

文章编号:1671-251X(2020)02-0073-05

DOI:DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019120017

# 预制裂隙岩石单轴压缩声发射特征研究

牛心刚<sup>1,2,3</sup>

- (1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037;
2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037;
3. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)



扫码移动阅读

**摘要:**为了研究预制裂隙岩石失稳破坏过程中声发射特征,对预制不同倾角裂隙岩石进行了单轴压缩声发射试验,分析了预制裂隙岩石变形破坏特征及声发射信号变化规律。结果表明:随着预制裂隙倾角的减小,岩石试件的抗压强度逐渐降低,达到峰值应力的时间逐渐缩短,破坏时的轴向应变逐渐减小,试件由拉伸劈裂破坏向剪切滑移破坏转变;随着预制裂隙倾角减小,试件首次出现声发射能量和振铃计数峰值的时间提前、所需加载的轴向应力减小;声发射累计振铃计数随加载时间的增加呈非线性上升趋势,且预制裂隙倾角越小,声发射累计振铃计数上升速率越快。

**关键词:**煤炭开采;岩体动力灾害;岩石力学;预制裂隙岩石;裂隙倾角;声发射;单轴压缩  
**中图分类号:**TD315      **文献标志码:**A

## Research on acoustic emission characteristics of prefabricated fissure rock under uniaxial compression

NIU Xingang<sup>1,2,3</sup>

- (1. National Key Laboratory of Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China; 2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China;
3. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:**In order to research acoustic emission (AE) characteristics during instability and failure of prefabricated fissure rock, uniaxial compression AE test of prefabricated fissure rock with different inclination angles was carried out, and deformation and failure characteristics of prefabricated fissure rock and variation law of AE signals were analyzed. The results show that with the decrease of prefabricated fissure inclination angle, compressive strength of rock specimens gradually decreases, time to reach the peak stress gradually shortens, axial strain during rock failure gradually decreases, and specimen changes from tensile splitting failure to shear sliding failure. With the decrease of prefabricated fissure inclination angle, the time when the peak of AE energy and ringing count first appear in specimen is advanced and the axial stress required for loading decreases. The cumulative AE ringing count shows a nonlinear upward trend with the increase of loading time, and the smaller the prefabricated fissure inclination angle is, the faster the cumulative AE ringing count rises.

**Key words:** coal mining; rock mass dynamic disaster; rock mechanics; prefabricated fissure rock; fissure inclination angle; acoustic emission; uniaxial compression

收稿日期:2019-12-09;修回日期:2020-02-11;责任编辑:盛男。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804206,2017YFC0804208)。

作者简介:牛心刚(1990—),男,安徽淮北人,助理研究员,博士研究生,主要从事煤矿瓦斯动力灾害防治方面的研究工作,E-mail:xingangniu@163.com。

引用格式:牛心刚. 预制裂隙岩石单轴压缩声发射特征研究[J]. 工矿自动化,2020,46(2):73-77.

NIU Xingang. Research on acoustic emission characteristics of prefabricated fissure rock under uniaxial compression[J]. Industry and Mine Automation,2020,46(2):73-77.

## 0 引言

岩石破裂是其内部的微裂隙萌生、扩展、贯通,直至出现宏观裂隙的过程,研究该过程对深部开采中岩体动力灾害的预测具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。实际工程中很多岩体含有断层、节理及裂隙等宏观构造,岩石受力破裂过程中伴随有声发射现象<sup>[3]</sup>,因此研究预制裂隙岩石破裂特征及破裂过程中声发射信号变化规律可为岩体动力灾害预测提供理论基础。

众多学者对岩石受力破裂特征及破裂过程的声发射信号变化规律开展了大量研究工作。付金伟等<sup>[4]</sup>利用透明树脂材料制作双裂隙试件,构建了新型弹脆性本构关系,详细分析了试件的裂隙扩展与贯通过程。李地元等<sup>[5]</sup>利用 SHPB 试验平台对含预制裂隙的矩形大理岩试样进行动态冲击试验,研究了端部裂隙形态对岩石动态力学特性及裂隙扩展的影响。赵振等<sup>[6]</sup>研究了预制裂隙煤样的破坏特征,发现了煤样不同加载阶段声发射分形维数变化规律可作为煤岩动力灾害的前兆信息。Yang Shengqi 等<sup>[7-8]</sup>利用高速摄像技术研究了单裂隙及 2 条平行非共面裂隙砂岩的破裂失稳过程,分析了裂隙倾角和长度、岩桥倾角等对裂隙扩展贯通及力学特性的影响。苏海健等<sup>[9]</sup>对含纵向裂隙的砂岩进行了单轴压缩试验,结果表明其峰值强度和峰值应变随裂隙长度的增大先减小后增大,试样沿裂隙尖端发生劈裂破坏。宋彦琦等<sup>[10]</sup>通过对预制裂隙大理岩试样进行加卸载试验,发现在不同加载条件下裂纹高发在与裂纹面夹角为 $-100^{\circ}\sim-130^{\circ}$ 的区域。贾炳等<sup>[11]</sup>探究了煤样在加载过程中的声发射响应规律。张艳博等<sup>[12]</sup>基于频谱分析和信息熵理论,采用单轴压缩声发射试验研究了干燥与饱水状态下的煤矸石破裂全过程及多参数声发射前兆信息变化规律。王林均等<sup>[13]</sup>采用单轴压缩声发射试验研究了多种脆性岩石破裂特征和声发射信号规律,得到了岩石试件内部颗粒间的胶结强度对声发射累计振铃计数、声发射能量的影响。左建平<sup>[14]</sup>采用单轴压缩声发射试验研究了标准岩样、标准煤样和煤岩组合体的破裂特征和声发射信号规律,得到了三者之间破坏机制的差异。

为了研究预制裂隙岩石失稳破坏过程中声发射特征,在上述研究的基础上,笔者开展了预制不同倾角裂隙岩石的单轴压缩声发射试验,分析了预制裂隙岩石变形破坏特征及声发射信号变化规律。

## 1 单轴压缩试验

试验所用岩石取自淮南矿业(集团)有限责任公

司潘北煤矿细砂岩层,试验共制备 8 块高度为 100 mm、直径为 50 mm 的标准试件,分为 4 组,其中 1 组为完整试件,其余 3 组为预制倾角 $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 裂隙试件(预制裂隙倾角定义为裂隙与轴向加载方向的夹角),如图 1 所示。采用金刚石电动切割机对试件预制裂隙,裂隙尺寸为长 60 mm、宽 3 mm、深 20 mm。试验采用 RMT-150B 刚性伺服控制压力机和 DS5-16B 多通道声发射监测设备。

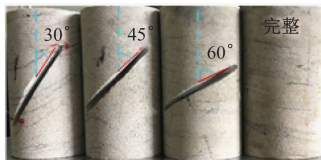


图 1 试件制备

Fig. 1 Specimens preparation

## 2 试验结果

### 2.1 应力-应变曲线及宏观破坏形态

完整及预制裂隙试件的应力-应变曲线及宏观破坏形态如图 2 所示。

由图 2(a)可知:完整试件抗压强度较大,为 64.45 MPa,峰后应力-应变表现出应变脆性特征,轴向应变较大,为 0.016 0;完整试件应力-应变曲线由压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和残余变形阶段构成;完整试件的破坏类型以拉伸劈裂破坏为主。

由图 2(b)可知:在相同载荷作用下,预制裂隙尖端产生的应力集中使试件更易发生破坏,进而影响 $60^{\circ}$ 预制裂隙试件抗压强度,表现为试件抗压强度降低,为 49.35 MPa,峰后应变脆性特征有所增强,轴向应变减小,为 0.014 4; $60^{\circ}$ 预制裂隙试件的新生裂隙扩展形式<sup>[15]</sup>主要为预制裂隙两端产生拉伸翼裂隙及剪切反翼裂隙并扩展至试件顶底部; $60^{\circ}$ 预制裂隙试件的破坏类型以预制裂隙两端的拉伸破坏为主,剪切破坏为辅。

由图 2(c)可知:由于 $45^{\circ}$ 预制裂隙走向与加载方向较 $60^{\circ}$ 预制裂隙更加倾向于平行,预制裂隙尖端应力集中增强,致使 $45^{\circ}$ 预制裂隙试件抗压强度较 $60^{\circ}$ 预制裂隙试件降低,为 38.53 MPa,峰后应力-应变也表现出较强的应变脆性特征,轴向应变进一步减小,为 0.011 4; $45^{\circ}$ 预制裂隙试件的新生裂隙扩展形式主要为预制裂隙上端产生拉伸翼裂隙及拉剪复合反翼裂隙并扩展至试件顶底部,预制裂隙下端产生剪切次生裂隙并扩展至试件底部; $45^{\circ}$ 预制裂隙试件的破坏类型以预制裂隙两端的拉剪复合型破坏为主。

由图 2(d)可知:由于 $30^{\circ}$ 预制裂隙走向与加载方向倾向于平行,试件易沿预制裂隙发生剪切滑移

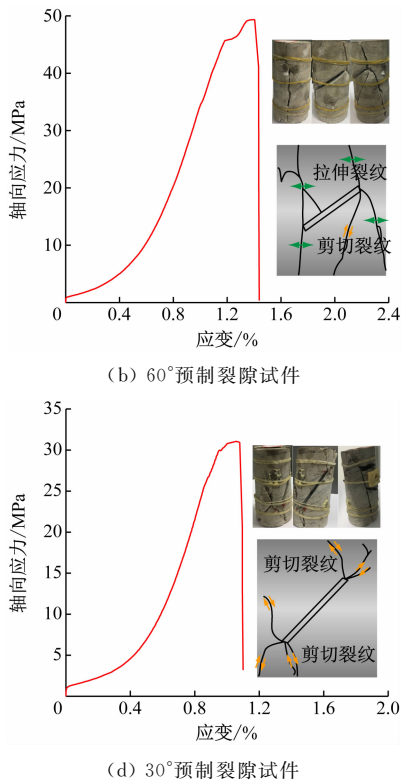
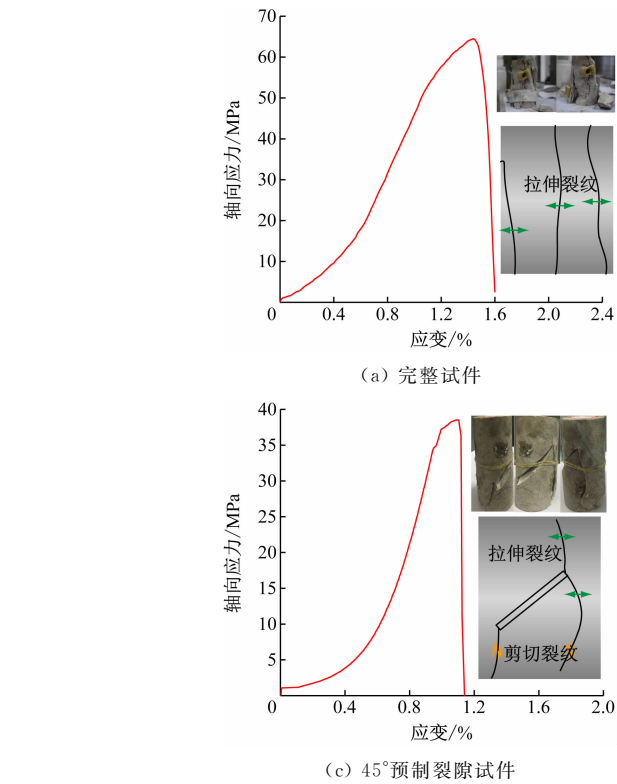


图 2 完整及预制裂隙试件应力-应变曲线及宏观破坏形态

Fig. 2 Stress-strain curves and macroscopic failure morphology of complete and prefabricated fissure specimens

破坏,致使 30° 预制裂隙试件抗压强度比 60° 和 45° 预制裂隙试件都小,为 30.94 MPa,峰后应力-应变也表现出较强的应变脆性特征,轴向应变进一步减小,为 0.011 0;30° 预制裂隙试件的新生裂隙扩展形式主要为预制裂隙两端产生剪切翼裂隙和剪切次生裂隙并扩展至试件顶底部;30° 预制裂隙试件的破坏类型以预制裂隙两端的纯剪切破坏为主。

综合上述分析可得:压力机加载过程中,试件易在预制裂隙尖端产生应力集中,宏观表现为预制裂隙处新生裂隙的萌生、扩展及试件的最终脆性断裂;随着预制裂隙倾角的减小,试件的破坏特征由拉伸劈裂破坏向剪切滑移破坏转变。

2.2 声发射特征

各预制裂隙试件单轴压缩破坏过程应力-时间曲线、声发射能量及振铃计数变化曲线如图 3 所示。在预制裂隙试件的压密阶段,压力机的加载应力较小,原生裂隙变形闭合,次生裂隙萌生发育,此阶段形成的微裂隙较少,裂隙间的摩擦错动和拉剪破坏能力弱,试件破坏产生的弹性波较少,裂隙压密、萌生和扩展规模处在微观级别,此时声发射能量和振铃计数处于较低水平。随着压力机的加载应力升高,压力机输入的能量以弹性能形式储存在试件中,此时原生裂隙压密和新生裂隙萌生扩展。预制裂隙倾角分别为 60,45,30° 时,声发射能量和振铃计数首次出现峰值点对应的时间分别为 101,75,37 s,轴

向应力分别为 25.6,18.9,9.2 MPa。由此可见,随着预制裂隙倾角的减小,试件首次出现宏观裂隙(声发射能量和振铃计数首次出现峰值点)时的时间提前、所需加载的轴向应力变小。这是由于随着预制裂隙倾角减小,试件的破坏特征由拉伸劈裂破坏向剪切滑移破坏转变,破裂面间的摩擦效应增强,试件破坏释放的弹性波增多。试件表面首次出现宏观裂隙时,储存在试件中的弹性能以试件表面宏观裂隙薄弱面为释放通道进行释放,试件发出爆鸣声,声发射能量和振铃计数呈突变增长,表现为“孤震”型。

预制裂隙试件声发射累计振铃计数曲线如图 4 所示。可看出累计振铃计数随加载时间的增加呈非线性上升趋势,其中 30° 预制裂隙试件声发射累计振铃计数随加载时间的增加上升最快,60° 预制裂隙试件声发射累计振铃计数随加载时间的增加上升最慢。这主要是由于 30° 预制裂隙两端产生的新生裂隙数量最多、扩展速度最快,能量释放最剧烈;60° 预制裂隙走向与加载方向倾向于垂直,60° 预制裂隙两端产生的新生裂隙数量较 30,45° 预制裂隙两端多,但新生裂隙扩展速度最缓慢,能量释放最弱。

3 结论

(1) 预制裂隙的存在影响岩石试件的抗压强度和变形破坏特征,主要表现为随着预制裂隙倾角的减小,试件的抗压强度逐渐降低,达到峰值应力的时

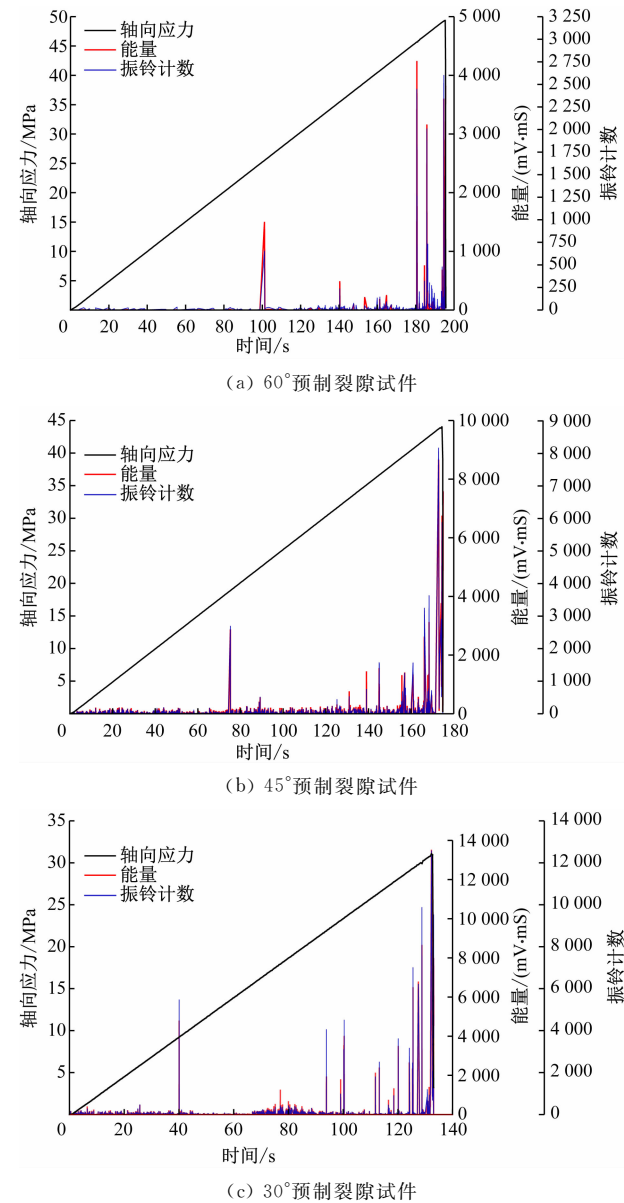


图 3 预制裂隙试件声发射参数、应力—时间曲线  
Fig. 3 Acoustic emission parameters and stress-time curves of prefabricated fissure specimens

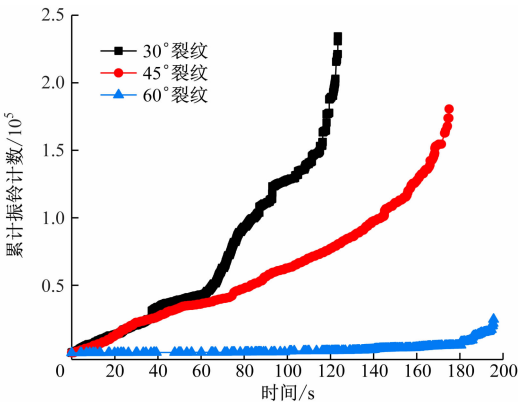


图 4 预制裂隙试件声发射累计振铃计数曲线  
Fig. 4 Cumulative acoustic emission ringing count curve of prefabricated fissure specimens

间逐渐缩短,破坏时的轴向应变逐渐减小,试件的破坏特征由拉伸劈裂破坏向剪切滑移破坏转变。

(2) 随着预制裂隙倾角的减小,试件首次出现声发射能量和振铃计数峰值的时间提前、所需加载的轴向应力减小;声发射累计振铃计数随加载时间的增加呈非线性上升趋势,且预制裂隙倾角越小,声发射累计振铃计数上升速率越快。

参考文献 (References):

[1] 陈军涛,郭惟嘉,尹立明,等.深部开采底板裂隙扩展演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2298-2306.  
CHEN Juntao, GUO Weijia, YIN Liming, et al. Experimental study of floor cracking under deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2298-2306.

[2] 申建军,刘伟韬,张勤,等.含双裂纹试件破坏特性力学试验及数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(12):1397-1401.  
SHEN Jianjun, LIU Weitao, ZHANG Qin, et al. Numerical simulation and mechanical experiment on failure behaviour of specimens containing pre-existing two flaws [J]. Journal of Liaoning Technical University ( Natural Science ), 2016, 35 ( 12 ): 1397-1401.

[3] 朱振飞,陈国庆,肖宏跃,等.基于声发射多参量分析的岩桥裂纹扩展研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):909-918.  
ZHU Zhenfei, CHEN Guoqing, XIAO Hongyue, et al. Study on crack propagation of rock bridge based on multi parameters analysis of acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 909-918.

[4] 付金伟,朱维申,谢富东,等.岩石中三维双裂隙组扩展和贯通过程的试验研究和弹脆性模拟[J].岩土力学,2013,34(9):2489-2495.  
FU Jinwei, ZHU Weishen, XIE Fudong, et al. Experimental studies and elasto-brittle simulation of propagation and coalescence process of two three-dimensional flaws in rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2489-2495.

[5] 李地元,韩震宇,孙小磊,等.含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2872-2883.  
LI Diyuan, HAN Zhenyu, SUN Xiaolei, et al. Characteristics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split hopkinson pressure bar tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2872-2883.

[6] 赵振,刘孝传,马德鹏,等.预制裂隙煤样损伤破坏力学及声发射特征分析[J].矿业研究与开发,2019,39(1):63-67.

- ZHAO Zhen, LIU Chuanxiao, MA Depeng, et al. Analysis of damage and failure mechanism and acoustic emission characteristics of coal samples with prefabricated cracks [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(1): 63-67.
- [7] YANG Shengqi, JING Hongwen. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression [J]. International Journal of Fracture, 2011, 168(2): 227-250.
- [8] YANG Shengqi, TIAN Wenling, HUANG Yanhan, et al. An Experimental and numerical study on cracking behavior of brittle sandstone containing two non-coplanar fissures under uniaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(4): 1497-1515.
- [9] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 等. 纵向裂隙对砂岩力学特性影响试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 644-649.
- SU Haijian, JING Hongwen, ZHAO Honghui, et al. Experimental study on the influence of longitudinal fissure on mechanics characteristic of sandstone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 644-649.
- [10] 宋彦琦, 李名, 王晓, 等. 基于高速摄影的单预制裂纹大理岩加卸载试验 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 773-781.
- SONG Yanqi, LI Ming, WANG Xiao, et al. Observation of marble with single pre-existing crack using high-speed photography under loading and unloading conditions [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 773-781.
- [11] 贾炳, 倪小明, 苏承东. 煤样加载过程声发射响应特征试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(7): 33-36.
- JIA Bing, NI Xiaoming, SU Chengdong. Experimental study on response features of acoustic emission to coal samples during loading process [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 33-36.
- [12] 张艳博, 梁鹏, 刘祥鑫, 等. 基于声发射信号主频和熵值的岩石破裂前兆试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 2959-2967.
- ZHANG Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2959-2967.
- [13] 王林均, 张搏, 钱志宽, 等. 单轴压缩下两类脆性岩石声发射特征试验研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 699-705.
- WANG Linjun, ZHANG Bo, QIAN Zhikuan, et al. Experimental investigation of the acoustics emission characteristics of two types of brittle rocks under uniaxial compression [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 699-705.
- [14] 左建平, 裴建良, 刘建锋, 等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1564-1570.
- ZUO Jianping, PEI Jianliang, LIU Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1564-1570.
- [15] TANG C A, LIN P, WONG R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-part II: numerical approach [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 925-939.