TiO₂ film components induced by long-pulse and short-pulse lasers [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(20): 3435-3441.
- [20] Wilks S C, Kruer W L. Absorption of ultrashort, ultra-Intense laser light by solids and overdense plasmas [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(11): 1954-1968.
- [21] Hughes T P, Bayfield J E. Plasmas and laser light[J]. *Physics Today*, 1977, 30(4): 54-56.
- [22] Hidai H, Matsusaka S, Chiba A, et al. Heat accumulation in microdrilled glass from ultraviolet laser ablation [J]. *Appl Phys A*, 2015, 120: 357-367.
- [23] Pan Yunxiang, Zhang Hongchao, Chen Jun, et al. Millisecond laser machining of transparent materials assisted by nanosecond laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 000765.
- [24] Kask N E, Radchenko V, Fedorov G M, et al. Temperature dependence of the ability of optical glass to withstand 10-msec laser pulses [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1977, 7(2): 264.