

煤系泥岩典型应力阶段遇水强度弱化与 渗透性实验研究

许兴亮^{1,2}, 张 农^{1,2}, 李玉寿³

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 采用 MTS815.02S 型电液伺服岩石力学实验系统, 研究水岩相互作用条件下, 煤系泥岩典型应力阶段岩体渗透性变化与遇水后强度弱化规律, 并用原位窥视仪实验验证主要结论。研究表明: 峰值强度前不同应力阶段遇水弱化程度差异不大, 遇水后峰值强度平均降低了 14.5%; 残余强度阶段遇水对岩块稳定残余强度的弱化最高, 达到 50%左右, 其次是塑性阶段与弹性阶段, 在应变软化阶段由于泥质岩体渗流通道的自封闭作用, 该阶段遇水对残余强度弱化程度最小; 在破坏前的弹性变形乃至屈服阶段, 渗透性较弱且随变形增加变化不明显; 受载至应变软化阶段, 渗透性增强并在残余强度阶段达到渗透峰值, 在塑性压密变形阶段没有明显的降低, 随变形扩展而逐步趋于稳定。

关键词: 岩石力学; 煤系泥岩; 典型应力阶段; 强度弱化; 渗透性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 3089 - 06

EXPERIMENTAL STUDY OF PERMEABILITY AND STRENGTH WEAKENING OF MUDSTONE CONSIDERING EFFECT OF WATER UNDER TYPICAL STRESS STAGES

XU Xingliang^{1, 2}, ZHANG Nong^{1, 2}, LI Yushou³

(1. School of Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 3. School of Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: In consideration of water-rock interaction, strength weakening and permeability of the mudstone under different typical stress stages are studied by MTS815.02S servo-controlled rock mechanical test system. Main conclusions are verified by in-situ test using electrical camera. It shows that water-weakened action of specimen is not notable before the peak strength, and the peak strength decreases by 14.5% after affected by water; the water-weakened action is the highest in residual strength stage, steady peak strength decreases about 50%; water-weakened action in plastic stage and elastic stage are in the second place because of self-sealing action of fissures by water argillization action, and the water-weakened action is minimum in the strain softening stage.

收稿日期: 2007 - 11 - 12; **修回日期:** 2008 - 01 - 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674085); 国家重点基础研究发展计划(973)计划资助项目(2007CB209408); 2006 年教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET - 06 - 0478)

作者简介: 许兴亮(1976 -), 男, 博士, 1999 年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事巷道围岩控制, 岩石力学实验研究方面的研究工作。E-mail: xusmf@163.com

With the increasing of deformation, permeability variation of specimen is not notable and maintains lower value in the elastic and yield stage. Permeability coefficient begins to increase in the later strain-softening stage and reaches to the peak value in the residual strength stage, and then tends to steady in the plastic compaction stage.

Key words: rock mechanics; mudstone; typical stress stages; strength weakening; permeability

1 引言

在煤矿地下工程中,受原岩应力场与工程扰动二次应力场的叠加作用,沿巷道断面径向不同空间位置的围岩,分别处于应力应变过程中的不同应力阶段,不同应力状态岩体的裂隙发育和贯通情况不同,这决定了岩体渗透性的变化及其遇水弱化程度。本文设计了煤系泥岩典型应力阶段的强度弱化与渗透性实验,通过实验所获得的应力-应变关系和应变-渗透性关系对比曲线,直观地研究分析岩石的渗透性变化和水的弱化效应。

国内外很多学者对应力场与渗透场的耦合进行了有益的探索。S. P. Li 等^[1, 2]最早采用伺服渗透实验研究了岩石的应力场-渗流场耦合关系,并拟合出岩石全应力应变过程中的渗透率-应变方程。作彦卿等^[3~5]集中总结了花岗岩、砂岩等脆性岩石在峰值强度前弹塑性阶段岩体中应力与渗流之间的关系,提出了裂隙岩体应力场与渗流场耦合模型。随后彭苏萍等^[6~10]对不同岩性岩石的应变-渗透率关系进行了研究,阐述了不同岩性岩石在变形破坏过程中渗透性变化的规律,概化出岩石的一般应变-渗透曲线。朱珍德等^[11]进行了不同围压条件下全应力-应变过程渗流试验,孔亮和王媛^[12]从剪切荷载的角度研究了对裂隙渗透性影响。缪协兴等^[13~16]对破碎后的块状岩体中渗流问题进行了研究。以上研究成果,多以花岗岩砂岩等脆性岩石为研究对象,无法考虑渗流过程中发生水岩相互作用而引起的渗流通道的泥化效应对渗流的影响;研究成果大多集中于峰值强度前弹塑性阶段,无法为煤矿巷道围岩受动压影响而多处于岩石变形破坏的残余强度阶段的岩体提供指导,也很少涉及岩石的渗透特性变化导致的承载性能劣化。

本文采用 MTS815.02S 型电液伺服岩石力学实验系统,同时进行三向压缩、孔隙水压及水渗透,既可研究全应力应变过程渗透性变化规律又可得到不同遇水时机岩石的强度弱化规律。

2 典型应力阶段遇水强度弱化与渗透性实验

实验方案:先由泥岩试块无水影响的实验得到全应力-应变曲线;再选取该曲线上几个典型应力点,包括弹性阶段、塑性屈服阶段、峰后应变软化阶段、残余应力阶段等,导入裂隙水分别进行实验,其目的在于研究泥岩不同应力应变阶段遇水后强度弱化规律及其变形过程中渗透性变化。

2.1 试块岩性

采用岩石组份衍射实验与透射电镜微结构实验对试块进行了鉴定实验,结果见图 1。

由图 1 可见,实验样品中多数晶粒具有高岭石晶粒特征,晶粒结晶较好,粒径变化较大,晶粒边界清晰,厚度均匀,基本可见 3~5 个 120°的角(见图 1(b), (c));样品中一定量具淡化边的絮状颗粒,厚度渐变,部分呈现淡化边及具卷沿特征,应为伊蒙混层或蒙脱石晶粒(见图 1(c)),根据 X-射线衍射实验和透射电镜微(TEM)实验,可见实验岩块主要由高岭石及中等含量的伊利石和伊蒙混层等黏土矿物组成,岩块为典型煤系沉积泥岩。

2.2 泥岩遇水弱化及渗透性实验原理

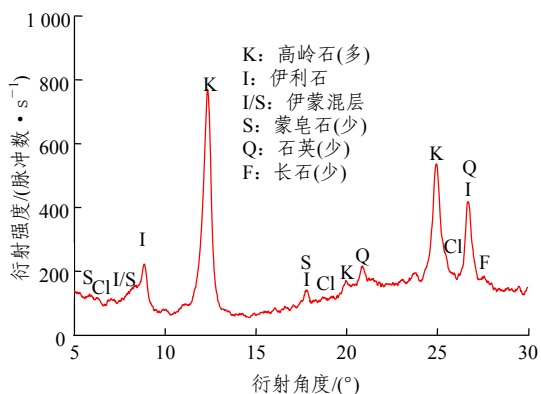
对于低渗透率岩样,由于岩石的渗流速度太小以致不能测量,因此采用瞬态法测定岩石的渗透特性,即测定一定时间内孔隙压力梯度的变化,基于压力梯度及其变化率的散点图拟合曲线得到岩石的渗透特性。实验中计算机自动采集数据,其渗透率可以按下式计算:

$$k = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A m \ln \left[\frac{\Delta p_w(i-1)}{\Delta p_w(i)} \right] \quad (1)$$

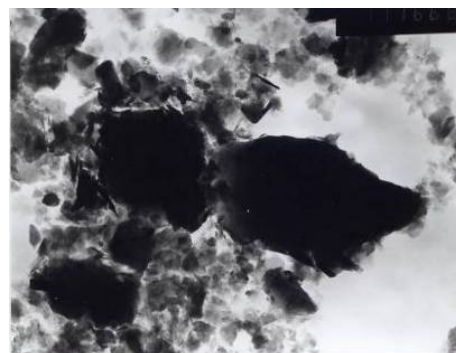
式中: A 为数据采集行数, m 为实验参数($m = 5.26 \times 10^{-4}$), $\Delta p_w(i-1)$ 和 $\Delta p_w(i)$ 分别为第 $i-1$ 行和 i 行的渗透压差值, k 为渗透率。

2.3 实验过程

选取新鲜岩块密封后在实验室加工成标准试块。为使实验结果具有可比性,该实验的试块取自



(a) 试块 X - 射线衍射图谱



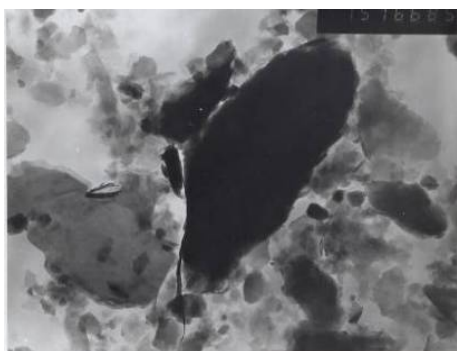
(d) $\times 1.2 \times 10^4$ (编号 16686)

图 1 试块岩性鉴定结果

Fig.1 Photographs of identifying samples component



(b) $\times 1.2 \times 10^4$ (编号 16683)



(c) $\times 1.2 \times 10^4$ (编号 16685)

同一块岩石加工而成, 在实验过程中证实了该取样方法具有很好的一致性。设定各试块初始实验控制参数: 围压为 5.0 MPa, 孔隙水压为 3.0 MPa, 起始渗透压差为 1.0 MPa。

峰值前的变形阶段, 采用应力控制, 达到设定应力值后, 加入孔隙水, 利用孔隙压力系统在岩样两端施加水压 $P_1 = P_2$, 保持一段时间观察岩样遇水变形特征, 然后降低一端的孔隙压力, 使岩样两端形成孔隙压差 Δp , 并采集孔隙压差随时间的变化和变形参数。在峰值后变形阶段, 采用位移控制, 当加载至设定应力阶段, 分析岩样遇水后弱化效应。通过实验得到结果见表 1。

3 实验结果分析

3.1 典型应力阶段遇水强度弱化规律分析

(1) 试块峰值强度的弱化

表 1 不同应力阶段遇水强度弱化效应与渗透率变化

Table 1 Strength attenuation and permeability changing by water weakening under different stress stapes

编号	尺寸/mm		围压 /MPa	孔隙水压 /MPa	渗透压差 /MPa	遇水弱化 应力阶段	未遇水峰 值强度 /MPa	遇水峰 值强度 /MPa	峰值强度 弱化 程度	未遇水残 余强度 /MPa	遇水残 余强度 /MPa	残余强 度弱化 程度	渗透率 $/(10^{-6} \mu\text{m}^2)$
	直径 D	高度 H											
HB10-3	50.07	95.26	5	-	-	无水的影响	81.63	-	-	35.78	-	-	-
HB10-5	49.99	93.44	5	3	1	弹性阶段 22.93 MPa	82.93 [#]	71.73	0.135	35.20 [#]	32.09	0.088	0.057 920
HB10-4	49.97	94.10	5	3	1	塑性屈服阶段 45.92 MPa	82.93 [#]	70.15	0.154	35.20 [#]	26.43	0.249	0.072 446
HB10-1	49.55	95.00	5	3	1	应变软化阶段 72.80 MPa	85.56	-	-	35.20	35.00	0.006	0.130 556
HB10-2	50.13	94.16	5	3	1	残余强度阶段 32.30 MPa	81.60	-	-	32.30	17.31	0.465	1.436 000
HB10-6*	50.02	62.96	5	3	1	残余强度阶段 37.54 MPa	62.50	-	-	37.54	20.09	0.465	1.597 708

注: “*” 表示该试块有缺陷; “#” 表示该数据是通过计算求得平均值。

各试块遇水后的峰值强度与未受水影响的峰值强度的比值反映了水对峰值强度的影响，HB10 - 4，HB10 - 5 试块分别于峰值前塑性阶段与弹性阶段遇水，试块的峰值强度由未受水影响的 82.93 MPa，分别降低至 70.15，71.73 MPa，遇水后峰值强度平均下降了 14.5%，可见峰值强度前不同应力阶段遇水对试块的弱化程度并无太大差异。

(2) 试块稳定残余强度的弱化

HB10 - 2，HB10 - 6 试块峰后残余强度阶段遇水其稳定残余强度分别下降了 46.4%，46.5%；HB10 - 5 试块弹性阶段遇水，稳定残余强度下降了 8.8%；HB10 - 4 试块塑性阶段遇水，稳定残余强度下降了 24.91%；HB10 - 1 试块应变软化阶段遇水，稳定残余强度降低 0.6%。可见，不同应力阶段遇水岩块的弱化程度不同，以残余强度阶段遇水对岩块稳定残余强度的弱化程度最高，其次是塑性阶段与弹性阶段，应变软化阶段遇水对残余强度弱化程度最小。

强度弱化程度并不随渗透率的增加而加大，还与岩性、遇水时机等其他因素有关。在应变软化阶段由于裂隙水浸入，使得脆性裂隙的发展与贯通受到抑制，导致裂隙面泥化，产生自封闭作用(见图 2)，从而减少了对稳定残余强度的弱化程度。这也证实了在岩块受载破坏过程中渗透性并不能无限增加的现象。

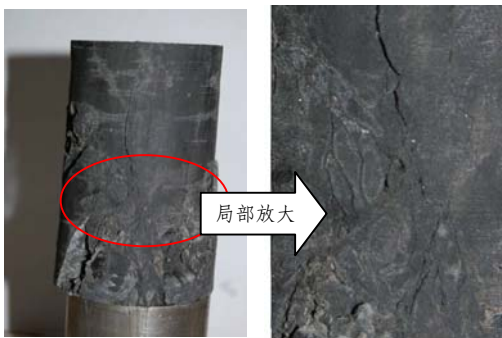


图 2 1#试块裂隙贯通情况与局部放大
Fig.2 Fissures connectivity and selective enlargement of specimen #1

(3) 工程意义

峰值强度前(包括弹性阶段和塑性阶段)遇水，使得试块峰值强度平均下降了 14.5%(见图 3)。根据巷道围岩的三区划分，岩体遇水后峰值强度的降低必然会降低塑性极限平衡区的承载强度，巷道开挖

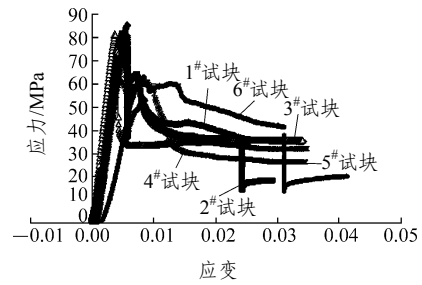


图 3 各试块典型应力阶段遇水弱化全应力 - 应变曲线
Fig.3 Complete stress-strain curves of specimens by water weakening under different typical stress stages

引起的向围岩中转移一定量的应力，必然导致更大范围内的围岩进入塑性极限平衡区，表现为塑性区扩大，即有水弱化的围岩塑性区的半径较大。根据桃园矿现场的观测证实塑性区半径可以扩大到 1.2~2.0 倍。在进入残余强度前(包括弹性阶段、塑性阶段、应变软化阶段)遇水，从图 3 岩块遇水弱化全应力 - 应变曲线可以看出，在该曲线上峰后塑性变形区间变宽，即峰后塑性变形能力加强，表现为由脆性突然破坏向塑性延性破坏转变。巷道围岩表现为相对无水影响的巷道高阻大变形，即由于水的加入使得变形调整时间加长，保持较高塑性变形阻力，持续大变形。这种变化趋势也可以从巷道锚杆受力反映出来，无水影响的巷道锚杆受力很快达到恒定，受水影响的巷道锚杆受力变化时间长，有的还有二次增阻现象。残余强度期间遇水大大降低了破碎岩体的稳定残余强度，强度降低达 50%左右，这也使处于平衡状态的破碎区围岩承载能力大幅降低，如果没有有效的控制措施，将会导致围岩失稳。

3.2 全应力 - 应变过程中渗透性规律分析

岩石的渗透率伴随着变形破坏发生了巨大变化，研究岩石全应力 - 应变过程中裂隙发育而引起的渗透率变化规律对掌握水对泥质软岩变形过程的影响有着重要的作用。本次实验所用试样均无肉眼可见的天然微裂隙，渗透性初始值均极其微弱，可以认为渗透性的变化源于受载后岩块裂隙的发育和贯通。

根据实验中各试块不同应力阶段渗透系数及其对应的应变值得到图 4 所示的渗透曲线，在破坏前的弹性阶段乃至屈服阶段，渗透性较弱且随变形的变化不明显；岩样受载至应变软化段，渗透性快速增强并在残余强度阶段达到渗透峰值，且在塑性压

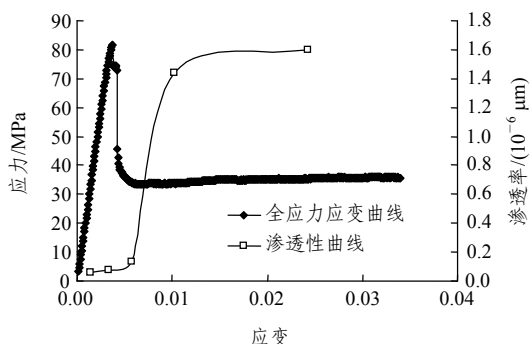
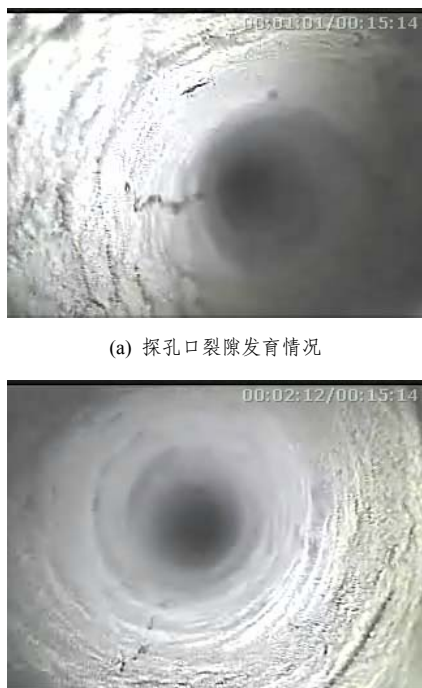


图 4 岩石全应力 - 应变过程的渗透曲线
Fig.4 Curves of rock permeability under complete stress-strain course

密变形阶段没有明显的降低, 随变形扩展而逐步趋于稳定。可见, 在峰值前应力对裂隙的作用主要表现为压效应时, 渗透性随应力的变化并不明显, 当应力对裂隙作用主要表现为拉张效应情况下, 渗透性随应力增大而增强。

4 原位窥视仪研究围岩裂隙发育

为了分析巷道围岩不同深度裂隙发育规律进而研究分析渗透性规律, 采用地质钻孔窥视仪成像方法对岩体的裂隙发育情况进行研究。沿巷道围岩径向裂隙发育情况的典型窥视仪图片(见图 5)可见, 在



(a) 探孔口裂隙发育情况

(b) 探孔内 650 mm 裂隙发育情况

图 5 探孔内裂隙发育情况

Fig.5 Inner cracks development of exploration holes

巷道开掘后 3~4 h, 迎头岩层就已经有裂隙扩展发育。肉眼可见裂隙(张开度大于 0.1 mm)集中于浅层 0.8~1.5 m 范围以内, 而且开巷初期裂隙面清晰, 裂隙面未破碎, 裂隙规模既有大有小。

对岩体裂隙的主要几何参数张开度进行统计整理见图 6。

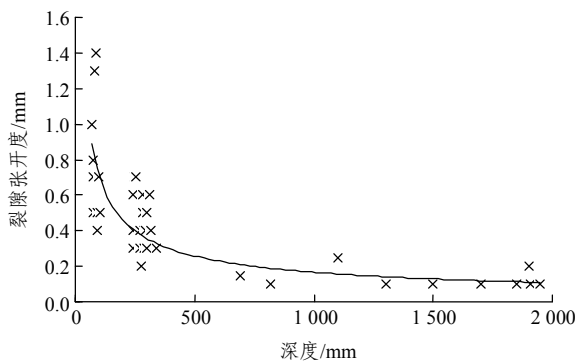


图 6 裂隙张开度随径向深度的变化
Fig.6 Variation of cracks gap width with increase of radial depth

经过拟合得到裂隙张开度和径向深度的关系为

$$y = 12.824x^{-0.629} \tag{2}$$

式中: y 为裂隙张开度, x 为巷道围岩径向深度。

根据统计(见图 6)裂隙张开度由浅至深成幂指数关系逐渐变小。在巷道围岩探孔内平行于层面方向的裂隙数量占优, 达 69%, 垂直于岩层方向的裂隙仅占 31%, 如果仅从裂隙张开度的角度去分析围岩渗透性可见轴向的渗透性要大于径向; 在大于 1.5 m 以外偶有可见裂隙发育, 裂隙张开度大于 0.3 mm 的大裂隙更多集中在 0.4 m 内, 以张裂隙为主。裂隙迹长明显地由浅入深逐渐降低, 迹长大、连通性好、规模较大的裂隙主要集中在浅层围岩中(沿巷道径向深度小于 0.5 m)。从统计结果可见裂隙张开度的变化也反映了岩体的渗透性随岩体破坏其渗透性逐渐增加的趋势。

5 结 论

(1) 泥岩遇水强度弱化规律: 峰值强度前(包括弹性阶段和塑性变形阶段)遇水, 使得峰值强度弱化程度平均下降 14.5%; 水对稳定残余强度的弱化明显不同, 残余强度阶段遇水, 稳定残余强度降低最大, 应变软化阶段降低最小; 强度弱化程度并不随

渗透率的增加而加大,与岩性等其他因素有关。

工程意义:峰后阶段遇水使得岩体塑性变形能力加强,表现为由脆性突然破坏向塑性延性破坏转变,相对无水影响的巷道围岩表现为长期高阻大变形。残余强度阶段遇水降低了极限平衡状态岩体的稳定残余强度,围岩承载能力大幅降低,如果没有有效的控制措施,将会导致围岩失稳。

(2)泥岩遇水后受载过程的渗透性规律:破坏前的弹性变形乃至屈服阶段,渗透性较弱且随变形的变化不明显;受载至应变软化阶段,渗透性增强并在残余强度阶段达到渗透峰值,在塑性压密变形阶段受裂隙面自封闭作用影响渗透率有所降低,但最后随变形扩展而逐步趋于稳定。

工程意义:由于残余强度阶段渗透能力最强,而且在该阶段遇水弱化程度最大,因此在巷道围岩控制工程中,必须阻止残余强度阶段遇水。

参考文献(References):

- [1] LI S P, LI Y H, LI Y, et al. Permeability-strain equations corresponding to the complete stress-strain path of Yin Zhuang sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts, 1994, 31(4): 383 - 391.
- [2] 李世平,李玉寿,吴振业.岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J].岩土工程学报,1995,17(2):13-19.(LI Shiping, LI Yushou, WU Zhenye. The permeability-strain equations relating to complete stress-strain path of the rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 13 - 19.(in Chinese))
- [3] 仵彦卿.裂隙岩体应力与渗流关系研究[J].水文地质工程地质,1995,(6):30-35.(WU Yanqing. Study on relationship between stress and seepage of cracked rocks[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1995, (6): 30 - 35.(in Chinese))
- [4] 周创兵,熊文林.地应力对裂隙岩体渗透特性的影响[J].地震学报,1997,19(2):154-163.(ZHOU Chuangbing, XIONG Wenlin. Influence of stress on permeability of cracked rocks[J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(2): 154 - 163.(in Chinese))
- [5] 姜振泉,季梁军,左如松,等.岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1442-1446.(JIANG Zhenquan, JI Liangjun, ZUO Rusong, et al. Correlativity among rock permeability and strain stress under servo-control condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1442 - 1446.(in Chinese))
- [6] 彭苏萍,屈洪亮,罗立平,等.沉积岩石全应力应变过程的渗透性试验研究[J].煤炭学报,2000,25(2):113-116.(PENG Suping, QU Hongliang, LUO Liping, et al. An experimental study on the penetrability of sedimentary rock during the complete stress strain path[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 113 - 116.(in Chinese))
- [7] 彭苏萍,孟召平,王虎,等.不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):742-746.(PENG Suping, MENG Zhaoping, WANG Hu, et al. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 742 - 746.(in Chinese))
- [8] 郑纲.岩体裂隙三轴应力渗透规律的试验研究[J].工程地质学报,2007,35(1):42-46.(ZHENG Gang. Experimental study on the permeability regularities of rock cracks under triaxial compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 35(1): 42 - 46.(in Chinese))
- [9] 杨天鸿,赵兴东,冷雪峰,等.地下开挖引起围岩破坏及其渗透性演化过程仿真[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增1):2386-2389.(YANG Tianhong, ZHAO Xingdong, LENG Xuefeng, et al. Numerical simulation on failure process of over burden rock strata and permeability evolution caused by mining excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2386 - 2389.(in Chinese))
- [10] 杨永杰,宋扬,陈绍杰.煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究[J].岩土力学,2007,28(2):381-385.(YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 381 - 385.(in Chinese))
- [11] 朱珍德,张爱军,徐卫亚.脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J].岩土力学,2002,23(5):555-563.(ZHU Zhende, ZHANG Aijun, XU Weiya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 555 - 563.(in Chinese))
- [12] 孔亮,王媛.剪切荷载对裂隙渗透性影响研究现状[J].河海大学学报,2007,35(1):42-46.(KONG Liang, WANG Yuan. Influence of shear loads on fissure permeability[J]. Journal of Hohai University, 2007, 35(1): 42 - 46.(in Chinese))
- [13] 缪协兴,刘卫群,陈占清.采动岩体渗流理论[M].北京:科学出版社,2004.(MIAO Xiexing, LIU Weiqun, CHEN Zhanqing. Seepage theory of mining rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [14] 刘卫群,缪协兴,陈占清.破碎岩石渗透性的试验测定方法[J].实验力学,2003,18(1):56-61.(LIU Weiqun, MIAO Xiexing, CHEN Zhanqing. A testing method for determining the permeability of over broken rock[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(1): 56 - 61.(in Chinese))
- [15] 程宜康,陈占清,缪协兴,等.峰后砂岩非Darcy流渗透特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12):2005-2009.(CHENG Yikang, CHEN Zhanqing, MIAO Xiexing, et al. Testing study on permeability of non-darcy flow in post-peak sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2005 - 2009.(in Chinese))
- [16] 李小琴,李文平,李洪亮.砂岩峰后卸除围压过程的渗透性试验研究[J].工程地质学报,2005,13(4):481-484.(LI Xiaoqin, LI Wenping, LI Hongliang. Experimental study on permeability of sand stone during post-peak unloading of the confining pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 481 - 484.(in Chinese))