

文章编号: 1000-4750(2015)10-0198-05

# 基体裂纹-异型夹杂相互作用焦散线实验研究

岳中文<sup>1</sup>, 韩瑞杰<sup>1</sup>, 郝文峰<sup>2</sup>, 刘 伟<sup>2</sup>, 姚学锋<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083); 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084)

**摘 要:** 该文通过透射式静态焦散线方法利用三点弯曲梁断裂实验对异型夹杂与基体裂纹的相互作用进行研究。首先得到不同夹杂情况下 I 型裂纹尖端的焦散斑图, 引入焦散斑纵横轴长之比 $\beta$ 反映焦散斑在夹杂作用下的畸变特性; 其次, 提取相应的焦散斑特征尺寸, 并得到 I 型裂纹的应力强度因子  $K_I$ ; 最后, 基于不同夹杂情况下裂尖焦散斑、裂尖应力强度因子与裂尖和夹杂之间距离的关系, 揭示不同夹杂对裂纹尖端应力场奇异性影响规律。实验研究结果为含异型夹杂结构的强度设计和断裂性能评估提供实验依据。

**关键词:** 静态焦散线; 异型夹杂; 应力强度因子  $K_I$ ; 焦散斑畸变; 裂纹

中图分类号: O346.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.03.0143

## EXPERIMENTAL STUDY ON CAUSTICS OF INTERREACTION BETWEEN MATRIX CRACK AND DIFFORMITY INCLUSION

YUE Zhong-wen<sup>1</sup>, HAN Rui-jie<sup>1</sup>, HAO Wen-feng<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, YAO Xue-feng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Three point bending beam fracture experiments were carried out by means of transmission type static caustics method to study the interaction of difformity inclusions and matrix crack. Firstly, the caustic patterns of mode-I crack tip of difformity inclusions were obtained, and then the  $\beta$  value was introduced, which was defined as the ratio of vertical and horizontal axis of caustic pattern, reflecting the distortion performance of caustic pattern under the effect of inclusion. Secondly, the corresponding feature dimensions of caustic pattern were extracted, and the stress intensity factor  $K_I$  of mode-I crack tips were obtained. Finally, the impact of difformity inclusions on stress field singularity around the crack tip was revealed based on the relationship of caustic pattern, stress intensity factor and the distance between crack tip and inclusion. The experiment provides reference for strength design and fracture performance assessment of structures containing inclusion.

**Key words:** static caustic; difformity inclusion; stress intensity factor  $K_I$ ; distortion; crack

工程中研究裂纹对构件强度的影响至关重要, 因此也成为当前人们研究的热点<sup>[1-4]</sup>。构件中含有各种形状的夹杂, 不同类型的夹杂将对结构裂尖场附近的应力场产生不同的影响<sup>[5]</sup>。了解夹杂物对裂

纹尖端附近应力场的作用, 对结构损伤、断裂机制分析和寿命预测有重要作用。

光学焦散线技术在研究材料断裂问题方面应用十分广泛<sup>[6-13]</sup>。1964 年 Manogg<sup>[14]</sup>第一次提出用

收稿日期: 2014-03-02; 修改日期: 2014-04-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51374210); 中央高校基本科研业务费项目(2009QL15); 国家自然科学基金重点项目(51134025); 高等学校学科创新引智计划项目(B14006)

通讯作者: 韩瑞杰(1986-), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事断裂力学方面研究(E-mail: hanruijiefd@163.com)。

作者简介: 岳中文(1975-), 男, 安徽人, 副教授, 博士, 博导, 主要从事断裂动力学方面研究(E-mail: zwyue75@163.com);

郝文峰(1985-), 男, 安徽人, 博士生, 主要从事断裂力学及复合材料力学方面研究(E-mail: haowenfeng2007@163.com);

刘 伟(1990-), 男, 吉林人, 博士生, 主要从事断裂力学方面研究(E-mail: liuwei\_in\_china@163.com);

姚学锋(1964-), 男, 河南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事实验力学和复合材料力学等方面研究(E-mail: yxf@mail.tsinghua.edu.cn)。

焦散线方法来解决力学实验中奇异性的问题。1970年 Theocaris 等<sup>[15]</sup>用静态焦散线方法确定裂尖塑性区和裂尖应力强度因子。Papadopoulos 和 Papanicolaou<sup>[16]</sup>对含单/双夹杂试件模型的断裂力学问题进行焦散线实验分析。姚学锋等<sup>[6-9]</sup>采用焦散线研究了聚合物材料含多裂纹的相互作用、复合材料的应力奇异性及梯度材料的动态断裂等力学行为。Li<sup>[17]</sup>等利用焦散线研究了正交复合材料的动态断裂问题。

本文采用透射式焦散线方法对含三角形、圆形以及正方形有机玻璃(PMMA)夹杂的三点弯曲试件进行静态断裂实验,得到不同夹杂情况下裂尖焦散斑及应力强度因子  $K_I$ , 揭示异型夹杂对基体 I 型裂纹裂尖焦散斑形状及应力强度因子的影响规律。

### 1 实验基本原理

本文实验采用静态焦散线方法,其基本原理在于利用纯几何光学的映射关系,将裂纹尖端应力集中区域的复杂变形状态转换成非常简单与清晰的阴影光学图形,进而确定应力强度因子。设备光路如图 1 所示,主要包括激光器、光学透镜、加载设备、力传感器、计算机和 CCD 相机。对于 I 型裂纹,裂尖应力强度因子  $K_I$  与垂直于裂纹方向的焦散斑最大尺寸  $d$  之间的关系是<sup>[15]</sup>:

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3(3.17)^{5/2} Z_0 c d_{\text{eff}}} d^{5/2} \quad (1)$$

其中:  $K_I$  为不同形状夹杂试件裂尖应力强度因子,  $Z_0$  为参考平面到试件平面的距离( $Z_0=500$  mm),  $c$  为材料的应力光学常数(对于环氧树脂,  $c=0.77 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/N),  $d_{\text{eff}}$  为试件的有效厚度(本实验试件  $d_{\text{eff}}=5$  mm)。



图 1 焦散线实验光路图

Fig.1 Diagrams of experimental optical system

为更好地说明裂尖焦散斑在夹杂作用下的变形特征,现引入焦散斑纵横轴向尺寸之比 $\beta$ :

$$\beta = \frac{\text{焦散斑纵向尺寸 } d_0}{\text{焦散斑横向尺寸 } d} \quad (2)$$

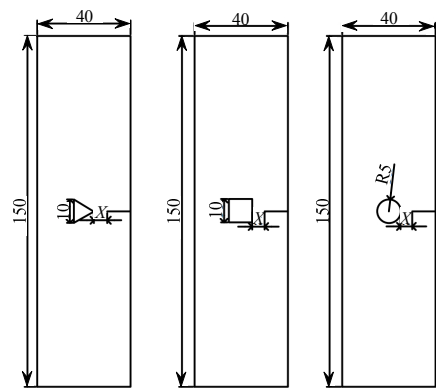
其意义在于反映焦散斑畸变程度的大小,  $\beta$  值越大(本文中  $\beta \geq 1$ ), 焦散斑受夹杂的影响就越大。

### 2 实验基本信息

#### 2.1 含夹杂试件

本实验采用的含不同形状有机玻璃(PMMA)夹杂的试件制备过程如下: 1) 固定夹杂: 将预制的三角形、圆形以及正方形有机玻璃夹杂固定于预先制作好的有机玻璃模具中; 2) 注胶及固化: 把配置好的环氧树脂沿着模具边缘缓慢注入模具中,并在常温下固化 24 h; 3) 脱模: 用刀具沿着模具边缘轻轻敲击,将固化成型的试件与模具分离,在此过程中避免用手触摸试件夹杂及周边区域,以免影响试件透光性; 4) 预制裂纹: 在试件正反两面贴上保护膜,标注预制裂纹的尺寸、方向,预制裂纹。

最终,含夹杂试件尺寸长 150 mm、宽 40 mm、厚 5 mm,内部夹杂尺寸分别为: 等边三角形边长 10 mm、圆形半径为 5 mm、正方形边长为 10 mm,夹杂的厚度与试件厚度相同。本实验裂尖初始位置到夹杂底部距离  $X$  分别为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 以及 5 mm。试件具体尺寸如图 2 所示。



(a) 等边三角形 (b) 圆形 (c) 正方形

图 2 含异型夹杂三种试件

Fig.2 Three types of specimens containing shaped inclusions

#### 2.2 焦散线实验

首先将试件放置于图 1 的光路中,利用力传感器对试件施加载荷  $P=227.95$  N。裂纹尖端焦散斑图像由 CCD 拍摄,然后确定焦散斑横向的最大尺寸。并通过式(1)确定应力强度因子  $K_I$ 。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 含异型夹杂试件的 I 型裂纹尖端焦散斑图

图 3、图 4、图 5 分别给出含等边三角形、圆形、正方形等夹杂的三点弯曲试件中裂纹尖端的焦散斑图。其中，所有的实验载荷保持一致， $P=227.95\text{ N}$ 。

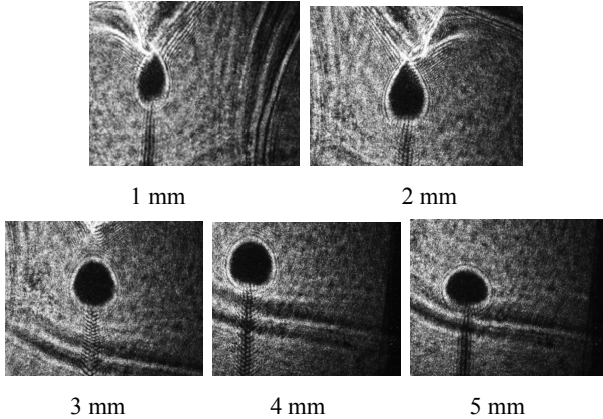


图 3 含三角形夹杂试件的 I 型裂纹尖端焦散斑图  
Fig.3 Caustic spots at the crack tips of model I in the specimen containing triangle inclusion

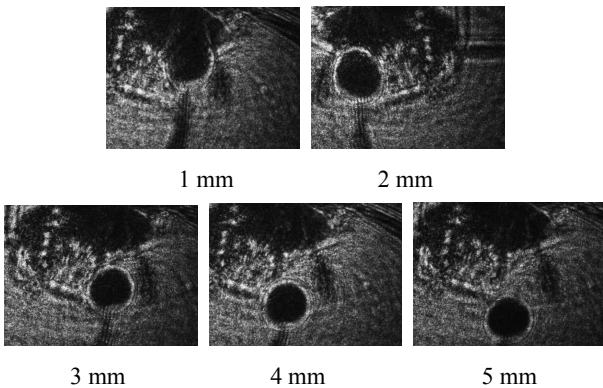


图 4 含圆形夹杂试件的 I 型裂纹尖端焦散斑图  
Fig.4 Caustic spots at the crack tips of model I in the specimen containing round inclusion

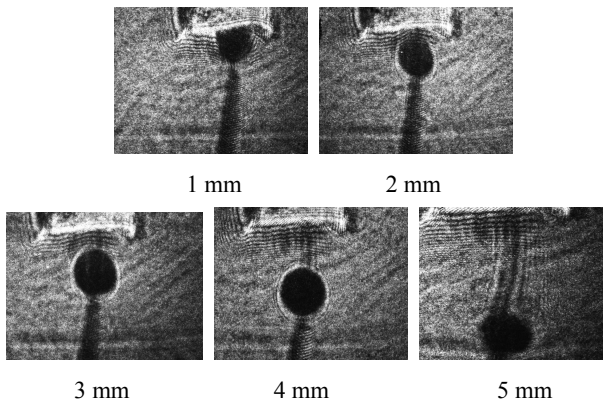


图 5 含正方形夹杂试件的 I 型裂纹尖端焦散斑图  
Fig.5 Caustic spots at the crack tips of model I in the specimen containing square inclusion

如图 3 所示，裂尖到三角形夹杂距离  $X=5\text{ mm}$  时，夹杂对于焦散斑的影响并不明显，焦散斑的形状与均质材料 I 型裂纹尖端焦散斑形状相同。当  $X=4\text{ mm}$  时，焦散斑横向尺寸变化不大，但是焦散斑形状有发生畸变的趋势。随着裂尖到夹杂距离的减小，焦散斑形状的畸变程度增大。当三角形夹杂试件中在裂尖距离夹杂小于  $2\text{ mm}$  时，畸变程度非常明显，焦散斑顶部逐渐变尖，呈“焰心”形，并关于裂纹初始方向所在的轴线对称。如图 4 所示，裂尖到圆形夹杂距离  $X=5\text{ mm}$  时，夹杂对于焦散斑的影响不明显。随着裂尖到圆形夹杂距离减小，焦散斑的形状由近似圆形逐渐向椭圆形改变，当圆形夹杂试件中裂尖距离夹杂小于  $3\text{ mm}$  时，畸变程度非常明显，呈椭圆形。如图 5 所示，随着裂尖到正方形夹杂距离减小，焦散斑逐渐变小，但形状没有发生明显变化，说明正方形夹杂对焦散斑畸变程度影响相对较小。

不同类型夹杂试件的焦散斑纵横向尺寸的比值  $\beta$  随裂尖到夹杂距离  $X$  的关系曲线如图 6 所示。随着裂尖到夹杂距离减小，含三种类型夹杂的  $\beta$  值都随之增大，焦散斑的畸变程度增大，但三角形夹杂试件的  $\beta$  值随距离  $X$  变化最大，正方形夹杂试件的变化最小，焦散斑形状改变不明显，而圆形夹杂试件的变化率介于两者中间，说明三角形夹杂对焦散斑变形程度的影响最大，圆形夹杂次之，正方形夹杂试件裂尖焦散斑受变形程度影响最小。

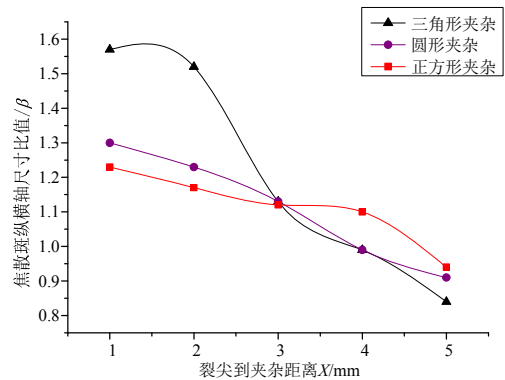


图 6 含不同类型夹杂的  $\beta$ -X 关系曲线  
Fig.6  $\beta$ -X curves of specimens containing different inclusions

#### 3.2 含异型夹杂三点弯曲试件 I 型裂纹尖端应力强度因子 $K_I$

含不同类型夹杂三点弯试件的静态焦散斑特征尺寸变化规律如图 7 所示；含异型夹杂试件裂尖应力强度因子  $K_I$  随裂尖到夹杂距离  $X$  的变化规律及在相同裂纹长度条件下无夹杂试件裂尖应力强



度因子经验值<sup>[18]</sup>对比曲线如图 8 所示。

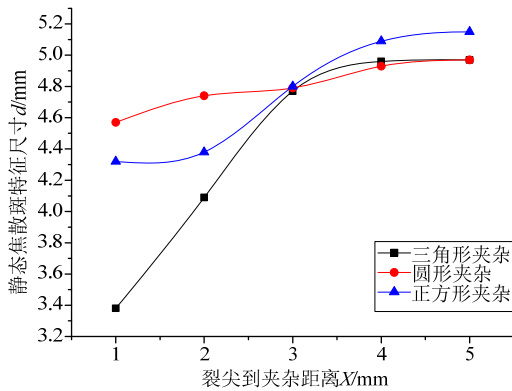


图 7 含不同类型夹杂试件的  $d$ - $X$  曲线

Fig.7  $d$ - $X$  curves of specimens containing different inclusions

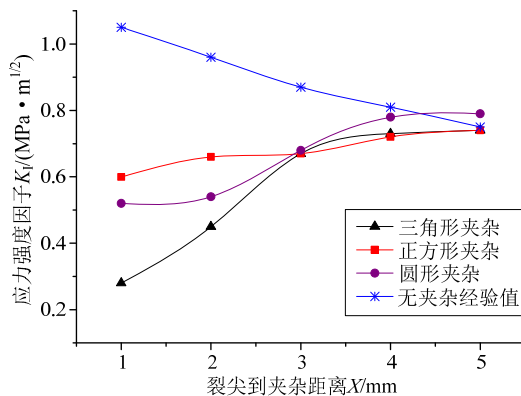


图 8 含不同类型夹杂试件的  $K_I$ - $X$  曲线

(无夹杂试件与含夹杂试件保持相同裂纹长度)

Fig.8  $K_I$ - $X$  curves of specimens containing different inclusions (the same length of cracks for specimen without inclusion and specimen containing different inclusions)

显然, 含不同夹杂(等边三角形、圆形、正方形)试件的静态焦散斑特征尺寸  $d$  以及其裂尖应力强度因子  $K_I$  值都随着裂尖向夹杂靠近而减小, 夹杂将使试件的承载能力降低, 但  $d$  以及  $K_I$  减小的幅度因所含夹杂的形状和夹杂与裂尖相对位置的不同而产生很大差异。裂尖距夹杂较远时, 焦散斑特征尺寸及裂尖应力强度因子相对较大。当裂尖到夹杂距离  $X=3$  mm 时, 三者应力强度因子几乎相等。随着裂尖到夹杂距离的靠近, 三者之间的差异性开始显现。裂尖靠近夹杂过程中, 三角形夹杂试件的  $K_I$  减小幅度最大, 圆形夹杂试件次之, 而正方形夹杂试件的  $K_I$  下降最缓慢。根据三种不同夹杂试件实验结果对比可知, 沿裂纹方向上夹杂的几何图形界面处所对应的曲率将对裂尖应力强度因子产生很大影响。对于三角形夹杂, 其顶角处曲率无穷大, 夹杂对裂尖焦散斑影响最为明显; 对于正方形夹杂, 其几何图形曲率为 0, 夹杂对裂尖焦散斑影响最不

明显; 对于圆形夹杂, 由于其几何图形沿裂纹方向上所对应的曲率介于三角形和正方形之间, 其裂尖焦散斑受夹杂影响程度也介于二者之间。说明在距离夹杂较近受夹杂影响明显的区域内, 三角形夹杂试件裂尖附近应力场受夹杂影响变形程度最大, 圆形夹杂次之, 正方形夹杂试件裂尖附近应力场受夹杂影响程度最小。

从图 8 所示含相同裂纹长度无夹杂试件裂尖应力强度因子经验值与含异型夹杂试件裂尖应力强度因子对比曲线可知, 含夹杂试件  $X=5$  mm 情况下具有相同长度裂纹时, 无夹杂试件应力强度因子经验值与含夹杂试件应力强度因子处于同一水平, 说明在裂尖距夹杂较远处, 夹杂对裂尖应力强度因子影响较小; 随着含夹杂试件裂尖到夹杂距离  $X$  的减小, 相同裂纹长度时无夹杂试件应力强度因子值逐渐增加, 而含有夹杂试件裂尖应力强度因子受夹杂影响越来越明显, 其值不断减小。

## 4 结论

本文对基体裂纹-异型夹杂相互作用进行了焦散线实验研究。主要结论如下:

(1) 含异型夹杂(等边三角形、圆形、正方形)试件夹杂距裂尖越近, 焦散斑特征尺寸越小, 同时畸变程度越大。当裂尖距夹杂较近时, 含三角形夹杂的焦散斑呈“焰心”形, 含圆形夹杂的焦散斑呈椭圆形, 含正方形夹杂的焦散斑形状随裂尖到夹杂距离  $X$  的减小变化最小。

(2) 引入焦散斑纵横轴之比  $\beta$  可以有效地表示焦散斑受夹杂影响后的畸变程度。随着裂尖不断向夹杂靠近,  $\beta$  值不断增大, 焦散斑在夹杂的影响下畸变越来越明显。

(3) 相同裂纹长度时, 与无夹杂试件裂尖应力强度因子经验值相比含夹杂试件裂尖距夹杂较远处, 夹杂对裂尖应力强度因子影响较小; 随着含夹杂试件裂尖到夹杂距离  $X$  的减小, 相同裂纹长度时无夹杂试件应力强度因子值逐渐增加, 而含有夹杂试件裂尖应力强度因子受夹杂影响越来越明显, 其值不断减小。

(4) 当裂尖距夹杂较近时, 三角形夹杂对裂尖应力强度因子产生的影响最大, 正方形夹杂对裂尖应力强度因子产生的影响最小, 而圆形夹杂介于两者中间。沿裂纹方向上夹杂的几何图形界面处所对应的曲率对裂尖奇异应力场分布影响很大, 这也将

对工程结构中夹杂的选取及其空间分布方式的确定起到指导作用。

#### 参考文献:

- [1] 卿龙邦, 李庆斌, 管俊峰, 王娟. 基于虚拟裂缝模型的混凝土断裂过程区研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 112—116, 132.  
Qing Longbang, Li Qingbin, Guan Junfeng, Wang Juan. Study of concrete fracture process zone based on fictitious crack model [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 112—116, 132. (in Chinese)
- [2] 任利, 谢和平, 谢凌志, 艾婷. 基于断裂力学的裂隙岩体强度分析初探[J]. 工程力学, 2012, 30(2): 156—162, 168.  
Ren Li, Xie Heping, Xie Lingzhi, Ai Ting. Preliminary study on strength of cracked rock specimen based on fracture mechanics [J]. Engineering Mechanics, 2012, 30(2): 156—162, 168. (in Chinese)
- [3] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2012, 30(4): 59—67.  
Nie Jianguo, Wang Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 30(4): 59—67. (in Chinese)
- [4] Lee P Y, Sun Z C, Liao M, et al. The study of crack mechanism during arc brazing of cooling pipe to ITER magnet support system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 1—4.
- [5] Jajam K C, Tippur H V. Role of inclusion stiffness and interfacial strength on dynamic matrix crack growth: An experimental study [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(9): 1127—1146.
- [6] Yao X F, Xu W. Recent application of caustics on experimental dynamic fracture studies [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2011, 34(6): 448—459.
- [7] Yao X F, Xu W, Bai S L, Yeh H Y. Caustics analysis of the crack initiation and propagation of graded materials [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(3/4): 953—962.
- [8] Yao X F, Xu W, Arakawa K, Takahashi K, T Mada. Dynamic optical visualization on the interaction between propagating crack and stationary crack [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(2): 195—207.
- [9] 许蔚, 姚学锋, 金观昌. 功能梯度材料 II 型动态裂纹尖端的焦散线分析[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 30—35.  
Xu Wei, Yao Xuefeng, Jin Guanchang. Caustics analysis of mode II dynamic crack tip in functionally gradient materials [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 30—35. (in Chinese)
- [10] 姚学锋, 倪受庸, 方竞. 关于瞬态应力强度因子和裂纹扩展加速度之间的关系探讨[J]. 工程力学, 1996, 13(3): 33—39.  
Yao Xuefeng, Ni Shouyong, Fang Jing. An analysis of the relations between the stress intensity factor and crack acceleration [J]. Engineering Mechanics, 1996, 13(3): 33—39. (in Chinese)
- [11] 许蔚, 徐曼琼, 姚学锋, 等. 正交复合材料 I 型裂纹动态响应焦散线实验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 173—177.  
Xu Wei, Xu Manqiong, Yao Xuefeng, et al. Experimental study of caustics of mode-I dynamic crack response in orthotropic composites [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(3): 173—177. (in Chinese)
- [12] 杨仁树, 杨立云, 岳中文, 等. 爆炸载荷下缺陷介质裂纹扩展的动焦散试验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 187—192.  
Yang Renshu, Yang Liyun, Yue Zhongwen, et al. Dynamic caustics experiment of crack propagation in material containing flaws under blasting load [J]. Journal Of China Coal Society, 2009, 34(2): 187—192. (in Chinese)
- [13] 岳中文, 杨仁树, 郭东明, 等. 爆炸作用下空孔周围应力场变化的模型实验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(5): 624—628.  
Yue Zhongwen, Yang Renshu, Guo Dongming, et al. Model experimental of stress field around empty hole under blasting loading [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 624—628. (in Chinese)
- [14] Manogg P. Anwendungen der schattenoptik zur untersuchung des zerreissvor-gangs von platen [D]. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 1964.
- [15] Theocaris P S. Local yielding around a crack tip in plexiglas [J]. Journal of Applied Mechanics. 1970, 37(2): 409—415.
- [16] Papadopoulos G A, Papanicolaou G C. Dynamic crack propagation in rubber-modified composite models [J]. Journal of Materials Science, 1988, 23(10): 3421—3434.
- [17] Kezhuang Gong, Zheng Li. Caustics method in dynamic fracture problem of orthotropic materials [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(8): 614—619.
- [18] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 100.  
China Aviation Academy. Handbook of stress intensity factors [M]. Beijing: Science Press, 1981: 100. (in Chinese)