

含孔洞硬岩破坏过程的离散元分析

张社荣¹, 孙博¹, 王超¹, 严磊^{2, 3}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084;
3. 中国水电顾问集团 昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 基于颗粒离散元理论, 采用数值试验模拟含孔洞凝灰质砂岩在单轴、双轴和三轴压缩条件下的破坏过程, 并从峰值强度、微裂纹数目和能量等角度分析不同加载方式的影响。研究表明: 无论采用何种加载方式, 试样破坏均是从孔洞周边开始的; 单轴压缩的孔洞变形与双轴及三轴压缩不同, 且在试样侧面中间形成一条明显的贯通拉裂缝; 三轴压缩对试样承载能力的提高明显大于双轴压缩, 且围压越大, 两者对试样承载能力的提高幅度之差越大; 双轴压缩条件下试样的起裂应力随着围压的增大而减小, 而三轴压缩条件下试样的起裂应力随着围压的增大而增大; 应变能的变化过程可以反映试样的破坏过程, 其峰值主要受围压影响; 耗散能的变化过程可以体现试样破坏过程中细观颗粒的滑移、摩擦程度, 其变化规律与加载方式和围压均有关。

关键词: 岩石力学; 离散元; 细观力学; 数值试验; 应变能

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增2 - 3855 - 09

DISCRETE ELEMENT ANALYSIS OF FAILURE PROCESS OF HARD ROCK WITH A PRE-EXISTING CIRCULAR OPENING

ZHANG Sherong¹, SUN Bo¹, WANG Chao¹, YAN Lei^{2, 3}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: Based on the theory of particle flow code, the failure process of tuffaceous sandstone with a pre-existing circular opening is simulated by numerical experiments under uniaxial, biaxial and triaxial compressions. And the impact of different loading modes is analyzed from the view of peak strength, microcrack and energy. The results show that the failure of rock specimen starts around the opening regardless of loading modes. The deformation of opening under uniaxial compression is different from that under biaxial and triaxial compressions. And a macro-crack is formed on the side of rock specimen under uniaxial compression. Peak strength of rock specimen under triaxial compression is larger than that of biaxial compression at the same confining pressure. And the difference of peak strength between biaxial and triaxial compressions increases with the increase of confining pressure. Crack-initiation stress decreases with the increase of confining pressure under biaxial compression, while crack-initiation stress increases with the increase of confining pressure under triaxial compression. The change process of strain energy can reflect the failure process of rock specimen. And its peak value is greatly influenced by confining pressure. The change process of dissipated energy can reflect the extent of slip and friction between microscopic particles. And its change law is related to loading modes and confining pressure.

Key words: rock mechanics; discrete element; mesomechanics; numerical experiment; strain energy

收稿日期: 2011 - 12 - 06; **修回日期:** 2012 - 02 - 13

基金项目: 国家创新研究群体科学基金资助项目(51021004)

作者简介: 张社荣(1960 -), 男, 1982年毕业于天津大学水利系水建专业, 现任教授, 主要从事水工结构静动力分析、水电工程安全技术方面的研究工作。E-mail: tjuzsr@126.com

1 引言

目前,我国水电工程和引水工程逐渐向西南地区发展。受当地地质条件的制约,地下洞室结构大都处于高埋深、高地应力状态。与浅埋洞室相比,深埋洞室的变形和破坏机制完全不同。目前研究深埋洞室在开挖过程中围岩的破坏过程和变形特征,通常采用室内模型试验和数值模拟 2 种方法。A. Fakhimi 等^[1]通过室内试验和离散元的数值模拟,研究了含孔洞 Berea 砂岩在双轴压缩条件下的破坏模式,数值结果和试验结果吻合较好。S. H. Wang 等^[2]采用 FEM 法研究了非均质各向异性花岗岩中圆形隧洞开挖过程中的损伤区。S. Y. Wang 等^[3]采用有限元软件 RFPA^{2D} 研究不均匀性和围压对含孔洞岩石损伤开裂的影响。P. Jia 和 C. A. Tang^[4]从细观角度研究了节理倾角和侧压力系数对城门洞型隧洞破坏模式的影响。李地元等^[5]针对含双侧预制方形孔洞的板状试样进行单轴压缩试验,并结合数值模拟研究试样的力学响应和破坏过程。刘招伟和李元海^[6]采用数字散斑相关量测方法(DSCM)和数字照相量测软件系统 PhotoInfor,研究了含孔洞岩石在单轴压缩条件下变形破裂规律。谢林茂等^[7]利用 RFPA^{3D-Parallel} 程序进行了含孔洞岩石试样在单轴、双轴和三轴加载条件下破裂过程的数值模拟。杨圣奇等^[8]通过细观力学试验和数值模拟,研究了含单个孔洞大理岩在加载过程中的裂纹萌生、扩展、演化和贯通特征。本文以前人的研究成果为基础,采用颗粒离散元法研究含孔洞凝灰质砂岩在单轴、双轴和三轴压缩条件下的破坏过程,进一步探索不同加载方式下含孔洞硬岩的破坏机制。

2 基本理论

颗粒离散元理论是基于 P. A. Cundall 和 O. Strack^[9]的离散元理论发展起来的,是以颗粒的组合构成宏观物质,并通过颗粒结构的细观参数来表现材料的宏观力学行为,克服了传统连续介质力学模型的宏观连续性假设,适合于模拟岩体损伤、开裂等非线性行为。颗粒离散元理论在整个计算循环过程中,交替应用力-位移定律和牛顿运动定律:通过力-位移定律更新接触部分的接触力;通过运动定律更新颗粒-颗粒与颗粒-墙体的位置,达到新

的平衡^[10]。

(1) 作用力与位移的关系

在颗粒离散元理论中,颗粒与颗粒之间的接触力分为法向力 F_i^n 和切向力 F_i^s (下标 i 表示方向,下同):

$$F_n = F_i^n + F_i^s \quad (1)$$

法向作用力与位移的关系式为

$$F_i^n = k^n U^n n_i \quad (2)$$

式中: k^n 为法向刚度,属于割线模量,与总位移和力对应; U^n 为法向位移增量(颗粒-颗粒或颗粒-墙体的变形重叠量); n_i 为接触面上的单位法向向量。

切向作用力与位移的关系式为

$$\Delta F_i^s = -k^s \Delta U_i^s \quad (3)$$

式中: k^s 为切向刚度,属于切向模量,与位移和力的增量对应; ΔU_i^s 为切向位移增量,可写为

$$\Delta U_i^s = V_i^s \Delta t \quad (4)$$

式中: V_i^s 为切向接触速度, Δt 为计算时步。切向作用力可写为

$$F_i^s \leftarrow F_i^s + \Delta F_i^s \quad (5)$$

(2) 运动法则

颗粒的运动是由作用于其上的剩余力和剩余力矩决定的,可以用颗粒内一点的线速度与角速度来描述。运动方程由 2 组向量方程表示:一组表示剩余力与平动的关系,另一组表示剩余力矩与旋转运动的关系:

$$F_i = m(\ddot{x}_i + g_i) \quad (\text{平动方程}) \quad (6)$$

$$M_i = \dot{H}_i \quad (\text{旋转运动方程}) \quad (7)$$

式中: \ddot{x}_i 为加速度, F_i 为剩余力, m 为颗粒质量, g_i 为体积力加速度(如重力加速度), M_i 为剩余力矩, H_i 为角动量。

颗粒离散元主要采用 2 种黏结模型——接触黏结模型和平行黏结模型模拟岩石类材料,图 1 给出了黏结模型颗粒-黏结体系的力-位移行为^[11]。本文选择接触黏结模型模拟岩石材料,该模型中的黏结只作用在 2 个颗粒之间无穷小的接触点上,只能传递力,不能传递力矩,由法向和切向黏结强度定义。当施加的应力超过黏结强度时,黏结将破坏。有关接触黏结模型的详细内容请参考相关研究^[11-12],此处不再赘述。

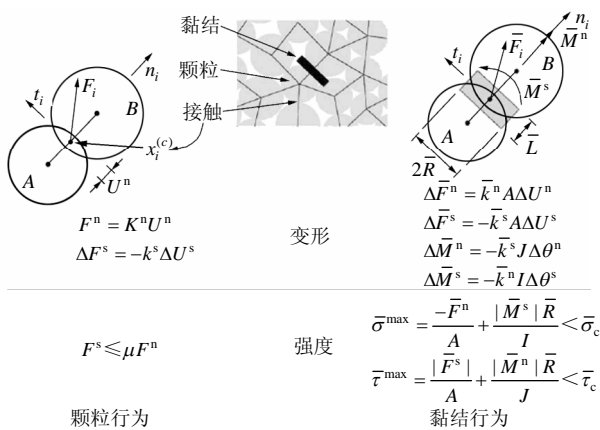


图 1 颗粒 - 黏结体系的力 - 位移行为^[11]

Fig.1 Force-displacement behavior of grain-cement system^[11]

颗粒离散元理论中的应变能 E_c 是指存储在线性接触中的总应变能，其表达式为

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_{N_c} (|F_i^n|^2 / k^n + |F_i^s|^2 / k^s) \quad (8)$$

式中： N_c 为接触数目； $|F_i^n|$ ， $|F_i^s|$ 分别为接触力的法向和切向幅值。

耗散能 E_f 是指颗粒之间因接触滑移摩擦而耗散的能量，即摩擦做功，其表达式为

$$E_f \leftarrow E_f - \sum_{N_c} [\langle F_i^s \rangle (\Delta U_i^s)^{slip}] \quad (9)$$

式中： $\langle F_i^s \rangle$ 为当前时步的平均剪切力， $(\Delta U_i^s)^{slip}$ 为当前时步的滑移位增量。

3 计算模型及计算条件

岩石试样为凝灰质砂岩，取自西部某拟建深埋输水隧洞地区钻孔岩芯。该岩石试样单轴抗压强度超过 300 MPa，属于典型硬岩。本文针对该区含孔洞凝灰质砂岩的破坏模式进行研究，从数值试验角度分析含孔洞硬岩在单轴、双轴和三轴压缩条件下的破坏过程。

3.1 细观参数的标定

在进行含孔洞试样破坏过程分析之前，首先需要标定试样的细观参数。以室内单轴压缩试验数据为基础，采用“trial and error”方法^[12]进行标定。图 2 为单轴压缩试样模型，试样直径为 50 mm，高 100 mm，颗粒最小粒径为 1 mm，最大粒径与最小粒径之比为 1.66，颗粒空间分布采用均匀随机分布方式（随机种子数不同，颗粒分布不同）。表 1 为标定的试样细观参数，图 3 为室内试验与数值模拟的轴向

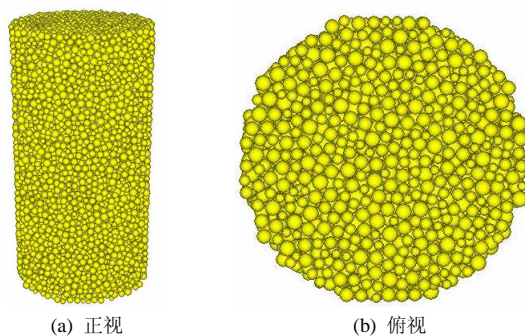


图 2 单轴压缩试样离散元模型

Fig.2 Discrete element model of rock specimen under uniaxial compression

表 1 试样的细观参数

Table 1 Micro parameters of rock specimen

E_c /GPa	k_n/k_s	μ	σ_c /MPa		σ_e /MPa	
			均值	标准差	均值	标准差
97	2.1	0.5	120	12	300	30

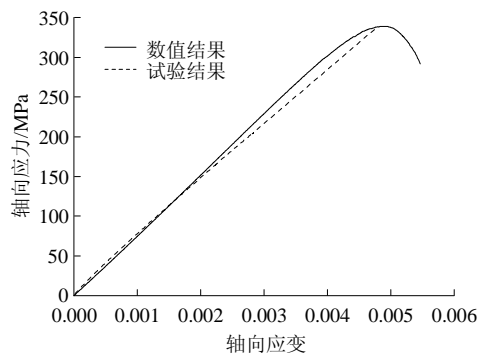


图 3 单轴压缩条件下室内试验与数值模拟的轴向应力 - 轴向应变关系

Fig.3 Axial stress-axial strain relationship of experimental and numerical analysis under uniaxial compression condition

应力 - 轴向应变关系，表 2 为室内试验和数值模拟得到的岩石试样宏观力学参数。由图 3 及表 2 可知，标定的细观参数比较合理，能反映岩石的宏观力学特性。

表 2 单轴压缩条件下岩石试样宏观力学参数

Table 2 Macroscopic mechanical parameters of rock specimen under uniaxial compression condition

取值类型	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	单轴抗压强度 σ_c /MPa
室内试验	73.63	0.18	338.85
数值模拟	76.10±0.74	0.177±0.003	332.74±5.31

3.2 计算模型及计算方案

鉴于室内物理试验的复杂性和孔洞试样加工困难，本文采用数值方法研究含孔洞试样的破坏过程。

图 4 为含孔洞试样模型。试样截面尺寸为 100 mm×40 mm，高 100 mm。其加载条件分为单轴压缩、双轴压缩和三轴压缩，其中双轴/三轴压缩各分析方案的围压见表 3。

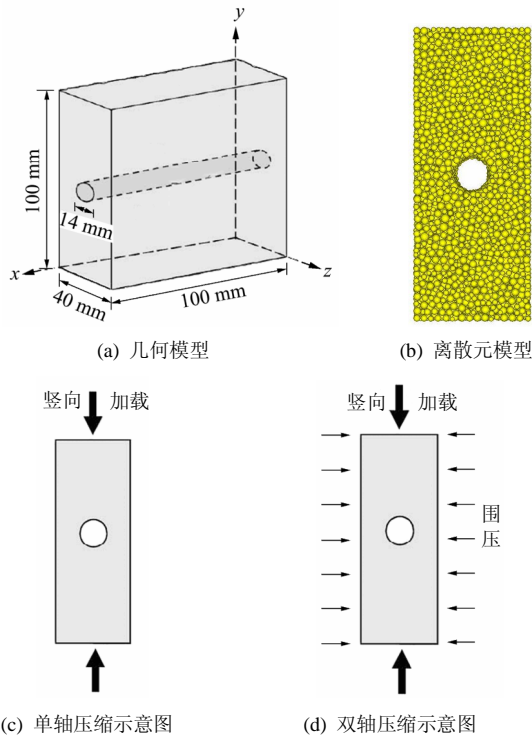


图 4 含孔洞试样模型

Fig.4 Model of rock specimen with a circular opening

表 3 双轴/三轴压缩试验的分析方案

Table 3 Analysis schemes of biaxial/triaxial test

方案	围压/MPa	
	x 向	z 向
1	5	5
2	10	10
3	15	15
4	20	20
5	25	25
6	30	30

注：双轴压缩时仅施加 z 向围压。

4 破坏过程分析

4.1 单轴压缩条件下的破坏过程

在数值试验中，单轴、双轴和三轴压缩是通过一套数值伺服控制程序实现的。在单轴压缩条件下，首先删除 x 方向和 z 方向的墙，只保留 y 方向的墙，然后通过调整墙的速度施加轴向荷载。图 5~7 分别为单轴压缩条件下试样破坏过程图(图中黑色表示张拉型微裂纹，亮白色表示剪切型微裂纹，下同)、轴向应力和微裂纹个数与轴向应变关系曲线(轴向

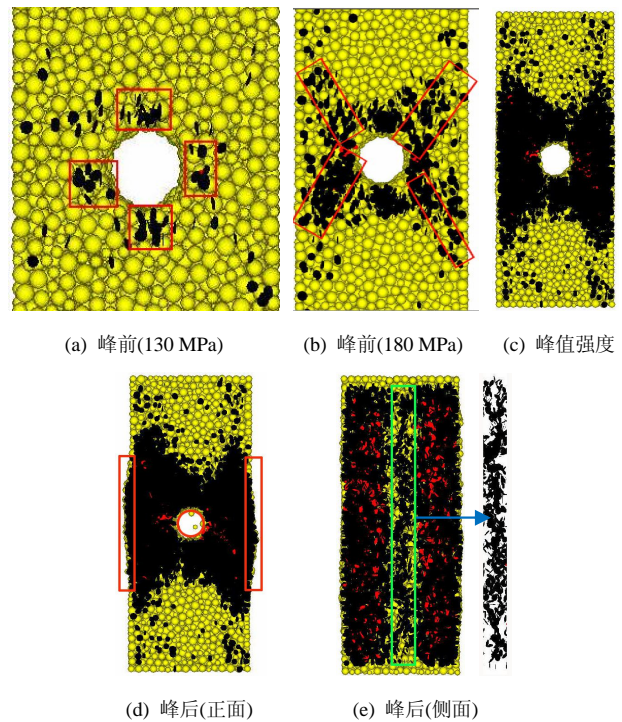


图 5 单轴压缩条件下试样破坏过程

Fig.5 Failure process of rock specimen under uniaxial compression

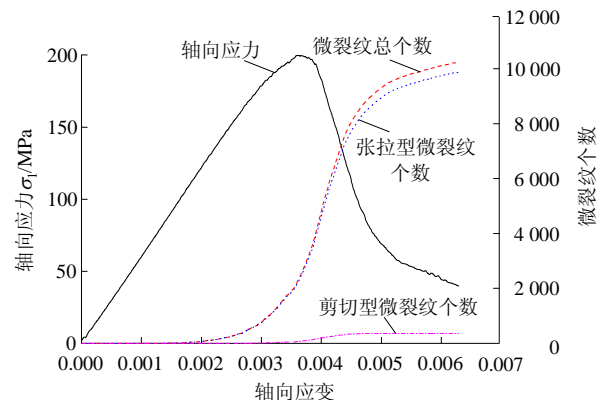


图 6 单轴压缩条件下的轴向应力和微裂纹个数与轴向应变关系曲线

Fig.6 Relation curves of axial stress and number of microcracks with axial strain of rock specimen under uniaxial compression

应变以开始施加轴向荷载时计入)和能量 - 轴向应变曲线。

由图 5 可知，首先在孔洞四周出现密集微裂纹(图 5(a)中方形区域)，远场也出现少数微裂纹，并且以张拉型微裂纹为主。随着轴向荷载的增加，孔洞两帮微裂纹成角度向两侧发展(图 5(b)中方形区域)；当加载到试样的峰值强度后，两帮微裂纹已扩展到孔洞的水平向两侧，而孔洞顶部和底部约 1.5 倍洞径范围内均出现微裂纹(见图 5(c))。随着轴向荷载的进一步增大，由于无围压影响，试样中部向两侧

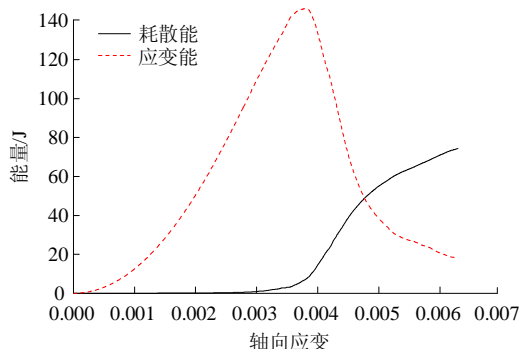


图 7 单轴压缩条件下能量 - 轴向应变曲线

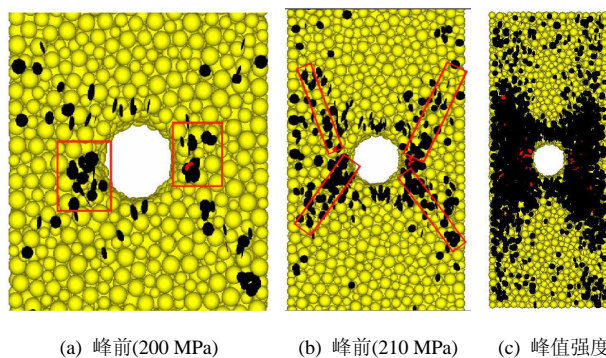
Fig.7 Energy-axial strain curves of rock specimen under uniaxial compression

膨胀明显(图 5(d)中长条形区域), 孔洞有压扁的趋势, 并且孔洞内部有颗粒剥落(图 5(d)中圆形区域)。从试样侧面观察, 微裂纹主要集中在试样两侧, 但中间有一条明显的贯通拉裂缝(图 5(e)中长条形区域, 微裂纹相互连接、贯通), 这是以往的二维数值模拟无法观测到的。

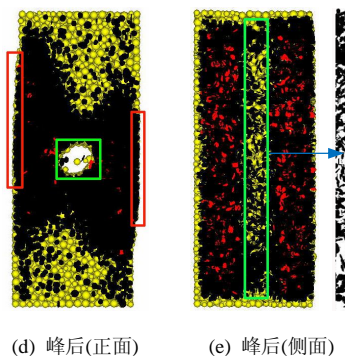
由图 6 可知, 在单轴压缩条件下, 试样的峰值强度为 199.8 MPa。当轴向应力达到 74.7 MPa(轴向应变为 0.001 24)时, 试样开始出现微裂纹, 并随着轴向压力的增大而增加, 且在达到试样峰值强度附近时微裂纹增加速率最大; 峰值强度后继续加载, 由于试样已经贯通破坏, 微裂纹产生速率急剧减小。微裂纹中以张拉型微裂纹为主, 即超过了颗粒之间接触黏结的法向强度。由图 7 可知, 随着轴向荷载的增大, 外力做功大部分转化为试样的应变能, 一小部分转化为颗粒的动能, 故试样的应变能是不断增加的。但达到试样的峰值强度后, 微裂纹相互贯通, 试样破坏严重, 颗粒之间开始相互滑动。由于颗粒之间设置了摩擦因数, 摩擦做功导致耗散能快速增加, 而试样的应变能由于接触的减少而急剧减小。

4.2 双轴压缩条件下的破坏过程

在双轴压缩条件下, 首先删除 x 方向的墙, 然后通过伺服控制程序调整 y 和 z 方向墙的速度施加指定围压(见表 3), 最后再通过调整 y 方向墙的速度施加轴向荷载。图 8~11 分别为双轴压缩条件下试样破坏过程图(围压为 5 MPa)、轴向应力 - 轴向应变曲线(峰后强度为峰值强度的 0.2 倍)、微裂纹个数 - 轴向应变曲线(峰后强度为峰值强度的 0.2 倍)和能量 - 轴向应变曲线(峰后强度为峰值强度的 0.2 倍)。



(a) 峰前(200 MPa) (b) 峰前(210 MPa) (c) 峰值强度



(d) 峰后(正面) (e) 峰后(侧面)

图 8 双轴压缩条件下试样破坏过程

Fig.8 Failure process of rock specimen under biaxial compression

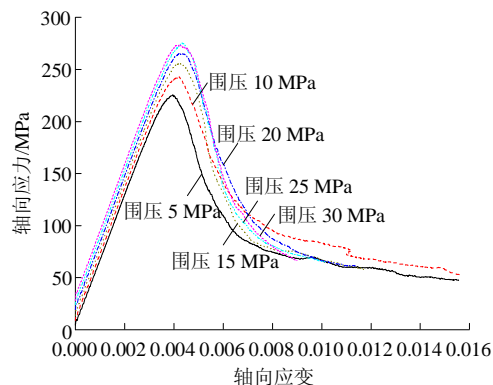
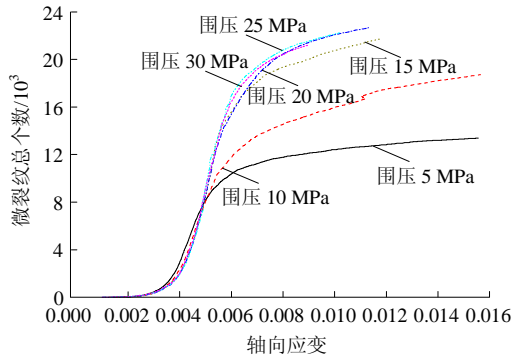


图 9 双轴压缩条件下的轴向应力 - 轴向应变曲线

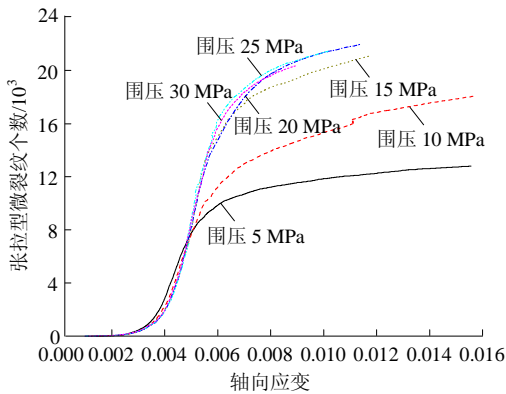
Fig.9 Axial stress-axial strain curves of rock specimen under biaxial compression

由图 8 可知, 试样破坏过程基本和单轴压缩试验相似, 但由于围压的限制, 初始微裂纹主要集中在孔洞两帮, 而在孔洞顶部和底部较少(图 8(a)中方形区域); 试样中部膨胀变形不如单轴压缩明显(图 8(d)中长条形区域), 这是由于侧面围压的限制; 孔洞变形为斜椭圆状(图 8(d)中方形区域), 这是由于考虑了岩石的不均质性和围压的影响; 试样侧面中间未出现明显的贯通拉裂缝(图 8(e)中长条形区域, 微裂纹未完全连接、贯通), 这可能是由于围压抑制了此处微裂纹的产生。

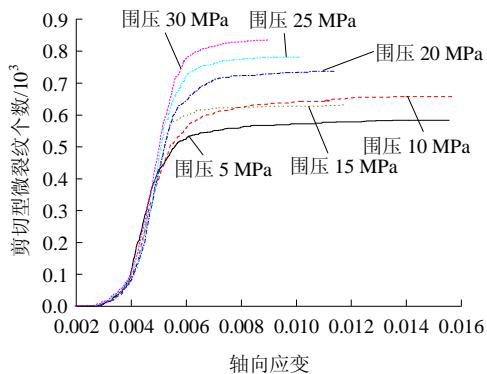
由图 9 可知, 随着围压的增加, 试样的峰值强



(a) 微裂纹总个数



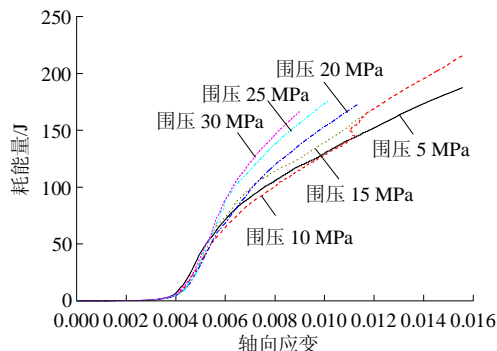
(b) 张拉型微裂纹个数



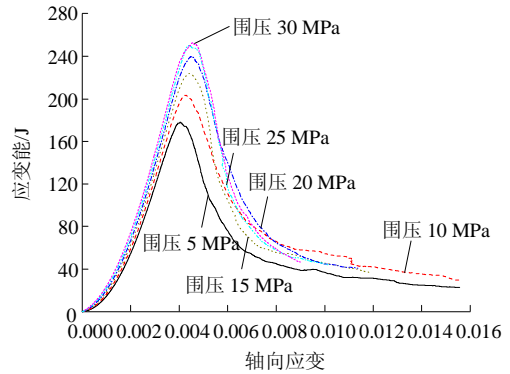
(c) 剪切型微裂纹个数

图 10 双轴压缩条件下微裂纹 - 轴向应变曲线

Fig.10 Number of microcracks-axial strain curves of rock specimen under biaxial compression



(a) 耗散能



(b) 应变能

图 11 双轴压缩条件下能量 - 轴向应变曲线

Fig.11 Energy-axial strain curves of rock specimen under biaxial compression

度逐渐增加(围压为 30 MPa 时略有减小); 虽然峰值强度对应的轴向应变变化规律不明显, 但仍可表明试样由单轴压缩时的脆性状态逐渐向延性发展, 且围压越大, 延性表现越明显。由图 10 可知, 在双轴压缩条件下, 微裂纹仍然以张拉型微裂纹为主, 且微裂纹总个数、张拉型微裂纹个数均随着围压的增加先增加后减小, 而剪切型微裂纹个数不断增加; 与单轴压缩相比, 在双轴压缩条件下更易产生微裂纹, 微裂纹数目远多于单轴压缩; 同时围压不同, 试样起裂应力(试样出现第一条微裂纹, 下同)不同(分别为 91.8, 87.1, 85.0, 83.4, 81.4 和 79.5 MPa), 随着围压的增加基本呈线性减小(从围压 5 MPa 到围压 10 MPa 起裂应力减小 4.7 MPa, 其余均约减小 2 MPa), 这可能是未限制试样 x 向(孔洞轴向)变形, 导致围压越大, 试样沿 x 向的变形越大, 更易产生微裂纹。由图 11 可知, 随着围压的增加, 试样的应变能峰值不断增加, 且应变能峰值的增加幅度随着围压的增加而逐渐减小; 而耗散能先增加后减小, 与不同围压下试样的轴向应变变化规律相同(轴向应变越大, 颗粒之间滑动增量越大, 摩擦耗散能也越大)。

4.3 三轴压缩条件下的破坏过程

在三轴压缩条件下, 首先通过伺服控制程序同时调整 x , y 和 z 方向墙的速度来施加指定围压(见表 3), 最后再调整 y 方向墙的速度施加轴向荷载。图 12~15 分别为三轴压缩条件下试样破坏过程图(围压为 5 MPa)、轴向应力 - 轴向应变曲线(峰后强度为峰值强度的 0.4 倍)、微裂纹个数 - 轴向应变曲线(峰后强度为峰值强度的 0.4 倍)和能量 - 轴向应变曲线(峰后强度为峰值强度的 0.4 倍)。

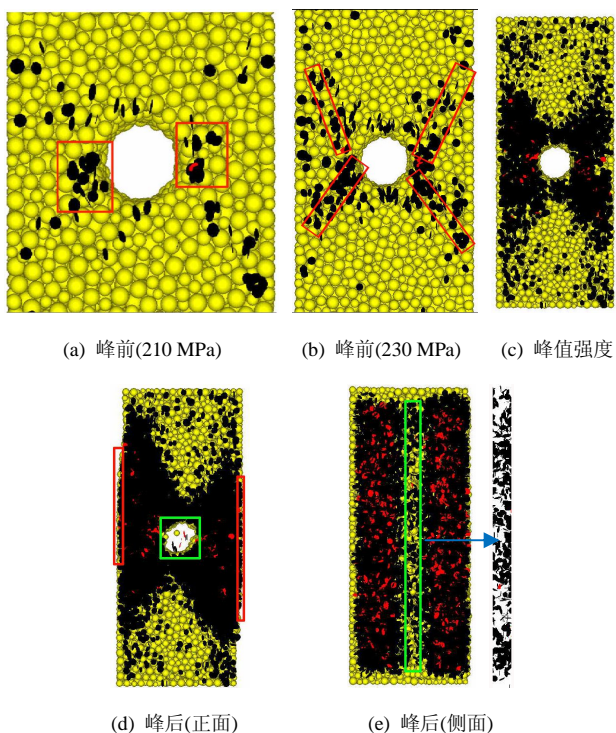


图 12 三轴压缩条件下试样破坏过程

Fig.12 Failure process of rock specimen under triaxial compression

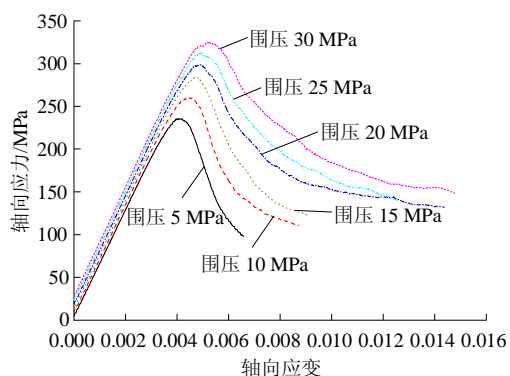


图 13 三轴压缩条件下的轴向应力 - 轴向应变曲线

Fig.13 Axial stress-axial strain curve of rock specimen under triaxial compression

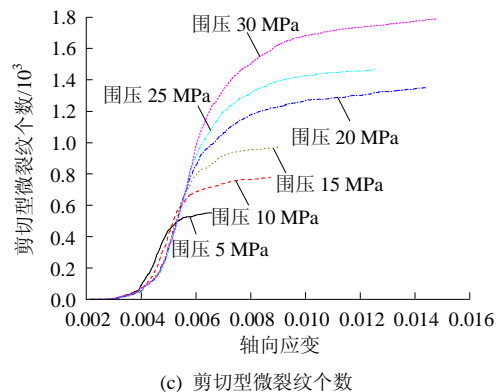
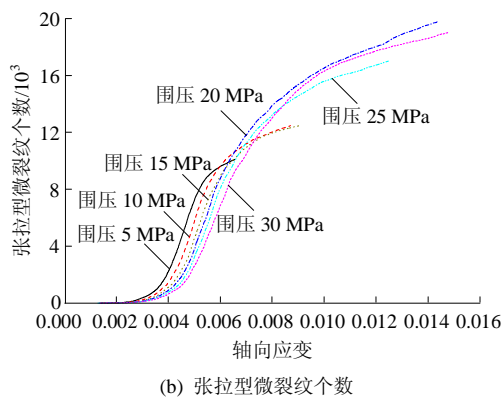
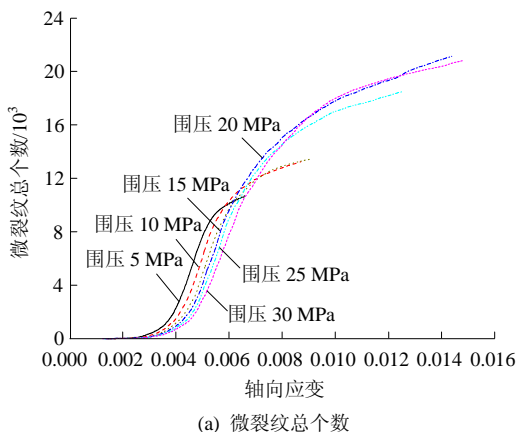


图 14 三轴压缩条件下微裂纹个数 - 轴向应变曲线

Fig.14 Number of microcracks-axial strain curves of rock specimen under triaxial compression

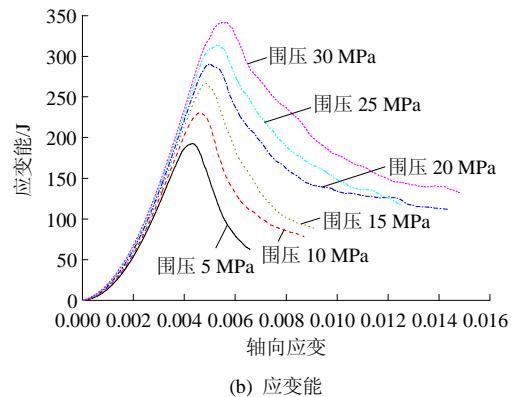
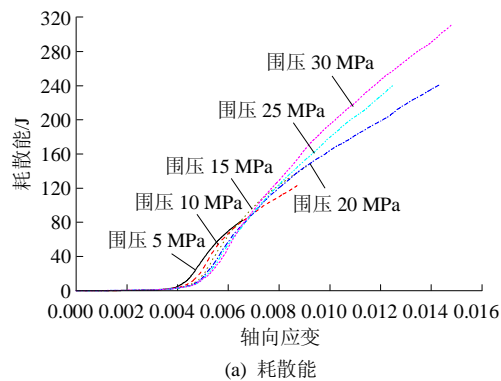


图 15 三轴压缩条件下能量 - 轴向应变曲线

Fig.15 Energy-axial strain curves of rock specimen under triaxial compression

由图 12 可知, 三轴压缩条件下试样破坏过程及破坏形式和双轴压缩条件下基本相同, 并且由于在 x 方向也施加了围压, 试样侧面中间更难出现宏观贯通拉裂缝(图 12(e)长条形区域, 微裂纹未完全连接、贯通)。

由图 13 可知, 在三轴压缩条件下, 随着围压的增加, 试样的峰值强度及其对应的轴向应变均不断增加, 且峰值强度的增加幅度随着围压的增加逐渐减小, 但轴向应变的增加幅度无明显规律。在三轴压缩下, 试样的轴向应变随围压增加不断增大, 其延性行为更为明显。与双轴压缩相比, 三轴压缩条件下的峰值强度明显高于双轴压缩。由图 14 可知, 在三轴压缩条件下, 微裂纹仍然以张拉型微裂纹为主, 并且微裂纹总个数、张拉型微裂纹个数均随着围压的增加先增加后减小, 而剪切型微裂纹个数不断增加; 同时, 围压不同, 试样的起裂应力不同(分别为 93.1, 98.4, 100.4, 102.6, 104.3 和 106.5 MPa), 随着围压的增加基本呈线性增加(围压从 5 到 10 MPa, 起裂应力增加 5.3 MPa, 其余均约增加 2 MPa), 这是由于三轴压缩同时限制了 x 和 z 向变形, 故围压越大, 试样变形相对越小, 微裂纹越难产生。由图 15 可知, 在三轴压缩条件下, 试样的应变能峰值和耗散能均随着围压的增加而增大; 围压每增加 5 MPa, 应变能峰值增加 20~40 MPa; 耗散能的变化规律仍与轴向应变的变化规律相同(轴向应变越大, 颗粒之间滑移增量越大, 摩擦耗散能也越大)。

4.4 对比分析

从试样破坏模式上看, 3 种压缩条件下微裂纹均是从孔洞周边产生并成一定角度向两侧逐渐扩展, 但单轴压缩的最终破坏模式和双轴压缩及三轴压缩差别较大: 单轴压缩条件下孔洞有压扁变形的趋势, 且侧面中间形成一条明显的宏观贯通拉裂缝; 而双轴和三轴压缩条件下孔洞变为斜椭圆状, 且侧面中间无明显的宏观贯通拉裂缝。从轴向应力来看, 各压缩条件下轴向应力的变化过程基本相同, 只是峰值强度不同(见图 16): 单轴压缩最小, 在相同围压下双轴压缩条件下试样峰值强度小于三轴压缩, 且围压越大, 两者差值越大, 这是由于双轴压缩仅限制了 z 向变形, 而三轴压缩同时限制了 x 和 z 向变形; 并且双轴压缩条件下峰值强度对应的轴向应变变化无规律, 而三轴压缩条件下峰值强度对应的轴向应变逐渐增加, 同时两者的差值随着围压的增加而增大, 三轴压缩条件下试样的延性行为明显大

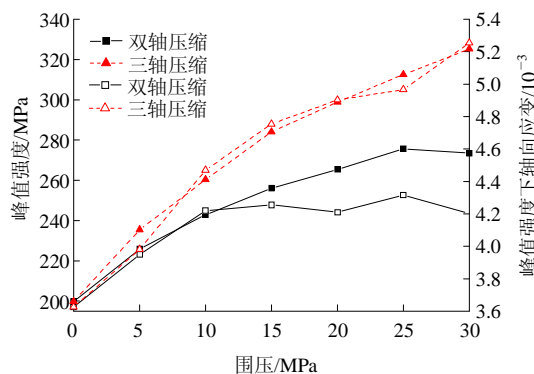


图 16 不同围压下峰值强度及其轴向应变

Fig.16 Peak strength and axial strain under different confining pressures

于双轴压缩。从微裂纹个数来看, 微裂纹个数变化及其开裂方式基本相同(均以张拉开裂为主), 但由于双轴和三轴加载方式的不同, 其微裂纹个数随围压的变化形式不同, 起裂应力随围压的变化规律完全相反: 双轴压缩条件下, 起裂应力随着围压的增加而减小; 三轴压缩条件下, 起裂应力随着围压的增加而增大, 两者的差值逐渐增大(见图 17)。从能量角度来看, 3 种压缩条件下能量变化形式基本相同: 应变能随着轴向荷载的增加先增大后减小, 体现了试样的破坏过程; 耗散能随着轴向荷载的增加而增大, 体现了试样破坏过程中细观颗粒的滑移、摩擦程度。但加载方式不同时, 各能量的具体变化规律不同: 在双轴压缩条件下, 试样的应变能峰值不断增加, 而耗散能先增加后减小; 在三轴压缩条件下, 试样的应变能峰值和耗散能均随着围压的增加而增大; 双轴压缩和三轴压缩的应变能峰值之差随着围压的增加而增加(见图 18)。

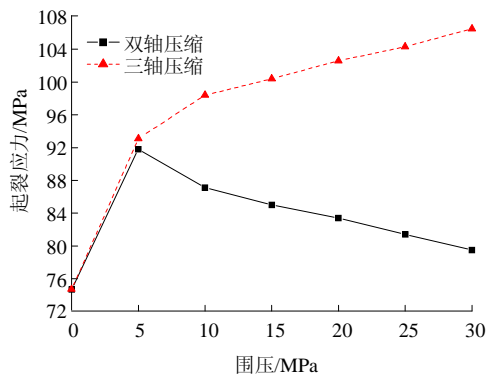


图 17 不同围压下起裂应力

Fig.17 Crack-initiation stress under different confining pressures

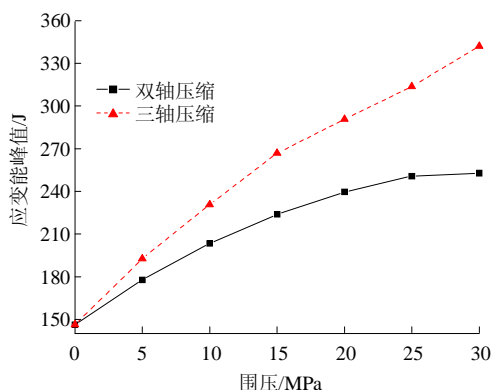


图 18 不同围压下应变能峰值

Fig.18 Peak strain energy under different confining pressures

5 结 论

本文采用颗粒离散元理论, 以数值试验模拟含孔洞凝灰质砂岩在单轴、双轴和三轴压缩条件下的破坏过程, 初步得出以下结论:

(1) 在 3 种压缩方式下, 试样破坏均是从孔洞周边开始的, 但单轴压缩的孔洞变形与双轴及三轴压缩不同, 且在试样侧面中间形成一条明显的贯通拉裂缝。

(2) 三轴压缩对试样承载能力的提高明显大于双轴压缩, 且围压越大, 两者对试样承载能力的提高幅度之差越大。

(3) 在 3 种压缩方式下, 微裂纹以张拉型微裂纹为主。单轴压缩条件下试样的起裂应力最小; 相同围压下双轴压缩条件下试样的起裂应力小于三轴压缩; 且双轴压缩条件下试样的起裂应力随着围压的增加而减小, 三轴压缩条件下试样的起裂应力随着围压的增加而增大。

(4) 应变能的变化过程可以反映试样破坏过程, 且应变能峰值主要受围压影响; 在相同围压下, 三轴压缩的应变能峰值大于双轴压缩。耗散能的变化过程体现了试样破裂过程中微观颗粒的滑动、摩擦剧烈程度, 其变化规律与加载方式、围压均有关。

参考文献(References):

[1] FAKHIMI A, CARVALHO F, ISHIDA T, et al. Simulation of failure around a circular opening in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(4): 507 - 515.

[2] WANG S H, LEE C I, RANJITH P G, et al. Modeling the effects of heterogeneity and anisotropy on the excavation damaged/disturbed zone(EDZ)[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2009, 42(2): 229 -

258.

- [3] WANG S Y, SLOAN S W, SHENG D C, et al. Numerical analysis of the failure process around a circular opening in rock[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 39(1): 8 - 16.
- [4] JIA P, TANG C A. Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(5): 500 - 507.
- [5] 李地元, 李夕兵, 李春林, 等. 单轴压缩下含预制孔洞板状花岗岩试样力学响应的试验和数值研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1 198 - 1 206.(LI Diyu, LI Xibing, LI C Charlie, et al. Experimental and numerical studies of mechanical response of plate-shape granite samples containing prefabricated holes under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1 198 - 1 206.(in Chinese))
- [6] 刘招伟, 李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(8): 133 - 139.(LIU Zhaowei, LI Yuanhai. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compressive load[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 133 - 139.(in Chinese))
- [7] 谢林茂, 朱万成, 王述红, 等. 含孔洞岩石试样三维破裂过程的并行计算分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(9): 1 447 - 1 455.(XIE Linmao, ZHU Wancheng, WANG Shuhong, et al. Three-dimensional parallel computing on failure process of rock specimen with a preexisting circular opening[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9): 1 447 - 1 455.(in Chinese))
- [8] 杨圣奇, 吕朝辉, 渠涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(6): 774 - 781.(YANG Shengqi, LU Chaohui, QU Tao. Investigations of crack expansion in marble having a single pre-existing hole: experiment and simulations[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2009, 38(6): 774 - 781.(in Chinese))
- [9] CUNDALL P A, STRACK O. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [10] 罗勇, 龚晓南, 连峰. 三维离散颗粒单元模拟无黏性土的工程力学性质[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(2): 292 - 297.(LUO Yong, GONG Xiaonan, LIAN Feng. Simulation of mechanical behaviors of granular materials by three-dimensional discrete element method based on particle flow code[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(2): 292 - 297. (in Chinese))
- [11] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1 329 - 1 364.
- [12] Itasca Consulting Group, Inc.. Particle flow code, PFC^{3D}, release 3.1[R]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.