

文章编号: 1001-3806(2018)01-0121-06

## 拉盖尔-高斯光束作用下熔石英温度及应力研究

赵麒<sup>1</sup>, 白忠臣<sup>2</sup>, 周骅<sup>1</sup>, 陆安江<sup>1,2</sup>, 张正平<sup>1</sup>, 刘桥<sup>1\*</sup>

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 为了研究拉盖尔-高斯光束与熔石英相互作用, 采用仿真计算的方法对  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$  和  $TEM_{10}$  3 种模式拉盖尔-高斯光束辐照下的熔石英的温度和热应力进行研究, 取得了仿真数据。结果表明, 激光光强的空间分布影响材料的温度分布和应力分布; 温度的积累效应明显, 经过连续激光脉冲作用后材料温度持续升高, 焦点区域超过  $1900^{\circ}\text{C}$ ; 温度梯度导致热应力产生, 局部热应力接近  $50\text{MPa}$ 。该仿真结果为熔石英的加工提供了有益的参考。

**关键词:** 激光技术; 温度; 仿真; 熔石英; 拉盖尔-高斯光束; 热应力

**中图分类号:** TN249

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.024

## Research of temperature and thermal stress of fused silica irradiated by Laguerre-Gaussian beam

ZHAO Qi<sup>1</sup>, BAI Zhongchen<sup>2</sup>, ZHOU Hua<sup>1</sup>, LU Anjiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhengping<sup>1</sup>, LIU Qiao<sup>1</sup>

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Application, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to study the interaction of Laguerre-Gaussian beam and fused quartz, the method of simulation calculation was adopted to study the temperature and thermal stress of the fused quartz irradiated by 3 modes of Laguerre-Gaussian beam ( $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$ ,  $TEM_{10}$ ). The simulation data were obtained. The results show that spatial distribution of laser intensity affects temperature distribution and stress distribution of the materials. The accumulation effect of temperature is obvious. After continuous laser pulse action, the material temperature continues to rise. The focus area is over  $1900^{\circ}\text{C}$ . The temperature gradient leads to thermal stress. The local thermal stress is close to  $50\text{MPa}$ . The simulation results provide the useful reference for the processing of fused silica.

**Key words:** laser technique; temperature; simulation; fused silica; Laguerre-Gaussian beam; thermal stress

### 引言

熔石英由于其硬度高、膨胀系数低、耐高温、化学稳定性好、透紫外光和红外光, 以及有良好的热学、光学和机械性能, 被广泛用于激光装置和光学仪器中。熔石英在激光的辐照下出现温度升高、熔融、汽化等现象, 使得材料发生损伤和破坏。这一过程中材料内部的温度、应力、形变等不便测量, 采用建模仿真可以对其进行有效的研究。

激光辐照固体材料温度和应力分布的理论计算和仿真, 国内外已有不少研究结果。参考文献[1]中对比了  $\text{CO}_2$  激光辐照熔石英和 BK7 玻璃的温度场。LI 研究了高重复频率脉冲对温度累积效应的影响<sup>[2]</sup>。LI

等人对单个脉冲作用下熔融石英的温度和热应力进行了数值计算<sup>[3]</sup>。YU 等人对激光辐照熔石英的过程进行动态模拟, 分析了温度场、应力场的变化及残余应力分布<sup>[4]</sup>。LI 等人对激光辐照 CCD 探测器热效应进行了有限元仿真<sup>[5]</sup>。CAI 等人对增透石英的热应力进行了数值模拟<sup>[6]</sup>。JIAO 等人研究了  $\text{CO}_2$  激光作用下运动石英玻璃的温度分布<sup>[7]</sup>。JIANG 等人利用数值方法对波段外脉冲激光对锗材料热冲击效应进行了研究<sup>[8]</sup>。SU 等人对激光作用下的窗口材料热应力进行了分析<sup>[9]</sup>。

基于 COMSOL 平台, 本文中考虑了熔石英在不同温度下热参量和力学参量的变化因素, 分别对  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$ ,  $TEM_{10}$  这 3 种模式拉盖尔-高斯光束辐照下的熔石英进行仿真。考虑到激光能量在熔石英中的热积累效应, 仿真采用两个连续的激光脉冲对熔石英进行辐照, 得到温度和应力分布。仿真结果对于激光加工熔石英过程中的温度控制、应力控制、激光模式的选择提供了有益的参考。

基金项目: 国际合作研究资助项目(2014DFA00670)

作者简介: 赵麒(1976-), 男, 博士研究生, 主要从事激光微加工技术方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liuqiao1955@163.com

收稿日期: 2017-03-08; 收到修改稿日期: 2017-05-08

## 1 基本原理

### 1.1 激光加热温度场方程

激光脉冲照射熔石英时,考虑到激光脉冲作用时间短,忽略石英辐射与周围空气的传导与对流因素,建立傅里叶热传导方程为<sup>[10]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\kappa \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中,  $\nabla \cdot (-\kappa \nabla T)$  为热传导项,  $Q$  为热源,  $t$  为时间,  $\rho$  为密度,  $c$  为比热容,  $\kappa$  为导热系数,  $T$  为温度。

考虑激光加热迅速,忽略对流和辐射项在绝热条件下,边界条件为:

$$-n \cdot (-\kappa \nabla T) = 0 \quad (2)$$

式中,  $n$  为单位矢量。

### 1.2 热应力和应变分析

热应力和应变求解涉及多个变量和方程。应变  $\epsilon$

可以由形变的梯度  $\nabla u$  表示:

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \quad (3)$$

由广义胡克定律可以得到应力  $s$ 、应变  $\epsilon$  和温度  $T$  之间的关系<sup>[11]</sup>:

$$s = s_0 + C : (\epsilon - \epsilon_0 - \epsilon_{th}) \quad (4)$$

式中,  $s_0$  和  $\epsilon_0$  为初始应力与初始应变, 热应变变量  $\epsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$ ,  $\alpha$  为材料的膨胀系数, “:” 为张量的双点积(双点乘),  $C$  为 4 阶弹性张量, 可表示为  $6 \times 6$  的矩阵形式。

## 2 仿真计算

### 2.1 石英材料选择与环境条件

由于熔石英是非晶体,其物理特性各向同性。随着熔石英温度变化,其物理参量会发生变化。表 1 中为熔石英各个温度下的参量值<sup>[4]</sup>。

Table 1 Physical parameters of fused silica

temperature/°C	20	250	500	750	1000	1500	1700	2000	2500
thermal conductivity/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	1.30	1.56	1.84	2.13	2.40	2.26	2.28	—	2.38
specific heat capacity/(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	740	987	1121	1178	1121	1246	1273	—	1273
density/(kg · m <sup>-3</sup> )	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
expansion coefficient/10 <sup>-7</sup> K <sup>-1</sup>	2.76	7.95	5.75	4.68	4.17	5.10	6.00	11.45	11.45
Young modulus/GPa	71.44	70.76	70.30	70.43	71.05	73.79	75.45	85.28	—
Poisson ratio	0.158	0.153	0.150	0.148	0.150	0.160	0.166	0.210	—

采用分段线性函数对以上物理参量进行拟合, 20°C 以下的参量以 20°C 的参量代替, 2500°C 以上的参量以 2500°C 的参量代替, 便于仿真计算。

假设不随温度变化的石英材料参量有: 吸收系数  $\beta = 10\text{cm}^{-1}$ , 密度  $\rho = 2.2\text{g/cm}^3$ , 反射系数  $R = 0.035$ 。

### 2.2 激光加热热源分布函数

考虑到纳秒激光为长脉宽激光, 激光在通过一定厚度的熔石英介质后, 由于介质吸收了一部分光能量后, 透射光的强度就要减弱; 熔石英对激光的吸收遵从朗伯比定律(Beer-Lambert law)。以熔石英所吸收的能量作为激光加热热源, 表示为<sup>[12]</sup>:

$$Q(x, y, z, t) = (1 - R)\beta P(t)I(x, y, z)\exp(-\beta z) \quad (5)$$

式中,  $\beta$  为材料吸收系数,  $R$  为材料反射系数,  $P(t)$  为激光功率时间分布,  $I(x, y, z)$  为激光强度空间分布。

高斯激光脉冲的功率形式为:

$$P(t) = P_{\max} \exp\left[(-4\ln 2)\left(\frac{t}{t_p}\right)^2\right] = \left(\frac{E_p}{1.064t_p}\right) \exp\left[(-4\ln 2)\left(\frac{t}{t_p}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中,  $P_{\max}$  为脉冲峰值功率,  $E_p$  为单个脉冲能量,  $t_p$  为脉冲宽度半峰全宽(full wave at half maximum, FWHM)。

柱面坐标系下广义拉盖尔-高斯光束光强分布<sup>[13]</sup>为:

$$I(r, \varphi, z) = \frac{2}{\pi w^2(z)} \left[\sqrt{2} \frac{r}{w(z)}\right]^{2l} \cdot L_p^l \left[\frac{2r^2}{w^2(z)}\right]^2 \cdot \exp\left[\frac{-2r^2}{w^2(z)}\right] \cdot \begin{cases} \cos^2(l\varphi) \\ \sin^2(l\varphi) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $w(z)$  为光束半径,  $w(z) = w_0 \left(1 + \frac{z^2}{z_R^2}\right)^{0.5}$ ,  $z_R = \frac{n\pi w_0^2}{\lambda}$  为瑞利长度,  $n$  为介质折射率,  $\lambda$  为激光波长,  $w_0$  为焦斑半径,  $L_p^l$  为拉盖尔多项式, 其不同阶数的表达式为:

$$L_n^m(\xi) = \sum_{k=0}^m \frac{(n+m)!(-\xi)^k}{(m+k)!k!(n-k)!} \quad (8)$$

式中,  $l$  和  $p$  分别代表角向模数和径向模数,  $\begin{cases} \cos^2(l\varphi) \\ \sin^2(l\varphi) \end{cases}$  表示既可以取  $\cos^2(l\varphi)$ , 也可以取  $\sin^2(l\varphi)$ ,  $\varphi$  代表柱面坐标系下的角度。

### 2.3 模型装置

利用激光对熔石英材料进行微加工, 这一方面已经有人进行理论和实验的研究<sup>[14-17]</sup>。针对这一应用本文中构建激光辐照系统模型并进行仿真计算。如图

1a 所示,光束照射在圆柱体熔石英上表面,聚焦于中心位置。参照声光调 Q 的 Nd:YAG 激光器的参量,激光波长  $\lambda = 1064\text{nm}$ ;脉冲能量  $E_p = 1.7\text{mJ}$ ;脉冲宽度 (FWHM)  $t_p = 140\text{ns}$ ,光束通过聚焦透镜后,焦斑半径  $w_0 \approx 20\mu\text{m}$ ;熔石英样品几何外形为圆柱体,直径  $400\mu\text{m}$ 、长度  $2000\mu\text{m}$ ,样品横向尺寸远大于光斑半径,样品厚度超过激光聚焦深度(瑞利长度)。仿真过程为两个时间上连续的激光脉冲对熔石英的辐照过程,功率分布如图 1b 所示。单位功率下,TEM<sub>00</sub>,TEM<sub>01</sub>,TEM<sub>10</sub>模拉盖尔-高斯激光在  $t = 0$  时刻、 $z = 0$  平面上的强度分布如图 2 所示。

采用 COMSOL 软件中的固体传热模块和固体力学模块,通过温度耦合的方式进行多物理场的仿真,得到温度和热应力分布结果<sup>[6-7]</sup>。融石英外表面采用绝热处理;熔石英的初始温度和外界环境温度均为  $20^\circ\text{C}$ ;位移场和速度场初始值均为 0;采用温变物理参量的熔石英进行仿真;网格剖分采用自由剖分四面体结构,利用 COMSOL 软件的瞬态自适应网格细化的功能,以兼顾仿真结果的精细度和计算数据量。

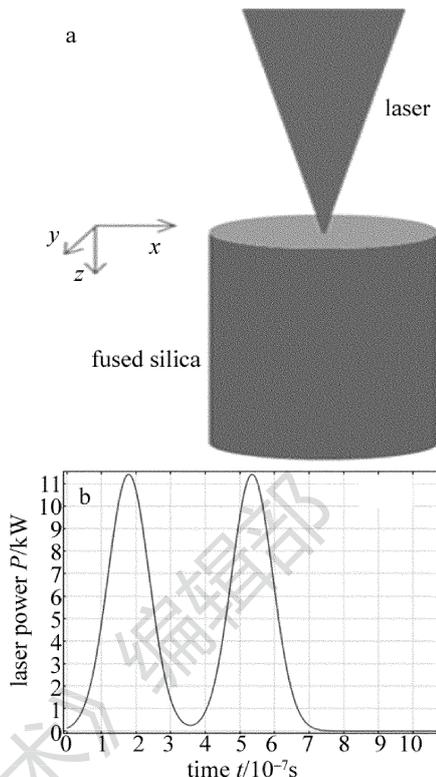


Fig. 1 a—laser irradiation system b—power of laser pulses

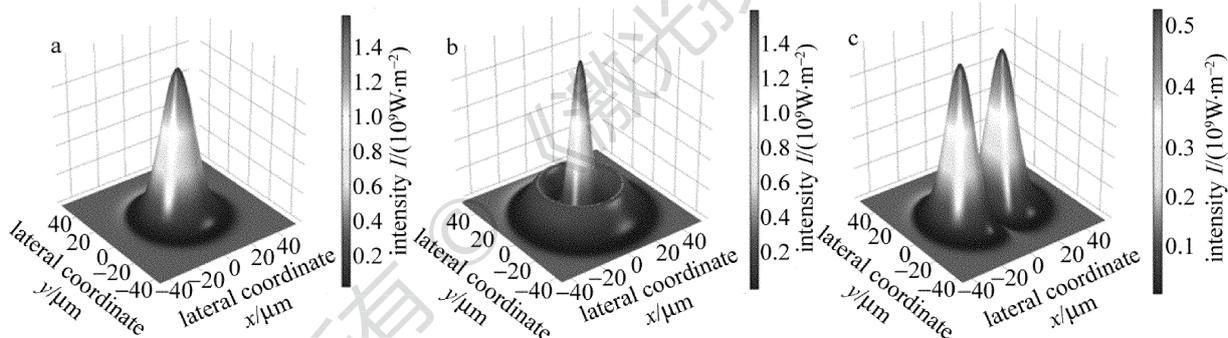


Fig. 2 Spatial intensity distribution of Laguerre-Gaussian beam

a—TEM<sub>00</sub> b—TEM<sub>01</sub> c—TEM<sub>10</sub>

### 3 分析与讨论

#### 3.1 熔石英的温度分布

图 3 为不同模式的拉盖尔-高斯激光辐照下熔石英在经过两个激光脉冲后,  $t = 1.428\mu\text{s}$  时刻的温度分布。由图可得,温度分布与激光光强空间分布基本一致,且温度分布随石英内部的深度逐渐降低。

经过两个激光脉冲后,在  $t = 1.428\mu\text{s}$  时刻,沿径向线段  $(0\mu\text{m}, 0\mu\text{m}, 65.2\mu\text{m})$ ,  $(60\mu\text{m}, 0\mu\text{m}, 62.5\mu\text{m})$  上各点的温度分布如图 4a 所示。由图可知,曲线与光强分布十分近似,在距中心  $60\mu\text{m}$  处温度已经接近环境温度  $20^\circ\text{C}$ ,这也说明忽略熔石英和外界热交换这一假设是合理的。

分别取采样点  $P_1 (0\mu\text{m}, 0\mu\text{m}, 62.5\mu\text{m})$  和  $P_2$

$(0\mu\text{m}, 10\mu\text{m}, 62.5\mu\text{m})$ , 针对在激光脉冲作用过程中的温度变化进行仿真计算,并采用 TEM<sub>00</sub>, TEM<sub>01</sub>, TEM<sub>10</sub>这 3 种不同模式激光得到结果,如图 4b 所示。TEM<sub>00,P1</sub>, TEM<sub>01,P1</sub>, TEM<sub>10,P1</sub> 分别代表  $P_1$  点在 3 种不同模式激光的作用下温度变化曲线; TEM<sub>00,P2</sub>, TEM<sub>01,P2</sub>, TEM<sub>10,P2</sub> 分别代表  $P_2$  点在 3 种不同模式激光的作用下温度变化曲线。图 4 表明,  $P_1$  和  $P_2$  点温度变化曲线与激光脉冲时间分布曲线的积分曲线类似,在激光脉冲前半周期温度上升明显,后半周期温度变化缓慢;同时由于热量没有能够及时向周围传递,产生了热量的累积,第 2 个激光脉冲到来使石英温度持续上升。如果温度达到材料融化或汽化温度,将导致材料的熔融汽化破坏。  $P_1$  和  $P_2$  点温度曲线形式类似,区别在于幅度的差异,这是由于光强空间分布的不同造成的。

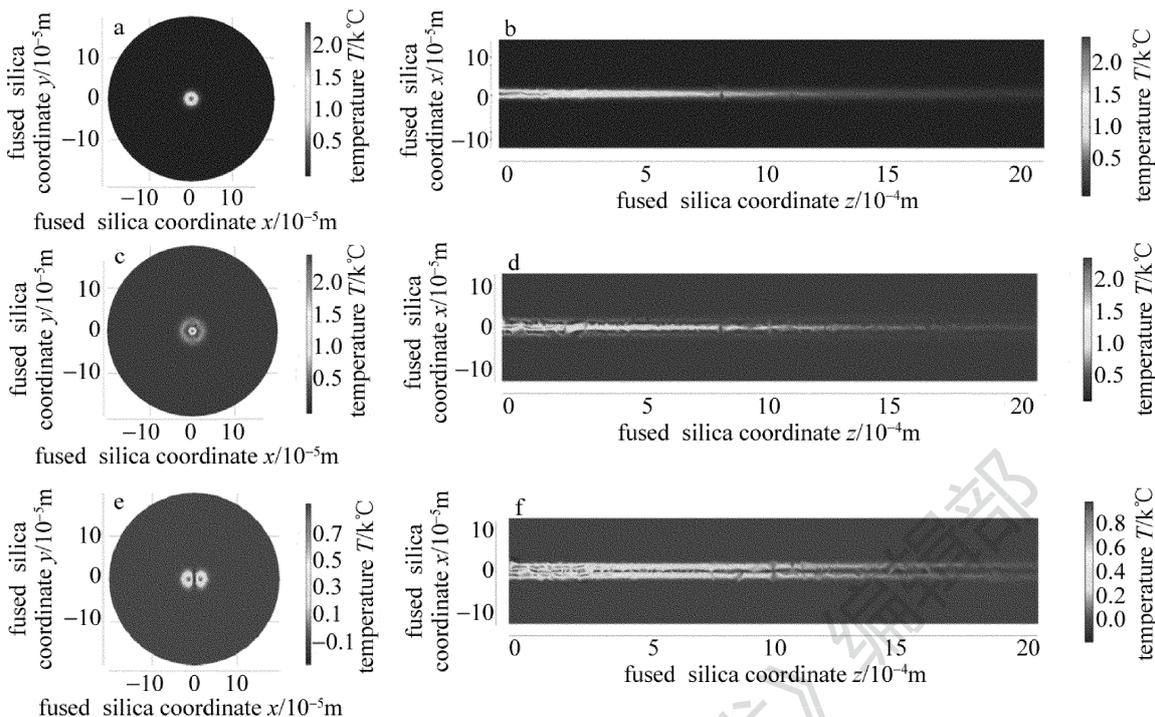


Fig. 3 Temperature distribution of fused silica by different laser beams

a—TEM<sub>00</sub>, z=0 μm b—TEM<sub>00</sub>, y=0 μm c—TEM<sub>01</sub>, z=0 μm d—TEM<sub>01</sub>, y=0 μm e—TEM<sub>10</sub>, z=0 μm f—TEM<sub>10</sub>, y=0 μm

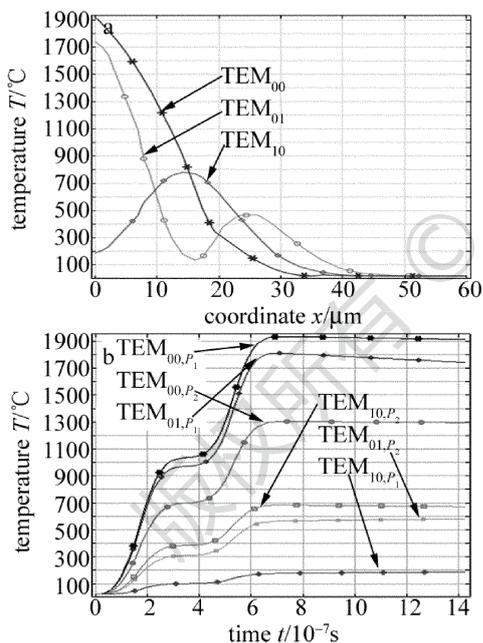


Fig. 4 Spatial and temporal distribution of fused silica temperature  
a—spatial distribution at  $t = 1.428 \mu s$  b—temporal distribution at sampling points

### 3.2 熔石英的热应力分布

图5为经过两个激光脉冲后,  $t = 1.428 \mu s$  时刻, TEM<sub>00</sub>, TEM<sub>01</sub>, TEM<sub>10</sub> 模拉盖尔-高斯激光作用下熔石英的热应力分布图, 正值代表热应力为压应力, 负值代表热应力为拉应力。

图6为经过两个激光脉冲后,  $t = 1.428 \mu s$  时刻, 沿

径向线段 ( $0 \mu m, 0 \mu m, 65.2 \mu m$ ), ( $60 \mu m, 0 \mu m, 62.5 \mu m$ ) 的焦点区域上各点的热应力分布图。TEM<sub>00</sub> 模式激光作用下, 在中心区域  $20 \mu m$  内, 热应力为压应力, 且随距离的增大而快速减小; 在  $20 \mu m$  以外的区域, 热应力为拉应力, 拉应力先增大然后减小, 最大的拉应力约  $7 MPa$ , 出现在  $30 \mu m$  位置附近。TEM<sub>01</sub> 模式激光作用下, 在中心区域  $8 \mu m$  内, 热应力为压应力, 且随距离的增大而快速减小; 在  $8 \mu m \sim 22 \mu m$  区域, 热应力表现为拉应力, 拉应力先增大然后减小, 最大的拉应力约  $14 MPa$ , 出现在  $12 \mu m$  位置附近; 在  $22 \mu m \sim 32 \mu m$  区域, 热应力表现为压应力, 压应力先增大然后减小; 在  $32 \mu m$  以外区域, 热应力再次表现为拉应力, 同样有一次先增大然后减小的过程。TEM<sub>10</sub> 模式激光作用下, 在中心区域  $5 \mu m$  内, 热应力为拉应力, 最大值出现在  $0 \mu m$  位置, 达到  $16 MPa$ , 且随距离的增大而快速减小, 在  $5 \mu m \sim 28 \mu m$  区域表现为压应力, 压应力先增大后减小, 在  $28 \mu m$  以外区域, 热应力再次表现为拉应力, 同样有一次先增大然后减小的过程。

熔石英抗压强度  $1100 MPa$ , 抗拉强度  $48 MPa$ , 如果热应力超过材料的抗拉强度, 将导致材料的断裂破坏。脉冲作用熔石英时, 随着脉冲不断作用增加温度将不断上升, 将导致材料熔融和汽化, 对材料造成热损伤。虽然在温度较低的区域, 不足以熔融汽化材料, 但是如果产生的热应力超过材料的抗拉强度, 材料也将发生断裂破坏。

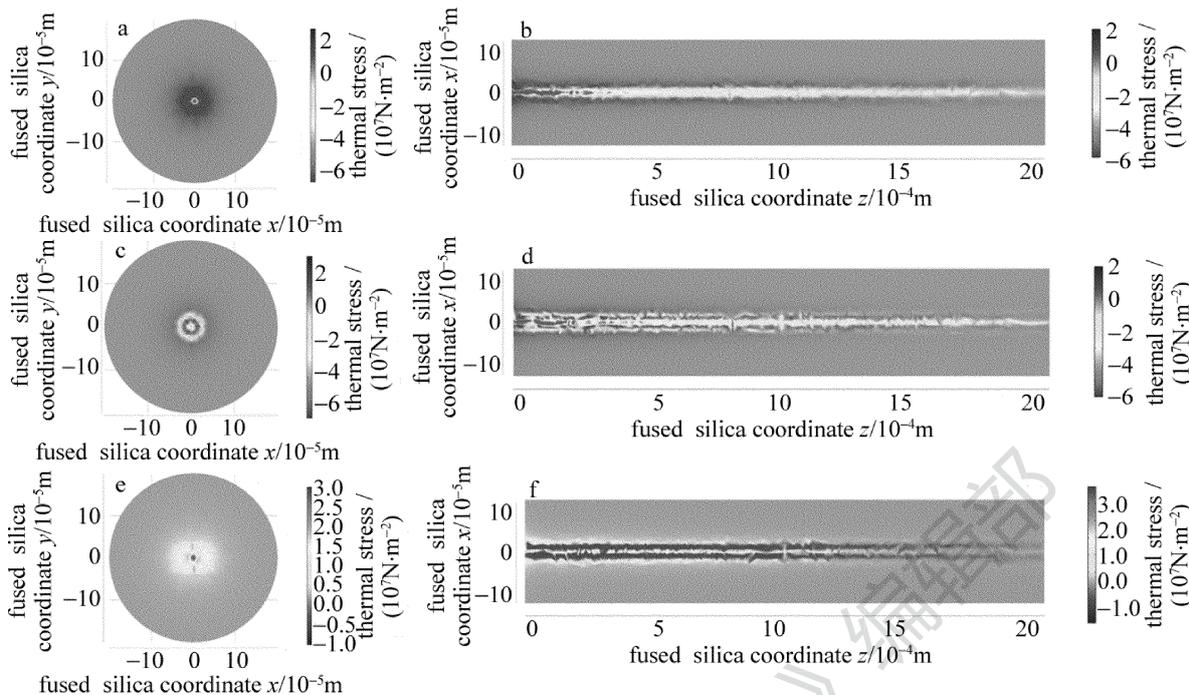


Fig. 5 Thermal stress distribution of fused silica by different laser beams

a—TEM<sub>00</sub>, z=0 μm b—TEM<sub>00</sub>, y=0 μm c—TEM<sub>01</sub>, z=0 μm d—TEM<sub>01</sub>, y=0 μm e—TEM<sub>10</sub>, z=0 μm f—TEM<sub>10</sub>, y=0 μm

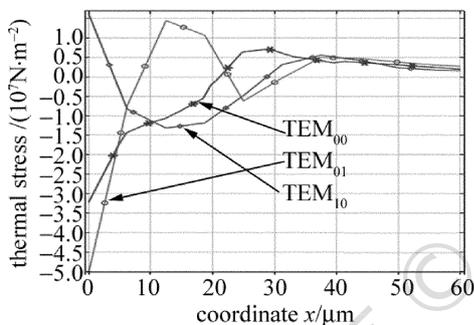


Fig. 6 Thermal stress distribution

## 4 结论

利用多物理场仿真工具 COMSOL 对不同模式的拉盖尔-高斯光束与熔石英的作用过程进行仿真。仿真结果表明:不同模式拉盖尔-高斯光束辐照熔石英,对材料可能造成破坏的区域不同;一方面对材料的破坏来自于温度,温度达到材料融化或汽化温度,将导致材料的熔融汽化破坏;另一方面来源于热应力,材料升温不均匀,巨大的温度梯度导致热应力的产生,产生的热应力达到材料的力学破坏阈值,发生热应力损伤,将会产生裂纹等损伤形貌。

### 参考文献

[1] WEI Ch Y, HE H B, DENG Zh, *et al.* Study of thermal behaviours in CO<sub>2</sub> laser irradiated glass[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(4): 044202.  
 [2] LI Y. Heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser micromachining and its applications[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012:11-31 (in Chinese).

[3] LI Sh X, ZHANG Zh P, QIN Sh J, *et al.* Research on the temperature and thermal stress of fused silica irradiated by a laser pulse[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7):786-791 (in Chinese).  
 [4] YU J X, HE Sh B, XIANG X, *et al.* Simulation on stress control of laser irradiated fused silica on ANSYS[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(6): 870-874 (in Chinese).  
 [5] LI X L, NIU Ch H, MA M Y, *et al.* Finite element simulation of damage characteristics of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 730-733 (in Chinese).  
 [6] CAI J X, ZHANG Y, WANG D, *et al.* Numerical simulation study on thermal stress damage in 1064nm anti-reflection fused silica by laser [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(6):77-81 (in Chinese).  
 [7] JIAO J K, WANG X B. Temperature distribution of moving quartz glass heated by CO<sub>2</sub> laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1):1-4 (in Chinese).  
 [8] JIANG N, NIU Y X, ZHANG Sh L, *et al.* Numerical simulation of thermal shock effect on germanium induced by out-of-band pulsed-laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 481-484 (in Chinese).  
 [9] SU L, ZENG X D. Study of thermal deformations of laser windows [J]. *Electronic Science and Technology*, 2009, 22(4): 63-65 (in Chinese).  
 [10] COMSOL. Heat transfer module user's guide [EB/OL]. (2013-11-01) [2017-03-05]. <http://www.comsol.com/support/knowledgebase>.  
 [11] COMSOL. Structural mechanics module user's guide [EB/OL]. (2013-11-01) [2017-3-05]. <http://www.comsol.com/support/knowledgebase>.  
 [12] GRIGOROPOULOS C P. Transport in laser microfabrication [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2009:60-84.  
 [13] GAO Y H, AN Zh Y, LI L J, *et al.* Research on beam shaping for high-order gaussian beam[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,

- 2011,9(5): 61-64(in Chinese).
- [14] QIN S J, LI W J. Micromachining of complex channel systems in 3-D quartz substrates using *Q*-switched Nd:YAG laser [J]. Applied Physics, 2002, A74(6): 773-777.
- [15] LI Sh X, BAI Zh Ch, QIN Sh J. Researche on the fabrication of micro channels in fused silica substrates by nanosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012,49(2):041401(in Chinese).
- [16] ZHAI L B, ZHAO H L, CHEN J M. The microfabrication of micro-channel on glass with frequency tripled Nd:YAG laser [J]. Applied Laser, 2006,26(6):365-368(in Chinese).
- [17] LI Sh X, BAI Zh Ch, HUANG Zh, *et al.* Study on the machining mechanism of fabrication of micro channels in fused silica substrates by laser-induced plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(11): 115201(in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部