

# 赫兹型微裂纹光场调制增强作用的系统研究

蔡月飞 吕志伟<sup>†</sup> 李森森 王雨雷 朱成禹 林殿阳 何伟明

(哈尔滨工业大学光电子研究所, 可调谐激光国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2013年7月4日收到; 2013年8月19日收到修改稿)

通过改变裂纹的倾角、宽度和深度参数, 模拟了赫兹型裂纹在不同参数下对光场调制能力的不同. 模拟发现, 倾斜角度为  $20.9^\circ$  到  $45^\circ$  之间的裂纹危害最大, 倾角大于  $45^\circ$  小于  $48.2^\circ$  的裂纹危害也十分大, 而倾斜角度为  $45^\circ$  时的裂纹危害最小. 对于  $30^\circ$  倾角的赫兹型裂纹, 一定范围内, 赫兹型裂纹深度的增加会导致其光场调制增强能力呈二次方关系增加, 但宽度的增加不会使其光场调制增强作用增加. 裂纹深度和宽度的增加可以用来近似裂纹的演化过程, 所以裂纹的扩展导致了其光场调制能力的增加, 进而导致损伤增长速率的加快, 这和  $e$  指数损伤增长规律相符.

**关键词:** 损伤增长, 亚表面缺陷, 赫兹型裂纹, 光场增强

**PACS:** 42.60.Jf, 42.62.-b, 68.55.-a, 42.50.Wk

**DOI:** 10.7498/aps.62.234203

## 1 引言

随着高功率激光系统的发展, 损伤增长逐渐成为限制高功率输出能量水平提高、光学元件寿命和系统运行成本的关键因素<sup>[1]</sup>, 而亚表面缺陷中的微裂纹缺陷又在损伤初始点形成和损伤增长过程中起到十分重要的作用<sup>[2]</sup>.

目前, 已有大量的研究工作集中在亚表面微裂纹对光场调制增强作用的模拟上<sup>[3-9]</sup>, 或集中于损伤增长的研究上<sup>[10-12]</sup>, 却很少将亚表面微裂纹与损伤增长联系起来, 而这种联系恰恰有助于更为深入地分析损伤增长的内在机理. 本文将从微裂纹对光场的调制增强作用入手, 分析亚表面微裂纹与损伤增长之间的内在联系. 由于赫兹型裂纹最为常见, 本文将集中研究赫兹型裂纹对光场的调制增强作用. 首先改变裂纹的倾斜角度, 由此辨别出了几种危害较大的微裂纹情况; 然后改变微裂纹的宽度和深度, 以此来理想化近似微裂纹的演化过程, 将模拟得到的场增强因子作为损伤增长速率的贡献因子, 据此阐释损伤增长所遵循的  $e$  指数变化规律. 通过以上研究, 一方面能为光学元件的加工提供指导, 尽可能避开危害较大的那几种微裂纹; 另一方面有助于我们深入认识损伤增长机理, 为损伤增长

减缓技术手段提供理论支撑.

## 2 亚表面赫兹型裂纹对光场调制增强作用的数值模拟

### 2.1 亚表面赫兹型裂纹的数值模型

高能激光系统上的光学元件多以熔融石英为材料, 故本文选择熔融石英材料作为研究对象. 而紫外损伤尤为严重<sup>[9]</sup>, 因此本文选择辐照激光波长为  $351\text{ nm}$ . 熔融石英亚表面微裂纹可根据应力场的不同分为赫兹型裂纹(又称为锥形裂纹)、径向裂纹和横向裂纹, 其中以赫兹型裂纹最为常见<sup>[13]</sup>. 而裂纹位于后表面时对光场的调制作用比裂纹位于前表面的情况要强, 熔石英后表面更容易发生损伤<sup>[9]</sup>.

因此, 本文将集中研究赫兹型裂纹处于熔石英玻璃材料后表面的情况. 它的几何模型可以用图 1 所示模型来描述, 采用电磁仿真领域常用的有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 对光场的分布进行数值模拟. 由于有限元的计算区域有限, 必须选取合适的计算区域和边界条件.

裂纹在微米量级, 熔融石英样品尺寸在厘米量级, 为了避开电大尺寸模拟的问题, 选择比裂纹尺

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: lvzw@hit.edu.cn

寸稍大、又能把亚表面层和空气包含进去的计算区域,即如图所示的虚线区域.以下选择 351 nm 的波长进行数值模拟,入射电场振幅归一化为 1 V/m,电磁场模式为 TE 平面时谐电磁波.设熔融石英材料的相对介电常数为 2.25,相对电导率为 0,相对磁导率为 1;空气的相对介电常数为 1,相对电导率为 0,相对磁导率为 1.计算区域的左右边界选为匹配边界 (matched boundary),上下边界选为散射边界条件 (scattering boundary condition).当裂纹位于材料后表面时,计算区域的下边界的场源 (source field) 设为 1 V/m,而上边界的场源设为 0.为考察亚表面微裂纹对光场的增强作用,定义场增强因子 (field enhancement factor, FEF) 为整个计算区域中光场的最大值,和不含赫兹型裂纹的理想玻璃界面的场增强因子比,值越大增强作用越大.

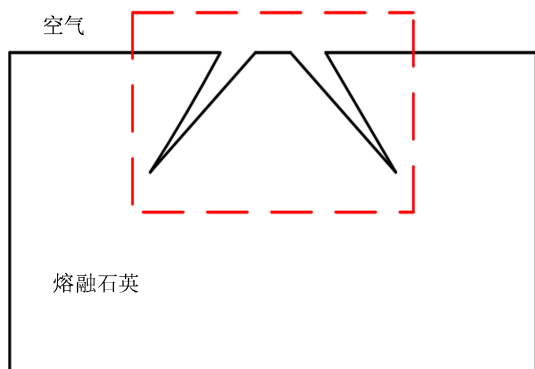


图1 亚表面赫兹型裂纹数值计算区域的选取

作为对比,首先模拟不含任何缺陷的理想玻璃表面,它的场增强因子为 1.202,光场分布如图 2 所示,它和菲涅耳折射公式计算的电场增强倍数相符,即从石英玻璃正入射进入空气介质中,透射电场是入射电场的 1.20 倍.

为便于讨论,将赫兹型裂纹的相关几何参数加以定义,如图 2 所示.

由图 3 可见,一个赫兹型裂纹可以把它看成是由两个平面型裂纹组合而成的.为方便以下讨论,把 EC, DF 称作为第一个斜面,把 BE, GF 斜面称为第二个斜面,把 BCE 和 CDF 区域称为裂缝,把 CD 上方的空气称为裂纹中心的正上方,把 CD 下方的玻璃介质称为裂纹中心的正下方.

裂纹的深度为  $d$ ,开口宽度为  $w$ ,内径为  $2a$ ,其中第一个斜面的倾角  $\theta$  称之为裂纹倾角,由于  $d, w, \theta$  和  $\alpha$  并不独立,而第二个斜面的倾角是由  $w$  和  $d$  以及  $\theta$  这三个参数共同决定的,即存在如下关系  $\alpha = \arctan[(w/d) - \tan \theta]$ .

因此本文不把  $\alpha$  作为一个独立的参数来进行讨论,而仅仅讨论  $\theta, d$  和  $w$  三个参数对赫兹型裂纹的光场调制增强能力的影响.

## 2.2 赫兹型裂纹的光场调制增强能力随其倾角的变化

模拟了  $2a = 4 \mu\text{m}, w = 2 \mu\text{m}, d = 8 \mu\text{m}$  的赫兹型裂纹,倾角从  $15^\circ$  变化到  $55^\circ$  的几种情况,如图 4 所示.

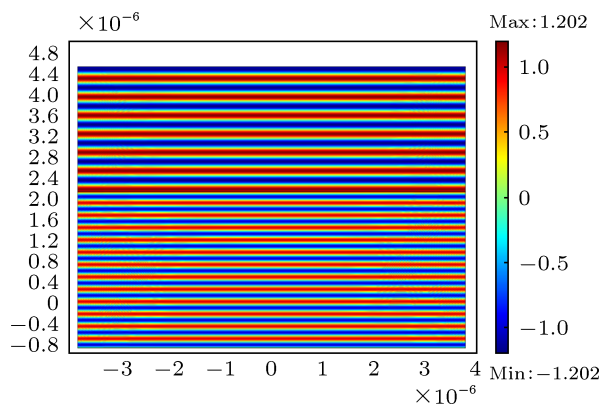


图2 典型的赫兹型裂纹的几何形状

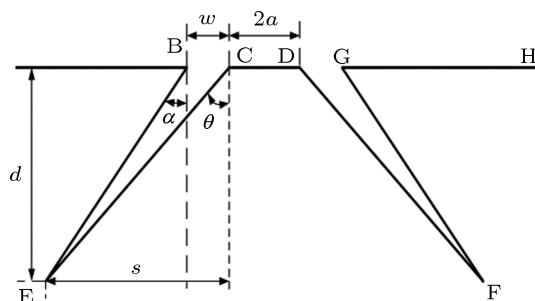


图3 典型的赫兹型裂纹的几何形状

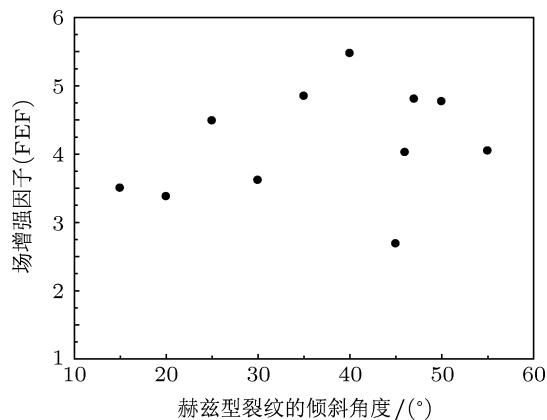


图4  $2a = 4 \mu\text{m}, w = 2 \mu\text{m}, d = 8 \mu\text{m}$  赫兹型裂纹的倾角对 FEF 的影响

### 2.3 赫兹型裂纹的光场调制增强能力随其深度的变化

选择如下参数的赫兹型裂纹进行数值模拟, 内径  $2a = 10 \mu\text{m}$ , 开口宽度  $w = 1.0 \mu\text{m}$ , 倾角为  $30^\circ$ . 让深度  $d$  从  $2.5 \mu\text{m}$  变化到  $6.5 \mu\text{m}$ , 得到如图 5 所示的关系曲线, 拟合得到 FEF 与  $d$  近似满足如下二次方关系:

$$y = 0.13174x^2 - 0.7516x + 3.9369.$$

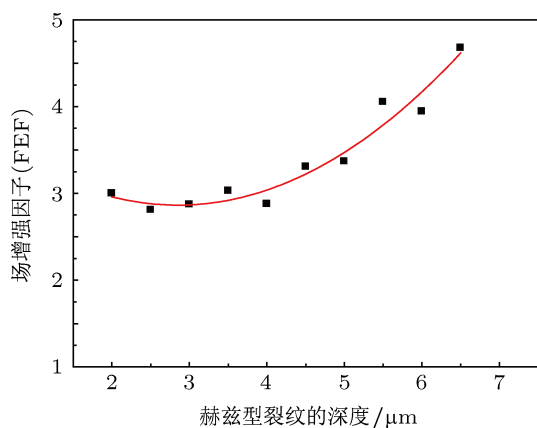


图 5  $2a = 10 \mu\text{m}$ ,  $w = 1.0 \mu\text{m}$ , 倾角  $30^\circ$  的赫兹型裂纹的深度对 FEF 的影响

### 2.4 赫兹型裂纹的光场调制增强能力随其宽度的变化

当  $2a = 10 \mu\text{m}$ ,  $d = 4.5 \mu\text{m}$ , 倾斜角度为  $30^\circ$  时, 宽度从  $0.5 \mu\text{m}$  变化到  $2.5 \mu\text{m}$ , 得到如图 6 所示的关系曲线, 用线性函数拟合得到 FEF 与  $w$  近似满足

$$y = -0.00138x + 3.50755.$$

上入射的光线垂直, 此时的干涉增强却并不强, 光场增强有一些类似“衍射”的效应, 场增强的最大值出现在空气中, 所以这种裂纹的危害最小.

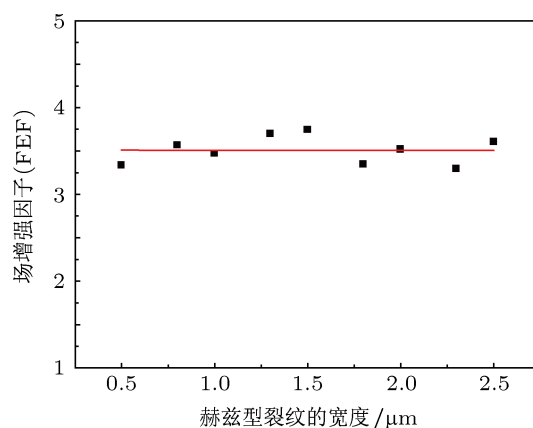


图 6  $2a = 10 \mu\text{m}$ ,  $d = 4.0 \mu\text{m}$ , 倾角  $30^\circ$  的赫兹型裂纹的宽度对 FEF 的影响

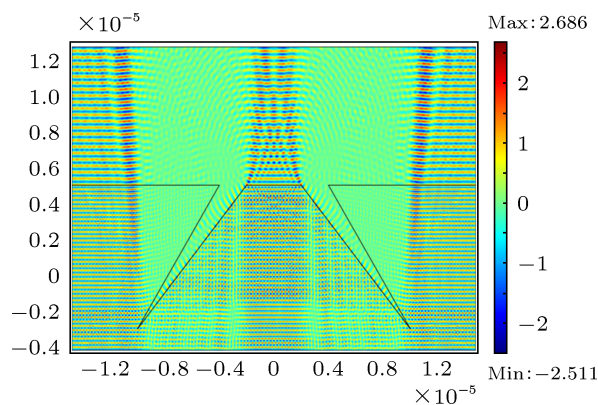


图 7 倾角为  $45^\circ$ ,  $2a = 4 \mu\text{m}$ ,  $w = 2 \mu\text{m}$ ,  $d = 8 \mu\text{m}$  时的赫兹型裂纹

## 3 数值实验的结果分析

### 3.1 危害较大的几种微裂纹的辨别

对赫兹型裂纹的第一个斜面而言, 当倾角满足  $20.9^\circ \leq \theta \leq 48.2^\circ$  ( $n = 1.5$ ) 但同时还必须满足倾角小于  $45^\circ$ , 这样从 EC 面反射光线的才能入射到 CD 面上. 以  $20.9^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $48.2^\circ$  为分界点, 讨论裂纹倾角对其光场增强能力的影响.

在倾角为  $45^\circ$  时, 赫兹型裂纹对光场的调制增强作用最弱, 此时的场增强因子为 2.686, 是模拟的这几种情况中最小的, 它的光场分布如图 7 所示. 虽然  $45^\circ$  的第一斜面对光场有很强的限制作用, 能把光线反射回到玻璃介质中, 反射光线几乎垂直向

裂纹的倾角在  $0^\circ$  到  $20.9^\circ$  之间时, 有倾角  $15^\circ$  和  $20^\circ$  两种情况的裂纹, 它们的光场分布如图 8 所示. 这两个光场, 光线被第一个斜面全反射然后透射进入赫兹型裂纹上方的空气中. 此时的场增强因子大约为 3, 但光场增强的最大值出现在裂纹正上方的空气中, 所以此时裂纹的危害并不大.

再讨论裂纹倾角在  $20.9^\circ$  到  $45^\circ$  之间的情形, 倾角为  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$  的这三种情形, 场增强因子大都在将近 5 的水平. 但当倾角为  $30^\circ$  时, 场增强因子出现了约为 3.573 的较低值, 这是由于裂纹中心的空气玻璃水平分界面较小, 第一个斜面下端反射的光线不可能都入射到这个平面上, 靠近第一斜面底端入射的光线被全反射后能直接入射到另外一侧的第一斜面上去, 进而发生部分透射. 在裂纹倾角为  $40^\circ$  时, 同样也出现了这种“光线泄露”的情况, 如图 8 所示即为光场分布图.



这时光线“泄露”进入狭缝的原因可以用简单的几何光线折射反射的知识来解释. 裂纹的内径  $2a$  是影响光线泄露很重要的因素, 当  $2a$  比较大而倾角不是太大时, 从第一斜面反射的光基本都能入射到 CD 面上, 进而发生全反射. 但当  $2a$  比较小的时候, 这种内径对裂纹的光线限制能力的影响就突显出来. 两种情况的场增强最大值点大都出现在裂纹的正下方, 所以这类裂纹的危害比较大.

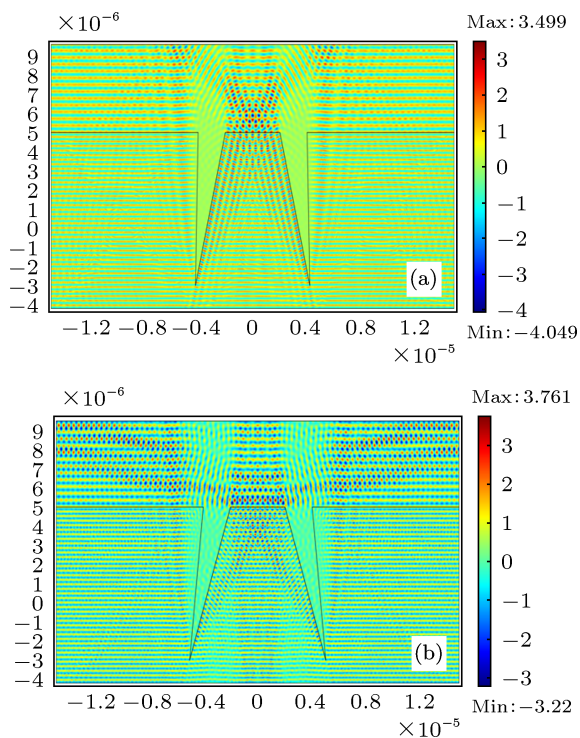


图8 内径  $2a = 4 \mu\text{m}$ ,  $w = 2 \mu\text{m}$ ,  $d = 8 \mu\text{m}$  时的两种赫兹型裂纹 (a) 倾角为  $15^\circ$  时的赫兹型裂纹; (b) 倾角为  $20^\circ$  时的赫兹型裂纹

进一步讨论裂纹倾角在  $45^\circ$  到  $48.2^\circ$  之间的情形, 当裂纹倾角为  $46^\circ$  时, 场增强因子为 4.023; 当裂纹倾角为  $47^\circ$  时, 场增强因子为 4.802. 这两种情况下的光场分布如图 9 所示.

这两种情况的光场增强大多出现在玻璃介质内部, 这是因为垂直向上入射的光线被第一个斜面全反射后直接进入玻璃介质中, 在玻璃介质内部发生干涉增强, 这时的裂纹危害也是很大的.

最后, 我们讨论裂纹倾角大于  $48.6^\circ$  的情况, 倾角为  $50^\circ$  和  $55^\circ$  的裂纹属于这种类型. 由于不满足全反射条件, 垂直向上的光线入射到第一斜面上进入狭缝中, 被狭缝的第二斜面反射进入裂纹开口的空气中, 在裂纹正上方的空气中发生干涉增强, 因而光场增强的较大值点出现在裂纹正上方的空气中, 这种裂纹的实际危害并不大, 尽管场增强因子比较大, 在 4 左右.

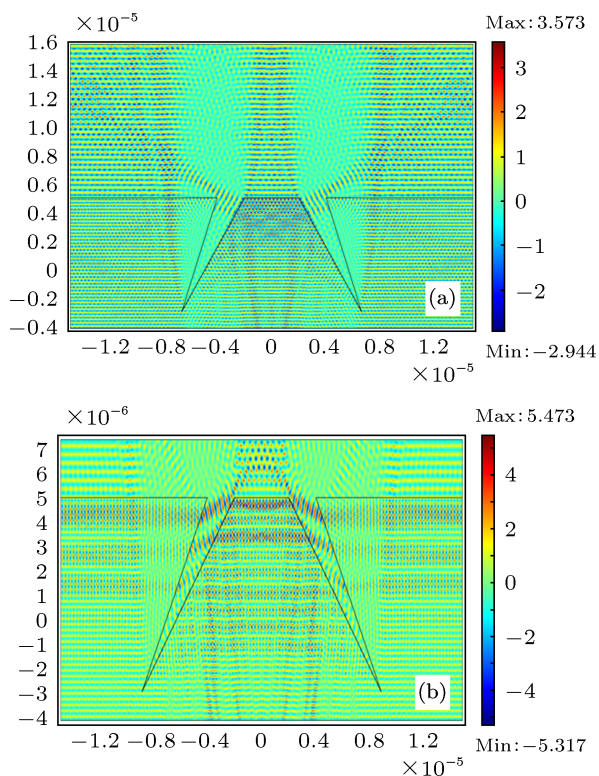


图9 内径  $2a = 4 \mu\text{m}$ ,  $w = 2 \mu\text{m}$ ,  $d = 8 \mu\text{m}$  时的两种赫兹型裂纹 (a) 倾角  $30^\circ$  的赫兹型裂纹; (b) 倾角为  $40^\circ$  时的赫兹型裂纹

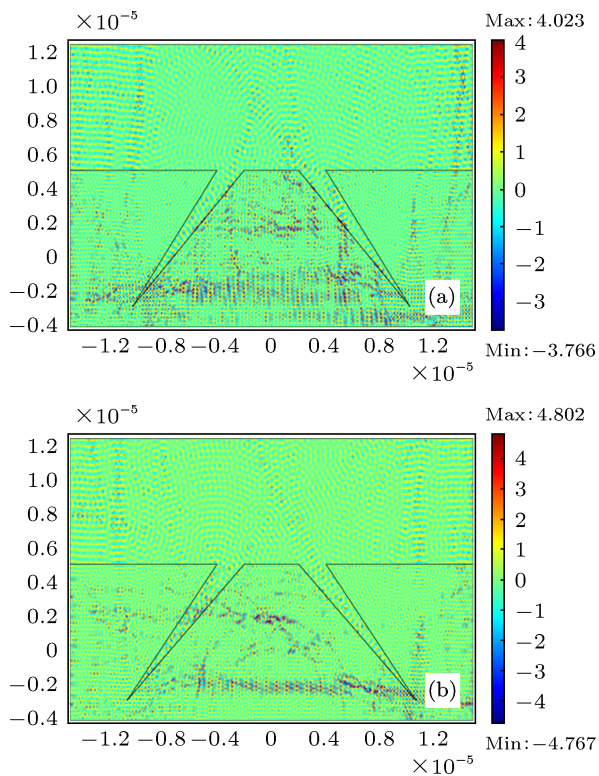


图10 倾角在  $45^\circ$  和  $48.2^\circ$  之间的两种裂纹的对比 (a) 裂纹倾角为  $46^\circ$  的赫兹型裂纹; (b) 裂纹倾角为  $47^\circ$  的赫兹型裂纹

所以, 对于赫兹型裂纹, 裂纹倾角小于  $20.9^\circ$  时, 场增强因子较小, 这种裂纹的危害不大; 倾角



在  $20.9^\circ$  到  $45^\circ$  之间, 场增强因子很大, 且光场增强的最大值点出现在裂纹正下方的玻璃介质中, 危害作用最大; 倾角在  $45^\circ$  时, 裂纹对光场的调制增强作用最小, 危害最小; 倾角大于  $45^\circ$  小于  $48.2^\circ$  时, 裂纹对光场的调制增强作用也十分大; 倾角大于  $48.2^\circ$  时, 裂纹对光场的调制增强作用较强, 但场强增强的最大值点在裂纹正上方的空气介质中, 危害比较大。

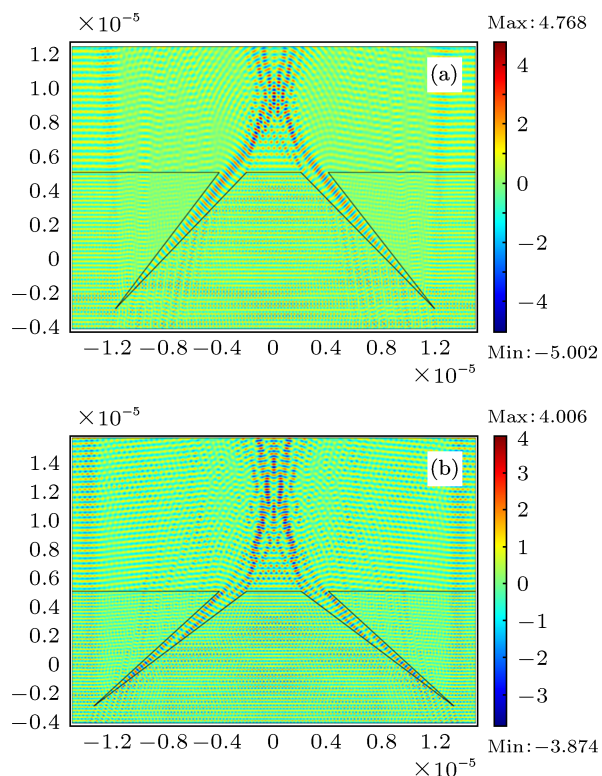


图 11 倾角大于  $48.2^\circ$  的两种裂纹的对比 (a) 裂纹倾角为  $50^\circ$  的赫兹型裂纹; (b) 裂纹倾角为  $55^\circ$  的赫兹型裂纹

### 3.2 微裂纹的演化对损伤增长影响的分析

通过图 5 和图 6 可以发现, 在一定范围内, 处于后表面的赫兹型裂纹对光场的调制增强作用会随着裂纹深度的增加而增大, 而随着裂纹宽度的增加基本不变. 这和文献 [14] 中 Hamza 等人的实验结果一致, 即裂纹的张开幅度和损伤阈值的下降有

着直接的关系. 这就很容易解释后表面的损伤增长是以  $e$  指数规律增长了, 因为亚表面微裂纹对光场有着强烈的调制增强作用, 使得裂纹附近的局部温度升高、折射率改变, 产生应力. 在多发脉冲持续作用下, 裂纹进一步扩展, 深度和宽度都逐渐增大, 对光场的调制能力进一步增强, 温度升高, 应力进一步扩展, 这就形成了恶性循环, 使得损伤增长的速率越来越快, 这很可能是导致损伤增长呈  $e$  指数增长规律的关键因素。

鉴于裂纹扩展对损伤增长的影响, 已有很多损伤减缓的方法被提出 [15–18], 其中  $\text{CO}_2$  激光预处理方法就是通过使微裂纹愈合来减缓损伤增长速率. 经处理后光学元件的损伤增长速率要比未经损伤处理光学元件的增长速率要小 [16], 尽管损伤增长速率有了很大的减缓, 但没有完全消除掉损伤增长现象. 这说明,  $\text{CO}_2$  激光预处理方法减缓损伤增长有一定的效果, 但还不能完全消除亚表面微裂纹等亚表面缺陷的存在, 因而也就无法彻底消除熔融石英材料的损伤增长现象, 这也从侧面证明了裂纹对损伤增长的重要影响。

## 4 结论

最有害的赫兹型裂纹是倾角为  $20.9^\circ$  到  $45^\circ$  之间的裂纹, 倾角大于  $45^\circ$  小于  $48.2^\circ$  的裂纹的危害也十分大, 而倾斜角度为  $45^\circ$  时的裂纹危害最小. 其他倾角的赫兹型裂纹的危害都不是特别大。

在一定范围内, 随着赫兹型微裂纹深度的增加, 裂纹对光场的调制能力也在增加, 并呈二次方的增长关系, 但宽度的增加不会带来裂纹光场调制能力的增加. 在损伤增长过程中, 伴随着裂纹的扩展演化, 裂纹尺寸的变大, 微裂纹对光场的调制增强作用也在增加, 进而增长速率越来越快, 这是促成损伤增长呈  $e$  指数增长的可能原因之一. 因此, 可以通过愈合亚表面微裂纹来减缓损伤增长。

- [1] Demos S G, Kozlowski M R, Staggs M C 2001 *International Society for Optics and Photonics* Boulder, October 16, 2000 p277
- [2] Bloembergen N 1973 *Applied Optics* **12** 661
- [3] Genin F Y, Salleo A, Pistor T V 2001 *JOSA A* **18** 2607
- [4] Wang Y, Xu Q, Chai L Q, Chen N, Zhu X Q 2005 *High Power Laser and Part. Beams* **17** 67 (in Chinese) [王毅, 许乔, 柴立群 2005 强激光与粒子束 **17** 67]
- [5] Chai L Q, Ge D B, Xu Q 2005 *Optical Technique* **31** 24 (in Chinese)

- [6] Tian D B, Yuan X D, Zu X T 2008 *High Power Laser and Part. Beams* **319** (in Chinese) [田东斌, 袁晓东, 祖小涛 2008 强激光与粒子束 **20** 319]
- [7] Hua J R, Li L, Xiang X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044206 (in Chinese) [花金荣, 李莉, 向霞 2011 物理学报 **60** 044206]
- [8] Li L, Xia X, Xiao-Tao Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074209
- [9] Zhang L, Chen W, Hu L 2013 *Applied Optics* **52** 980

- [10] Rubenchik A M, Feit M D 2002 *International Society for Optics and Photonics* Boulder 2002 p79
- [11] Norton M A, Hrubesh L W, Wu Z 2001 *Proc. SPIE*. 2001 p4347
- [12] Norton M A, Carr A V, Carr C W 2008 *International Society for Optics and Photonics Boulder Damage Symposium XL Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers* Boulder, September 22, 2008 p71321H
- [13] Lawn B, Wilshaw R 1975 *Journal of Materials Science* **10** 1049
- [14] Hamza A V, Siekhaus W J, Rubenchik A M *Boulder Damage International Society for Optics and Photonics* Boulder, October 01, 2001 p96
- [15] Hrubesh L W, Norton M A 2001 *LLNL REPORT* 2001 UCRL-JC-144295 p1
- [16] Yin W, Xu S Z, Zu X T 2009 *Atomic Energy Science and Technology* **43** 860 (in Chinese) [尹伟, 徐世珍, 祖小涛 2009 原子能科学技术 **43** 860]
- [17] Bass I L, Guss G M, Hackel R P 2005 *Boulder Damage Symposium XXXVII: Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers. International Society for Optics and Photonics* Boulder, September 19, 2005 p59910C
- [18] Gallais L, Cormont P, Rullier J L 2009 *Opt. Express* **17** p23488

## Systematic studies on the field enhancement effect of Hertzian microcracks

Cai Yue-Fei Lü Zhi-Wei<sup>†</sup> Li Sen-Sen Wang Yu-Lei Zhu Cheng-Yu  
Lin Dian-Yang He Wei-Ming

(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

(Received 4 July 2013; revised manuscript received 19 August 2013)

### Abstract

In order to study the effect of micro-cracks on the damage growth, the different field enhancements of the Hertzian micro crack are investigated by varying its angle, width, and depth. Simulation results show that the most harmful cracks are those with inclination angles from 20.9° to 45°, and the cracks with an angle less than 45° and larger than 48.2° are also harmful, but the cracks with inclination angle of 45° are the least harmful. Increasing the depth of the Hertzian cracks will lead to their field enhancement factors increasing with a quadratic relationship. However, increasing the width does not make it essential to the increase of its field enhancement ability. The development of micro-cracks can be approximated by increase its depth and width, so the development of cracks will lead to the increase of its light field modulation capability, and also to its damage growth rate to accelerate, following an exponential law.

**Keywords:** damage growth, sub-surface defects, Hertzian crack, light field enhancement

**PACS:** 42.60.Jf, 42.62.-b, 68.55.-a, 42.50.Wk

**DOI:** 10.7498/aps.62.234203

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lvzw@hit.edu.cn