

文章编号:0253-9993(2012)S1-0075-06

# 泥岩孔裂隙分布特征及其对吸水性的影响

柴肇云<sup>1,2</sup>, 郭卫卫<sup>1</sup>, 陈维毅<sup>2</sup>, 康天合<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 应用力学与生物医学工程研究所, 山西 太原 030024)

**摘要:**基于泥岩样品的扫描电镜测试和液氮等温吸附试验,系统研究煤系泥岩的显微孔裂隙形态特征和分布规律,进而探讨孔裂隙分布特征对其吸水软化崩解性的影响规律。主要研究成果为:①泥岩孔裂隙类型有粒间孔、层间孔、粒缘收缩孔、气胀孔、溶蚀孔、矿物铸模孔及裂隙等;②孔裂隙的发育程度及相互间的连通性差,自然状态下,多以隐裂隙的形式存在,肉眼很难辨别;③孔裂隙以所含黏土矿物微集聚体间孔隙和构成泥岩骨架的大颗粒间孔隙为主,其中构成泥岩骨架的大颗粒间孔隙体积占泥岩总体积的20%以上;④泥岩吸水软化崩解是在宏观结构破坏或扰动的基础上,由微孔裂隙吸附效应引起的,受其物质组成不同的影响,自然吸水率和软化崩解机理存在明显差异。

**关键词:**泥岩;孔裂隙结构;氮气等温吸附;微孔裂隙吸附效应;软化崩解

**中图分类号:**TD313 **文献标志码:**A

## Distribution characteristics of mudstone pore-fracture and its influence on absorption

CHAI Zhao-yun<sup>1,2</sup>, GUO Wei-wei<sup>1</sup>, CHEN Wei-yi<sup>2</sup>, KANG Tian-he<sup>1</sup>

(1. Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Based on scanning electronic microscope (SEM) analysis and isothermal adsorption of low temperature nitrogen experimentation of mudstone samples, microstructure morphological characteristics and distribution laws of pore-fracture of coal measures mudstone were studied systematically, and the influence of distribution characteristics of mudstone pore-fracture on absorption softening disintegration was researched. The research results are as follows: ① Pore-fracture types of mudstone include inter-granular pores, inter-stratum pores, granular edge shrink pores, blowholes, corrosion pores, mineral casting pores and fractures etc. ② Degree of development and inter connectivity of pore-fracture of mudstone is poor, and it occurs in implicit fracture form in the natural state. ③ The pore-fracture of mudstone is dominated by clay mineral inter conglomeration pores and inter large granules that compose the mudstone skeleton pores, and inter large granules pores accounts for a little more than 20% of total pores volume. ④ The absorption softening disintegration of mudstone is caused by adsorption effect of micropore-fractures on the basis of macrostructure damage and disturbed, the natural absorption and soften disintegration mechanism difference obviously differ in composition of substance.

**Key words:** mudstone; pore structure; adsorption isotherm of nitrogen; adsorption effect of micropore-fracture; softening disintegration

煤炭开采环境大多为沉积岩,在煤系地层沉积岩中,泥岩是一种主要构成岩层,包括炭质泥岩、砂质泥

收稿日期:2011-08-16 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51004075);中国博士后科学基金项目(20110491631);山西省青年科技研究基金项目(2011021024-2)

作者简介:柴肇云(1978—),男,山西晋城人,副教授。E-mail:chaizhaoyun\_2002@163.com

岩和页岩等软弱岩体<sup>[1]</sup>。这类岩体对湿度、温度、应力和地下水等环境因素极为敏感。特别是湿度条件变化时,泥岩的性质与状态会发生很大的变化,产生体积膨胀,强度降低,进而引发工程稳定性控制问题。

有关泥岩,在以往的文献中,大多偏重于对其中的矿物组分或者黏土矿物的结构<sup>[2-3]</sup>、含水岩石力学特性<sup>[4-7]</sup>、水对岩石动力学特性的影响<sup>[8]</sup>、水-岩化学作用的力学效应<sup>[9-11]</sup>、吸水膨胀变形及变形时效特性<sup>[12-13]</sup>、岩石遇水后的微观结构特性与软化机制<sup>[14-16]</sup>、吸水崩解特性以及胀缩机理<sup>[17-18]</sup>等方面进行研究,对于泥岩的重要属性,孔裂隙结构涉及较少,而孔裂隙又是泥岩中各类流体储集运移的场所,它们的结构特征和连通程度,对泥岩的渗透性、强度特征、吸水膨胀以及软化崩解等物性起着重要作用,进一步研究其孔裂隙结构特征的重要性是显而易见的。

为此,本文以较大量的扫描电镜观察结果为依据,系统研究了泥岩的显微孔裂隙形态特征,分析探讨其成因,并结合矿物组成、液氮等温吸附测试结果分析其孔裂隙分布规律,进而研究泥岩孔裂隙与其吸水性之间的相关规律。

## 1 显微孔隙形态特征

孔隙结构是泥岩的孔裂隙大小、形态、发育程度及其相互结合关系,反映泥岩对各类流体的储运能力。泥岩的孔隙有原生孔隙、次生孔隙和裂隙。原生孔隙主要为粒间压实残余孔隙和基质内微孔隙,而矿物解理缝和纹理及层理缝基本被后期胶结物充填,从而丧失了作为储集空间和流体运移通道的能力。次生孔隙的形成因素很多,包括大气降水、地表淋滤水的淋滤作用,有机质成熟演化中产生的有机酸的溶蚀作用,黏土矿物转化产生酸性水的溶蚀作用等,类型包括粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔隙、超大孔、胶结物内孔隙和基质内微孔隙等。

泥岩的孔隙以平面方向延展的黏土碎屑颗粒矿物粒间孔(图 1(a))、层间孔(图 1(b))、粒缘收缩孔(图 1(c))及裂隙(图 1(d))为主。近于三维方向的孔隙多见于气胀孔(图 1(e))、溶蚀孔(图 1(f))、矿物铸模孔(图 1(g))、碎屑矿物颗粒和胶结物相继被溶蚀形成的超大孔(图 1(h))以及碎屑矿物和砂粒局部集聚时所形成的粒间孔(图 1(i)和 1(j))。

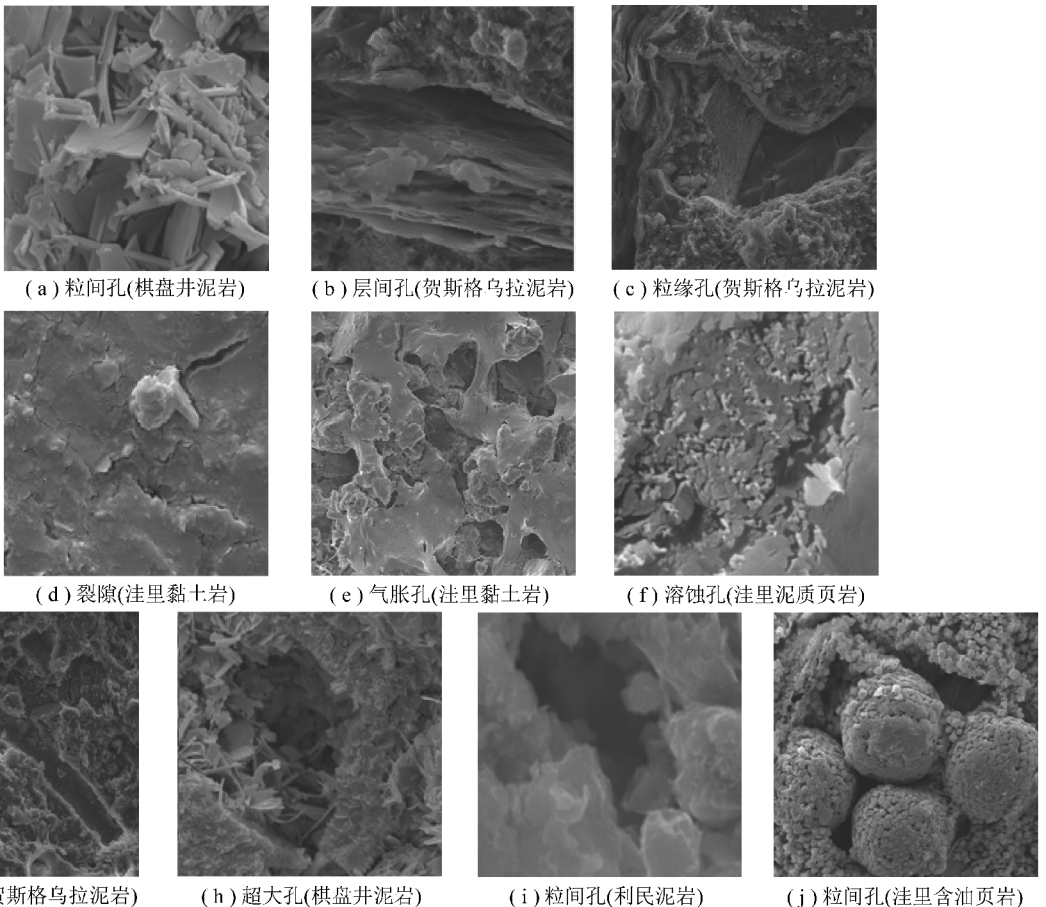


图 1 泥岩显微孔隙形态特征

Fig. 1 Microstructure morphological characters of mudstone

在压实作用不强的泥岩中,黏土矿物杂乱堆积,片间孔形态多种多样,缺少定向性。经压实后的泥岩,随着黏土矿物的定向排列,片间孔也趋于定向化,形成各种片状构造和面状孔隙,逐步发展成为平行层理的面状孔隙。

包裹砂粒的黏土碎屑颗粒在压实作用中,由于砂粒的支撑作用,黏土颗粒定向排列形成波纹状构造(图2)和波纹状裂隙,此种裂隙一般平行层理发育。此外,由于黏土和砂粒受挤压程度不同,黏土因脱水重结晶而体积收缩,形成粒缘收缩孔隙,在断面上多呈环形,有时呈弧形,围绕砂粒分布,通常为孤立孔隙,连通性较差。

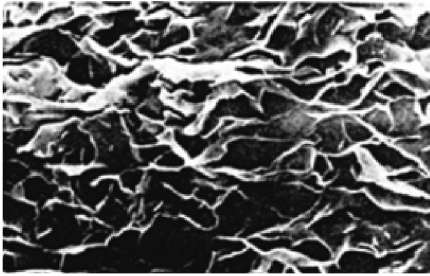


图2 黏土颗粒定向排列形成波纹状构造

Fig. 2 Ripple structure formed by clay particles orientation  
泥岩中裂隙主要有两种类型:一种是构造裂隙,

多呈网格状、雁行状分布,缝隙较平直,延伸较远;另一种是成岩裂隙,多呈纺锤状、放射状分布,一般延伸不远,有时可与层面裂隙相连,多数情况下连通性较差。泥岩中的裂隙在自然状态下,多以隐裂隙的形式存在,肉眼很难辨别,但是如果将磨光的岩样表面浸水,擦干表面水分后,很容易就可看到各种形状印有水痕的裂隙网络(图3)。

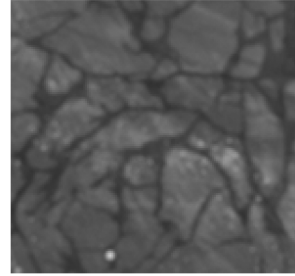


图3 泥岩裂隙网络

Fig. 3 Fracture network of mudstone

## 2 氮气等温吸附试验

### 2.1 试验岩样

试验岩样分别采自屯兰、李雅庄、五虎山、利民、棋盘井、贺斯格乌拉、昭通、洼里等8个典型软岩矿区,对试样进行X射线衍射分析,测试结果见表1。

表1 试验岩样的矿物组成

Table 1 Mineral composition of test samples

取样地点	石英	高岭石	伊利石	蒙脱石	绿泥石	黄铁矿	斜长石	其他矿物	%
屯 兰	35	40	25						
李雅庄	35	40	15			5			
五虎山	30	40	20			5		5	
利 民	30	40	5			20			
棋盘井	30		10		20		20		
贺斯格	20	20	5				10	45	
昭 通	60	20	10			5		5	
洼 里	40		10	20	10		10	10	

### 2.2 试验设备与方法

试验在美国 Micromeritics 公司生产的 Tristar 3000 型全自动物理吸附仪上进行,采用静态定容测试法,在液氮饱和和温度(200 K)下测试了8种泥岩样品对氮气的吸附性能,并以此为依据运用 BJH 法表征各个样品的孔隙结构及主要微结构特征参数,应用密度函数理论(DFT)对样品进行全孔分布计算,样品的比表面积用标准 BET 法和 BJH 法计算。

### 2.3 试验结果

表2为岩样比表面积、孔径和孔容的测定结果。由表可知,泥岩中孔裂隙发育程度及其相互之间的连

通性差,孔径小。

## 3 孔裂隙分布特征

岩样的氮气等温吸附-脱附曲线反映了其孔裂隙的分布特征,孔裂隙的大小、形态以及连通性与岩样的吸水性密切相关。限于篇幅,仅以五虎山和洼里岩样为例,分析泥岩的孔裂隙分布特征。

### 3.1 吸附-脱附特征

图4为样品的氮气等温吸附-脱附曲线。从中可以看出,在相对压力  $p/p_0 < 0.8$  的范围内,样品的氮气吸附随着相对压力的上升增长平缓,沿等温线的起

表 2 岩样比表面积、孔径和孔容

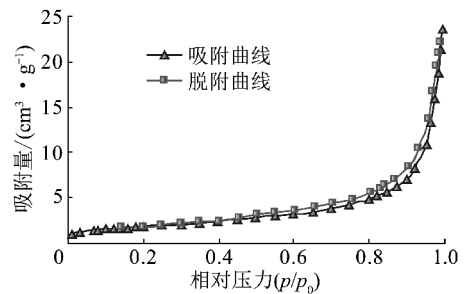
Table 2 Specific surface areas, pore diameters and pore volume of samples

取样地点	BET 比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	BJH 比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	Langmuir 比表面 积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	BET 平均孔 径/nm	BJH 平均 孔径/nm	孔容/ ( $\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )
屯 兰	7.369	8.142	10.213	20.456	19.887	37.6
李雅庄	6.796	7.869	9.886	21.231	20.146	36.9
五虎山	6.687	7.593	9.392	21.872	19.373	36.8
利 民	5.946	6.632	8.144	19.723	18.444	34.6
棋盘井	5.442	6.025	7.364	17.683	16.854	33.9
贺斯格	9.661	10.033	14.446	12.762	12.034	39.6
昭 通	11.332	11.964	16.125	13.201	12.874	40.1
洼 里	13.226	13.840	18.337	13.484	13.081	45.3

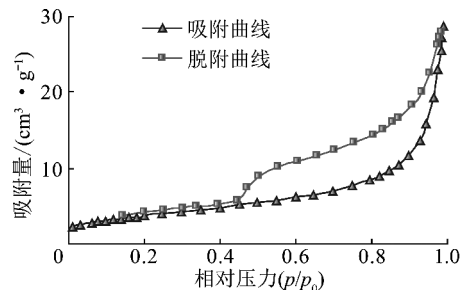
始部分吸附主要发生在微孔中,只限于在孔壁上形成薄层,表明样品具有孔径分布单一的结构特点。当相对压力  $p/p_0 > 0.8$  时,吸附容量随着压力增大呈陡峭增长趋势,曲线急剧上升。这与样品本身含有一定量的中孔和较大的孔隙有关,这将导致吸附过程中毛细凝聚现象的产生,越来越多的孔被填充,吸附曲线的脱附与吸附分支不重叠,由于毛细凝聚的结果而出现滞后环,环越大表示孔径越大。样品所出现的细扁滞后环可能是由样品所含黏土矿物集聚体内的中孔所造成的,也可能是样品中存在大量结晶缺陷造成局部结构单元破坏,出现二次孔结构引起。从图 4 中还可以看出,洼里岩样的滞后环远大于五虎山岩样,说明洼里岩样中“开放孔”占据比例较大,即孔隙之间连通性好,洼里岩样自然吸水率远大于五虎山岩样充分证实了这一点。

### 3.2 比表面积与孔径

图 5 为样品比表面积与孔径的关系曲线,从图中可以看出,五虎山泥质页岩和洼里泥质页岩比表面积累积曲线相近,比表面积累积曲线为近似下凹曲线的形态,即细微孔和微孔占有明显优势。从比表面积与孔径的关系曲线可知,五虎山泥质页岩的比表面积与孔径的关系曲线上有 2 个峰值点,即优势孔孔径集中在 10.2 nm 和 82.5 nm 左右(图 5(a)),其中 10.2 nm 为黏土矿物微集聚体间孔隙,而 82.5 nm 则为石英等构成泥岩骨架的大颗粒间孔隙;洼里泥质页岩的比表面积与孔径的关系曲线上出现 4 个峰值点,数量多的孔集中于 3.0, 10.3, 28.1 和 84.7 nm 左右 4 种孔径(图 5(b)),优势孔孔径集中在 3.0 nm 和 84.7 nm,其中 3.0 nm 为片状黏土矿物叠聚层间距,10.3 nm 为黏土矿物微集聚体间孔隙,28.1 nm 和 84.7 nm 为构成泥岩骨架的大颗粒间孔隙,但孔的数量要远多于五虎山泥质页岩。



(a) 五虎山泥质页岩



(b) 洼里泥质页岩

图 4 岩样低温氮等温吸附-脱附曲线

Fig. 4 Curves of isothermal adsorption-desorption of low temperature nitrogen of sample

### 3.3 孔容与孔径

图 6 为样品孔容与孔径的关系曲线,从中可以看出,两种岩样的孔容累积与孔径关系曲线相近,均为先缓后陡,即孔隙细微孔和微孔占优势。由孔容与孔径的关系曲线可知,两种泥岩均在 60 ~ 120 nm 范围出现凸点,其中五虎山泥质页岩孔径为 82.5 nm 时,所占孔体积最大,为  $8.6 \text{ mm}^3/\text{g}$ ,占总体积的 23.4%,洼里泥质页岩孔径为 84.7 nm 时,所占孔体积最大,为  $12.7 \text{ mm}^3/\text{g}$ ,占总体积的 28%,充分说明泥岩孔隙以构成泥岩骨架的大颗粒间孔隙为主,但总的来说,两类泥岩的孔体积低,孔隙发育程度差。

## 4 孔裂隙与吸水性的关系

从上述分析可知,泥岩中孔裂隙发育程度及其相

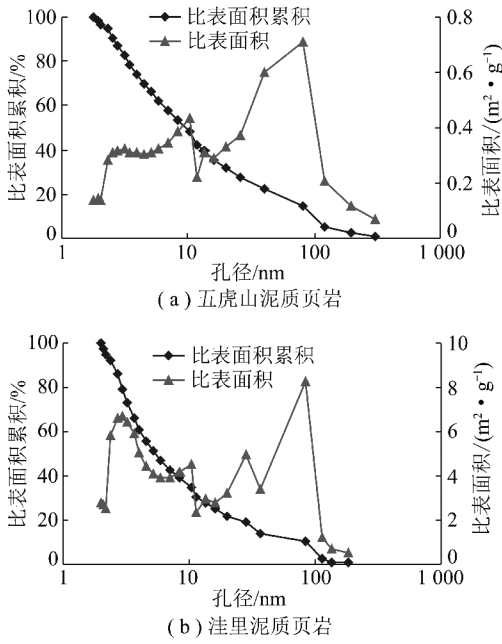


图 5 岩样孔径与比表面积关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between pore diameters and specific surface area of sample

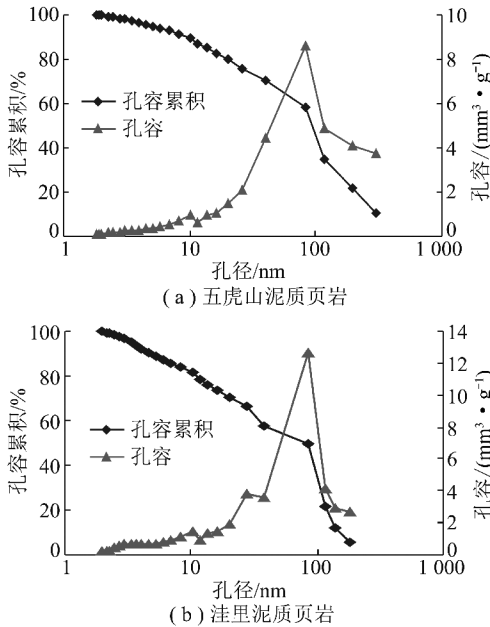


图 6 岩样孔径与孔容关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between pore diameters and pore volume of sample

互之间的连通性差,孔径小,水分在这种微孔隙中是难以流动的,这些微孔隙和微裂隙对于泥岩的渗水性是没有意义的,在地质学方面一般将泥岩作为油气盖层或隔水层,然而在煤系地层巷道中由于泥岩的吸水软化崩解又频繁引发工程稳定性控制问题,是目前矿业工程所面临的难点问题之一。

对泥岩软化崩解机制的研究<sup>[19]</sup>表明,泥岩软化或浸水崩解,都须经历宏观结构破坏、失水收缩和吸

水膨胀 3 个过程,泥岩的吸水软化崩解过程实际上是岩体结构不断受到宏观破坏、扰动逐步过渡到微观破坏、扰动的过程。正因如此,天然状态下,埋藏于地下的泥岩具有良好的隔水性,没有宏观结构破坏和失水收缩过程,水分不会进入泥岩内部引起泥岩的软化崩解。

正是有了宏观结构破坏,才使得原本对渗水毫无意义的发育程度和连通性均差的微孔隙对泥岩的吸水产生了决定作用。微孔隙和微裂隙的表面,实际上是在一定结构体系中,黏土颗粒与水之间真正接触而相互作用的有效界面。显然孔隙率越高、微孔隙和微裂隙越发育,则相界面便越大,表面自由能也越高,对水的吸附作用也愈强。由于水的吸附使岩样表面自由能减小,所以这一吸附过程有自发进行的倾向,所吸附的水分不仅会覆盖住整个微孔隙和微裂隙的表面,而且还产生一种楔裂力,使孔隙向纵深发展,从而导致其强度降低,产生软化崩解现象。

泥岩的软化崩解与泥岩的物质组成紧密相关<sup>[18]</sup>。受泥岩物质组成不同的影响微孔隙吸附效应存在明显差异,黏土矿物组成以高岭石或伊利石为主泥岩,吸水率低(图 7),软化崩解主要由岩块内部缺陷中空气受水的挤压产生超张应力,使原结构缺陷扩容导致矿物骨架沿最弱面发生破裂而引起的,崩解颗粒分布的分维数  $D < 2$ ,介于  $0.873\ 1 \sim 1.764\ 2$ ,以大粒径颗粒为主;黏土矿物组成以蒙脱石为主泥岩,吸水率高(图 7),软化崩解主要是所含膨胀性矿物蒙脱石遇水膨胀造成岩块的差异膨胀引起的,崩解颗粒分布的分维数  $D > 2$ ,介于  $2.223\ 1 \sim 2.716\ 2$ ,以小粒径颗粒为主。

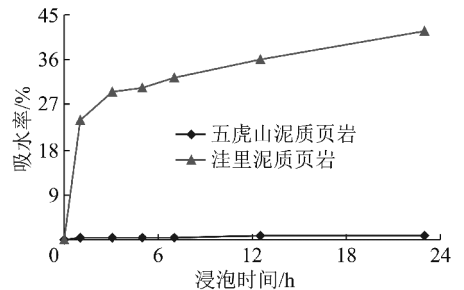


图 7 岩样自然吸水率随浸泡时间变化曲线

Fig. 7 Natural absorption curves of rock samples with time

### 5 结 语

本文借助于扫描电镜和液氮等温吸附试验手段,系统分析了泥岩孔隙隙形态和分布特征,并探讨了泥岩孔隙隙特征对其吸水、软化、崩解性能的影响规律,它为进一步阐明泥岩工程失稳致灾机理提供了一个

理论基础,对泥岩工程稳定性控制新理论和技术的产生发展有积极意义。

### 参考文献:

- [1] 孟召平,彭苏萍.煤系泥岩组分特征及其对岩石力学性质的影响[J].煤田地质与勘探,2004,32(2):14-16.  
Meng Zhaoping, Peng Suping. Mudstone composition of coal measures and its influence on the mechanical properties[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(2): 14-16.
- [2] 何满潮,周莉,李德建,等.深井泥岩吸特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1113-1120.  
He Manchao, Zhou Li, Li Dejian, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of mudstone in deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1113-1120.
- [3] 李洪志.淮南、铁法煤矿膨胀型软岩力学化学特征[J].中国煤田地质,1997,9(1):65-69.  
Li Hongzhi. The mechanical-geochemical characteristics of swelling soft rock Huainan and Tiefa Coal Mine[J]. Coal Geology of China, 1997, 9(1): 65-69.
- [4] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等.特殊软岩软化的微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):3993-4000.  
Zhou Cuiying, Tan Xiangshao, Deng Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 3993-4000.
- [5] Corkum A G, Martin C D. The mechanical behaviour of weak mudstone (opaline clay) at low stresses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44: 196-209.
- [6] 朱珍德,邢福东,刘汉龙,等.红砂岩膨胀力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):596-600.  
Zhu Zhende, Xing Fudong, Liu Hanlong, et al. Testing study on the swelling mechanical behavior of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 596-600.
- [7] Erguler Z A, Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46: 355-370.
- [8] 朱合华,周治国,邓涛.饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(5):823-828.  
Zhu Hehua, Zhou Zhiguo, Deng Tao. Acoustic parameter of low-porosity rock under dry and saturated condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 823-828.
- [9] 汤连生.水-岩反应的力学与环境效应研究[D].北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2000.  
Tang Liansheng. Mechanical effects and environmental effects of water-rock and soil interaction[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, the Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [10] 汤连生,王思敬.岩石水化学损伤机制及量化方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):314-319.  
Tang Liansheng, Wang Sijing. Analysis of mechanism and quantitative methods of chemical damage in water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 314-319.
- [11] 汤连生,张鹏程,王思敬.水-岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):526-531.  
Tang Liansheng, Zhang Pengcheng, Wang Sijing. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water on rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 526-531.
- [12] 朱合华,叶斌.饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1791-1796.  
Zhu Hehua, Ye Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep in saturation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1791-1796.
- [13] 朱珍德,邢福东,刘汉龙,等.南京红山窑第三系红砂岩膨胀变形性质试验研究[J].岩土力学,2004,25(7):1041-1044.  
Zhu Zhende, Xing Fudong, Liu Hanlong, et al. Experimental research on expansive deformation of tertiary red sandstone in Nanjing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1041-1044.
- [14] 杨春和,冒海军,王学潮,等.板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J].岩土力学,2006,27(12):2090-2098.  
Yang Chunhe, Mao Haijun, Wang Xuechao, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2090-2098.
- [15] 黄宏伟,车平.泥岩遇水软化微观机理研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(7):866-870.  
Huang Hongwei, Che Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866-870.
- [16] 刘长武,陆士良.泥岩遇水崩解软化机理的研究[J].岩土力学,2000,21(1):28-31.  
Liu Changwu, Lu Shiliang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 28-31.
- [17] 柴肇云,康天合,李元宝.物化型软岩微结构单元特征及其胀缩性研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1265-1269.  
Chai Zhaoyun, Kang Tianhe, Li Yibao. Study on microstructure unit character and its swell-shrink property for physico-chemical soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1265-1269.
- [18] 康天合,柴肇云,王栋,等.物化型软岩块体崩解特性差异的试验研究[J].煤炭学报,2009,34(7):907-911.  
Kang Tianhe, Chai Zhaoyun, Wang Dong, et al. Experimental study on block disintegration difference of physicochemical soft rock[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 907-911.
- [19] 谭罗荣.关于黏土岩崩解、泥化机制的讨论[J].岩土力学,2001,22(1):1-5.  
Tan Luorong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 1-5.