

# 基于声发射活动参数的岩石破裂过程应力阈值确定

赵兴东, 徐继涛, 姬 祥, 刘建坡  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 在实验室应用声发射监测系统,对 25 块花岗岩样进行单轴压缩实验.通过连续实时监测花岗岩样破裂全过程中事件率、累计能量、能率、持续时间和振幅等声发射源特征参数的变化规律,获得岩样破裂过程各加载阶段的应力阈值.将岩石试件破裂全过程中各个阶段的应力阈值与峰值强度进行比较,并与以往实验结果对比,发现岩石变形特性和裂纹演化规律具有统一性.

**关 键 词:** 声发射;岩石破裂;单轴压缩;应力阈值

中图分类号: TU 45      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2017)02-0270-05

## Defining Stress Thresholds of Rock Failure Process Based on Acoustic Emission Activity Parameters

ZHAO Xing-dong, XU Ji-tao, JI Xiang, LIU Jian-po  
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Xing-dong, E-mail: zhaoxingdong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The uniaxial compression experiments were carried out on 25 granite samples by application of acoustic emission testing system in the laboratory. Through continuous real-time monitoring these characteristics of the acoustic emission sources such as event rate, cumulative energy, energy rate, time duration and amplitude in the failure process of granite rock samples, the stress thresholds at each loading stage were obtained in the whole failure process. Furthermore, by comparing the stress threshold at each stage with peak strength during the process of rock fracturing and with previous experimental results, we find that rock deformation characteristics are consistent with the evolution of the crack in rock.

**Key words:** acoustic emission; rock fracture; uniaxial compression; stress threshold

岩石破裂失稳机理一直是研究工程岩体破坏的基础.根据岩石破裂过程中产生的物理力学现象,国内外学者运用多种技术手段研究岩石失稳机理,如 X 射线衍射仪<sup>[1]</sup>、CT 扫描技术<sup>[2]</sup>、红外遥感技术<sup>[3]</sup>,以及声发射技术等.岩石破裂过程中各特征值的确定对岩体工程灾害预测与防治具有重要的指导作用.本文运用声发射信号特性变化确定单轴压缩下岩石破裂过程各应力阈值,为判别工程岩体稳定性提供参考和依据.

依据岩石试件的应力-应变曲线和裂纹体积变化曲线,文献[4-7]将岩石破裂全过程定义为五个阶段:①裂纹闭合阶段;②线弹性阶段;③裂

纹起始阈值和裂纹稳定发展阶段;④临界能量释放和裂纹不稳定发展阶段;⑤破裂和峰值后阶段.但是,Eberhardt 等<sup>[8]</sup>认为,岩石裂纹稳定扩展阶段可分为两部分:裂纹初始到裂纹相互作用阶段和裂纹相互作用到裂纹破裂贯通阶段.Chang 等<sup>[9]</sup>依据声发射信号参数和体积应变曲线对岩石破裂过程应力阈值进行类似的划分.综合国内外学者的研究成果,确定岩石破裂过程中各阶段应力阈值的方法主要有:裂纹体积应变法、轴向应变法、轴向刚度法、环形应变法、能量计算判别法、声发射信号参数和矩张量鉴定法,以及裂纹扩展速度判断法等<sup>[4,10-16]</sup>.

Griffith<sup>[10]</sup>从能量的角度对岩石变形破裂过程中裂纹起始和破裂损伤的应力阈值进行计算. Bieniawski<sup>[4,11]</sup>通过对苏长岩、石英岩进行单轴、双轴、三轴压缩实验,结合变形特性和能量观点对岩石破裂全过程中的裂纹闭合、起始、裂纹破裂的应力阈值进行了综合的理论分析和实验验证,并介绍了利用裂纹扩展的速度变化来鉴别岩石破裂过程中裂纹破坏的应力阈值方法. Eberhardt 等<sup>[8]</sup>对 130 m 水平的粉红色花岗岩进行单轴压缩实验,运用岩石变形特性结合声发射技术对岩石破裂峰值前各个阶段的应力阈值进行确定. 彭俊等<sup>[16]</sup>提出基于轴向应变响应确定岩石压缩破裂过程中裂纹闭合应力的新方法,并使用多组岩石单轴和三轴压缩实验结果验证了该方法的合理性.

通过以上使用不同方法获得岩石压缩过程破坏失稳应力阈值的研究,发现应用裂纹体积应变法在确定岩石变形过程中不可避免地存在主观性和不确定性. 基于均质特性的 Griffith 能量计算法会由于假设和参数选取而带来误差. 运用裂纹扩展速度在岩石峰值前只能判断裂纹损伤破裂的阈值,且需要专门仪器观测,操作性差. 自从声发射技术应用于岩石破裂失稳机理研究以来,其凭借逐步成熟的理论和设备,受到国内外许多学者的青睐,并逐渐应用于机理研究和现场实践. 本文在上述研究基础上根据 Eberhardt 应力阈值划分准则,应用声发射技术,对花岗岩样进行单轴压缩实验,获取岩石变形、破裂过程中声发射活动特征参数,进而确定峰值压力前岩石加载过程各阶段的阈值,并研究这些阈值与峰值的关系.

# 1 岩样制作和实验系统

## 1.1 岩样制作

实验采用的花岗岩试样(以下称为 A 组试样)在实验室内严格按照国际岩石力学学会建议的方法加工制作. 岩样加工尺寸为 50 mm × 50 mm × 100 mm. 岩样两端平整度为 0.5 mm,尺寸误差在 ± 0.3 mm,两端垂直于轴线的误差在 ± 0.25°,岩样的物理力学参数如下:长度均值 100.33 mm,宽度均值 50.63 mm,单轴抗压强度 97 ~ 130 MPa,弹性模量 72.16 GPa,泊松比 0.162.

## 1.2 加载条件与声发射仪器

实验所用的加载系统采用 TAW - 3000 电液伺服岩石三轴实验机,其主要参数为:最大轴向实

验力 3 000 kN,分辨能力 20 N;最大轴向变形 8 mm,分辨能力 0.000 5 mm;框架刚度不小于 10 GN/m;采用 0.06 mm/min 轴向等位移加载速度.

实验所使用的声发射仪器为美国物理声学公司生产的两通道 Pocket - AE,门槛值 45 dB,采样带宽 1 kHz ~ 1 MHz,采样速率 20 MB/s.

## 1.3 数据采集系统

采用应力传感器和动态应变仪对岩石所施加的载荷和纵向、环向变形进行实时测量. 应用声发射系统获取岩石破裂过程声发射特征参数. 为消除端部效应及压力机对声发射活动参数的影响,在试件加载端均匀涂抹黄油进行隔离.

# 2 实验结果与分析

## 2.1 基于声发射活动特性确定岩石破裂阈值

根据在单轴压缩下岩石破裂过程中声发射参数变化特性来确定各个阶段的应力阈值. 实验结果如图 1 ~ 图 4 所示.

### 2.1.1 裂纹闭合阶段及闭合应力阈值

裂纹闭合阶段:岩样从初始加载到裂纹闭合过程. 在此加载阶段,岩样内部原有的初始裂纹将逐步闭合,在其闭合过程中释放出不同的声发射信号,以声发射事件率或一个声发射事件的幅度(AE event amplitude)下降到平均水平时的值作为裂纹闭合应力阈值.

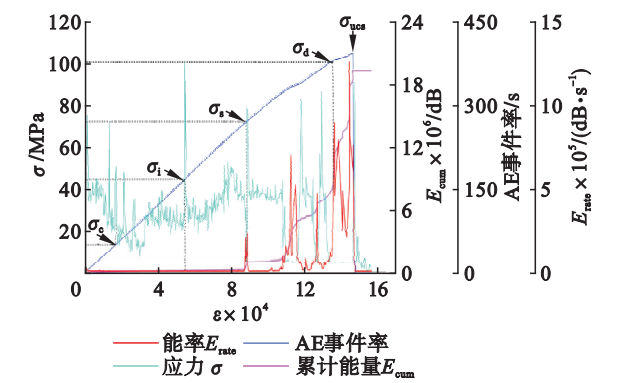


图 1 应力、声发射事件率、累计能量、能率与应变的关系曲线

Fig. 1 Curves of stress, acoustic emission event rate, cumulative energy and energy rate versus strain

由图 1 可知,在微裂纹闭合阶段声发射事件率比较高并且变化较大,而其释放的累计能量较低,且能率变化幅度较大. 这说明张开裂纹在闭合的过程中,存储的裂纹应变能以较小能量的弹性波释放. 从图 1 可以看出,裂纹闭合阶段声发射事

件率越高,则能率越大,这表明了单位时间内声发射事件与能量释放的一致性,即一个位错源(裂纹闭合、移动)引起晶格位移变化并引发一个声发射事件;位错源的数量等于产生声发射事件的数目,这符合断裂力学的常识.由于内含裂纹大小相同,因此每个声发射事件释放的能量在裂纹闭合阶段几乎相同,导致声发射事件率(AE event rate)与能率(energy rate)的变化相吻合(见图1).本阶段单个声发射事件幅度和持续时间(AE event duration)与声发射事件率的变化有明显相关性(见图2,图3):声发射事件持续时间在开始加载时较长,后来逐步减少,主要与压力机加载端和岩样相接触过程初期产生的噪声有关;弹性波幅度与声发射事件率随着加载过程压力增大而降低,释放的能率在整个过程都很低,这说明尽管试件内部存在众多的微裂纹,但在压密过程中裂纹尖端存储的能量耗散少,转移、积累多.此时,岩石原有的缺陷随轴向应力的增加逐渐闭合导致试件非均质性逐渐降低最终到达线弹性阶段,成为弹性体.

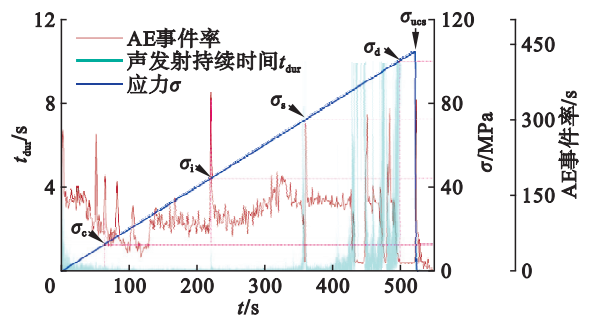


图2 声发射事件率、单个声发射事件持续时间和应力与时间关系曲线  
Fig. 2 Curves of AE event rate, single AE event duration and stress versus time

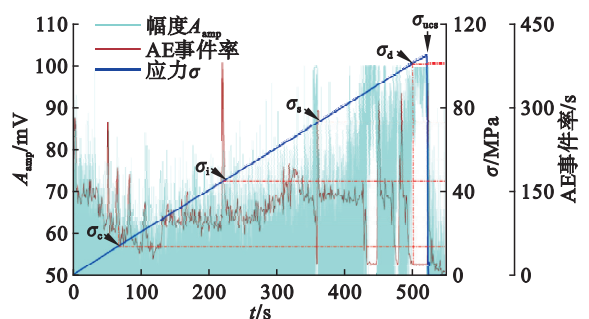


图3 声发射事件率、单个声发射事件幅度、应力与时间关系曲线  
Fig. 3 Curves of AE event rate, single AE event amplitude and stress versus time

根据岩石的变形特性(试件轴向刚度)确定裂纹闭合阶段(如图4所示),当试件的弹性模量值由小变大,逐渐趋于与应力坐标轴平行时,此应

力点之前的阶段为裂纹闭合阶段.应用声发射参数活动特性确定裂纹闭合应力阈值( $\sigma_{cl}$ )为13.47 MPa;使用应力-应变特性曲线法<sup>[8]</sup>确定裂纹闭合阈值( $\sigma_c$ )为15.23 MPa.两种方法确定的裂纹闭合阈值相近,因此可以根据声发射信号特性来判定裂纹闭合阈值.

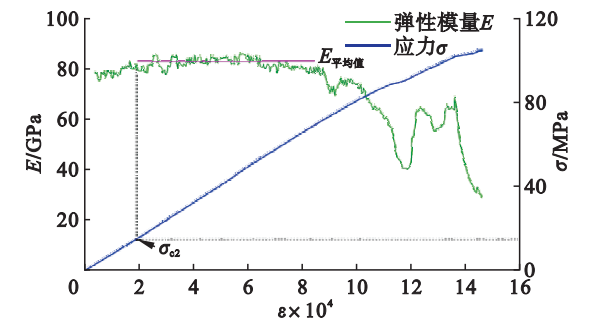


图4 弹性模量、应力与应变关系曲线  
Fig. 4 Curves of Young's modulus and stress versus strain

2.1.2 线弹性阶段及裂纹起始应力阈值  
当轴向应力超过裂纹闭合应力阈值( $\sigma_c$ )后,岩石试件进入弹性阶段.在此阶段,随着轴向应力的增加,轴向应变刚度趋于常量,即 $E_{平均值}$  = 常数(见图4).进入弹性阶段后,声发射信号也显示出与裂纹闭合阶段不同的特性.如图1所示,线弹性阶段声发射事件率较低,变化较小;声发射累计能量近似于水平,且能率几乎不变.这些特性表明,本阶段岩石试件是近似于弹簧的线弹性体,试件的微破裂较少,仅有的弹性波是由于加载过程中晶格的移动和裂纹尖端的位错引起的.在本阶段,声发射事件持续时间较短且较平均,起伏小;声发射幅值比裂纹闭合阶段更低,声发射事件率和幅度能够很好地吻合(见图2,图3).这些声发射特性的变化预示岩石试件进入了线弹性阶段,可以作为确定线弹性阶段的依据.

线弹性阶段的后期,声发射事件率有一个急剧的增大(图2),且单个声发射信号幅度、持续时间也有类似的增加(图3),这是微裂纹快速生成,以及原来存在于岩石试件中已经闭合的缺陷“复苏”的结果.将线弹性阶段后期声发射事件率急剧增加时所对应的应力值作为裂纹起始的阈值,可以确定试件的裂纹起始应力阈值( $\sigma_i$ )为45.01 MPa.

2.1.3 微裂纹扩展阶段及相互作用应力阈值  
随着轴向应力增加,并超过初始裂纹阈值后( $\sigma_i$ ),岩石内部微裂纹不断萌生、扩展、成核,并在岩样内部形成不同空间分布的裂纹成核区.随着荷载的增加,在岩样裂纹成核区内微裂纹沿主



裂纹开裂方向逐步扩展,并与相邻成核区裂纹相互作用,诱致其相互贯通,此加载阶段为裂纹稳定扩展阶段。

在微裂纹的起始阶段,虽然声发射事件率较高且变化幅度较大,但声发射累计能量和能率几乎没有变化. 这表明虽然产生的微裂纹较多,但是裂纹的体积小,彼此相互独立;释放的裂纹尖端存储的弹性波能量低,试件还是处于稳定阶段(见图 1). 从图 2 和图 3 可以看出,本阶段一个声发射事件持续时间短,而声发射事件的幅度与声发射事件率变化较为吻合(即声发射事件幅值较高且变化大). 这从另一个角度反映出微裂纹初始阶段释放的能量小,试件处于稳定阶段的特点. 这一点也可以从图 1 得到验证:尽管应力-应变曲线稍许偏离斜直线,但总体上随荷载的增大,应力、应变稳定上升. 以往研究显示,在使用变形特性和能量理论计算方法时裂纹扩展阶段都被忽略,这是由岩石变形不明显以及理论计算的局限性所决定的。

在裂纹扩展阶段的后期,声发射事件率、累计能量、能率、单个声发射事件持续时间以及声发射事件幅度都有突变(见图 1,图 2,图 3),这表明微裂纹从单独作用扩展到了相邻裂纹之间的相互作用,将这一突变点所对应的应力值作为裂纹相互作用的应力阈值. 因此,本裂纹相互作用的应力阈值( $\sigma_s$ )为 92. 58 MPa.

2. 1. 4 裂纹成核和损伤应力阈值

随着荷载的增加,岩石试件超过裂纹相互作用阈值( $\sigma_s$ ),进入裂纹扩展和临界能量释放(裂纹聚合)阶段. 由图 1 所示,在此阶段声发射事件率变化幅度和频率较前几个阶段大得多,而且累计能量在快速增加,能率也有几个突变;因此可知,能量分梯度增加,宏观裂纹的扩展分步进行,岩石的失稳也是逐步发生。

单个声发射事件的持续时间与声发射事件率有较好吻合,即较高的声发射率伴随较长的单个声发射事件持续时间. 但是,如图 2 所示,在宏观裂纹生成时,单个声发射事件持续时间长而声发射事件率很低,这就是岩石破裂前的平静期的特征. 声发射参数的这种变化可以作为判定宏观裂纹(即判定岩石损伤的阈值)产生的依据. 单个声发射事件的幅值在整个阶段都较高,尤其在声发射率低时即宏观裂纹出现时单个声发射事件幅值更高(图 2,图 3)。

由于试件在裂纹聚合阶段声发射能率有几个突变,这里将能率的最后一个突变作为裂纹破裂

损伤阈值( $\sigma_d$ ). 根据这个变化,确定本试件的裂损伤应力阈值为 101. 70 MPa. 在此突变点前裂纹聚合阶段内,试件能量释放且并不发生大规模破裂,表明岩石试件并没有真正地贯通成破裂面. 而从图 2,图 3 可知,在突变点单个声发射事件持续时间很长,幅值极高,表明岩石在这一点有较大的裂纹生成且破裂面贯通。

2. 1. 5 裂纹不稳定发展阶段及峰值强度

从图 1 可以看出,应力超过损伤阈值( $\sigma_d$ )后,裂纹不稳定发展阶段声发射信号特点为:声发射事件率较低,但累计能量变化大. 这表明形成贯通破裂面后试件沿弱面剪切、滑动,最终达到破裂、失稳. 在裂纹不稳定发展阶段,单个声发射事件幅度、持续时间都保持高的水平(图 2,图 3),这与上述宏观裂纹的发展密切相关. 应力-应变曲线由增加到降低的拐点就是峰值强度( $\sigma_{ucs}$ ). 本试件破坏的峰值强度为 105. 30 MPa.

2. 2 各应力阈值与峰值的关系

将 A 组试件岩石破裂全过程中各个应力阈值与峰值强度的比值,以及国内外学者使用多种方法得到的关于岩石破裂过程阈值以峰值强度百分比的结果列于表 1 中。

表 1 岩样各应力阈值与峰值强度百分比的均值 Table 1 Average values of percentages of various stress thresholds versus peak strength for rock samples %				
岩样	裂纹闭合 应力阈值 百分比 均值	裂纹起始 应力阈值 百分比 均值	裂纹相互 作用应力 阈值百分 比均值	裂纹损伤 破裂应力 阈值百分 比均值
A 组	12. 82	54. 41	74. 50	90. 76
能量 计算 <sup>[4]</sup>	—	≈ 35	—	≈ 80
130 m LdB 花岗岩 <sup>[8]</sup>	16. 88	46. 22		75. 23
240 m LdB 花岗岩 <sup>[6]</sup>	18. 91	40. 63		76. 37
南非辉 长岩	15. 39	31. 85		73. 87
Yeosan 大理岩 <sup>[9]</sup>	19. 66	34. 45		92. 32

注:—表示没有列出。

对于本实验岩石,当荷载加载到峰值强度的 13% 时,岩石进入线弹性阶段;而加载到 55% 时,裂纹又开始萌生、扩展. 需特别注意的是,当应力加载到峰值强度的 90% 时,岩石试件的晶粒压碎,宏观裂纹产生,试件沿破裂面移动,此时应力

成为岩石失稳的关键点,与其他学者的实验结果比较接近,裂纹演化具有一致性. 这一结果侧面证明了用声发射方法确定岩石破裂阈值的正确性.

3 结 论

1) 通过声发射事件率、累计能量、能率、单个声发射事件持续时间及幅度等特征参数,确定岩石破裂全过程各个阶段的应力阈值,并且使用轴向刚度法验证裂纹闭合应力阈值,实验对比表明两种测试结果基本一致. 因此,应用声发射活动特性确定岩石破裂过程应力阈值的方法可行.

2) 在试件加载过程中,裂纹扩展阶段声发射事件率低,单个声发射事件持续时间长、幅度大,并出现能率突变,这些现象可作为判定宏观裂纹形成的依据,同时也是部分学者认为岩石破裂前的“平静期”.

3) 根据声发射特征参数随荷载、时间的变化,可以解释裂纹闭合、萌生、起裂、发展、聚合,以及破裂的时空演化过程及其变化规律,为确定各阶段应力阈值提供一种可靠的方法.

参考文献:

[ 1 ] 张渊,张贤,赵阳升. 砂岩的热破裂过程[J]. 地球物理学报,2005,48(3):656-659.  
(Zhang Yuan, Zhang Xian, Zhao Yang-sheng. Process of sandstone thermal cracking [ J ]. *Chinese Journal of Geophysics*,2005,48(3):656-659. )

[ 2 ] 朱红光,谢和平,易成,等. 岩石材料微裂隙演化的 CT 识别[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1230-1238.  
(Zhu Hong-guang, Xie He-ping, Yi Cheng, et al. CT identification of microcracks evolution for rock materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2011,30(6):1230-1238. )

[ 3 ] 刘善军,吴立新,王川婴,等. 遥感岩石力学( VIII )——论岩石破裂的热红外前兆[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(10):1621-1627.  
(Liu Shan-jun, Wu Li-xin, Wang Chuan-ying, et al. Remote sensing-rock mechanics ( VIII )—TIR omens of rock fracturing [ J ] *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2004,23(10):1621-1627. )

[ 4 ] Bieniawski Z T. Mechanism of brittle rock fracture. part I—theory of the fracture process [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*,1967a,4(4):395-406.

[ 5 ] Brace W F. Mechanism of brittle fracture of rocks [ C ]//

State of Stress in the Earth's Crust; Proceedings of the International Conference. New York: American Elsevier Publishing Company,1964:110-178.

[ 6 ] Martin C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings [ D ]. Winnipeg, Manitoba: University of Manitoba,1993.

[ 7 ] Diederichs M S, Kaiser P K, Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2004,41(5):785-812.

[ 8 ] Eberhardt E, Stead D, Stimpson B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock [ J ]. *Canadian Geotechnical Journal*,1998,35(2):222-233.

[ 9 ] Chang S H, Lee C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*,2004,41:1069-1086.

[ 10 ] Griffith A. The phenomena of rupture and flow in solids [ J ]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: A*,1921,221:163-198.

[ 11 ] Bieniawski Z T. Mechanism of brittle rock fracture. part II—experimental studies [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*,1967b,4(4):407-423.

[ 12 ] 张志镇. 岩石变形破裂过程中的能量演化机制 [ D ]. 徐州: 中国矿业大学,2013.  
(Zhang Zhi-zhen. Energy evolution mechanism during rock deformation and failure [ D ]. Xuzhou: China University of Mining Technology,2013. )

[ 13 ] Eberhardt E. Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression [ D ]. Saskatoon: University of Saskatchewan,1998.

[ 14 ] Nickslar M, Martin C D. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks [ J ]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2012,45(4):607-617.

[ 15 ] 周辉,孟凡震,卢景景,等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨 [ J ]. 岩土力学,2014,35(4):913-918.  
(Zhou Hui, Meng Fan-zhen, Lu Jing-jing, et al. Discussion on methods for calculating crack initiation strength and crack damage strength for hard rock [ J ]. *Chinese Rock and Soil Mechanics*,2014,35(4):913-918. )

[ 16 ] 彭俊,蔡明,荣冠,等. 裂纹闭合应力及其用于评价岩石微裂纹损伤 [ J ]. 岩石力学与工程学报,2015,34(1):1-10.  
(Peng Jun, Cai Ming, Rong Guan, et al. Crack closure stress and its use for assessing stress-induced microcrack damage [ J ]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2015,34(1):1-10. )