

# 类岩材料多裂隙体在单轴压缩下的数值模拟

郑欣平, 曹平, 蒲成志

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

E-mail: xinpingsz@hotmail.com

2011-10-19 收稿; 2011-12-30 接受

国家自然科学基金(10972238)资助

**摘要** 应用岩石破裂过程分析系统(RFPA<sup>2D</sup>)软件, 考虑岩石的非均匀性, 对含不同裂隙倾角和分布密度的试件在单轴压缩下的破坏模式进行研究, 探索了不同裂隙倾角和分布密度对多裂隙类岩材料断裂破坏模式的影响规律. 数值分析与实验结果基本一致, 试样破坏是一个由渐变到突变的过程, 总体破坏过程可大致分为弹性变形阶段、裂纹萌生和稳定扩展阶段、裂纹不稳定扩展至失稳阶段 3 个阶段; 声发射事件也可对应分为线性阶段、增长阶段、突变阶段 3 个阶段. 对比不同试件组发现, 含多预制裂隙体的裂纹贯通方式和整体破坏方式由裂隙倾角起主导影响作用; 裂隙分布密度对裂隙体整体破坏形式的影响因裂隙倾角的差异而有所不同.

## 关键词

类岩材料多裂隙体  
单轴压缩  
裂隙倾角  
分布密度  
破坏模式  
数值分析

天然岩石材料中存在裂隙、孔隙、层理、断层、软弱夹层等弱结构面, 使其呈现出各向异性、非均匀性、不连续性等特点, 加大了工程项目开展的难度. 岩石在外载作用下的破坏过程, 实际上就是其内部弱结构面萌生、扩展、贯通的过程. 因此, 岩石以及类岩材料中裂纹的不规则扩展、相互作用及其贯通破坏机制, 引起了众多学者的关注.

Muskelishvili<sup>[1]</sup>利用复变应力函数理论为求解共线多裂隙问题建立了理论基础. Hori 和 Nemat-Nasser<sup>[2]</sup>将虚张力法应用于解决多裂隙或缺陷间的相互作用问题. Wang<sup>[3]</sup>利用边界力法对轴向拉伸载荷作用下含有共线裂隙的矩形板进行了研究. Chen<sup>[4]</sup>应用复变函数理论推导了多种情况下的多裂隙问题的理论解. 张平等<sup>[5-7]</sup>在前人的基础上, 综合分析了各种影响因素. 黎立云等人<sup>[8,9]</sup>对预制有序及无序多裂隙类岩材料进行研究, 探讨了裂隙倾角对宏观等效强度、等效弹性模量及泊松比的影响规律. 黄明利等人<sup>[10]</sup>在电子显微镜扫描下进行单轴压缩实验, 即时观察并分析了岩石受力过程中微裂纹的萌生、扩展和贯通破坏过程. 赵永红和梁晓峰<sup>[11]</sup>研究了带预制

割缝灰岩平板试件在单轴压缩下的微裂纹萌生、扩展及贯通过程.

唐春安教授研究开发了 RFPA 软件, 提出真实破坏过程分析方法, 为岩石的数值模拟提供了新的研究思路, 该系统在岩石破坏机制与岩石工程问题的研究方面已取得许多成果. 朱万成<sup>[12]</sup>对含中心裂纹的岩石进行了单轴巴西劈裂实验的数值模拟; 芮勇勤<sup>[13]</sup>对岩石剪切破裂过程进行了数值模拟研究; 李连崇<sup>[14]</sup>考虑岩石损伤过程的时间因素影响, 建立了考虑流变效应的岩石破裂过程 RFPA<sup>2D</sup> 数值模型.

本文利用 RFPA<sup>2D</sup> 软件, 考虑岩石的非均匀性, 对含不同裂隙倾角和分布密度的试件在单轴压缩下的破坏模式进行研究, 与实验结果进行比对分析, 探索裂隙倾角及裂隙分布密度双重因素影响下多裂隙类岩材料的断裂破坏规律.

## 1 RFPA<sup>2D</sup> 数值模拟

### 1.1 RFPA<sup>2D</sup> 基本原理<sup>[15]</sup>

RFPA 软件基于有限元理论和统计损伤理论, 综

合考虑了材料的非均性、缺陷分布的随机性,并把这种材料特性的统计分布假设结合到数值计算方法(有限元法)中,对满足给定强度准则的单元进行破坏处理,从而使得非均匀性材料破坏过程的数值模拟得以实现。

RFPA 软件中材料介质模型离散化成由细观基元组成的数值模型,认为材料介质在细观上是各向同性的弹-脆性或脆-塑性介质;并将离散化后的细观基元的力学性质假定服从统计分布规律,从而建立细观与宏观介质力学性能的联系。RFPA 利用线弹性有限元方法,按弹性力学中的基元线弹性应力、应变求解方法,分析模型的应力、应变状态,并引入适当的基元破坏准则(相变准则)和损伤规律,基元的相变临界点用修正的 Coulomb 准则。

RFPA 模拟裂纹扩展时,材料介质的裂纹扩展是一个准静态过程,忽略因快速扩展引起的惯性力的影响。

### 1.2 RFPA<sup>2D</sup> 数值模型

进行数值模拟时,为了充分模拟试件与加载钢板之间的相互作用,在模型中设置上下 2 块加载板,其材料参数按照普通钢取值。同时,为了缓解试件与加载板之间的接触应力,减弱端部效应,在加载板与试件间设置一层垫层,其弹性模量取值为 10 GPa。加载板和垫层的泊松比均为 0.25<sup>[12]</sup>。

采用 RFPA<sup>2D</sup> 软件进行数值模拟,为了考虑岩石或类岩石材料的非均匀性对模型中裂纹扩展及破裂

过程的影响,试件假定由等尺寸的四边形单元组成,这些单元的力学性质(如弹性模量、强度等)按照 Weibull 分布进行赋值。RFPA<sup>2D</sup> 软件区别于其他软件的特点是考虑材料非均匀性。假设加载板和垫层为均匀、各向同性;试件单元需假定其均质度系数  $m$ ,  $m$  值越大,认为其均质性越好;本构关系中的其他参数(如摩擦角),不考虑其非均匀性。该试件模型由 150×200 个细观元组成,其 Weibull 分布参数见表 1。根据实验环境,设置边界条件,采用 0.002 mm/step 的位移控制加载速率对模型进行单向加载数值分析。

考虑裂隙倾角的影响,设置裂隙倾角  $\theta$  为 25°或 75°;为了研究不同的裂隙分布密度的影响,设计选用 15 条、20 条、25 条和 30 条裂隙(每 5 条一排)4 种类型,裂隙布置方式如图 1 所示。试件为多条平行裂隙与多组共线裂隙的组合体。

### 2 试件制作与实验

试件模型使用标号 425 的白水泥、自来水和经 1.05 mm 孔径筛分过的细沙,利用厚度为 0.4 mm 的铝合金薄片,预制成闭合贯通裂隙,裂隙长度为 20 mm;脱模后,试件外观尺寸为 200 mm×150 mm×30 mm。裂隙倾角  $\theta$  设置 25°和 75°两组,每组预制 15 条、20 条、25 条和 30 条有序贯通裂隙(每 5 条一排)4 种类型试件<sup>[16]</sup>。试件中裂隙布置方式如图 1 所示(单位 mm)。

类岩材料多裂隙体破坏实验在新 SANS 微机控制电液伺服刚性试验机上进行。实验加载方式采用

表 1 数值模型的材料参数

弹性模量		抗压强度		泊松比	摩擦角	压拉强度比
均质度	平均值(MPa)	均质度	平均值(MPa)			
3	18500	3	75	0.23	40°	11

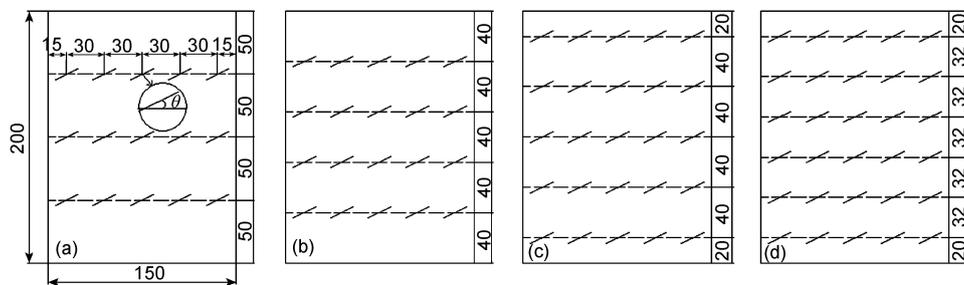


图 1 试件的几何参数

(a) 15 条裂隙; (b) 20 条裂隙; (c) 25 条裂隙; (d) 30 条裂隙

200 N/s 的力控. 为了减少端部效应的影响, 在加载钢块和试件上下受压接触面间布置预先涂抹黄油的橡皮垫.

### 3 破坏模式分析

#### 3.1 试件宏观破坏模式

数值模拟的试件破坏模式与实验结果基本吻合, 25°和 75°两组裂隙体的数值模拟与实验的破坏模式见图 4 和 5. 观察数值模拟的试件破坏模式, 在预制裂隙的尖端依次出现翼裂纹、次生裂纹, 最后岩桥发生搭接, 试件破坏. 裂纹首先从预制裂隙的尖端开始萌生, 随着施加位移的增加, 两侧翼裂纹发生扩展并最终大致沿着平行于最大压应力的方向(即轴向), 并能够延伸到试件的上下端面; 内部翼裂纹的扩展范围一般在多个预制裂隙之间的岩桥区域.

采用 RFP A<sup>2D</sup> 进行数值模拟, 可逐步观察到预制裂隙尖端产生翼裂纹, 裂纹扩展、贯通的过程. 可根据每一步的不同变化判断翼裂纹萌生、扩展的次序. 图 2 以含 20 条 25° 预制裂隙的模型为例, 展示了模拟得到的完整破坏过程.

图 3 为数值模拟的荷载-位移曲线和声发射曲线. 对载荷-加载步曲线进行分析, 可发现随着施加位移

的逐渐增加, 试件在受力后, 其破坏是一个由渐变到突变的过程, 总体破坏过程可大致分为 3 个阶段. (1) 弹性变形阶段: 曲线呈线性关系, 材料内部发生原有裂隙压密及孔洞闭合等局部结构调整; (2) 裂纹萌生和稳定扩展阶段: 试件中预制裂隙的尖端产生局部应力集中, 随着所受位移的逐渐增加, 即所受荷载的增加, 可观察到预制裂隙尖端有翼裂纹的萌生和扩展; (3) 裂纹不稳定扩展至失稳阶段: 此时的荷载达到峰值强度, 瞬间发生突然性的裂纹扩展和贯通, 裂纹扩展和贯通的速度很快, 次生裂纹相互连接形成宏观的破裂面, 试件的承载骨架发生破坏, 承载能力急剧下降.

假定每个发生初始损伤的单元以声发射的形式释放其所具有的弹性能, 将声发射数目按破裂的微观单元数目进行统计. 对声发射数目曲线进行分析, 由声发射事件随加载过程的变化关系, 可大体分为 3 个阶段. (1) 线性阶段, 声发射来源于预制裂隙内部颗粒间的摩擦和预制裂隙压密过程中的声发射, 事件断续、零星、稀少; (2) 声发射事件增长加快, 但能量较小, 反映了裂纹的萌生; (3) 随着施加位移的增加, 声发射产生坡度较陡的高峰, 声发射事件增加速度快, 且能量较大, 反映出裂纹的不稳定扩展. 峰值强度后, 声发射事件骤跌, 表明试件发生破坏后, 释



图 2 20 条 25° 倾角裂隙体的渐进破坏模式

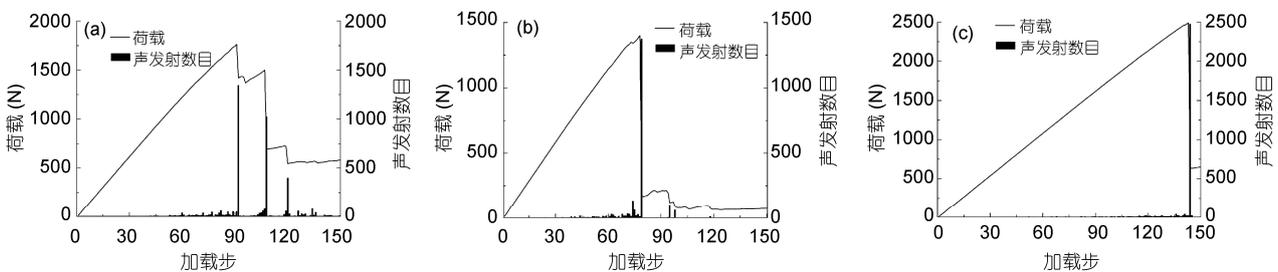


图 3 荷载-位移曲线和声发射曲线

(a) 20 条 25° 裂隙; (b) 30 条 25° 裂隙; (c) 20 条 75° 裂隙

放出大量能量, 试件强度丧失.

### 3.2 不同裂隙倾角、分布密度下破坏模式对比分析

当裂隙倾角为  $25^\circ$  时(如图 4 所示), 15 条裂隙体试件, 在加载初期, 预制裂隙被压密, 此过程作用时间较长; 随施加位移的逐渐增加, 翼裂纹从预制裂隙尖端开始萌生, 试件两侧的翼裂纹发展先于内部; 施加位移的进一步增加, 裂隙尖端开始出现次生倾斜裂纹; 最终, 试件两侧的翼裂纹大致沿着平行于最大压应力的方向产生贯通, 与裂隙走向同向的斜对角线上的裂隙尖端翼裂纹产生搭接、贯通, 试件整体发生破坏. 裂隙分布密度增大, 相邻两排裂隙间岩桥长度减小. 20 条裂隙体试件, 预制裂隙尖端出现翼裂纹的时间较 15 条裂隙体试件早; 继续加载, 位于与裂隙走向同向的斜对角线上的裂隙尖端翼裂纹发育速度较快, 并搭接形成贯通裂隙. 25 条裂隙体试件, 相邻两排裂隙间岩桥长度及走向与 20 条时相同, 只是减小了预制裂隙与上下两端面间的距离, 从而增大裂隙的分布密度. 30 条裂隙体试件, 翼裂纹出现得更早, 试件破坏源于斜对角线上产生较大相对位移.

当裂隙倾角为  $75^\circ$  时(如图 5 所示), 15 条裂隙体试件, 预制裂隙的压密现象较不明显, 翼裂纹出现时间较晚; 翼裂纹的发育主要集中在试件两侧的预制

裂隙尖端, 试件破坏主要是由于两侧翼裂纹的搭接、贯通, 试件产生突然整体破坏, 试件内部少见翼裂纹的发育. 20 条、25 条、30 条裂隙体试件的破坏模式无明显差异, 但发生整体破坏的时间越来越早.

对比分析图 3 的荷载-位移曲线和声发射曲线, 可发现: (1) 当裂隙倾角同为  $25^\circ$  时, 20 条裂隙体与 30 条裂隙体的荷载-位移曲线和声发射曲线大致变化趋向相同. 20 条裂隙体可观察到 3 次荷载与声发射数目的突变, 分别反映了两侧和斜对角线上的翼裂纹搭接、贯通; 30 条裂隙体只出现 1 次荷载与声发射数目突变, 另 2 次变化幅度不大, 因 30 条裂隙体的破坏源于斜对角线上的裂纹贯通破坏, 产生较大相对位移, 而两侧较难观测到翼裂纹的搭接、贯通现象. 30 条裂隙体的峰值荷载和声发射数目突变比 20 条裂隙体早出现. 30 条裂隙体在预制裂隙尖端出现翼裂纹的时间较 20 条裂隙体早, 试件发生破坏速度较快. (2) 当裂隙分布密度同为 20 条时,  $75^\circ$  倾角裂隙体的荷载-位移曲线和声发射曲线与  $25^\circ$  倾角裂隙体不同.  $75^\circ$  倾角裂隙体只发生 1 次荷载与声发射数目的突变, 且荷载与声发射变化量较  $25^\circ$  倾角裂隙体大. 因  $75^\circ$  倾角裂隙体主要是两侧翼裂纹的搭接、贯通, 试件产生突然整体破坏, 与  $25^\circ$  倾角裂隙体的破坏模式有明显差异.  $25^\circ$  倾角裂隙体的峰值荷载和声发射突变出现时间比

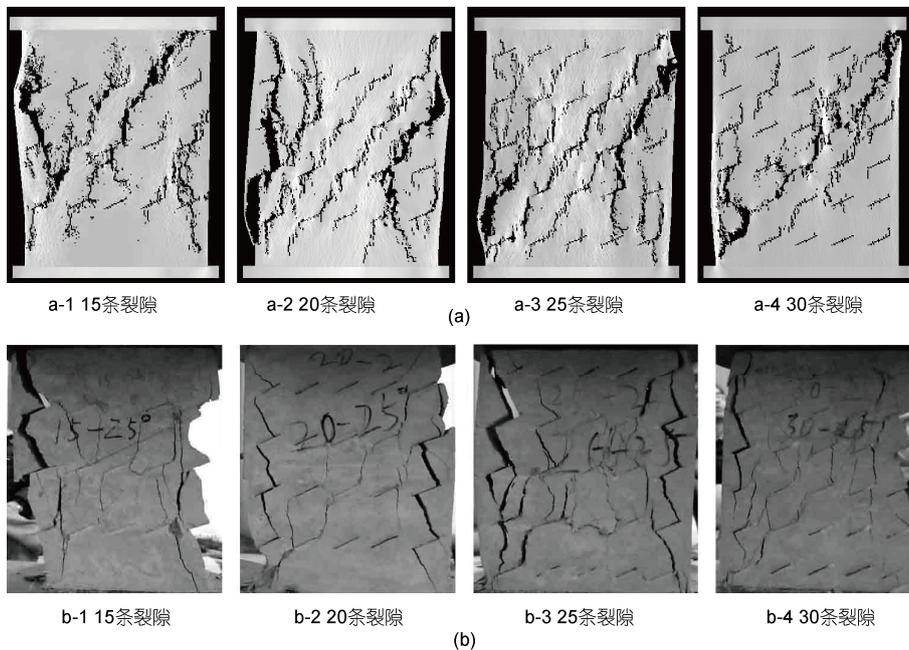


图 4  $25^\circ$  倾角裂隙体的破坏模式  
(a) 模拟图; (b) 实验图

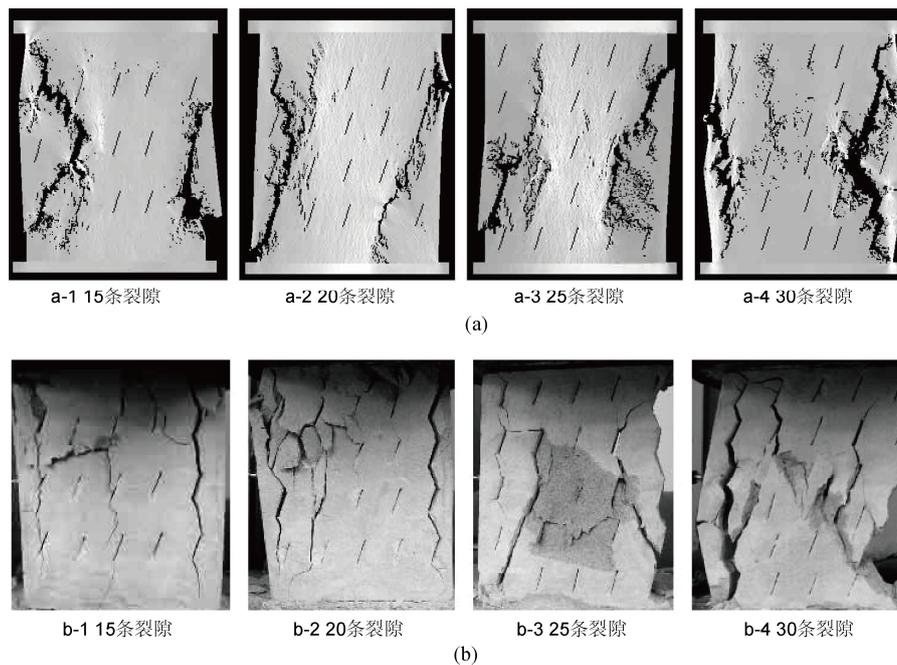


图5 75°倾角裂隙体的破坏模式  
(a) 模拟图; (b) 实验图

75°倾角裂隙体早, 即 25°倾角裂隙体出现翼裂纹的时间比 75°倾角裂隙体早, 且发生破坏时间也较早。

通过不同试件组破坏模式对比发现: (1) 多裂隙体的裂隙贯通方式和整体破坏方式由裂隙倾角起主导影响作用, 含同种密度多裂隙体试件, 裂隙倾角不同则破坏模式有明显差异. 同为含 20 条预制裂隙的试件, 25°试件可观察到两侧与斜对角线上的预制裂隙间的贯通破坏, 75°试件只观察到两侧的预制裂隙间的贯通破坏. (2) 裂隙分布密度对裂隙体整体破坏形式的影响因裂隙倾角的差异而有所不同, 裂隙倾角越小, 其受分布密度的影响越大, 随着倾角的增大, 受分布密度的影响减弱. 25°试件组, 含 15 条预制裂隙时, 先观察到两侧翼裂纹的萌生、贯通, 再发现斜对角线上的裂纹贯通, 试件整体破坏; 而含 30 条预制裂隙时, 试件产生破坏的主要原因是斜对角线上的裂纹贯通破坏, 产生较大相对位移. 75°试件组, 随着分布密度的增加, 破坏模式基本保持不变。

#### 4 结论

考虑裂隙倾角和分布密度双重因素的影响, 通过数值分析结果与实验结果的对比, 发现数值模拟

中的模型破坏过程与实验中观察到的裂隙体破坏模式基本一致. 综合两种破坏模式的结果, 得到如下结论.

(1) 对数值模拟中的载荷-加载步曲线进行分析, 可发现随着施加位移的逐渐增加, 试件在受力后, 其破坏是一个由渐变到突变的过程, 总体破坏过程可大致分为 3 个阶段: 弹性变形阶段、裂纹萌生和稳定扩展阶段、裂纹不稳定扩展至失稳阶段. 声发射事件随加载过程的变化关系, 也可大体分为线性阶段、增长阶段、突变阶段 3 个阶段.

(2) 裂隙倾角对含多预制裂隙体的裂隙贯通方式和整体破坏方式起主导影响作用. 含多预制裂隙体在同种密度下, 对于不同的裂隙倾角, 其破坏模式有明显的差异.

(3) 裂隙分布密度对含预制裂隙体整体破坏模式的影响因裂隙倾角的差异而有所不同, 裂隙倾角越小, 其受分布密度的影响越大. 裂隙倾角较小时, 试件破坏模式受裂隙分布密度影响较大, 不同密度下的破坏模式有较明显的差异; 随着裂隙倾角的增大, 其破坏模式受裂隙分布密度的影响程度减弱, 不同密度下的破坏模式相近.

## 参考文献

- 1 Muskelishvili N I. Some Basic Problems of Mathematical Theory of Elasticity. Groningen, Holland: Noordhoff Press, 1953
- 2 Hori M, Nemat-Nasser S. Interacting micro-cracks near the tip in the process zone of a macro-crack. *J Mech Phys Solids*, 1987, 35: 601–629
- 3 Wang R D. The stress intensity factors of a rectangular plate with collinear cracks under uniaxial tension. *Eng Fract Mech*, 1997, 56: 347–356
- 4 Chen Y Z, Hasebe N, Lee K Y. *Multiple Crack Problems in Elasticity*. Southampton: Wit Prees, 2003
- 5 张平. 裂隙介质静动应力条件下的破坏模式与局部化渐进破坏模型研究. 博士学位论文. 西安: 西安理工大学, 2004
- 6 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25: 1210–1217
- 7 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 动载下三条断续裂隙岩样的裂缝贯通机制. *岩石力学与工程学报*, 2006, 27: 1457–1464
- 8 黎立云, 车法星, 卢晋福, 等. 单压下类岩材料有序多裂纹体的宏观力学性能. *北京科技大学学报*, 2001, 23: 199–203
- 9 黎立云, 刘大安, 史孝群, 等. 多裂纹类岩体的双压实验与正交各向异性本构关系. *中国有色金属学报*, 2002, 12: 165–170
- 10 黄明利. 岩石多裂纹相互作用破坏机制的研究. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20: 423
- 11 赵永红, 梁晓峰. 灰岩平板试件变形破坏过程的试验观测研究. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23: 1608–1615
- 12 朱万成, 黄志平, 唐春安, 等. 含预制裂纹巴西盘试样破裂模式的数值模拟. *岩土力学*, 2004, 25: 1609–1612
- 13 芮勇勤, 唐春安. 岩石剪切破坏过程的 RFPA<sup>2D</sup> 数值模拟. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21: 364–368
- 14 李连崇, 徐涛, 唐春安, 等. 单轴压缩下岩石蠕变失稳破坏过程数值模拟. *岩土力学*, 2007, 28: 1978–1986
- 15 唐春安, 王述红, 傅宇方. *岩石破裂过程数值试验*. 北京: 科学出版社, 2002
- 16 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析. *岩土力学*, 2010, 31: 3661–3666

## Numerical simulation on rock-similar material with multi-fractures under uniaxial compression

ZHENG XinPing, CAO Ping & PU ChengZhi

*School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China*

Considering the heterogeneity of rock, the study of the specimens with multi-fractures under uniaxial compression has been made by RFPA<sup>2D</sup> software. It was aimed to explore the influence of different angle and density of fractures on the failure mechanisms which belong to the rock-like materials with multi-fractures. Numerical analysis is consistent with the experimental results. The study shows that the overall failure process is a gradual-sudden change, which can be divided into 3 phases: elastic deformation stage, crack initiation and stable expansion stage, and crack unstable extended to failure stage. The AE events also can be divided into 3 phases: linear stage, growth stage, and mutation stage. Comparing different sample groups, it is found that the fracture angle is the most important influence on failure patterns; at the same time, the impact of fracture density is different due to the fracture angles.

**rock-similar material with multi-fractures, uniaxial compression, fracture angles, fracture density, failure mode, numerical simulation**

doi: 10.1360/972011-1025