

文章编号: 1001-4888(2016)05-0683-11

含水率和围压对安家岭泥岩峰后力学特性影响的试验研究^{*}

王来贵¹, 张红记^{1,2}, 张春会³, 潘纪伟¹, 赵娜¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 霍州煤电集团有限责任公司, 山西霍州 031400;

3. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要: 为分析含水率和围压对泥岩峰后力学特性的影响,从山西安家岭矿取泥岩,制成不同含水率的 5 组试样,在 YAW2000 电液伺服试验机上开展了三轴试验,获得了不同含水率泥岩试样三轴全程应力应变曲线,使用激光共聚焦显微镜观测了泥岩增水过程中微观结构变化。利用试验结果,分析了围压和含水率对泥岩峰值强度、残余强度、弹性模量、破坏应变和脆性模量的影响规律和泥岩增水过程中微观结构的变化规律。引入脆性模量系数和强度退化指数来描述围压对泥岩峰后强度退化过程和残余强度的影响,与 FLAC 中的 SS 模型结合,建立了考虑围压影响的泥岩应变软化力学模型,模拟了围压对泥岩应变软化行为的影响。研究表明:(1)随着围压增加,泥岩的峰值强度、偏应力峰值、破坏应变和残余强度都增长,峰后强度降低速率趋缓,强度退化指数和脆性模量系数可以较好地描述围压对泥岩残余强度和峰后强度退化过程的影响。(2)泥岩增水过程中,岩样内微裂隙及尺寸增长,泥岩的力学性质劣化。随着含水率增加,泥岩的弹性模量、峰值强度和残余强度降低,破坏应变增长。含水率与泥岩的弹性模量、峰值强度和破坏应变之间近似服从线性关系。(3)本文基于脆性模量系数的岩石应变软化模型能较好地描述三轴压缩泥岩的全程变形行为。

关键词: 泥岩; 峰后力学特性; 含水率; 围压

中图分类号: TU443

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-243

0 引言

泥岩是由粘土质碎屑经沉积成岩作用形成的地质体。作为一种天然介体,泥岩通常遭受地应力和地下水的作用。地下水和地应力都对泥岩的力学性能有很大影响^[1-4]。在干燥状态下,泥岩表观完整、坚硬,强度和模量较高。遭遇水作用后短时间内迅速软化,强度和模量降低,甚至膨胀、崩解。另一方面,地应力对泥岩的力学特性也有很大影响。岩石三轴试验研究表明,随着围压增加,泥岩的峰值强度和模量都增加。另外,在工程实践中泥岩地层受工程活动扰动(如煤层和巷道开挖)后,不仅发生变形,而且可能破坏,通常是破坏泥岩和未破坏泥岩共同承受荷载作用,因此研究围压和含水率对泥岩峰后力学特性的影响具有重要工程价值。

围压和含水率对岩石力学特性的影响已得到国内外学者的关注。张黎明等^[5]、张帆等^[6]和汪斌等^[7]分别对粉砂岩、三峡花岗岩和锦屏大理岩开展三轴实验研究,分析了围压对岩石峰后残余强度的影

^{*} 收稿日期: 2015-12-24; 修回日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51274079, No. 51274110, No. 51574139)

通讯作者: 张红记(1968—),男,博士研究生,副总工程师,主要从事破坏岩石力学方面的研究。Email: zhanghongji1968@163.com

响。周翠英等^[1]分析了水与软岩相互作用的机制。刘建等^[8]研究了水对砂岩蠕变行为影响的物理化学作用机制。王东等^[9]研究了侧向变形控制下干燥和饱和灰岩变形破坏规律的异同。Yilmaz^[10]认为工程岩体内渗流情况复杂,应研究含水率对岩石力学特性的影响规律,并通过实验分析了含水率对石膏岩峰值强度和弹性模量的影响规律。然而,Yilmaz 仅开展了单轴实验,也没有关注石膏岩峰后力学特性。张春会等^[3]通过三轴实验研究了含水率和围压对巴里坤砂岩杨氏模量和峰后残余强度的影响,但没有探讨围压和含水率对强度退化过程的影响。Fang 等^[11,12]总结了围压对岩石峰后残余强度的影响,提出了强度退化指数的概念。Yuan 等^[13,14]分析了围压对岩石峰后剪胀扩容的影响,建立了基于扩容指数的岩石力学模型。张春会等^[15,16]在砂岩三轴实验结果基础上,分析了围压对岩石峰后强度退化过程的影响,建立了基于脆性模量系数的岩石应变软化和渗透率演化模型。总体上,目前无论在围压和含水率对泥岩峰后力学特性影响的试验研究方面,还是应变软化模型方面的研究都不完善,这方面的研究仍有待加强。

本文从山西安家岭露天矿取泥岩,开展了泥岩三轴压缩试验和泥岩增水过程中微结构演化试验,分析了含水率和围压对泥岩峰后力学特性的影响规律。引入脆性模量系数和强度退化指数,建立了考虑围压影响的岩石应变软化模型,并模拟了围压对泥岩峰后力学特性的影响。

1 试验

1.1 试样及试验结果

泥岩试样取自山西安家岭露天矿。岩样从钻孔岩芯中直接提取,取样后及时蜡封,然后装箱运送至实验室进行切割,切割后的试样为圆柱形,直径约为 60mm,高度约为 120mm,高径比为 2,如图 1 所示。

岩样的真密度为 $2.48\text{g}/\text{cm}^3$,测试岩样的含水率和密度,计算岩样的孔隙率,再测试岩样的有效孔隙率。利用非金属超声检测分析仪测试各岩样波速。取有效孔隙率和波速相近的岩样作为试验岩样。将 0.0%、2.5%、5.0%、7.0%和 9.5%作为预定含水率。将试验岩样烘干,抽真空饱和后再风干至预定含水率附近,测试含水率,停止风干,进行试验。按照含水率分组,如表 1 所示。



图 1 试样
Fig. 1 Samples



图 2 试验装置
Fig. 2 Testing setup

三轴试验设备为吉林金力 YAW-2000 型电液伺服刚性试验机。该试验机由主机、轴向伺服油源、自制三轴压力室和计算机测控系统等组成,最大轴向力为 2000kN,最大围压为 100MPa,如图 2 所示。自制三轴压力室(如图 2)由试验室腔、上端盖和上压头组成,实验室腔外接储能器,提供近似稳定围压。将泥岩试样安置于自制三轴压力室内,然后安装在试验机平台上,施加预定围压,再进行轴向位移加载,加载速率 $0.005\text{mm}/\text{s}$,轴向位移由测控系统直接读取。

表 1 泥岩试件的物理特性
Tab.1 Physical properties of mudstone samples

组别	试样编号	孔隙比	有效孔隙率	含水率(%)	饱和度(%)	含水率(%)	饱和度(%)
I	NY01	0.336	0.234	0.0	0.0	0.0	0.0
	NY02	0.291	0.192	0.0	0.0		
	NY03	0.303	0.211	0.0	0.0		
	NY04	0.330	0.232	0.0	0.0		
	NY05	0.330	0.217	0.0	0.0		
II	NY06	0.317	0.266	2.4	18.8	2.5	20.6
	NY07	0.292	0.209	2.4	20.4		
	NY08	0.321	0.212	2.6	20.1		
	NY09	0.282	0.209	2.6	22.9		
	NY10	0.298	0.206	2.5	20.8		
III	NY11	0.329	0.224	5.4	40.7	4.8	42.2
	NY12	0.264	0.190	4.6	43.2		
	NY13	0.295	0.213	4.8	40.3		
	NY14	0.267	0.196	4.7	43.6		
	NY15	0.264	0.196	4.6	43.2		
IV	NY16	0.292	0.197	6.1	51.8	6.1	52.4
	NY17	0.309	0.213	6.3	50.5		
	NY18	0.290	0.199	6.1	52.1		
	NY19	0.299	0.202	6.1	50.6		
	NY20	0.262	0.196	6	56.8		
V	NY21	0.290	0.208	9.3	79.4	9.4	82.6
	NY22	0.251	0.194	8.8	87.1		
	NY23	0.268	0.206	9.2	85.1		
	NY24	0.299	0.241	9.6	79.7		
	NY25	0.312	0.235	10.3	81.9		

另制备 1 个尺寸为 25mm×25mm×10mm 的干燥泥岩试样,在试样中心取 1.2mm×1.2mm 的矩形观测区域,标注观测方向,称重后按照预定的含水率在不同湿度下存放于恒温恒湿箱内,每隔 1 天称重 1 次,当两次质量基本无变化时,取出称重,计算岩样的含水率,置于 OLYMPUS OLS4000 激光共聚焦显微镜(如图 3)下放大 100 倍观测,获得试样的表面形貌。

由三轴压缩试验获得不同含水率泥岩试样轴向应力—轴向应变曲线如图 4~图 8 所示。由激光共聚焦显微镜获得泥岩增水过程中表面的微观形貌变化如图 9 所示。图 8 中单轴压缩和 10MPa 围压的三轴压缩试验试件一经加载立即破坏,试验失败。



图 3 激光共聚焦显微镜
Fig. 3 Laser scanning microscope

对图 4~图 8 的试验结果进行整理,结果如表 2 所示。

在表 2 中,弹性模量实际上是指平均模量,其值为三轴应力—应变曲线上近似直线部分的斜率。尤明庆^[17]认为,均质岩样的弹性模量并不受围压影响。本文岩样的弹性模量随围压增加而略有增加,这可能是由于本文岩样内的初始微裂隙和微孔隙等缺陷结构随着围压增加而闭合,使得岩样表现出具有更好的抗变形能力所致。

表 2 泥岩三轴实验结果

Tab.2 The results of mudstone under tri-axial compression

组别	围压 (MPa)	峰值强度 (MPa)	残余强度 (MPa)	破坏应变 (%)	强度退化 指数	弹性模量 (GPa)	脆性模量 (GPa)	脆性模量 系数
I	0	42.5	6.2	1.07	1.000	4.23	25.87	1.000
	5	59.4	10.2	1.49	0.715	4.95	17.80	0.688
	10	63.1	26.6	1.56	0.675	4.32	6.91	0.267
	15	74.7	35.1	1.83	0.569	4.97	3.44	0.133
	20	96.5	71.7	2.19	0.440	4.68	1.18	0.046
II	0	29.7	1.7	1.18	1.000	3.63	17.50	1.000
	5	34.6	10.9	1.19	0.858	2.88	15.87	0.907
	10	57.4	20.9	1.75	0.517	3.32	4.72	0.270
	15	73.2	46.5	1.97	0.406	3.69	2.48	0.142
	20	88.9	71.1	2.15	0.334	4.11	2.16	0.123
III	0	18.7	1.0	1.46	1.000	1.25	6.77	1.000
	5	29.1	6.8	2.02	0.643	1.53	2.02	0.298
	10	32.3	14.6	2.77	0.579	1.58	1.02	0.151
	15	54.4	16.0	2.91	0.344	2.19	1.06	0.157
	20	61.7	55.0	3.34	0.303	2.28	1.76	0.260
IV	0	6.2	0.6	1.55	1.000	0.44	0.77	1.000
	5	19.1	4.7	2.36	0.325	0.85	0.67	0.870
	10	24.5	14.9	2.89	0.253	0.94	0.73	0.948
	15	36.4	29.6	3.25	0.170	1.05	0.28	0.364
	20	52.6	37.6	3.88	0.118	1.34	0.15	0.195
V	5	9.5	2.3	2.64	—	0.75	—	—
	15	25.2	13.5	3.98	—	0.74	—	—
	20	33.6	28.0	4.61	—	0.84	—	—

1.2 试验结果分析

(1) 围压的影响

图 4~图 8 分别为不同含水率泥岩试样三轴压缩下的全程应力应变曲线。由图可以看出,围压对泥岩的全程力学行为有很大影响。随着围压增加,泥岩的峰值强度和破坏应变增长,偏应力峰值也有所增长。这主要是由于随着围压增加,泥岩内颗粒之间的接触增强,颗粒之间的摩擦和粘结效应可能都有所增强,相应的破坏应变也有所增长。当泥岩达到峰值强度,再增加轴压,泥岩的强度下降,并逐渐降至残余强度,维持不变。围压对泥岩的强度下降过程和残余强度有很大影响,随着围压增加,泥岩的强度降低速率趋缓,残余强度增大,即泥岩峰后塑性增强,脆性减弱,残余强度提高。

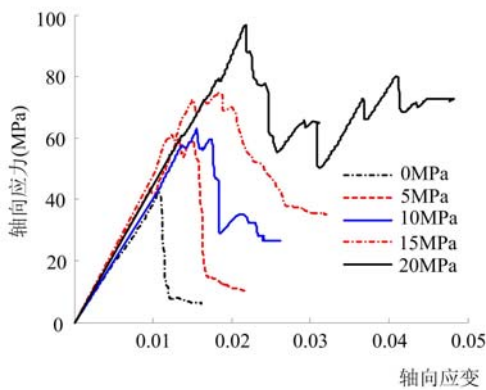


图4 I组岩样全程应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curve of group I

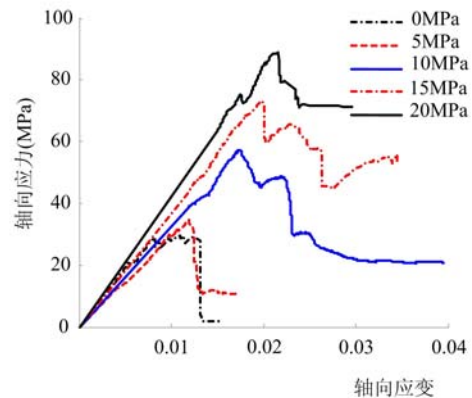


图5 II组岩样全程应力应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curve of group II

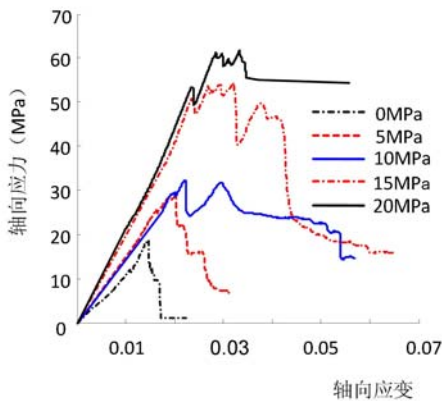


图6 III组岩样全程应力应变曲线

Fig. 6 The stress-strain curve of group III

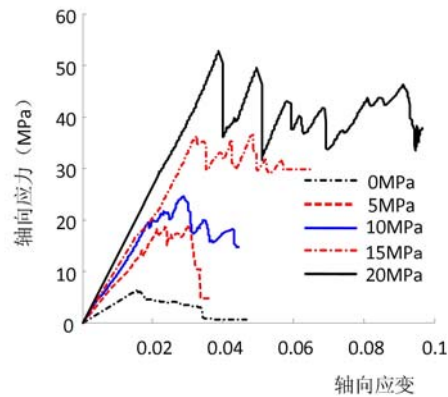


图7 IV组岩样全程应力应变曲线

Fig. 7 The stress-strain curve of group IV

(2) 含水率的影响

对图4~图8和表2的试验数据进行整理,可以得到含水率对泥岩弹性模量、峰值强度和破坏应变的影响如图10~图12所示。

从图10~12可见,含水率对泥岩的弹性模量、峰值强度和破坏应变有很大影响。随着含水率增加,泥岩的弹性模量降低,峰值强度降低,破坏应变增长。以第I组和第IV组泥岩样为例,单轴压缩下第I组泥岩的弹性模量、峰值强度、破坏应变分别为4.23GPa、42.5MPa和1.07%,第IV组泥岩的弹性模量、峰值强度、残余应变分别为0.44GPa、6.2MPa和1.55%,弹性模量降低了90%,峰值强度降低了85%,破坏应变增长了45%。这主要是由于泥岩内富含粘土矿物,如伊利石、蒙脱石、高岭石等,粘土矿物具有很强的亲水性,易于与水结合。当泥岩遇水后,其微观结构发生了很大变化,主要表现是大量次生孔隙形成、扩展、甚至汇聚成核,使得泥岩的强度和模量降低,这一过程如图9所示。

从图9可以看出,干燥泥岩试样表面平整,没有裂隙。图9(b)为含水率增加到4.8%时试样的表面形貌,试样表面仍然比较平整,但视野区域中有Y型裂隙,裂隙宽度约为152 μm ,当含水率增加至6.9%

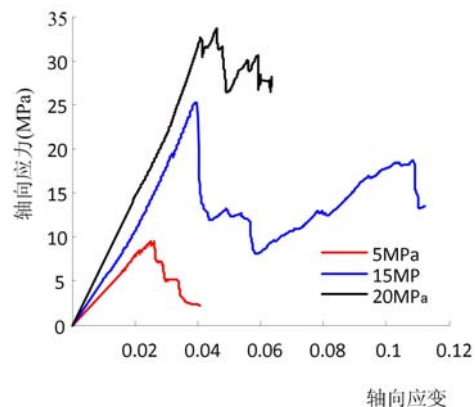


图8 V组岩样全程应力应变曲线

Fig. 8 The stress-strain curve of group V

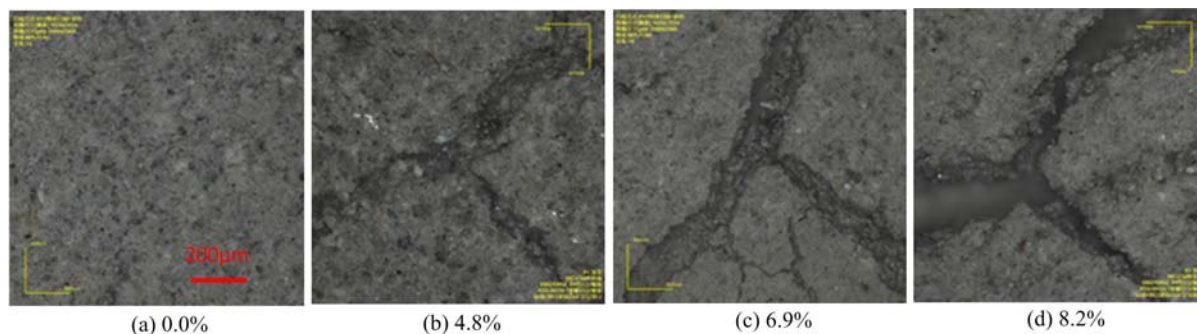


图 9 安家岭泥岩增水过程中微观结构(100 倍)

Fig. 9 Mudstone sample scanned by LSM ($\times 100$) for varying water content

时,裂隙宽度仍有增加,约为 $196\mu\text{m}$,同时还产生了新的裂隙。当含水率增加至 8.2% 时,裂隙内明显充满自由水,同时裂隙宽度也明显增大,约为 6.9% 时的 1.6 倍。可见,增水过程中岩样内微裂隙及微裂隙尺寸增长,使得岩石的力学性质劣化。

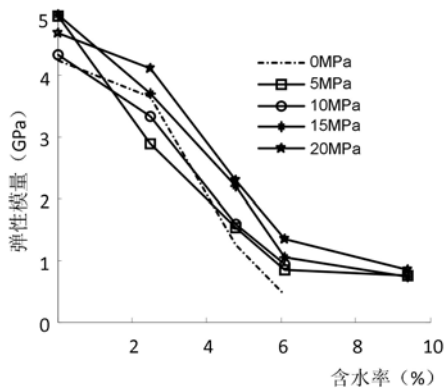


图 10 不同含水率的弹性模量

Fig. 10 Elastic modulus of different water content

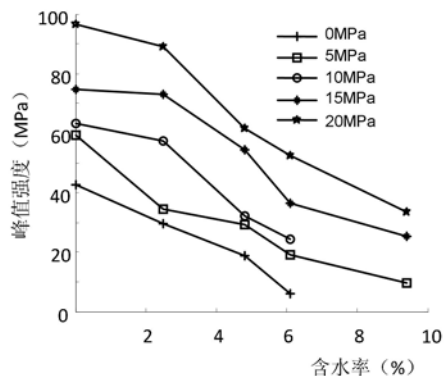


图 11 不同含水率的峰值强度

Fig. 11 Peak strength of different water content

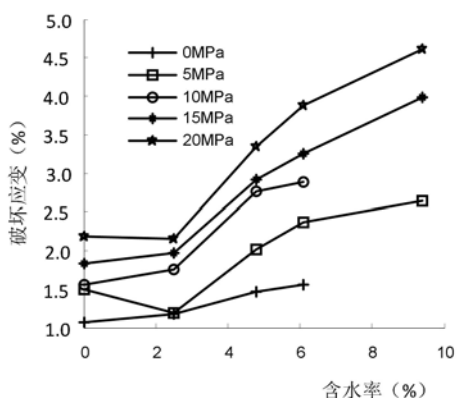


图 12 不同含水率的破坏应变

Fig. 12 Failure strain of different water content

含水率与泥岩的弹性模量、峰值强度和破坏应变之间的关系可以使用如下直线方程来拟合:

$$E = aw + b \quad (1a)$$

$$\sigma_p = cw + d \quad (1b)$$

$$\epsilon_f = ew + g \quad (1c)$$

式中, w 为含水率; a, b, c, d, e 和 g 为拟合常数; E 为弹性模量; σ_p 为峰值强度; ϵ_f 为破坏应变。

利用式(1)拟合图 10~图 12 中的试验数据,拟合结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,含水率与泥岩的弹性模量、峰值强度和破坏应变之间近似服从直线关系。

从表 2 还可以看出,含水率对泥岩峰后强度退化过程和残余强度也有很大影响,随着含水率增加,

泥岩的峰后强度退化过程趋缓,泥岩的塑性特征增强,脆性特征减弱。以第 I 组和第 IV 组泥岩试件为例,单轴压缩条件下第 I 组泥岩的峰后脆性模量为 25.87 GPa,第 IV 组泥岩的峰后脆性模量为 0.77 GPa,降低了 97%。另外,随着含水率增加,泥岩的残余强度也降低。

表 3 拟合结果
Tab. 3 The fitting results

围压 (MPa)	E			σ_p			ε_f		
	a	b	R ²	c	d	R ²	e(%)	g(%)	R ²
0	-0.659	4.594	0.967	-5.71	43.41	0.990	0.083	1.037	0.981
5	-0.456	4.271	0.924	-5.10	53.61	0.965	0.150	1.255	0.894
10	-0.575	4.465	0.992	-6.75	66.95	0.964	0.243	1.429	0.953
15	-0.482	4.727	0.961	-5.90	79.69	0.959	0.247	1.662	0.979
20	-0.455	4.723	0.961	-7.17	99.34	0.984	0.288	1.919	0.960

分别使用线性、自然对数和负指数函数对表 2 中含水率与峰后残余强度、脆性模量之间的关系进行拟合,计算数据与试验数据的相关系数都小于 0.75,拟合效果较差,表明不宜使用这些函数描述含水率对残余强度和脆性模量的影响。

2 三轴压缩泥岩应变软化模型

张春会等^[15,16]分析了围压对岩石峰后强度退化过程的影响,提出使用脆性模量系数描述围压对岩石峰后强度退化过程的影响,结合 Fang 等的强度退化指数^[11,12]、Yuan 等的扩容指数^[13,14]和 FLAC 中的 SS 模型,建立了模拟围压对岩石峰后应变软化行为影响的力学模型,即基于脆性模量系数的岩石应变软化力学模型。在该模型中将围压条件下岩石的应力应变曲线简化为三个阶段^[15],分别为线弹性阶段 OA、峰后强度退化阶段 AB 和残余强度阶段 BC,如图 13 所示。结合本文试验结果图 4~图 8,可以发现本文安家岭泥岩的全程应力应变曲线与图 13 较为接近,围压对泥岩峰后力学行为的影响也与图 13 所描述的规律近似,因此可以使用基于脆性模量系数的岩石应变软化模型来描述围压对安家岭泥岩力学行为的影响。

如前所述,含水率和围压都对泥岩力学行为有很大影响。但含水率的影响程度与泥岩内粘土矿物含量及粘土矿物类别有关,因此含水率对泥岩模量、峰值强度、残余强度等参数的影响不具有很好的规律性。

利用脆性模量和脆性模量系数的定义^[15,16],获得不同含水率和不同围压下安家岭泥岩的脆性模量和脆性模量系数如表 2 中第 8 和第 9 列所示。

张春会等^[15,16]提出,脆性模量系数与围压之间近似服从如下负指数函数关系:

$$\gamma = \exp(-n_b \sigma_3) \tag{1}$$

式中, n_b 为三轴试验数据拟合常数; σ_3 为围压。

利用式(1)拟合不同含水率(I 组~IV 组)泥岩三轴压缩下脆性模量系数与围压的关系,结果如图 14~图 17 所示。从图 14~图 17 可以看出,式(2)能较好地拟合安家岭泥岩脆性模量系数与围压之间的关系。

利用强度退化指数的定义^[11,12],获得不同含水率不同围压下安家岭泥岩的强度退化指数如表 2 中第 6 列所示。

张春会等^[15,16]和 Fang 等^[11,12]认为强度退化指数与围压之间服从负指数函数关系,可以表示为:

$$r_d = \exp(-n_d \sigma_3) \tag{2}$$

式中, n_d 为拟合常数。

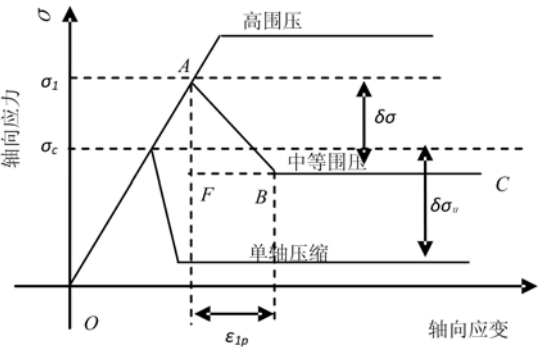


图 13 简化应力应变曲线^[15]

Fig. 13 Simplified stress-strain curve^[15]

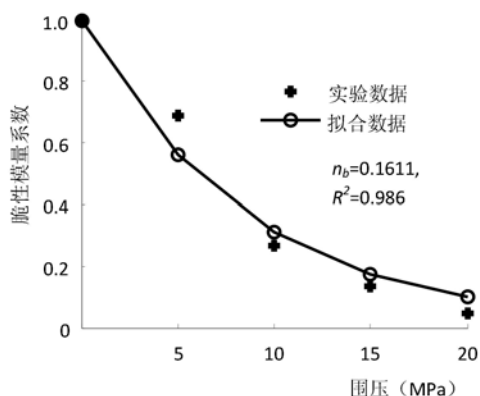


图 14 第 I 组泥岩脆性模量系数与围压
Fig. 14 Brittle modulus coefficient VS
confining pressure for group I

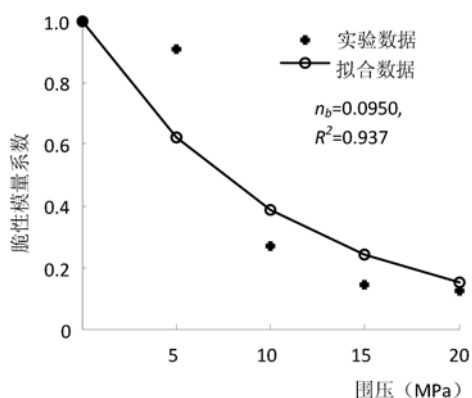


图 15 第 II 组泥岩脆性模量系数与围压
Fig. 15 Brittle modulus coefficient VS
confining pressure for group II

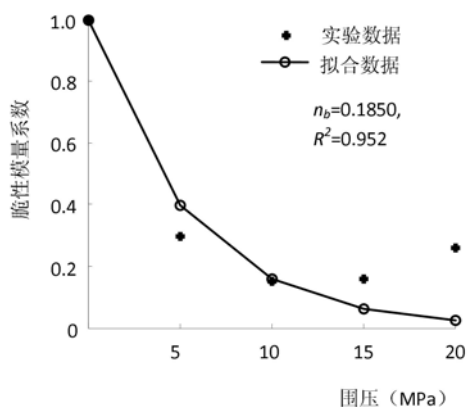


图 16 第 III 组泥岩脆性模量系数与围压
Fig. 16 Brittle modulus coefficient VS
confining pressure for group III

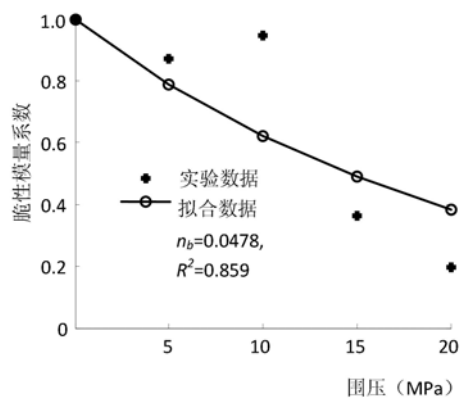


图 17 第 IV 组泥岩脆性模量系数与围压
Fig. 17 Brittle modulus coefficient VS
confining pressure for group IV

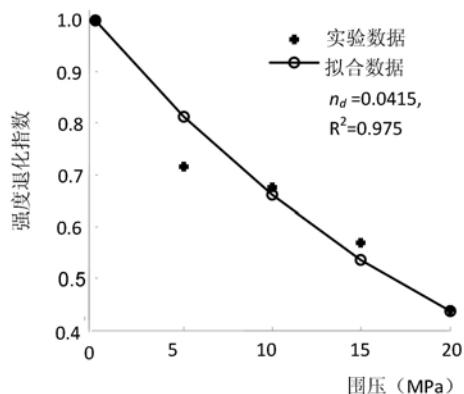


图 18 第 I 组泥岩强度退化指数与围压
Fig. 18 Strength degradation index VS
confining pressure for group I

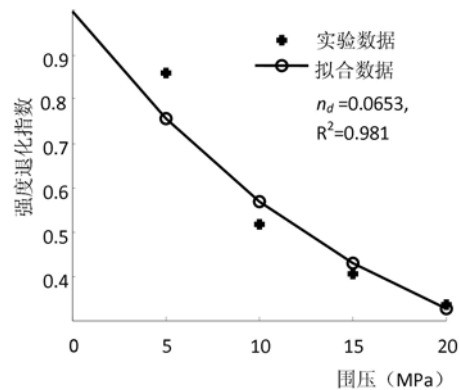


图 19 第 II 组泥岩强度退化指数与围压
Fig. 19 Strength degradation index VS
confining pressure for group II

利用式(2)拟合强度退化指数与围压之间的关系,结果如图 18~图 21 所示。从图可以看出,式(2)能较好地拟合安家岭泥岩强度退化指数与围压之间的关系。

可见,利用张春会等^[15,16]的基于脆性模量系数的岩石应变软化模型可以较好地描述围压对安家岭泥岩应变软化力学行为的影响。

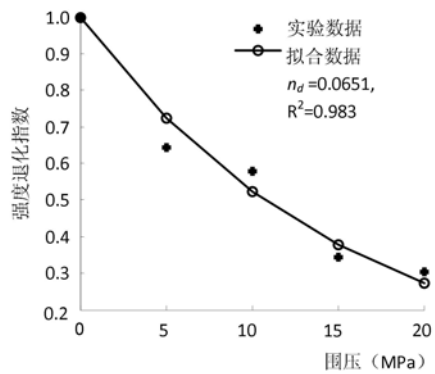


图 20 第 III 组泥岩强度退化指数与围压
Fig. 20 Strength degradation index VS
confining pressure for group III

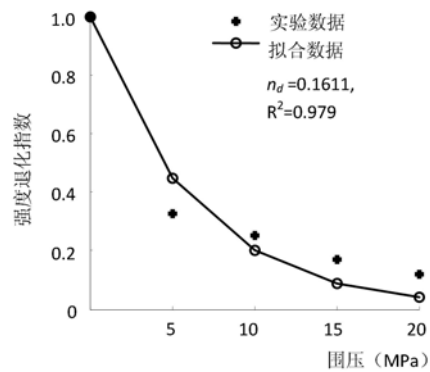


图 21 第 IV 组泥岩强度退化指数与围压
Fig. 21 Strength degradation index VS
confining pressure for group IV

3 数值模拟

本文在 FLAC 下利用基于脆性模量系数的岩石应变软化模型^[15,16]对第 I 组安家岭泥岩三轴压缩过程进行模拟。数值泥岩试样尺寸为 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$, 岩样侧向施加恒定围压 0MPa, 5MPa, 10MPa, 15MPa, 20MPa。轴向位移加载, 速度为 $0.5 \times 10^{-7} \text{m/step}$ 。泥岩样的弹性模量为 4.6GPa, 泊松比为 0.3, 单轴抗压强度为 42.5MPa, 残余强度为 6.2MPa, 单轴强度降为 36.3MPa, 单轴脆性模量为 25.9GPa, 强度退化指数拟合系数 $n_d = 0.0415$, 脆性模量系数拟合系数 $n_b = 0.1611$, 单轴剪胀角为 16.2° , $\sigma_h = 93\text{MPa}$, $m_d = 1.5$ 。

利用数值模型获得泥岩三轴压缩全程应变曲线如图 22 所示。从图 22 可以看出, 数值模拟结果与试验结果基本一致, 本文模型能较好地模拟泥岩三轴压缩过程中的变形、破坏和强度退化过程, 从而为工程中安家岭泥岩力学行为预测提供了一种方法。

4 结论

本文在吉林金力三轴试验机上对不同含水率的山西安家岭泥岩开展了三轴试验, 获得了不同含水率不同围压下泥岩试样的全程应力应变曲线, 利用激光共聚焦显微镜观测了泥岩增水过程中微观结构变化, 进而分析了含水率和围压对泥岩峰后力学特性的影响规律。通过研究主要取得了如下结论:

(1) 随着围压增加, 泥岩的峰值强度、偏应力峰值、破坏应变和残余强度都增长, 峰后强度降低速率趋缓。

(2) 强度退化指数和脆性模量系数可以较好地描述围压对安家岭泥岩残余强度和峰后强度退化过程的影响。

(3) 泥岩增水过程中, 岩样内微裂隙尺寸增长, 岩石的力学性质劣化。随着含水率增加, 泥岩的弹性模量、峰值强度和残余强度降低, 破坏应变增长。含水率与泥岩的弹性模量、峰值强度和破坏应变之间近似服从线性关系。

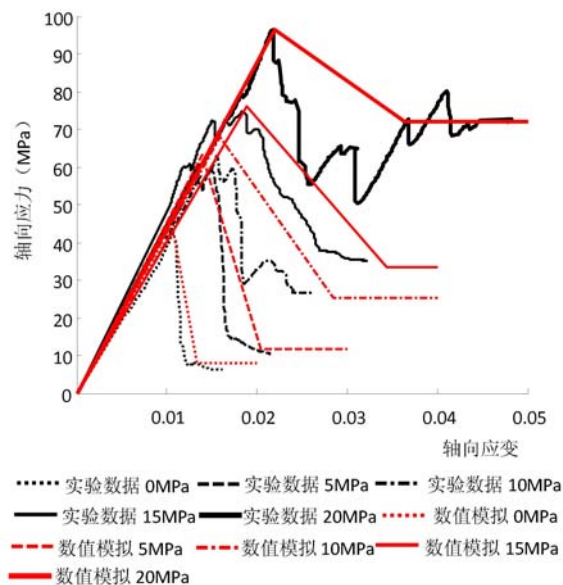


图 22 安家岭泥岩数值模拟结果

Fig. 22 Numerical simulation results of Anjialing mudstone

(4) 基于脆性模量系数的岩石应变软化模型能较好地描述三轴压缩泥岩的全程变形行为。

参考文献:

- [1] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1):33—38 (ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1):33—38 (in Chinese))
- [2] 汪亦显, 曹平, 黄永恒 等. 水作用下软岩软化与损伤断裂效应的时间相依性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(4):55—62 (WANG Yixian, CAO Ping, HUANG Yongheng, et al. Time-dependence of damage and fracture effect for strain softening of soft rock under water corrosion [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2010, 42(4):55—62 (in Chinese))
- [3] 张春会, 赵全胜. 饱水度对砂岩强度和模量影响的三轴试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(4):951—958 (ZHANG Chunhui, ZHAO Quansheng. Triaxial tests of effects of varied saturations on strength and modulus for sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4):951—958 (in Chinese))
- [4] 陆银龙, 王连国, 杨峰 等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3):640—648 (LU Yinlong, WANG Lianguo, YANG Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3):640—648 (in Chinese))
- [5] 张黎明, 王在泉, 李华峰 等. 粉砂岩峰后破坏区应力脆性跌落的试验和本构方程研究[J]. 实验力学, 2008, 23(3):234—240 (ZHANG Liming, WANG Zaiquan, LI Huafeng, et al. Theoretical and experimental study on siltstone brittle stress drop in post-failure region [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(3):234—240 (in Chinese))
- [6] 张帆, 盛谦, 朱泽奇 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1):2651—2655 (ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study of post-peak mechanical behavior and strain-softening model of Three Gorges granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Sup. 1):2651—2655 (in Chinese))
- [7] 汪斌, 朱杰兵, 邹爱清 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10):2138—2145 (WANG Bin, ZHU Jiebing, WU Aiqing, et al. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10):2138—2145 (in Chinese))
- [8] 刘建, 李鹏, 乔丽苹 等. 砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12):2540—2550 (LIU Jian, LI Peng, QIAO Liping, et al. Experimental research on creep behavior and mechanism of sandstones with hydro-physical-chemical effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12):2540—2550 (in Chinese))
- [9] 王东, 王丁, 韩小刚 等. 侧向变形控制下的灰岩破坏规律及其峰后本构关系[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12):2022—2027 (WANG Dong, WANG Ding, HAN Xiaogang, et al. Limestone failure law and post-failure constitutive relation in the control of lateral deformation [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12):2022—2027 (in Chinese))
- [10] Yilmaz Isik. Influence of water content on the strength and deformability of gypsum [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2):342—347.
- [11] Fang Z, Harrison J P. A mechanical degradation index for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38:1193—1199.
- [12] Fang Z, Harrison J P. Development of a local degradation approach to the modelling of brittle fracture in heterogeneous rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39:443—457.
- [13] Yuan S C, Harrison J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41:679—686.
- [14] Yuan S C, Harrison J P. Development of a hydro-mechanical local degradation approach and its application to modeling fluid flow during progressive fracturing of heterogeneous rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42:961—984.

- [15] 张春会, 岳宏亮, 王来贵 等. 基于脆性模量系数的岩石应变软化及渗透率演化模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1):255—264 (ZHANG Chunhui, YUE Hongliang, WANG Laigui, et al. Strain softening and permeability evolution model based on brittle modulus coefficient[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1):255—264 (in Chinese))
- [16] 张春会, 赵全胜, 王来贵 等. 三轴压缩岩石应变软化及渗透率演化的实验和数值模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8):1774—1782 (ZHANG Chunhui, ZHAO Quansheng, WANG Laigui, et al. Test and numerical modeling on strain softening behavior and permeability evolution of rock under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8):1774—1782 (in Chinese))
- [17] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1):53—60 (YOU Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1):53—60 (in Chinese))
- [18] ITASCA. Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, Minnesota, 2012.

Experimental Investigation on the Effects of Confining Pressure and Moisture Content on Post-Peak Mechanical Behavior of Anjialing Mudstone

WANG Lai-gui¹, ZHANG Hong-ji^{1,2}, ZHANG Chun-hui³, PAN Ji-wei¹, ZHAO Na¹

(1. Department of Mechanics and Science Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. Huozhou Coal Electricity Group CO., LTD, Huozhou 031400, Shanxi, China; 3. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China)

Abstract: In order to investigate the effects of confining pressure and moisture content on mudstone post-peak mechanical behavior, mudstone samples collected from Anjialing mine Shanxi province were divided into five groups with different moisture contents. Tri-axial compression test was conducted by using YAW2000 electro-hydraulic servo testing machine, and full stress-strain curves of mudstone samples with different moisture contents were obtained. Besides, mudstone micro-structure change during the moisture content increasing process was observed by laser confocal microscope. Based on experimental results, the effects of confining pressure and moisture content on the peak strength, residual strength, elastic modulus, failure strain and brittle modulus of mudstone were analyzed; mudstone micro-structure change during moisture content increasing process was also studied. Brittle modulus coefficient and strength degradation index were introduced to describe the effects of confining pressure on the post-peak strength degradation process and residual strength. Combining with SS model in FLAC, mudstone strain softening model was established by taking into account the effects of confining pressure, to simulate the effects of confining pressure on mudstone strain softening. Results show that (1) with the increase of confining pressure, the peak strength, deviatoric stress peak value, failure strain and residual strength all increase, the post-peak strength decrease rate becomes slow. The brittle modulus coefficient and strength degradation index can better describe the effects of confining pressure on the post-peak strength degradation process and residual strength. (2) during mudstone moisture content increasing process, the microfracture and size in mudstone sample increase, its mechanical properties degrade, the elastic modulus, peak strength and residual strength decrease, and the failure strain increases. There are approximately linear relations between mudstone elastic modulus, peak strength and failure strain with the moisture content. (3) strain softening model based on brittle modulus coefficient and presented in this paper can better describe full deformation behavior of mudstone subjected to tri-axial compression.

Keywords: mudstone; post-peak mechanical properties; moisture content; confining pressure