

表面划痕中残余抛光颗粒对材料热损伤特性的影响*

郭文华¹, 陶 冶², 张蓉竹¹

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065; 2. 四川大学 机械工程学院, 成都 610065)

摘 要: 建立了高功率激光辐照下光学表面存在划痕且残存抛光颗粒时的热损伤分析模型, 对这种复杂缺陷条件下的光学材料热损伤性能进行了研究。利用有限差分法计算了不同尺度抛光颗粒处于划痕中不同位置时光学材料表面的光场调制和温度场的分布。根据表面温度分布, 得到了对应条件下光学材料的热损伤阈值变化规律。结果表明: 除了抛光颗粒半径对材料损伤阈值存在影响外, 当抛光颗粒位于划痕宽度方向不同位置时, 材料的热损伤阈值也会有比较明显的变化; 当位于划痕中心时, 抛光颗粒对材料光场调制最强, 更容易造成材料的熔化损伤。

关键词: 抛光颗粒; 有限差分法; 热损伤阈值; 光场调制

中图分类号: TN24

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190303

Effect of residual polishing particles on thermal damage characteristics of materials in surface scratches

Guo Wenhua¹, Tao Ye², Zhang Rongzhu¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A thermal damage analysis model of scratches and residual polishing particles on the optical surface is established. The thermal damage properties of optical materials under such complex defects are studied. The finite difference method was used to calculate the light field modulation and temperature field distribution of the optical material surface at different positions of the polished particles at different scales. According to the surface temperature distribution, the thermal damage threshold of the optical material under the corresponding conditions is achieved. The results show that in addition to the influence of the polishing particle radius on the material damage threshold, when the polishing particles are located at different positions in the scratch width direction, the thermal damage threshold of the material will also change significantly. Among them, the polishing particles in the center of the scratch have the strongest modulation on the light field, and are more likely to cause melting damage of the material.

Key words: polished particles; FDTD; thermal damage threshold; light field modulation

光学材料在吸收激光能量后, 温度会升高, 一旦温度超过材料熔点, 材料就会出现熔化损伤。而激光材料的损伤是限制激光功率水平进一步提高的主要瓶颈^[1], 因此了解光学元件的抗激光损伤能力对确保高功率激光系统的有效运行具有重要意义。当前激光功率增加对光学材料损伤阈值提出了更高的要求, 而许多研究表明, 在光学元件制造流程(如切割、抛光)中引入的划痕会对光学材料的损伤阈值产生明显的影响^[2-4], 因此需要对不同缺陷表面的阈值进行研究。1973年 N. Bloembergen^[5]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^[6]等人使用时域有限差分方法(FDTD)模拟了熔石英表面圆柱形、三角形上的划痕对激光电磁场的调制作用, 计算出划痕尺寸不同时电磁场的分布规律。2012年, 章春来^[7]建立了坑点型划痕的旋转抛物面模型, 用三维时域有限差分方法研究了熔石英后表面坑点型划痕随深度、宽度、间距以及酸蚀量变化对波长 $\lambda=355\text{ nm}$ 入射激光的调制。2019年, 谢焱鑫^[8]建立了具有表面划痕的熔融石英材料的热损伤分析模型, 分析了矩形和弧形划痕的长度、宽度和深度对材料损伤阈值的影响。然而, 这些研究大多针对的是熔石英等光学材料在使用加工中存在的缺陷结

* 收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2019-11-04

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 郭文华(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与材料相互作用方面的研究工作; domissi@163.com。

通信作者: 陶 冶(1984—), 男, 四川大学机械工程学院副教授, 主要从事精密测量与传感方面的研究工作; yetao@scu.edu.cn。

构对光场分布及表面损伤的影响,并没有考虑抛光过程中残余的抛光颗粒对材料损伤的影响。在实际加工过程中,抛光颗粒常常会被划痕卡住,从而遗留在材料表面。抛光颗粒材料与光学材料不同,这必然会对光的吸收调制产生影响,本文就这一问题进行研究,建立了划痕缺陷上存在抛光颗粒的热损伤理论模型,对存在着抛光颗粒的划痕缺陷的光学材料热损伤性能进行了研究。

1 理论模型

光学元件表面存在许多形态的划痕,从理论分析的角度出发,可以将划痕简化为两种典型形状,即矩形划痕和圆弧形划痕^[8],在本文取矩形划痕,矩形划痕中存在抛光颗粒,如图1所示。划痕引起元件透射波前畸变,对光场相位进行调制^[9],而抛光颗粒则影响了元件的透过率分布,对光场振幅进行调制^[10]。

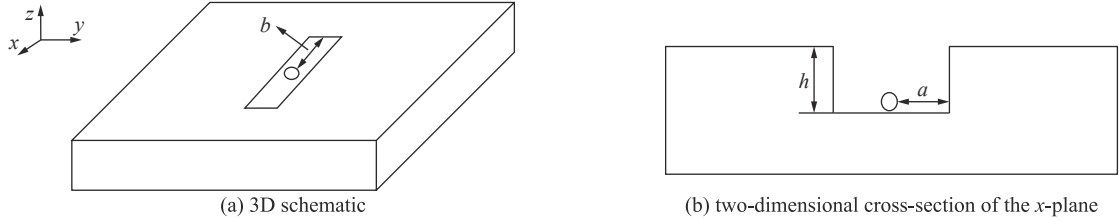


Fig. 1 Schematic diagram of the analysis model of scratches and polished particle

图1 同时存在划痕与抛光颗粒分析模型示意图

一个长度、宽度以及深度分别为 l, w, h 的划痕,引起的相位调制量为

$$\Delta\phi = 2\pi(n-1)\frac{h}{\lambda}\left[\text{rect}\left(\frac{x-x_0}{w}\right)\text{rect}\left(\frac{y-y_0}{l}\right)\right] \quad (1)$$

式中: λ 为入射光波长; n 为材料折射率; (x_0, y_0) 为划痕横向中心坐标位置。由抛光颗粒引起的振幅调制量^[10]为

$$\Delta E = E_0\left\{1 - A\exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}\right]\right\} \quad (2)$$

式中: E_0 为初始振幅; A 为缺陷振幅调制幅度, 决定缺陷的振幅挡光率大小; r 为抛光颗粒半径。均匀平面光经存在抛光的划痕调制后复振幅可表示为

$$E = (E_0 + \Delta E)\exp(i\Delta\phi) \quad (3)$$

近轴条件下,将调制后的光场代入波动方程后求解,就可以得到光经过材料内部任意 xoy 平面上的光场分布

$$\nabla_{\perp}^2 E + 2ik_0 \frac{\partial E}{\partial z} = -2k_0^2 \frac{1}{n} |E|^2 E + ik_0 \beta E \quad (4)$$

式中: $k_0 = \frac{2\pi n}{\lambda}$; E 为光场复振幅; β 为损耗系数; z 为激光辐射材料的深度。

假定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。入射光斑为均匀分布时,材料表面的热传导方程为

$$(\partial T / \partial t) = \kappa \nabla^2 T + [\alpha I_{\alpha}(x, y, t) V / C_p] \exp(-\alpha x) \quad (5)$$

式中: T 为材料表面温度; C_p 为材料的定压热焓; V 是摩尔体积; α 为材料的吸收系数; κ 为热扩散系数, $\kappa = k / (\rho c)$, ρ 为材料密度, c 为材料比热容, k 为波矢。

引入 Green 函数^[11]可以得到材料受激光辐照作用过程和作用之后材料的温度分布

$$T(z, t) = \begin{cases} (2I_{\alpha}/m) \sqrt{\kappa t} \psi(z/2\sqrt{\kappa t}), & t < \tau \\ (2I_{\alpha}/m) \left\{ \sqrt{\kappa t} \psi(z/2\sqrt{\kappa t}) - \sqrt{\kappa(t-\tau)} \psi\left[z/2\sqrt{\kappa(t-\tau)}\right] \right\}, & t > \tau \end{cases} \quad (6)$$

式中: τ 为矩形脉冲宽度; m 为导热系数; $\psi(x) = \exp(-x^2) / \sqrt{\pi} - x\phi(x)$, 其中, $\phi(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp(-\eta^2) d\eta$, 是误差函数。

假设各边界条件都是理想的,利用 FDTD 方法分析划痕对光场的调制分布,采用公式(6)进行模拟计算,得到材料经过存在抛光颗粒的划痕缺陷调制后的温度场分布,当元件表面温度最大达到或高于材料熔点时,材料就会发生热熔融,从而对材料造成损伤,把恰好使材料达到熔点时的电场值作为材料的热损伤阈值。

2 抛光颗粒对损伤阈值的影响

针对图1所示的物理模型,使用波长为 1 064 nm 的均匀平面激光束照射,针对光学材料 SiO_2 , 抛光颗粒金刚

石, 我们进行了具体计算。表面划痕的尺寸 l, w, h 分别取 4 000, 500 及 50 nm。初始温度定义为常温, 取 300 K, 初始入射光场是 10^5 V/m。

2.1 抛光颗粒不同位置对损伤阈值的影响

首先分析一个半径为 10 nm 的抛光颗粒在划痕中所在位置不同时, 材料损伤阈值的变化。当抛光颗粒沿划痕长度方向的位置固定, 当颗粒距离划痕边缘位置不同时, 计算得到了其对应的光场分布, 如图 2 所示。可见, 光场经过表面缺陷的调制后, 光场调制增强区对称分布于划痕周围两侧, 并且光场调制最强区域不在划痕中心。在对光场调制作用过程中, 因为划痕尺度远大于抛光颗粒, 抛光颗粒尺度较小, 所以划痕尺寸起到决定性作用, 抛光颗粒对光场调制没有起到明显的影响, 但是由于其与基底不属于同类材料, 直接对光场振幅进行调制, 因此会对光场的强弱变化起到一定影响。

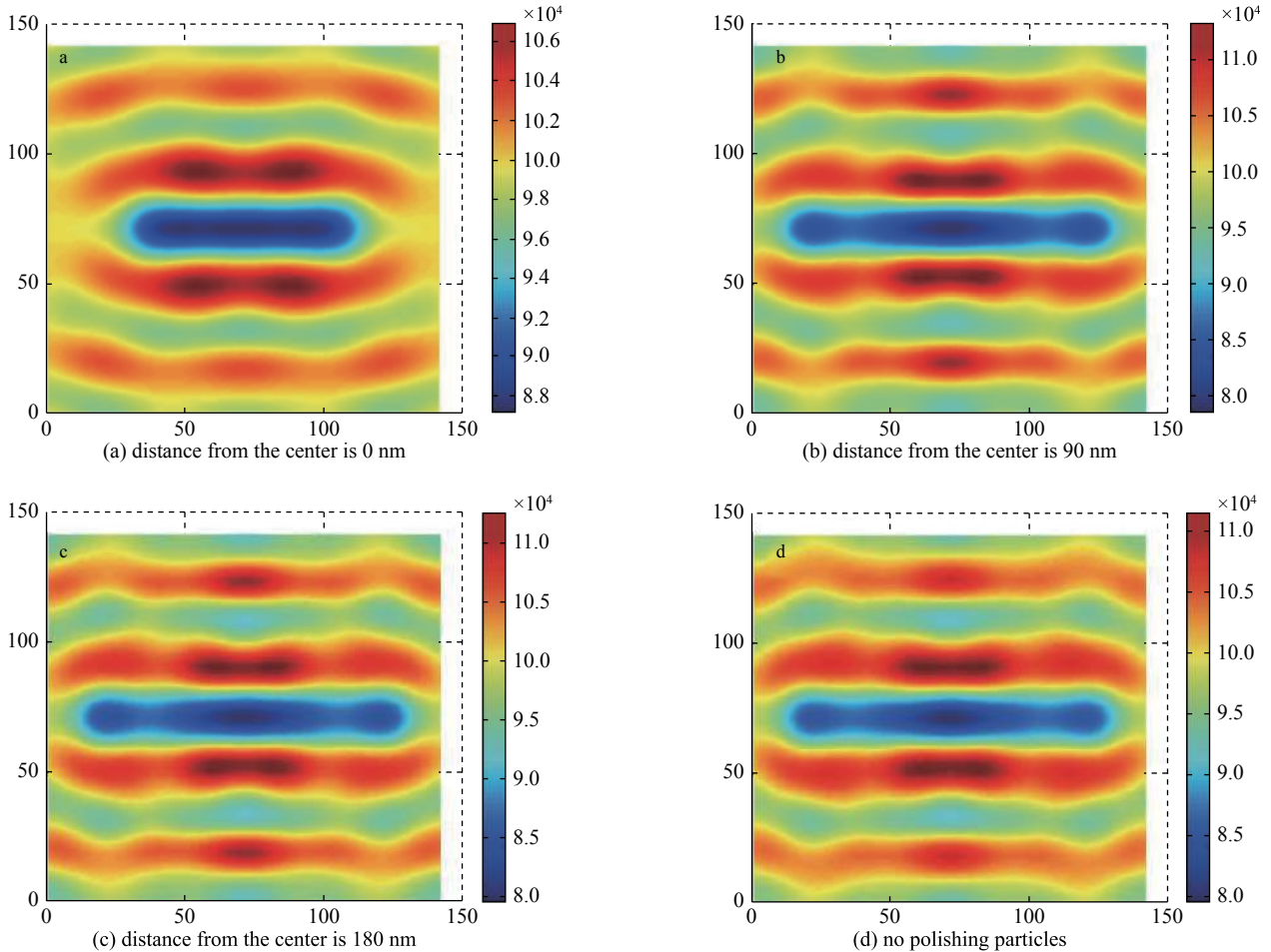


Fig. 2 Effect of polishing particles on the light field distribution of the material surface at different positions in the width direction of the scratch

图 2 抛光颗粒在划痕宽度方向上不同位置对材料表面光场分布的影响

为了更清楚地显示出抛光颗粒对调制光场的影响, 图 3(a) 给出了颗粒位于划痕宽度方向不同位置时, 光场极大值的变化。从图 3 可看出, 相比只存在划痕的情况, 抛光颗粒的出现使得材料表面光场调制变强, 光场极大值增强。随着抛光颗粒具体位置的变化, 光场极值有一定的波动。这是因为材料表面的划痕引起的调制是相位调制, 颗粒位置的不同, 会引起划痕相位的变化, 从而引起光场极大值的波动。

材料表面调制后, 材料表面的光场出现了局部增强, 这也使得对应位置温度增强。利用热传导方程可以计算得到, 存在抛光颗粒时温度的最高值达到了 347.99 K, 相比初始温度 300 K 上升了 16.00%。当划痕中还残留抛光颗粒时, 无论颗粒位于何处, 材料的温度极值均高于仅存在划痕时, 由于温度与光场直接相关, 所以得到的温度变化与光场极值的变化规律相同。

随着入射光场强度的增加, 材料表面的调制及温度也相应增加。当表面上某一点的温度达到熔点时, 就判定材料已出现损伤。因此, 我们可以得到上述抛光颗粒在划痕宽度不同位置的热损伤阈值。抛光颗粒在划痕宽度不同位置的热损伤阈值的趋势如图 3(b) 所示。随着抛光颗粒位置的变化, 材料的损伤阈值也随之变化。热损伤

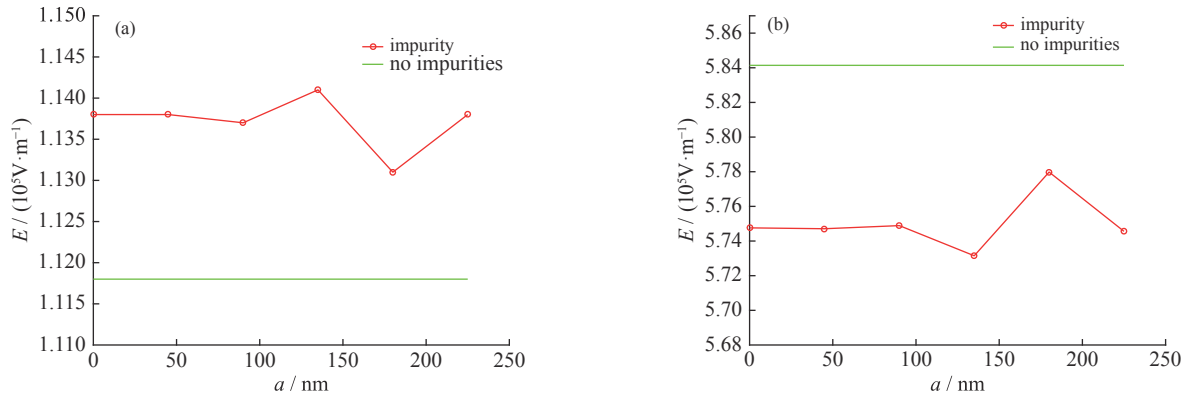


Fig. 3 Effect of polishing particles on the light field modulation (a) and thermal damage threshold (b) at different locations of the scratch width

图 3 划痕宽度不同位置处抛光颗粒对光场调制 (a) 及热损伤阈值 (b) 的影响

阈值最小的位置相对于无抛光颗粒的热损伤阈值下降了 1.05%。

不改变计算参数, 当抛光颗粒沿划痕宽度方向的位置固定、而颗粒距离划痕边缘位置不同时, 我们对光场分布进行了计算, 结果发现改变抛光在划痕长度上不同位置时, 并不会改变其光场调制的分布及调制的强弱。

图 4(a) 给出了颗粒位于划痕长度方向不同位置时, 光场极大值几乎没有变化, 这是因为在划痕长度方向的相位是相同的, 而颗粒在长度不同的位置, 导致的相位改变是一样的, 所以得到的光场极大值是一致的。利用热传导方程计算得到存在抛光颗粒时的温度最高值均为 342.46 K, 相比初始温度 300 K 上升了 14.15%。如图 4(b) 所示, 随着抛光颗粒的变化, 材料的热损伤阈值不变。热损伤阈值的位置相对于无抛光颗粒的热损伤阈值下降了 1.61%。

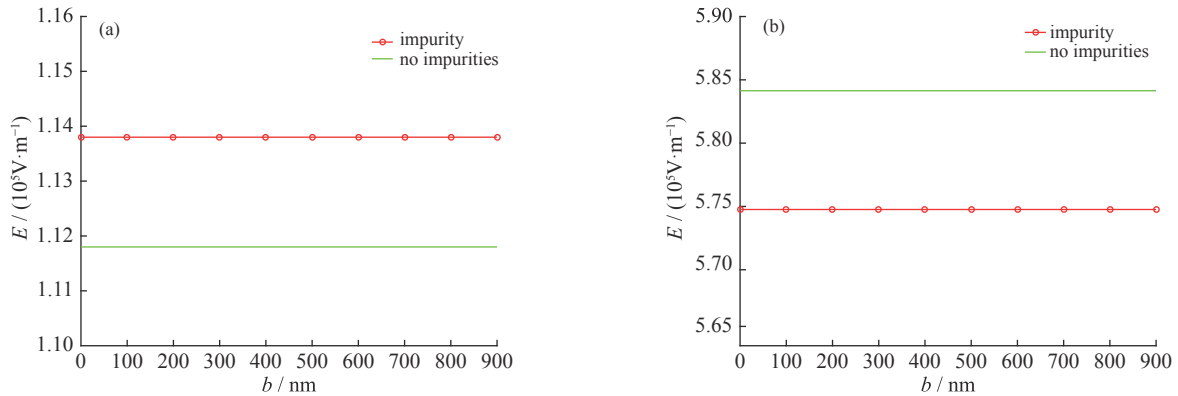


Fig. 4 Effect of polishing particles on the light field modulation (a) and thermal damage threshold (b) at different locations of the scratch length

图 4 划痕长度不同位置处抛光颗粒对光场调制 (a) 及热损伤阈值 (b) 的影响

2.2 抛光颗粒半径对损伤阈值的影响

不改变计算参数, 固定颗粒位置在划痕的中心处, 改变颗粒半径后, 对其光场分布进行了计算。结果发现, 改变抛光颗粒半径的大小并不会改变它们的光场调制的分布, 只会改变其光场的调制作用的强弱。

由图 5(a) 可见, 随着抛光颗粒半径的增加, 在抛光颗粒的调制与划痕的调制以及它们之间的调制下, 光场的极大值有规律地变化, 这是因为颗粒的大小引起对划痕处的相位造成了变化, 所以呈现出一个上下起伏的波动。利用热传导方程可以计算得到温度的最高值达到了 342.46 K, 相比初始温度 300 K 上升了 14.15%。温度极大值总趋势是在降低的。由图 5(b) 所示, 随着抛光颗粒半径的变化, 材料的损伤阈值也随之变化, 但是其阈值总趋势是在上升, 在抛光半径到达 25 nm 的时候, 抛光颗粒大小已经与划痕深度一样, 此时材料的热损伤阈值最大。热损伤阈值最小的半径相对于无抛光颗粒的热损伤阈值下降了 0.41%。

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, 建立了划痕缺陷上存在抛光颗粒的热损伤理论模型, 模拟了抛光颗粒在矩形划痕上的位置以及抛光颗粒在矩形划痕上的大小在波长为 1 064 nm 均匀平面光的辐照下, 抛光颗粒在划痕缺陷的不同位置和颗粒大小导致的光学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, 热损伤阈值几

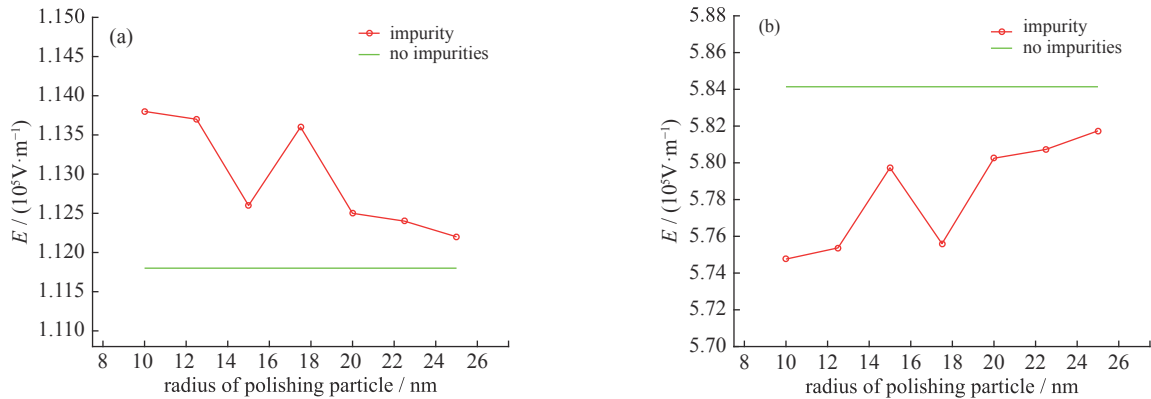


Fig. 5 Effect of polishing particles with different radii on light field modulation (a) and thermal damage threshold (b)

图 5 不同半径的抛光颗粒对光场调制 (a) 及热损伤阈值 (b) 的影响

乎不受抛光颗粒在划痕长度上所处位置的影响,主要受抛光颗粒在划痕缺陷的宽度和抛光颗粒半径的影响,抛光颗粒在宽度距离中心点的位置不同,热损伤阈值随之改变,随着距离中心位置的增加,热损伤阈值上下起伏的变化,在抛光颗粒贴到划痕边缘时,热损伤阈值相对其他位置达到最大;抛光颗粒半径不同,热损伤阈值也不同,随着抛光颗粒半径的增加,热损伤阈值会上下起伏,但其总趋势是上升,在抛光颗粒大小与划痕深度一样的时候,热损伤阈值相对于其他位置达到最大。如果材料表面的划痕无法彻底消除,尽可能优先处理抛光颗粒,这样可以适当提高材料的热损伤阈值。

参考文献:

- [1] Walker T W, Guenther A H, Nielsen P E. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings—Part I: Experimental[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(10): 2041-2052.
- [2] 项震, 聂传继, 葛剑虹, 等. 光学元件亚表面缺陷结构的蚀刻消除[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(3): 373-376. (Xiang Zhen, Nie Chuanji, Ge Jianhong, et al. Eliminating of subsurface damage structure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3): 373-376)
- [3] 蒋勇. 熔石英光学元件表面损伤修复的理论和实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 34-42. (Jiang Yong. Theoretical and experimental studies on surface damage repair of fused silica optical components. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 34-42)
- [4] 江修娥, 王斌, 刘剑, 等. 激光脉宽对光学薄膜元件热损伤的影响[J]. *激光与红外*, 2017, 47(1): 32-37. (Jiang Xiue, Wang Bin, Liu Jian, et al. Effect of pulse durations on laser thermal damage of optical thin films[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(1): 32-37)
- [5] Bloembergen N. Role of cracks, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surfaces of transparent dielectrics[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(4): 661-664.
- [6] 花金荣, 蒋晓东, 祖小涛, 等. 熔石英亚表面横向划痕调制作用的3维模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1441-1444. (Hua Jinrong, Jiang Xiaodong, Zu Xiaotao, et al. Three dimensional numerical simulation of modulation by transverse crack on fused silica subsurface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1441-1444)
- [7] 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: 114210. (Zhang Chunlai, Wang Zhiguo, Xiang Xia, et al. Simulation of field intensification induced by pit-shaped crack on fused silica rear-surface[J]. *Physica Sinica*, 2012, 61: 114210)
- [8] Xie Yanxin, Qi Lei, Liu Yali, et al. Influence of surface cracks on laser-induced thermal damage characteristics of optical material[J]. *Optik*, 2019, 184: 220-226.
- [9] 尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 光学元件表面缺陷相对位置分布对近场光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42: 0308004. (You Kewei, Zhang Yanli, Zhang Xuejie, et al. Influence of relative position of optical component surface defects on near field beam quality[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42: 0308004)
- [10] 苏倩倩, 张国文, 陶华, 等. 非线性介质表面缺陷对激光光场的调制[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2585-2590. (Su Qianqian, Zhang Guowen, Tao Hua, et al. Modulation of nonlinear medium with surface defects on intensity properties of laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2585-2590)
- [11] Carslaw H S, Jaeger J C. *Conduction of heat in solids*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1986.