

材料表面缺陷对激光热损伤的影响

张龙霞 朱晓冰 李风雨 张蓉竹

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 建立了激光辐照下光学表面典型锥状缺陷的热损伤分析模型, 基于有限差分方法计算了典型缺陷附近的调制光场和温度场分布, 得出了缺陷对材料热损伤阈值的影响规律。结果表明, 热损伤阈值与入射激光的波长呈正相关, 与缺陷的尺寸呈负相关。同一波长激光辐照的情况下, 材料表面有 1 个缺陷存在时, 热损伤首先发生在缺陷处, 而当多个缺陷存在时, 热损伤首先发生在 2 个缺陷的中间区域, 并且多个缺陷要比单个缺陷更易造成损伤; 对于不同波长的辐照激光来说, 波长为 800 nm 的激光要比波长为 1064 nm 的激光更容易使材料产生损伤。

关键词 激光器; 热损伤阈值; 温度场分布; 表面缺陷

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0914001

Laser-Induced Thermal Damage Influenced by Surface Defects of Materials

Zhang Longxia Zhu Xiaobing Li Fengyu Zhang Rongzhu

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract The thermal damage analysis model of a classical circular cone protuberance on the surface induced by laser is set up. The modulation light field distribution and the temperature field distribution around the defects are calculated by finite-difference method, and the influence rule of the defects on thermal damage threshold is obtained. Results show that the thermal damage threshold increases while incident wavelength of laser increases and the size of defects decreases. In conditions of the same wavelengths, thermal damage occurs first in the defect when there is a defect, while thermal damage occurs in the middle region of the two defects first and it is more likely to make damage when there are multiple defects. For different wavelengths, the laser wavelength of 800 nm is more likely to cause damage in the material than the laser with wavelength of 1064 nm.

Key words lasers; thermal damage threshold; temperature field distribution; surface defects

OCIS codes 140.3330; 140.3440; 140.6810

1 引 言

红外激光系统在红外遥感、光谱测量、军事等领域得到了广泛应用^[1-2], 随着激光能量输出的提高, 红外激光的热效应对光学材料带来的损伤问题也越来越突出。利用热效应模型可以很好地描述激光辐照下材料的温度变化^[3], 这也成为相关研究的出发点。但是目前的研究工作主要是针对均匀材料, 考虑不同波长、脉宽、重频等参数对材料温升、应力、损伤等特性的影响^[4-5]。在计算中一般不考虑材料存在缺陷, 得到的应该是材料的本征热损伤特性数据。而实际上高功率激光系统使用了大量的大口径光学元件, 这些元件加工难度大, 加工后的表面质量必然会对元件的损伤特性带来额外的影响。这也成为目前理论计算材料阈值与实际测量值之间存在差异的一个关键。很多时候粗糙度被用来表征元件的表面质量, 实际上描述了元件在加工过程中留下的诸如研磨纹路、微观不平度等正常的加工痕迹, 这种加工误差对入射光场的调制作用不明

收稿日期: 2016-03-16; **收到修改稿日期:** 2016-05-05

基金项目: 四川省教育厅创新团队项目 (13TD0048)

作者简介: 张龙霞(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学材料损伤方面的研究。E-mail: 1165489935@qq.com

导师简介: 张蓉竹(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精密光学检测以及光电子技术方面的研究。

E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn(通信联系人)

显^[6]。而在加工过程中,材料应力变化、磨料切割产生脆性断裂等原因,会使表面残留各种加工缺陷(如凹凸点、裂缝、划痕、沟槽、锈蚀等),这些缺陷在元件表面是离散随机出现的,且尺寸相对较大,它们对入射光场会产生明显调制,使材料阈值明显降低^[7-8]。

要想对实际损伤情况进行更好的分析和预测,需要建立非理想情况的损伤模型。早年已有一些关于缺陷损伤的研究,Bloembergen N^[9]于1973年用静电场理论模拟了材料微观缺陷周围的场增强。2005年,王毅等^[10]用时域有限差分(FDTD)的方法模拟了熔石英表面划痕附近的二维电场分布。2012年,章春来等^[11]用同样的方法对熔石英表面划痕及酸蚀量诱导场损伤做了实验模拟分析,并且获得了不同条件下的最大光强增强因子。不过这些研究重点针对的是缺陷对光场的调制,进一步将调制场对热损伤的影响进行深入分析的报道还不多见。本文建立了分析缺陷热损伤的理论模型,运用FDTD方法对具有典型缺陷形貌的光学材料热损伤性能进行了研究。

2 理论模型

2.1 表面缺陷对光场的调制

广义地说,光学元件的激光损伤是指激光与物质的相互作用导致元件性能或者结构发生了可观察到的变化^[12]。用均匀平面光照射理想光学材料表面,由于理想表面对入射光场没有调制作用,材料表面的光场均匀分布,只要入射光场没有达到材料的本征吸收极限,材料就不会发生损伤破坏。但实际过程中,由于材料在加工过程中会存在各种缺陷,这些缺陷就会对入射光场进行不同程度的调制,使材料表面的光场局部增强,导致材料表面光场分布不均匀,当此光场达到一定值时,就会对材料造成损伤。

缺陷对元件光场调制一般分为振幅调制和相位调制两种,这里只研究相位调制型缺陷。假设所研究材料折射率为 n ,那么在表面某一点处 l 高度的凸起缺陷会引入 $\Delta\varphi$ 的相位差

$$\Delta\varphi = 2\pi(n-1)\frac{l}{\lambda}, \quad (1)$$

光波经过元件后其复振幅可写为:

$$E = E_0 \exp(i\Delta\varphi) = E_0 \exp\left[2\pi i(n-1)\frac{l}{\lambda}\right], \quad (2)$$

式中, E_0 为初始复振幅。近轴条件下,将畸变光场代入波动方程^[13]后求解,就可以得到光经过元件后的 z 平面上的光场分布:

$$\nabla_{\perp}^2 E + 2ik_0 \frac{\partial E}{\partial z} = -2k_0^2 \frac{\gamma}{n} |E|^2 E + ik_0(\beta - \mu)E, \quad (3)$$

式中 $k_0 = 2\pi n/\lambda$, E 为光场复振幅, μ 为增益系数, β 为损耗系数, γ 为非线性折射率系数。

通过对理论模型的分析,可以对缺陷导致的光场调制进行具体计算。为了简化问题,将缺陷设置为与元件同材料的理想锥体,并利用FDTD方法分析光场分布,以及用相关的软件来建立三维模型,图1所示为平面光照射带有双锥形缺陷材料的三维模型。

对不同数量的缺陷对光场的影响进行分析。假设缺陷锥体在材料的正中心,各边界条件均是理想的,用波长为1064 nm的均匀平面光垂直照射带有不同数量缺陷(锥体半径为200 nm,高为150 nm)的光学材料,在表面经缺陷调制后,光场将重新分布,得到如图2所示的 xoy 面上的光场分布结果。

由图2可知,在所选定的缺陷尺寸范围内,缺陷对光场的调制结果是:1)于锥体缺陷对均匀平面光进行反射、折射以及这些光线与入射光线之间发生干涉等,光场局部增强并且这种增强沿径向方向逐渐减弱;2)于1064 nm这样的长波长,它在缺陷中心没有聚焦作用,所以光场的最大值不在锥体中心,而是在缺陷的附近呈环形分布,且沿着径向方向光场的极大值逐渐减小;3)当表面存在多个缺陷时,其光场的调制情况要比单锥体强得多,并且光场最大值在两锥体中间区域,这是锥体间的相互作用使光场在中部叠加增强的结果。

由图3可知,无论材料表面缺陷数量多少,在一定的尺寸内,光场的最大值和次极大值均随着高度的增加而增加,并且最大值要比次极大值增加得更明显。对于相同尺寸的缺陷,表面缺陷数量多的次极大值比缺陷数量少的最大值还要大许多,说明了元件表面多个缺陷存在时,光场的局部增强是不可忽视的。

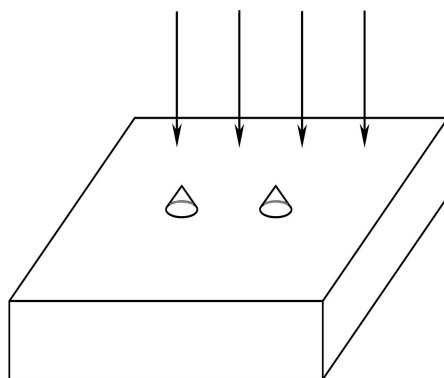


图 1 平面光照射带有圆锥形缺陷材料的三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of material with circular cone protuberance defects irradiated by plane light

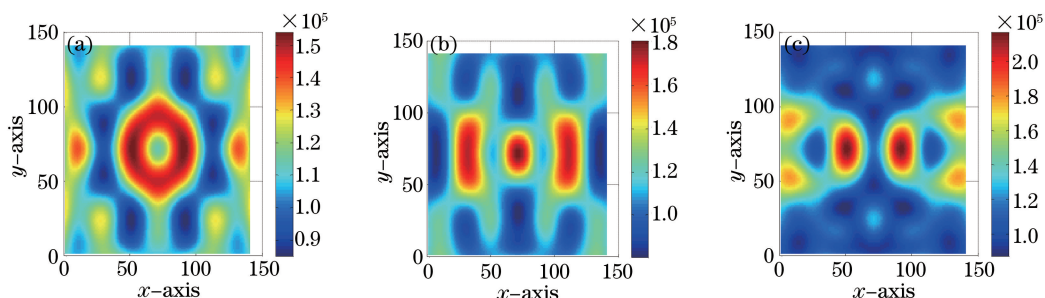


图 2 波长为 1064 nm 时,不同数量的圆锥缺陷材料 xoy 面上的光场分布情况。

(a) 单一锥体缺陷;(b) 双锥体缺陷;(c) 三锥体缺陷

Fig. 2 Light field distribution of materials with different numbers of cone defects on xoy surface when the wavelength is 1064 nm. (a) Single cone defect; (b) double cone defect; (c) three cone defects

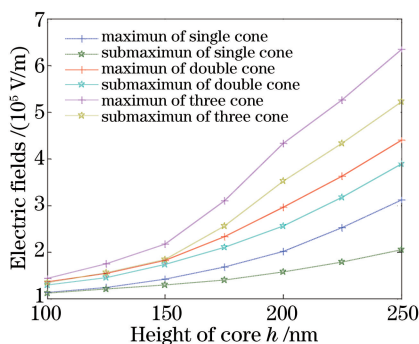


图 3 波长为 1064 nm 时,单一锥体、双锥体和三锥体缺陷的光场最大值和次极大值数量随高度的变化趋势

Fig. 3 Maximun and submaximum of light field distribution of single, double and three cone defects with different heights when the wavelength is 1064 nm

2.2 表面缺陷对温度场的影响

前面讨论了表面缺陷的存在会使光场局部增强的现象。从材料的表面损伤形态又知,缺陷对激光的吸收在表面损伤中起着重要作用,而且,随着光场的增强,材料对光能的吸收也增强,也就更容易导致材料的热损伤。那么,对表面缺陷温度场分布的研究就显得非常必要了。

用一定脉冲大小的激光照射光学材料表面,由于粒子运动时间小于激光脉冲时间,可以理想地认为材料吸收激光能量后,随即又把能量转化为热能,即材料表面温度的升高,当温度达到材料的熔点时就会对材料造成熔融性损坏。为简化运算,考虑所涉及的参数在整个模拟运算过程中均为不变量,且入射激光不与外界其他物质发生作用,也就是说过程中无能量的损失。

用均匀平面光照射光学元件,由于缺陷的存在,光场会重新分布。由(3)式可以得到调制后的光场值 E ,

代入公式 $I_a = (1-R)E^2$ 即可求得材料吸收部分的激光功率密度。激光以柱面对称的方式辐照材料表面时的热流方程可记为^[14]

$$(\partial T / \partial t) = \kappa \nabla^2 T + [\alpha I_a(x, y, t) V / c_p] \exp(-\alpha x), \quad (4)$$

式中, T 为温度, t 为时间, c_p 为定压热容, V 是摩尔体积, α 为材料的吸收系数, κ 为热扩散系数。

对(4)式引入格林函数^[15]可以得到, 材料受激光辐照冷却之后, 脉冲作用过程和作用之后材料的温度分布为^[14]

$$T(z, t) = \begin{cases} (2I_a/k) \sqrt{\kappa t} \psi(z/2\sqrt{\kappa t}), & t < \tau \\ (2I_a/k) \{ \sqrt{\kappa t} \psi(z/2\sqrt{\kappa t}) - \sqrt{\kappa(t-\tau)} \psi[z/2\sqrt{\kappa(t-\tau)}] \}, & t > \tau \end{cases}, \quad (5)$$

式中, $\kappa = k / (\rho c)$, ρ 为材料密度, c 为材料比热容, τ 为矩形脉冲宽度, z 为激光辐射材料的深度, 互补差函数 $\varphi(x) = 1 - \phi(x)$, 它的积分是 $\psi(x) = \exp(-x^2) / \sqrt{\pi} - x\varphi(x)$, $\phi(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp(-\eta^2) d\eta$ 是误差函数。

通过(5)式的模拟计算, 可获得一定时间作用后材料表面的温度分布。因为每种材料都有其固定的温度承受极限, 当元件表面某点温度高于材料熔点时, 就会对材料造成热熔融损伤, 这就为判定激光损伤提供依据。假设缺陷锥体在材料的正中心, 各边界条件均是理想的, 其半径为 200 nm, 高依次为 100、150、200 nm, 用波长为 1064 nm 的均匀平面光垂直照射带有以上缺陷的光学材料, 经缺陷材料调制整合后, 利用上述温度分布函数模拟, 得到如图 4 所示的材料表面的温度场分布(软件模拟过程中, 把初始温度定义为常温, 即 300 K, 为了使结果更为精确, 更具有参考性, 这里统一取 1 个脉冲结束之后的表面温度分布)。

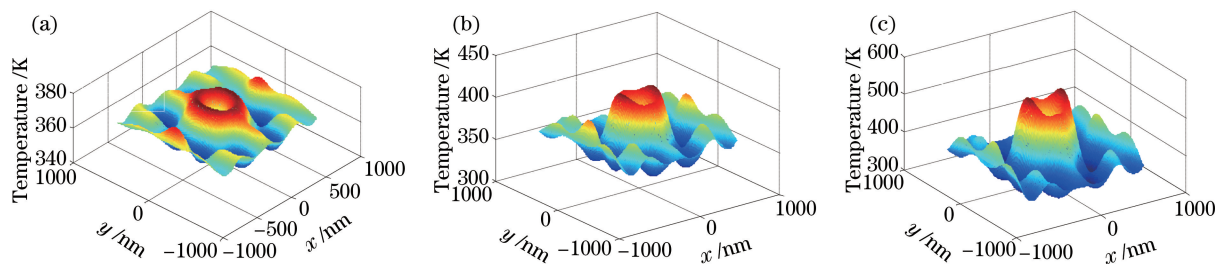


图 4 波长为 1064 nm 时, 不同高度的单锥体缺陷对应的温度场分布。

(a) $h=100$ nm; (b) $h=150$ nm; (c) $h=200$ nm

Fig. 4 Temperature field distribution of single cone defect with different heights when the wavelength is 1064 nm. (a) $h=100$ nm; (b) $h=150$ nm; (c) $h=200$ nm

由图 4 可知, 均匀平面光垂直照射不同缺陷大小的元件时, 材料表面温度与缺陷高度呈正相关, 即缺陷高度越高, 材料表面温度越大。在该缺陷尺寸内, 温升最大值在缺陷附近呈环形分布, 且随着高度的增加, 对应的温度最大值、极大值也是逐渐增大的; 温度最大值比次极大值增加得更明显。

缺陷横向尺寸固定($r=200$ nm)时, 在 1064 nm 和 800 nm 激光照射下, 不同高度对应的临界光场值如表 1 所示, 2 种波长对应的临界光场(也就是损伤阈值)变化趋势如图 5 所示。

表 1 缺陷高度变化对材料损伤阈值的影响

Table 1 Damage threshold of materials affected by different heights of defect

| h /nm | 50 | 100 | 120 | 150 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda=1064$ nm, $E/(10^5$ V/m) | 7.930 | 7.680 | 7.060 | 6.180 |
| $\lambda=800$ nm, $E/(10^5$ V/m) | 6.280 | 3.720 | 3.480 | 3.383 |

由图 5 可以看出, 随着缺陷纵向尺寸的增大, 材料达到临界损伤时所需要的入射光场值是逐渐变小的, 说明热损伤阈值随缺陷高度的增加而减小; 对于同一尺寸的缺陷, 短波长对应的入射光场值比长波长要小, 即对于相同缺陷, 波长越短, 材料越易损伤, 这是因为短波长激光更容易与材料表面进行耦合。也就是说, 材料的损伤阈值主要受缺陷尺寸和波长的影响。缺陷高度固定($h=120$ nm)时, 在 1064 nm 和 800 nm 激光照射下, 不同径向对应的临界光场值如表 2 所示, 2 种波长对应的临界光场变化趋势如图 6 所示。

表 2 缺陷横向尺寸对材料损伤阈值的影响

Table 2 Damage threshold of materials affected by different horizontal sizes of defect

| r/nm | 100 | 150 | 200 | 250 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda = 1064 \text{ nm}, E/(10^5 \text{ V/m})$ | 7.880 | 7.440 | 7.060 | 6.560 |
| $\lambda = 800 \text{ nm}, E/(10^5 \text{ V/m})$ | 6.286 | 4.350 | 3.480 | 2.790 |

由图 6 可以看出,随着缺陷横向尺寸的增大,材料达到临界损伤时所需要的入射光场值也是逐渐变小的,说明热损伤阈值随锥体底半径的增大而减小;同样,对于相同尺寸的缺陷,短波长对应的入射光场值比长波长小,即对于相同缺陷,波长越短,材料越易损伤。

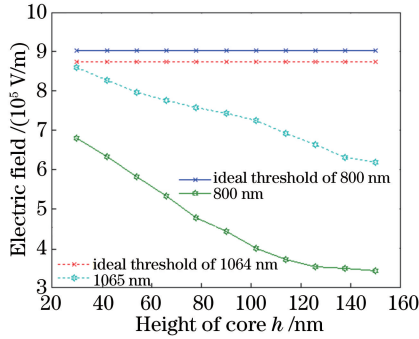


图 5 热损伤阈值随缺陷纵向延伸变化趋势
Fig. 5 Thermal damage threshold versus longitudinal extension of defects

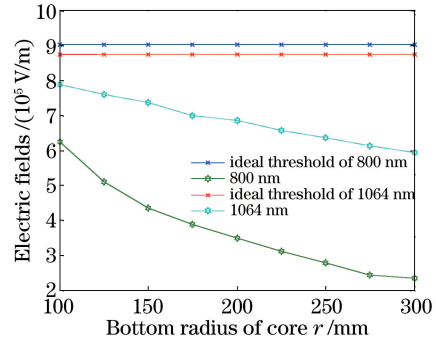


图 6 热损伤阈值随缺陷横向延伸变化趋势
Fig. 6 Thermal damage threshold versus horizontal extension of defects

从图 5、6 可以明显看出,存在缺陷后材料阈值明显降低,且随着缺陷尺寸的增加,材料的热损伤阈值下降。由表 1 和表 2 可知,随着缺陷尺寸的增加,光场增强,热损伤阈值减小。对于波长为 1064 nm 的激光,光场每增强约 6%,热损伤阈值约降为原来的 95%;对于波长为 800 nm 的激光,相同缺陷尺寸变化下,光场增强约 25%,热损伤阈值约降为原来的 80%;2 种波长比较而言,波长为 800 nm 时材料的热损伤阈值降幅更大些。综上所述,材料的损伤阈值主要受缺陷尺寸和辐照波长影响:与缺陷大小呈负相关,与辐照波长呈正相关。

双锥体缺陷与单一缺陷对材料的影响规律有很多类似之处,由图 7 可以看出,当材料表面有 2 个锥体缺陷存在时,两锥体之间的区域升温幅值最大,其次才是两锥体本身,这是两锥体对入射光场调制后并在中间区域叠加的结果;另外,中心最大与锥体极大的比值依次为:1.088、1.069、1.030,即随着高度增加,缺陷中心与中间区域的温度越来越接近,最终超过叠加处的温度,这是因为高度增加,锥体的反射减弱,聚焦作用增强,从而使锥体处的升温增强;比较图 4 和图 7 可以看出,同样条件下,双缺陷比单一缺陷造成的温度要高许多,即双缺陷更加降低了材料的热损伤阈值,更容易使材料损伤,这是因为 2 个缺陷之间也对光场进行了重新分配,使光场进一步加强。当固定 2 个缺陷的大小,改变它们之间的距离时,随着两锥体间距的增大,元件表面温度逐渐降低,当增大到一定值时,两缺陷彼此不再影响。同样,材料表面存在 3 个缺陷时,更容易对材料造成损伤。从图 8 可以看出,材料表面温度分布不仅与缺陷大小有关(一定范围内,缺陷尺寸越大,升温越高),缺陷的不同分布同样会对材料阈值产生很大影响,在文中计算间距下,缺陷水平排列时的阈值要比环状排列时的低。

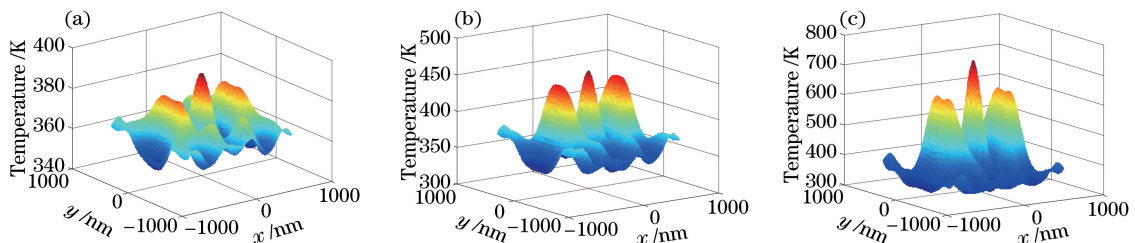


图 7 波长为 1064 nm 时,不同高度的双锥体缺陷对应的温度场分布。(a) $h = 100 \text{ nm}$; (b) $h = 150 \text{ nm}$; (c) $h = 200 \text{ nm}$
Fig. 7 Temperature field distribution of double cone defects with different heights when the wavelength is 1064 nm. (a) $h = 100 \text{ nm}$; (b) $h = 150 \text{ nm}$; (c) $h = 200 \text{ nm}$

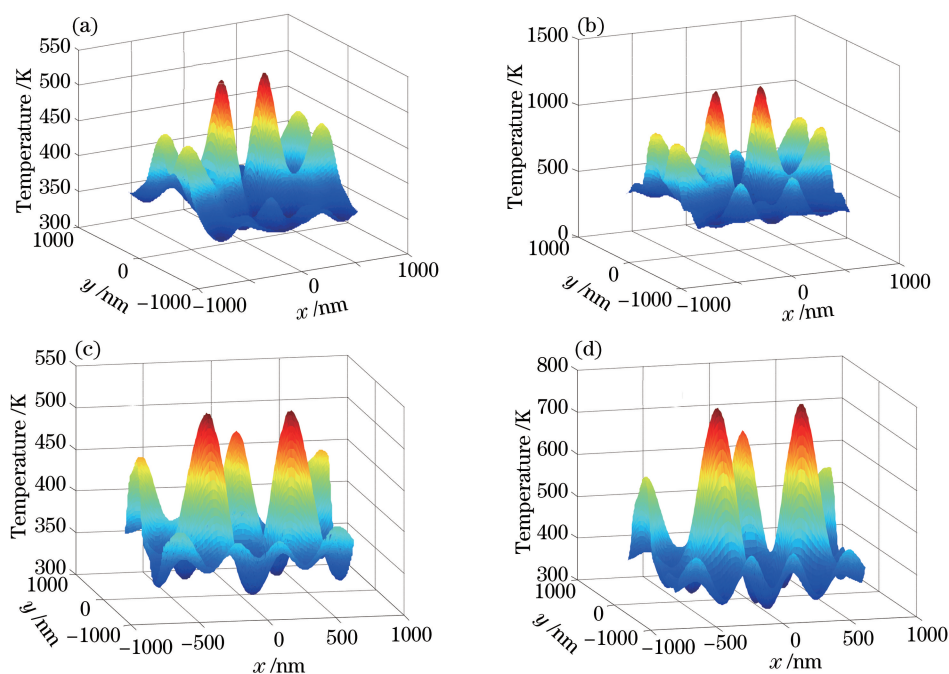


图 8 波长为 1064 nm 时,不同高度的 3 个锥体缺陷按不同排列对应的温度场分布。

(a) $h=150$ nm, 水平排列; (b) $h=200$ nm, 水平排列; (c) $h=150$ nm, 环状排列; (d) $h=200$ nm, 环状排列

Fig. 8 Temperature field distribution of three cone defects with different heights in different arrangements when the wavelength is 1064 nm. (a) $h=150$ nm, horizontal arrangement; (b) $h=200$ nm, horizontal arrangement;

(c) $h=150$ nm, circular arrangement; (d) $h=200$ nm, circular arrangement

3 结 论

为了研究激光损伤对材料宏观性能的影响,基于 FDTD 法和可能最大损失空间吸收边界条件,建立了三维圆锥体缺陷模型,模拟了波长为 1064 nm 和 800 nm 的均匀平面光辐照下,不同尺寸的单锥体、双锥体以及三锥体缺陷导致的元件表面光场分布和温度场分布变化。另外,比较温度最大值与材料熔点的大小来判断材料的损伤状况。结果显示,热损伤阈值主要受入射光波长和缺陷尺寸共同影响。对于单锥体模型,当锥体底半径一定时,波长为 1064 nm 和 800 nm 的均匀平面光照射下材料的热损伤阈值均随锥体高度的增加而减小;当锥体高度一定时,波长为 1064 nm 和 800 nm 的均匀平面光照射下材料的热损伤阈值均随锥体底半径的增加而减小;当缺陷尺寸一定时,材料的损伤阈值随波长的增大而增大。对于双锥模型,材料的损伤阈值同样是与缺陷尺寸负相关,与激光波长正相关,不同的是,双锥模型中,两锥体中间有温度场的叠加,并且叠加区的温度值最大,热损伤阈值由该区决定,即该区最容易发生熔融性损坏。而对于表面存在 3 个缺陷的模型,其除了有双锥缺陷的规律外,它的不同形式的分布也会给材料阈值造成不容忽视的影响,在所研究范围内,水平分布比环状分布更容易使材料损坏。当缺陷尺寸一定时,无论缺陷如何分布,多锥缺陷材料的损伤阈值比单锥缺陷材料的低,即缺陷数量越多,对材料的影响越大。

参 考 文 献

- 1 Sun Qibing. Studies on nonlinear frequency conversion technology of the near-infrared and mid-infrared waveband laser [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
孙启兵. 近红外及中红外波段激光非线性频率变换技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2010.
- 2 Li Guo, Li Meihua, Wang Xiaolei, *et al.* Research on trend of defect in infrared non-destructive testing[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s104002.
李 果, 李美华, 王晓磊, 等. 红外无损检测的损伤趋势判定研究[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s104002.
- 3 Zhu Xiaobing, Fu Bo, Du Lifeng, *et al.* Comparative analysis on thermal damage characteristics of ZnS and SiO₂ induced

- by short pulse laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(12): 121002.
- 朱晓冰, 付 博, 杜立峰, 等. ZnS 与 SiO₂ 材料的短脉冲激光热损伤特性比较[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(12): 121002.
- 4 Luo Jin, Liu Zhichao, Chen Songlin, *et al.* Theoretical research of multi-pulses laser induced damage in dielectrics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3301-3306.
- 罗 晋, 刘志超, 陈松林, 等. 多脉冲激光辐照下介质损伤理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3301-3306.
- 5 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.
- 黄 峰, 牛燕雄, 汪岳峰, 等. 光学窗口材料激光辐照热力效应的解析计算研究[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 576-580.
- 6 Liu Peng. Visualized detection for the surface micro-defects of optical elements [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- 刘 鹏. 光学元件表面微缺陷可视化检测技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- 7 Zhou Lidan, Su Jingqin, Liu Lanqin, *et al.* Effects on beam quality of booster stage induced by "defects" on optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(3): 326-327.
- 周丽丹, 粟敬钦, 刘兰琴, 等. 光学元件"缺陷"对助推放大级光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(3): 326-327.
- 8 Hu Jianping, Zhang Wenhui, Duan Lihua, *et al.* The surface damage induced by 1064 nm laser on K9 glass[J]. Laser Journal, 2006, 27(3): 59-60.
- 胡建平, 张问辉, 段利华, 等. K9 玻璃表面的 1064 nm 激光损伤[J]. 激光杂志, 2006, 27(3): 59-60.
- 9 Bloembergen N. Role of crack, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surface of transparent dielectrics[J]. Appl Opt, 1973, 12(4): 661-664.
- 10 Wang Yi, Xu Qiao, Chai Liqun, *et al.* Simulation and analysis of electromagnetic field distributing around fused silica scratch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 67-70.
- 王 毅, 许 乔, 柴立群, 等. 熔石英表面划痕附近电磁场分布模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 67-70.
- 11 Zhang Chunlai, Wang Zhiguo, Xiang Xia, *et al.* Simulation of field intensification induced by pit-shaped crack on fused silica rear-surface[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(11): 114210.
- 章春来, 王治国, 向 霞, 等. 熔石英后表面坑点型划痕对光场调制的近场模拟[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 114210.
- 12 Hrubesh L W, Norton M A, Molander W A, *et al.* Methods for mitigating growth of laser-initiated surface damage on fused silica optics at 351 nm[R]. California: LLNL REPORT, 2001.
- 13 Ren Huan, Jiang Hongzhen, Liu Xu, *et al.* Influence of scratch defects on quality of beam field[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(9): 092011.
- 任 寰, 姜宏振, 刘 旭, 等. 划痕型缺陷对光场质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 092011.
- 14 Allmen M V, Blatter A. Laser-beam interactions with materials: physical principles and applications [M]. Berlin: Springer Verlag, 1995.
- 15 Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids[M]. Oxford: Oxford University Press, 1986.