

文章编号:1000-582X(2011)04-100-07

高应力岩石局部化变形与隧道围岩灾变破坏过程

赵 瑜^{1a,b},张春文^{1a,b},刘新荣^{1a,b},陈陆望²

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院;b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045;
2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院,安徽 合肥,230009)

摘 要:为了研究深埋隧道围岩变形局部化与渐进破坏现象,运用 FLAC3D 三维显式有限差分法分析软件,基于摩尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型,采用大变形的计算方法,研究了岩石试件在单轴压缩状态下局部化现象启动、发展直至试件最终破坏的全过程,进一步结合隧道物理模型试验,探讨了高应力条件下隧道围岩变形局部化与渐进破坏的关系,发现岩石材料表现出的软化性状与剪切带形成的结构软化有着密切的联系,从围岩屈服区和软化带的分布规律找到高地应力隧道围岩渐进破坏的突破口,并指出岩体单元的弹性变形和单元屈服后岩体的塑性挤出是隧道开挖后收敛变形的主要原因。

关键词:应变局部化;破坏过程;高地应力

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Study on strain localization and progressive failure of surrounding rock under high pressure environment

ZHAO Yu^{1a,b}, ZHANG Chun-wen^{1a,b}, LIU Xing-rong^{1a}, CHEN Lu-wang²

(1. a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045 P. R. China;
2. School of Resources and Environmental Engineering; Hefei University of Technology, Hefei 230009 Anhui, P. R. China)

Abstract: This paper uses the Mohr-Coulomb criterion with tension cut-off strain-softening model and the large-strain calculation method to study the localized deformation and progressive failure. It investigates the process of strain localization appearing, growing and sample failure, and uses the physical and numerical simulation to explore the relationship between strain localization and progressive failure of surrounding rock. The results show that the soften character of rock sample is caused by strain localization. The breach point of progressive failure is founded based on the distribution law of plastic zones and soften strips. The key causes of the tunnel convergence deformation after opening are the plastic extrusion and the elastic deformation of rock yield units caused by stress release.

Key words: strain localization; progressive failure; high geostress

岩石在承受外界荷载的过程中,当达到一个临界的变形水平之后,在将要形成破裂面的局部区带

上,发生强烈的变形集中,使原来均匀的或近似均匀的变形场变成极不均匀的现象,表现为变形在不连

收稿日期:2010-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50621403;50804060);教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-09-0844)

作者简介:赵瑜(1978-),男,重庆大学博士,副教授,主要从事地下工程及环境保护研究,(E-mail) ztytut1@126.com。

续发展,可称之为变形局部化现象。在材料出现宏观破坏之前,局部化带中的材料和周围的材料变形仍然满足几何协调性,但局部化带中的应变率与局部化带外的应变率相比发生了跳跃。变形局部化是岩土材料失稳的一个重要特征,是材料破坏的先兆,局部区域的损伤及逐步发展是破坏过程的基本特征^[1-3]。岩石局部化变形机理研究,对岩石材料组成结构的正确分析以及对岩石材料力学特征的正确描述具有十分重要的意义,并且岩石局部化剪切带的形成和发展是引起巷道围岩剪切破坏的根本原因,甚至导致巷道失稳。这对巷道围岩变形破坏与控制机理进行深入的研究提供可靠的理论依据^[4]。

国内外许多学者在变形局部化方面做了很深入的研究,Rudnicki JW等在压力敏感材料的三轴压缩中模型来预测局部化的产生,表明 Drucker-Prager 弹塑性模型中的非关联流动法则对局部化的预测结果有很大的影响^[5]。Peng S等在不同的端部边界条件和围压下对花岗岩的断裂和破坏过程进行试验,研究了试件上下端部摩擦边界条件对岩石试件剪切带的影响^[6]。Labuz JF等利用平面应变仪对岩石和混凝土进行压缩试验,认为砂岩和灰岩破坏面不会在峰值荷载处完全形成,平面剪切带的倾角可以用塑性理论很好地预测^[7]。Bhandari AR等通过研究岩石变形局部化与应变率的关系,探讨了岩石变形局部化的转化机制^[8-9]。Rudnicki JW等建立了从均匀变形中分化的非单一或分叉的局部变形模型^[10]。Zhang YQ基于统一强度理论,研究了孔隙发育对岩石应变局部化的影响,得出了屈服准则对岩石局部化的影响规律^[11]。Hao SW等通过表面局部化与灾变断裂关系的研究,尝试提出一种新的灾变断裂的预测方法^[12]。尹光志等进行了不同加载速度和不同含水率条件下对重庆红色泥砂岩的变形局部化进行了试验研究,并利用弹性波方法测定了变形局部化的起动时间^[13]。周小平等利用摩擦弯折裂纹模型研究了受压、受拉条件下细观非均匀性岩石的损伤局部化问题和全过程应力应变关系,确定了损伤局部化发生的条件,分析了产生损伤局部化的原因^[14]。栾茂田等通过理论推导建立了岩石发声分叉失稳时的最大硬化模量和临界局部化方向,研究了局部化方向角对于岩石的损伤程度和初始泊松比的依赖关系^[15]。但关于岩石局部化变形与深埋隧道围岩灾变破坏过程研究的研究成果还

不多见。

岩体本身具有力学响应的非线性特性,高应力环境下,岩体的单元多处于峰后应力状态,非线性特性就更加突出,加之围岩体发生了较大的变形以及隧道断面的不规则等造成了高地应力隧道围岩的力学响应的极端复杂性^[16-17]。文中以共和隧道 III 级深埋围岩段为研究对象,利用 FLAC3D 进行双重非线性数值仿真计算,结合物理模拟进行对比分析,通过对深埋隧道岩体变形演化过程进行研究,探讨岩石局部化变形与深埋隧道围岩灾变破坏过程的关系。

1 工程概况

西部开发通道重庆至长沙共和隧道位于彭水县共和乡境内,为双洞分修特长隧道,左洞全长 4 779 m,右洞全长 4 745 m,两洞轴线相距 20~23 m。隧道岩层中地应力值随埋深增大而增大,最大埋深 1 000 m,最大埋深处为 III 级围岩段。最大水平应力 29.86 MPa,垂直应力 27.0 MPa,最小水平应力 20.21 MPa,围岩主要力学参数为弹性模量 27.3 GPa;单轴抗压强度 50.01 MPa;单轴抗拉强度 6.1 MPa;泊松比 0.43;内聚力 1.9 MPa;内摩擦角 33.7°;容重 27.5 kN/m³。

2 物理模拟

根据试验系统试件的最大尺寸以及该隧道的施工设计断面尺寸,设定几何相似比为 55,因隧道埋深为 1 000 m,地应力大,此处不考虑容重,应力相似比定为 40,模型尺寸为 800 cm×800 cm×200 cm,如图 1 所示,物理模型试件边界荷载在中科院武汉岩土所大型物理模型试验机上施加。X 方向为水平加载方向,对向加载;Y 方向下部固定,上部施加垂直荷载;Z 方向前后向均固定,通过与其紧贴的 2 块高强混凝土传力块对模型试件施加前后方向约束。从物理模型试件边界荷载条件与几何尺寸来看,基本符合平面应变条件。物理模型边界水平荷载与垂直荷载同步施加,施加水平荷载与垂直荷载的速度分别为 20 kN/min、18.33 kN/min,由物理模型试验机的液压伺服控制。当水平荷载施加到 120 kN 后保持荷载不变开始进行三心拱洞室开挖。圆形洞室开挖完成后,在物理模型试件的水平与垂直方向同步提高荷载。

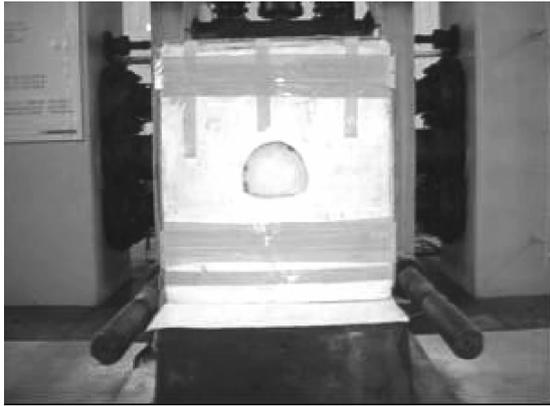


图 1 物理模型试件

3 数值模拟

数值计算模型的几何尺寸及形状严格遵循所制作的相似模型试件,模型的总体尺寸为长 800 mm 宽×800 mm×厚 200 mm,如图 2 所示。数值计算所施加的边界荷载与模型试验施加的边界荷载过程近似。模型的下边界施加上方位移为 0 的约束,前后表面施加前后方向位移为 0 的约束边界。左右边界施加水平荷载,上边界施加垂直荷载。考虑到岩体应力-应变关系实际上是非线性的,变形不仅同应力大小有关,而且同应力历史或应力路径有关,伴随应力调整产生的是一个非线性不可逆的能量耗散过程,因而采用大变形计算方法,本构模型采用应变软化模型。

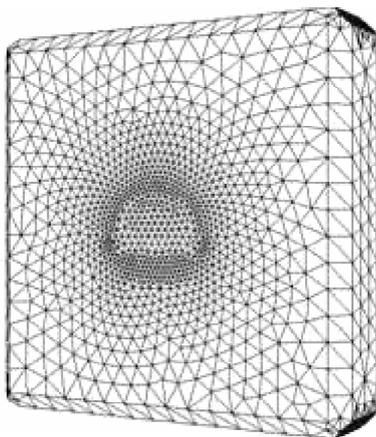


图 2 计算模型

3.1 应变软化模型

FLAC3D 是一种三维连续体快速拉格朗日分析程序,采用了混合离散方法、动态松弛方法和显式差分方法。该法用途较广,不必求解大型方程组,不

通过迭代以满足非线性乃至软化的本构关系,可以较好的模拟出变形局部化剪切带及其演化规律。该法不形成刚度矩阵,适合于模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏和塑性流动的力学行为^[18-19]。

FLAC3D 中的应变软化模型是基于与剪切流动法则不相关联而与拉力流动法则相关联的摩尔-库仑模型,岩石的屈服准则采用莫尔-库仑与拉破坏准则,在屈服面上,剪切失效应力点的位置由非关联流动准则决定,拉伸失效应力点的位置由关联流动准则决定,通过用户自定义粘聚力、摩擦角、剪胀角些变量作为总应变中塑性应变部分的分段函数,来表示塑性屈服开始后,粘聚力、摩擦角、剪胀角 γ 逐渐弱化的现象。

通过多次几何尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 小试件(网格剖分如图 3 所示)数值试验反演,得到了同共和隧道深埋段围岩相似材料单轴应力-应变关系曲线较一致的应力-应变关系曲线(如图 4)。

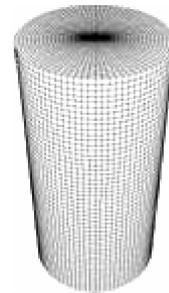


图 3 小试件单元划分

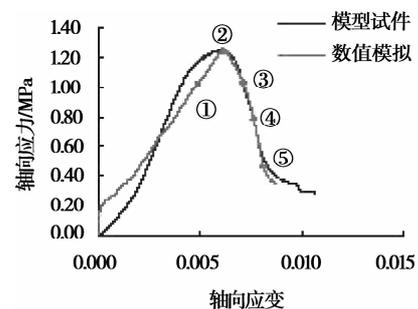


图 4 数值试验与试验室测试的应力-应变关系曲线比较

反演后的粘聚力、摩擦角、剪胀角等参数与塑性应变的函数关系见图 5。

3.2 应变局部化与材料的软化特性

依次截取 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 小试件数值模拟轴向应力-应变曲线上 5 个点(见图 5)的剪切应变速率图,如图 6 所示,1#点处轴向应力接近峰值,试件

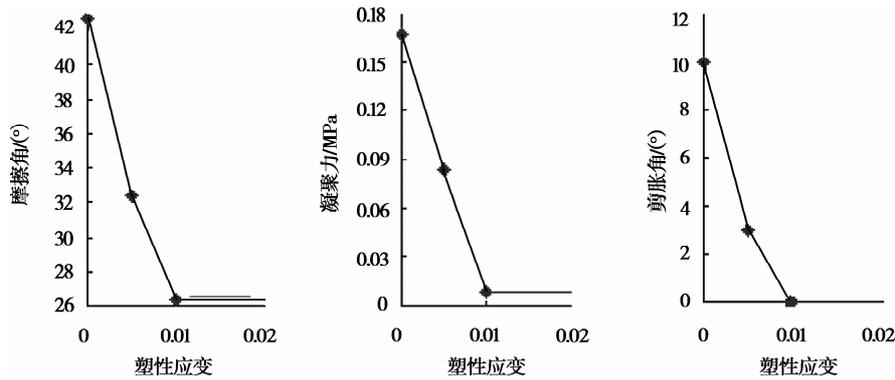


图5 摩擦角、凝聚力及剪胀角与塑性应变的关系

各部位的剪切应变速率产生差异,岩石局部化剪切带启动,带内外岩石单元应力都处于上升阶段,带内外都处于弹塑性加载阶段,此时属于连续分叉,由于端部效应,在试件两端出现塑性破坏。试件中部的应变速率随载荷的增加而渐渐大于试件的两端,一直到峰值应力,这个过程都在持续发展,在峰值点(2#点),试件表面单元全部屈服。在峰后,试件表面塑性破坏单元呈现分区现象,逐渐形成数个贯穿试件的优势剪切速率剪切带,部分剪切带内材料处于塑性软化状态,带外部分岩体已经发生了卸载现象,随着轴向应变的进一步增加,有的剪切带消失,有的则继续发展,直到试件达到残余强度时,只剩下了2条优势剪切带。可见岩石材料表现出的软化性状与剪切带形成的结构软化有着密切的联系。

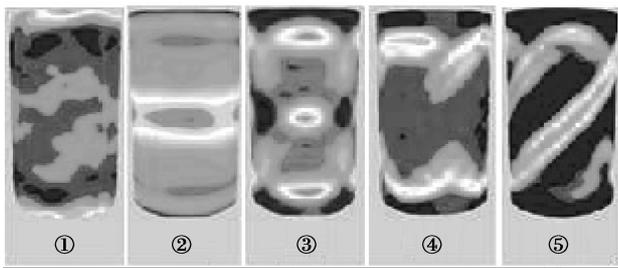


图6 各点剪切应变速率图

4 隧道物理模拟与数值模拟试验结果对比分析

在模型试验过程中,在孔内放置本色BT-688型针孔摄影机进行实时内窥摄影,并把图像信号传入安装在电脑上的成丰CF-1701-4数据采集卡进行数据转换,这样通过计算机显示器可以监控洞室的整个破坏过程。

当水平荷载施加到120 kN,垂直荷载施加到

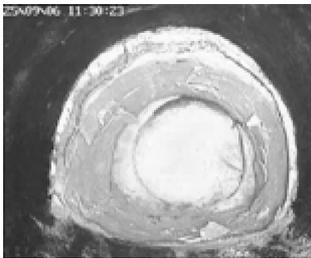
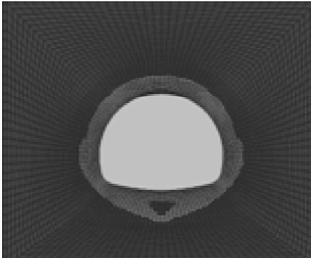
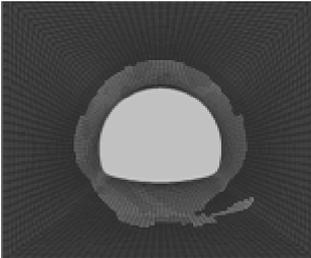
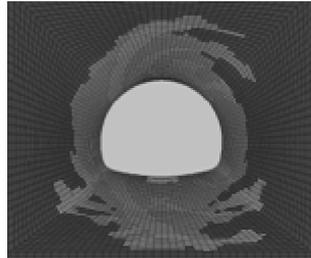
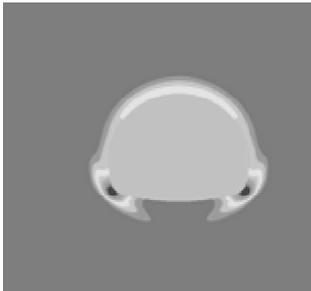
110 kN时,洞室开始开挖。开挖前,围岩处于三向应力状态,整个数值模型处于弹性状态。开挖后,围岩个别区域出现屈服区、软化带,其余大部分处于弹性状态,而物理模型没有观测到任何破坏迹象。

水平荷载施加到130 kN,垂直荷载到119 kN时,洞口边缘塑性区、软化带继续扩展,洞壁塑性区、软化带贯通,拱脚软化程度最高,软化程度由洞壁向洞内依次减小,拱底和拱肩塑性区面积较大,塑性区开始集中于数条狭窄的区域内,出现分带现象,在物理模型上表现为左拱肩部位岩石局部屈服变形,并产生一条肉眼可以观察到或摄影机可以分辨出的微小裂纹,而其余大范围围岩仍保持整体稳定。

继续施加荷载,局部剪切破坏带、拉伸破坏带、软化带不断增加,且沿洞壁轮廓向外扩展。当施加荷载施加到160 kN,垂直荷载施加到147 kN时,围岩局部剪切破坏带、拉伸破坏带、软化带的数量快速增加,以洞室为中心呈螺旋状向周边扩展。在物理模型上表现为左拱肩部位碎屑飞出,右拱脚部位岩石局部屈服变形,产生微小裂纹,右拱腰部位出现较大掉块,拱顶碎屑飞出,拱顶大块掉渣依次出现。

当施加荷载施加到210 kN,垂直荷载施加到197 kN时,已出现大量局部剪切破坏带、拉伸破坏带、软化带,拱顶和拱底破裂带的前端在洞室周边汇集,逐渐形成封闭的破裂环趋势,强软化带和弱软化带交替出现,高、低粘聚力多次交替出现,基本上已无软化程度由洞壁向洞内依次减小的趋势,而是已各条软化带中心为核心,软化程度由带中心向带两边梯度降低。在物理模型上表现为破坏裂纹逐渐由拱腰向拱顶贯通,并扩展到整个洞室内壁轮廓并在壁面快速扩张并伴随剥离现象,不时有较大的碎屑、碎块跨落或弹出,内收敛发生严重,压碎掉渣,成层脱层。

表 1 物理模拟与数值模拟结果比较

	水平荷载/130 kN 垂直荷载/119 kN	水平荷载/160 kN 垂直荷载/147 kN	水平荷载/210 kN 垂直荷载/197 kN
物理模型试验破坏过程			
数值模拟屈服区的扩展			
数值模拟软化带的发展			

注:软化带指围岩中材料强度指标发生弱化的区域,文中以内聚力为判断标准,凡内聚力低于初始给定内聚力的材料既认为材料发生软化,红色、淡红色、黄色、淡黄色、绿色、淡绿色、蓝色依次表示单元的强度软化程度逐渐增大,其中红色单元处于弹性状态,没有软化,淡蓝色单元软化程度最为严重;数值模拟屈服区扩展图中,蓝色表示单元处于弹性状态,粉红色表示该单元曾经是产生剪破坏的塑性区,但由于应力的重新调整,在计算结束后,这些屈服单元的应力状态不再满足屈服准则,灰色表示该单元在当前应力状态下发生了剪切塑性破坏,绿色表示该处发生拉破坏。

由此可见,高应力条件下,地下洞室的破坏局部化现象严重,不同空间和位置表现出不同的变形特征,在模型不同的部位,呈现出显著的差异,变形的起点在左拱肩和右拱脚部位,然后扩展至整个洞室,洞室变形发展表现出不对称性。

在初始应力状态下,虽然开挖卸荷造成洞室附近应变集中,但围岩其他各处的变形场基本上是均匀的,而当围岩应力在逐渐增加后,变形会强烈集中到围岩其他各个区域或条带上,表现出强烈的变形局部化现象,集中的变形带导致该处围岩屈服,岩体达到屈服极限后开始软化,软化愈严重,屈服区呈带状交替现象分布愈明显,屈服区上岩体的强度不是同时发挥到最大值,而是逐渐发挥的,而且由于应变局部化的产生而导致的非均匀变形使得岩体的软化

性状与屈服区产生的结构破坏直接相关,所以,岩体的软化性状可视为岩体的局部化变形的结构反映。

高应力条件下,围岩在渐进破坏过程中,破坏区呈带状非连续分布现象,这是深部围岩的一种独特的现象,不少专家也注意到这种现象^[16,20],如俄罗斯学者通过现场实测与模拟试验,发现深部巷道围岩的破裂区域呈带状间隔分布现象,如根据观测数据描绘的南非 Witwatersrand 金矿 2 000~3 000 m 深处的巷道顶板破裂损伤区域分布情况和根据量测数据描绘的俄罗斯 Маяк 矿山中的破裂带分布情况,表明在深部岩体中开挖洞室或巷道时,其两侧和工作面前的围岩中会产生交替的破裂区和不破裂区。国内也有一些实测与模拟试验的结果表明深部围岩具有类似特点。破裂带非连续分布现象揭示了深部

围岩的另一种平衡过程及其新的平衡稳定形式。

5 结 论

1)随着地应力的提高,隧道围岩出现屈服区交替出现,内聚力软化区交替出现现象,而且地应力越高,这种交替出现的分区会越多。高地应力情况下,隧道围岩的塑性区和内聚力软化区以带状交替出现方式由洞壁向围岩内部扩展。

2)高地应力洞室开挖是一个非线性不可逆的能量耗散过程。开挖后,由于应力较高和岩体的不利受力状态,岩体单元自身储存的弹性能导致部分单元屈服,进而岩体强度降低,单元的弹性变形和单元屈服后岩体的塑性挤出是隧道收敛变形的主要原因,因而采用应变软化模型能很好的模拟这一过程。

3)高地应力洞室的失稳是一个渐进过程,小裂缝出现标志着剪切滑移面的形成,也可能是整个围岩累进性破坏的突破口。随着荷载的继续施加,应力继续调整,引起另一些次薄弱部位的破坏,然后导致整个洞室的破坏。在进行支护时这些部位要重点加强,以免这些部位引起整个洞室的失稳破坏。

致谢:物理模拟试验得到中科院武汉岩土所白世伟研究员,杨春和研究员的指导。

参考文献:

- [1] 张东明. 岩石变形局部化及失稳破坏的理论与实验研究[D]. 重庆:重庆大学博士学位论文,2004:89-132.
- [2] 王学滨. 岩石变形局部化的 FLAG 数值模拟[D]. 辽宁阜新:辽宁工程技术大学硕士学位论文,2002:46-53.
- [3] 周伟,常晓林,唐忠敏,等. 溪洛渡高拱坝渐进破坏过程仿真分析与稳定安全度研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2002,34(4):46-50.
ZHOU WEI, CHANG XIAO-LIN, TANG ZHONG-MIN, et al. Research of gradually destruction process simulantion analysis and stabilization safety on xiluodu high arch dam [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2002,34(4):46-50.
- [4] 徐营. 岩石局部化变形与巷道围岩分岔失稳机理研究[D]. 山东泰安:山东科技大学硕士学位论文,2006:10-35.
- [5] RUDNICKI J W, RICE J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1975,23(6):371-394.
- [6] PENG S,JOHNSON AM. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of chelmsford granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1972,9(1):37-86.
- [7] LABUZ J F,DAI S T,PAPAMICHOS E. Plane-strain compression of rock-like materials [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1996,33(6):573-584.
- [8] BHANDARI A R,INOUE J. Experimental study of strain rates effects on strain localization characteristics of soft rocks[J]. Soils and Foundations,2005,45(1):125-140.
- [9] BHANDARI A R,INOUE J. Strain localization in soft rock-a typical rate-dependent solid; experimental and numerical studies [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2005,29(11):1087-1107.
- [10] RUDNICKI J W, RICE J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1975,23(6):371-394.
- [11] ZHANG Y Q,LIU G R,HAN X. Analysis of strain localization for ductile materials with effect of void growth [J]. International Journal of Mechanical Sciences,2004,46(7):1021-1034.
- [12] HAO S W,WANG H Y,XIA M F, et al. Relationship between strain localization and catastrophic rupture[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2007,48(1):41-49.
- [13] 尹光志,岳顺,张东明,等. 准平面应变条件下泥砂岩变形局部化的试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(3):586-590.
YIN GUANG-ZHI, YUE SHUN, ZHANG DONG-MING, et al. Experimental research on deformation localization of mud-sand stone in quasi-plane strain state [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(3):586-590.
- [14] 周小平,张永兴,哈秋聆,等. 压应力状态下细观非均匀性岩石的损伤局部化和应力应变关系分析[J]. 应用数学和力学,2004,25(9):951-957.
ZHOU XIAO-PING,ZHANG YONG-XING,HA QIU-LING, et al. Analysis of the localization of damage and the complete stress-strain relation for mesoscopic heterogeneous rock under uniaxial tensile loading[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2004,25(9):951-957.
- [15] 栾茂田,王忠昶,杨庆. 考虑损伤效应的岩石类材料局部化特性分析[J]. 岩土力学,2007,28(1):1-6.
LUAN MAO-TIAN, WANG ZHONG-CHANG, YANG QING. Analysis of localization behavior of rock-like materials with damage effect [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(1):1-6.
- [16] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. 东华理工学院学报,2004,27(1):1-4.

- QIAN QI-HU. The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 1-4.
- [17] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 26-31.
ZHAO ZHONG-HU, XIE HE-PING. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 26-31.
- [18] 何满潮, 王树仁. 大变形数值方法在软岩工程中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 185-188.
HE MAN-CHAO, WANG SHU-REN. Application of numerical method of large deformation to soft rock engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 185-188.
- [19] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (Version 2. 1) users manual [C]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 2002.
- [20] 贺永年, 韩立军, 邵鹏, 等. 深部巷道稳定的若干岩石力学问题[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 288-295.
HE YONG-NIAN, HAN LI-JUN, SHAO PENG, et al. Some problems of rock mechanics for roadways stability in depth[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(3): 288-295.
- (编辑 陈移峰)
-
- (上接第99页)
- [6] 管保山, 王欣. 低渗透气藏压裂改造技术研究[R]. 河北廊坊: 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 2009.
- [7] 温庆志, 张士诚, 王雷, 等. 支撑剂嵌入对裂缝长期导流能力的影响研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 65-68.
WEN QING-ZHI, ZHANG SHI-CHENG, WANG LEI, et al. Influence of proppant embedment on fracture long-term flow conductivity [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 65-68.
- [8] 卢聪, 郭建春, 王文耀, 等. 支撑剂嵌入及对裂缝导流能力损害的实验[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 99-101.
LU CONG, GUO JIAN-CHUN, WANG WEN-YAO, et al. Experimental research on proppant embedment and its damage to fractures conductivity [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 99-101.
- [9] 杨振周, 陈勉, 胥云, 等. 火山岩岩板长期导流能力试验[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 42-44.
YANG ZHEN-ZHOU, CHEN MIAN, XU YUN, et al. An experimental study of long-term conductivity of volcanic rock core plate[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 42-44.
- [10] BLASINGAME T, JOHNSTON J, LEE W. Type-curve analysis using the pressure integral method [C]//SPE California Regional Meeting, April 5-7, 1989, Bakersfield, California, United States; Society of Petroleum Engineers, Inc, 1998.
- [11] AGARWAL R, GARDNER D, KLEINSTEIBER S. Analyzing well production data using combined-type curve and decline-curve concepts [C]// the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 27-30, 1998, New Orleans, United States; Society of Petroleum Engineers, Inc, 1999.
- [12] MATTER L, ANDERSON D. A systematic and comprehensive methodology for advanced analysis of production data [C]//the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 5-8, 2003, Denver, Colorado, United States; Society of Petroleum Engineers, Inc, 2003.
- [13] 罗瑞兰. 深层气藏变形介质渗流机理及气藏工程应用研究[D]. 北京: 中国石油大学博士学位论文, 2006.
- [14] 罗瑞兰, 程林松, 彭建春, 等. 确定低渗岩心渗透率随有效覆压变化关系的新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 87-90.
LUO RUI-LAN, CHENG LIN-SONG, PENG JIAN-CHUN, et al. A new method of determining relationship between permeability and effective overburden pressure for low-permeability reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(2): 87-90.
- [15] 罗瑞兰, 朱华银, 万玉金, 等. 岩石应力敏感对苏里格气井产能的影响[J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 19-22.
LUO RUI-LAN, ZHU HUA-YIN WAN YU-JIN et al. The effect of rock stress sensitivity on well deliverability in Sulige gas field [J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(6): 19-22.
- (编辑 陈移峰)