

# 低弹模包体强度对试样破裂模式影响的数值试验

刘庭金<sup>1</sup>, 唐春安<sup>2</sup>, 朱合华<sup>1</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:**应用自行开发的岩石破裂与失稳 RFPA<sup>2D</sup>系统, 对含低弹模不同强度的包体试样的破裂模式进行了数值试验. 结果表明:随着包体强度的增大, 包体声发射总次数呈明显的下降趋势, 而包体主破裂位移加载量呈上升趋势, 试样最大承载力呈上升趋势; 包体水平轴线上各单元点的剪应力降总是先发生在包体两端位置处, 当包体强度较小时, 剪应力降由包体水平轴线中央向其两端扩展, 当包体强度较大时, 由包体水平轴线两端向其中央扩展.

**关键词:** 包体; 破裂模式; 数值模拟; 声发射; 剪应力降

**中图分类号:** TU 458.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-374X(2002)03-0263-06

## Numerical Test of Inclusion Strength Influence on Fracture Model of Specimen with Low Elastic Modulus Inclusion

LIU Ting-jin<sup>1</sup>, TANG Chun-an<sup>2</sup>, ZHU He-hua<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Centre of Rock Induced Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Fracture model of samples with inclusion of low elastic modulus and different strength under the iso-speed displacement load are simulated by using our RFPA<sup>2D</sup> code. The results show that with the increase of the inclusion strength, its acoustic emission(AE) total count has a decreasing trend, while its main fracture displacement load and maximal carrying capacity has an increased trend; when the inclusion strength is comparatively low, shear stress within inclusion horizontal axes decline from center to its two sides, while when inclusion strength is comparatively high, the result is the other way, though the original shear stress decline is always at its boundary.

**Key words:** inclusion; fracture model; numerical simulation; acoustic emission; shear stress decline

为了认识地震震源的孕育过程及地震前兆场的规律, 世界各国很早就开始了对地震孕震模式的研究. Brady 在 1974 年发表了软包体理论, 并分别在 1974 年、1975 年和 1976 年从实验、理论角度论述了软包体在地震发生和前兆机制中的作用<sup>[1-3]</sup>. Rice 在 1979 年提出了“包体弱化模型”, 对应变软化程度对包体破裂失稳和破裂前兆的影响进行了研究<sup>[4]</sup>. 陈颢提出的包体理论<sup>[5]</sup>认为: 包体是岩石变形局部化形成和发展的前提条件, 当包体的等效刚度等于其周围弹性体的(卸载)刚度时, 包体变形发生失稳, 导致地震的发生. 梅世蓉针对板内地震活动与前兆场的时空演化特征, 结合强震孕震和发生的条件, 提出了坚固体孕震模式<sup>[6]</sup>. 针对该硬包体孕震模式, 许昭永等人对含硬包体试样的破裂特征、破裂孕育过程中应变场的变化特征及微破裂图像演变过程进行了实验研究<sup>[7-9]</sup>. 张智等<sup>[10]</sup>对单轴压力下地震断面上障碍体的性质和作用进行了模拟实验研究. 唐春安<sup>[11]</sup>认为: 浅源地震是不同地质体(具有不同弱化特征)相互作用的岩石力

收稿日期: 2001-07-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1998040700); 国家自然科学基金资助项目(49974009)

作者简介: 刘庭金(1976-), 男, 江西南康人, 博士生.

学系统的一种失稳现象,而失稳的内在原因是在某些因素作用下局部的弱化,是一种物理的非稳定问题,并对包体孕震模式进行了数值模拟研究。

由于实验室试验和理论解析方法在进行地震孕育过程研究中遇到了许多困难,数值模拟分析方法被看成是研究地震基本问题的一个有力工具<sup>[12]</sup>。目前,利用数值计算方法对地震孕育过程进行研究及可用于探索未知规律的数值试验方法<sup>[12]</sup>(numerical test)已为国内外许多学者所重视。

本文在充分考虑岩石力学性质非均匀性的基础上,应用自行开发的岩石破裂过程分析 RFPA<sup>2D</sup>系统,对含不同包体强度的试样破裂模式进行了系列数值试验研究,分析了在包体弹性模量较低的情况下,包体强度对试样破裂特征、包体声发射规律、试样最大承载力、包体水平轴线上各单元点的剪应力降过程等方面的影响。

## 1 模型设计

### 1.1 RFPA<sup>2D</sup>系统简介

岩石破裂与失稳分析 RFPA<sup>2D</sup>软件系统<sup>[13]</sup>,由东北大学岩石破裂与失稳研究中心近年开发研制,它是基于有限元理论和全新材料破裂过程算法思想的大型数值计算软件系统。

岩石材料作为一种非均匀介质,其破坏过程是一个微观层次单元不断损伤和宏观材料裂纹不断形成的过程,它包含了细观单元渐进破坏对宏观力学性能的影响。因此,从细观非均匀性与宏观力学行为两个层次来考察岩石的破裂过程,将有助于深入了解岩石损伤和破裂机制。假定宏观层次的岩石由细观层次的单元组成,单元力学行为服从某种既定的分布,单元的破坏表现为刚度和强度等力学性质的变化(弱化或退化)。单元破坏前表现为弹性,破坏后具有一定的残余强度。单元力学性质如图1所示,当单元达到其峰值强度后,单元力学性质发生弱化。根据材料破坏后仍具有一定的承载能力这一特点,将受压破坏后的单元转变为具有传压能力的“接触”单元,将受拉破坏后的单元转变为具有“分离作用”的单元。在单元行为中体现材料破坏的物理性能是 RFPA<sup>2D</sup>的重要特点之一。单元破坏判据采用修正后可同时考虑拉伸或剪切破坏的库仑准则,其表达式为

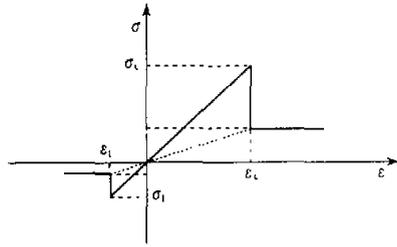


图1 单元力学行为

Fig.1 Mechanics of basic unit

$$\begin{cases} \sigma_1 - \frac{(1 + \sin\varphi)}{(1 - \sin\varphi)}\sigma_3 \geq \sigma_c, \sigma_3 \geq 0 \\ \sigma_3 \leq -\sigma_1, \sigma_3 \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

鉴于岩石材料具有非均匀性这一特点,RFPA<sup>2D</sup>软件采用 Weibull 分布函数  $\varphi(m, \lambda_0, \lambda)$  来描述单元力学性质的非均匀性,其中参数  $m$  反映岩石材料的均匀性,称为均质度,其值越大,表示岩石材料均质性越高;参数  $\lambda_0$  反映单元力学性质(如弹性模量、强度等)的平均值;参数  $\lambda$  表示单元力学性质参数,采用蒙特卡罗方法进行随机赋值。

RFPA<sup>2D</sup>分析系统中将岩石材料的非均质参数引入到计算单元中,认为宏观破坏是单元破坏的累积过程;单元具有脆性,其弹模和强度等力学参数服从韦伯分布;当单元强度达到破坏准则时发生破坏,破坏后该单元比其它单元弹模更低,故可以用连续介质力学方法处理物理非连续介质问题;岩石的损伤量、声发射同破坏单元数成正比。因此 RFPA<sup>2D</sup>具有模拟包体非线性变形并导致包体失稳破裂全过程的功能。

### 1.2 数值模型设计

运用 RFPA<sup>2D</sup>系统设计系列尺寸为 150 mm×120 mm 的试样,将试样划分成 150×120 等面积单元的平面网格,包体为一直径  $D=50$  mm 的圆形介质体,位于试样中央。母岩强度为 120 MPa,弹模为 60 GPa,其均质度均为 3,包体弹模为 20 GPa,其强度分五等,其均质度均为 5,见图2所示。对系列试样在竖直方向上进行等位移速率单轴加载,每步加载位移量为 0.001 mm,直至试样基本失去承载能力为止。

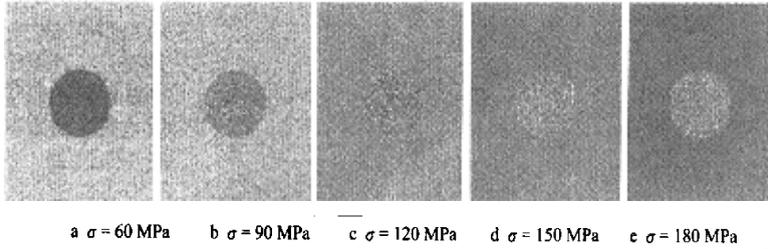


图 2 系列模型图  
Fig.2 Serial models

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 试样破裂特征

图 3 是模拟得到的含不同强度的包体试样破裂过程特征图, 从图 3 可以看到:

(1) 当包体强度  $\sigma = 60 \text{ MPa}$  时, 先在母岩与包体交界处的上下两个端点发生张破裂, 接着包体发生较大破裂, 并沿着位移加载方向在试样中央形成一条细长的破裂带, 在包体左右两侧母岩的上端发生较大破裂。

(2) 当包体强度  $\sigma = 90 \text{ MPa}$  时, 试样破裂特征与包体强度  $\sigma = 60 \text{ MPa}$  时大致相同, 不同的是包体的左上侧和右下侧部位发生破裂。

(3) 当包体强度  $\sigma = 120 \text{ MPa}$  时, 试样先在母岩与包体交界的上下两个端点处发生张破裂, 接着在包体的右侧产生一条破裂带, 包体内部发生破裂程度较小, 并在试样中央形成一条细长的破裂带。

(4) 当包体强度  $\sigma = 150 \text{ MPa}$  时, 试样先在母岩与包体交界的上下两个端点处发生张破裂, 接着在包体与母岩交界处的左侧产生一条破裂带, 该破裂带最后转向试样的左上角方位, 同时包体上下两端的小裂纹不断沿着位移加载方向向试样两端扩展, 形成一条细长的破裂带, 包体内部只发生少量破裂, 并在包体右侧形成一较大的破裂带。

(5) 当包体强度  $\sigma = 180 \text{ MPa}$  时, 试样先在母岩与包体交界的上下两个端点处发生张破裂, 接着在包

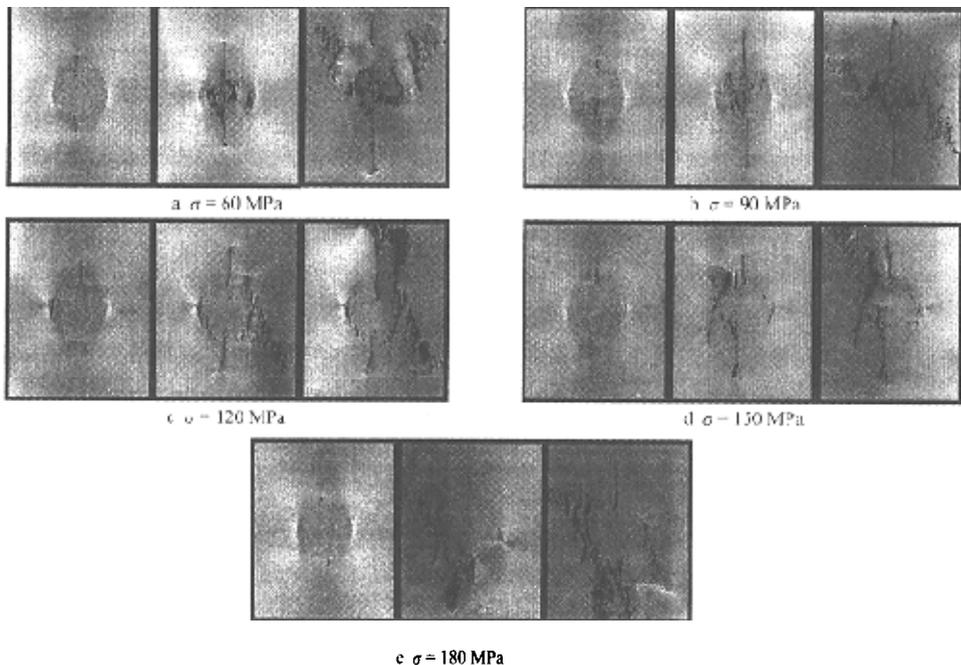


图 3 低弹模不同强度包体试样破裂过程  
Fig.3 Fractural process of serial models

体左端发生破裂形成一破裂带,该破裂带在母岩左下侧沿位移加载方向成逆时针 45° 形成一大破裂带,同时在包体右下侧的母岩中形成一破裂带,而包体上下两端的裂纹只得到较小程度的扩展,包体基本上没有发生破裂。

从以上分析可知:包体强度对试样的破裂特征起着重要的影响.在其它条件相同的情况下,随着包体强度的增大,包体本身的破裂程度呈下降的趋势,当包体强度较低时,包体本身破裂程度较高,而当包体强度较高时,包体破裂程度较低.另外,由于试样中存在不同强度的包体,导致试样中形成的剪切带形式有所不同.当试样中包体强度较小时,包体上下两端形成的应力集中足以导致包体本身发生剪切破坏,因此剪切带穿越包体本身;当试样中包体强度较大时,包体上下两端形成的应力集中难以使包体发生剪切破坏,因此剪切带绕过包体而形成于包体外的母岩中.该模拟结果与文献[10]的实验结果一致,见图4所示(图4中的试样a,b,c分别为来自文献[10]中强度逐渐增大的试样的破裂特征实验结果).

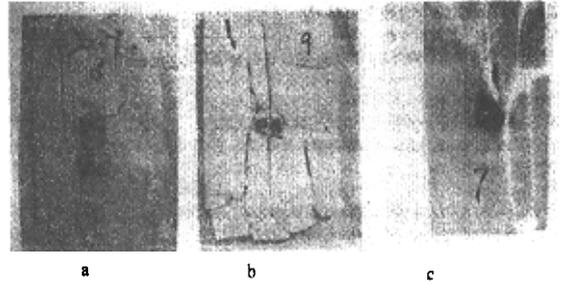


图4 文献[10]实验结果

Fig.4 Experimental results from reference [10]

2.2 试样承载力及包体声发射分析

图5为包体试样载荷、包体声发射次数与位移加载步关系曲线图.从图5可知:

(1) 含包体强度  $\sigma = 60 \text{ MPa}$  的包体试样,在位移加载步第56步载荷达到最大值 1769 N,临界应力值为 14.7 MPa.包体在加载步第40步,产生大量的声发射现象,该声发射次数为 402,在第57步包体又产生声发射次数为 105 的声发射现象,包体声发射次数总数为 605.

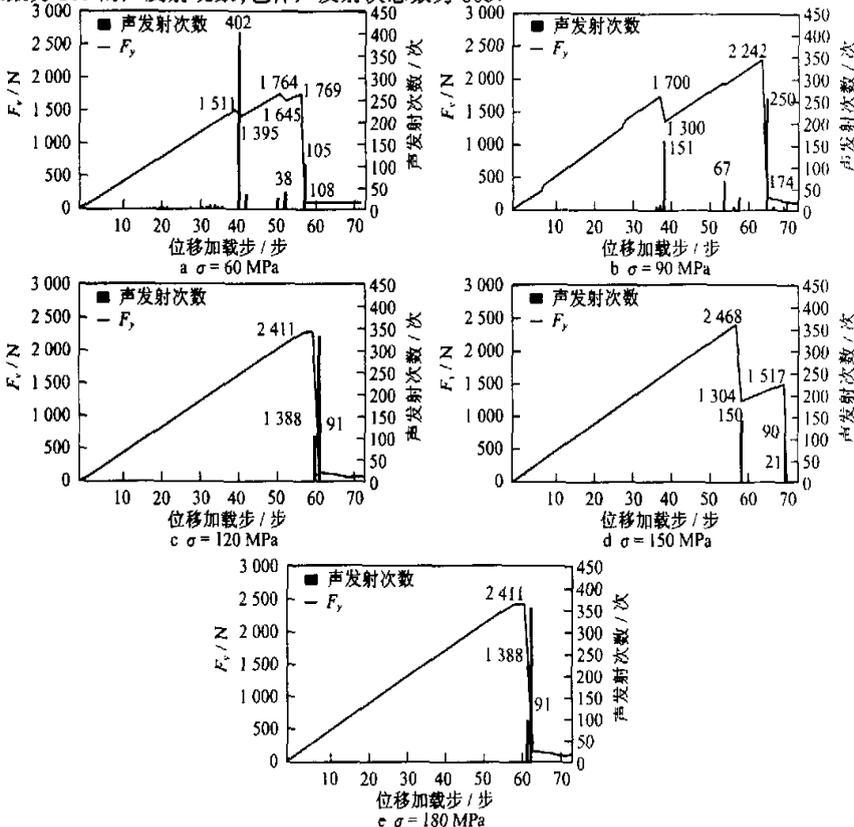


图5 包体试样载荷、包体声发射次数与位移加载步关系曲线

Fig.5 Force and inclusion acoustic emission counts of serial models

(2) 含包体强度  $\sigma = 90$  MPa 的包体试样, 在位移加载步第 70 步, 载荷达到最大值 2 242 N, 临界应力值为 18.9 MPa. 包体在加载步第 42 步时, 有较多声发射现象发生, 次数为 151, 在第 60 步包体发生次数为 67 的声发射现象, 在第 71 步时次数为 250 的声发射现象, 包体声发射累计总次数为 565.

(3) 含包体强度  $\sigma = 120$  MPa 的包体试样, 在位移加载步第 64 步, 载荷达到最大值 2 411 N, 临界应力值为 20.1 MPa. 包体在第 65 步时, 产生声发射次数为 91 的声发射现象, 紧接着在第 67 步包体发生次数为 350 的声发射现象, 包体声发射累计总次数为 513.

(4) 含包体强度  $\sigma = 150$  MPa 的包体试样, 在位移加载步第 64 步, 载荷达到最大值 2 468 N, 临界应力值为 20.6 MPa. 包体在第 65 步时, 产生次数为 150 的声发射现象, 在第 78 步时包体发生次数为 90 的声发射现象, 包体发生的声发射累计总次数为 255.

(5) 含包体强度  $\sigma = 180$  MPa 的包体试样, 在位移加载步第 65 步, 载荷达到最大值 2 521 N, 临界应力值为 21.0 MPa. 包体在加载步第 66 步产生次数为 72 的明显声发射现象, 包体发生的声发射累计总次数为 84.

图 6 是不同强度包体试样最大载荷与包体强度关系曲线图, 表 1 为包体声发射过程分析表. 从以上分析可知: 随着包体强度的增大, 试样最大承载力和临界应力值呈上升趋势, 该模拟结果与文献[10]实验结果一致; 包体声发射总次数呈明显的下降趋势, 而包体发生明显声发射现象所对应的位移加载步(即位移加载量)呈上升趋势.

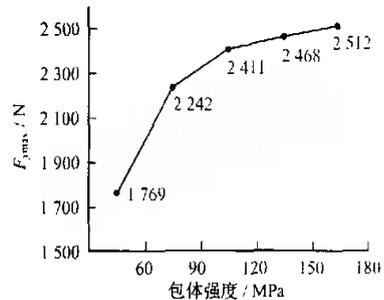


图 6 试样最大载荷与包体强度关系

Fig. 6 Relation between maximal force and inclusion strength

表 1 包体声发射过程分析表

Tab.1 Process of inclusion acoustic emission

$\sigma$ /MPa	加载步/步	次数/次	总次数/次	$\sigma$ /MPa	加载步/步	次数/次	总次数/次
60	40	402	605	120	65	91	513
	57	105			67	350	
90	42	151	565	150	65	150	255
	60	67			78	90	
	71	250		180	66	72	84

### 2.3 包体水平轴线单元点剪应力发展过程

图 7 是包体水平轴线(包体水平轴线是指: 沿着包体圆心, 划一条过该点长度为 51 个单元长度的水平线段)上的剪应力发展过程图. 由图 7 可知: 在低弹模不同强度包体试样系列中, 由于包体弹性模量远小于母岩弹性模量, 因此总是先在包体左右两个端点处形成高剪应力区, 但不同强度包体试样的剪应力降发生过程有所不同: 当包体强度较低时, 剪应力降先发生在包体水平轴线上的中央位置, 并不断向其两端扩展, 由于包体强度较低, 包体水平轴线上大部分单元点发生破坏, 因而剪应力大部分降为零值; 当包体强度较大时, 由于包体强度大于母岩强度, 且包体弹性模量远小于母岩弹性模量, 不容易形成应力集中, 因此先在包体的两端发生剪应力降, 应力值降为零, 随后由于包体两端破裂带的贯通, 导致包体水平轴线上其它点的应力值下降, 但由于包体本身没有破坏, 因此这些点的应力不为零; 当包体强度与母岩强度相当时, 由于包体弹性模量远小于母岩弹性模量, 因此剪应力降过程与包体强度较大时基本一致, 但由于包体发生一定程度的破裂, 因此包体水平轴线上只有部分单元点保持一定的剪应力值.

## 3 结论

本文通过对低弹模不同强度包体试样破裂特征、包体声发射规律、试样最大承载力及包体水平轴线上单元点剪应力发展过程的数值模拟分析, 得到以下几点结论:

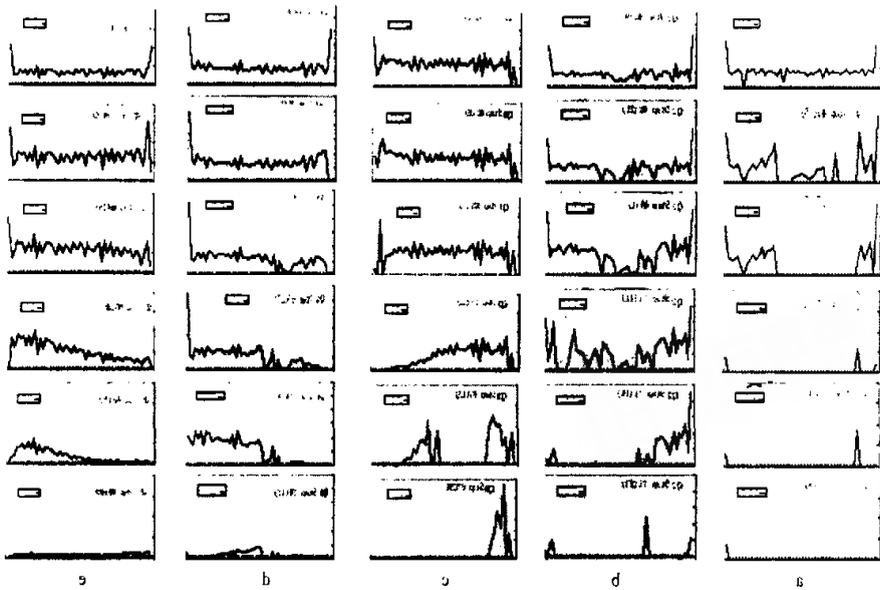


图7 包体水平轴线剪应力发展过程示意图

Fig.7 Process of shear stress at inclusion horizontal axial

(1) 随着包体强度的增大,包体破裂程度呈下降趋势,试样中形成的破裂带越来越不明显.

(2) 包体水平轴线上各单元点的剪应力降总是先发生在包体水平轴线的两端位置处,当包体强度较小时,剪应力降由包体水平轴线中央向其两端扩展,而当包体强度较大时,由包体水平轴线两端向其中央扩展.

(3) 随着包体强度的增大,包体声发射总次数呈明显的下降趋势,而包体发生明显声发射现象所对应的位移加载步(即位移加载量)呈现上升趋势.

(4) 随着包体强度的增大,试样最大承载力和临界应力值呈明显的上升趋势.

#### 参考文献:

- [1] Brady B T. Theory of earthquakes(part 1): A scale independent theory of rock failure[J]. Pure Appl Geophys, 1974, 112: 701-725.
- [2] Brady B T. Theory of earthquakes(part 2): Inclusion theory of crustal earthquakes[J]. Pure Appl Geophys, 1975, 113(1/2): 149-168.
- [3] Brady B T. Theory of earthquakes(part 4): General implications for earthquake prediction[J]. Pure Appl Geophys, 1976, 114: 1031-1059.
- [4] Rice J R. The theory of precursory procession in the inception of earthquake rupture[J]. Gerlands Beitr Geophysik, 1979, 88(2): 91-127.
- [5] 陈 颢. 地壳岩石的力学性能——理论基础与实验方法[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- [6] 梅世蓉. 地震前兆物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——固体孕育震模式的由来与证据[J]. 地震学报, 1995, 17(3): 275-282.
- [7] 许昭永, 王 彬, 赵晋明, 等. 含硬包体试样破裂特征的实验研究[J]. 地震学报, 1997, 19(1): 79-85.
- [8] HU Yi-li, XU Zhao-yong, WANG Bin, et al. The variation stress field on free plane of the sample containing hard inclusion in process of fracture development[J]. Earthquake, 1997, 17(2): 162-168.
- [9] 许昭永, 胡毅力, 赵晋明, 等. 含硬包体试样微破裂图像演变过程的实验研究[J]. 地震学报, 1997, 19(3): 317-322.
- [10] 张 智, 吴开统. 地震断层面上障碍体的实验研究[J]. 地球物理学报, 1989, 32(1): 204-209.
- [11] 唐春安, 傅守方. 震源孕育模式的数值模拟研究[J]. 地震学报, 1997, 19(4): 337-346.
- [12] 唐春安. 岩石破裂过程数值模拟方法发展的若干问题[A]. 世纪之交软岩工程技术现状与展望[C]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999. 10-17.

# 低弹模包体强度对试样破裂模式影响的数值试验

作者: [刘庭金](#), [唐春安](#), [朱合华](#)  
 作者单位: [刘庭金, 朱合华\(同济大学地下建筑与工程系, 上海, 200092\)](#), [唐春安\(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁沈阳110004\)](#)  
 刊名: [同济大学学报\(自然科学版\)](#) **ISTIC EI PKU**  
 英文刊名: [JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY \( NATURAL SCIENCE\)](#)  
 年, 卷(期): 2002, 30(3)  
 引用次数: 1次

## 参考文献(12条)

1. [Brady B T Theory of earthquakes\(part 1\):A scale independent theory of rock failure](#) 1974
2. [Brady B T Theory of earthquakes\(part 2\):Inclusion theory of crustal earthquakes](#) 1975(1/2)
3. [Brady B T Theory of earthquakes\(part 4\) :General implications for earthquake prediction](#) 1976
4. [Rice J R The theory of precursory procession in the inception of earthquake rupture](#) 1979(02)
5. [陈 地壳岩石的力学性能—理论基础与实验方法](#) 1998
6. [梅世蓉 地震前兆物理模式与前兆时空分布机制研究\(一\)—一固体孕震模式的由来与证据\[期刊论文\]-地震学报](#) 1995(03)
7. [许昭永, 王彬, 赵晋明 含硬包体试样破裂特征的实验研究\[期刊论文\]-地震学报](#) 1997(01)
8. [HU Yi - li, XU Zhao- yong, WANG Bin The variation stress field on free plane of the sample containing hard inclusion in process of fracture development](#) 1997(02)
9. [许昭永, 胡毅力, 赵晋明 含硬包体试样微破裂图象演变过程的实验研究\[期刊论文\]-地震学报](#) 1997(03)
10. [张智 吴开统地震断层面上障碍体的实验研究\[期刊论文\]-地球物理学报](#) 1989(01)
11. [唐春安, 傅宇方 震源孕育模式的数值模拟研究\[期刊论文\]-地震学报](#) 1997(04)
12. [唐春安 岩石破裂过程数值模拟方法发展的若干问题](#) 1999

## 相似文献(3条)

1. 期刊论文 [刘庭金, 唐春安 包体泊松比对含包体试样破裂模式的影响的数值试验 -大地测量与地球动力学](#) 2002, 22(2)

运用自行开发的岩石破裂过程分析系统RPPA2D, 在考虑岩石材料非均匀性的基础上, 对含不同泊松比的包体试样的破裂模式进行了数值试验. 研究认为: 包体泊松比对含包体试样的破裂模式有重要影响. 随着包体泊松比的增大, 包体试样的最大承载力、主声发射能量及总声发射能量都呈上升趋势, 包体试样的破裂特征也明显不同.

2. 期刊论文 [刘庭金, 朱合华, 唐春安 高弹模包体强度对试样破裂模式影响数值试验 -同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2002, 30(6)

应用东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的RPPA2D系统, 对含高弹模不同强度的包体试样的破裂模式进行了数值试验. 结果表明: 随着包体强度的增大, 包体主声发射位移加载量呈上升趋势; 试样最大承载力和临界应力呈上升趋势, 残余承载力呈下降趋势; 当包体与母岩强度接近时, 包体破裂程度低, 主声发射频度低; 当包体与母岩强度相差较大时, 包体破裂程度高, 主声发射频度高; 当包体强度较小时, 剪应力降由包体垂直轴中央不断向其两端扩展, 而当包体强度较大时, 剪应力降由包体垂直轴线的两端向其中央扩展.

3. 期刊论文 [刘庭金, 唐春安 软硬接触对含包体试样破裂模式影响的数值试验 -地震研究](#) 2002, 25(1)

运用自行开发的岩石破裂过程分析系统RPPA2D, 对包体与母岩间软、硬接触对包体试样破裂模式的影响进行了数值试验. 研究认为: 软、硬接触对包体试样的破裂特征和试样最大承载力起着重要的影响, 软接触对包体试样的破裂特征和最大承载力起着决定性的影响, 而包体本身所起的作用并不重要. 硬接触时包体试样的破裂特征和最大承载力主要取决于包体和母岩的力学性质.

## 引证文献(2条)

1. [韩贵雷, 贾玉琴 大断面巷道交叉点破坏机理分析及支护研究\[期刊论文\]-矿业研究与开发](#) 2009(4)
2. [刘庭金 混凝土及岩土材料破坏过程的弹塑性各向异性损伤数值模型及其应用\[学位论文\]博士](#) 2004

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_tjdxzb200203003.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_tjdxzb200203003.aspx)

下载时间: 2010年5月28日