

# 不同围压条件下孔壁周边裂纹演化的数值模拟分析\*

傅宇方<sup>1</sup> 黄明利<sup>1</sup> 任凤玉<sup>1</sup> 唐春安<sup>1, 2</sup>

(<sup>1</sup>东北大学岩石破裂与失稳研究中心 沈阳 110006)

(<sup>2</sup>中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室 北京 100080)

**摘要** 利用RFPA<sup>2D</sup>软件研究了试样孔洞周边裂纹的形成和演化,验证了三种类型裂纹的存在。研究了不同围压条件下不同裂纹间的相互作用机制。验证了局部应力集中是裂纹形成和扩展的重要因素,同时也指出,岩石类材料非均匀性是形成拉、压应力集中区及裂纹扩展路径不规则和随机性的主要原因。

**关键词** 数值模拟, 裂纹演化, 非均匀性, 声发射

**分类号** TV 223.4

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2000)05-0577-07

## 1 前言

在深部采矿和地下结构工程中,从采油钻孔到巷道岩壁稳定性是人们一直关心的重要问题。岩壁破坏一般表现在裂纹形成和集结,多裂纹相互贯通,并引起表面岩石的剥落,严重的将引发岩壁的动力失稳等灾害。由于埋深和构造应力的不同,破坏的形式也存在差异,因此研究不同围压条件下岩壁裂纹分布和发展规律是一项有意义的工作,它可以为钻孔和巷道支护和设计提供更可靠的依据。

在单轴和多轴加载条件下岩样孔壁裂纹形成和演化研究方面,人们做了大量的工作<sup>[1~14]</sup>。通常认为裂纹的模式有3种:(1)初始裂纹(primary cracks),随着施加载荷的增加而形成于孔洞周边的拉应力集中区;(2)远场裂纹(remote cracks),在孔洞周边的远方形成的裂纹;(3)剪切裂纹(shear cracks),在孔洞周边的压应力集中区形成的裂纹。这三种裂纹的分布形式见图1。

目前,国内外已有许多利用有限元(FEM)、边界元(BEM)和位移非连续性方法<sup>[5]</sup>(DDM)等数值方法研究孔洞周边材料破坏方面的报道。但是通常这些方法中的多数仅仅从均匀、连续介质出发。而实验和工程实际均表明岩石类材料非均匀性对破坏机制影响是非常显著的。目前岩石材料非均匀性对宏观

性质的影响已得到人们的认识,如文[6]所述,“微裂纹结构的演化和变形局部化行为的控制是决定岩石与混凝土材料的强度和变形性能的主要依据”。实际工程中加载方式主要是压缩载荷,而通常岩石类脆性材料破坏均以拉伸破坏为主。按照格里菲斯(Griffith)的思想,可以认为造成岩石材料脆性拉伸破坏的原因是其内部裂纹尖端的应力集中区诱导拉伸作用的结果。而实际上,岩石内部的孔隙、软的或硬的结核或颗粒、颗粒边界和三通点(triple points)都可以因为诱发应力集中而产生微破裂。在工程实际中,岩石的非均匀性主要受结构面的控制,但是在完整的、结构面不发育的岩体中,可以认为岩石材料的非均匀性是导致应力集中区产生的一个重要原因。同时由于岩石内部裂纹扩展方式与应力状态有关,作为影响应力状态的围压需要给予考虑,这样裂纹扩展和相互作用研究才能符合实际情况。在上述认识的基础上,本文采用东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的用于岩石破坏过程分析的软件——RFPA<sup>2D</sup>,研究了不同围压条件下岩石孔洞周边的裂纹演化问题。

## 2 岩石破坏分析 RFPA<sup>2D</sup>方法概述

RFPA<sup>2D</sup>(Rock Failure Process Analysis)软件是基于有限元应力分析原理开发的岩石类材料破坏过

1999年5月24日收到初稿,1999年9月6日收到修改稿。

\* 本研究为国家杰出青年基金(59525408)和辽宁省自然科学基金、中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室(LNM)开放基金资助项目。

作者 傅宇方 简介:男,27岁,1997年于东北大学采矿系获博士学位,现主要从事岩石破裂失稳机制及相关数值方法研究等方面的工作。

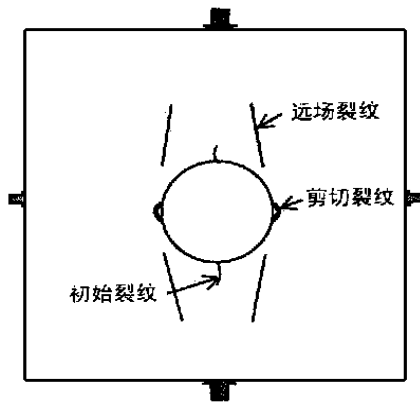


图 1 三种裂纹形式<sup>[4]</sup>

Fig 1 Three types of crack<sup>[4]</sup>

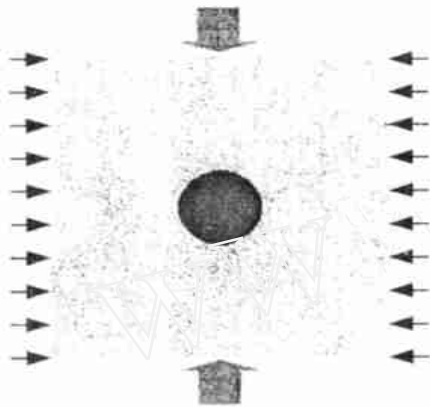


图 2 试样模型

Fig 2 Sample model

程分析工具, 基本原理参见文[7, 8]。RFPA<sup>2D</sup>软件运用物理统计的方法描述材料的非均匀性, 对于某一特定的结构面的非均匀处理, 可以采用不同分布参数来定义其性质。它由两部分组成: 应力分析和破坏分析。应力分析采用线弹性有限元法, 在这里有限元方法仅仅是一个应力分析求解器, 计算单元的应力、应变和位移, 不涉及破坏的处理; 破坏判据依据修正的库仑准则(Coulomb, 可考虑拉伸破坏), 破坏后的单元采用单元刚度特性退化处理。在当前步应力分析结束后, 再进入破坏分析阶段。破坏分析的结果是对整体刚度矩阵按实际单元的力学参数进行调整, 然后再进行应力分析, 直至分析结束。

### 3 建立模型

本文研究不同围压条件下脆性岩石孔壁周边裂纹演化规律。模拟侧压系数(水平方向围压值与垂直方向应力峰值之比) $\lambda = 0, 0.19, 0.24$ 条件下脆性岩石孔壁周边裂纹分布形式和破坏过程, 主要探讨复杂应力条件下三种裂纹的形成、扩展及其相互间作用的影响。

本研究采用正方形试样, 模型尺寸为  $150\text{mm} \times$

$150\text{mm}$ , 圆孔直径为  $37\text{mm}$ 。试样模型的物理力学性质参数及载荷条件如表 1。加载方式为压应力条件下的位移控制, 每步加载位移量  $\Delta S = 0.003\text{mm}$ , 侧向围压通过施加恒定应力载荷实现。模型划分为  $150 \times 150 = 22\,500$  个单元。模型见图 2。为了研究材料非均匀性的影响, 假设基体单元的弹性模量及强度等力学性质参数服从 Weibull 分布(采用何种具体的分布形式取决于对这个问题不同认识), 通过调整 Weibull 分布函数参数改变材料的非均匀性。因采用修正的库仑(Coulomb, 可考虑拉伸破坏)判据作为单元破坏的准则, 设准则中基元材料的拉、压强度比为  $1/5$ , 内摩擦角为  $30^\circ$ 。有关上述分布函数和参数的定义及选取方式参见文[7, 8]。

因篇幅所限, 本文仅讨论围压的影响。

表 1 计算模型力学性质参数

Table 1 Mechanical parameters of models

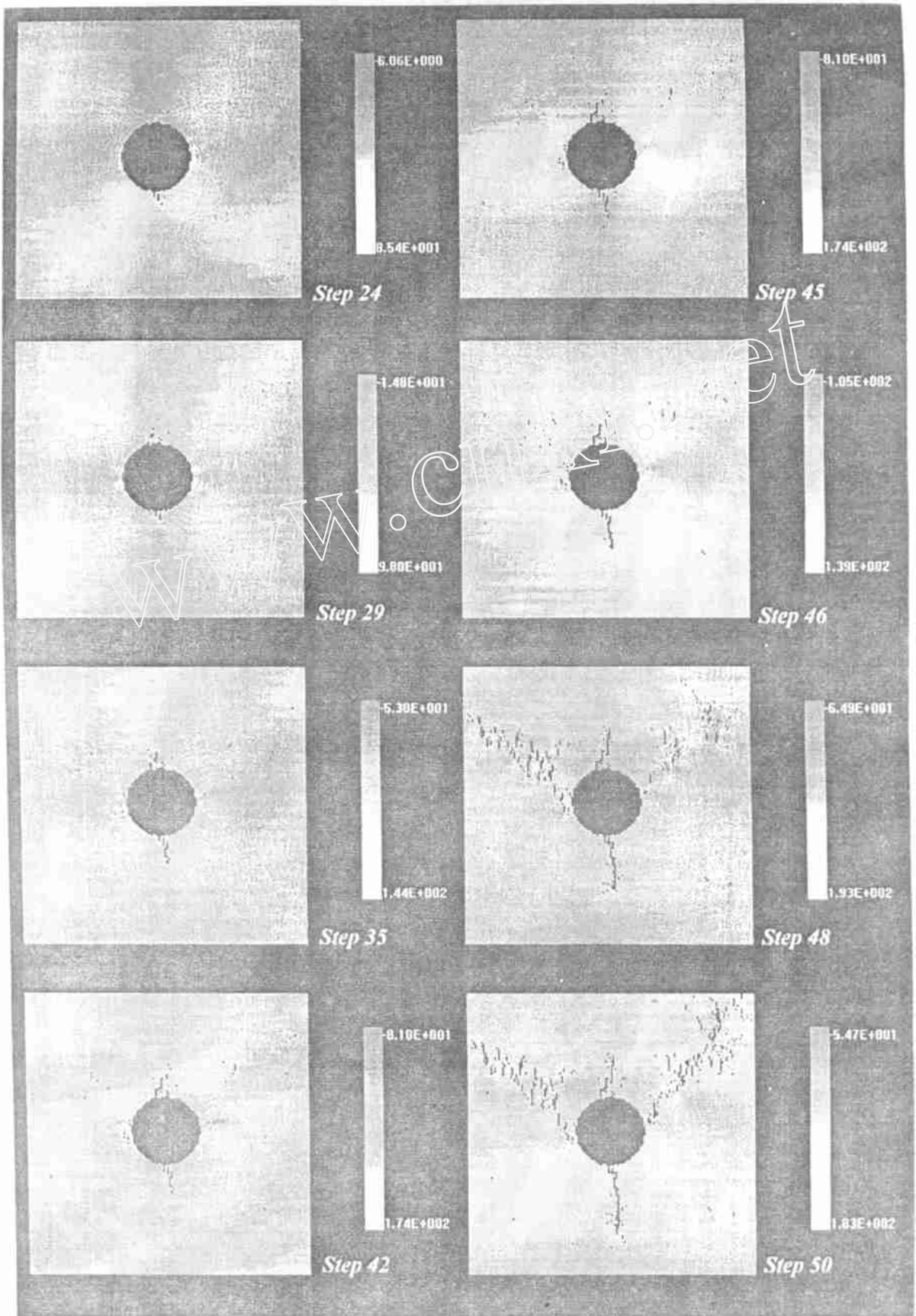
模型	$E / \text{MPa}$		$R / \text{MPa}$		$\nu$		$\lambda$
	均值	均质度	均值	均质度	均值	均质度	
I	3	60 000	3	150	10	0.25	0
II	3	60 000	3	150	10	0.25	0.19
III	3	60 000	3	150	10	0.25	0.24

## 4 计算结果及分析

### 4.1 裂纹的形成和分布

图 3~ 5 分别为模型 I, II, III 试样变形破坏的模拟过程, 其中图 4, 5 中声发射图代表了当前计算步产生的声发射<sup>[7]</sup>的分布形式, 剪应力图则是所有计算步破坏单元的累积结果。图 6 为模型 I, II, III 应力-应变曲线和声发射(能量累积)-时间曲线。

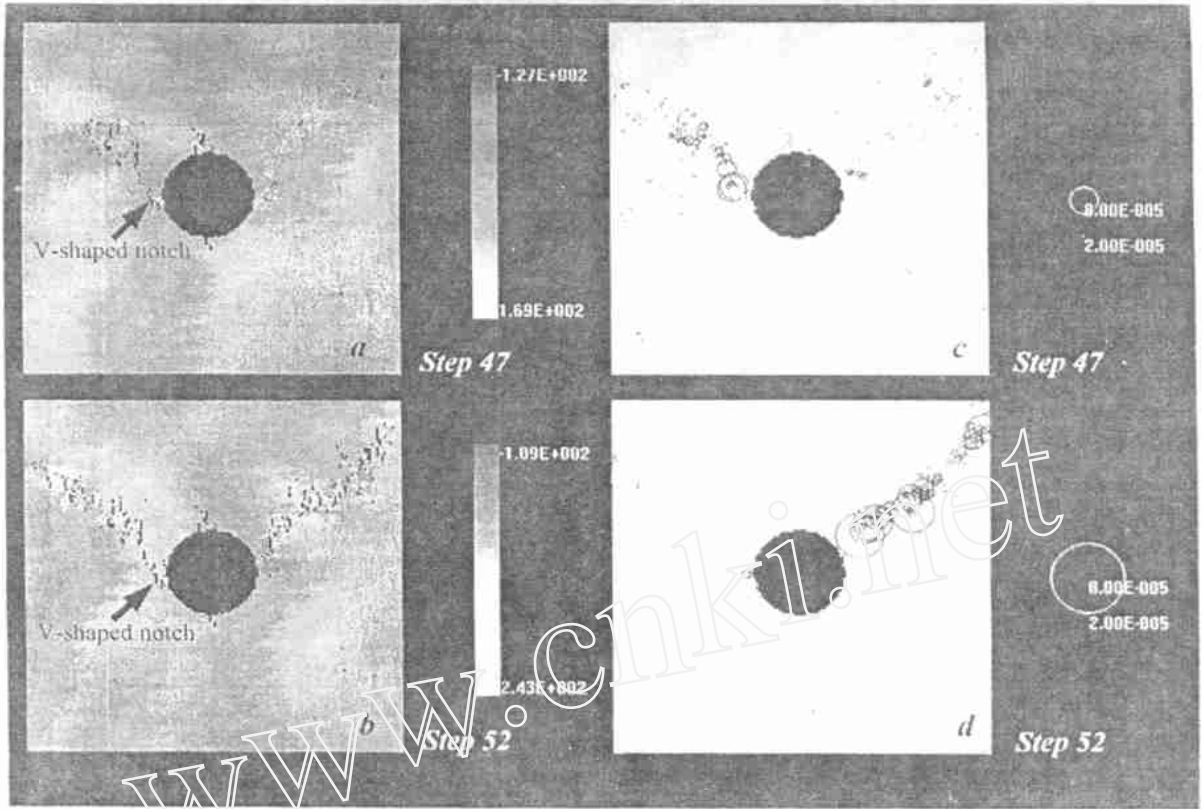
模拟结果中可以清晰地看到三种类型的裂纹。当载荷达到  $20.35\text{MPa}$  时(见图 3 中 24 步), 在平行于加载方向的孔洞上下顶端处的拉应力集中区初始裂纹出现; 随着垂直载荷的增加, 拉伸裂纹的长度不断增加(见图 3 中 24~ 50 步)。载荷达到  $24.19\text{MPa}$  时(见图 3 中 29 步), 剪切裂纹开始在垂直于加载方向的孔洞两侧压应力集中区出现, 随着载荷的继续增加, 剪切裂纹不断增加, 在孔洞两侧逐渐形成压裂区(45 步)。此后, 在与加载方向成  $45^\circ$  的地方(即试样的对角线)开始出现随机的、无序的、相互独立的小裂纹(拉伸和剪切裂纹均有, 但以后者居多)。当载荷达到  $20.3\text{MPa}$  时(见图 3 中 46 步), 由于远场裂纹的增加, 在外载荷的作用下, 裂纹间尚未贯通的部分扭剪, 产生剪切破坏, 原来彼此相互独立的裂纹相互贯通, 形成大的宏观裂纹(46~ 50 步)。文[2, 3]用石膏和 Potash 盐岩分别做了单孔洞和多孔洞周边裂纹演化的模型实验, 其最终破裂模



(图中单元灰度表示剪切应力值(MPa)的大小, 黑色表示单元已经破坏)

图 3  $\lambda = 0$  条件下孔洞周边裂纹演化过程图

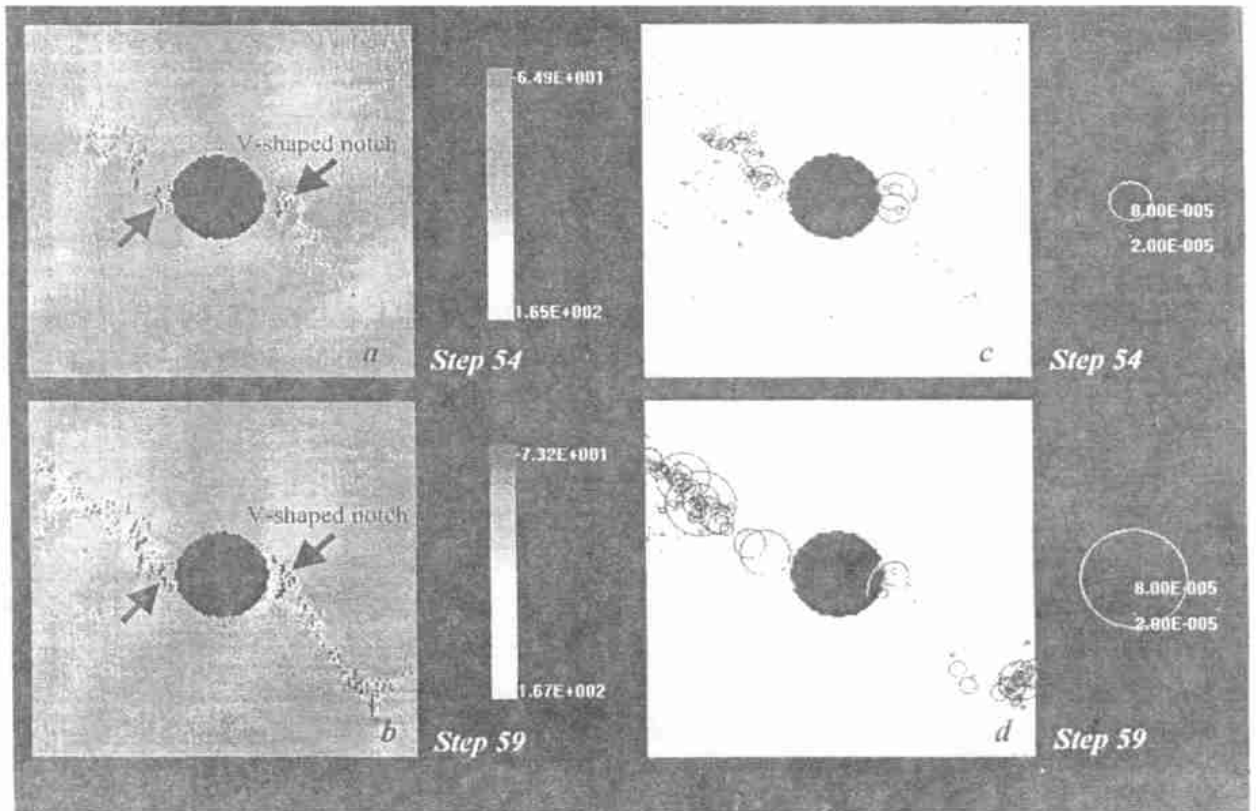
Fig 3 The evolution of crack around borehole with  $\lambda = 0$



(a), (b) 为剪应力图, 灰度表示应力值(M Pa)的大小; (c), (d) 为声发射分布图, 圆圈表示能量值(J)的大小。

图 4  $\lambda = 0.19$  条件下孔洞周边裂纹演化过程和声发射图

Fig 4 The evolution of crack around borehole and AE distribution with  $\lambda = 0.19$



(a), (b) 为剪应力图, 灰度表示应力值(M Pa)的大小; (c), (d) 为声发射分布图, 圆圈表示能量值(J)的大小。

图 5  $\lambda = 0.24$  条件下孔洞周边裂纹演化过程和声发射图

Fig 5 The evolution of crack around borehole and AE distribution with  $\lambda = 0.24$

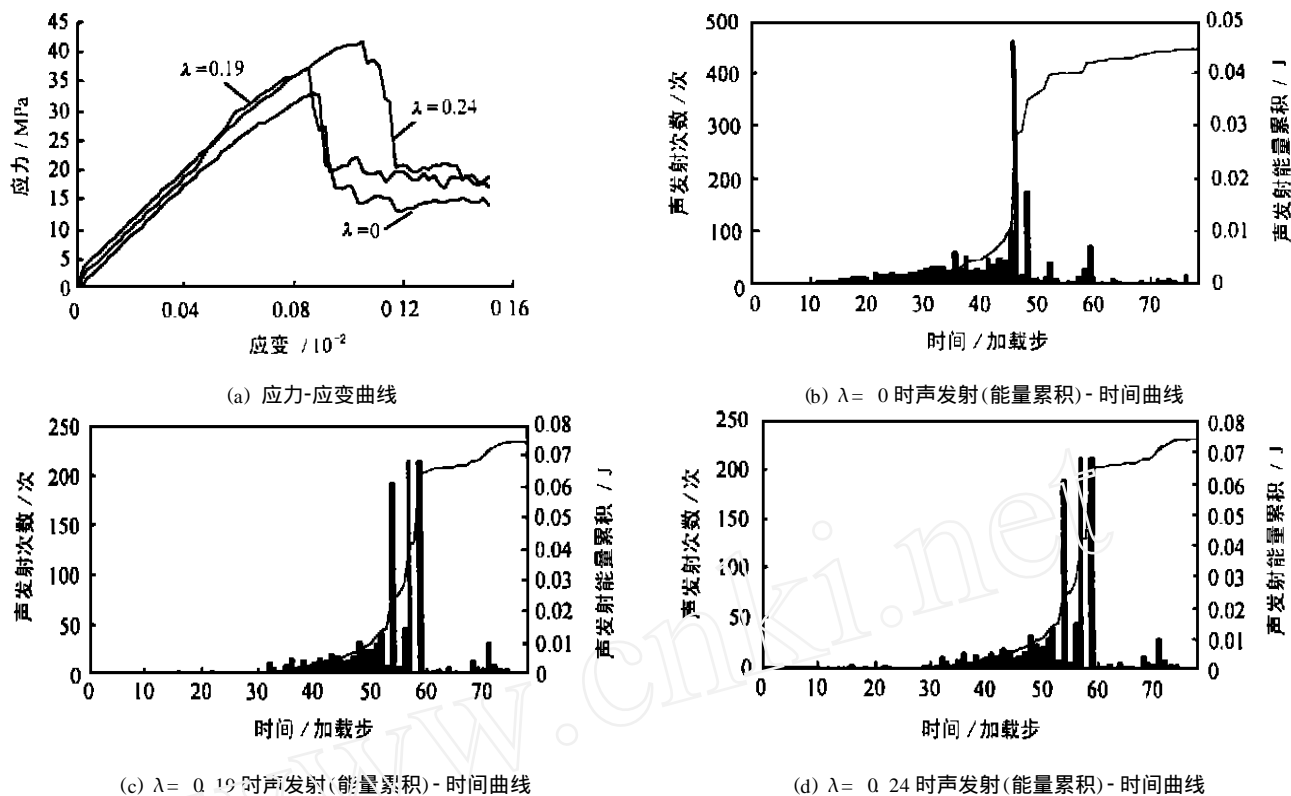


图 6 模型 I, II, III 应力-应变曲线和声发射(能量累积)-时间曲线

Fig 6 Stress-strain curves and AE number-time curves for model I, II and III

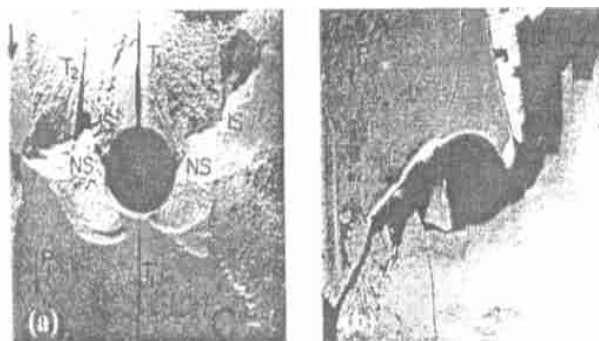


图 7 石膏试样破裂模式实例<sup>[2]</sup>

Fig 7 Fracture pattern of plaster samples<sup>[2]</sup>

式见图 7。图 7(a) 为石膏试样在低围压条件下孔壁裂纹模式和分布, 孔洞周边的三种裂纹初始裂纹 ( $T_1$ ), 远场裂纹 (IS), 剪切裂纹 (NS), 与本模拟结果 (图 3) 表现出较好的一致性; 图 7(b) 为石膏试样在低围压条件下的一种宏观破裂模式, 在与载荷 ( $P_1$ ) 方向呈  $45^\circ$  角的位置形成了一条宏观剪切破裂带, 裂纹从与载荷 ( $P_1$ ) 方向垂直的孔洞两侧开始发育, 并一直发展到试样的两端, 同侧压系数  $\lambda = 0.24$  的数值模拟的破裂模式 (图 5) 比较吻合。

当与最大主应力成  $45^\circ$  角方向的宏观剪切裂纹形成后, 其破裂方式见图 3 第 46, 48 步, 由图 6(b) 声发射能量累积曲线可以看到, 释放出大量的能量。从试样的整个破裂过程来看, 破裂的主要能量和声

发射数量取决于剪切破坏, 而破裂初期的拉伸破裂所消耗的能量和产生的声发射数量是非常少的, 见图 6(b)。

图 4, 5 是侧压系数  $\lambda$  分别为 0.19 和 0.24 的试样孔壁裂纹发育和形成数值模拟结果, 尽管以上提到的 3 种类型的裂纹均能出现, 但由于围压的作用, 拉伸裂纹明显被抑制, 扩展速度逐渐降低并停止, 剪切作用的影响明显增强, 在孔壁两侧形成明显的剪切破坏带 (图 4 中 52 步, 图 5 中 59 步), 而孔壁上下顶端拉伸裂纹扩展距离很短。与此同时, 在图 4, 5 中可以发现与主应力垂直的孔洞两侧的破裂区呈 V 形 (图中黑色箭头所指的区域), 在工程实际中这种破坏被称为 V-shaped notch, 是一种多发于构造应力复杂的深部岩石开挖工程中的破裂现象, 其形成原因是由于在特定应力条件下, 在孔壁两侧产生应力集中, 同时又因开挖改变了原来的三维受力状态, 使其处于单轴受力状态, 进而产生 V 字型破坏区。图 8 为工程实际中巷道的 V-shaped notch 破坏实例<sup>[11]</sup>。关于这一破坏现象的研究在国内外已有较多的报道<sup>[4, 9, 10-12]</sup>。

由图 6 可以看到, 与图 6(b) ( $\lambda = 0$ ) 相比, 图 6(c) ( $\lambda = 0.19$ ), 图 6(d) ( $\lambda = 0.24$ ) 在整个破裂过程中声发射的数量减少, 但是主破裂所需的能量却增加了, 并且主破裂发生的时间向后延迟。这一点与岩石力学实验中的大量结果非常吻合。



图 8 开挖工程破坏实例<sup>[11]</sup>

Fig 8 A practical failure case<sup>[11]</sup>

#### 4.2 裂纹演化及相互作用对试样宏观破坏的影响

裂纹间相互作用和连接将产生局部弱化并最终导致岩石的宏观失效。这一点从图 3~5 中裂纹的形成和演化过程可观察到。在本文研究的问题中, 尽管岩石材料抵抗拉伸的能力低, 但是影响岩石宏观失效的主要原因并不是张拉裂纹(孔洞上下端), 而是诸多小裂纹的形成导致局部区域弱化(与主应力成 45°)。在与最大主应力方向成 45°的条带(共轭变形带)上分布着众多平行于最大主应力方向的细小裂纹, 并在与最大主应力方向成 45°的位置上大致按翼型分布排列, 同孔洞上下端张拉裂纹相比, 剪切裂纹和远场裂纹的尺寸比较小, 但是由于它们的数量多排列比较紧密, 整个远场裂纹分布区的性质弱化使应力场转移到自身, 抑止了张拉裂纹的进一步扩展。然后随着载荷的增加, 弱化区面的剪切滑移使得众多的细小裂纹间未破坏的部分发生了扭剪连接, 并逐渐延伸到岩石试样边界的劈裂面, 形成宏观裂纹带。这一点同实验结果<sup>[3]</sup>比较一致。

另外, 在这一过程中由于岩石类材料的非均匀性(有关岩石类材料非均匀性对破坏的影响的论述将在其他文章中详细介绍), 使得裂纹的扩展路径表现出随机性、非规则性(图 3~5 孔洞的上下端及两侧的初始裂纹路径)。在裂纹发展的前端由于强度高的基元的出现, 裂纹发展方向便发生改变, 转向强度低的基元方向发展。单独的裂纹能够分出许多小的分支, 呈“Y”字形扩展。随着载荷的不断增加, 裂纹的分叉越来越明显, 并进而发展成不同分叉裂纹间的相互搭接, 最终导致条带状分叉裂纹发育、相互贯通的软化区域出现, 降低了材料的内聚力。在剪应力的作用下, 整个软化区发生错动, 裂纹间的桥

接被剪断, 造成整个岩石试样的坍塌破坏。这一结果同试验结果<sup>[3]</sup>是吻合的。

## 5 结 论

本文通过上述研究得到如下结论:

(1) 验证了初始裂纹、剪切裂纹和远场裂纹的存在。

(2) 裂纹的形成和演化同局部应力集中和岩石材料的非均匀性有关。

(3) 在低围压条件下, 试样的宏观失效主要由试样中的单一裂纹的扩展造成的; 在较高围压条件下, 微裂纹数量增加、集中相互作用是导致试样宏观失效的主要原因。

(4) 岩石材料的非均匀性是裂纹的扩展路径表现出随机性的主要原因。

依据本文的研究结果, 影响深部开挖工程岩壁稳定性的主要因素是垂直于最大主应力方向的剪切破坏, 由于剪切裂纹的产生为远场裂纹的形成提供了基础, 由图 3~5 均可看到, 与加载方向成 45°左右的宏观裂纹均是从剪切裂纹处开始的, 而且诸多细小裂纹间的相互贯通均是由于剪切滑移造成的, 而初始裂纹在这种复杂应力条件下对宏观破裂失稳的影响不大。同时也能看到, 在引入单元非均匀性统计分布规律后, 即便采用的力学模型相对比较简单, 但是仍然能够模拟裂纹形成、扩展及相互作用的复杂过程。这说明复杂的破坏现象可能是一些简单机理演化的结果<sup>[15]</sup>。

致谢 本文得到中国地质大学地质超深钻探技术国家专业实验室资助, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 张晓春, 杨挺青, 缪协兴. 岩石裂纹演化及其力学特性的研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 97~103
- 2 Lajtai E Z, Lajtai V N. The Collapse of cavities[J]. Int. J. Rock, Min. Sci. & Geomech. Abst., 1975, 12(1): 81~86
- 3 Carter B J, Lajtai E Z. Stress and time-dependent fracture around cavities in physical models of Potash salt rock [A]. In: Hudson J. A. ed. Proc. ISRM Symposium: Eurock 92, Chester, Rock characterization[C]. London: Imperial College, 1992, 269~274
- 4 Martin C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength [J]. Can. Geotech. J., 1997, 34(5): 159~168
- 5 Napier J A L, Hildyard M W. Simulation of fracture growth around openings in highly stressed, brittle rock[J]. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1992, 92(6): 159~168
- 6 杨卫. 细观力学和损伤力学[J]. 力学进展, 1992, 22(1): 1~9

- 7 唐春安 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, 1997, 16(4): 368~ 374
- 8 Tang C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34(2): 249~ 261
- 9 Martin C D, Read R S, Martino J B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34(7): 1065~ 1073
- 10 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒等 地下工程围岩稳定性分析 第一版[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983, 245~ 258
- 11 URL Puzzle answers, Why does it crack?. ISRM News Journal, 1993, 1(2): 68~ 71
- 12 费鸿禄 岩爆的动力失稳研究[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 1993
- 13 Ewy R T, Cook N G W. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock—I: observations and analysis of deformations[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1990, 27(5): 387~ 407
- 14 Ewy R T, Cook N G W. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock—II: initiation, growth and interaction of fractures[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1990, 27(5): 409~ 427
- 15 夏蒙禁, 韩闻生, 柯孚久等 统计细观损伤力学和损伤演化诱发突变(1)[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 1~ 40

## NUMERICAL ANALYSIS OF CRACK EVOLUTION AROUND BOREHOLE IN ROCK SAMPLE SUBJECTED TO CONFINING PRESSURES

Fu Yufang<sup>1</sup>, Huang Mingli<sup>1</sup>, Ren Fengyu<sup>1</sup>, Tang Chun an<sup>1,2</sup>

<sup>(1)</sup> Center of Rockbursts and Induced Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006 China)

<sup>(2)</sup> Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

**Abstract** A newly developed numerical approach RFPA<sup>2D</sup> Code is presented to simulate the evolution of crack around borehole in brittle rock. The three types of cracks observed in experiments are examined in numerical study. In addition, the mechanisms of fracture interaction in rock specimen subjected to confining pressures are investigated. The results from the above studies are that the local stress concentration is an important factor to affect the growth of fractures. Also, it is point out that the heterogeneity of rock materials is the significant reason for formation of the zone of tensile, compressive stress concentration, unregular path and randomness of propagation of cracks.

**Key words** numerical simulation, evolution of crack, heterogeneous acoustic emission

### 下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》是今年最后一期学报, 将集中发表地处我国西部省份的陕西和甘肃两省作者的论文。这些论文的主要内容为:

- (1) 岩体本构模型、CT 实时分析、多场耦合分析与数值计算;
- (2) 矿山岩石力学与采矿事故预报专家系统;
- (3) 滑坡模型、边坡稳定性分析与山体灾害预测;
- (4) 松动岩体与敦煌洞窟围岩及附加构筑物的工程特性;
- (5) 岩土介质的动力特性与黄土本构关系;
- (6) 动态离心模型试验与振动台试验研究;
- (7) 深基坑冻土墙与其他。

此外, 作为年末期, 还发表学报分类目录和总目录。