

文章编号:0253-9993(2013)S1-0076-06

一种含夹层盐岩模型材料的试验研究

姜德义¹, 张军伟¹, 屈丹安^{1,2}, 陈 结¹, 杨春和^{1,3}

(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. 西气东输管道公司, 江苏 金坛 213200; 3. 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)

摘要:以江苏金坛盐矿天然含夹层盐岩为原型,采用天然盐粉、精制石英砂、松香和酒精等作原料,根据相似原理,经过多次配比试验,研制出一种含夹层盐岩相似材料,其密度、泊松比、弹性模量、抗压强度等物理力学参数基本满足相似理论设定参数,其变形特征和破坏特性也与天然含夹层盐岩相似。试验结果表明:压制力增大,含夹层盐岩模型材料的力学强度越高;含水率和夹层厚度增加,将弱化其力学强度;夹层总厚度相同时,夹层数目多的模型材料比夹层数目少的力学强度略高。

关键词:含夹层盐岩; 夹层; 模型材料; 相似理论**中图分类号:**TU458 **文献标志码:**A

Experimental study on a similar material of rock salt with interlayer

JIANG De-yi¹, ZHANG Jun-wei¹, QU Dan-an^{1,2}, CHEN Jie¹, YANG Chun-he^{1,3}

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

Abstract: The rock salt with interlayer in Jintan Salt Mine in China was regarded as the prototype in this experiment. A similar material of rock salt with interlayer by using natural salt powder, quartz sand, rosin and alcohol based on similarity theory was made by numerous experiments. The physical and mechanical parameters of model material basically met the similar conditions, such as bulk weight, Poisson's ratio, elastic modulus, compressive strength. The deformation characteristics and failure characteristics were similar to the natural bedded rock salt. The effect of pressure, moisture content, the interlayer thickness and the number of interlayer for mechanical properties of the model material was studied. The results show that the higher compaction force of the similar material is, the more stronger mechanical strength is. The increasing of moisture content and interlayer thickness of the similar material will weaken its mechanical strength. When the total thickness of interlayer is similar, then the mechanical strength of similar material with more interlayers is slightly higher than the one with less interlayer.

Key words:salt rock with interlayer; interlayer; similar material; similarity theory

深部盐岩矿床是石油、天然气等能源地下储备的理想场所。我国盐岩矿床多夹层,其典型特点是单层厚度薄,软弱夹层多,这些夹层的存在给盐岩造腔过程中造腔速度和腔体形状的控制带来了难度,也影响着腔体的稳定性^[1-2]。因此,开展含夹层盐岩体的物理力学特性和工程应用研究,对我国地下能源储备库建造和运营具有重要的意义。目前,国内外很多学者

对层状盐岩做了相关研究:Taliercio A 等^[3]对层状岩石的破坏机理进行了试验研究;杨春和、李银平、徐素国等^[4-6]对层状盐岩体的变形和破坏特性进行了研究,发现软弱夹层对层状岩体的强度起决定作用;唐明、邵保平^[7-8]对含夹层盐岩的蠕变特性进行了研究,发现夹层的蠕变率小于盐岩,但是夹层含量大小影响着含夹层盐岩的蠕变特性。以上试验都是以天

然含夹层盐岩为试验对象的,天然含夹层盐岩受制于尺寸、钻孔取芯成本和场地复杂性的影响,获取十分困难,而且,岩芯中夹层的厚度和位置分布都是随机的,对于研究其力学特性来说缺乏规律性。与此相反,模型试样获取容易,可重复性好,更有利于实验的观测和研究。任松、刘建平等^[9-10]研制出了一种盐岩相似材料用于盐岩蠕变特性和溶解特性的研究,但是这些模型材料并不涉及夹层问题;张强勇等^[11]研制出了一种盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料,把盐岩层、泥岩层和夹层分别单独进行了模拟,没有考虑含夹层盐岩的情况;张桂民等^[12]等研制了一种交互层状岩体模型材料制备方法,但是没有找到与天然含夹层盐岩力学特性相似的材料。

本文经过多次试验,成功研制出了一种与金坛盐矿天然赋存的含夹层盐岩单轴力学强度相似的模型材料,并初步研究了压制力、含水率、夹层厚度和夹层数目对模型材料力学性质的影响。这为将来对含夹层盐岩体的物理力学理论和工程应用研究提供理论基础。

1 相似原理

根据相似原理要求,相似材料的物理力学现象要与天然岩体相似。试验将含夹层盐岩看作一个整体但又不改变其层状分布特征,针对其物理力学特性并结合试验研究内容,作了合理的简化。设原型为 P,模型为 M,原型和模型之间具有相同量纲的同种物理量的相似比为 K,定义 L 为长度,γ 为密度,E 为弹性

模量,σ 为应力,ε 为应变,μ 为泊松比,g 为重力加速度,t 为时间。根据相似第三定理,利用量纲分析法^[13-14]推导出模型试验满足以下相似关系。

(1) 应力相似比尺 K_σ 、弹性模量相似比尺 K_E 和应变相似比尺 K_ϵ 之间的关系:

$$K_\sigma = K_E K_\epsilon \quad (1)$$

(2) 弹性模量相似比尺 K_E 、几何相似比尺 K_L 和密度相似比尺 K_γ 之间的关系:

$$K_E = K_L K_\gamma \quad (2)$$

(3) 几何相似比尺 K_L 、重力加速度相似比尺 K_g 和时间相似比尺 K_t 之间的关系:

$$K_L = K_g K_t^2 \quad (3)$$

(4) 原型和模型所有无量纲物理量(如应变、泊松比等)的相似比尺等于 1,即

$$K_\epsilon = K_\mu = 1 \quad (4)$$

2 模型材料的制作与力学试验测试

2.1 试验参数的确定

试验以金坛盐矿埋深 870~950 m 的天然含夹层盐岩的物理力学参数为参考,各项参数的相似比选取如下:几何相似比 $K_L=1$, 密度相似比 $K_\gamma=1$, 重力加速度相似比 $K_g=1$, 应力相似比 $K_\sigma=1$, 弹性模量相似比 $K_E=1$, 对于无量纲量相似比皆取 1。

对比金坛天然含夹层盐岩常规力学参数结合相似比可以确定含夹层盐岩模型材料的常规力学参数的理论值,见表 1。

表 1 金坛天然含夹层盐岩和设计模型材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of model material and bedded salt rock in Jintan

名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	单轴抗压强度/MPa
天然含夹层盐岩	21.16	3.80	0.277	5.70	30.43	19.46
设计模型材料	21.16	3.80	0.277	5.70	30.43	19.46

2.2 材料选择和配比试验

模型材料的选择要保证其物理力学特性与天然含夹层盐岩相似。试验选用重庆北碚区天然盐矿筛选出的盐粉和精制石英砂作为主要原料,二者的化学成分见表 2 和表 3。其中,选用粒径小于 16 目的盐粉作为含夹层盐岩的盐层部分,使用前将盐粉在烘干箱中放置 24 h 进行干燥处理;选用粒径为 10~20 目的精制石英砂、松香和酒精作为夹层部分,石英砂作为夹层的骨料,松香和酒精作为胶结剂,使用时将骨料和胶结剂搅拌均匀。

经过多次配比试验和力学测试,最终找出了一种基本满足相似条件要求的模型材料配比方案,具体见

表 4。

表 2 北碚天然盐粉筛选后成分

Table 2 Components of Beibei natural salt %

可溶物		不溶物		
NaCl	Na ₂ CO ₃	K ₂ SO ₄	石沙	泥质
91	0.5	0.5	7.5	0.5

表 3 精制石英砂化学成分

Table 3 Chemical composition of quartz sand %

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO+MgO
99.74	0.025	0.008	0.03

表4 模型材料配比方案

Table 4 Ratio of the similar materials

含夹层盐岩	材料配比 $S : Q : R : A$	占材料总质量/%
盐层	1 : 0 : 0 : 0	90
夹层	0 : 9 : 1 : 0.2	10

注: S 为干燥盐粉质量; Q 为精制石英砂质量; R 为松香质量; A 为酒精质量。

2.3 试件制备

试件制备采用200 t压力试验机将盐岩粉末与夹层粉末压制成型,如图1所示。试件的制备过程为:先分别称量一定量的粒径小于16目的干燥盐粉和一定量的夹层混合物;然后按照盐粉—夹层—盐粉的顺序,把制备好的材料先后添加到压制模具中,最后利用120 MPa的压力加压,保压30 min后取出试件(图2),密封放置24 h即可进行力学试验。



图1 压力试验机

Fig. 1 Pressure testing machine



图2 含夹层盐岩试样

Fig. 2 Samples of similar salt rock with interlayer

2.4 力学测试结果

力学试验采用自制的高温三轴盐岩特性试验机。最大轴力400 kN,轴力误差精度小于示值的 $\pm 0.8\%$,位移误差精度小于 $\pm 0.8\%$ 。

为了对试件展开单轴压缩力学试验研究,需要将模型试件制作成高径比为2:1的标准试件^[15]。试验前将压制的模型试件手工打磨成直径49 mm,高98 mm的标准试件,误差小于1 mm。单轴压缩试验采用0.5 mm/min的加载速率,试验结果见表5。

表5 模型材料单轴压缩试验实测物理力学参数

Table 5 Measured values of physico-mechanical parameters of uniaxial compression tests for similar material

试件 编号	夹层厚 度/mm	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	单轴抗压 强度/MPa
A1	10.12	19.767	2.410	0.231	19.02
A2	10.09	19.796	2.393	0.222	19.57
A3	10.20	19.994	2.767	0.354	20.29
平均值	10.14	19.852	2.523	0.269	19.63

对比表1和表5发现模型材料的密度、单轴抗压强度、泊松比等参数与天然含夹层盐岩的相似度均大于93%,满足相似要求,而弹性模量仅为天然含夹层盐岩的66.4%,相似度较低。但是,模型材料的变形发展过程和破坏特征均与天然试件相似,同时考虑到模型材料只经过短时间的保压胶结成型,远不及天然含夹层盐岩经过长期的压密结晶过程而变得致密,因此,认为弹性模量存在的差距是在可接受范围之内。

2.5 模型材料的变形破坏特征分析

图3为模型材料的单轴压缩应力-应变曲线,图4为金坛天然含夹层盐岩的单轴压缩应力-应变曲线。对比分析图3,4可知,模型材料的应力应变曲线基本和天然含夹层盐岩的应力应变曲线相似,都包括孔隙压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和破裂阶段。其中,模型材料的孔隙压密阶段较天然含夹层盐岩长,这是因为模型材料的压制时间较短,难以达到天然盐岩的致密程度。此外,模型材料的径向应变在峰值后的变化范围较天然含夹层盐岩小。这是由于盐层和夹层的变形特征不同,而天然含夹层岩盐试件一端是夹层,一端是盐层,分布不均匀,模型材料中夹层均分布在盐层中间。单轴压缩试验时,径向变形仪均固定在试件中部,在做天然试件时,径向变形仪测的部位是变形能力较强的盐层,模型材料试验时,径向变形仪测的部位是变形能力远不及天然盐层的夹层材料。因此,试样应力达到峰值之后图3中显示的扩容现象比图4中的明显要小,但是考虑到反映试样轴、径向整体变形特征的泊松比二者相似,且图5中也能看到模型材料有明显的径向扩容现象,所以认为模型材料能够用于含夹层盐岩力学特性的研究。

从图3可知,模型材料经过较长的弹性变形阶段后开始屈服。当应力达到峰值后,轴向应变不断增加,应力快速下降,这与天然含夹层盐岩的应力-应变关系基本保持一致。随着轴向应力的不断增大,

试件的径向应变也不断增加,应力达到峰值后的一段时间内,应力缓慢下降,但径向应变持续增加,这

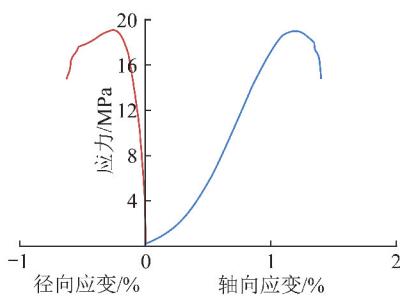


图 3 含夹层盐岩模型材料单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of model material of salt rock with interlayer under uniaxial compression

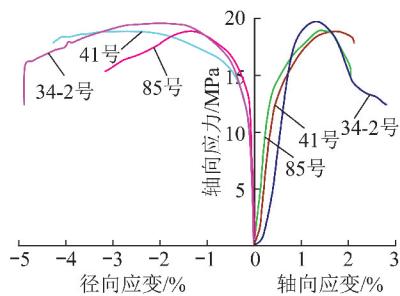


图 4 金坛含夹层盐岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of Jintan's salt rock with interlayer under uniaxial compression



图 5 模型材料单轴压缩破坏

Fig. 5 Uniaxial compression destruction of model material

是因为试件已经出现了张拉裂缝,在应力作用下这些裂缝不断扩展变大。

图 5 为模型材料单轴压缩破坏后的图片,从图中可知,试件的单轴压缩破坏形式为沿着轴向多个劈裂面产生张拉破坏,同时,夹层部分有不同程度的鼓胀。含夹层盐岩试件破坏时,盐层与夹层结合处首先破坏,然后向盐岩部分扩展。

3 模型材料力学特性影响因素

在寻找模型材料的配比试验过程中发现压制力、含水率、夹层厚度和夹层数目等因素均对含夹层盐岩模型材料的力学特性有影响。针对每个因素都设置了 3 个水平,在其他因素相同时单独分析了某个因素对模型材料力学性质的影响,试验方案见表 6。

表 6 模型材料力学特性影响因素研究方案

Table 6 Research program of model material's mechanical properties influencing factors

组别	压制力/MPa	含水率/%	夹层厚度/mm	夹层数目
B	100~200	0	10	1
C	120	0.16~1.08	10	1
D	120	0	10~20	1
E	120	0	5~15	1~3

图 6 和表 7 是不同压制力对模型材料力学性质的影响情况,从中可知,压制力为 100 MPa 时,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量最小,而泊松比最大;压制力为 200 MPa 时,单轴抗压强度和弹性模量最大,而其泊松比最小;压制力为 120 MPa 时,单轴抗压强度、弹性模量和泊松比居中。可见,随着压制力的增大,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量有增大趋势而泊松比呈现减小趋势。

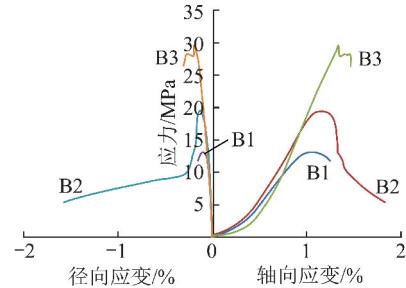


图 6 不同压制力的模型材料的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of model materials under different press power

表 7 不同压制力的模型材料的力学参数

Table 7 Mechanical parameters of model materials under different press power

试件编号	压制力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
B1	100	2.058	0.231	13.16
B2	120	2.523	0.186	19.12
B3	200	3.429	0.182	29.47

图 7 和表 8 是不同含水率对模型材料力学性质的影响情况,从中可知,含水率为 1.08% 时,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量最小而泊松比最大;含水率为 0.16% 时,单轴抗压强度和弹性模量最大而其泊松比最小;含水率为 0.62% 时,模型材料的单轴抗压强度、弹性模量和泊松比居中。可见,随着含水率的增大,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量有减小趋势而泊松比呈现增大趋势。

图 8 和表 9 是不同夹层厚度对模型材料力学性质的影响情况,从中可知,夹层厚度为 20 mm 时,模

型材料的单轴抗压强度和弹性模量最小;夹层厚度为10 mm时,单轴抗压强度和弹性模量最大;夹层厚度为15 mm时,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量居中。可见,随着含水率的增大,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量有减小趋势而泊松比变化趋势不明显。

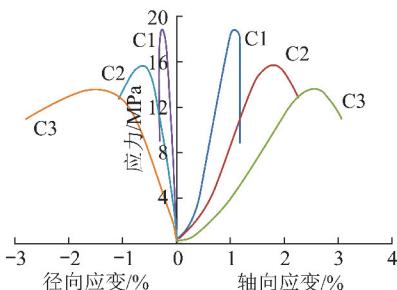


图7 不同含水率的模型材料的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of model materials with different moisture content

表8 不同含水率的模型材料的力学参数

Table 8 Mechanical parameters of model materials with different moisture content

试件编号	含水率/%	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
C1	0.16	2.767	0.155	18.77
C2	0.62	1.319	0.364	15.70
C3	1.08	0.730	0.508	13.54

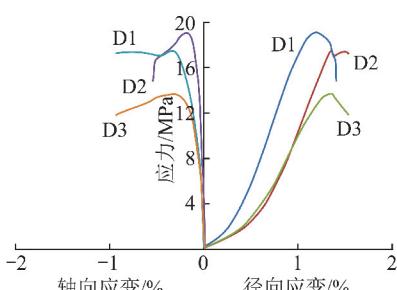


图8 不同夹层厚度的模型材料的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of model materials with different interlayer thickness

表9 不同夹层厚度的模型材料的力学参数

Table 9 Mechanical parameters of model materials with different interlayer thickness

试件编号	夹层厚度/mm	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
D1	10	2.523	0.186	19.12
D2	15	2.176	0.330	17.46
D3	20	1.523	0.214	13.64

质的影响情况,试件中每个夹层的厚度为5 mm。从中可知,夹层数目为3时,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量最小而泊松比最大;夹层数目为1时,单轴抗压强度和弹性模量最大而其泊松比最小;夹层数目为2时,单轴抗压强度、弹性模量和泊松比居中。可见,夹层总厚度不同时,随着夹层数目的增大,模型材料的单轴抗压强度和弹性模量有减小趋势而泊松比呈现增大趋势。这可能是因为夹层混合物在压制过程中只是经过简单的胶结,黏结力低,使得夹层比盐层强度低,所以,夹层的强度对整个试件的强度起到了决定作用。当夹层在试件中的厚度比增大时,模型材料的整体强度也随之下降。

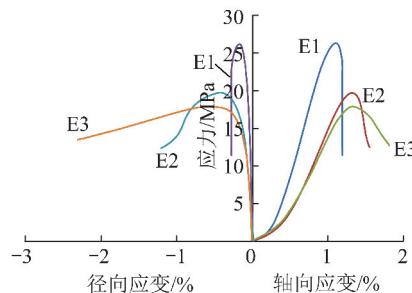


图9 不同夹层数目的模型材料应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of model materials with different interlayer number

表10 不同夹层数目的模型材料的力学参数

Table 10 Mechanical parameters of model materials with different interlayer number

试件编号	夹层数	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
E1	1	3.477	0.116	26.13
E2	2	2.206	0.180	19.65
E3	3	1.523	0.212	17.87

对比表9和表10可知,当夹层总厚度同为10 mm时,夹层数目为1的试件单轴抗压强度为19.12 MPa,比夹层数目为2的试件单轴抗压强度小0.53 MPa;当夹层总厚度同为15 mm时,夹层数目为1的试件单轴抗压强度为17.46 MPa,比夹层数目为3的试件单轴抗压强度小0.41 MPa。可见,当夹层总厚度相同时,夹层数目少的力学强度略低于夹层数目多的,这可能是夹层数目越多,使试件整体岩性分布更为均匀,从而使强度略有增加,但是厚度比仍然是影响模型材料总体强度的主要因素。究竟夹层的分布特征对含夹层盐岩力学强度影响的详细情况是怎样的,还需要后续更多针对性的试验研究,本文主要目的在于找到一种含夹层盐岩的模型材料并初步探讨可能影响其力学特性的因素。

图9和表10是不同夹层数目对模型材料力学性

4 结 论

(1) 经过大量的材料配比和力学性质测试找到了一种以盐粉、精制石英砂、松香和酒精为主要材料的含夹层盐岩的模型材料,该模型材料基本满足相似要求。

(2) 利用此模型材料压制的标准含夹层型岩试件,其变形和破坏特性和天然含夹层盐岩的变形破坏特性基本相同。

(3) 通过改变含夹层盐岩模型材料的压制力、含水率、夹层厚度和夹层数目等因素,对其做单轴压缩试验。结果发现,压制力的增大提高了含夹层盐岩模型材料的力学强度,含水率和夹层厚度的增加降低了含夹层盐岩模型材料的力学强度,并且,总厚度相同时,夹层数目增加,力学强度略有增大。

值得说明的是,文中研究的含夹层盐岩中盐岩部分采用天然盐粉,夹层采用不溶材料,所以模型材料具有和天然盐岩相似的溶解特性,但因相似材料中压制的盐岩的溶解速率受压制力、保压时间和含水率等因素影响,使得相似材料中的盐岩溶解速率和天然盐岩存在差异。因本文重点在分析含夹层盐岩的力学特征,故对其溶解特性未做具体分析和描述。

参考文献:

- [1] 邵保平,赵阳升,赵延林,等. 层状盐岩储库长期运行腔体围岩流变破坏及渗透现象研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (S): 241–246.
Xi Baoping, Zhao Yangsheng, Zhao Yanlin, et al. Investigation on rheodestruction and permeability of surrounding rock for long-term running storage cavern in bedded rock salt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (S): 241–246.
- [2] 班凡生,熊伟,高树生,等. 岩盐储气库水溶建腔影响因素综合分析研究 [A]. 第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集 [C]. 2011.
Ban Fansheng, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. The generalized analysis research on factors to effect gas storage in salt caverns building with water solution [A]. Conference Proceedings of the Ninth National Rock Mechanics And Engineering [C]. 2011.
- [3] Taliercio A, Landriani G S. A failure condition for layered rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25(5): 299–305.
- [4] 杨春和,李银平,屈丹安,等. 层状盐岩力学特性研究进展 [J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484–494.
Yang Chunhe, Li Yiping, Qu Dan'an, et al. Research progress of mechanical properties of salt rock with interlayer [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(4): 484–494.
- [5] 李银平,刘江,杨春和. 泥岩夹层对盐岩变形和破损特征的影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2461–2466.
Li Yiping, 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): 2461–2466.
- [6] 徐素国,梁卫国,莫江,等. 软弱泥岩夹层对层状盐岩体的力学特性影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 878–883.
Xu Suguo, Liang Weigu, Mo Jiang, et al. Influence of weak mud stone intercalated layer on mechanical properties of laminated salt rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 878–883.
- [7] 唐明明,王芝银,丁国生,等. 含夹层盐岩蠕变特性试验及其本构关系 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 42–45.
Tang Mingming, Wang Zhiyin, Ding Guosheng, et al. Creep property experiment and constitutive relation of salt-mudstone interlayer [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 42–45.
- [8] 邵保平,赵阳升,赵金昌,等. 层状盐岩在温度应力耦合作用下的蠕变特性进行了研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 90–96.
Xi Baoping, Zhao Yangsheng, Zhao Jinchang, et al. Study on coupled thermo-mechanical creep properties of bedded rock salt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 90–96.
- [9] 任松,郭松涛,姜德义,等. 盐岩蠕变相似模型及相似材料研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 106–110.
Ren Song, Guo Songtao, Jiang Deyi, et al. Study of creep similar model and creep equivalent material of salt rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 106–110.
- [10] 刘建平,姜德义,陈结,等. 一种盐岩相似材料的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3660–3665.
Liu Jianping, Jiang Deyi, Chen Jie, et al. Experimental research on a similitude material of rock salt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3660–3665.
- [11] 张强勇,刘德军,贾超,等. 盐岩油气储库介质地力学模型相似材料的研制 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3581–3586.
Zhang Qiangyong, Liu Dejun, Jia Chao, et al. Development of geo-mechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3581–3586.
- [12] 张桂民,李银平,施锡林,等. 一种交互层状岩体模型材料制备方法及初步试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 284–289.
Zhang Guimin, Li Yiping, Shi Xilin, et al. Research on a model material preparation method for alternate layered rock mass and preliminary experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 284–289.
- [13] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验 [M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2005.
- [14] 张强勇,李术才,焦玉勇. 岩体数值分析方法与地质力学模型试验原理及工程应用 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [15] 中华人民共和国煤炭工业部. 煤与岩石物理力学性质测定方法 [M]. 北京:中国标准出版社, 1988: 32–33.