

湖北云应盐矿深部层状盐岩直剪试验研究

李银平¹, 蒋卫东^{2,3}, 刘江⁴, 陈剑文¹, 杨春和¹

(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. 中南大学 商学院, 湖南 长沙 410083; 3. 江西铜业集团公司, 江西 贵溪 335424; 4. 中南电力设计院, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了解湖北云应盐矿深部层状盐岩, 特别是盐岩和硬石膏夹层界面的抗剪性能, 开展 3 类典型岩体的直剪试验。试验结果表明: 层状盐岩界面和盐岩、硬石膏的剪切应力-位移曲线较为相似, 加载初期曲线的斜率较小, 剪应力增加缓慢而位移增加较快; 当剪应力达到某一数值后, 剪切位移增加变得缓慢, 曲线斜率变大; 快达到峰值强度时曲线斜率再逐渐由陡变缓; 达到峰值强度后出现软化, 剪应力随位移的增加逐渐达到残余强度, 从峰值强度到残余强度过程中, 相对而言, 层状岩石交界面的剪应力下降得比较快。试验结果还表明: 盐岩硬石膏交界层面处的抗剪强度参数 c , φ 值分别为 4.08 MPa 和 45.9°, 和盐岩试样和硬石膏试样的强度参数相差并不大, 甚至还略强。这说明湖北省云应盐矿深部层状盐岩中盐岩和硬石膏夹层的交界层面具有较强的粘聚力, 不是一个弱面, 这将有利于盐岩溶腔的密闭性和稳定性。层状盐岩的这一特殊力学特性对于在深部层状盐岩构造中开展能源储备是非常有利的。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 直接剪切试验; 夹层; 界面

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)09-1767-06

DIRECT SHEAR TESTS FOR LAYERED SALT ROCKS OF YUNYING SALT MINE IN HUBEI PROVINCE

LI Yinping¹, JIANG Weidong^{2,3}, LIU Jiang⁴, CHEN Jianwen¹, YANG Chunhe¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Business, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 3. Jiangxi Copper Corporation, Guixi, Jiangxi 335424, China; 4. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: For investigation on the characteristics of shear deformation and strength of layered salt rocks in Yunying Salt Mine, Hubei Province, direct shear tests on three types of rocks are carried out. It is shown that the curves of shear stress vs. displacement of salt rock, anhydrite and layered salt rock are similar: during the beginning stage of shear loading, the slope coefficients are small, the shear displacement increasing fast while the shear stress increasing slowly; when the shear stresses reach a certain value, the increase of shear displacement slows down, and the slope coefficients get larger; the increase of shear displacement becomes fast again prior to shear stress reaching peak value; after peak point, strain softening appears, the shear stresses decreasing slowly and reaching residual strength finally. The test results also show that the shear strength of layered salt rocks is close to or even slightly higher than that of salt rock and anhydrite: cohesive strength $c = 4.08$ MPa, and frictional angle $\varphi = 45.9^\circ$. This indicates that the interfaces between salt rock and anhydrite are not weak as expected. The strong interface property of layered salt rocks will guarantee the sealability and stability of salt caverns, and benefit the energy(oil and gas) storage in layered salt rocks formation in depth.

Key words: rock mechanics; salt rock; direct shear test; interlayer; interface

收稿日期: 2007-02-09; **修回日期:** 2007-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50434050, 50374064); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704)

作者简介: 李银平(1969-), 男, 博士, 1991年毕业于浙江大学工程力学系, 现任副研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: ypli@whrsm.ac.cn

1 引言

盐岩由于具有孔隙度低、渗透率小、损伤自恢复和塑性变形能力大等优良特性，被认为是石油、天然气地下储备和高放射性废物深埋置的理想场所。我国盐岩矿藏分布范围广，盐岩层的基本特点是盐岩层多，单层厚度薄，盐岩体中一般含有众多夹层(如硬石膏层、硬石膏层和钙芒硝层等)^[1,2]。在这种特殊条件下，储存库的稳定性和安全性等关键问题在国内外尚无成熟的理论可借鉴。

目前，国内外对盐岩等层状岩体的力学特性开展了一系列的试验研究，如 U. Hunsche 等^[3-12]通过试验开展了盐岩的静动力力学特征、蠕变特性及温度效应的研究。最近，针对湖北云应盐矿深部层状盐岩，李银平等^[1,13]开展了盐岩、硬石膏泥岩和含硬石膏盐岩 3 种典型试样的单轴及三轴压缩试验，分析了 3 种试样的变形和破坏特征，试验结果表明：夹层对盐岩体的变形和破坏特性有明显的影响，强度高于盐岩的夹层却先于盐岩出现横向拉伸破坏；应力-应变曲线出现“应力跌落”现象；最后结合互层盐岩体 Cosserat 介质扩展模型^[14,15]分析了盐岩和夹层力学特性的不匹配对复合岩体变形和破坏特性的影响，解释了试验观察到的现象，进一步揭示了复合体的变形和破坏机制。陈锋等^[16]则开展了层状盐岩的流变试验，试验结果表明，硬石膏泥岩的蠕变率只有盐岩的 1/5 ~ 1/20，层状盐岩的蠕变主要由盐岩层控制。

对于层状盐岩介质而言，其变形破坏特征与盐岩和硬石膏夹层的界面的力学特性是紧密相关的，界面的力学特性对层状盐岩构造中的洞穴——储库的稳定性、盖层突破压力及渗透稳定性都有着显著的影响。已进行的压缩试验^[1]和流变试验^[16]结果表明，湖北云应盐矿深部层状盐岩试样在压缩试验中没有出现沿界面的滑动。为了深入了解界面的力学特性，作者开展了一系列的试验，如层状盐岩直接剪切试验、巴西劈裂(间接拉伸)试验以及界面微观分析试验，限于篇幅，本文仅对层状盐岩直接拉伸试验的结果进行介绍。

2 试样制备

本文的层状盐岩试样来自湖北云应盐矿，云应盐矿是典型的层状盐岩矿床，主要由盐层和硬石膏

夹层组成，夹层和盐层呈不等厚互层结构，其中 04-15 盐群(埋深为 500 ~ 800 m)则是密集互层结构。本文试验的岩石试样分为 3 种类别：第 1 种是从盐岩层取出的盐岩试样，主要化学成分为 NaCl, Na₂SO₄, CaSO₄ 和不溶物，NaCl 含量为 65.73% ~ 68.33%，Na₂SO₄ 含量为 4.28% ~ 5.89%，CaSO₄ 含量为 14.46% ~ 16.50%；不溶物含量为 11.45% ~ 12.80%，盐层中同种化学成分的变化在 3% 以内，呈灰褐色粗粒状。第 2 种是从硬石膏夹层中取出的试样，NaCl 含量为 17.50% ~ 23.62%，Na₂SO₄ 含量为 11.19% ~ 19.43%，CaSO₄ 含量为 23.86% ~ 26.35%，水不溶物平均含量为 36.24% ~ 42.62%。第 3 种是含硬石膏夹层盐岩的层状盐岩试样，即盐岩试样中含有不同厚度的水平硬石膏夹层。为了解层状盐岩的抗剪强度，除了对层状盐岩中盐岩和硬石膏交界层面进行直剪试验外，为了便于分析比较，还对盐岩和硬石膏试样进行了试验。

由于直剪试验的标准试样是边长为 150 mm 的立方体或直径不小于 150 mm 的圆柱体。将所取到的直径为 75 ~ 90 mm 的圆柱体盐岩和硬石膏岩芯切割为 100 ~ 120 mm 长的圆柱体，层状盐岩直剪试样加工过程中应保证盐岩与硬石膏的交界层面位于圆柱体试样中间，加工好的直剪试样如图 1 所示。将加工好的圆柱体试样放入 150 mm×150 mm×150 mm 的模具中心位置，同时保证盐岩和硬石膏交界层面位于模具垂直高度的中间位置，然后在试样周围浇注混凝土，在浇注的立方体中间即试样的剪切层面位置预留一层约 10 mm 厚的无强度砂层，然后浇注成型见图 1。盐岩和硬石膏的直剪试样采用同样的模具进行浇注，在试样中间受剪部分也同样预留一层约 10 mm 厚的无强度砂层。



图 1 直剪试样图

Fig.1 Samples for direct shear test

3 试验设备及过程

直剪试验是在中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的 RMT-150C 岩石力学试验机上进行的, 该试验机为数字控制式电液伺服试验机, 主要用来做岩石和混凝土一类材料的力学性能试验, 可以做单轴压缩、单轴间接拉伸、三轴压缩和剪切等多种试验。

直剪试验的试验程序为: 先将试样放入剪切盒中, 施加一定的法向力(本次试验的法向力分别为 5, 10, 20 和 30 kN); 然后施加剪切荷载直至试样破坏。直剪试验试样受力情况如图 2 所示。

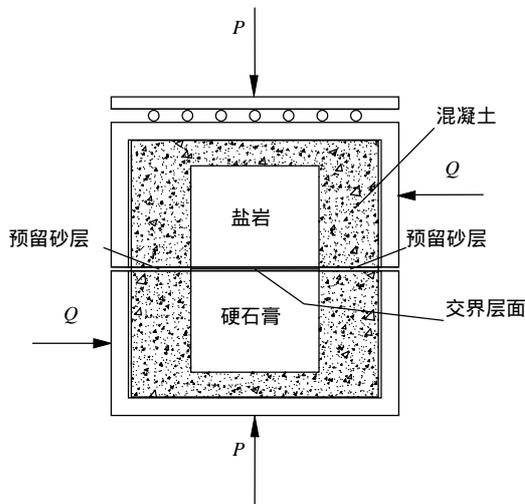


图 2 直剪试验试样受力图

Fig.2 Force diagram of samples in direct shear test

直剪试验的目的是: (1) 确定岩石的抗剪强度; (2) 获取岩石的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ; (3) 获取层状盐岩体中盐岩与硬石膏交界面的界面剪切力学参数。直剪试验的法向应力 σ_n 和剪应力 τ 按下式计算:

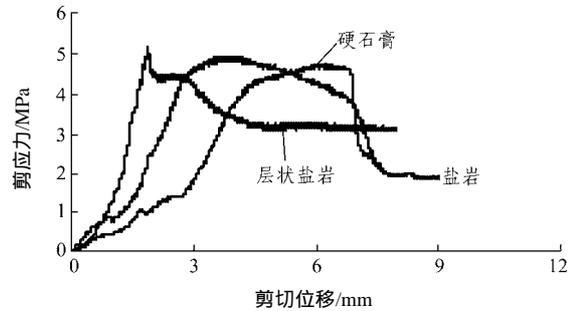
$$\sigma_n = \frac{P}{A}, \tau = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

式中: P 为法向力, Q 为试样剪断前达到的最大剪切力, A 为沿试样剪切方向的有效剪切面积。由于预留砂层的摩擦力是很小的, 有效剪切面积指的是立方体试样内埋圆柱形岩芯的横截面积。

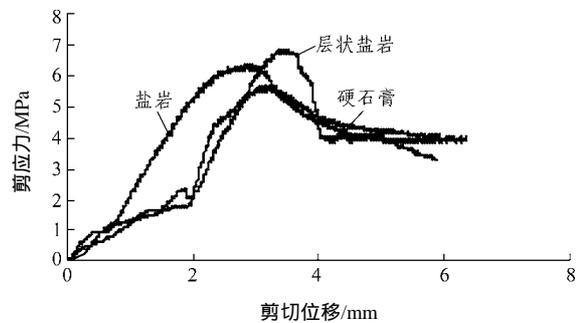
4 试验结果及分析

4.1 剪切变形特性

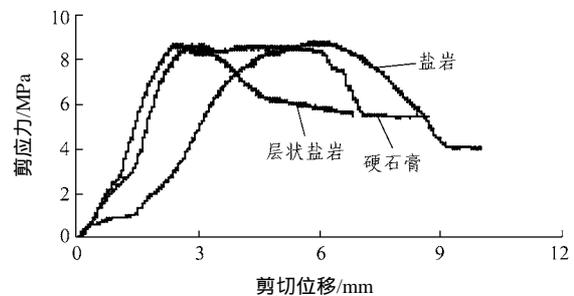
盐岩、层状盐岩及硬石膏 3 种试样在相同法向力下的剪应力-剪切位移曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 盐岩、层状盐岩和硬石膏 3 种岩石的剪应力-剪切位移曲线比较相似, 其基本特点是:



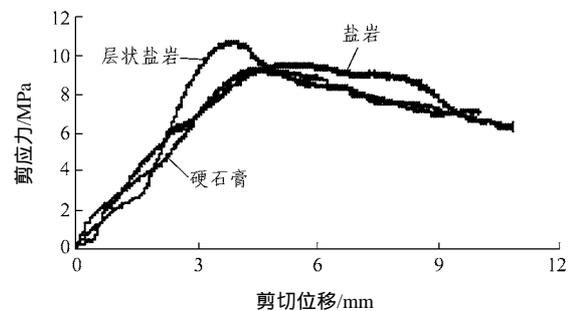
(a) 法向力 5 kN



(b) 法向力 10 kN



(c) 法向力 20 kN



(d) 法向力 30 kN

图 3 相同法向力下 3 种岩石的剪应力-位移曲线

Fig.3 Curves of shear stress vs. displacement for three rocks under different normal stresses

(1) 加载初期曲线的斜率较小，剪应力增加缓慢而剪应变增加较快，这一阶段试样内开始产生张裂纹，但是开始产生的张裂纹并不就是沿着剪切面发生破坏。

(2) 当剪应力达到某一数值后，剪应变受阻增加变得缓慢，而剪应力迅速增加，曲线斜率变陡，临近峰值强度时曲线斜率逐渐由陡变缓达到峰值强度，复合层状盐岩和硬石膏由陡变缓达到峰值强度的这个阶段跟盐岩相比要短。

(3) 达到峰值强度后曲线斜率由正变负，剪应力随剪应变的增加逐渐达到残余强度。从峰值强度到残余强度层状盐岩的剪应力随剪应变下降得比较快，而硬石膏和盐岩下降则比较慢。

4.2 剪切强度特性

本文分别对盐岩、层状盐岩和硬石膏试样进行了 4 组不同法向力(5, 10, 20, 30 kN)下的直剪试验，为了避免试验结果的离散影响，每组试验进行 3 个试样。试验结果见表 1~3。

表 1 盐岩直剪试验结果

Table 1 Results of direct shear test for salt rock

试样编号	剪切面面积 /mm ²	法向力 /kN	法向应力 /MPa	最大剪切力 /kN	峰值剪应力 /MPa
S10	4 453.28	5	1.12	22.17	4.98
S11	4 500.72	5	1.11	18.64	4.14
S12	4 429.65	5	1.13	21.84	4.93
S01	4 453.28	10	2.25	31.00	6.96
S02	4 429.65	10	2.26	28.29	6.39
S03	4 429.65	10	2.26	27.47	6.20
S04	4 406.09	20	4.54	36.74	8.34
S05	4 488.83	20	4.46	38.65	8.61
S06	4 441.46	20	4.50	39.09	8.80
S07	4 488.83	30	6.68	43.56	9.70
S08	4 524.53	30	6.63	43.84	9.69
S09	4 370.87	30	6.86	43.12	9.87

岩石的抗剪强度指岩石抵抗剪切破坏的能力，可用 c 和 φ 来表示。直接剪切试验的原理就是库仑定律。库仑定律认为在法向应力较小时，抗剪强度与法向应力近似一条直线，用公式可表示为

表 2 层状盐岩直剪试验结果

Table 2 Results of direct shear test for layered salt rock

试样编号	剪切面面积 /mm ²	法向力 /kN	法向应力 /MPa	最大剪切力 /kN	峰值剪应力 /MPa
L10	4 548.41	5	1.10	25.84	5.68
L11	4 560.37	5	1.10	23.50	5.15
L12	4 394.33	5	1.14	19.53	4.44
L01	4 465.11	10	2.24	27.92	6.25
L02	4 453.28	10	2.25	26.00	5.84
L03	4 429.65	10	2.26	31.00	7.00
L04	4 453.28	20	4.49	40.52	9.10
L05	4 512.62	20	4.43	43.07	9.54
L06	4 441.46	20	4.50	38.86	8.75
L07	4 476.97	30	6.70	48.39	10.81
L08	4 429.65	30	6.77	49.54	11.18
L09	4 453.28	30	6.74	46.49	10.44

表 3 硬石膏直剪试验结果

Table 3 Results of direct shear test for anhydrite

试样编号	剪切面面积 /mm ²	法向力 /kN	法向应力 /MPa	最大剪切力 /kN	峰值剪应力 /MPa
M10	4 488.83	5	1.11	22.66	5.05
M11	4 548.41	5	1.10	23.20	5.10
M12	4 441.46	5	1.13	21.12	4.76
M01	4 441.46	10	2.25	26.45	5.96
M02	4 500.72	10	2.22	28.42	6.31
M03	4 406.09	10	2.27	25.05	5.69
M04	4 572.34	20	4.37	37.29	8.16
M05	4 465.11	20	4.48	37.84	8.47
M06	4 488.83	20	4.46	39.14	8.72
M07	4 429.65	30	6.77	40.88	9.23
M08	4 394.33	30	6.83	41.85	9.52
M09	4 453.28	30	6.74	42.00	9.43

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \tag{2}$$

盐岩、层状盐岩和硬石膏的抗剪强度曲线分别如图 4~6 所示。3 种试样的抗剪强度参数见表 4。其中，层状盐岩交界面处的抗剪强度参数 c ， φ 值分别为 4.08 MPa 和 45.9°，可见层状盐岩交界面的

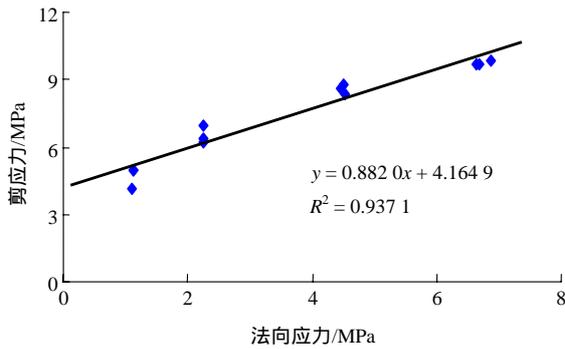


图 4 盐岩的抗剪强度曲线

Fig.4 Curve of shear strength for salt rock

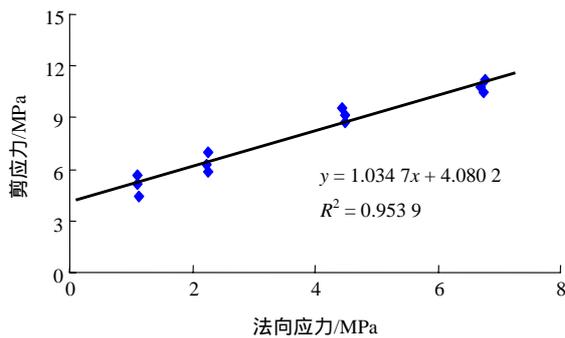


图 5 层状盐岩交界层面直接剪切强度曲线

Fig.5 Curve of shear strength for layered salt rock in direct shear text

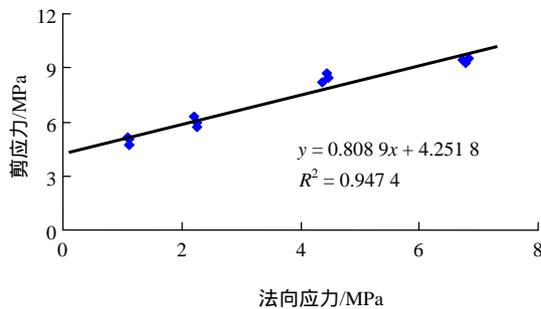


图 6 硬石膏的直接剪切强度曲线

Fig.6 Curve of direct shear strength for anhydrite

表 4 3 种试样的抗剪强度参数

Table 4 Shear strength parameters of three types of rocks

试样类别	φ ($^{\circ}$)	c /MPa
盐岩	41.4	4.17
层状盐岩交界面	45.9	4.08
硬石膏	39.0	4.25

c 值与盐岩和硬石膏的相差不大, 而 φ 值则比盐岩和硬石膏的大, 由此可知交界层面的黏结力较强, 有较强的抗剪切能力, 不易产生剪切滑动。试样破坏后图片见图 7。

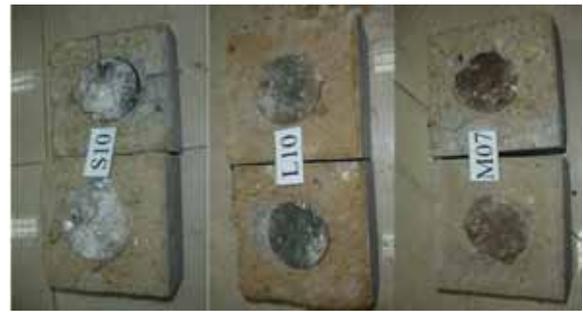


图 7 3 种岩石试样的直接剪切试样破坏图片

Fig.7 Failure pattern pictures of three types of rocks in direct shear test

5 结 论

层状盐岩界面和盐岩、硬石膏的剪应力-位移曲线较为相似, 其基本特点是: 加载初期曲线的斜率较小, 剪应力增加缓慢而位移增加较快; 当剪应力达到某一数值后, 剪切位移增加变得缓慢, 曲线斜率变大, 快达到峰值强度时曲线斜率再逐渐由陡变缓, 相对而言, 复合岩石和硬石膏由陡变缓达到峰值强度的这个阶段跟盐岩相比要短一些; 达到峰值强度后出现应变软化, 剪应力随剪切位移的增加逐渐达到残余强度, 相对而言, 从峰值强度达到残余强度, 复合层状岩石的剪应力随位移下降得比较快。

本文试验的重要发现是: 对于湖北云应盐矿, 层状盐岩交界层面处的抗剪强度参数 c , φ 值分别为 4.08 MPa 和 45.9 $^{\circ}$, 与盐岩和硬石膏试样的抗剪强度参数 c , φ 值相差并不大, 甚至还略强, 这说明湖北云应盐矿深部层状盐岩中盐岩和硬石膏的交界层面具有较强的黏结力, 不是一个弱面, 这将有利于盐岩溶腔的密闭性和稳定性, 对于在深部层状盐岩构造中开展能源储备是非常有利的。当然这一结论是否具有区域普适性以及界面化学分析将是下一步工作的研究重点。

参考文献(References):

- [1] 李银平, 刘江, 杨春和. 硬石膏夹层对盐岩变形和破坏特征的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 461 - 2 466.(LI Yinping, LIU Jiang, YANG Chunhe. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 461 - 2 466.(in Chinese))

- [2] LIANG W G , YANG C H , ZHAO Y S , et al. Experimental investigation on mechanical properties of bedded salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2007 , 44(3) : 400 – 411.
- [3] HUNSCHE U , HAMPEL A. Rock salt—the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository[J]. Engineering Geology , 1999 , 52(3/4) : 271 – 291.
- [4] HUNSCHE U , ALBRECHT H. Results of true triaxial strength tests on rock salt[J]. Engineering Fracture Mechanics , 1990 , 35(4/5) : 867 – 877.
- [5] HUNSCHE U. Fracture experiments on cubic rock salt samples[C]// The First Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-Zellerfeld : Trans. Tech. Publications , 1984 : 169 – 179.
- [6] SKROTZKI W. An estimation of the brittle to ductile transition in salt[C]// The First Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-Zellerfeld : Trans Tech. Publications , 1984 : 381 – 388.
- [7] 吴文,徐松林,杨春和,等. 盐岩的冲击特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21) : 3 613 – 3 620.(WU Wen , XU Songlin , YANG Chunhe , et al. Testing studies on response behaviour of rock salt to impacting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(21) : 3 613 – 3 620.(in Chinese))
- [8] 吴文,徐松林,杨春和,等. 盐岩冲击过程本构关系和状态方程研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3) : 367 – 372.(WU Wen , XU Songlin , YANG Chunhe , et al. Investigation on constitutive relationship and equation of state for salt under impact loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2004 , 26(3) : 367 – 372.(in Chinese))
- [9] 杨春和,白世伟,吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000 , 19(3) : 270 – 275.(YANG Chunhe , BAI Shiwei , WU Yimin. Stress level and loading path effect on time-dependent properties of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2000 , 19(3) : 270 – 275.(in Chinese))
- [10] 杨春和,高小平,吴文. 盐岩时效特性实验研究与理论分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(6) : 764 – 766.(YANG Chunhe , GAO Xiaoping , WU Wen. Experiment studies and theoretical analysis of time-dependent properties of rock salt[J]. Journal of Liaoning Technical University , 2004 , 23(6) : 764 – 766.(in Chinese))
- [11] 杨春和,陈锋,曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11) : 1 602 – 1 604.(YANG Chunhe , CHEN Feng , ZENG Yijin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2002 , 21(11) : 1 602 – 1 604.(in Chinese))
- [12] 高小平,杨春和,吴文,等. 盐岩蠕变特性温度效应的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12) : 2 054 – 2 059.(GAO Xiaoping , YANG Chunhe , WU Wen , et al. Experimental studies on temperature dependent properties of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(12) : 2 054 – 2 059.(in Chinese))
- [13] 刘江,杨春和,吴文,等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1) : 3 104 – 3 109.(LIU Jiang , YANG Chunhe , WU Wen , et al. Experiment study on short-term strength and deformation properties of salt rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(Supp.1) : 3 104 – 3 109.(in Chinese))
- [14] 杨春和,李银平. 互层盐岩体的 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23) : 4 226 – 4 232.(YANG Chunhe , LI Yinping. Expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(23) : 4 226 – 4 232.(in Chinese))
- [15] 李银平,杨春和. 层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(4) : 509 – 513.(LI Yinping , YANG Chunhe. Three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics , 2006 , 27(4) : 509 – 513.(in Chinese))
- [16] 陈锋,李银平,杨春和,等. 云应盐矿蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1) : 3 022 – 3 027.(CHEN Feng , LI Yinping , YANG Chunhe , et al. Experimental study on creep behaviors of rock salt in Yunying Salt Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(Supp.1) : 3 022 – 3 027.(in Chinese))