第 24 卷 第 1 期
2002 年 1 月 (35～41)

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA

Vol. 24, No. 1
Jan., 2002

文章编号: 0253-3782(2002)06-0035-07

含预制软弱带的岩石破裂过程的数值模拟*

焦明若[1,2)] 张国民[3)] 唐春安[4)] 傅宇方[4)]

1) 中国沈阳 110031 辽宁省地震局
2) 中国沈阳 110006 东北大学资源与土木工程学院博士后流动站
3) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心
4) 中国沈阳 110006 东北大学岩石破裂与失稳研究中心

摘要 考虑到岩石脆性破坏过程中介质的不均匀性之特点，对岩石样品中含预制弱介质条带的岩石样品破坏过程进行二维有限元数值模拟，并对弱介质带的破坏贯通过程、新的断层的产生和有关的地震活动进行了研究. 数值模型展示了岩石从变形、微观破坏到整体破坏的全过程以及微震活动的时空分布特征. 应力、应变和微震活动的时空分布形象地描绘了岩石变形的局部化和时空迁移等现象，这与实际地壳中所观测到的现象是一致的. 此外，模拟结果与实验观测结果也是一致或相似的.

关键词 预制弱带 岩石破坏 微震活动 数值模拟
中图分类号: P315.8 **文献标识码:** A

引言

有限元方法在分析地壳构造应力场和构造变形场方面得到了广泛的应用. 例如，王仁等(1980)运用有限元方法反演地壳应力场，并预测未来地震危险区. 汪素云和陈培善(1980)运用有限元方法对我国及邻区现代构造应力场进行数值模拟计算，得到了我国构造应力场分布方向的整体图象. 除了运用有限元进行构造应力场的分析外，人们还利用有限元方法进行震源孕育过程和前兆场的数值模拟分析. 例如，张国民等(1994)利用有限元数值模拟的方法，研究了短临前兆的复杂性；梁北援等(1987)对断层应力应变积累进行了数值模拟，并讨论了地震危险区；梅世蓉等(1989)对唐山地震的孕震过程进行了模拟；陈修启和张国民(1993)对大同地震孕震过程进行了数值模拟研究. 然而，从总体上看，有关地震孕育模式的研究，由于处理岩石破坏问题的复杂性，很难对地质体从地震孕育、发生乃至余震的全过程进行数值模拟，更难以给出有关震源特征和孕震过程的时空分布图象，特别是由于地壳介质的不均匀性和微破裂过程引起的非均匀应力场、应变场以及微震活动性的时间与空间分布规律. 唐春安等(1997)利用自行研制的岩石破裂过程分析 RFPA 系统，在考虑材料力学性质非均匀性特点的基础上，对地震孕育过程进行数值模拟，并给出了应力场、变形场和微震活动的时空分布，形象地给出了变形的局部化、微破裂、主破裂、余震

* 国家重点基础研究发展规划项目(G19980407)和国家自然科学基金(49974009)共同资助.
2000-10-13 收到初稿，2001-09-24 收到修改稿，2001-11-03 决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

等直观图象.

本研究所用 RFPA^{2D} 系统，是一个能模拟岩石介质逐渐破坏过程的数值模拟工具. 有关它的基本思想详见唐春安(1997)文章和表 1. 其基本思想是：① 通过考虑细观单元力学参数(弹模、强度等)的非均匀性，模拟岩石宏观变形、破坏的非线性行为；② 通过考虑材料破坏后单元的参数弱化(包括刚度退化)，模拟材料破坏的非连续和不可逆行为.

表 1 FEM 面临的问题和在 RFPA 中的解决方法

问题	解决方法
单元组构定律	视单元为具有线性行为的弹脆性介质材料
宏观非线性行为	介质非均匀性导致非线性
非均匀性	通过对介质引入不同的介质强度和弹性模量
破坏和破坏准则	当单元达到其破坏强度时即发生破坏
破坏的单元	除赋予较低的弹性模量外与未破坏单元一样
新形成的断裂(不连续)	由连续的破坏单元连接组成(连续的)
摩擦	单元之间的抵抗作用

在 RFPA^{2D}模型中，介质的非均匀性是通过假定材料各单元的力学性质整体上服从 Weibull 分布. 其定义如下：

$$\varphi(\sigma_c) = \frac{m}{\sigma_0}\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0}\right)^{m-1}\exp\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0}\right)^{m} \tag{1}$$

其中，σ_0 为单元强度的平均值，m 表征单元整体的均匀程度.

RFPA^{2D}包括两个方面的功能：应力分析和破坏分析. RFPA^{2D}的应力分析采用有限元法进行；破坏分析则是根据一定的破坏准则来检查材料中是否有单元破坏. 对破坏单元则采用刚度特性退化(处理分离)和刚度重建(处理接触)的办法进行处理. 为了模拟试验机加载情况，采用位移加载方式. 对于每一步给定的位移增量，首先进行应力计算，然后根据破坏准则来检查模型中是否有破坏单元，如果没有，继续增加一个位移增量，进行下一步应力计算；如果有破坏单元，则根据单元的拉或剪破坏状态进行刚度退化处理. 然后重新进行当前步的应力计算. 重复上述过程，直至整个材料产生宏观破坏. 由于单元的破坏是脆性，因此将单元破坏释放的弹性能看成是声发射所释放的能量. 到目前为止，对于如何选择破坏准则，还没有一个统一的认识. 考虑到岩石类脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度，因此，本研究采用了修正后的库仑(Coulomb)准则[包含拉伸截断(tension cut-off)]作为单元破坏的强度判据. 根据这一准则，单元的破坏可能是拉坏也可能是剪坏.

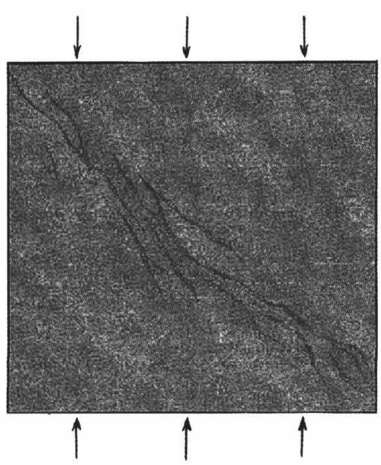

图 1 试件模型示意图

此外，RFPA^{2D}方法根据统计细观损伤力学和岩石声发射的基本原理，提出了用有限元方法研究岩石声发射规律的基本思路(唐春安，1997).

1 数值模拟模型设计

试件尺寸为 150 mm×150 mm，共计 22 500 个单元. 在对角线方向预制一个软弱带(图 1). 模拟为二维平面应力问题. y 方向以每步 0.002 mm 定常位移速率加载，侧向无约束. 加载步为 400 步. 数值模拟中所用的材料的各力学参数均按照 Weibull 分布赋值. 本研究在单元破坏所使用的拉压比是 1∶10、摩擦角 $\varphi=30°$. 具体参数见表 2.

表 2　岩石试样的力学参数

材料	弹性模量 /GPa	弹性模量均质度	强度 /MPa	强度均质度	泊松比	泊松比均质度
母岩	60	3	200	3	0.25	100
断层	30	3	60	3	0.25	100

2　模拟结果和讨论

2.1　应力-加载步曲线

图 2 为模型的应力-加载步曲线. 从所获得的应力-加载步关系来看，如果模型考虑了介质的不均匀性，那么在模拟岩石脆性破坏时就能够得到岩石变形破坏的非线性行为. 从图中我们也可以看到模型产生了 3 次较大的宏观应力降，而宏观应力降的产生则是由于软弱带上强烈的变形局部化和应力的显著集中所致. 而最后一次的宏观应力降则表明，整个软弱带上所积累的应力应变全部释放，从而导致整个岩石的整体破坏.

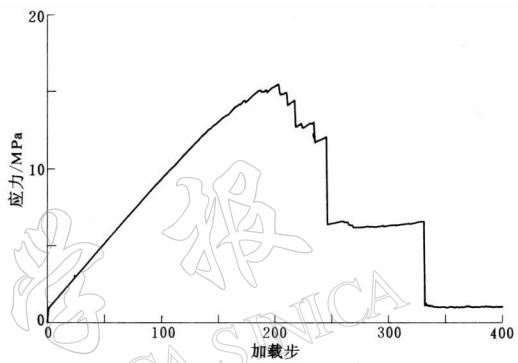

图 2　模型所产生的应力-加载步曲线

2.2　声发射的时间序列特征

图 3 是整个模型产生的声发射频度分布. 可以看出，每一次宏观应力降均伴有声发射频度出现高值，同时也说明，每一次大的破坏都是许多单元同时破坏的结果.

图 4 是声发射能量随加载步的变化. 可以看出，较大的应力降对应较大的声发射能量释放. 但值得注意的是，并不是应力降最大的对应的声发射能量释放也最大. 例如，第二次应力降最大，但对应的声发射能量并不是最高. 也就是说，应力降的大小与声发射能量释放或声发射震级的大小并不完全一致，这与实际地震中较大的地震的应力降却不一定很高是一致的.

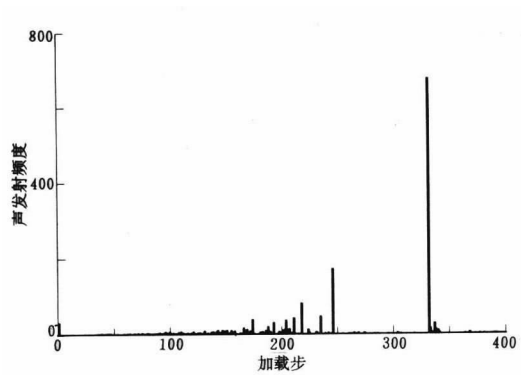

图 3　声发射频度随加载步的分布

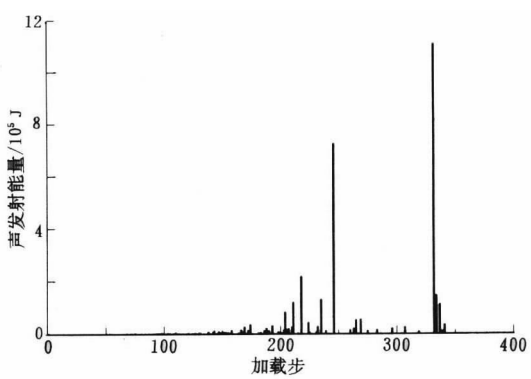

图 4　声发射能量随加载步的分布

2.3　震级-频度关系

图 5为模型给出的震级-频度关系. 可以看出，在中间部分有较好的线性段. 上述结果

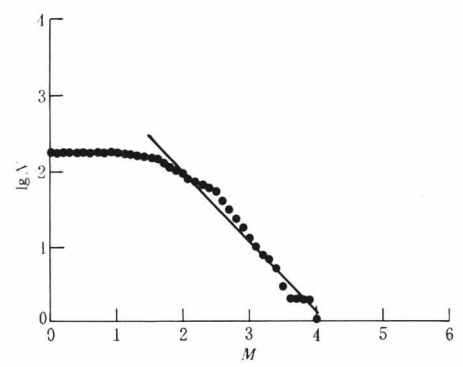

图 5 G-R 关系

也证实了 Gutenberg-Richter 经验关系的存在，同时也说明了本数值模型的合理性. 同时我们也注意到，G-R 关系并不是在全部震级范围成立，这与实际观测结果是一致的(孙文福，顾浩鼎，1992). 此外，模拟结果也反驳了现在的一种说法，即由于地震记录不完整而导致的偏离 G-R 经验关系. 因为我们模型中产生的声发射均有完整的记录(与声发射定义有关).

2.4 应力、应变及其声发射的空间分布特征

RFPA^{2D}的显著特点之一就是可以比较直观地给出应力、应变和声发射的空间分布图象. 图 6 为数值模拟给出的岩石破坏过程中的变形、应力和声发射(微破裂)的空间分布图. 鉴于篇幅所限，只给出具有代表性的第 1，218，246 和 337 步的模拟图象. 同时需要指出的是，给出的应力是相对应力，并由下式计算得到：

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_c} = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} - S\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \tag{2}$$

其中，σ_s/σ_c 表示单元临近破坏的程度，S 为拉压比. 单元的亮度大小直接表示了按强度准则归一化后的应力相对大小. 单元越亮，表示该单元越临近破坏. 单元破坏后，其颜色最暗. 因此，通过上述模拟结果的颜色变化即可以跟踪应力场的变化迁移，并可预测未来的潜在破坏区域. 实际上每一幅图都是未来地震危险程度的分布图(图 6).

在加载初始阶段，沿软弱带只有少数单元发生破坏(～200 步)，此时，应力-应变曲线接近线弹性；随着加载的进行，沿软弱带破坏单元越来越多，微破裂表现为随机性和无序性，单个微破裂的影响范围很小，微破裂之间的关联作用较弱，最大的特点是变形比较分散(～210 步)，应力-应变曲线呈非线性；之后，随着微破裂的进一步积累，微破裂之间的关联作用明显增强，表现为短程关联，并且在局部小尺度范围内丛集，但整个系统仍保持整体稳定(～245 步)；随着加载的继续，微破裂表现为长程关联，小尺度的丛集整合成较大尺度的丛集，应力-应变曲线伴有明显的应力降(～246 步)，丛集尺度越来越大，直至形成一贯通的宏观断层(～337 步).

3 讨论

3.1 变形局部化

变形局部化是岩石临近主破裂前变形过程中出现的一种重要的地质现象. 图 6a，b 中的高亮点的变化进程反映的就是这种变形的局部化时空特征. 应变或应变高度局部化的结果导致宏观破裂. 加载初期的变形主要集中在软弱带的中部，随着加载的进行，变形则转向两端，最终由于变形局部化区域的相互融合而导致贯通. 因此，根据变形局部化的结果，可预示未来发生主震的位置.

3.2 震源迁移

地震迁移是地震活动的重要时空现象之一. 在地震预报实践中，根据地震时空迁移规律，地震工作者对一些强震做出了成功的短临预报. 然而，关于地震迁移的物理机制仍然

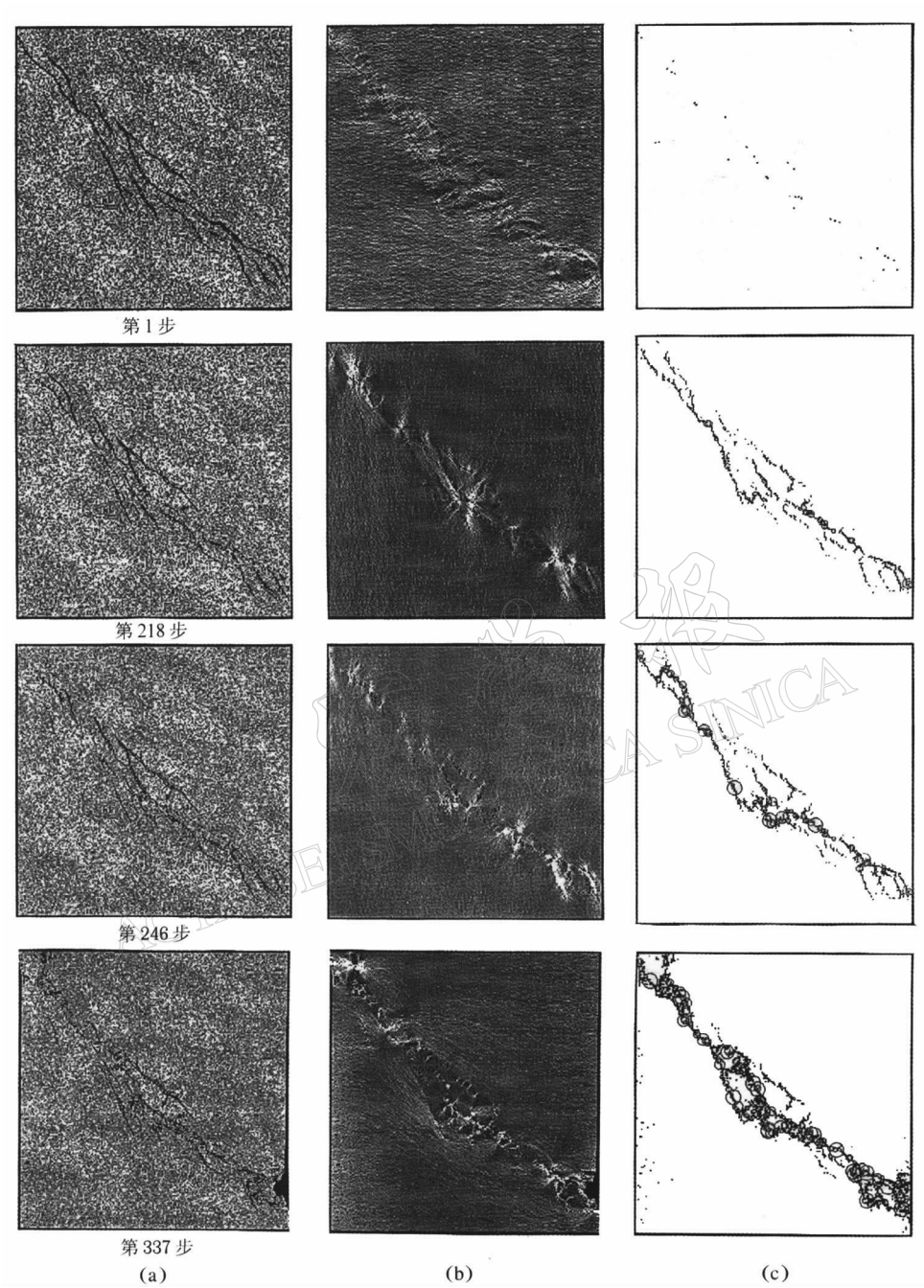

图 6　含软弱带试样受载破坏过程的数值模拟结果

(a) 变形场；(b) 应力场；(c) 声发射分布

是没有解决的问题. 从本模型的数值模拟的结果可以给我们一些启示：地震发生时由于能量的释放而导致出现应力降(如模型中的 246 步)，并使变形局部化减弱和地震的平静. 此后，随着应力和能量的进一步积累，将预示着下一个地震活跃期的到来. 例如，从图 6b 可以看出，较高应力的单元沿着软弱带频繁迁移，表现为白色的亮点(高应力)从一处迁移到

另一处. 单元越亮，它就越接近破坏. 一旦单元破坏，颜色将变成黑色. 图 6c 的声发射分布也表现出类似的规律. 从以上的模拟结果可以看出，虽然我们不知道何时地震会发生，但可以知道地震在哪里发生. 也就是说，如果我们对某区域的地壳介质了解得非常清楚，那么从理论上就可以知道地震将在哪里发生.

3.3 前震、主震和余震

使用本模型可以模拟出地震的前震、主震和余震(图 3). 前震的产生是由于声发射事件在加载初期阶段沿软弱带的分布比较零散和处于无序状态所致. 但接近主震时则趋于增加和丛集. 而当主震发生时，则是由于大量微震同时发生的结果. 由于主震发生后仍有一部分残余能量存在于岩石中(模型中沿软弱带可能有少量的局部部位未连通)，所以主震发生后随着应力的进一步积累将有余震发生. 值得注意的是，在主震发生前有一明显的平静期，这与实际地震发生前所表现的现象是一致的. 而这一重要现象则被看成是一种前兆显示，这将对地震预报有意义.

3.4 地震前兆的复杂性

如果高应力的部位与前兆有关，那么根据图 6 可看出，白色亮点(高应力)随着加载的进行而不断发生变化. 这种应力迁移现象是由于地壳介质的不均匀性引起的. 在真实地壳中，很难或几乎不可能清楚地了解地壳的精细组成和详细的结构，因此，在主震前找到高应力集中点即前兆点是非常困难的. 考虑到我们的实际观测台站的数量和布局等因素，在大震前找到前兆的机会是很小的，这也预示了我们的预报水平不会很高. 本模型似乎对理解前兆的复杂性有一定的帮助.

3.5 应力的预报意义

数值模拟结果表明，应力比声发射能更好地预测较大微震的发生地点. 应力明显集中的地方往往会有较大事件发生. 例如从图 6b 可以看出，在 218 步时，应力主要集中在预制软弱带的两端和中间部位，至 246 步时，中间应力集中的部位由于应力释放而发生地震. 同时，应力向其它部位转移. 每一高亮点的出现，即预示某一较大事件(地震)的发生地点. 如果能对应力场进行高精度观测，无疑对通过应力预测大地震是有着非常重要意义的. 而过去由小震预测大地震的方法，如空区等方法有其不确定性. 近年来得到进一步发展的红外热像实验技术(耿乃光，1998)，为精确观测应力场变化提供了可能.

4 结论

岩石破裂过程的数值模拟对理解岩石的变形破坏行为有一定的帮助. 本研究对孕震过程的数值模拟从现象上揭示了地震活动的孕育及发展过程的一些基本特征，如前震、主震和余震，地震迁移、变形局部化等现象，特别是模拟所给出的应力、应变和声发射(微震)分布的图象，在时空两方面再现了地震全过程的力学物理图象. 同时，数值模拟结果对理解前兆复杂性有很大的益处：处于不同构造部位和介质性质差异较大的台站对前兆的响应程度是不同的，因此，会出现同一地区的台站虽然地壳介质相同或相似，但对应力的反应却不同，也可能出现处于同一构造部位的台站，因所处的地壳介质的巨大差异而有很大的差异等等；同时，本模型也考虑了微破裂之间的相互作用，这也是非常有意义的，因为这种相互作用的结果，可能会使那些达到破裂强度的单元，因减震作用可能推迟发震，也可能使那些未达到破裂强度的单元因为增震作用而提前发震. 反映在前兆上，就有可能出现

有前兆而无地震，或有地震而无前兆的现象.

此外，本模型最大的优势是能够模拟不均匀的介质，如果我们对岩石样本的介质和结构设计得合理，就有可能在正确的震源模式指导下，对地震前兆做出有意义的跟踪，这将对地震预报是有意义的.

与传统的有限元模拟方法相比，本模型不仅能对应力场进行分析，同时也能对岩石的破裂全过程进行分析.

参　考　文　献

陈修启，张国民. 1993. 大同-阳高地震的孕育及其前兆机制的数值模拟[A]. 见：国家地震局科技监测司编. 大同阳高地震研究[C]. 北京：地震出版社，198～205

耿乃光. 1998. 热红外震兆成因的模拟实验研究[J]. 地震，**18**(1)：83～88

梁北援，罗咏生，梅世蓉，等. 1987. 定常边界力作用下断层应力应变积累的数值模拟和强震危险区的讨论[J]. 中国地震，**3**(2)：47～55

梅世蓉，梁北援，朱岳清. 1989. 唐山地震孕育过程的数值模拟[J]. 中国地震，**5**(3)：9～17

孙文福，顾浩鼎. 1992. 具有独立过程的地震序列震级-频度分布[J]. 地震学报，**14**(3)：273～280

唐春安，傅宇方，赵文. 1997. 震源孕育模式的数值模拟研究[J]. 地震学报，**19**(4)：337～346

唐春安. 1997. 岩石破裂过程声发射的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报，**16**(4)：368～378

王仁，何国琦，殷有泉，等. 1980. 华北地区地震迁移的数值模拟[J]. 地震学报，**2**(1)：32～42

汪素云，陈培善. 1980. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟[J]. 地球物理学报，**23**(1)：35～45

张国民，张永仙，石耀霖. 1994. 地震前兆复杂性的数值模拟研究[J]. 地震，**14**(1)：2～10

NUMERICAL SIMULATION OF ROCK PROGRESSIVE FAILURE ON SAMPLES WITH A PRE-EXISTED WEAK ZONE DURING BRITTLE FAILURE

Jiao Mingruo[1,2)]　Zhang Guomin[3)]　Tang Chun′an[4)]　Fu Yufang[4)]

1) *Seismological Bureau of Liaoning Province*, *Shenyang* 110031, *China*

2) *Resource and Civil Engineering School*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110006, *China*

3) *Center for Analysis and Prediction*, *China Seismological Bureau*, *Beijing* 100036, *China*

4) *Center for Rockbursts and Induced Seismicity Research*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110006, *China*

Abstract: Considering the heterogeneity of geomechanical materials, seismicity during brittle rock failure under compressive loading on the sample with an original weak zone are simulated by using rock failure process analysis code ($RFPA^{2D}$). The run-through process of weak zone, the forming of new fault and associated micro-seismicities are studied. The modeling demonstrates the total process of source development of earthquake from deformation, micro-failure to collapse and the behavior of temporal-spatial distribution of micro-seismicities. The stress, strain and the temporal-spatial distribution of micro-seismicities life-likely portrayed the phenomena of localization and temporal transitions, which is similar to those observed in our real crust. Also, the results obtained in simulations are in agreement with or similar to the reported experimental observations.

Key words: pre-existed weak zone; rock failure; micro-seismicity; numerical simulation

http://www.dizhenxb.org.cn