

文章编号: 1000-7598(2013)11-3110-07

泥岩夹层软化试验研究

任松¹, 文永江¹, 姜德义¹, 陈结¹, 屈丹安^{1,3}, 杨春和^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 中国石油天然气股份有限公司 西气东输管道分公司储气库项目部, 江苏 金坛 213200)

摘要: 基于正交试验方案, 研究了温度、卤水浓度及浸泡时间 3 个因素对泥岩夹层软化的影响规律。分别运用极差分析法和方差分析法对试验结果进行分析。对任意两个影响因素分别进行二元线性回归, 根据其标准回归系数对泥岩夹层单轴抗压强度及弹性模量相对重要性比值构建判断矩阵, 运用层次分析法计算各个影响因素的权值。试验结果表明: 温度和浸泡时间在泥岩夹层软化过程中起着决定作用, 影响权重达到 98% 以上; 浸泡时间的影响最大, 权重达到 80%; 卤水浓度的变化对泥岩夹层软化影响较微弱, 在实际的工程中可以忽略不计。随着浸泡时间的延长和温度的升高, 泥岩夹层内部裂隙逐渐被溶液侵入, 单轴抗压强度和弹性模量呈递减趋势。鉴于卤水浓度影响甚微, 仅利用温度和浸泡时间建立了软化方程。

关键词: 泥岩夹层; 正交试验; 单轴抗压强度; 弹性模量; 层次分析法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental research on softening in mudstone interlayer

REN Song¹, WEN Yong-jiang¹, JIANG De-yi¹, CHEN Jie¹, QU Dan-an^{1,3}, YANG Chun-he^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Gas Storage Project Department, West-to-East Pipeline Company, Petro China Company Limited, Jintan, Jiangsu 213200, China)

Abstract: Based on orthogonal test, the softening mudstone interlayer effected by three factors, i.e. temperature, brine density and immersion time, is studied. The extremum difference analysis and variance analysis are respectively applied to analyzing the results of the test. Any two factors are the binary liner regression; the relative importance ratio according to the standardized regression coefficients for the uniaxial compressive strength and elastic modulus of mudstone interlayer is used to build judgment matrix; analytic hierarchy process is used to calculate weights of various factors. The results show that the temperature and the immersion time play a decisive role on the softening process of mudstone interlayer; and the weights of analytic hierarchy process are more than 98%. The greatest influencing factor is immersion time whose weight is about 80%. The change of brine density has hardly any effect; therefore it can be neglected in the practical project. With the immersion time extending and the temperature increasing, the cracks in mudstone interlayer are gradually intruded into solution; meanwhile, the uniaxial compressive strength and elastic modulus show a decreasing trend. In view of the insignificant role the brine density plays in the whole experiment, only temperature and immersion time are taken into consideration to establish the equations.

Key words: mudstone interlayer; orthogonal test; uniaxial compressive strength; elastic modulus; analytic hierarchy process

1 引言

盐岩具有渗透率低, 蠕变特性好, 可塑性大, 极易溶解于水以及损伤自恢复的特性, 能适应储存压力的变化, 保证储存洞库的密闭性, 因此, 盐岩已成为国际能源储备的首选介质。相比国外大量存在的盐丘型储存条件, 我国盐岩矿床的基本特点是

矿层层数多、单层厚度薄、夹层大多难溶。当前盐岩造腔过程中经常遇到一些层状夹层(芒硝、石膏和泥岩以及它们的混合物), 这些不溶或缓溶夹层给造腔带来了诸多不利影响, 因此, 研究其软化性质及垮塌机制显得尤为重要。目前国内外学者针对泥岩软化的性质做了大量试验研究。Yoshida 等^[1-2]分析了泥岩和超固结黏土的软化效应, 此外还进行

收稿日期: 2012-09-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No. 2009CB724606); 国家自然科学基金资助项目(No. 51074198); 重庆市科委自然科学基金计划资助(No. 2010BB6044)。

第一作者简介: 任松, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 从事岩土工程力学方面的教学和科研工作。E-mail: rs_rwx@cqu.edu.cn

了相关的软化有限元分析。黄宏伟等^[3]研究了软化泥岩的微观结构后指出, 泥岩软化决定性因素并不是其含有的黏土矿物的多少, 而是泥岩的微观结构特征。冒海军等^[4]做了黏土矿物组构对水化作用的影响评价分析, 认为泥岩随亲水矿物的增加及黏土矿物的定向排列性, 水化程度愈深。周翠英等^[5-7]研究了软岩在纯水浸泡下的力学性质软化情况, 得出其抗压强度、抗拉强度和抗剪强度随着饱水时间的延长而不断降低, 并服从指数变化规律, 同时采用“自组织临界性”理论深入分析了软化试验中的临界现象, 并且还研究了软岩遇水软化的耗散结构形成机制。张永安等^[8]通过 X 射线衍射法分析了黏土矿物的化学成分, 并通过试验研究了红层泥岩水化膨胀、失水崩解、溶解溶蚀等水岩作用特征。藤宏伟等^[9]采用声波探测与单轴抗压试验相结合的方法进行了页岩的饱水软化试验, 得到页岩动弹模量及强度的饱水软化方程。刘长武等^[10]研究了泥岩遇水崩解的软化机制, 提出泥岩崩解软化是泥岩内部微观结构和微孔隙的宏观反映。杨春和等^[11]研究了板岩遇水软化的微观结构和力学特性, 研究表明, 随着浸泡时间的延长, 板岩力学参数都呈减弱趋势, 软化程度增大。李杭州等^[12]通过应变控制式固结不排水三轴试验研究了膨胀性泥岩应力-应变关系。高红波等^[13]对盐水浸泡作用下石膏力学特性进行了试验研究, 得出随着温度升高、盐溶液浓度增大及浸泡时间的延长, 石膏岩强度呈降低弱化趋势。施锡林等^[14]对卤水浸泡下的泥质夹层抗拉强度进行了试验研究, 分析得到随着卤水浓度降低和浸泡时间延长, 泥质夹层试样抗拉强度弱化越明显; 夹层中盐岩的溶解与黏土矿物的吸水膨胀及软化对试样抗拉强度的弱化有相互促进的作用。

目前关于盐层中泥岩夹层受多因素共同作用的正交设计试验鲜有报导, 而多夹层盐穴储库建造过程中夹层受到温度、卤水等因素的共同作用。因此, 本文结合实际, 将温度和卤水浓度两个环境因素一并考虑, 试验设计为温度、浸泡时间及卤水浓度 3 个因素相互耦合共同作用下的正交试验, 研究了泥岩夹层的单轴抗压强度及弹性模量随浸泡环境变化的变化规律; 通过试验结果进行极差分析和方差分析, 得出各因素对泥岩夹层软化影响的主次关系; 并且运用层次分析法确定各因素对泥岩夹层软化的权值大小; 建立了各个因素与泥岩夹层单轴抗压强度和弹性模量之间的关系式; 为今后盐岩能源库造腔的稳定性和安全性提供一定的理论基础和试验依据。

2 试验方法

2.1 试验设备

本次试验是在重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自行研制的三轴试验机上进行, 试验机主要结构如图 1 所示。该设备采用计算机自动控制的电液伺服自动加载系统, 本系统由液压站、计算机测控系统、主机等部分组成。液压站提供系统动力, 计算机测控系统用于控制电液伺服阀, 通过电液伺服缸加载, 主机安放试样并在计算机控制下进行加载试验, 加载试验按规定的加载过程自动完成。该设备最大轴向力为 400 kN, 轴向力示值精度优于示值的 $\pm 0.8\%$ 。



图 1 高温三轴试验机

Fig.1 High temperature triaxial test equipment

2.2 试样制备

试验的岩样采用湖北云应盐岩矿钻探过程中取出的夹层-紫红色粉砂质泥岩岩芯。泥岩夹层试样组成成分及质量百分含量见表 1, 其中可溶物 (NaCl、 Na_2SO_4) 占了 4.41%, 难溶物 (CaSO_4) 占了 2.36%, 不溶物 (黏土矿物及硅酸盐矿物) 占了 93.23%, 绝大部分为黏土矿物。试样加工为直径为 30 mm, 高度为 60 mm 的标准圆柱体, 试样的取样和加工严格按照试验规范进行, 通过手工磨制加工而成, 加工好的试样尺寸精度误差保证在 ± 0.2 mm 以内, 泥岩试样如图 2 所示。

2.3 试验方法

本次试验运用正交试验设计方法, 研究泥岩夹层在温度、卤水浓度及浸泡时间 3 个因素共同作用下的软化情况, 具体试验步骤如下:

表 1 泥岩试样的成分 (单位: %)

Table 1 Components of mudstone specimens (unit: %)

NaCl	Na_2SO_4	CaSO_4	黏土矿物及硅酸盐矿物
3.81	0.60	2.36	93.23



图 2 泥岩试样图
Fig.2 Mudstone sample

(1) 加工好岩样, 用电子天平称量试验前岩样的质量, 并测量其高度与直径;

(2) 根据正交试验的要求, 任意选取试验组, 配置相应浓度卤水溶液 (溶液中 Na^+ 和 Cl^- 的和达 97.5% 左右), 并将其放置在对应的恒温水浴箱内;

(3) 达到试验设置时间取出岩样, 对岩样风干直至其表面无水分并称量质量;

(4) 将岩样安装在试验机上, 采用位移加载, 加载速率为 0.1 mm/min, 直到试样完全破坏。

2.4 正交试验设计

盐岩造腔过程中经常会遇到泥岩夹层, 由于泥岩中绝大部分成分不溶解, 从而对腔体形状控制造成很大的影响, 而实际工程中泥岩夹层处于复杂的环境中, 受到多方面因素影响。为了准确分析各个因素对泥岩夹层软化的影响大小, 本文拟选取正交试验方法研究造腔过程中各关键因素对泥岩夹层软化程度的影响。

本文选择泥岩夹层软化过程中的温度、卤水浓度及浸泡时间 3 个影响因素, 对其单轴抗压强度及弹性模量的值进行分析, 按照正交试验法^[15]采用 3 因素 4 水平的试验 $L_{16}(4^3)$ 方案, 共需进行 16 次试验, 各因素水平的取值如表 2 所示。

其中温度梯度值的选取是根据当地气温和地温梯度 (深度每增加 100 m 温度将增加 3 °C) 以及夹层钻采深度计算而获得。卤水浓度选取是根据工程实际造腔时的卤水浓度而确定, 时间梯度是根据之前的准备试验获得。为了减小试验误差对结果的影响, 所以各因素水平梯度的选择尽量大一些。

表 2 正交试验 3 因素 4 水平表
Table 2 3 factors and 4 levels of orthogonal test

水平	影响因素		
	温度/°C	卤水浓度/(g/mL)	浸泡时间/d
1	30	0.0	7
2	40	0.1	14
3	50	0.2	21
4	60	0.3	28

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

通过对影响泥岩夹层软化的 3 个因素温度、卤水浓度及浸泡时间的正交试验结果发现, 3 个因素对泥岩夹层单轴抗压强度和弹性模量的影响差别很大, 以下通过极差和方差两种分析方法分别对影响程度进行说明, 试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果
Table 3 Orthogonal experimental results

试验 分组	温度 /°C	卤水浓度 /(g/mL)	浸泡时间 /d	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa
1	30	0.0	7	12.04	3.802
2	30	0.1	14	8.86	3.243
3	30	0.2	21	6.90	2.572
4	30	0.3	28	5.95	2.154
5	40	0.0	14	8.34	3.024
6	40	0.1	7	11.38	3.667
7	40	0.2	28	5.88	2.095
8	40	0.3	21	6.84	2.356
9	50	0.0	21	6.16	2.430
10	50	0.1	28	5.37	1.808
11	50	0.2	7	10.92	3.721
12	50	0.3	14	8.39	2.753
13	60	0.0	28	5.03	1.632
14	60	0.1	21	6.08	2.181
15	60	0.2	14	8.06	2.802
16	60	0.3	7	10.56	3.417

由表 3 可以看出, 在某个因素的某个水平所在的那组试验中, 其他的因素的水平都分别出现 1 次。例如当温度为 40 °C 时, 另外两个因素的各个水平都相应只出现了 1 次。因此, 某个因素某个水平的所有试验平均值可以认为是此因素在该水平的单独作用时的试验值。将各个水平下试验均值差值的最大值作为极差, 由此作极差分析是合理的, 极差分析如表 4、5 所示。从表中可以看出: 浸泡时间的极差最大, 其次为温度的极差, 由此说明温度和浸泡时间两个因素对泥岩夹层软化贡献很大, 而卤水浓度的极差很小甚至低于试验空列极差 (视为误差), 而其水平变动已经足够大, 因此, 可以认为卤水浓度对软化不重要。

表 4 影响单轴抗压强度的各因素极差分析表
Table 4 Extremum difference analysis of the influencing factors of uniaxial compressive strength

水平均值	温度 /°C	卤水浓度 /(g/mL)	浸泡时间 /d	误差项	误差项
水平 1	8.438	7.893	11.225	8.098	8.078
水平 2	8.110	7.923	8.412	7.912	7.865
水平 3	7.710	7.940	6.495	7.793	7.925
水平 4	7.433	7.935	5.558	7.888	7.822
极差	1.005	0.047	5.667	0.305	0.256

表 5 影响弹性模量的各因素极差分析表
Table 5 Extremum difference analysis of the influencing factors of elastic modulus

水平均值	温度 /℃	卤水浓度 /(g/mL)	浸泡时间 /d	误差项	误差项
水平 1	2.943	2.722	3.652	2.708	2.692
水平 2	2.785	2.725	2.955	2.738	2.796
水平 3	2.678	2.797	2.385	2.705	2.656
水平 4	2.508	2.670	1.922	2.763	2.770
极差	0.435	0.127	1.730	0.058	0.140

作方差分析的目的是区分试验中由于试验条件改变引起的数据波动和由于试验误差引起的数据波动^[16-17]。方差分析如表 6、7 所示,从最终的 F 比与 F 临界值的比较中可以得知,当置信度为 0.99 时,温度和浸泡时间两个因素依然高度显著,而卤水浓度的 F 比值很小,它对泥岩夹层软化贡献甚微。

表 6 影响单轴抗压强度的各因素方差分析表
Table 6 Variance analysis of the influencing factors of uniaxial compressive strength

因素	因素偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
温度	2.343	3	13.622	9.78
浓度	0.005	3	0.029	9.78
时间	75.110	3	436.686	9.78
误差	0.340	6		

表 7 影响弹性模量的各因素方差分析表
Table 7 Variance analysis of the influencing factors of elastic modulus

因素	因素偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
温度	0.401	3	13.148	9.78
浓度	0.033	3	1.082	9.78
时间	6.688	3	219.279	9.78
误差	0.060	6		

3.2 浸泡时间对泥岩夹层软化的影响

浸泡时间对泥岩软化效果非常明显,在之前的很多研究中已经得到证实,此次研究结果也印证了本结论,如图 3 所示。浸泡 7 d 后其抗压强度为 11.225 MPa,弹性模量为 3.652 GPa,浸泡 28 d 后分别降低到 5.558 MPa 和 1.922 GPa,降低百分率分别为 50.5%和 47.4%,随着浸泡时间延长软化速率也逐渐降低。泥岩夹层岩样浸水后,首先是其表面的黏土矿物被软化;随后溶液沿着微裂隙孔隙及层理面向其内部渗透,黏土矿物发生膨胀,层理面黏聚力和内摩擦角都随浸泡时间延长而逐渐降低;当浸泡时间继续增长时,出现泥化现象,溶液更进一步侵入泥岩夹层内部,一些闭合型孔裂隙也被侵入,泥岩夹层力学参数更进一步降低。浸泡时间不同,取出的岩样表面区分明显,如图 4 所示,从左至右

浸泡时间分别为 14、21、28 d,从图中可以看出,随着浸泡时间延长其可见张开型裂隙越多。

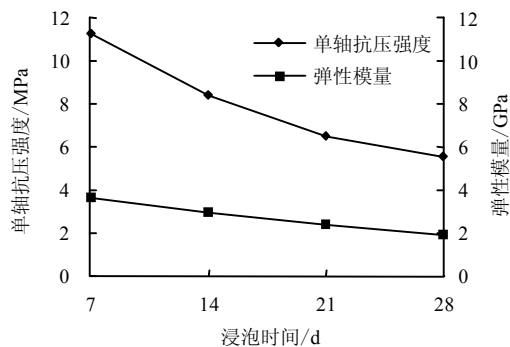


图 3 浸泡时间与泥岩夹层力学参数关系
Fig.3 Relationships between immersion time and mechanical parameters of mudstone interlayer



图 4 不同浸泡时间试样对比图
Fig.4 Sample comparing chart on different immersion times

3.3 温度对泥岩夹层软化的影响

温度对泥岩夹层力学参数的影响比较大,单轴抗压强度和弹性模量都随着温度的升高而呈降低弱化趋势,如图 5 所示。温度从 30 ℃增加到 60 ℃时,泥岩单轴抗压强度降低 11.9%,弹性模量降低 14.8%,软化效果比较明显。温度对泥岩夹层软化的影响机制可以根据热力学的观点进行解释。温度升高的过程中,泥岩夹层内部分子及溶液分子活性大大增强,使得溶液更容易进入泥岩夹层微孔隙裂隙,从而软化结构面(结构面黏聚力和内摩擦角都减小);泥岩夹层中的黏土矿物细小,亲水性很强,由于各种矿物质的膨胀性差异很大,当温度升高时引起不均匀体积膨胀,部分胶结物被稀释、软化或是溶解,泥岩夹层强度逐步降低。

3.4 卤水浓度对泥岩夹层软化的影响

卤水浓度对泥岩夹层力学参数影响微弱,甚至比试验误差还小,如图 6 所示。在卤水浓度变化的范围内,泥岩夹层单轴抗压强度和弹性模量的最大

极差分别为 0.047 MPa、0.127 GPa, 小于误差值, 而方差分析中的 F 比值远远小于 F 临界值, 所以卤水浓度的变化对泥岩夹层强度的影响很小。实际造腔过程中当泥岩夹层处于高温、高浓度溶液下时, 在泥岩表面会有析出的 NaCl 晶体附着, 从而影响溶液分子进入泥岩夹层内部, 但这种情况只在特定状态下发生, 所以卤水浓度对泥岩夹层软化基本上没有贡献。

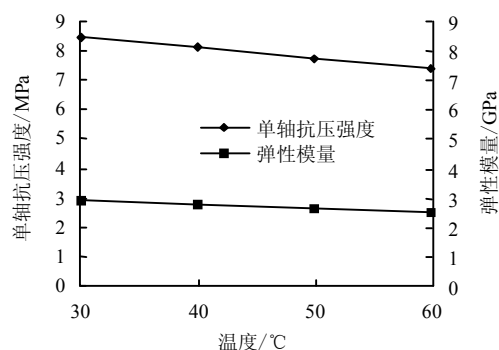


图5 温度与泥岩夹层力学参数关系

Fig.5 Relationships between temperature and mechanical parameters of mudstone interlayer

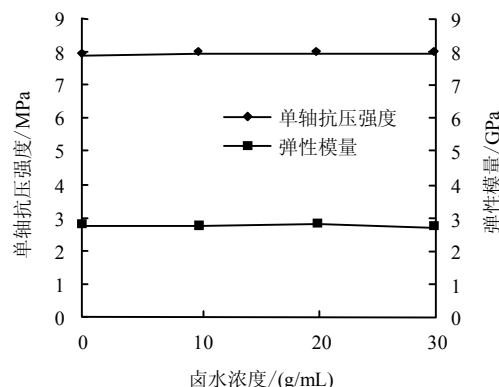


图6 卤水浓度与泥岩夹层力学参数关系

Fig.6 Relationships between brine density and mechanical parameters of mudstone interlayer

4 权值分析

4.1 建立递阶层次结构模型

层次分析法作为一种决策过程, 提供了一种表示决策因素测度的基本方法^[18]。在递阶层次结构下, 它根据所规定的相对标度——比例标度, 依靠决策者的判断, 对同一层次有关因素的相对重要性进行两两比较, 并按层次从上到下合成方案对于决策的目标的测度。而测度的最终结果是以方案的相对重要性的权重表示。

递阶层次结构一般分为 3 层: 目标层、准则层和措施层。此次试验建立的结构中, 目标层为各因

素的权值, 准则层为泥岩夹层单轴抗压强度和弹性模量, 措施层为 3 个影响因素。

4.2 构造两两比较判断矩阵

利用回归分析的方法, 将任意两个影响因素对泥岩夹层单轴抗压强度和弹性模量做二元线性回归, 回归之前应对原始数据进行预处理, 使得各影响因素与两个力学参数呈较好的线性关系, 同时对影响因素进行相关系数检验^[19]。通过计算, 得到标准回归系数表, 见表 8、9。标准回归系数体现的是两个因素一起作用于泥岩夹层时的相对重要性, 利用该系数做两两比较, 取其绝对值用于构建判断矩阵 A 和 B , 其中 A 为单轴抗压强度的判断矩阵, B 为弹性模量的判断矩阵。

表8 单轴抗压强度标准回归系数表
Table 8 Standard regression coefficients of uniaxial compressive strength

因素	温度	卤水浓度	浸泡时间
温度		-0.173 00	-0.173 00
卤水浓度	0.007 35		0.007 35
浸泡时间	-0.959 00	-0.959 00	

表9 弹性模量标准回归系数表
Table 9 Standard regression coefficients of elastic modulus

因素	温度	卤水浓度	浸泡时间
温度		-0.236 0	-0.236 0
卤水浓度	-0.013 9		-0.013 9
浸泡时间	-0.961 0	-0.961 0	

判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 23.537 & 4 & 0.180 & 4 \\ 0.042 & 5 & 1.000 & 0 & 0.007 & 7 \\ 5.543 & 3 & 130.476 & 2 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 16.978 & 4 & 0.245 & 6 \\ 0.058 & 9 & 1.000 & 0 & 0.014 & 5 \\ 4.072 & 0 & 69.136 & 7 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

经求解得到判断矩阵 A 的最大特征值是 3.000 02, 对应的特征向量为 $(-0.177 \ 5, -0.007 \ 5, -0.984 \ 1)^T$, 对特征向量归一化后得到各影响因素的权重向量 $\omega = (0.152, 0.006, 0.842)^T$; B 的最大特征值是 2.999 94, 对应特征向量为 $(0.238 \ 5, 0.014 \ 0, 0.971 \ 1)^T$, 对特征向量归一化后得到各影响因素的权重向量 $\omega = (0.195, 0.011, 0.794)^T$ 。

4.3 一致性检验

在计算单准则下排序权重向量时, 必须进行一致性检验。通过式 (1) 计算判断矩阵随机一致性比例

CR , 当 $CR < 0.1$ 时, 认为判定矩阵具有满意的一致性。式中 RI 为平均随机一致性指标, 查表得到当 $n = 3$ 时, $RI = 0.52$ 。

$$CR = \frac{\lambda_{\max}(A) - n}{(n-1)RI} \quad (1)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; n 为判断矩阵的阶数。

经计算得到 $CR(A) = 0.000\ 02$, $CR(B) = 0.000\ 05$, 判断矩阵 A 和 B 的 CR 值都远远小于 0.1 , 因此, 判断矩阵 A 和 B 具有满意的一致性。由此可知温度、卤水浓度和浸泡时间 3 个因素对泥岩单轴抗压强度影响权值大小依次为: 0.152 、 0.006 、 0.842 ; 对弹性模量影响权值大小依次为 0.195 、 0.011 、 0.794 , 其中温度和浸泡时间两个因素对泥岩夹层软化影响权重都达到 98% 以上, 而浸泡时间权重都能达到 80% 左右, 可见卤水浓度对泥岩夹层软化几乎不起任何作用, 此结论完全和前面的极差分析和方差分析一致。

5 泥岩夹层软化方程

根据前面的研究, 在泥岩夹层软化影响的因素中, 卤水浓度作用很小, 在本次建立的软化方程中忽略不计。将泥岩夹层单轴抗压强度与弹性模量分别对温度和浸泡时间两个因素作二元线性回归, 并对回归公式进行 F 检验。

$$\sigma = 14.189 - 0.0342a - 0.27b \quad (2)$$

式中: σ 为泥岩夹层单轴抗压强度; a 为温度; b 为浸泡时间。

$$E = 4.804 - 0.014\ 1c - 0.082\ 3d \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; c 为温度; d 为浸泡时间。

经过计算可以得到, 式 (2) F 值为 123.928 , 式 (3) F 值为 302.683 , 远远大于置信区间为 95% 时的 F 临界值 3.8 , 即认为回归方程高度显著, 证明温度和浸泡时间两个因素与单轴抗压强度和弹性模量有很好的线性关系。从回归方程的各影响因素的系数中也同样体现着浸泡时间在泥岩夹层软化中举足轻重的作用。

6 结 论

(1) 在试验研究的 3 个因素中, 浸泡时间对泥岩夹层软化的贡献最大。随着浸泡时间的延长, 溶液从试样表面逐渐侵入显结构面, 弱化结构面力学参数, 而后再通过显结构面慢慢侵蚀到微小的孔裂

隙, 使得泥岩夹层强度进一步降低。

(2) 温度对软化泥岩夹层有比较明显的作用, 其单轴抗压强度和弹性模量降低趋势比较均匀。

(3) 卤水浓度对泥岩夹层软化效果不明显, 实际盐岩造腔过程中可以不考虑其影响。

(4) 通过二元线性回归建立了关于温度和浸泡时间的泥岩夹层软化方程, 为今后的泥岩夹层垮塌机制研究提供一定的理论基础。

参 考 文 献

- [1] YOSHIDA N, MORGENSTERN N R, CHAN D H. Analysis of softening effects in mudstone and over-consolidated clays[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, 31(1): 121—130.
- [2] YOSHIDA N, MORGENSTERN N R, CHAN D H. Finite element analysis of softening in fissured, over-consolidated clays and mudstones[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, 28(1): 51—61.
- [3] 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 Hong-wei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. *Journal of Tongji University*, 2007, 35(7): 866—870.
- [4] 冒海军, 郭印同, 王光进, 等. 黏土矿物组构对水化作用影响评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2723—2728.
MAO Hai-jun, GUO Yin-tong, WANG Guang-jin, et al. Evaluation of impact of clay mineral fabrics on hydration process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2723—2728.
- [5] 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 Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, 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.
- [6] 周翠英, 朱凤贤, 张磊. 软岩饱水试验与软化临界现象研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1709—1715.

- ZHOU Cui-ying, ZHU Feng-xian, ZHANG Lei. Research on saturation test softening and its critical phenomena of soft rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1709—1715.
- [7] 朱凤贤, 周翠英. 软岩遇水软化的耗散结构形成机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34(3): 525—532.
- ZHU Feng-xian, ZHOU Cui-ying. Forming mechanism of dissipative structure in the softening process of saturated soft rocks[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 2009, 34(3): 525—532.
- [8] 张永安, 李峰, 陈军. 红层泥岩水岩作用特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 22—26.
- ZHANG Yong-an, LI Feng, CHEN Jun. Analysis of the interaction between mudstone and water[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(1): 22—26.
- [9] 滕宏伟, 任松, 姜德义, 等. 共和隧道页岩饱水软化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 2657—2662.
- TENG Hong-wei, REN Song, JIANG De-yi, et al. Experimental study of mechanical properties of water-saturated weaken shale in gonghe tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 2657—2662.
- [10] 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 Chang-wu, LU Shi-liang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 28—31.
- [11] 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 Chun-he, MAO Hai-jun, WANG Xue-chao, et al. Study of variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2090—2098.
- [12] 李杭州, 廖红建, 孔令伟, 等. 膨胀性泥岩应力-应变关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 107—110.
- LI Hang-zhou, LIAO Hong-jian, KONG Ling-wei, et al. Experimental study of stress-strain relationship of expansive mudstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 107—110.
- [13] 高红波, 梁卫国, 杨晓琴, 等. 高温盐溶液浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 935—943.
- GAO Hong-bo, LIANG Wei-guo, YANG Xiao-qin, et al. Experimental study of mechanical property of gypsum rock soaked in hot saturated brine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 935—943.
- [14] 施锡林, 李银平, 杨春和, 等. 卤水浸泡对泥质夹层抗拉强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2301—2308.
- SHI Xi-lin, LI Yin-ping, YANG Chun-he, et al. Test study of influence of brine on tensile strength of muddy intercalation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(11): 2301—2308.
- [15] 《正交试验法》编写组. 正交试验法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.
- [16] 王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [17] 杨虎, 刘琼荪, 钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [18] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989.
- [19] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.