

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.034

天然与饱水状态下石膏岩蠕变试验研究

刘秀敏¹, 蒋玄苇¹, 陈从新¹, 夏开宗^{1,2}, 周意超^{1,2}, 宋许根^{1,2}

(1. 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, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 石膏岩的饱水软化蠕变特性是影响石膏矿采空区安全评价的重要因素。以荆门石膏矿岩为研究对象, 开展天然与饱水状态下的单试样逐级增量加载试验, 分析了饱水软化作用下石膏岩的蠕变特性, 选取西原模型描述石膏岩的本构关系。分析结果可得, 饱水试样总蠕变量大于天然试样; 饱水试样蠕变破坏强度 (11 MPa) 是天然试样蠕变破坏强度 (21.5 MPa) 的 0.54 倍, 长期强度 (10 MPa) 是天然试样长期强度 (19.5 MPa) 的 0.49 倍。利用西原模型对蠕变曲线进行拟合分析拟合参数可知, 饱水试样参数 E_1 是天然试样的 0.1~0.5 倍, η_1 是天然试样的 0.2~0.7 倍, E_2 是天然试样的 2~10 倍。以上结论均表明饱水试样的蠕变特性更加明显。分析讨论饱水软化作用对石膏岩蠕变特性影响机制可知, 荆门石膏岩软化作用主要由物理软化作用及化学软化作用耦合而成, 物理软化作用主要为静水作用下的孔压效应, 化学软化作用主要为石膏岩的重结晶作用。试验分析结果可为石膏矿采空区安全评价提供依据, 具有重要的工程实际意义。

关键词: 石膏岩; 蠕变; 饱水; 长期强度; 西原流变模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0277 - 07

Study of creep characteristics of gypsum rock in natural and saturated states

LIU Xiu-min¹, JIANG Xuan-wei¹, CHEN Cong-xin¹, XIA Kai-zong^{1,2}, ZHOU Yi-chao^{1,2}, SONG Xu-gen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The saturated and softening creep characteristics of gypsum rock have important impacts in the safety evaluation of gypsum mine goaf. Taking Jingmen gypsum mine as the research object, the saturated and softening creep characteristics of gypsum rock are analyzed by carrying out single sample step by step increment load experiment in natural or saturated conditions; the constitutive relation of gypsum rock has been described by Nishihara model. The results show that the total creep deformation of saturated states is large than the natural; the average strength (11 MPa) of saturated samples is 0.54 times of the natural samples (21.5 MPa), the average long-term strength of saturated samples (10 MPa) is 0.49 times of natural samples (19.5 MPa); using the Nishihara model to fit the creep curve and analyze the creep parameter; the fitting results show that the creep parameter E_1 is 0.1-0.5 times of natural sample; η_1 is 0.2-0.7 times; E_2 is 2-10 times. The above results indicate that the creep characteristics of saturated samples are more obvious than the natural ones. By analyzing the mechanism of creep characteristics of water-softening gypsum rock, we can draw the conclusion: the water-softening of gypsum rock includes the hole-pressure effect under hydrostatic pressure in physical layer aspect and recrystallization in chemical layer aspect. The resulting findings can provide basis for safety evaluation of gypsum rock goaf, which has important actual engineering significance.

Keywords: mining engineering; gypsum mine; creep; water-saturated; long-term strength; visco-elastoplastic model

1 引 言

石膏岩蠕变特性及本构关系是石膏矿采空区安全评价中的重要课题, 饱水软化作用对石膏岩蠕

变特性的影响尤为明显^[1-3], 研究天然与饱水状态下石膏岩的蠕变特性对石膏矿采空区的稳定性分析和预测具有明确的现实意义。

朱合华等^[4]通过对比干燥及饱水状态下蠕变试

收稿日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51274188)

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China(51274188).

第一作者简介: 刘秀敏, 女, 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要从事边坡及地下工程方面的研究工作。E-mail: xmliu@whrsm.ac.cn

通讯作者: 夏开宗, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: xiakaizong1988@sina.com

验结果,探讨含水率对蠕变特性的影响。徐卫亚等^[5]进行饱和状态下绿片岩及大理岩的三轴流变试验,基于得到的流变数据研究其流变特性。李鹏等^[6]通过室内不同含水率剪切蠕变试验,研究了含水率对软弱结构面蠕变特性的影响,并选取 Burgers 模型对试验曲线进行拟合,探讨含水率对蠕变特性影响的内部机制。李男等^[7]分别对干燥和饱水砂岩进行剪切蠕变试验,结果表明饱水砂岩蠕变应变量和蠕变速率都较高。黄小兰等^[8]以大庆泥岩为研究对象,研究了不同含水情况的蠕变试验,表明含水率对泥岩的弹性模量、蠕变变形及稳定蠕变率等各方面都有明显的影响。刘小军等^[9]以浅变质板岩为研究对象,研究了含水率对单轴蠕变特性试验的影响,并考虑其对蠕变模型参数的影响,表明饱水度越大,蠕变参数中瞬时弹性模量、黏性模量、黏滞系数都越小。查阅文献可知,国内外关于石膏岩蠕变特性的研究较少,针对饱水软化作用对石膏岩蠕变特性影响的研究更少,有必要开展试验进一步研究天然及饱水状态下石膏岩的蠕变特性。

本研究以荆门石膏矿为实际工程背景,开展了天然与饱水状态下石膏岩单试样逐级增量加载试验,对试验数据进行修正,在此基础上分析天然与饱水状态下石膏岩的蠕变特性,通过直接筛选法及后验排除法辨识选取西原模型描述其蠕变规律,分析讨论了饱水软化作用对石膏岩蠕变特性的影响机制。

2 试样制备及实验设备

试样为荆门神龙石膏岩,岩体完整性好。按照实验仪器及国际岩石力学学会标准要求,制备若干 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形岩样,并挑选外表完整及波速较为一致的试样开展试验。从常规三轴力学结果可知这种石膏矿的强度的离散性较小^[10]。

采用 RC-2000 微机控制岩石伺服三轴蠕变试验机(见图 1)进行石膏矿天然及饱水状态下的蠕变试验。仪器主要配置有 2 000 kN 刚度 10 GN/m 的轴向加载框架、70 MPa 的三轴压力室、交流伺服机电及控制器的蠕变加载装置、2 000 kN 的高精度负荷传感器、直径 ϕ 分别为 50、75、100 mm 的变形传感器各一套和 0~25 mm 的数显千分表等。轴向测量范围为 2 000 kN,围压范围为 0~70 MPa,围压测量精度为 $\pm 2\%$ 。轴向变形测量范围为 0~10 mm,径向变形测量范围为 0~5 mm,变形测量精度均为 $\pm 0.5\%$ 。环境要求:在稳定的基础上安装,室温在 10~35 范围内,相对湿度要求小于 80%;周围无震动,无腐蚀性介质和无较强电磁场干扰;

电源电压的波动范围不硬超过 $\pm 10\%$,计算机及控制器电源单独接入。



图 1 实验仪器

Fig.1 Laboratory apparatus

3 试验方法

采用真空饱水法制备饱水试样,考虑到石膏岩孔隙率较低,渗透率较小,饱水方法在规范规定的基础上进行相应改进,并将试样放入密闭潮湿空气中保持湿润状态(见表 1),饱水溶液采用饱和硫酸钙溶液。

考虑到蠕变试验时间较长,稳定蠕变实验室温度为 (25 ± 5) ,湿度为 $(75 \pm 10)\%$ 。表 2 为天然及饱水试样的蠕变试验方案,其中试样 3-1、8-1 为天然试样,试样 10-2、9-5 为饱水试样,各试样初始加载应力根据相同条件下单轴抗压确定。

表 1 试件饱水方法

Table 1 Saturation method of sample

步骤	操作
	干燥状态下抽真空 2 h
	保持真空状态,从下部加水至试样高度 1/5,抽真空 4 h
	进水到水面至试样高度的 2/5,关闭进水阀门,抽真空 4 h
	进水到水面至试样高度的 3/5,关闭进水阀门,抽真空 4 h
	进水到水面至试样高度的 4/5,关闭进水阀门,抽真空 4 h
	进水到水面至试样高度的 5/5,关闭进水阀门,抽真空 4 h
	进水高出试样顶端 2 cm,关闭进水阀门,静置 2 h
	打开放气阀,保持试样在水中静置 24 h

表 2 试验方案

Table 2 Test plan

编号	状态	试样尺寸 (mm×mm)	波速 (m/s)	初始轴向应力 (MPa)
3-1	天然	$\phi 48.51 \times 99.74$	3 030	7
8-1	天然	$\phi 49.65 \times 99.06$	3 488	7
10-2	饱水	$\phi 48.56 \times 99.72$	3 448	3
9-5	饱水	$\phi 48.98 \times 100.04$	3 704	3

4 试验结果及分析

4.1 试验结果

图 2 为试验破坏后试样。试样均以劈裂破坏剪

切破坏为主。

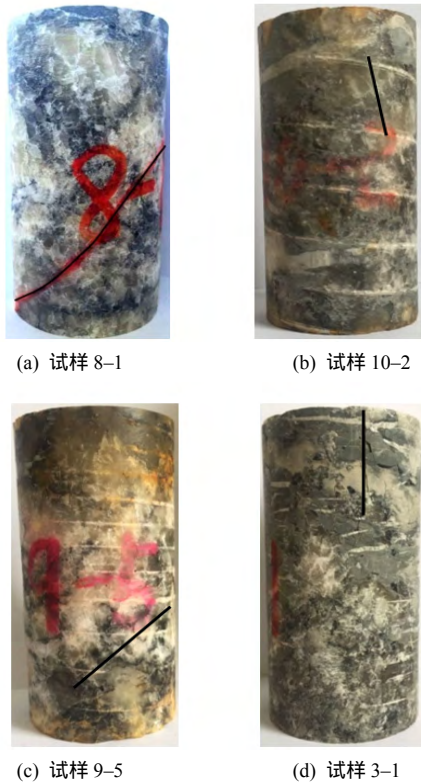


图2 破坏后的试样
Fig.2 Samples after destruction

图 3 为 4 块试样利用单试样逐级增量加载法获得的试验曲线。图 4 为考虑历史应力影响，利用 Boltzmann 法叠加原理处理获得的分别加载曲线，表 3 统计了试样在各级轴向应力下的蠕变参数。

4.2 饱水软化作用对石膏岩蠕变特性影响分析

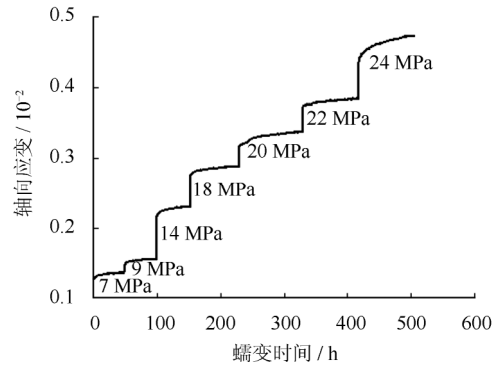
分析天然试样及饱水试样蠕变曲线（见图 3）发现，荆门石膏岩蠕变存在衰减蠕变阶段及等速蠕变阶段，即荆门石膏岩的总变形量为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_{cp} + \varepsilon_{cm} \quad (1)$$

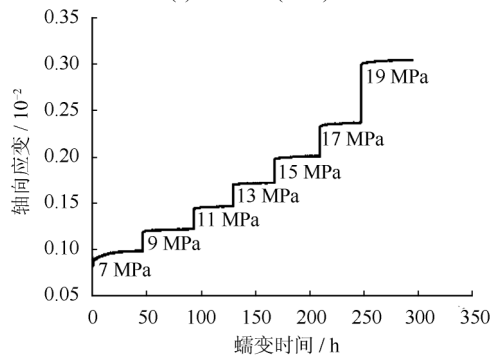
式中： ε 为总变形量； ε_0 为弹性变形量； ε_c 为总蠕变变形量； ε_{cp} 为衰减蠕变变形量； ε_{cm} 为等速蠕变变形量^[11]。

为分析饱水软化作用对石膏岩蠕变特性的影响，控制饱水软化单一变量，表 4 统计 4 块试验在不同轴压下石膏岩蠕变达到稳定的时间、总蠕变量 ε_c 、衰减蠕变量 ε_{cp} 及等速蠕变量 ε_{cm} 。由表可见，（1）蠕变稳定时间是试样由衰减蠕变阶段转化为稳定蠕变阶段并保持变形稳定所需的时间，即减速蠕变阶段的曲率半径越大，试样蠕变趋于稳定的时间越长。试样 10-2（饱水）、9-5（饱水）的蠕变稳定时间是试样 8-1（天然）、3-1（天然）的 2~3 倍，

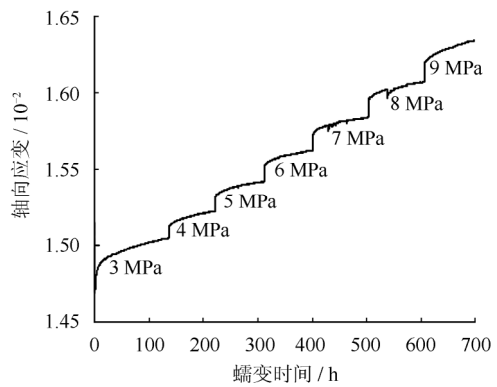
即与天然试样相比饱水试样蠕变趋于稳定的时间更长，蠕变特性更加明显；（2）饱水试样的总蠕变量是天然试样的 3~5 倍；等速蠕变量是天然试样的 2~5 倍；衰减蠕变量是天然试样的 4~7 倍，即饱



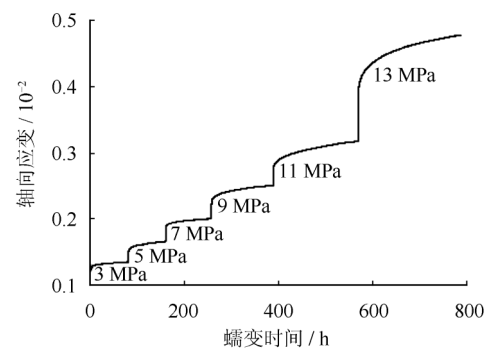
(a) 试样 3-1(天然)



(b) 试样 8-1(天然)



(c) 试样 10-2(饱水)



(d) 试样 9-5(饱水)

图3 单试样逐级增量加载曲线

Fig.3 Stepwise increment loading curves of single sample

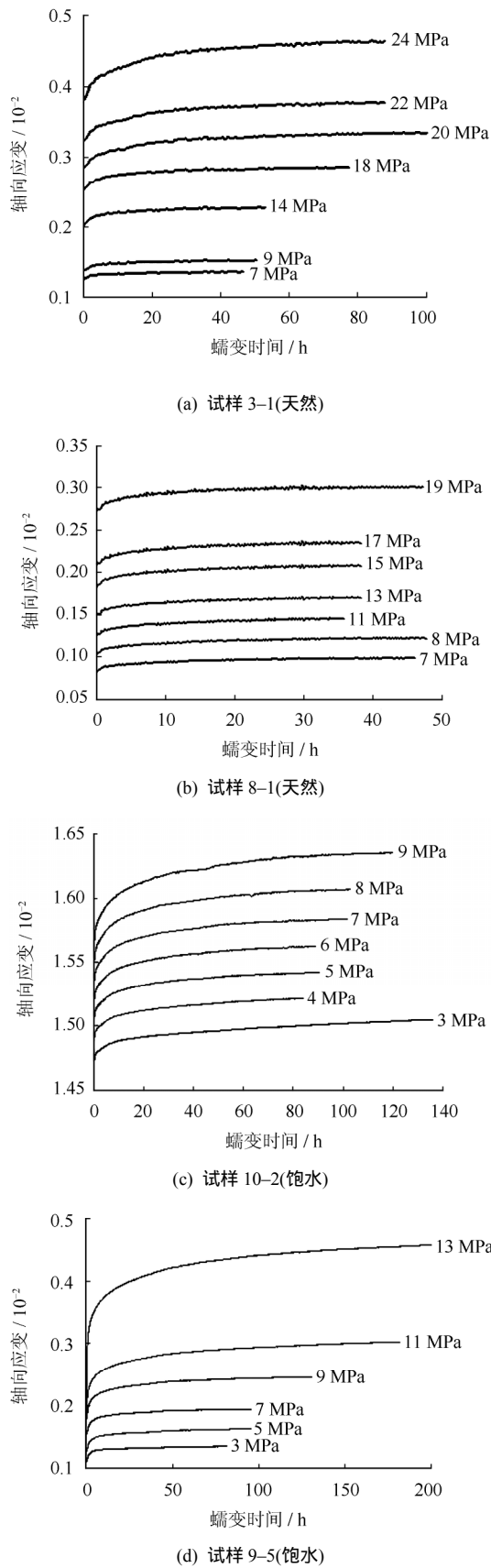


图4 试样分别加载曲线

Fig.4 Each loading curves of samples

水试样每个阶段的蠕变量均明显大于天然试样，表明饱水试样的蠕变特性更加明显。

表3 蠕变参数统计

Table 3 Creep parameter statistics

试样	轴向压力 / MPa	稳定时间 / h	总蠕变量 / (10 ⁻² mm)	衰减蠕变量 / (10 ⁻² mm)	等速蠕变量 / (10 ⁻² mm)
3-1 (天然)	7	46.51	0.85	0.65	0.20
	9	50.51	1.21	0.93	0.29
	14	53.01	2.10	1.81	0.28
	18	77.45	2.86	2.46	0.40
	20	100.4	4.65	3.97	0.68
	22	87.9	4.78	3.86	0.93
	24	90.41	7.35	6.03	1.32
8-1 (天然)	7	46	1.21	1.03	0.18
	9	47.7	1.51	1.25	0.26
	11	35.7	1.67	1.33	0.33
	13	38.2	1.81	1.53	0.28
	15	38.2	2.08	1.73	0.35
	17	38.2	2.31	1.8	0.51
	19	47.2	2.61	2.27	0.34
10-2 (饱水)	3	136.4	2.82	1.62	1.2
	4	84.46	2.75	1.78	0.97
	5	90.63	3.16	2.22	0.95
	6	89.13	3.73	2.53	1.2
	7	102.13	4.39	3.16	1.23
	8	103.3	5.07	3.68	1.4
	9	119.97	6.28	4.66	1.63
9-5 (饱水)	3	82.14	2.15	1.64	0.51
	5	96.14	3.32	2.41	0.91
	7	96.14	3.76	2.83	0.93
	9	131.23	6.14	4.79	1.35
	11	181.96	9.52	7.09	2.43
13	219.33	17.15	13.5	3.65	

表4 不同轴压时的蠕变参数

Table 4 Creep parameters unde different axial compressions

轴压 / MPa	试样编号	稳定时间 / h	总蠕变量 / (10 ⁻² mm)	衰减蠕变量 / (10 ⁻² mm)	等速蠕变量 / (10 ⁻² mm)
7	8-1(天然)	46	1.21	1.03	0.18
	3-1(天然)	46.51	0.85	0.65	0.20
	10-2(饱水)	102.13	4.39	3.16	1.23
	9-5(饱水)	96.14	3.76	2.83	0.93
9	8-1(天然)	47.70	1.51	1.25	0.26
	3-1(天然)	50.51	1.21	0.93	0.29
	10-2(饱水)	119.97	6.28	4.66	1.63
	9-5(饱水)	131.23	6.14	4.79	1.35

4.3 饱水软化作用对石膏岩蠕变强度影响分析

表5统计了天然试样与饱水试样的蠕变强度（即试样最终破坏的应力强度）平均值，饱水试样的平均蠕变破坏强度为11 MPa，天然试样的平均蠕变破坏强度为21.5 MPa，即饱水试样的蠕变破坏强度为天然试样蠕变破坏强度的0.54倍。

4.4 饱水软化作用对石膏岩长期强度影响分析

本文利用等时应力-应变曲线簇法分析荆门石膏岩长期强度。等时应力-应变曲线簇拐点为黏弹性

表 5 饱水试样蠕变强度及天然试验蠕变强度对比
Table 5 Creep strength comparison between saturated sample and natural sample

试样编号	状态	蠕变强度 /MPa	蠕变强度平均值 /MPa
8-1	天然	24	21.5
3-1	天然	19	
10-2	饱水	9	11
9-5	饱水	13	

阶段转化为黏弹塑性阶段的节点，将这个节点定义为试样的长期强度^[12]。图 5 为分析各试样的长期强度的曲线簇，表 6 统计了天然试样和饱水试样长期强度的平均值。饱水试样的长期强度平均值为 9.5 MPa，天然试样长期强度平均值为 19.5 MPa，即饱水试样的长期强度是天然试样长期强度的 0.49 倍。

5 饱水软化作用对拟合模型参数影响分析

根据荆门石膏岩蠕变试验性态，采用西原模型描述蠕变试验曲线，利用最小二乘法获得西原模型模拟参数（见表 7），蠕变方程为^[13]

当 $\sigma < \sigma_s$ 时，

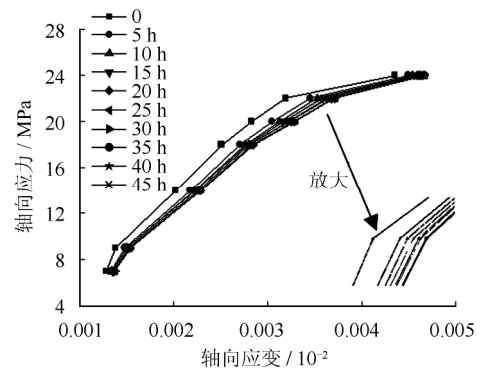
$$\varepsilon = \sigma_0 \left[\frac{E_1 + E_0}{E_1 E_0} - \frac{1}{E_1} \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \quad (2)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时，

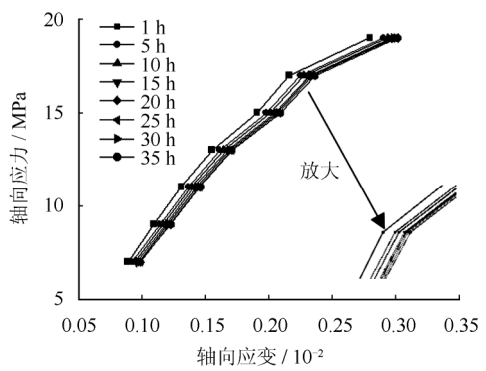
$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_2} t \quad (3)$$

式中： σ 为轴向应力； E_0 为材料的弹性模量； E_1 为材料的黏弹性模量； t_1 为卸载时间； η_1 、 η_2 为黏滞系数； σ_s 为屈服应力。为分析饱水软化作用对石膏岩西原模型拟合参数的影响，控制饱水软化单一变量，表 8 统计了不同轴压不同试样下的西原流变模型参数。分析可知，饱水软化作用对荆门石膏岩西原模型拟合参数影响较大，参数 E_1 、 η_1 表征衰减蠕变阶段的曲线性态^[14]，饱水试样参数 E_1 是天然试样的 0.1~0.5 倍， η_1 是天然试样的 0.2~0.7 倍， E_1 、 η_1 都有明显变小的趋势，即饱水试样的衰减蠕变阶段的曲率半径越大，试样蠕变趋于稳定的时间越长，与蠕变稳定时间较长结果吻合；参数 E_2 表征等速蠕变阶段的曲线性态^[14]，饱水试样参数 E_2 是天然试样的 2~10 倍， E_2 有明显变大的趋势，即饱水试样的等速蠕变阶段的蠕变速率大，蠕变特性更加明

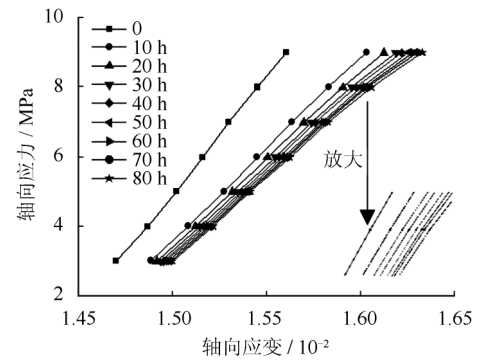
显。



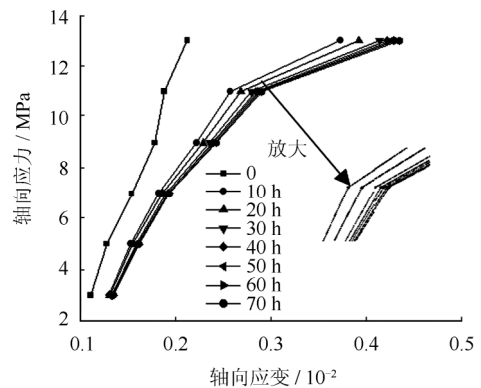
(a) 试样 3-1(天然)



(b) 试样 8-1(天然)



(c) 试样 10-2(饱水)



(d) 试样 9-5(饱水)

图 5 等时应力-应变曲线簇

Fig.5 Isochronous stress-strain curves of samples

表 6 饱水试样长期强度及天然试验长期强度对比
Table 6 Comparison between long-term strengths of saturated samples and natural samples

试样编号	饱水状态	长期强度 /MPa	长期蠕变强度平均值 /MPa
8-1	天然	22	19.5
3-1	天然	17	
10-2	饱水	8	9.5
9-5	饱水	11	

表 7 试样西原流变模型拟合参数
Table 7 Fitting paraments of samples using Nishihara model

试样	应力 /MPa	E_0 /MPa	E_1 /MPa	η_1 / (MPa·s)	η_2 / (MPa·s)	相关系数 R
3-1 (天然)	7	5 493	10.75×10^4	4.17×10^5	1.30×10^6	0.912 6
	9	6 484	8.57×10^4	3.11×10^5	3.59×10^6	0.957 2
	14	6 888	7.53×10^4	3.10×10^6	6.60×10^6	0.984 7
	18	7 034	7.79×10^4	5.26×10^5	1.36×10^7	0.976 1
	20	6 977	5.12×10^4	6.08×10^5	1.59×10^7	0.993 4
	22	6 779	5.01×10^4	6.09×10^5	1.57×10^7	0.997 8
	24	5 354	3.12×10^4	8.81×10^5	4.44×10^6	0.962 3
8-1 (天然)	7	8 346	4.55×10^4	3.87×10^5		0.983 7
	9	9 538	8.04×10^4	3.39×10^5	0.70×10^6	0.981 4
	11	8 612	1.00×10^4	4.23×10^5	1.29×10^6	0.983 8
	13	8 685	9.14×10^4	3.05×10^5	2.41×10^6	0.981 0
	15	8 069	6.97×10^4	6.48×10^5	1.25×10^6	0.979 9
	17	8 074	9.63×10^4	3.70×10^5	4.16×10^6	0.980 2
	19	6 911	7.52×10^4	5.01×10^5	2.39×10^7	0.979 8
10-2 (饱水)	7	8 346	4.55×10^4	3.87×10^5		0.983 7
	9	9 538	8.04×10^4	3.39×10^5	0.70×10^6	0.981 4
	11	8 612	1.00×10^4	4.23×10^5	1.29×10^6	0.983 8
	13	8 685	9.14×10^4	3.05×10^5	2.41×10^6	0.981 0
	15	8 069	6.97×10^4	6.48×10^5	1.25×10^6	0.979 9
	17	8 074	9.63×10^4	3.70×10^5	4.16×10^6	0.980 2
	19	6 911	7.52×10^4	5.01×10^5	2.39×10^7	0.979 8
9-5 (饱水)	3	2 765	1.41×10^4	3.68×10^4	1.50×10^6	0.908 1
	5	3 914	1.84×10^4	9.67×10^4	3.49×10^6	0.997 9
	7	4 585	2.15×10^4	8.68×10^4	4.88×10^6	0.997 8
	9	4 971	1.76×10^4	1.37×10^5	6.00×10^6	0.996 7
	11	5 391	1.48×10^4	1.87×10^5	6.01×10^6	0.997 8
	13	4 531	0.96×10^4	1.88×10^5	5.99×10^6	0.957 6

表 8 不同轴压时的西原模型参数
Table 8 Nishihara model parameters under different axial pressures

轴压 /MPa	试样	E_0 /MPa	E_1 /MPa	η_1 / (MPa·s)	η_2 / (MPa·s)
7	8-1(天然)	8 346	4.55×10^4	3.87×10^5	
	3-1(天然)	5 493	10.75×10^4	4.17×10^5	1.30×10^6
	10-2(饱水)	457	1.52×10^4	1.99×10^5	6.93×10^6
	9-5(饱水)	4 585	2.15×10^4	8.68×10^4	4.88×10^6
9	8-1(天然)	9 538	8.04×10^4	3.39×10^5	0.70×10^6
	3-1(天然)	6 484	8.57×10^4	3.11×10^5	3.59×10^6
	10-2(饱水)	577	1.23×10^4	2.00×10^5	6.95×10^6
	9-5(饱水)	4 971	1.76×10^4	1.37×10^5	6.00×10^6

6 饱水软化作用对石膏岩蠕变特性影响机制讨论

岩石饱水软化作用主要分为物理软化作用及化学软化作用^[15]。物理软化作用主要包括静水作用下的孔压效应及动水作用下的渗透力，观察外表及扫描图可知(见图 6)，荆门石膏岩由浅色区及深色区组成。浅色区晶体节理完全，晶面平整光滑；深色区充填细小片状矿物颗粒，小孔隙发育，因此荆门石膏岩有发生物理软化作用的条件。考虑到荆门石膏岩孔隙率较小，主要是静水作用下的孔压效应起作用。

化学软化指水与岩石矿物发生化学反应，如溶解、吸水膨胀及水中离子自身反应的生成物充填岩石空隙等对岩石强度、变形产生的弱化作用。对比浅色区饱水前后的电镜扫描图发现(见图 6)，饱水前石膏晶体为平整有序的晶面，层次清晰紧密；饱水后石膏晶体出现了明显的刀砍纹，层次较为混乱松散，即化学软化作用主要为重结晶作用^[10]。

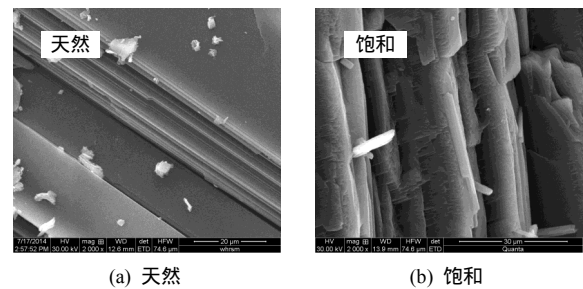


图 6 天然石膏岩和饱水硫酸钙溶液饱水后扫描电镜图
Fig.6 SEM graphs of natural and saturated samples

7 结 论

(1) 与天然试样相比，饱水试样蠕变稳定时间更长，每个阶段的蠕变量均明显大于天然试样，总蠕变量是天然试样的 3~5 倍，即饱水试样的蠕变特性更加明显。

(2) 饱水试样的蠕变破坏强度(11 MPa)是天然试样蠕变破坏强度(21.5 MPa)的 0.54 倍；长期强度(10 MPa)是天然试样长期强度(19.5 MPa)的 0.49 倍，即饱水后石膏岩的强度大幅度降低。

(3) 采用西原流变模型对荆门石膏岩拟合并分析拟合参数可知，饱水试样参数 E_1 是天然试样的 0.1~0.5 倍， η_1 是天然试样的 0.2~0.7 倍， E_2 是天然试样的 2~10 倍，即饱水试样的衰减蠕变半径较大，试样的等速蠕变阶段蠕变速率较大，蠕变特性更加明显。

(4) 荆门石膏岩软化由物理软化作用及化学软化作用耦合而成, 物理软化作用主要为静水作用下的孔压效应, 化学软化作用主要为石膏岩的重结晶作用。

参考文献

- [1] 冶金部长沙矿冶研究所岩石力学研究组. 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 152 - 156.
LIU Xiong. Overview of rock rheology[M]. Beijing: Geological Press, 1994: 152 - 156.
- [2] 孙钧. 岩石蠕变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081 - 1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081 - 1106.
- [3] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 106 - 395.
SUN Jun. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999: 106 - 395.
- [4] 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 He-hua, YE Bin. Oxperimental study on mechanical properties of rock creep in saturation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1791 - 1796.
- [5] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531 - 537.
XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, YANG Song-lin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (I) :experimental results[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 531 - 537.
- [6] 李鹏, 刘建, 朱杰兵, 等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1865 - 1871.
LI Peng, LIU Jian, ZHU Jie-bing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1865 - 1871.
- [7] 李男, 徐辉, 胡斌. 干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 439 - 443.
LI Nan, XU Hui, HU Bin. Shear creep characteristics of sandstone under dry and saturated states[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 439 - 443.
- [8] 黄小兰, 杨春和, 刘建军, 等. 不同含水情况下的泥岩蠕变试验及其对油田套损影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3477 - 3482.
HUANG Xiao-lan, YANG Chun-he, LIU Jian-jun, et al. Experimental study on mudstones creep behavior under different water contents and its effect on casing damage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.2): 3477 - 3482.
- [9] 刘小军, 张永兴, 王桂林, 等. 碎裂板岩不同含水状态下蠕变特性试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012, 13(6): 640 - 645.
LIU Xiao-jun, ZHANG Yong-xing, WANG Gui-lin, et al. Experimental of creep characteristics of cataclastic slate under different moisture states[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science)**, 2012, 13(6): 640 - 645.
- [10] 周意超, 陈从新, 刘秀敏, 等. 荆门石膏矿岩遇水软化力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 待刊.
ZHOU Yi-chao, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Experimental study on mechanical properties of water-softening gypsum rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**. Received, (to be published).
- [11] 马跃, 陈勉等, 杨春和, 等. 石膏含量对盐膏层蠕变速率影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3238 - 3244.
MA Yue, CHEN Mian-deng, YANG Chun-he, et al. Study of effects of gypsum content on salt-gypsum Stratum creep rate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 3238 - 3244.
- [12] 崔希海, 付志亮. 岩石流变特性及长期强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1021 - 1024.
CUI Xi-hai, FU Zhi-liang. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 1021 - 1024.
- [13] 陶波, 伍法权, 郭改梅, 等. 西原模型对岩石流变特性的适应性及其参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3165 - 3171.
TAO Bo, WU Fa-quan, GUO Gai-mei, et al. Flexibility of visco-elastoplastic model to rheological characteristics of rock and solution of rheological parameter[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3165 - 3171.
- [14] 袁海平, 曹平, 许万忠, 等. 岩石黏弹塑性本构关系及改进的 Burgers 蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 796 - 799.
YUAN Hai-ping, CAO Ping, XU Wan-zhong, et al. Visco elasto-plastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(6): 796 - 799.
- [15] 龚选平. 泥质粉砂岩含水率对其蠕变特性影响的研究 [硕士学位论文 D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
GONG Xuan-ping. The effect of water content on creep law of silty sand[M. S. Thesis D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006.