

# 石膏矿岩三轴压缩蠕变特性试验研究

蒋玄苇, 陈从新, 夏开宗, 刘秀敏, 周意超

(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试验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 石膏矿开采多采用房柱法, 其蠕变特性对采空区稳定性有重要影响。以荆花石膏矿为背景, 利用 RC-2000 微机控制岩石三轴蠕变试验机, 结合具体工程情况, 对荆花石膏矿岩进行围压分别为 0、2.5、5.0、7.5 MPa 的蠕变试验。分析了所得的蠕变试验数据, 选取合适的模型对试验曲线进行拟合, 利用等时应力-应变曲线簇法求得在不同围压下的长期强度。分析可知, 荆花石膏矿蠕变包含衰减蠕变和等速蠕变 2 个阶段, 轴向应力较小时只出现衰减蠕变, 轴向应变增大到一定程度时将出现衰减蠕变和等速蠕变 2 个阶段。选择西原模型对试验曲线进行拟合结果表明, 西原模型能较好地描述石膏矿的蠕变力学特性, 拟合相关系数  $R$  均大于 0.9; 在不同围压情况下长期强度与蠕变强度的比值为 0.89~0.95, 即围压对长期强度的影响不大。研究结论能为石膏矿采空区的稳定性分析提供依据。

**关 键 词:** 石膏矿岩; 蠕变; 长期强度; 西原模型

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0301 - 08

## Experimental study of creep characteristics of gypsum mine rock in triaxial compression

JIANG Xuan-wei, CHEN Cong-xin, XIA Kai-zong, LIU Xiu-min, ZHOU Yi-chao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China)

**Abstract:** Gypsum minings use room and pillar method frequently; the creep characteristics of gypsum mine have an important impact on the stability of mined-out area. In this paper, Jinghua gypsum mine is taken as the background, using RC-2000 microcomputer to control triaxial creep test machine to carry out experiments with Jinghua gypsum mine rock under confining pressures of 0, 2.5, 5.0, 7.5 MPa respectively. Creep test data obtained are analyzed, selecting the appropriate model for the test curve, and utilize the stress-strain curves method to obtain long-term strength under different confining pressures. The analytical results elaborate that the gypsum mine rock creep contains attenuation creep and constant creep; attenuation creep appears when the axial stress is small; constant creep and attenuation creep appear when the axial stress is big enough; using Nishihara model to fit the test curve. Results show that Nishihara model can describe the creep mechanical properties of gypsum mine rock nicely; the correlation coefficient  $R$  is more than 0.9. The ratio of long-term strength to creep strength is within 0.89-0.95 under different confining pressures, which means that the confining pressure has little effect on the long-term strength. The results findings will provide a basis for studying stability of gypsum mine mined out areas.

**Keywords:** gypsum mine rock; creep; long-term strength; Nishihara model

## 1 引 言

蠕变是岩石的重要力学特性之一, 是在应力保持不变的条件下应变持续增大的过程<sup>[1-2]</sup>。石膏矿普遍具有较为明显的蠕变特性, 是非金属矿中用途广、产量大、在国民经济发展中占重要地位的矿种。大多数石膏矿采用房柱法进行开采<sup>[3]</sup>, 石膏矿多为中

软岩体, 采空区石膏矿蠕变特性对矿山的安全生产和邻近居民的生产、生活和安全有重大影响。刘沐宇等<sup>[4]</sup>开展了室内纯扭转蠕变试验, 研究硬石膏的蠕变特性, 建立了其应力-应变与时间之间的函数关系式。Hoxha 等<sup>[5]</sup>通过室内试验揭示了天然石膏的蠕变行为及其受湿度的影响规律, 并提出了石膏蠕变的黏塑性本构关系模型。马跃等<sup>[7]</sup>研究了石膏含

收稿日期: 2015-10-17

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51274188)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51179187).

第一作者简介: 蒋玄苇, 女, 1991 年生, 硕士研究生, 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: 546340125@qq.com

量对盐膏层蠕变速率的影响,表明不同比例的盐、石膏、泥等组成的岩石蠕变差异很大。宋飞等<sup>[8]</sup>提出两种非牛顿提黏滞元件,建立新的蠕变力学模型,能较好地拟合石膏角砾岩试验数据。刘汝江等<sup>[9]</sup>运用 FLAC3D 软件的黏弹塑性本构模型,对石膏矿房矿柱的长期稳定性进行了数值模拟研究,确定鲁能泰山矿业在最大垂直应力下可保持长期稳定。以上研究在石膏矿岩的蠕变特性方面取得了一定的成果,但针对石膏矿蠕变特性及其长期强度的研究仍然较少。为进一步研究石膏矿的蠕变性质,本次以荆花石膏矿为工程背景,在进行瞬时单轴和三轴等常规力学试验的基础上,综合考虑荆花石膏矿现场围压情况,设置了围压为 0、2.5、5.0、7.5 MPa 时的蠕变试验。首先,对所得的蠕变曲线进行分析,获取蠕变率和蠕变强度等重要蠕变参数。其次,采用蠕变模型中的西原模型对曲线进行拟合,得到模型参数。最后,利用等时应力-应变曲线簇法求出长期强度,对比长期强度蠕变强度的大小,以期分析采空区长期稳定性提供依据。

## 2 试验设备及试验方法

### 2.1 试验装置

荆花石膏矿岩三轴压缩蠕变试验是在 RC-2000 微机控制岩石伺服三轴蠕变试验机上完成,主要研究岩石在三轴应力 ( $\sigma_1$ 、 $\sigma_2 = \sigma_3$ ) 作用下及  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2 = \sigma_3$  保持恒定的条件下变形与时间关系。仪器主要由主机、压力室、轴向力加载装置、围压加载装置组成,最大轴向试验力为 2 000 kN,试验力精度为  $\pm 1\%$ ,围压测量范围为 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  $\pm 0.5\%$ 。试验时要求室温在 10~35 范围内,相对湿度小于等于 80%,可测  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  和  $\phi 75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的试样。

### 2.2 试样制备及试验方法

石膏矿岩按照国际岩石力学学会要求,加工成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的岩样(见图 1)。直径误差小于 0.300 mm,端面不平度小于 0.020 mm,轴向偏差小于  $0.057^\circ$ ,观察外表剔除有明显缺陷和岩样,测量波速取一致性良好的试样进行试验。

试验采用单试样逐级增量加载法,为了对比单试件法,可从一个试样获得较多的岩石蠕变资料,所需试件及仪器数目也较少,试验时间相对较短,节约试验资源。单试样逐级增量加载法可避免由于试样的不均匀性和离散性导致试验结果的离散性。

是岩石室内蠕变试验中被广泛采用的方法之一。逐级增量加载法拟施加的最大轴向应力按照石膏矿岩在同一围压情况下的瞬时抗压强度确定。加载应力分 7~8 级,最大蠕变强度预估为瞬时强度的 85%,相邻两级大小差为 1~2 MPa,可确定初始加载应力大小,试验中可以根据实际情况调整加载应力增量大小。加载时,为确保试样和仪器良好接触,先施加 1~2 MPa 的初始应力,待确保试样和仪器接触后开始正式施压。为全面测量石膏矿岩的蠕变特性,正式加载 0~3 h 内,每 0.01 min 测量一次应变值;加载 3~5 h,每 1 min 测量一次应变值;加载 5 h 以后每 10 min 测量应变值。当应变值小于等于 0.001 mm/d 时认为此级蠕变达到稳定,加下一级荷载,否则继续加载,直到试样破坏为止。石膏矿力学参数和试验方案见表 1。



图 1 石膏矿试样

Fig.1 Gypsum mine samples

表 1 石膏矿力学参数和试验方案

Table 1 Mechanical parameters and testing program of gypsum mine

试样编号	含水状态	围压 /MPa	试样尺寸 /(mm×mm)	波速 /(m/s)	初始应力 /MPa
8-1	天然	0.0	$\phi 49.65 \times 99.06$	3 488	7
16-8	天然	2.5	$\phi 49.46 \times 99.51$	3 949	10
13-5	天然	5.0	$\phi 49.32 \times 100.24$	3 733	21
16-17	天然	7.5	$\phi 49.53 \times 99.69$	4 224	25

### 2.3 试验结果及分析

为便于分析石膏矿的蠕变特性,利用 Boltzmann 叠加原理处理试验数据得到分别加载曲线。图 2 为试样 8-1 在围压为  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \text{ MPa}$  时的单试样逐级增量加载曲线和经 Boltzmann 叠加原理处理后的分别加载曲线。图 3 为不同试样在不同围压下加载曲线。从图 3 中可以看出,不同围压情况下蠕变时间及蠕变变形都随着轴向应力的增大而增大,并且蠕变稳定时间也越来越长,试件越来越接近破坏。一般来说,常规蠕变随着轴向应力的增大将依次分别出现衰减蠕变、等速蠕变和加速蠕变 3 个阶段<sup>[10]</sup>:

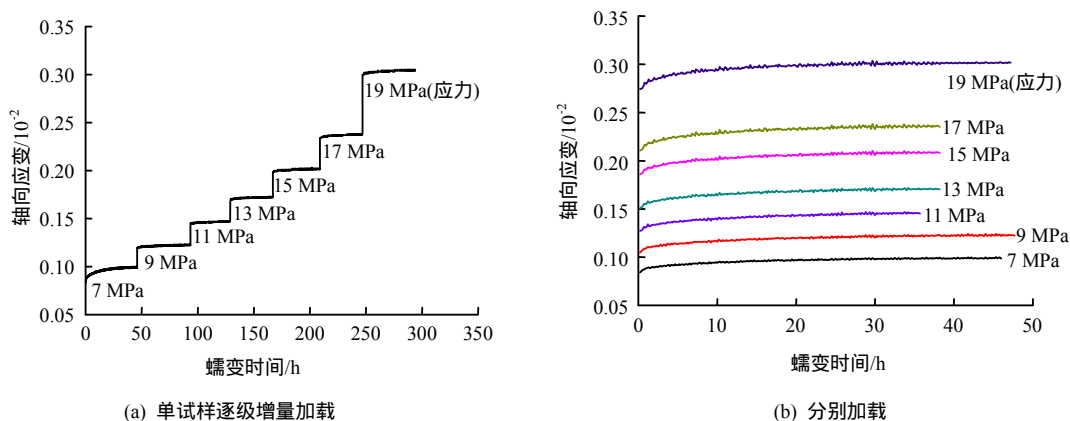


图 2 试样 8-1 单试样逐级增量加载和分别加载曲线  
 Fig.2 Loading curves of single sample step by step increment and every loading curves of sample 8-1

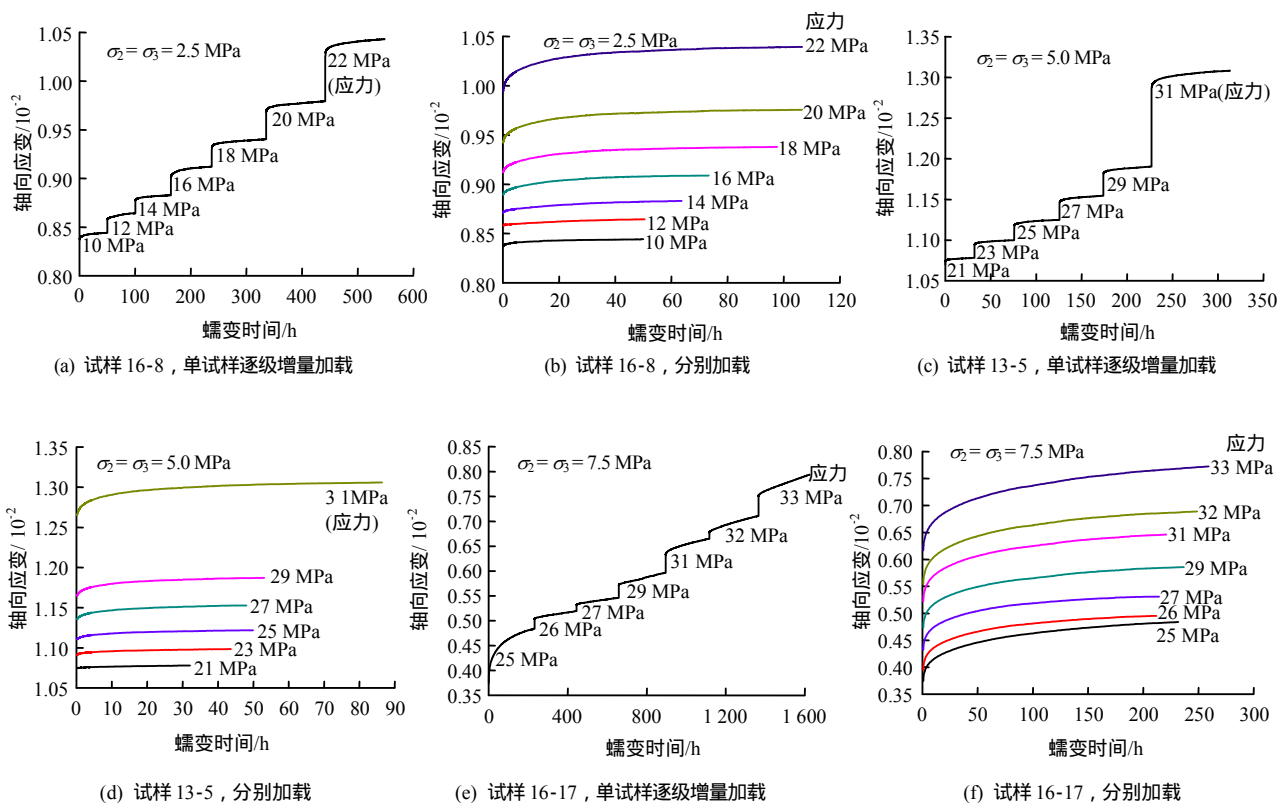


图 3 不同试样在不同围压下单试样逐级增量和分别加载曲线

Fig.3 Loading curves of single sample step by step increment load and every loading curve of samples under different confining pressures

衰减蠕变阶段，随着时间增大，其应变速率逐渐减小为 0，应变值随着时间增大为一定值；等速蠕变阶段，随着时间的增大，应变速率趋于定值，应变值将以这一定值稳定增大；加速蠕变阶段，应变速率逐渐增大，应变将趋于无穷大。若只出现衰减蠕变，为稳定蠕变，若出现等速蠕变和加速蠕变阶段，则为非稳定蠕变。分析单试样逐级加载曲线和经过 Boltzmann 叠加原理处理的分别加载曲线可知，石膏矿岩在低应力情况下值出现衰减蠕变阶段，较高

应力时可观察到明显的衰减蠕变和稳定蠕变阶段，不存在加速蠕变或加速蠕变过程太迅速不易观察到。石膏矿岩围压为 2.5、5.0、7.5 MPa 下的蠕变强度和瞬时强度见表 2，表 3 为不同试样在不同围压情况下的蠕变试样的特性参数，图 4 为破坏后的试样。图中，试样 8-1（围压为 0 MPa）只有剪切破坏，试样 16-8（围压为 2.5 MPa）、13-5（围压为 5.0 MPa）、16-17（围压为 7.5 MPa）以鼓胀破坏为主，还有少量的剪切破坏。

表 2 瞬时强度和蠕变强度

Table 2 Instantaneous strengths and creep strengths

试样编号	围压 /MPa	瞬时破坏强度 $\sigma$ /MPa	蠕变强度 $\sigma_r$ /MPa	$\frac{\sigma_r}{\sigma}$
16-8	2.5	25.76	22	0.85
13-5	5.0	32.96	31	0.94
16-17	7.5	43.48	33	0.76

### 3 石膏矿西原模型参数拟合

#### 3.1 西原模型

描述蠕变多用元件模型，元件模型的基本元件

有弹性元件、黏性元件和塑性元件。元件模型可分为黏弹性模型及黏弹塑性模型。常用的黏弹性模型有麦克斯韦模型、开尔文模型、三参量模型及伯格斯模型，常用的黏弹塑性模型有宾汉姆模型和西原模型，其中西原模型由弹性、黏弹性和黏塑性元件串联而成，其模型如图 5 所示。蠕变特性示意图和松弛特性示意图分别如图 6、7<sup>[10-11]</sup>所示。

当  $\sigma < \sigma_s$  时，蠕变方程为

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

表 3 不同试样在不同围压下蠕变特性参数

Table 3 Creep characteristic parameters of samples under different confining pressures

试样 8-1(围压 0 MPa)				试样 16-8(围压 2.5 MPa)				试样 13-5(围压 5.0 MPa)				试样 16-17(围压 7.5 MPa)			
应力 /MPa	观察时间 /h	瞬时变形 /(10 <sup>-2</sup> mm)	蠕变变形 /10 <sup>-2</sup> mm	应力 /MPa	观察时间 /h	瞬时变形 /(10 <sup>-2</sup> mm)	蠕变变形 /(10 <sup>-2</sup> mm)	应力 /MPa	观察时间 /h	瞬时变形 /(10 <sup>-2</sup> mm)	蠕变变形 /(10 <sup>-2</sup> mm)	应力 /MPa	观察时间 /h	瞬时变形 /(10 <sup>-2</sup> mm)	蠕变变形 /(10 <sup>-2</sup> mm)
7	46.0	8.77	1.10	10	50.0	73.87	0.55	21	32.1	107.54	0.27	25	231.9	37.5	10.90
9	47.7	10.86	1.36	12	50.5	75.88	0.56	23	43.7	109.26	0.61	26	211.9	39.56	9.97
11	35.7	13.05	1.47	14	63.7	77.26	1.05	25	49.9	111.25	0.94	27	214.4	43.27	9.83
13	38.2	15.53	1.51	16	73.5	79.24	1.66	27	48.1	113.86	1.43	29	236.9	47.39	11.18
15	38.2	19.10	1.70	18	97.7	81.63	2.16	29	53.1	116.86	1.85	31	220.9	52.28	12.31
17	38.2	21.66	1.85	20	106.6	84.85	2.72	31	86.4	127.21	3.37	32	248.9	55.51	13.38
19	47.2	28.08	2.06	22	106.6	90.30	3.63					33	259.4	61.77	15.97

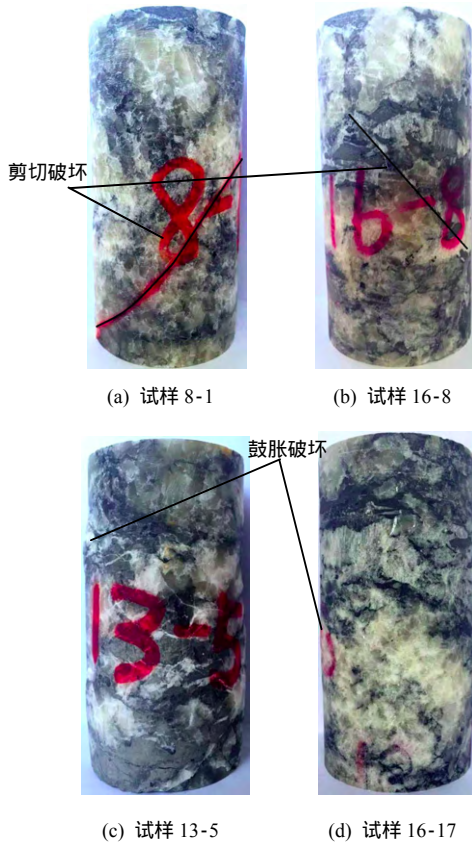


图 4 破坏后的试样

Fig.4 Samples after destruction

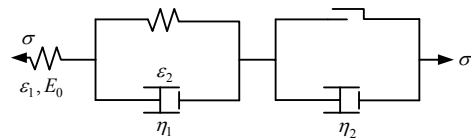


图 5 西原模型

Fig.5 Nishihara model

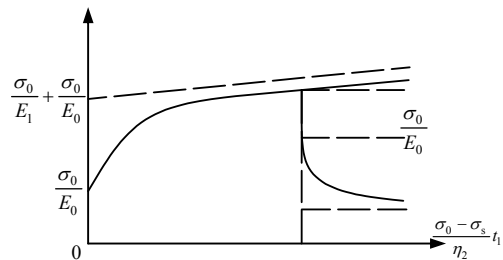


图 6 西原模型蠕变特性

Fig.6 Creep characteristics of Nishihara model

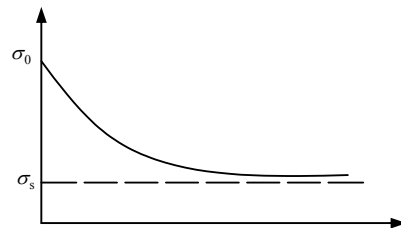


图 7 西原模型松弛特性

Fig.7 Relaxation characteristics of Nishihara model



此时塑性元件可视为一刚体，即塑性元件和与其并联的阻尼筒元件不发挥作用，相当于三参量模型，西原模型具有瞬时弹性变形，属于稳定蠕变，当  $t \rightarrow \infty$  时， $\varepsilon(\infty) \rightarrow \frac{\sigma_0}{E_\infty}$ 。

当  $\sigma > \sigma_s$  时，蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_2} t \quad (2)$$

此时应力大于塑性元件屈服应力，西原模型相当于伯格模型，具有瞬时弹性变形和随时间增加应变无限增加的特性。

### 3.2 试验数据的西原模型拟合

初步分析蠕变曲线可知，在轴向应力较低的情况下石膏矿蠕变只出现衰减蠕变阶段，属于稳定蠕变。随着轴向应力的逐渐增大，将会同时出现衰减蠕变和等速蠕变 2 个阶段但不出现加速蠕变阶段，属于非稳定蠕变。元件模型可较好地模拟衰减蠕变和等速蠕变 2 个阶段。选择元件模型时，注意到在低应力时蠕变变形量最后将趋于定值，属于稳定蠕变，其蠕变曲线可用三参量模型拟合。高应力情况下蠕变变形量将会等速增大，属于非稳定蠕变，可用伯格模型拟合。西原模型具有三参量模型和伯格模型二者共同的特点，即在应力较低的时候

可描述稳定蠕变的特性，在应力较高的时候可描述包含衰减蠕变和等速蠕变的非稳定蠕变<sup>[11]</sup>。为得到良好地拟合数据，本文采用西原模型进行拟合，用非线性最小二乘法对石膏矿围压为 0、2.5、5.0、7.5 MPa 分别加载蠕变曲线进行拟合，非线性最小二乘法的原理过程及西原模型参数识别方法见文献[12]，限于篇幅不再赘述。图 8 为试样 8-1 围压在 0 MPa 时的试验曲线和拟合曲线对比，表 4、5 为西原模型拟合的参数，拟合所得相关系数大于 0.9，即采用西原模型拟合合理。

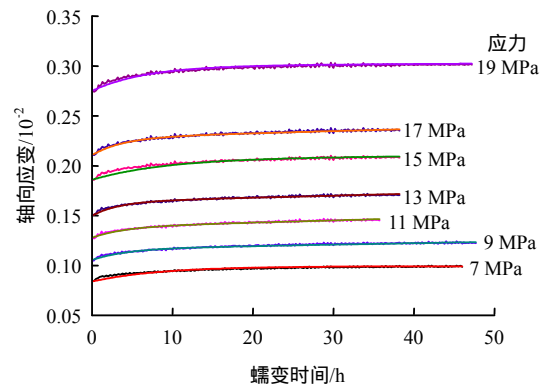


图 8 试样 8-1( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ )试验曲线和西原模型拟合对比  
Fig.8 Comparison between test curves of sample 8-1 and ones by fitting with Nishihara model under confining pressure of 0 MPa

表 4 试样 8-1、16-8 的西原模型参数

Table 4 Parameters of Nishihara model of samples 8-1, 16-8

试样 8-1 (围压 0 MPa)						试样 16-8 (围压 2.5 MPa)					
应力 /MPa	$E_0$ /MPa	$E_1$ /MPa	$\eta_1$ /(MPa·s)	$\eta_2$ /(MPa·s)	相关系数 R	应力 /MPa	$E_0$ /MPa	$E_1$ /MPa	$\eta_1$ /(MPa·s)	$\eta_2$ /(MPa·s)	相关系数 R
7	8 346	$4.55 \times 10^4$	$3.87 \times 10^5$		0.983 7	10	1 194	$2.11 \times 10^5$	$1.09 \times 10^6$	$2.55 \times 10^6$	0.991 2
9	9 538	$8.04 \times 10^4$	$3.39 \times 10^5$	$0.70 \times 10^6$	0.981 4	12	1 399	$4.10 \times 10^5$	$3.50 \times 10^6$	$0.42 \times 10^7$	0.997 5
11	8 612	$1.00 \times 10^4$	$4.23 \times 10^5$	$1.29 \times 10^6$	0.983 8	14	1 607	$1.95 \times 10^5$	$1.90 \times 10^6$	$0.67 \times 10^7$	0.997 4
13	8 685	$9.14 \times 10^4$	$3.05 \times 10^5$	$2.41 \times 10^6$	0.981 0	16	1 799	$1.00 \times 10^5$	$1.13 \times 10^6$	$1.36 \times 10^7$	0.997 9
15	8 069	$6.97 \times 10^4$	$6.48 \times 10^5$	$1.25 \times 10^6$	0.979 9	18	1 974	$0.84 \times 10^5$	$0.90 \times 10^6$	$0.90 \times 10^7$	0.997 2
17	8 074	$9.63 \times 10^4$	$3.70 \times 10^5$	$4.16 \times 10^6$	0.980 2	20	2 121	$0.74 \times 10^5$	$0.74 \times 10^6$	$1.90 \times 10^7$	0.996 5
19	6 911	$7.52 \times 10^4$	$5.01 \times 10^5$	$2.39 \times 10^7$	0.979 8	22	2 215	$0.57 \times 10^5$	$0.56 \times 10^6$	$1.71 \times 10^7$	0.995 1

表 5 试样 13-5、16-17 的西原模型参数

Table 5 Parameters of Nishihara model of samples 13-5, 16-17

试样 13-5(围压 5.0 MPa)						试样 16-17(围压 7.5 MPa)					
应力 /MPa	$E_0$ /MPa	$E_1$ /MPa	$\eta_1$ /(MPa·s)	$\eta_2$ /(MPa·s)	相关系数 R	应力 /MPa	$E_0$ /MPa	$E_1$ /MPa	$\eta_1$ /(MPa·s)	$\eta_2$ /(MPa·s)	相关系数 R
21	1 954	$1.39 \times 10^6$	$3.18 \times 10^6$	$1.59 \times 10^6$	0.994 8	25	6 880	$3.43 \times 10^4$	$9.94 \times 10^5$	$7.48 \times 10^5$	0.904 8
23	2 108	$0.34 \times 10^6$	$2.05 \times 10^6$	$4.19 \times 10^6$	0.997 5	26	6 572	$3.66 \times 10^4$	$7.48 \times 10^5$	$1.50 \times 10^6$	0.994 8
25	2 251	$0.28 \times 10^6$	$1.64 \times 10^6$	$8.43 \times 10^6$	0.996 4	27	6 255	$3.14 \times 10^4$	$1.04 \times 10^6$	$5.47 \times 10^6$	0.989 9
27	2 377	$0.23 \times 10^6$	$1.17 \times 10^6$	$5.95 \times 10^6$	0.997 3	29	6 132	$3.68 \times 10^4$	$6.47 \times 10^5$	$3.43 \times 10^6$	0.993 1
29	2 490	$1.67 \times 10^6$	$1.02 \times 10^6$	$7.54 \times 10^6$	0.995 6	31	5 919	$3.12 \times 10^4$	$1.11 \times 10^6$	$4.37 \times 10^7$	0.990 5
31	2 451	$0.09 \times 10^6$	$0.89 \times 10^6$	$12.03 \times 10^6$	0.992 7	32	5 781	$3.13 \times 10^4$	$9.94 \times 10^5$	$5.77 \times 10^6$	0.993 6
						33	5 354	$3.12 \times 10^4$	$8.81 \times 10^5$	$4.44 \times 10^6$	0.960 9

### 4 围压对石膏矿长期强度的影响

#### 4.1 等时应力-应变曲线簇法求长期强度

岩体在发生蠕变的过程中存在一个临界应力值，当施加应力小于临界应力值时，蠕变属于稳定蠕变，即随着时间的增加岩石不会发生破坏；当时间应力大于该临界应力值时，蠕变属于非稳定蠕变，即随着时间的增加岩石会发生破坏，此临界值即为长期强度<sup>[13]</sup>，有围压时的长期强度可称为广义长期强度<sup>[14-15]</sup>。目前求长期强度的方法主要有直接法和间接法。直接法即对岩石进行一系列不同应力水平的单级恒定荷载试验，是确定长期强度最正确的方法，但该方法会耗费大量的时间和试样，故不太常用。间接法是利用分级加载蠕变试验结果推算长期强度的方法。间接法包括稳定蠕变法、等时应力-应变法、加载卸载蠕变残余应变法等<sup>[16-17]</sup>，其中稳定蠕变法和等时应力-应变曲线簇法较适用于软岩，等时应力-应变曲线簇法是目前为止应用最为广泛的方法，并纳入岩石试验规范。综合分析后，此处

采用等时应力-应变曲线簇法求石膏矿岩的长期强度。

根据等时应力-应变曲线簇法可知，每条等时应力应变曲线都存在明显的转折点，转折点对应的应力大小即为长期强度。图 9 为不同围压时的等时应力-应变曲线簇。此处以围压为 5.0 MPa 时的等时应力-应变曲线簇为例，由图 9(c)中可明显观察到每条曲线均在轴向应力为 17 MPa 时产生明显的拐点，即当应力大于 17 MPa 时岩石内部产生了结构性变化，从黏弹性状态转化为黏弹塑性状态，可将 17 MPa 定为改岩石的长期强度，即  $\sigma_{\infty} = 17$  MPa。长期强度随着时间的增大有变小的趋势<sup>[18-19]</sup>，此处分析数据可得该石膏矿此特征不明显，故不作讨论。

#### 4.2 比较长期强度及蠕变强度

根据等时应力-应变曲线簇法求出围压为 0、2.5、5.0、7.5 MPa 时的长期强度，并与其蠕变强度相比（见表 6），分析可得长期强度与蠕变强度的比值为 0.89~0.95，即围压对长期强度的影响不大。

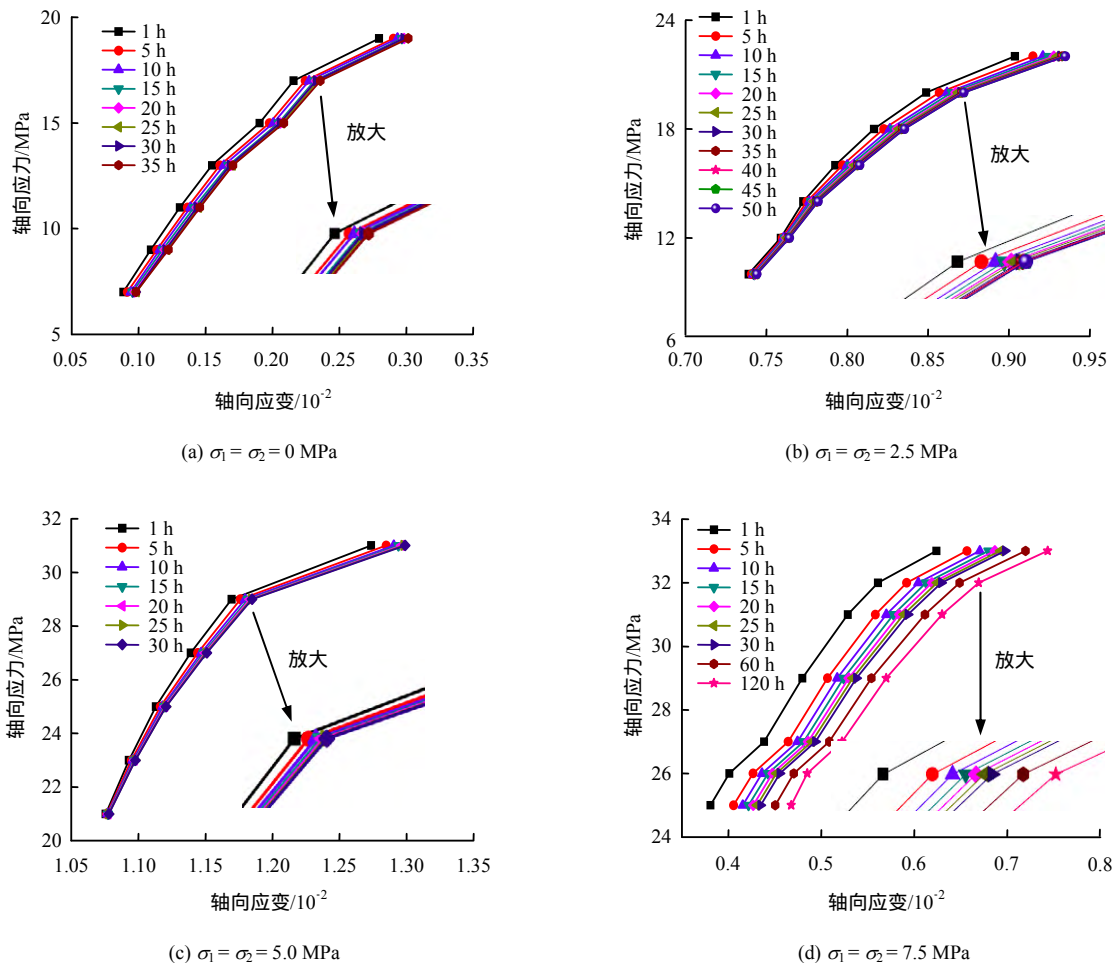


图 9 不同围压下等时应力-应变曲线簇

Fig.9 Isochronous stress-strain curves under different confining pressures

表 6 长期强度和蠕变强度对比

Table 6 Contrast of long-term strength and creep strength

试样 编号	围压 /MPa	$\sigma_{\infty}$ /MPa	$\sigma_f$ /MPa	$\frac{\sigma_{\infty}}{\sigma_f}$
8-1	0.0	17.0	19	0.89
16-8	2.5	20.0	22	0.91
13-5	5.0	29.0	31	0.90
16-17	7.5	31.5	33	0.95

## 4 结 论

(1) 荆花石膏矿在应力较小时应变随着时间的增大保持不变, 应力较大时应变随着时间的增大匀速增加, 即荆花石膏矿蠕变由衰减蠕变和等速蠕变 2 个阶段组成, 没有加速蠕变阶段或者加速蠕变阶段发生过程迅速不易观察到。

(2) 石膏矿岩在围压为 2.5、5.0、7.5 MPa 下的蠕变强度和瞬时破坏强度进行对比, 蠕变强度均小于瞬时破坏强度, 比值在 0.76 ~ 0.94 之间。

(3) 根据荆花石膏矿由存在衰减蠕变和等速蠕变 2 个阶段的特性, 对比常用元件模型, 选择西原模型利用最小二乘法对试验曲线进行拟合, 拟合结果相关系数大于 0.9, 证明西原模型能很好地描述石膏矿岩的蠕变特性。

(4) 利用等时应力-应变曲线簇法求得石膏矿岩的长期强度, 并与蠕变强度进行对比, 在围压为 0、2.5、5.0、7.5 MPa 围压下长期强度平均为蠕变强度的 0.89 ~ 0.95 倍。

## 参 考 文 献

- [1] 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.  
SUN Jun. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [2] 孙钧. 岩石流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] 张仰强. 石膏蠕变特性及矿房矿柱长期稳定性研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2010.  
ZHANG Yang-jin. Study on gypsum's properties and its room and pillar's long term stability[D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [4] 刘沐宇, 徐长佑. 硬石膏的流变特性及其长期强度的

确定[J]. 中国矿业, 2000, 9(2): 58 - 60.

- LIU Mu-yu, XU Chang-you. Rheological properties of anhydrite and determination of its long-term strength[J]. *China Mining Magazine*, 2000, 9(2): 58 - 60.
- [5] HOXHA D, GIRAUD A, HOMAND F. Modeling long-term behavior of a natural gypsum rock[J]. *Mechanics of Materials*, 2005, 37: 1223 - 1241.
- [6] HOXHA D, HOMAND F, AUVRAY C. Deformation of natural gypsum rock: Mechanisms and questions[J]. *Engineering Geology*, 2006, 86: 1 - 17.
- [7] 马跃, 陈勉, 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 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.
- [8] 宋飞, 赵法锁, 李亚兰. 石膏角砾岩蠕变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 46(3): 94 - 96.  
FEI Song, ZHAO Fa-suo, LI Ya-lan. Testing study on creep properties for gypsum breccias[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 46(3): 94 - 96.
- [9] 刘汝江, 张为民, 秦加付, 等. 石膏矿房矿柱长期稳定性数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报, 2010, 29(4): 15 - 18  
LIU Ru-jiang, ZHANG Wei-ming, QIN Jia-fu. Numerical simulation study on long-term stability of rooms and pillars in gypsum mines[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 2010, 29(4): 15 - 18.
- [10] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.  
ZHOU Wei-heng. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990.
- [11] 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 viscoelastoplastic model to rheological characteristics of rock and solution of rheological parameter[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3165 - 3171.
- [12] 阎岩, 王思敬, 王恩志. 基于西原模型的变参数蠕变方

- 程[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3025 - 3035.
- YAN Yan, WANG Si-jing, WANG En-zhi. Creep equation of variable parameters based on Nishihara model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3025 - 3035.
- [13] 夏才初, 许崇帮, 王晓东, 等. 统一流变力学模型参数的确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 425 - 432.
- XIA Cai-chu, XU Chong-bang, WANG Xiao-dong, et al. Method for parameters determination with unified rheological mechanical model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(2): 425 - 432.
- [14] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 锦屏绿片岩力学特性及长期强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1642 - 1649.
- ZHANG Qing-zhao, SHEN Ming-rong, DING Wen-qi. Study of mechanical properties and long-term strength of Jinping green schist[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(8): 1642 - 1649.
- [15] 张强勇, 杨文东, 陈芳, 等. 硬脆性岩石的流变长期强度及细观破裂机制分析研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1910 - 1918.
- ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, CHEN Fang, et al. Long-term strength and microscopic failure mechanism of hard brittle rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(12): 1910 - 1918.
- [16] 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. Test study on rock rheological properties and its long-term strength[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 1021 - 1024.
- [17] 崔旋, 余成学. 推断岩石长期强度的黏塑性应变率法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3899 - 3894.
- CUI Xuan, SHE Cheng-xue. Study of viscoplastic strain rate method to quickly determinelong term strength of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.2): 3899 - 3894.
- [18] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 246 - 251.
- XU Hong-fa. Time dependent behaviors of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(3): 246 - 251.
- [19] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1 - 20.
- TAN Tjongkie. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1982, 1(1): 1 - 20.