

DOI: 10.11779/CJGE201504021

三轴低频循环荷载下盐岩体积应变特性研究

许宏发¹, 王 晨¹, 马林建^{1, 2}, 董 璐¹

(1. 解放军理工大学国防工程学院爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 地下储气库围岩长期处于复杂疲劳应力状态下, 盐岩三轴循环荷载下的变形规律对储气库稳定性分析有参考价值。对 8 个盐岩试块进行了不同围压、不同应力水平和不同频率条件下的循环荷载试验。对每一试块施加恒定围压和轴向低频循环荷载。对试验参数进行了无量纲处理, 分析了应力比强度 (广义剪应力强度与球应力的比值)、应力比振幅、上限应力水平、荷载频率、循环次数 (N) 等对体积应变 (ε_v) 的影响。利用函数 $\varepsilon_v = \lambda \lg N + \varepsilon_{v0}$, 对每一试块的体积应变 - 循环次数曲线进行了拟合分析, 获得了参数 λ 和 ε_{v0} 随应力比振幅、上限应力水平和频率变化的数学表达式。标准化回归系数分析表明, 上限应力水平是影响盐岩体积变形的主要因素, 其次是应力比振幅。在高上限应力水平三轴状态下, 盐岩主要表现出体积扩大现象。

关键词: 三轴试验; 低频循环; 盐岩; 体积变形; 岩石扩容

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)04 - 0741 - 06

作者简介: 许宏发 (1964 -), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程和地下防护工程方面的教学与研究工作。E-mail: xuhongfa@163.com。

Volumetric strain of rock salt under triaxial low-frequency cyclic loading

XU Hong-fa¹, WANG Chen¹, MA Lin-jian^{1, 2}, DONG Lu¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Institute of National Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The surrounding rock salt of underground gas storage cavern is subjected to long-term triaxial fatigue stress. The deformation property of rock salt under triaxial cyclic loading is of great importance to the stability of the rock salt cavity. A series of laboratory tests are performed to explore the deformation behavior of eight rock salt specimens under various confining pressures, stress levels and loading frequencies. The axial low-frequency cyclic stress is applied on each salt specimen while the confining pressure is kept steady. The test parameters are processed by the dimensionless method. The effects of the strength of stress ratio (ratio of generalized shear strength to spherical stress), amplitude of stress ratio, level of the maximum stress, loading frequency and loading cycles (N) on the volumetric strain (ε_v) of rock salt are analyzed. The nonlinear curve fitting is carried out using the function $\varepsilon_v = \lambda \lg N + \varepsilon_{v0}$ for a curve of each specimen on the volumetric strain with the cycles. Further, the expressions for the parameters λ and ε_{v0} with the amplitude of stress ratio, the maximum stress and loading frequency are obtained, respectively. The analysis of standardization regression coefficient indicates that the maximum stress is the key factor that influences the volumetric deformation of rock salt, and the stress amplitude ratio comes the second. It is noted that the rock salt exhibits dilatancy under high maximum stress.

Key words: triaxial test; low-frequency cycle; rock salt; volumetric strain; dilatancy

0 引 言

盐岩受力易造成体积变化, 盐岩储气库在注气—采气的加、卸载循环中, 盐岩体变性质则会变得更为复杂。研究盐岩体积变形特性, 对储气库长期安全稳定和运营管理具有实际意义。

国内外对盐岩在循环荷载作用下的力学性质进行

了研究, 取得了一些成果。Fuenkajorn等^[1]进行了单轴循环荷载作用下盐岩疲劳试验, 分析了循环次数对盐岩强度和弹模的影响。Brouard等^[2]通过数值模拟分析

基金项目: 国家青年科学基金项目 (51309234); 江苏省青年科学基金项目 (BK20130065); 中国矿业大学深部岩土大学与地下工程国家重点实验开放基金项目 (SKLGDUEK1403)

收稿日期: 2014 - 01 - 13

了高频温度循环下储气库围岩温度、应变和应力的变化规律。Liang等^[3]进行了两种类型单轴循环荷载（即周期荷载和周期加一卸载）作用下不同类型盐岩的力学试验，分析了强度、弹模、应力-应变曲线等变化规律。郭印同等^[4]进行了单轴循环荷载下盐岩疲劳试验，研究了疲劳强度、变形模量和疲劳损伤演化特性。杨春和等^[5]进行了盐岩单轴循环加、卸载试验，分析了加卸载曲线特征、变形模量变化规律和简单应力状态下加、卸载本构关系。高红波等^[6]对盐岩及含夹层盐岩进行了应力水平不断提高的单轴反复加卸载试验，分析了强度、循环加卸载曲线、弹性塑性变形、滞回环等变形特性。任松等^[7]对不同温度条件下盐岩试件进行了单轴循环荷载试验，分析了疲劳寿命、体积应变、损伤等随着温度的变化规律。

上述工作主要是单轴周期荷载和单轴循环加卸载的试验研究，分析了疲劳强度、变形模量、循环曲线等特征和规律，但三轴循环试验和理论上的研究不多。

根据广义虎克定律，体积应变是由平均应力引起的，广义剪应变是由广义剪应力引起的。但对于对岩土材料，平均应力和广义剪应力对体积应变和广义剪应变将产生交叉效应，即平均应力既能引起体积应变，也能引起广义剪应变；广义剪应力既能引起广义剪应变，也能引起体积应变^[8-9]。早在1983年陈宗基等^[10]提出了岩石体积、偏应力和时间的变化关系，将扩容定义为偏应力作用下岩石体积的增加。随后国内外对岩石扩容问题开展了许多研究，如金济山^[11]提出了岩石扩容的本构模型；Yuan等^[12]建立了扩容指数概念，提出了扩容指数与围压之间的经验关系模型；Alejano等^[13]利用扩容角建立了岩体的本构模型；卢兴利等进行了砂质泥岩三轴试验，得到了不同围压下完全扩容应变与完全扩容极限^[9]，之后又根据三轴卸荷试验资料，建立描述卸荷条件下岩石损伤扩容和破裂碎胀演化机制的本构模型^[14]；杨圣奇等^[15]进行了不同围压下断续预制裂隙大理岩体全应力-应变试验，研究了围压对裂隙大理岩扩容特性影响。但总的来说这方面研究有必要深入进行。

本文通过不同围压和不同应力水平条件下盐岩试块轴向低频循环荷载试验，分析盐岩体积变形与球应力、广义剪应力、循环频率和循环次数之间的关系，通过拟合得到估计体积应变的经验公式。

1 试验基本方案

1.1 试件制备

试验采用湖北潜江盐矿钻井套钻取芯获取的盐岩试件，由于盐岩的性质与其他岩体材料有很大不同，具有质地较脆，常温下易溶于水，易被腐蚀的特点，因此，取样过程中采用饱和盐水作为降温介质，保证

盐岩试件的完整性。盐岩试件主要成分为NaCl，含有一定的Na₂SO₄、CaSO₄以及少量的角砾碎屑及泥岩杂质，颜色呈灰到黑色变化。之后采用数控车床对取出盐岩试件进行加工处理为符合国际标准的圆柱形试件，试样高径比约为2：1，尺寸约为φ50 mm×100 mm，误差在±3 mm。选取8个盐岩试件。

1.2 试验方案

试验设备为TAW-2000型微机控制电液伺服岩石三轴试验机。试验初始加载速率为0.002 kN/s，加载波形为正弦波。以循环试验开始为起点，进行循环加卸载，直至试件发生破坏或超过3 h后直接压缩破坏。

为全面详细地分析盐岩的力学特性，试验分别设置不同的围压、加载频率、应力水平等试验条件，具体试验参数见表1。表中，*f* 为轴向循环加载频率；σ_{1max} 为轴向循环荷载上限应力；σ_{1min} 为轴向循环荷载下限应力；σ₁ 为轴向应力，σ₃ 为围压。

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes

试件 编号	<i>f</i> /Hz	σ ₁		σ ₃ /MPa
		σ _{1max} /MPa	σ _{1min} /MPa	
1	0.083	28.881	26.987	7
2	0.083	27.245	23.741	7
3	0.050	24.831	17.018	7
4	0.056	26.507	12.209	7
5	0.050	38.861	20.220	14
6	0.071	29.578	17.862	14
7	0.043	40.435	19.874	14
8	0.042	38.871	17.144	14

2 试验结果

2.1 试验应力应变曲线

试验过程中主要获得盐岩试件的应力、轴向应变和径向应变的数据。获得盐岩试件的应力应变曲线如图1所示。图中ε₁ 为轴向应变，ε₃ 为径向应变，*q* 为广义剪应力。这里定义球应力为

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad , \quad (1)$$

广义剪应力为

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad , \quad (2)$$

式中，σ₂ 为中间主应力。在本文三轴状态下，广义剪应力为 *q* = σ₁ - σ₃，球应力为 *p* = (σ₁ + 2σ₃)/3。

由于在试验过程中，对盐岩试件进行的循环试验时间较短（3 h左右），并未达到破坏阶段，因此没有得到盐岩试件破坏阶段的应力应变曲线。从图1中可以看出：在盐岩的循环试验中，获得了盐岩两个部分的变形，一是初始弹性阶段；二是循环阶段，轴向和径向变形不断积累，塑性变形不断增加。

2.2 三轴压缩强度和应力比强度

根据笔者之前的常规三轴压缩试验^[16], 岩盐轴向峰值强度为

$$\sigma_{1s} = 2.001\sigma_3 + 15.739 \quad (3a)$$

式中, 应力单位为 MPa。

广义剪应力强度为

$$q_s = \sigma_{1s} - \sigma_3 \quad (3b)$$

在此定义应力比为广义剪应力 q 与球应力 p 的比值, 即

$$\bar{q} = q/p \quad (4)$$

若应力比强度 \bar{q}_s 为广义剪应力强度与球应力的比值, 则

$$\begin{aligned} \bar{q}_s &= \frac{q}{p} \bigg|_{\sigma_1=\sigma_{1s}} = \frac{\sigma_{1s} - \sigma_3}{(\sigma_{1s} + 2\sigma_3)/3} \\ &= \frac{1.001\sigma_3 + 15.739}{1.3337\sigma_3 + 5.2463} \end{aligned} \quad (5)$$

可以计算得到在围压 σ_3 分别为7 MPa和14 MPa时, 对应的应力比强度 \bar{q}_s 分别为1.560和1.244。

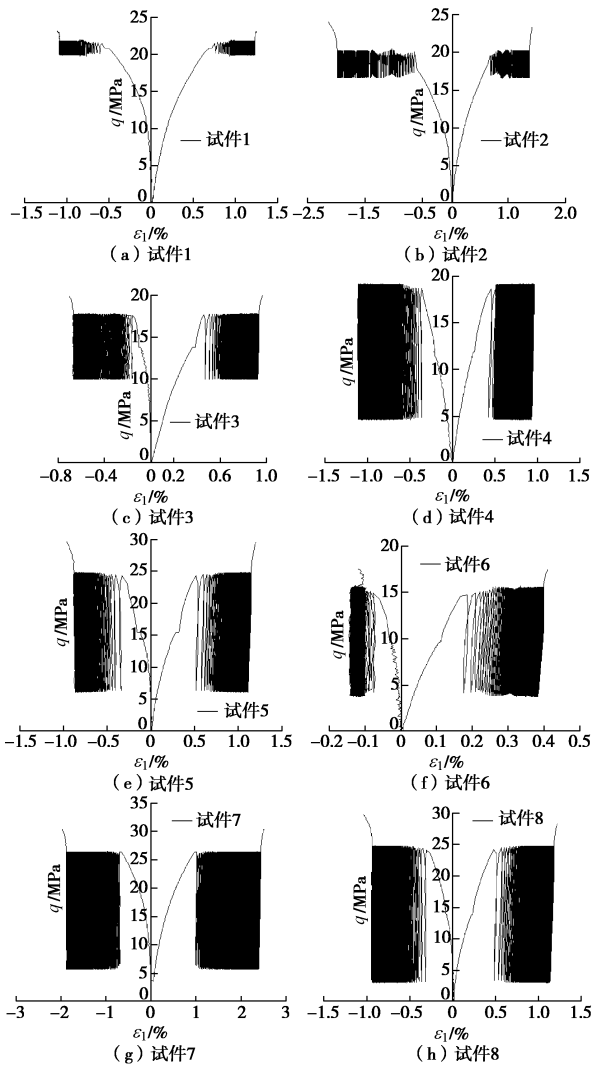


图1 盐岩试件应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of rock salt specimen

3 循环荷载下盐岩体积变形分析

一般认为岩土材料的体积变形是由球应力 p 和广义剪应力 q 交叉效应引起的。因此在研究盐岩体积变形的时候, 需要同时考虑球应力和广义剪应力的影响。球应力在加载过程中主要产生弹性变形, 即体积压缩部分, 而广义剪应力主要产生体积膨胀部分。由于本试验试验条件和数据有限, 并且球应力和广义剪应力产生的应变界限模糊, 难以区分, 因此在分析体积变形时, 不直接将球应力和广义剪应力分开研究, 引入应力比 \bar{q} 综合考虑球应力和广义剪应力的影响。

3.1 试验参数处理

根据试验中获得的应力分量按式(1)和式(2)计算得到球应力 p 和广义剪应力 q 。根据应变分量按下式计算得到体积应变 ε_v 如下:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (6)$$

为了消除岩块的个体差异, 采用无量纲化参数进行分析, 为此除应力比和频率外, 再引入上限应力水平 R_{up} 和应力比振幅 a_q , 分别定义为

$$R_{up} = \frac{\bar{q}_{max}}{\bar{q}_s} = \frac{q_{max}}{p_{max} \bar{q}_s} \quad (7)$$

$$a_q = \bar{q}_{max} - \bar{q}_{min} \quad (8)$$

式中, q_{max} 为上限广义剪应力, p_{max} 为上限球应力, \bar{q}_{max} 为最大应力比, \bar{q}_{min} 为最小应力比。

由表1中可知, 试件1和试件2的试验条件基本相同, 考虑到盐岩试件本身材料组成上存在一定差异, 将它们的试验数据平均计算, 编号1-2。将表1试验参数进行无量纲处理, 得到如表2所示试验参数。表中 p_{min} 为下限球应力, q_{min} 为下限广义剪应力。

3.2 体积变形特性分析

由试验数据(图1)可以计算得到试件的体积变形和循环次数 N 的关系曲线如图2所示。

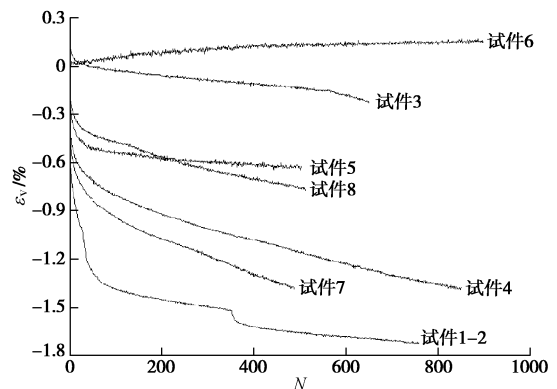


图2 体积应变-循环次数关系曲线

Fig. 2 Volumetric strain-cycle number curves

表 2 循环荷载试验无量纲参数

Table 2 Dimensionless parameters in the experiment							
编号	$p_{\max} \sim p_{\min}$	$q_{\max} \sim q_{\min}$	\bar{q}_s	R_{up}	$\bar{q}_{\min} \sim \bar{q}_{\max}$	$a_{\bar{q}}$	f/Hz
1	14.294~13.662	21.881~19.987	1.560	0.981	1.463~1.531	0.068	0.083
2	13.748~12.580	20.245~16.741	1.560	0.944	1.331~1.473	0.142	0.083
1-2	14.021~13.121	21.063~18.364	1.560	0.963	1.400~1.502	0.105	0.083
3	12.944~10.339	17.831~10.018	1.560	0.883	0.969~1.378	0.409	0.050
4	13.502~8.736	19.507~5.209	1.560	0.926	0.596~1.445	0.849	0.056
5	22.287~16.073	24.861~6.220	1.244	0.897	0.387~1.115	0.729	0.050
6	19.193~15.287	15.578~3.862	1.244	0.653	0.253~0.812	0.559	0.071
7	22.812~15.958	26.435~5.874	1.244	0.932	0.368~1.159	0.791	0.043
8	22.290~15.048	24.871~3.144	1.244	0.897	0.209~1.116	0.907	0.042

由图 2 可以看到:①试验得到体积应变变化过程,大致可分为两个阶段:应变减速阶段和稳定或等速阶段;②试件 6 由于该试件试验应力水平较低,上限应力水平仅有 0.524,因而发生了体积缩小现象;③试件 3 在 550 周期前应变变化趋于稳定,但之后产生了应变加速,因此在分析中只考虑前 550 个周期的应变情况;④其他试件体积应变呈不断增大的趋势,发生扩容。由于试验条件的不同,曲线的截距和变化幅度都各不相同。

3.3 体积应变特性的定量描述

(1) 体积应变曲线及估计

通过分析发现,图 2 岩盐试块的体积应变与循环次数的对数值之间存在较好的线性关系,如图 3 所示。因此可用下式对各试件试验曲线进行拟合,拟合曲线见如图 3 中虚线,拟合参数见表 3 所示。

$$\varepsilon_v = \lambda \lg N + \varepsilon_{v0} \quad (9)$$

式中 λ 为待定参数,反映体积变形随时间的变化率; ε_{v0} 为第初次循环后的体积应变, ε_v 与 ε_{v0} 的单位为 %。

表 3 拟合参数

Table 3 Fitting parameters			
编号	λ	$\varepsilon_{v0}/\%$	相关系数 R^2
1-2	-0.3996	-0.5561	0.96229
3	-0.0959	0.1467	0.86487
4	-0.2825	-0.3365	0.83322
5	-0.1698	-0.1780	0.90269
7	-0.3070	-0.4121	0.84360
8	-0.1884	-0.1642	0.82406

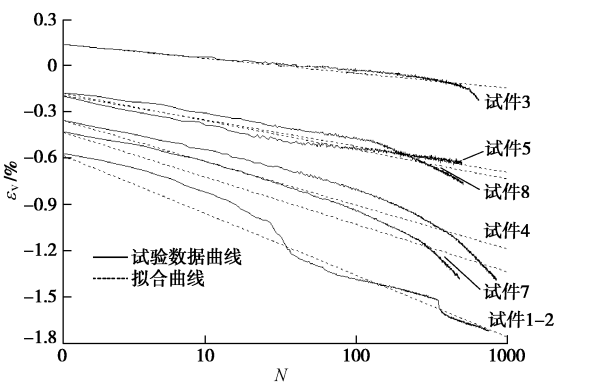


图 3 体积应变 - 对数周期曲线

Fig. 3 Volumetric strain - logarithmic cycle number curves

(2) 参数 ε_{v0} 估计

考虑到体积应变 ε_{v0} 仅与第一次加载状态有关,其它参数对其影响不大,因此 ε_{v0} 仅考虑上限应力水平 R_{up} 的影响。根据图 4 所示 ε_{v0} 与 R_{up} 间的相关性,进行非线性拟合,得到 ε_{v0} 与 R_{up} 的关系式如下所示:

$$\varepsilon_{v0} = -1.135 - 0.250 \ln(R_{up} - 0.877) \quad (10)$$

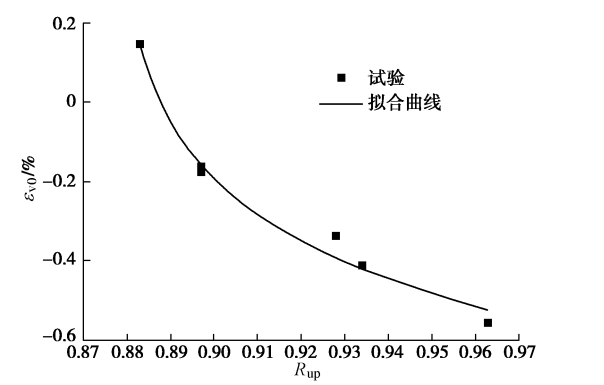


图 4 $\varepsilon_{v0} - R_{up}$ 关系及拟合曲线

Fig. 4 Relation between ε_{v0} and R_{up} and fitting curve

(3) 参数 λ 估计

a) 模型计算

影响参数 λ 的因素较多,主要有上限应力水平、应力比、振幅、频率等。引入下式数学模型进行多元回归分析:

$$Y = 10^{b_0} \prod_{j=1}^n X_j^{b_j} \quad (11)$$

式中, Y 因变量, X_j 自变量, b_j 为回归系数。

对式 (11) 两边取对数, 得

$$\lg Y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j \lg X_j \quad (12)$$

令

$$\begin{cases} y = \lg Y \\ x_j = \lg X_j \end{cases} \quad (13)$$

式 (12) 简写为

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j \quad (14)$$

由于参数 λ 均为负数, 无法直接取对数。取 $\lambda_1 = -\lambda$, 得到参数 λ_1 与 3 个影响因素之间的关系, 如表 4 所示。

表 4 计算参数
Table 4 Parameters

编号	λ_1	R_{up}	$a_{\bar{q}}$	f/Hz
1-2	0.3996	0.963	0.105	0.083
3	0.0959	0.883	0.409	0.050
4	0.2825	0.926	0.849	0.056
5	0.1698	0.897	0.729	0.050
7	0.3070	0.932	0.791	0.043
8	0.1884	0.897	0.907	0.042

通过多元回归分析, 得到 λ_1 的经验公式为
 $\lambda_1 = 1.450R_{up}^{18.220}a_{\bar{q}}^{0.228}f^{0.050} \quad (R^2=0.9736)$ 。(15)
b) 显著性检验

采用 F 检验对模型 (11) 进行整体显著性分析。假定置信水平为 95%, 则显著性水平 $\alpha=0.05$ 时, F 值为 19.4167。查 F 分布表, 得到 $F_{\alpha=0.05}(3,2)=19.16$, 显然, $F > F_{\alpha=0.05}$, 回归方程成立。说明用式 (15) 估算参数 λ_1 是合适的。

c) 影响因素主次判别

采用回归系数标准化的方法判别影响因素的重要性, 即标准化回归系数越大, 该系数对应的因素的影响程度越大^[17]。

$$P_j = |b_j| \sqrt{\frac{L_{jj}}{L_{yy}}}, \tag{16}$$

$$L_{jj} = \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2 = \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 - n\bar{x}_j^2, \tag{17}$$

$$L_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2, \tag{18}$$

式中, P_j 为标准化回归系数, $j=1,2,3$ 为影响因素编号, $i=1,2,\cdots,n$ 为试验值编号, n 为试验值的组数, \bar{x}_j 为自变量 x_j 试验值的均值, \bar{y} 为应变量 y 试验值的均值。得到 λ_1 的标准化回归系数, 如表 5 所示。

表 5 标准化回归系数表

Table 5 Standardized regression coefficients

影响因素	λ_1 标准化回归系数
上限应力水平 R_{up}	1.1422
应力比振幅 $a_{\bar{q}}$	0.3705
频率 f	0.0241

可以看到, 对参数 λ_1 , 上限应力水平 R_{up} 的影响最大, 而应力比振幅 $a_{\bar{q}}$ 和频率 f 的影响相对较小。

(4) 估计体积应变经验公式

将式 (10) 和式 (15) 代入式 (9) 可以获得体积应变 ε_v 与上限应力水平 R_{up} , 应力比振幅 $a_{\bar{q}}$ 以及频率 f 的关系方程:

$$\varepsilon_v = -0.630R_{up}^{18.220}a_{\bar{q}}^{0.228}f^{0.050} \ln N - 1.135 - 0.250 \ln(R_{up} - 0.877) \quad (19)$$

值得注意的是, 该式的适用条件为: 特定盐岩, 围压小于 15 MPa, 轴向循环频率 0.04~0.09 Hz, 上限应力水平 0.85~0.95。

4 结 论

本文通过盐岩三轴低频循环荷载下的疲劳试验, 初步分析了在循环荷载作用下体积变形的特性, 主要结论如下:

- (1) 在三轴低频循环荷载下, 盐岩的体积变形主要分为 3 个阶段, 本文试验得到变形的前两个阶段, 即最初的弹性阶段以及循环过程的稳定阶段, 其中第一阶段变形较快且时间较短, 第二阶段变形较为稳定。
- (2) 在应力水平较低时, 盐岩的体积缩小, 而在应力水平较高时, 盐岩的体积增大。
- (3) 由于球应力和广义剪应力的交叉影响, 本文引入了无量纲参数: 上限应力水平、应力比振幅, 综合反映各因素对盐岩体积变形的影响。
- (4) 上限应力水平是影响体积变形的主要因素, 而应力比幅值和频率是次要因素。
- (5) 本文所得经验公式可用以估计在三轴低频高上限应力水平循环荷载下盐岩的体积应变累积。

参考文献:

[1] FUENKAJORN K, PHUEAKPHUM D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt[J]. Engineering Geology, 2010, 112(1/2/3/4): 43 - 52.

[2] BROUARD B, BEREST P, DJIZANNE H, et al. Mechanical stability of a salt cavern submitted to high-frequency cycles[C]// 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Paris, 2012: 381 - 389.

[3] LIANG Wei-guo, ZHANG Chuan-da, GAO Hong-bo, et al. Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(1): 54 - 61.

[4] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353 - 1359. (GUO Yin-tong, ZHAO Ke-lie, SUN Guan-hua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1353 - 1359. (in Chinese))

[5] 杨春和, 马洪岭, 刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 3562 - 3568. (YANG Chun-he, MA Hong-ling, LIU Jian-feng. Study of

- deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 3562 - 3568. (in Chinese))
- [6] 高红波, 梁卫国, 徐素国, 等. 循环载荷作用下盐岩力学特性响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 2617 - 2623. (GAO Hong-bo, LIANG Wei-guo, XU Su-guo, et al. Study of mechanical behavior response of salt rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 2617 - 2623. (in Chinese))
- [7] 任松, 白月明, 姜德义, 等. 温度对盐岩疲劳特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(9): 1839 - 1845. (REN Song, BAI Yue-ming, JIANG De-yi, et al. Experimental study of temperature effect on fatigue property of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(9): 1839 - 1845. (in Chinese))
- [8] 陈存礼, 谢定义, 高鹏. 球应力往返作用下饱和砂土变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 513 - 520. (CHEN Cun-li, XIE Ding-yi, GAO Peng. Testing study on deformation characteristics of saturated sand under repeated spherical stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 513 - 520. (in Chinese))
- [9] 卢兴利, 刘泉声, 张伟, 等. 高应力软岩非弹性体积增加试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, **34**(7): 903 - 906. (LU Xing-li, LIU Quan-sheng, ZHANG Wei, et al. Test study of inelastic volume increase of soft rock in high stress[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **34**(7): 903 - 906. (in Chinese))
- [10] 陈宗基, 康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, **2**(1): 11 - 21. (CHEN Zong-ji, KANG Wen-fa. Time dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983, **2**(1): 11 - 21. (in Chinese))
- [11] 金济山. 岩石扩容性质及其本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, **12**(2): 162 - 172. (JIN Ji-shan. Study of the dilatancy behavior of rocks and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, **12**(2): 162 - 172. (in Chinese))
- [12] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(4): 679 - 686.
- [13] ALEJANO L R, ALONSO E. Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, **42**(4): 481 - 507.
- [14] 卢兴利, 刘泉声, 苏培芳. 考虑扩容碎胀特性的岩石本构模型研究与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(9): 1886 - 1893. (LU Xing-li, LIU Quan-sheng, SU Pei-fang. Constitutive model of rocks considering dilatancy-bulking behaviour and its calibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(9): 1886 - 1893. (in Chinese))
- [15] 杨圣奇, 刘相如. 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru. Experimental investigation on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (in Chinese))
- [16] 佟全. 泥质盐岩压缩与蠕变试验及地下储气库稳定性分析[D]. 南京: 解放军理工大学, 2013. (TONG Quan. Tests of compression and creep on muddy rock salt and the analysis of stability of underground gas storage[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [17] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012. (WANG Yan, SUI Si-lian, Experiment design and MATLAB data analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese))