

# 渗透压力作用下灰岩单轴压缩变形特性研究

宋战平<sup>1,2</sup>, 肖珂辉<sup>1,2</sup>, 杨腾添<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为探究渗透压力对灰岩单轴压缩变形特性的影响, 本研究采用自主研发的注水压力系统对标准灰岩试件在不同渗透压力条件下注水 72 h, 然后利用 600 kN 型微机控制电液伺服岩石刚性试验机对注水后的试件进行单轴压缩试验, 记录岩石的变形特性, 并利用声发射设备采集岩石加压过程中的 AE 特性。引入闭峰比和闭损比的概念以减小岩石初始裂缝对实验结果的影响, 实验结果表明: 在不同的渗透压力下, 岩石的变形阶段明显不同; 且随着渗透压力的增加, 岩石的各项力学特性均有不同程度的下降。

**关键词:** 单轴压缩; 渗透压力; 变形特性; 强度

中图分类号: TU454

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0649-05

## Study on deformation characteristics of limestone under uniaxial compression considering seepage pressure

SONG Zhanping<sup>1,2</sup>, XIAO Kehui<sup>1,2</sup>, YANG Tengtian<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to reveal the effect of osmotic pressure on the uniaxial compression deformation characteristics of limestone, a self-developed water injection pressure system was used to inject water into standard limestone specimens for 72 h under different osmotic pressures. Then the uniaxial compression test of water-injected specimens is carried out by using 600 kN microcomputer controlled electro-hydraulic servo rock rigidity tester. The deformation characteristics of rock and AE characteristics were collected during pressure loading. To reduce the effect of initial cracks on experimental results, this paper introduce the concepts of RCP (Ratio of Closed stress to Peak stress) and RCD (Ratio of Closed stress to Damage stress). Results show that the deformation stages of rocks are obviously different under different osmotic pressures, and with the increase of osmotic pressure, the mechanical properties of rocks decrease to varying degrees.

**Key words:** uniaxial compression; osmotic pressure; deformation characteristics; strength

岩石变形特性一直是岩石力学研究的主要内容, 也是岩体工程设计的核心<sup>[1]</sup>, 岩石变形特性影响着岩体工程的施工方案和安全。随着工程建设的发展, 富水环境下的隧道和地下工程数量日益增多, 由于地下水渗透引起的围岩失稳问题也愈发突出<sup>[2-4]</sup>。因此, 研究渗透压力作用下岩石的力学特性和变形特性具有重要意义。

前人在渗透水压力对岩石力学特性的影响方面做了诸多研究: Skempton<sup>[5]</sup>提出渗透水对岩体劣化的最集中体现是对岩体损伤力学特性的影响; 在此基础上, 刘新荣<sup>[6]</sup>分别从物理作用、化学作用以及力学作用三个方面论述了渗透水对岩石性能的劣化作用; 仵彦卿<sup>[7]</sup>利用 CT 扫描技术, 揭示了

不同渗透水压力作用下岩石空隙率、渗透速度、孔隙直径等参数的变化规律; Tsuyoshi<sup>[8]</sup>借助声发射揭示了花岗岩和致密砂岩在水-力耦合作用下的损伤演化过程; 邢福东<sup>[9]</sup>考虑应力场和渗流场耦合作用下岩石的失稳破坏, 揭示了渗透水压与侧向围压对脆性岩石力学特性及脆延转化特性的影响规律; 宋勇军<sup>[10]</sup>通过开展单轴蠕变试验对干燥和饱水炭质板岩流变模型进行了研究。

上述研究为认识渗透压力对岩石破坏强度和变形特性的影响奠定了基础。但目前, 绝大多数研究都是利用三轴试验模拟渗透水对岩石变形特性的影响, 而单轴条件下渗透水对岩石变形特性的影响的研究仍然较少。对于浅埋隧道而言, 其

收稿日期: 2018-11-07

修改稿日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578447); 住房和城乡建设部科学技术计划基金项目(2017-k4-032)

第一作者: 宋战平(1974—), 男, 教授, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作。E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn

开挖面附近岩石受力情况近似于单轴压缩,而单轴与三轴条件下岩石的受力及变形特性截然不同。因此,在前人研究的基础上,本文利用自主研发的渗透压加载系统对灰岩试件进行加压注水,并设计合理的单轴压缩试验对注水试件进行加载,同时采集声发射和应力-应变数据,最后通过对比、分析阐述灰岩的变形特性。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制备

试验选取位于贵阳市麦西隧道进口区的灰岩作为试验材料。通过水刀切割技术取得边长为300 mm的立方体灰岩岩块,并根据每个岩块的完整性的不同,通过钻取、切割打磨等工序制备成5~7个灰岩试件。国际岩石力学试验规程要求:试件端面不平行度小于0.02 mm,圆柱形标准试件高径比为2:1。故本研究将试件加工为直径50 mm,高度100 mm,端面不平行度满足要求的圆柱形试件。

### 1.2 试验设备

本试验采用西安力创仪器设备有限公司生产的600 kN型微机控制电液伺服岩石刚性试验机作为加载系统,该系统具有应力控制和应变控制两种加载方式,最大试验力为600 kN,试验力示值相对误差 $\leq \pm 1\%$ ,最大加载速度可达到70 mm/min。

试验利用自主研发的高渗透水压力装置进行注水,可实现渗透水压力加载系统与伺服加载系统的耦合。渗透水压力系统采用单泵缸控制,可实现恒压力或恒流量的渗透压加载效果,其组成如图1所示。

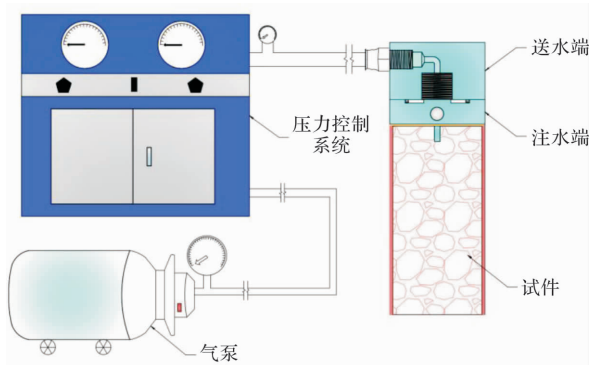


图1 适用于单轴压缩试验的渗透水压力系统

Fig.1 Osmotic pressure system uniaxial compression test

### 1.3 试件准备

#### (1) 饱水

本实验采用抽真空法强制饱水,在-0.98个标准大气压力环境下抽气饱水48 h。由于岩样属

于低孔隙率的灰岩,天然状态下的孔隙率仅为1.4%左右,在饱水过程中,水-岩物化反应导致孔隙率明显增加,强制饱水48 h后孔隙率增大趋势基本停滞。将试件取出烘干,测量干密度并进行成分分析后,重新强制饱水8 h,并用保鲜膜进行封存,防止水分流失。

#### (2) 烘干

将标准试件置于108℃的烘箱中,持续烘干36 h测其质量损失量记为 $m_1$ ,然后再烘干12 h测其质量损失量记为 $m_2$ ,当 $m_2/m_1 \leq 0.1$ 时,认为岩石完全干燥;否则,将之前所测质量损失量之和记为 $m_1$ ,再烘干12 h后,测质量损失量记为 $m_2$ ,并比较 $m_2/m_1$ 是否小于等于0.1,以此类推。当岩石完全烘干后,求岩石干密度并进行波速测定。

### 1.4 试验方案

本实验研究目的在于不同渗透压力作用下灰岩的单轴压缩破坏特性,因此,对4组试件分别进行0 MPa、2 MPa、4 MPa和6 MPa渗透压力注水。

实验可以分为以下4步进行:(1)利用环氧树脂将注水端与饱水后的试件顶端相连,防止渗透水从接缝中流出,并在试件侧表面涂止水剂防止水从试件侧表面渗出,其效果图如图2所示;(2)将送水端与注水端和渗透压力加载装置相连,利用渗透压力加载装置以4 MPa/min的速率加压至设计值后恒压72 h,然后进行电镜扫描试验;(3)在试件底端涂润滑剂,并利用伺服试验机以2 kN/s的速率对灰岩进行加载直至破坏;(4)加载过程中利用环向引伸计及声发射装置采集加载过程中的径向变形和AE活动,得到试件闭合应力、损伤应力和峰值应力。

## 2 试验结果及分析

灰岩试件的破坏形式和峰值应力如表1所示,由表1可知,除个别试件具有较大离散性以外,其余同组试件峰值应力基本相同,破坏形式均以劈裂为主。

试件A1强度明显低于同组其他试件,这是由于试件表面存在较大初始裂缝,且裂缝方向与水平方向夹角较大,加载时裂缝沿初始裂缝方向发生扩展,导致峰值应力降低,试件发生剪切破坏。

排除离散性对实验结果的影响,饱水灰岩在2 MPa、4 MPa和6 MPa渗透压力下的平均峰值应力为56.70 MPa、41.92 MPa和41.46 MPa,相较于无渗透压力下的平均峰值应力分别下降了21%、41%和42%。

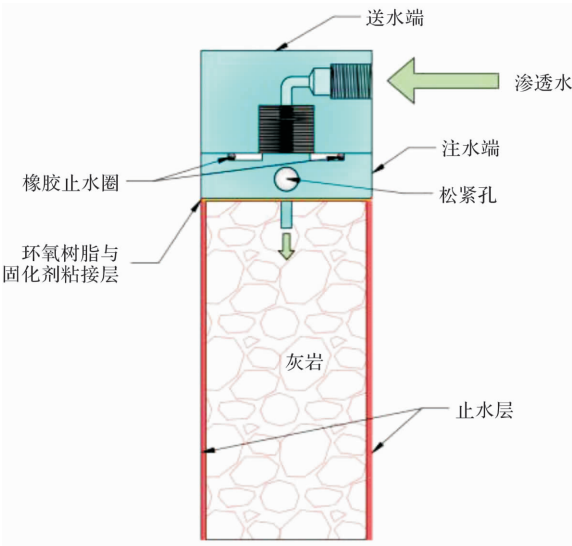


图 2 试件连接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of specimen connection

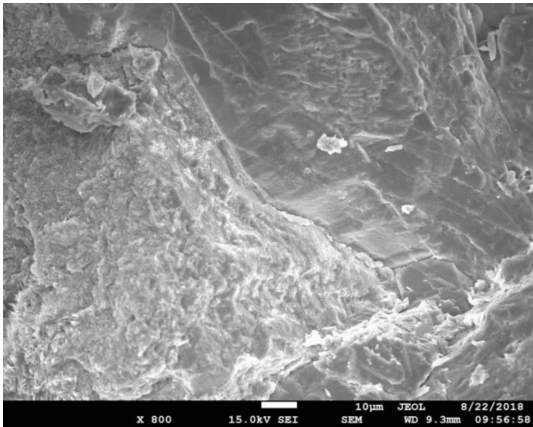
表 1 不同渗透压力下灰岩试件峰值应力与破坏形式

Tab. 1 Peak strength and failure mode of limestone specimens under different osmotic pressures

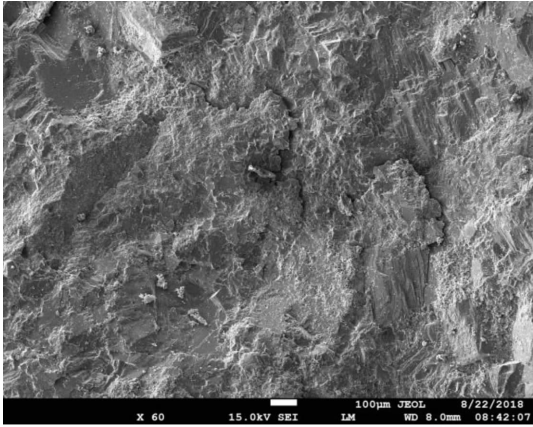
岩石编号	渗透压力/MPa	峰值应力 $\sigma_c$ /MPa	破坏形式
A1	0	42.36	剪切破坏
A2		69.79	劈裂破坏
A3		73.24	劈裂破坏
B1	2	54.31	劈裂破坏
B2		55.54	劈裂破坏
B3		60.24	劈裂破坏
C1	4	41.22	劈裂破坏
C2		39.17	劈裂破坏
C3		45.36	劈裂破坏
D1	6	40.19	劈裂破坏
D2		45.32	劈裂破坏
D3		38.88	劈裂破坏

2.1 裂隙变化情况

由电镜扫描试验结果可知(见图 3)，灰岩试件在无渗透压力条件下注水 72 h 后，裂隙依然较小(图 3(a))，当电镜扫描镜头放大倍率为 800 倍时，才可观察到部分地方有较短的裂隙，且裂缝深度较小；但随着渗透压力的增加，灰岩内部的裂隙进一步发展，裂隙数量有所增加，且宽度逐渐增大，裂隙趋于贯通；尤其当渗透水压力增大至 6 MPa 时(图 3(b))，试件裂缝明显增大，仅在 60 倍的放大倍率下即可清楚的观察到裂隙的存在，裂隙基本呈贯通裂隙，其裂缝宽度也较 0 MPa 时有明显提高。



(a) 0 MPa 渗透压注水 72 h 后



(b) 6 MPa 渗透压注水 72 h 后

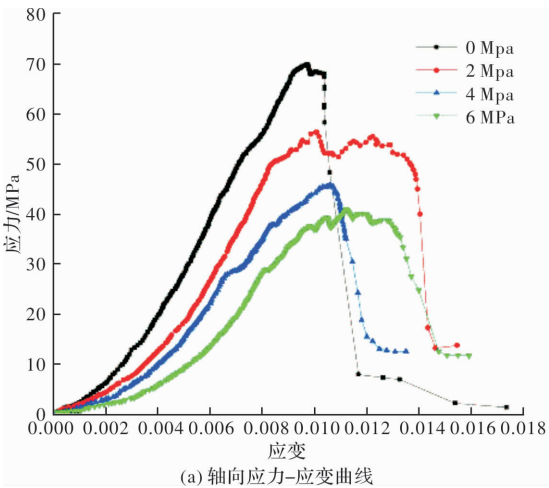
图 3 灰岩试件注水后电镜扫描试验结果

Fig. 3 SEM results of limestone specimen following the water injection

2.2 强度及变形特征

前人的研究<sup>[11-13]</sup>表明，岩石在单轴压缩过程中存在明显的阶段性，其变形过程大概可分为五个阶段：压密阶段、弹性阶段、裂缝稳定扩展阶段、裂缝非稳定扩展阶段和破坏阶段。

图 4 给出了具有代表性的试件 A2、B2、C3 和 D1 单轴压缩全过程的应力-应变曲线，表 2 给出了其特征强度值，分析图 4 和表 2。



(a) 轴向应力-应变曲线

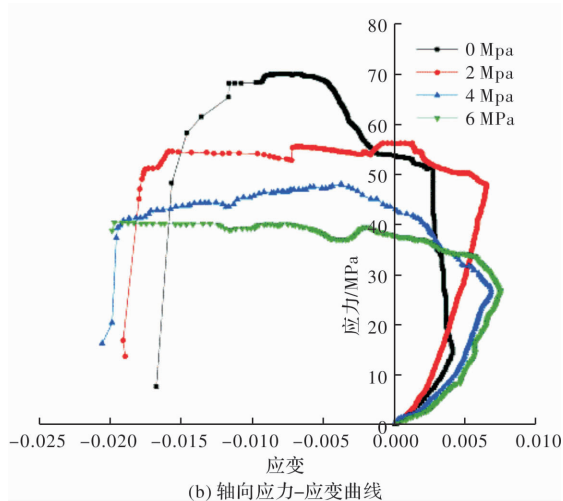


图4 不同渗透压力下灰岩单轴压缩全过程应力与变形曲线

Fig. 4 Stress and deformation curves of limestone under uniaxial compression by different osmotic pressure

表2 灰岩试件的特征应力值

Tab. 2 Typical results of damage thresholds of Limestone specimen

岩石 编号	闭合应力 $\sigma_a$ /MPa	损伤应力 $\sigma_f$ /MPa	峰值应力 $\sigma_c$ /MPa	$(\sigma_a/\sigma_f)$ /%	$(\sigma_a/\sigma_c)$ /%
A2	11.35	51.36	69.79	22.10	16.26
B2	10.51	53.75	55.54	19.55	18.92
C3	9.87	27.82	45.36	35.48	21.76
D1	10.78	29.05	40.19	37.11	26.82

注: 损伤应力为振铃计数突增时对应的应力; 闭合应力为压密阶段结束时对应的应力<sup>[14]</sup>。

压密阶段: 饱水后岩石的内部孔隙直接影响了岩石试件的压密变形量, 随着渗透压力的增加, 岩石孔隙内的渗透水与岩石发生物化反应的活性随之增加, 岩石溶蚀量增加, 内部孔隙增大, 从而导致岩石试件的压密变形量增大。在此阶段内, 虽然 4 MPa 渗透压力下的压密变形小于 2 MPa 渗透压力下的变形(究其原因是饱水后岩石的内部孔隙由岩石饱水前的初始孔隙和饱水对岩石产生的损伤组成, 在渗透压力较小时, 渗透水对灰岩内部产生的损伤影响较小, 因此岩石压密变形量主要由岩石饱水前的初始孔隙控制), 但总体而言, 随着渗透压力的增加岩石的压密阶段变形量呈增长趋势, D1 试件相较于 A2 试件, 其压密变形量增加了一倍以上(见图 4(a)); 与此同时, 各试件的闭合应力基本位于 9.87~11.35 MPa, 这说明不同的渗透压力虽然对灰岩的压密变形量有较大影响, 但对灰岩闭合应力的影响却十分微小。

弹性变形阶段: 在弹性阶段, 无渗透压力和低渗透压力(2 MPa)对饱水灰岩的弹性模量影响很

小, 二者的应力-应变曲线斜率基本一致, 这是由于在灰岩试件饱水时, 已经有部分劣化反应发生, 且较低的渗透压力下, 水-岩物化反应活性较低, 水对岩石劣化程度十分微弱, 因此劣化反应量较无渗透压力时几乎不变。但随着渗透压力的增加, 水-岩物化反应活性大大提高, 水对灰岩的劣化愈发明显, 灰岩的体应变和弹性模量均有较大变化, 由图 4(a)可以看出, 当渗透压力达到 4 MPa 时, 灰岩弹性模量明显降低。

裂缝稳定扩展阶段: 在单轴压缩过程中, 随着轴向应力的增加岩石的体积变形开始由体缩转为体胀, 则说明岩石已经进入了裂缝稳定扩展阶段, 此时岩石内部开始产生裂隙并逐渐扩展。为了避免不同试件自身的初始孔隙对结果的影响, 本文引入闭损比的概念, 即闭合应力与损伤应力之比。由表 2 可知, 随着渗透压力的增加, 试件的闭损比呈增长趋势, 这说明岩石进入裂缝稳定扩展阶段的损伤应力呈下降趋势, 相较于 A2 而言, D1 的闭损比增加了约 67.9%; 与此同时, 由图 4(b)可知, 随着渗透压力的增大, 灰岩的裂缝稳定扩展阶段逐渐缩短, 并很难从应力-应变曲线中分离出来, 当渗透压力达 4 MPa 时, 岩石在弹性阶段完成后, 迅速进入裂缝非稳定扩展阶段, 岩石由体缩变为体胀的过程非常短暂。

裂缝非稳定扩展阶段: 同样, 为了避免试件初始孔隙对试验结果的影响, 本研究再引入闭峰比的概念(岩石的闭合应力与峰值应力之比)。由表 2 可知随着渗透压力的增加, 灰岩的闭峰比也呈上升趋势, 相较于 A2 试件, D1 的闭峰比上升了约 64.9%, 这说明相同的初始孔隙比条件下, 随着渗透压力的增加灰岩的峰值应力呈下降趋势; 由图 4 可知, 灰岩试件单轴压缩条件下的应力-应变曲线均呈波动式上升, 这一现象说明岩石单轴压缩破坏实际上是岩石内部裂纹扩展的结果, 而渗透水压力加速了岩石裂纹扩展, 波动式上升是岩石内部能量累积-释放交替的过程。

### 2.3 声发射特性

试件在进入裂缝非稳定扩展阶段以前振铃计数和能量累积均处于较低水平(称为平静期), 当灰岩试件达到起裂应力时, 岩石 AE 活动愈加频繁, 能量释放量突然上升, 声发射特性进入活跃期。

本研究除了进行灰岩的应力-应变曲线分析, 还对不同渗透压力下灰岩声发射特性进行了分析, 研究发现(见图 5): 相较于高渗透压条件下的声发射特性, 低渗透压作用下的声发射特性更为活跃,



这与应力-应变曲线分析相呼应。由于灰岩试件在饱水过程中受到先期劣化作用导致饱水岩石压缩过程中微裂缝发育更加充分,但渗透水压力较低时,劣化后的灰岩试件对渗透水压力变化的响应不明显;与此同时,较高的渗透水压力对微裂缝尖端处奇异场分布的影响,也会导致岩石储备变形势能的能力降低,从而提前进入裂缝非稳定扩展阶段。

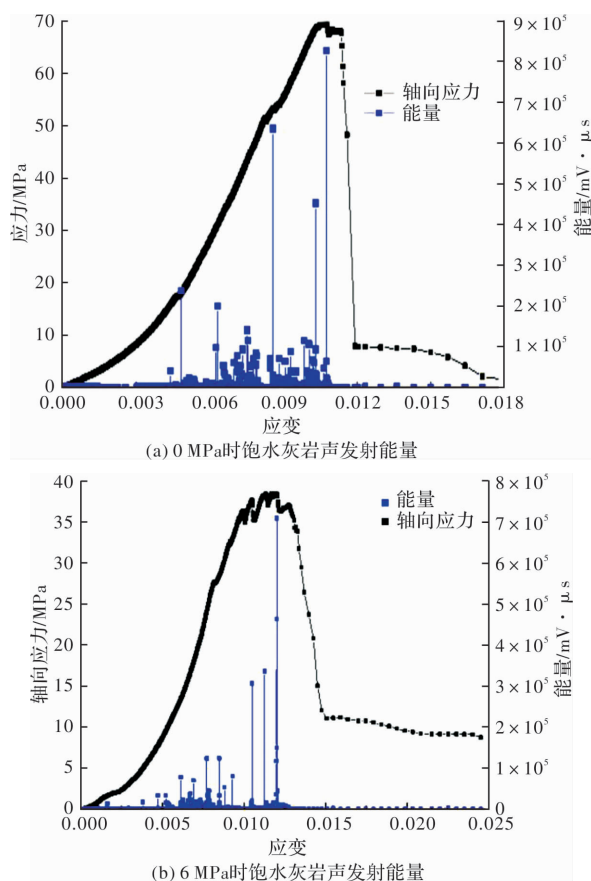


图5 不同试验条件下灰岩试件声发射试验结果

Fig. 5 Acoustic emission test results of limestone under different experimental conditions

综上所述,无论从裂隙变化情况、强度及变形特性还是声发射结果来看,其表现规律都是相同的:随着渗透水压力的增加,水-岩物化反应活性升高,反应速率增大,灰岩试件的劣化情况愈发明显,灰岩强度逐渐降低,6 MPa渗透压力下的峰值应力相较于无渗透水压力下的峰值应力下降了近50%。

### 3 结论

(1)随着渗透压力的增加,灰岩的压密阶段延长,弹性阶段和裂缝稳定扩展阶段明显缩短,当渗透压力达到6 MPa时,弹性阶段和裂缝稳定扩展阶段基本无法分离;

(2)本文建立了闭损比和闭峰比的概念,以减小不同试件初始裂隙对实验结果的影响,研究发现:

随着渗透压力的增加,岩石的闭损比和闭峰比均有较大程度上升,其最大升幅分别达到了67.9%和64.9%;与此同时,岩石的弹性模量和体积模量也随着渗透压力的增加出现了不同程度的降低;

(3)渗透水对灰岩的影响机制主要有两方面:一方面,渗透水通过加大岩石内部的孔隙分布降低岩石颗粒间的结构性,使岩石的材料性能产生劣化;另一方面,渗透压力改变了微裂缝尖端处奇异场的分布,在微裂缝尖端处产生应力集中,导致岩石起裂应力降低。

### 参考文献 References

- [1] 曹文贵,赵明华,刘成学. 岩石损伤统计强度理论研究[J]. 岩土工程学报,2004(6):820-823.  
CAO Wengui, ZHAO Minghua, LIU Chengxue. A study on damage statistical strength theory for rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004 (6):820-823.
- [2] 中国岩石力学与工程学会. 岩石力学与岩石工程学科发展报告[M]. 北京:中国科学技术出版社,2010.  
Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Report on advances in rock mechanics and rock engineering [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [3] ZHU W C, BMHNS O T. Simulating excavation damaged zone around a circular opening under hydromechanical conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5):815-830.
- [4] WANG Ying. Railway tunneling and its environmental effects [A]//Beijing International Symposium on Land Reclamation. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000. 661-665.
- [5] SKEMPTON A W. Effective stress in soils [J]. Concrete and Suction in Soils, 1960, 2(1):4-16.
- [6] 刘新荣,傅晏,郑颖人,等. 水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1):77-82, 88.  
LIU Xinrong, FU Yan, ZHENG Yingren, et al. A review on deterioration of rock caused by water-rock interaction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1):77-82, 88.
- [7] 仵彦卿,曹广祝,丁卫华. 砂岩渗透参数随渗透水压力变化的CT试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7):780-785.  
XU Yanqin, CAO Guangzhu, DING Weihua. CT test of sandstone permeability parameters variation with permeable water pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7):780-785.

(下转第703页)

- 48(08): 163-168.
- [10] 涂立尚. Q460D 钢母材及 ER55-G 型焊材微观断裂模型参数影响因素研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- TU L S, Research on influence factors of micromechanical fracture model parameters of Q460D steel base metal and ER55-G welding material[D]. Xi'an Chang'an University, 2018.
- [11] CHU C C, NEEDLEMAN A. Void nucleations effects in biaxially stretched sheets [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1980, 102(3): 249-256.
- [12] CORIGLIANO A, MARIANI S, ORSATTI B. Identification of gurson tvergaard material model parameters via kalman filtering technique. I. Theory [J]. International Journal of Fracture, 2000, 104 (4): 349-373.
- [13] 邢佑慧, 史一剑, 刘文涛, 等. 建筑钢材 GTN 损伤模型参数识别 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (4): 149-154.
- XING J H, SHI Y J, LIU W T, et al. Identification of GTN micromechanical damage parameters of structural steel[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 149-154.
- [14] SUN D Z, KIENZLER R, VOSS B, et al. Application of micromechanical models to the prediction of ductile fracture [C]//Fracture Mechanics 22nd Symposium. Philadelphia: ASTM, 1992, II: 368-378.
- [15] GAO X S, KIM J. Modeling of ductile fracture; Significance of void coalescence [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43 (20): 6277-6293.
- [16] ZHANG Z L, HAUGE M. On the gurson micromechanical parameters [J]. Fatigue and Fracture Mechanics, 1999, 29: 364-383.
- [17] BROWN L M, EMBURY J D. The initiation and growth of voids at second phase particles [C] // Proceedings of the third international conference of the strength of metals and alloys. Cambridge: ICSMA, 1973: 164-169.
- [18] WEST O, LIAN J H. Numerical determination of the damage parameters of a dual-phase sheet steel [J]. ISIJ International, 2012, 52(4): 743-752.

(编辑 沈 波)

(上接第 653 页)

- [8] TSUYOSHI I. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15: 283-295.
- [9] 邢福东, 朱珍德, 刘汉龙, 等. 高围压高压作用下脆性岩石强度变形特性试验研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 184-187.
- XING Fudong, ZHU Zhende, LIU Hanlong, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of brittle rocks under high confining pressure and hydraulic pressure [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2004, 32(2): 184-187.
- [10] 宋勇军, 雷胜友. 干燥和饱水炭质板岩流变力学特性与模型研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(1): 95-100.
- SONG Yongjun, LEI Shengyou. Study on rheological mechanical properties and model of carbonaceous slates under dry and saturated states [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Sciences), 2016, 48(1): 95-100.
- [11] CAI M, KAISERA P K, TASAKAB Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(5): 833-847.
- [12] LAN H, X, MARTIN C, D, HU B. Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(B1): 1-14.
- [13] 刘泉声, 胡云华, 刘滨. 基于试验的花岗岩渐进破坏本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 289-296.
- LIU Quansheng, HU Yunhua, LIU Bin. Progressive damage constitutive models of granite based on experimental results [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 30(2): 289-296.
- [14] 彭俊, 蔡明, 荣冠. 裂纹闭合应力及其岩石微裂纹损伤评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (6): 1091-1100.
- PENG Jun, CAI Ming, RONG Guan. Stresses for crack closure and it application to assessing stress-induced micro-crack damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (6): 1091-1100.

(编辑 沈 波)