

真三轴条件下单裂隙砂岩破坏过程的颗粒流模拟

贾蓬^{1,2}, 张瑶¹, 刘冬桥², 张亚兵¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 采用颗粒流程序从细观角度对在真三轴条件下含单裂隙砂岩的裂纹扩展贯通模式、破裂机理展开研究, 重点讨论了不同中主应力对单裂隙砂岩裂纹扩展和其力学特性的影响。研究表明: 在真三轴压缩条件下, 中主应力有助于增大含裂隙砂岩的强度, 但过高的中主应力会加快裂纹的扩展、贯通, 从而形成宏观破裂面; 当中主应力的作用方向与裂隙走向垂直时, 裂隙岩石的破坏模式为垂直于裂隙走向形成宏观剪切破裂面, 含裂隙砂岩在真三轴压缩条件下的破坏主要为伴随拉破坏的剪切破坏机制。

关 键 词: 真三轴压缩; 裂纹扩展机理; 颗粒流程序; 裂隙砂岩

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)11-1654-06

Particle Flow Simulation of Failure Process in Single Fissured Sandstone Under True Tri-axial Compression

JIA Peng^{1,2}, ZHANG Yao¹, LIU Dong-qiao², ZHANG Ya-bing¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China. Corresponding author: ZHANG Yao, E-mail: 1078893795@qq.com)

Abstract: A series of numerical simulations were conducted to analyze the crack propagation and failure mechanism of sandstone with an inner single fissure under true tri-axial compression by using the particle flow code. The effects of different intermediate principal stresses on the crack propagation and failure mechanical properties of fissured sandstone are discussed. Results show that under true tri-axial compression, the intermediate principal stress contributes to the increasing of the peak strength of the fissured sandstone, while a higher intermediate principal stress can accelerate the crack propagation thus form macroscopic fracture in the sandstone sample. When the direction of the intermediate principal stress is consistent with the strike of the inner-fissure, a shear fracture can form in the direction of the fissure strike. The failure of the fissured sandstone under true tri-axial compression is mainly the shear failure accompanied by tensile failure.

Key words: true tri-axial compression; crack propagation; particle flow code; fissured sandstone

随着经济的高速发展,采矿工程、水利水电工程等都快速向深部地下空间发展。深部岩体往往处于三向高应力下,且岩石多以硬岩为主。由于天然岩石内部发育分布着各种不同尺度的裂隙或节理,在开挖后由于应力集中,裂隙处的应力达到起裂应力,裂隙即开始扩展、贯通,最终导致宏观破坏失稳,因此不少学者对应力作用下裂隙的扩展模式和特性开展了大量的室内试验、理论及数值模拟研究,并获得了很多有益的研究成果。Wong

等^[1]获得的单轴压缩下含预制单裂隙的石膏和大理岩试样的7种类型破裂模式,包括三种拉伸裂纹模式、三种剪切裂纹模式、一种复合拉剪裂纹模式。Bobet等^[2]通过在石膏模型中预制双裂隙,研究了含非共面双裂隙的脆性类岩石试样在单轴压缩和围压作用下裂纹的起裂、扩展与贯通破坏过程,发现裂纹扩展和贯通模式与围压的大小和预制双裂隙的几何分布情况有关。黄彦华等^[3-7]通过对含预制裂隙的大理石、砂岩进行了单轴和

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20180550225, 20170540304); 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGDEUK1920); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N180701005, N170108029)。

作者简介: 贾蓬(1973-),女,内蒙古呼和浩特人,东北大学副教授,博士。

常规三轴压缩试验,研究了脆性岩石不同裂隙参数分布对预制裂隙的起裂、扩展、贯通破坏模式和裂纹演化特性的影响,并采用 PFC^{2D}对含共面双裂隙脆性砂岩进行了不同围压下的破裂过程模拟,来研究不同围压对裂隙岩体裂纹演化规律的影响. Jia^[8]利用 RFPA^{3D}软件,开展岩样在双轴应力作用下破裂过程的数值试验,发现应力的作用方向对岩石裂纹扩展模式具有明显的导向作用. Zhang 等^[9]用 PFC^{3D}研究了单轴压缩条件下含单个裂纹的类岩石材料的扩展破裂过程,发现裂隙的几何布置和不同应力加载条件对裂隙岩石破裂模式和其力学特性有很大的影响. 蒋明镜等^[10]通过用离散单元法,针对岩石材料进行了不同围压的模拟试验,研究含不同角度的预制单、双裂隙岩石裂纹萌生扩展与贯通.

大量的研究结果表明,裂隙的扩展与应力组合及其作用方式密切相关. 但以往的研究多采用表面裂隙或贯通裂隙,且多是基于侧压相同的假三轴试验,难以反映三维裂隙在三向应力条件下的扩展规律. 尽管利用 CT 扫描手段可以观察试件内部细观变化,但由于试样采集、制备过程繁琐,试验成本高,在真三轴应力作用下岩石内部三维裂隙的扩展规律研究仍然较少. 基于此,本文采用 PFC 颗粒流程序,从细观角度分析真三轴条件下含三维裂隙砂岩试样的力学特性及裂纹扩展演化特征,探讨中主应力对单裂隙砂岩破坏模式的影响.

1 参数标定及模型建立

1.1 砂岩试样模型参数标定

由于颗粒流程序 PFC 微观颗粒模型能反映岩石内部微裂纹扩展最终形成宏观裂纹的过程,因此构建出准确反映岩石特性的微观颗粒模型,合理模拟出岩石微观结构动态破裂过程,则其效果可与岩石的 CT 加载试验^[11]相仿. 本文参考室内单轴砂岩试验^[12]进行 PFC 数值模型中细观参数的标定. 一般来说,采用长方体试样得到的材料强度会略大于圆柱体试样得到的强度,但其差异小于 5%^[13],而在 PFC^{3D}数值模型中,由于不会受试样端部约束的影响,长方体和圆柱体试件的差异将更小,可以忽略不计. 故本文采用室内标准圆柱试样的单轴压缩试验结果来进行细观参数的拟合标定. 物理试验岩样为 100 mm × ϕ 50 mm 的圆柱体砂岩^[12],数值模拟模型尺寸设定为 100 mm × 50 mm × 50 mm. 选取模型颗粒半径在

2.5 ~ 3.5 mm 范围内均匀分布,采用平行黏结接触来模拟砂岩颗粒间力学行为,数值模拟砂岩试样中共生成 6 043 个颗粒,最后生成的初始模型如图 1 所示.

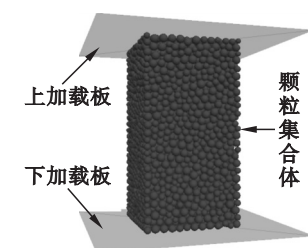


图 1 砂岩试样单轴试验数值模型
Fig. 1 Uniaxial test model of numerical sandstone specimen

为最大程度接近室内试验的加载过程,在 PFC 数值模拟中,给定上下墙恒定加载速率 0.05m/s^[14],利用伺服控制机制调整侧墙的运动来施加围压. 建模时用 Fish 语言设置三个测量球取平均值来监测加载过程单裂隙砂岩试样内部的应力应变数据,测量球的设置如图 2 所示. 引入离散裂隙网络 DFN 模型来记录试样加载过程中微裂纹的时空演化规律. 当应力跌落到峰后 70% 的峰值应力,宏观裂纹已经扩展到可以明显观察的阶段,则试验结束.

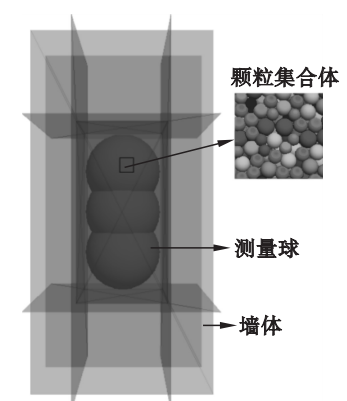


图 2 PFC 模型测量球设置
Fig. 2 Measuring spheres setting of PFC model

为确定模拟 PFC^{3D}的细观参数,通过试错法不断地调试平行黏结模型中各细观参数,最终确定一组合理的细观参数,使数值模拟中砂岩模型试样单轴压缩得到的基本宏观力学参数(单轴抗压强度、弹性模量)、应力 - 应变曲线与室内试验所得的结果基本一致. 如图 3 所示,砂岩模型试样单轴压缩得到的基本宏观力学参数与试验结果较为吻合,该颗粒集合模型能较好地模拟真实岩石试样的宏观力学特性(表 1). 但两者的应力 - 应变曲线稍有差别,如图 3a 所示,室内试验应力 -

应变曲线在初始较低应力阶段向下凹且为非线性,应力-应变曲线上峰值应力所对应的应变值明显小于室内试验峰值应力对应的应变值^[6],这是由于在加载初始阶段天然砂岩内部存在大量的微裂纹和缺陷被压密闭合.由图 3b 可见,通过室内单轴压缩试验,砂岩试样生成一条斜向的剪切破裂裂纹,其破坏形式与 PFC^{3D}单轴压缩模拟的破坏形式基本一致.故可用此组细观参数模拟该砂岩,如表 2 所示.

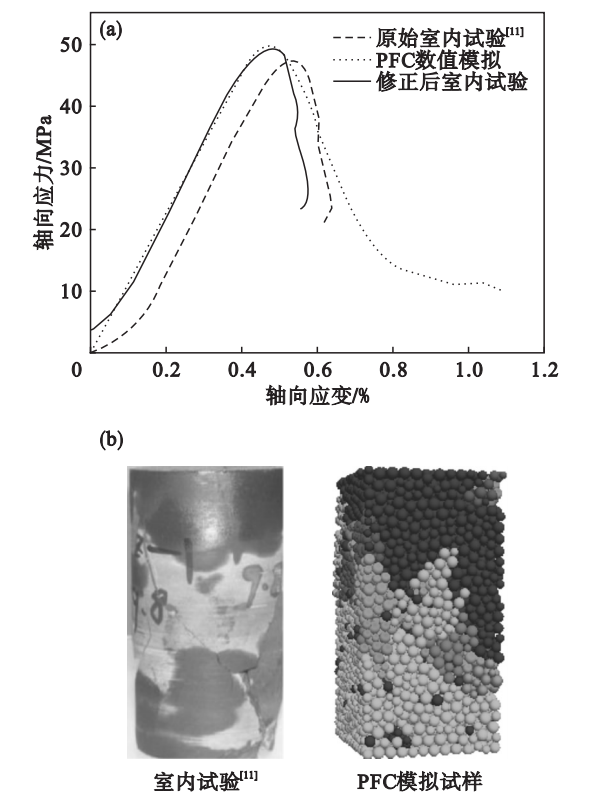


图 3 室内试验^[11]和 PFC 模拟结果对比
Fig. 3 Comparison between PFC numerical results and test results
(a)—应力-应变曲线对比; (b)—最终破坏形态对比.

表 1 砂岩力学参数 Table 1 Mechanical parameters of sandstone		
力学参数	室内试验 ^[11]	数值模拟
泊松比	0. 29	0. 301
单轴抗压强度/MPa	47. 27	49. 6
弹性模量/GPa	12. 4	11. 8

1.2 含单裂隙砂岩数值模型构建

裂隙采用光滑节理进行设置,通过弱化与相邻颗粒的接触来形成裂隙.参考 Cheng 等^[15],Fan 等^[16],Park 等^[17]将节理裂隙圆盘细观参数值设置为很小来弱化节理面的力学性质的方法,本文裂隙节理面摩擦系数取 0.5,而法向和切向黏结强度取 0,具体各细观参数如表 3 所示.

表 2 砂岩试样 PFC 模型颗粒模型细观参数 Table 2 Microscopic parameters of PFC model for sandstone model	
细观参数	取值
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 500
孔隙率	0. 6
颗粒弹性模量/GPa	18
颗粒法向与切向刚度比	4. 5
颗粒摩擦系数	0. 3
平行黏结弹性模量/GPa	18
平行黏结刚度比	4. 5
平行黏结法向强度/MPa	55
平行黏结切向强度/MPa	30

表 3 砂岩试样光滑节理模型细观参数 Table 3 Microscopic parameters in the smooth joint in the sandstone model	
细观参数	取值
节理摩擦系数	0. 5
节理法向刚度/GPa	2. 0
节理剪切刚度/GPa	2. 0
节理法向黏结强度/MPa	0
节理切向黏结强度/MPa	0

在 PFC 程序中预制裂隙均采用厚度为 0.1 mm 的圆盘,即裂隙的张开度为 0.1 mm,裂隙中心位置为试样的几何中心,裂隙的长度 $2a = 16$ mm,砂岩试样含单条裂隙的几何示意图如图 4 所示.

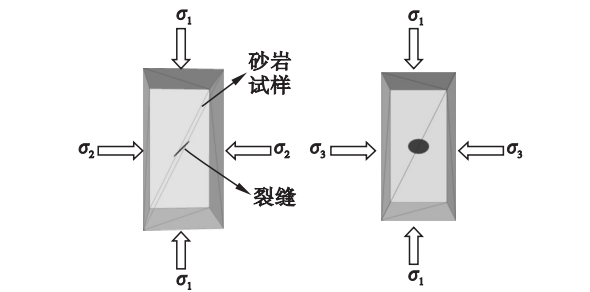


图 4 含单裂隙砂岩试样示意图
Fig. 4 Geometric diagram of sandstone specimen containing a single fissure

2 结果与讨论

2.1 中主应力对含裂隙砂岩力学特性的影响

为研究真三轴加载条件下中主应力对含裂隙砂岩宏观力学性质和裂纹扩展特性的影响,对裂隙倾角 α 为 45° 的单裂隙砂岩试样进行不同中主应力下的真三轴压缩数值试验.最小主应力 σ_3 均设定为 3 MPa,中主应力 σ_2 分别设为 3,6,12,18,24,30,40,50 MPa.

图 5 为不同中主应力下含单裂隙砂岩真三轴

压缩数值试验应力 - 应变曲线图, 当中主应力 σ_2 由 3 MPa 增大至 24 MPa 过程中, 单裂隙砂岩试样峰值应力逐渐增大, 但继续增大时其峰值应力逐渐减小 (图 6). 当 $\sigma_2 = \sigma_3 = 3$ MPa 时, 单裂隙砂岩应力峰值强度为 55.48 MPa, 而当 $\sigma_2 = 24$ MPa 时, 单裂隙砂岩应力峰值达到最大值 66.32 MPa, 应力峰值强度增大了 19.54%, 说明中主应力在一定程度上提高了岩石的强度, 此时 σ_2/σ_1 约为 1/3.

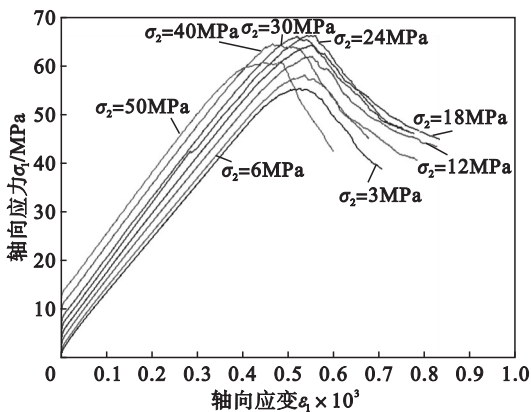


图 5 不同中主应力下含单裂隙砂岩真三轴数值试验应力 - 应变曲线图

Fig. 5 True triaxial stress-strain curves of sandstone specimen containing a single fissure under different intermediate principal stress

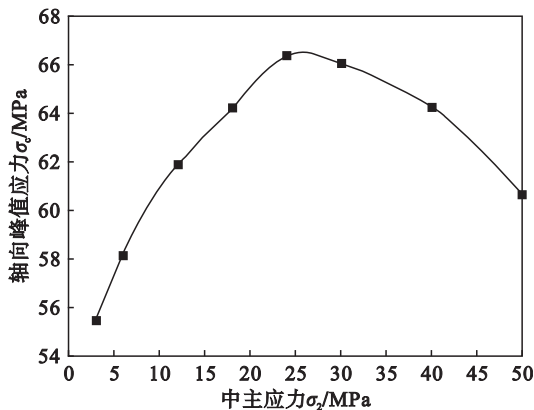


图 6 不同中主应力对应的轴向峰值应力
Fig. 6 Axial peak stress vs. different intermediate principal stress

2.2 不同中主应力条件下单裂隙砂岩破裂模式

图 7 为 $\sigma_3 = 3$ MPa, 中主应力 σ_2 分别为 6, 15, 24, 30, 40 MPa 时含裂隙砂岩试样在真三轴压缩下的最终破裂模式图. 当颗粒单元之间的法向应力或切向应力超过了相应的法向黏结强度或切向黏结强度时, 颗粒间的平行黏结发生破坏, 产生 DFN 裂纹. 从图中可见, 岩石的宏观破裂模式均为沿裂隙走向方向成 45° 的宏观破裂面, 说明中主应力与裂隙走向垂直时, 易形成垂直于裂隙走向的宏观破裂面. 随着中主应力的增大, 垂直

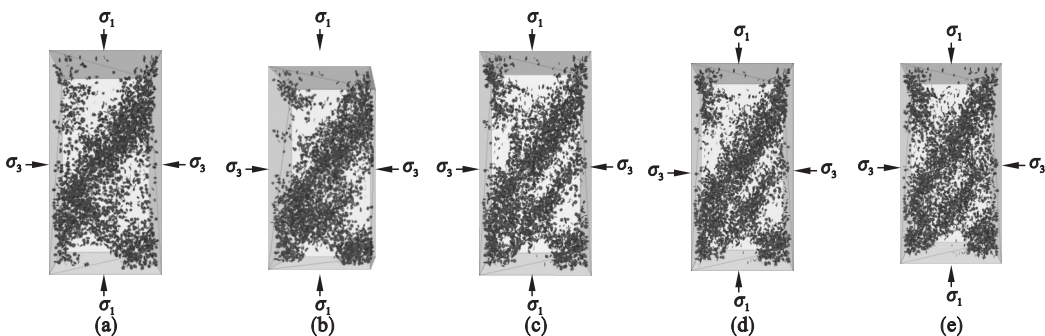


图 7 不同中主应力下单裂隙砂岩的最终破坏模式 (沿 σ_3 方向剖面)

Fig. 7 Ultimate failure mode of sandstone specimens containing a single fissure under different intermediate principal stress

(a) — 6 MPa; (b) — 15 MPa; (c) — 24 MPa; (d) — 30 MPa; (e) — 40 MPa.

于裂隙走向的宏观裂纹逐渐增多, 岩石的破裂程度增大.

2.3 中主应力对单裂隙砂岩试样损伤演化的影响

图 8 为真三轴压缩条件下, 含裂隙砂岩试样在中主应力 $\sigma_2 = 6, 15, 24, 30, 40, 50$ MPa 的轴向应力 - 轴向应变图及其微裂纹数目图, 包括张拉裂纹数目和剪切裂纹数目. 可以看出, 中主应力由 6 MPa 增大到 24 MPa 的过程中, 起裂应力由 40 MPa 逐渐增大至 50 MPa, 峰值应力由 58 MPa 增大至 65 MPa, 可见中主应力的增大在一定程度

上有利于裂隙砂岩的稳定性. 此后随着应力的增加, 微裂纹数量逐步增加, 当应力超过峰值应力 90% ~ 95% (即 σ_{cc}) 时, 裂纹数目急剧增长, 宏观裂纹形成, 岩石失稳破坏, 剪切裂纹的数目大于张拉裂纹的数目; 当轴向应力由 30 MPa 逐渐增加至 50 MPa 的过程中, 起裂应力 σ_{ci} 由 48 MPa 逐渐降低为 18 MPa, 表明过大的中主应力导致岩样内部裂纹扩展, 当应力超过峰值应力 σ_{cc} 时, 裂纹数量急剧增长, 最终扩展贯通形成宏观裂纹导致岩样的失稳破坏, 此时剪切裂纹仍占主导地位.

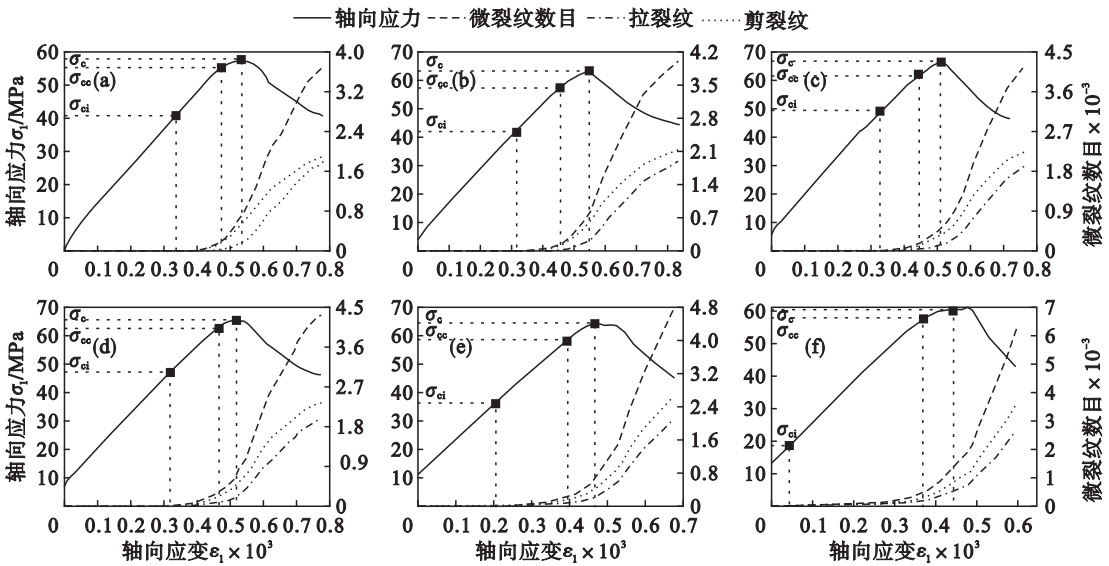


图 8 含裂隙砂岩试样在不同中主应力下微裂纹数目图

Fig. 8 Micro-crack numbers of brittle sandstone specimens containing fissure under different intermediate principal stress

(a)—6 MPa; (b)—15 MPa; (c)—24 MPa; (d)—30 MPa; (e)—40 MPa; (f)—50 MPa.

图 9 为应力衰减到峰值应力的 70% 停止加载时,含裂隙砂岩试样在中主应力 $\sigma_2 = 6, 15, 24, 30, 40, 50$ MPa 下的黏结张拉破坏裂纹和剪切破坏裂纹占总裂纹数目的百分比. 由图可以看出,在真三轴压缩作用下,预制单裂隙脆性砂岩的破坏机制为以剪切破坏为主,同时伴有拉破坏;且随着中主应力的增大,剪切破坏裂纹所占的比例逐渐增大.

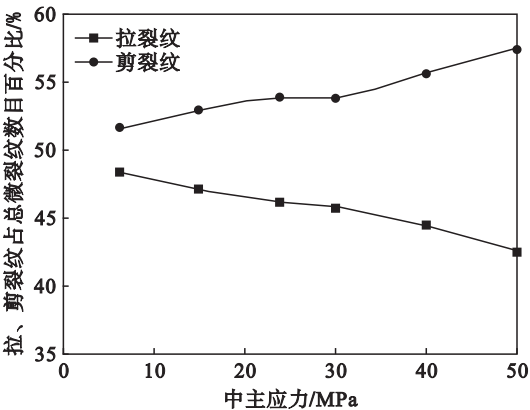


图 9 单裂隙砂岩试样不同中主应力下拉、剪裂纹百分比

Fig. 9 Tensile and shear crack percentage of sandstone specimens containing a single fissure under different intermediate principal stress

3 结 论

1) 在真三轴应力条件下,中主应力有助于增大含裂隙砂岩的强度,在试验条件下,当中主应力超过最大主应力的 1/3 时,单裂隙砂岩应力峰值

强度增大了 19.54%,而过高的中主应力会造成含裂隙岩石强度的下降.

2) 在真三轴压缩条件下,当中主应力的作用方向与裂隙走向垂直时,裂隙岩石的破坏模式为垂直于裂隙走向形成宏观剪切破裂面.

3) 含裂隙砂岩在真三轴压缩条件下,当应力超过峰值应力的 90% ~ 95% 时,裂纹数目急剧增长,宏观裂纹开始形成,岩石失稳破坏,破坏模式主要为伴随拉破坏的剪切破坏机制.

参考文献:

[1] Wong L N Y, Einstein H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46 (2): 239 - 249.

[2] Bobet A, Einstein H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1988, 35 (7): 863 - 888.

[3] 黄彦华,杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏观力学行为颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (8): 1644 - 1653.

(Huang Yan-hua, Yang Sheng-qi. Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (8): 1644 - 1653.)

[4] 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34 (1): 31 - 39.

(Yang Sheng-qi. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstones containing three pre-existing fissure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34 (1): 31 - 39.)

[5] Yang S Q, Jing H W. Strength failure and crack coalescence

behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. *International Journal of Fracture*,2011,168(2):227-250.

[6] Huang Y H,Yang S Q,Ranjith P G,et al. Strength failure behavior and crack evolution mechanism of granite containing pre-existing non-coplanar holes; experimental study and particle flow modeling [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017,88:182-198.

[7] 田文岭,杨圣奇,黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017,34(6):1207-1215.
(Tian Wen-ling, Yang Sheng-qi, Huang Yan-hua. PFC^{2D} simulation on crack evolution behavior of brittle sandstone containing two coplanar fissures under different confining pressures[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2017,34(6):1207-1215.)

[8] Jia P,Yang T H,Yu Q L. Mechanism of parallel fractures around deep underground excavations [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*,2012,61(61):57-65.

[9] Zhang X P,Wong L N Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression; a numerical study based on parallel bonded-particle model approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2012, 45(5):711-737.

[10] 蒋明镜,陈贺,张宁,等. 含双裂隙岩石裂纹演化机理的离散元数值分析[J]. 岩土力学,2014,35(11):3259-3268+3288.
(Jiang Ming-jing, Chen He, Zhang Ning, et al. Distinct element numerical analysis of crack evolution in rocks containing pre-existing double flaw [J]. *Rock and Soil Mechanics*,2014,35(11):3259-3268+3288.)

[11] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等. 岩石细观损伤演化规律的 CT 实时试验研究[J]. 中国科学(E 辑),2000,30(2):104-111.
(Ge Xiu-run, Ren Jian-xi, Pu Yi-bin, et al. CT real-time experimental study on the evolution law of mesoscopic damage of rock [J]. *Science in China(Series E)*,2000,30(2):104-111.)

[12] 胡光辉,徐涛,陈崇枫,等. 基于离散元法的脆性岩石细观蠕变失稳研究[J]. 工程力学,2018,35(9):26-36.
(Hu Guang-hui, Xu Tao, Chen Chong-feng, et al. A microscopic study of creep and fracturing of brittle rocks based on discrete element method [J]. *Engineering Mechanics*,2018,35(9):26-36.)

[13] Dillon R,Rankin G I. Cube, cylinder, core and pull-off strength relationships[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*,2013,166(10):521-536.

[14] Potyondy D O,Cundall P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*,2004,41(8):1329-1364.

[15] Cheng C,Chen X,Zhang S. Multi-peak deformation behavior of jointed rock mass under uniaxial compression;insight from particle flow modeling[J]. *Engineering Geology*,2016,213:25-45.

[16] Fan X,Kulatilake P H S W,Chen X. Mechanical behavior of rock-like jointed blocks with multi-non-persistent joints under uniaxial loading; a particle mechanics approach [J]. *Engineering Geology*,2015,190:17-32.

[17] Park J W,Song J J. Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2009,46(1):1315-1328.