

淮安盐岩及含泥质夹层盐岩应变全过程试验研究

唐明明¹, 王芝银¹, 丁国生²

(1. 中国石油大学 城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065006)

摘要: 针对淮安盐矿深部层状盐岩的构造特征, 对含泥岩夹层盐岩、纯泥岩和纯盐岩 3 种岩芯试样进行单轴压缩和不同围压下三轴压缩的全过程试验研究, 对比分析 3 种岩样的应变和破坏特性。试验结果表明: (1) 含夹层盐岩及纯盐岩在单轴及三轴条件下, 表现出明显的塑性应变趋势, 且其应力-应变全曲线表现出明显的应变硬化软化性质; (2) 盐岩及含夹层盐岩表现出明显的塑性应变能力, 采用多次加卸载循环后的弹性加载曲线来测定其弹性模量值较符合实际; (3) 对于纯盐岩试件, 随着加载的进行, 黏聚力随着塑性应变的增加而越来越小, 内摩擦角则先增大后减小; (4) 泥质夹层的存在对盐岩试件的力学性质有很大的影响, 主要表现为试件强度的提高, 并且泥质夹层的情况决定含夹层盐岩试件的破坏形式。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 含泥质夹层盐岩; 应变硬化软化; 应变全过程

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)增 1-2712-08

EXPERIMENTAL STUDY OF FULL PROCESS OF STRAIN OF ROCK SALT AND SALT-MUDSTONE INTERLAYER IN HUAI'AN SALT MINE

TANG Mingming¹, WANG Zhiyin¹, DING Guosheng²

(1. *Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

2. *Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei 065006, China*)

Abstract: For investigation on the mechanical characteristics of layered salt rocks in Huai'an Salt Mine, Jiangsu Province, and in consideration of the laminative geological structural character of most salt mines in China, experimental studies of uniaxial and triaxial compressions are carried out on three kinds of rock samples which are rock salt, mudstone and salt-mudstone interlayer. The experiment results indicate that: (1) The strain-stress relationship of rock salt and salt-mudstone interlayer under uniaxial compression or triaxial compression performs obviously strain hardening-softening properties. (2) The rock salt and salt-mudstone interlayer have obvious plastic deformation ability. The elastic modulus measured by the cycle loading-unloading curve is better than that measured directly from the primeval loading curve. (3) For the rock salt, the cohesive force is getting smaller and smaller while the internal friction angle first increases and then decreases with the plastic shear deformation increasing. (4) The presence of mudstone interlayer affects the mechanical characteristics of samples remarkably. The primary phenomenon is the strength's increasing. The failure modes of the mudstone interlayer rock salt are determined by their states.

Key words: rock mechanics; rock salt; salt-mudstone interlayer; strain hardening-softening; full process of strain

收稿日期: 2009-03-20; **修回日期:** 2009-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774090)

作者简介: 唐明明(1983-), 男, 2005年毕业于中国石油大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学及工程应用方面的研究工作。E-mail: tmm_sugar@126.com

1 引言

石油天然气等能源的地下储存已经成为一个不可避免的发展趋势, 盐岩由于具有孔隙度低, 渗透率小及塑性应变能力大等特点, 被认为是石油及天然气储备的理想场所。我国盐矿岩层的大多数为含夹层的层状盐岩, 盐丘型盐层极为稀缺, 目前, 国外学者对盐岩的力学特性开展了一系列研究^[1~13], 国内外方面如 U. Hunsche 等^[1, 2]通过试验开展了盐岩的静、动力学特征、蠕变特性及温度效应的研究, M. Hamami^[3]对盐岩分别进行现场原位试验及室内试验, 并比较了 2 种试验结果的差异; H. Alkan 等^[4]则是通过室内三轴压缩试验及声发射试验研究了盐岩在不同应力、加载速率及孔隙压力下的体积膨胀特性等。国内一些学者也在对盐岩性质研究的基础上针对层状盐岩尤其是湖北云应盐岩进行了一系列的研究^[8~12], 如: 梁卫国等^[8]对层状盐岩的物理力学特性进行了研究; 李银平等^[9~11]分析了泥岩夹层对盐岩应变和破损特征的影响; 杨春和和李银平^[12]则是针对不同岩层交替而成的互层盐岩体, 建立了三维 Cosserat 介质扩展本构模型。本文以江苏淮安某地区层状盐矿为研究对象, 对纯盐岩, 纯泥质夹层和含夹层盐岩 3 种试件进行单轴及三轴压缩试验, 得到 3 种岩芯的应力 - 应变全过程曲线, 并在三轴试验过程中进行加卸载循环试验, 得到了更符合实际的不同试件的弹性模量; 根据纯盐岩应力 - 应变的全过程曲线的应变硬化软化特性, 得到了其塑性硬化 - 软化模型参数; 并对 3 种岩芯试验结果进行对比, 分析了含夹层盐岩试件中夹层对岩芯力学特性影响。

2 试验设备及试件制备

试验仪器采用长春朝阳仪器厂出产的 RLW - 2000 三轴压缩试验机, 该试验机由轴向加载系统、围岩加载系统、计算机控制系统与测量系统四部分组成。其中最大轴向试验力为 2 000 kN, 最大围压为 80 MPa, 最大剪切试验力 1 000 kN。试验过程中荷载误差不超过 200 N, 仅为最大加载轴向力的 0.01%。

试件采用对已有盐岩及泥岩块进行套钻取芯, 由于常温下, 盐岩在水中溶解度较高, 因此在取芯

过程中, 采用饱和浓盐水或煤油代替纯水作为套钻取芯过程中的降温介质。取芯后, 对试件端面切割、磨平。试件高度及直径的比为 2 : 1, 试样两端面的平行度及不平整度均小于 0.025 mm。单轴试验时, 轴向荷载的加载速度为 0.50 MPa/s。三轴试验时, 先以 0.05 MPa/s 的加载速率同步施加侧向压力和轴向压力至预定的侧压力值, 并保持侧压力在试验过程中始终不变, 继而采用应变控制试验过程, 控制速率为 0.002 mm/s, 直到试件破坏。根据规程^[14]记录试验全过程的轴向载荷和应变值。

3 纯盐岩及泥岩试验结果分析

3.1 纯盐岩单轴压缩试验

对 3 个纯盐岩试件编号分别为 Y - 1, Y - 2, Y - 3 进行单轴压缩试验, 试验曲线如图 1 所示。

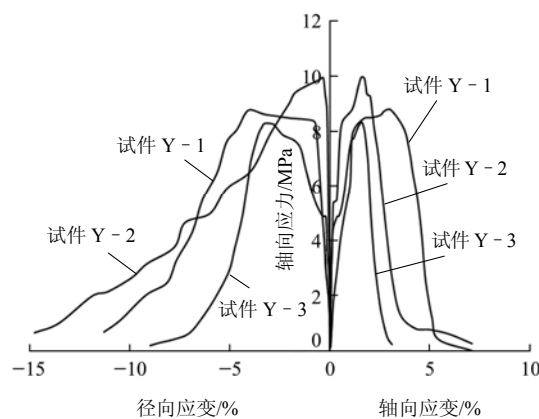


图 1 纯盐岩单轴压缩试验曲线

Fig.1 Curves of uniaxial compression of rock salts

盐岩在单轴条件下, 其应力 - 应变曲线大体可分为 3 个阶段: (1) 弹性应变阶段, 此阶段内的应力 - 应变曲线近似为直线, 达到屈服极限时, 其轴向应变仅为 0.1%左右, 屈服极限约为 5 MPa; (2) 塑性应变阶段, 此阶段内, 盐岩弹性应变较少, 塑性应变较大, 且轴向承受荷载能力随着塑性应变的增加而增加, 峰值应力约为 10 MPa, 此时轴向应变约为 1.5%; (3) 破坏阶段, 轴向加载超过峰值应力后, 随着加载的继续进行, 塑性应变持续增加, 轴向抗力不断减小, 并最终造成试件的破坏。盐岩试件在单轴压缩条件下, 其弹性模量为 2.76~6.89 GPa, 泊松比为 0.325~0.493, 屈服极限为 4.34~5.38 MPa, 峰值强度为 8.31~9.94 MPa。

3.2 纯盐岩三轴压缩试验

对纯盐岩试件 YS - 1, YS - 2, YS - 3 进行三轴压缩试验曲线, 其中 YS - 1 的试验围压为 30 MPa, 其三轴压缩试验曲线如图 2 所示, 由于盐岩试件在较低应力状态下就表现出“塑性应变”倾向, 试件自加载初期, 其应变就已经包括弹性应变及不可恢复的塑性应变, 因而在试验过程中, 为得到盐岩较为准确的弹性模量, 对试件进行卸载 - 再加载试验, 对 4 次卸载及再加载的试验曲线进行局部放大后如图 3 所示。

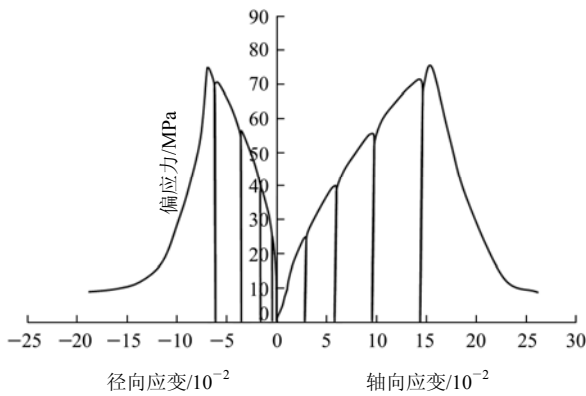


图 2 试件 YS - 1 三轴压缩试验曲线

Fig.2 Curves of triaxial compression of sample YS - 1

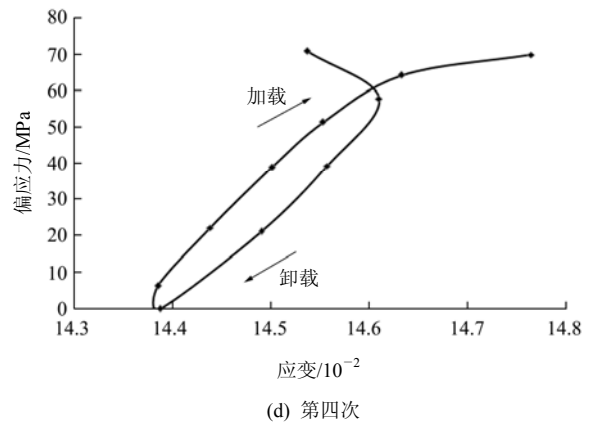
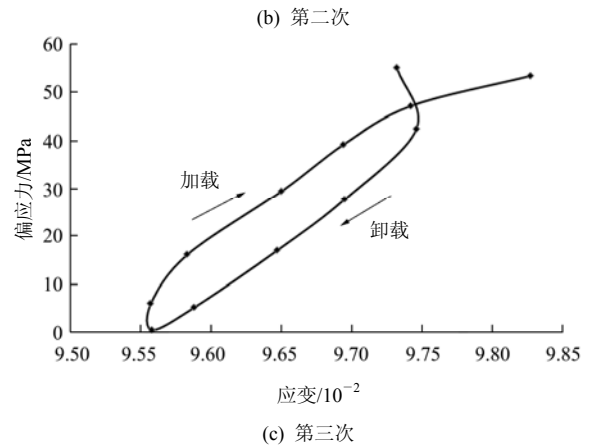
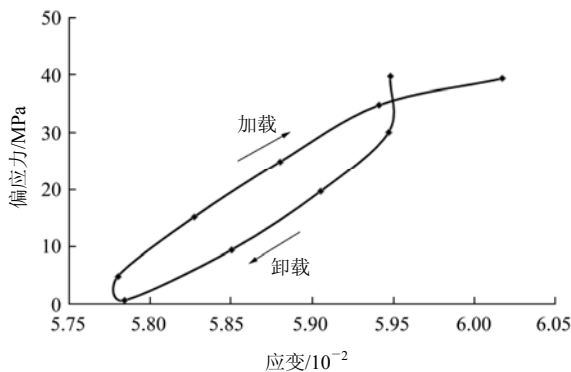
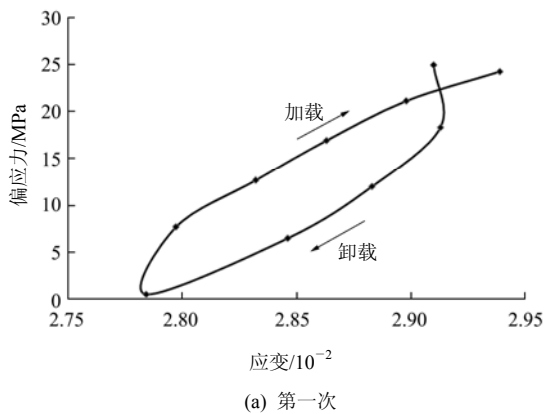


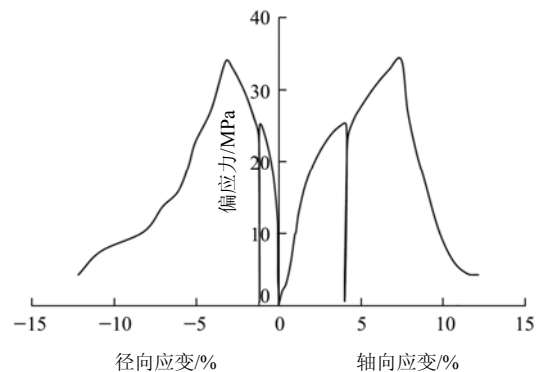
图 3 试件 YS - 1 加卸载试验曲线

Fig.3 Curves of the loading-unloading cycle of sample YS - 1



根据图 3, 试件 YS - 1 在 4 次加卸载循环中所表现出的加卸载弹性模量分别为 16.49, 18.75, 25.94 和 26.29 GPa。在卸载 - 再加载过程中, 可恢复的弹性应变仅为 0.2%左右, 与试件的总应变相比极少, 在整个压缩过程中几乎可以忽略不计, 盐岩试件的塑性应变较大。加载过程中, 轴向承载力随着塑性应变的增加而先增大后减小, 表现出明显的应变硬化 - 软化性质。

对试件 YS - 2 及 YS - 3 同样进行三轴压缩试验, 其试验围压分别为 10 及 20 MPa, 应力 - 应变试验曲线如图 4 所示。



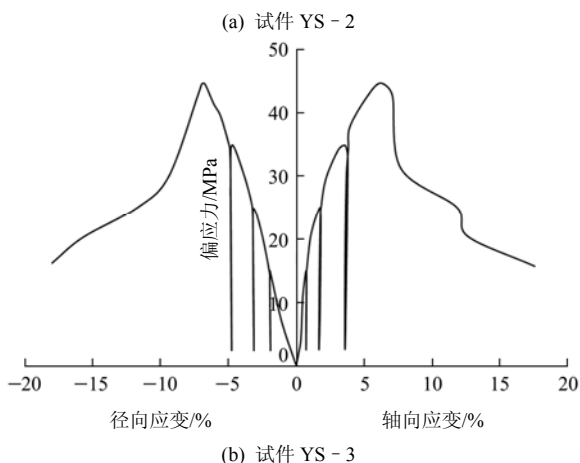


图 4 三轴压缩试验曲线

Fig.4 Curves of triaxial compression of sample

试件 YS - 2 在试验过程中, 仅进行了一次卸载及再加载试验, 其卸载及再加载弹性模量为 14.70 GPa, 试件 YS - 3 的 3 次卸载及再加载弹性模量分别为 13.40, 14.71 和 15.90 GPa, 可恢复的弹性应变仅为 0.15%~0.25%。由于试件总应变既包括可恢复的弹性应变又包括不可恢复的塑性应变, 且随着塑性应变的增加, 塑性应变在总应变中的比例增大, 因而随着加载的进行, 试件在卸载及再加载过程中随着循环次数的增加表现出综合弹性模量略微增加的趋势。不同围压下纯盐岩三轴压缩试验结果如表 1 所示。

通过对盐岩试件进行加卸载试验, 由于可恢复弹性应变相对总应变极小, 将每个试件最后一次加卸载循环试验的可恢复应变变量作为弹性应变变量, 根据不同应变时, 试件总应变变量减去可恢复的弹性应变变量, 得到试件的塑性应变变量, 进而可以根据不同围压时试件的三轴压缩全过程应力 - 应变曲线, 利用轴向应力、围压与轴向塑性应变的关系并采用 Coulomb-Navle 准则^[15]可以拟合纯盐岩在塑性硬化及软化阶段的屈服面并建立岩石的黏聚力 c 及内摩擦角 ϕ 与塑性应变的关系如图 5, 6 所示。

由图 5, 6 可见, 随着加载的进行, 黏聚力随着

塑性剪应变的增加越来越小, 内摩擦角则先增大后减小, 这种现象可解释为: 盐岩颗粒较大, 盐岩颗粒之间填充物的黏聚作用是盐岩试件黏聚力大小的重要影响因素, 随着试件塑性应变的增加, 试件内部裂隙的发展和贯通, 试件内部颗粒间裂隙增大, 填充物的黏聚作用降低, 因此表现为盐岩黏聚力的逐步降低, 同时, 由于盐岩颗粒较大, 形状不规则, 即使在较低的围压条件下, 颗粒之间仍然存在较大的摩擦力, 在塑性硬化阶段, 试件内部裂隙的发展, 颗粒间的接触面积增大, 摩擦力增加, 从而表现为内摩擦角的逐渐增大, 在塑性软化阶段, 由于内部裂隙贯通, 颗粒间的接触面积不再增加, 反而颗粒间的局部破坏使得颗粒间接触面更加光滑, 从而表现为摩擦力及内摩擦角的减小, 因而随着塑性应变的增加以及内部裂隙的扩展, 其内摩擦力先增大后减小, 这也是盐岩试件在单轴和三轴条件下出现应变硬化 - 软化现象的根本原因。

3.3 纯泥岩夹层试验结果分析

对纯泥岩夹层试件 N - 1 及 N - 2 进行单轴压缩试验, 试验曲线如图 7 所示, 泥岩岩石在单轴条件下, 弹性阶段较明显, 加载达到峰值应力时试件产生破坏, 峰值应力后, 岩石试件的轴向抗力迅速降低, 表现为脆性破坏, 泥岩试件的单轴压缩强度约为 50 MPa, 其弹性模量约为 16.70 GPa, 泊松比为 0.34。对纯泥岩夹层试件 N - 3 及 N - 4 进行三轴压缩试验, 试验曲线如图 8 所示。

三轴压缩时, 试件的承载能力由于围压的存在, 比单轴压缩强度有较大的提高。对试件 N - 3 施加围压为 10 MPa, 其抗压强度为 107.40 MPa, 弹性模量 22.36 GPa, 对试件 N - 4 围压为 20 MPa, 其抗压强度为 143.30 MPa。根据单轴及三轴时泥岩的应变特性可以得到泥岩的力学计算参数: 弹性模量 16.70~22.36 GPa, 泊松比为 0.15~0.30, 黏聚力为 14.73 MPa, 内摩擦角为 36°。

表 1 纯盐岩三轴压缩试验结果

Table 1 Results of triaxial compression of rock salt

试件编号	直径/mm	高度/mm	围压/MPa	屈服值			峰值			残余值			弹性模量 /GPa
				应力 /MPa	应变 1 /10 ⁻²	应变 2 /10 ⁻²	应力/MPa	应变 1 /10 ⁻²	应变 2 /10 ⁻²	应力 /MPa	应变 1 /10 ⁻²	应变 2 /10 ⁻²	
YS - 1	49.9	97.2	30	4.970	0.516	-0.074	74.913	15.570	-6.981	9.034	26.214	-18.870	21.87
YS - 2	50.0	101.4	10	3.014	0.454	-0.047	34.090	7.443	-3.250	4.247	12.117	-12.191	14.70

YS-3	50.2	92.9	20	9.010	0.476	-1.061	44.613	6.178	-6.967	15.601	17.535	-17.980	14.70
------	------	------	----	-------	-------	--------	--------	-------	--------	--------	--------	---------	-------

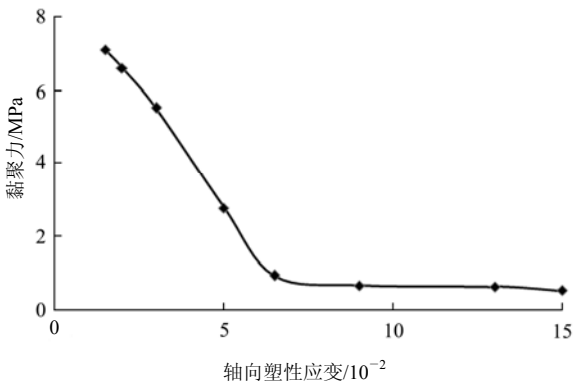


图5 黏聚力与轴向塑性应变的关系

Fig.5 Relationship between cohesive force and plastic deformation

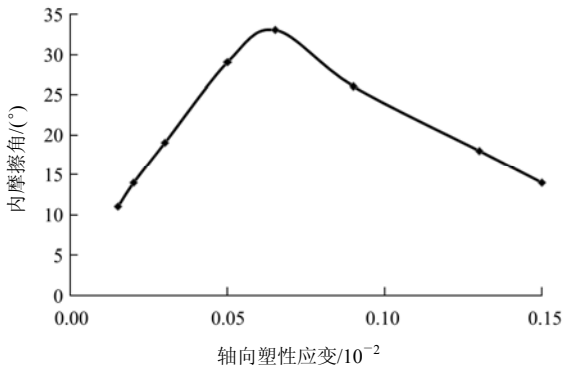


图6 内摩擦角与轴向塑性应变的关系

Fig.6 Relationship between internal friction angle and plastic deformation

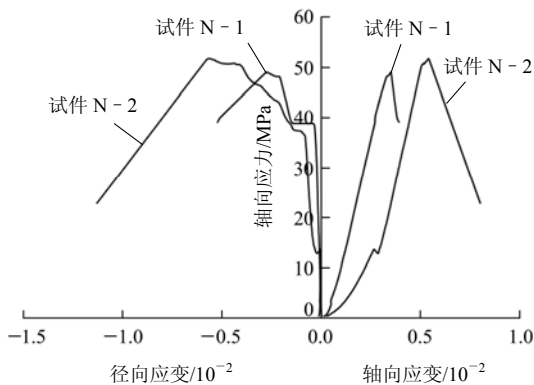


图7 纯泥岩夹层试件单轴压缩试验曲线

Fig.7 Curves of uniaxial compression of mudstone interlayer samples

4 含夹层盐岩试验结果分析

含夹层盐岩试件由于其内部泥质夹层含量的不同会造成其试验结果具有明显的复杂性及离散性,

因而, 为避免试验数据的差异过大, 需要在试验前对试件进行挑选, 尽量选择夹层含量相接近的试件进行试验。挑选含泥质夹层盐岩试件 15, 18 和 20

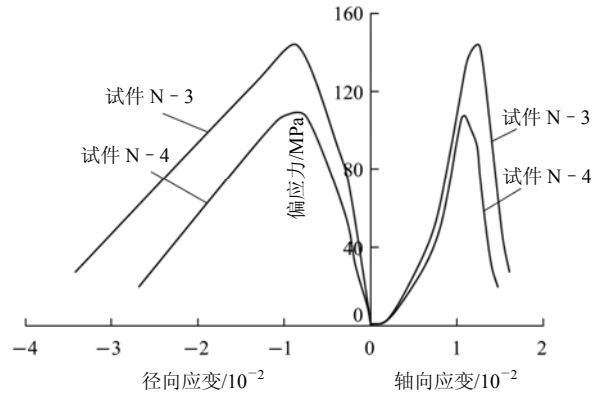


图8 纯泥岩夹层试件三轴压缩试验曲线

Fig.8 Curves of triaxial compression of mudstone interlayer samples

进行单轴压缩试验, 其中试件 15 在高度 1/3 处存在 2~3 条泥质岩石夹层, 各夹层厚度为 0.5~1.4 cm, 各夹层角度基本接近水平。试件 18 中部存在一条厚度约 2.3 cm 泥质夹层, 夹层角度为 0°~10°。试件 20 中部存在一条厚度约 3.0 cm 泥质夹层, 夹层角度为 0°~15°, 并有少量节理裂隙。含夹层盐岩试件在单轴压缩试验曲线如图 9 所示。加载初期, 轴向应变在 0.0%~0.1%左右时, 其应力-应变基本呈线性增长关系, 应变 2 变化极小, 弹性极限约为 5 MPa。应变为 0.1%~1.5%左右时, 其应力-应变关系呈现应变硬化特征, 峰值强度约 16.90 MPa。应变大于 1.5%时, 试件呈现应变软化特性。塑性应变持续增加, 轴向抗力不断减小, 并最终造成试件的破坏。破坏时, 轴向应变可达到 5.0%左右。

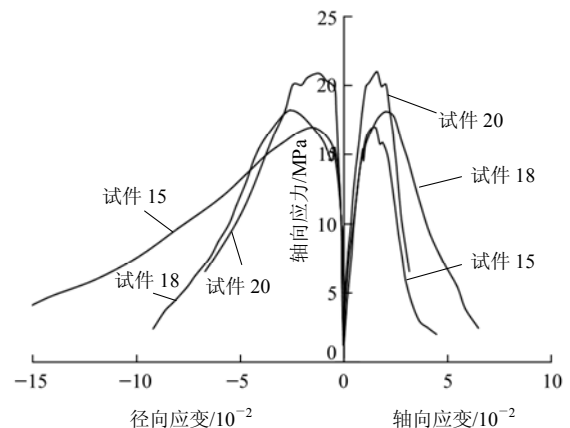
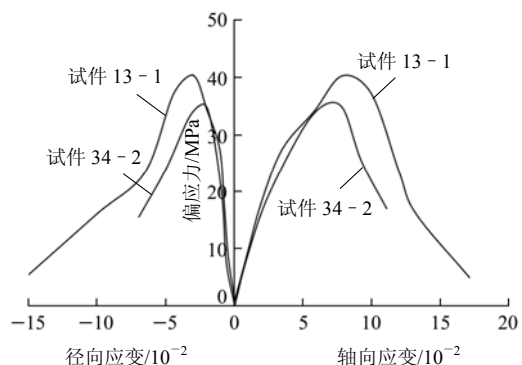


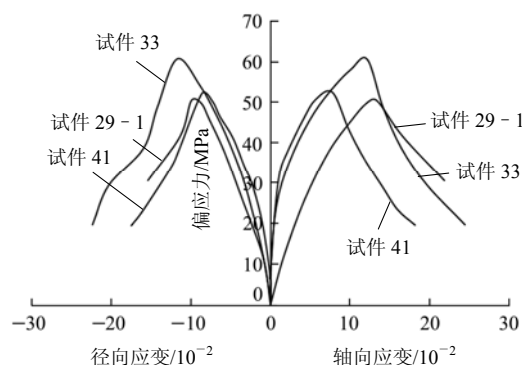
图 9 含夹层盐岩试件单轴压缩试验曲线

Fig.9 Curves of uniaxial compression of salt-mudstone interlayer samples

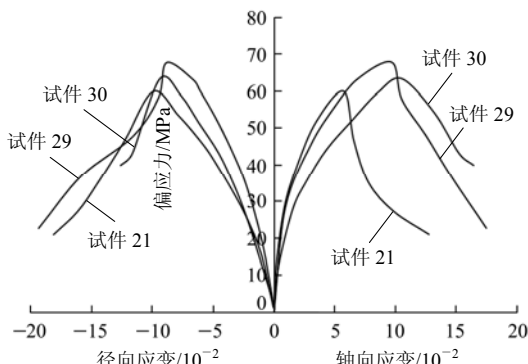
对 11 个含夹层盐岩试件进行不同围压下的三轴压缩试验, 其中试件 13 - 1 及 34 - 2 的试验围压为 10 MPa, 试件 29 - 1, 33, 41 的试验围压为 20 MPa, 试件 21, 30, 29 的试验围压为 30 MPa, 试验曲线如图 10 所示。



(a) 试件 13 - 1 及 34 - 2



(b) 试件 29 - 1, 33 及 41



(c) 试件 21, 30 和 29

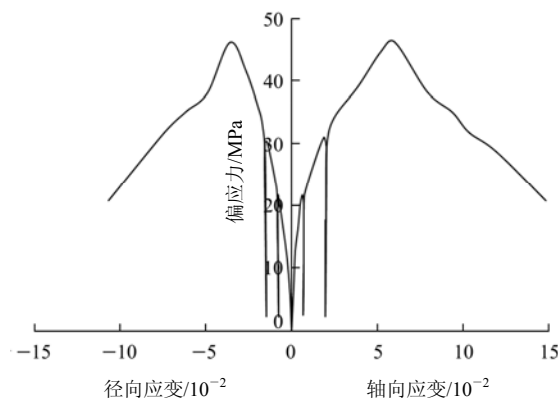
图 10 含夹层盐岩试件三轴压缩试验曲线

Fig.10 Curves of triaxial compression of salt-mudstone interlayer samples

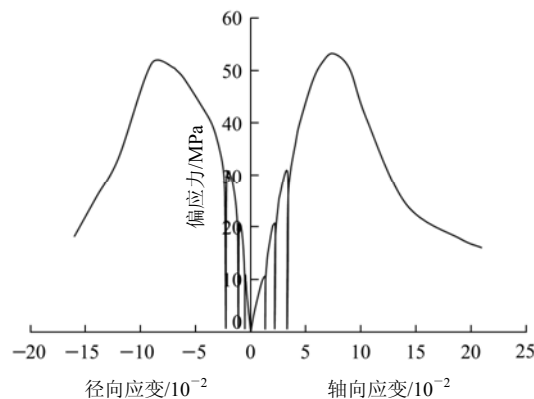
含泥质夹层盐岩试件同盐岩试件一样, 并不能

按照常规的方法直接从初始加载曲线上上升部分的斜率作为弹性模量值, 对试件 17 - 1, 55 - 1, 30 - 1 分别在围压 10, 20 和 30 MPa 下进行卸载及再加载试验, 试验曲线如图 11 所示。

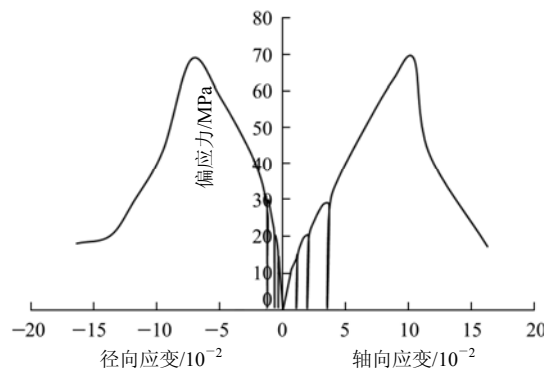
试件 17 - 1 的 2 次加卸载弹性模量分别为 33.5 和 35.9 GPa。试件 55 - 1 的 3 次加卸载弹性模量分



(a) 试件 17 - 1



(b) 试件 55 - 1



(c) 试件 30 - 1

图 11 含夹层盐岩试件 17 - 1, 55 - 1 和 30 - 1 三轴压缩试验曲线

Fig.11 Curves of triaxial compression of salt-mudstone interlayer samples 17 - 1, 55 - 1 and 30 - 1

别为 40.3, 25.4 和 18.9 GPa。试件 30 - 1 的 3 次加

卸载弹性模量分别为 14.8, 14.3 和 15.3 GPa。含夹层盐岩试件同样在加载初期便表现出明显塑性应变, 弹性应变在总应变中的比例极小, 且全过程应力 - 应变曲线表现出应变硬化 - 软化性质。三轴压

缩条件下, 含泥质夹层盐岩三轴压缩试验结果如表 2 所示。

泥质夹层的存在对盐岩试件的力学性质有很大

表 2 含夹层盐岩三轴压缩试验结果

Table 2 Results of triaxial compression of salt-mudstone interlayers

试件编号	直径 /mm	高度 /mm	围压 /MPa	屈服值			峰值			泥质夹层含量质量百分比/%
				应力/MPa	应变 $1/10^{-2}$	应变 $2/10^{-2}$	应力/MPa	应变 $1/10^{-2}$	应变 $2/10^{-2}$	
13 - 1	49.9	100.2	10	8.620	0.901	-0.440	40.330	7.84	-2.95	15.66
34 - 2	50.1	100.5	10	7.680	0.811	-0.591	35.200	6.51	-2.14	11.37
29 - 1	49.9	100.8	20	11.485	0.133	-0.560	52.360	7.42	-8.65	17.64
33	50.0	99.0	20	11.670	0.180	-1.040	60.530	12.13	-11.78	23.41
41	50.0	99.2	20	11.530	1.630	-0.910	50.351	13.34	-9.97	15.46
29	49.8	99.8	30	11.120	0.150	-0.750	59.970	5.69	-9.96	17.65
30	50.0	99.6	30	9.873	0.601	-0.219	68.900	10.41	-7.27	22.71
21	49.8	97.8	30	12.380	0.360	-0.930	63.340	10.47	-9.44	19.87
17 - 1	49.9	98.4	10	7.060	0.105	-0.118	46.200	6.03	-3.61	26.44
55 - 1	50.0	98.8	20	9.600	1.010	-0.100	53.140	7.49	-9.38	19.79
30 - 1	50.0	100.2	30	14.200	0.630	-0.770	67.690	9.67	-8.87	19.98

的影响, 通过对纯盐岩及含泥质夹层盐岩单轴压缩试验结果及表 1, 2 可以看出, 无论是单轴还是三轴条件下, 含夹层盐岩试件的弹性极限、弹性模量以及峰值抗压强度均比纯盐岩试件有不同程度的提高。含夹层盐岩试件的抗压强度尤其是三轴条件下的抗压强度一般高于纯盐岩试件, 可针对这一现象解释如下: 对于由多种介质材料组成的层状介质而言, 其破坏一定是从最容易破坏的位置开始, 泥质夹层的存在使得含夹层盐岩体试件的破坏存在 2 种情况:

(1) 试件中泥质夹层拉伸破坏。泥质夹层径向应变较小, 盐岩体径向应变较大, 由于盐岩体的径向应变而使得泥质夹层受径向拉应力, 当泥质夹层抗拉强度较低, 或泥质夹层厚度较小时, 泥质夹层先于盐岩体破坏, 因此含夹层试件强度值取决于其中泥质夹层部分的抗拉能力。这与李银平等^[9]的研究得到的结论类似。此种破坏多出现在单轴压缩中, 图 12(a)为部分出现此种破坏形式的试件试验后照片。

(2) 试件中盐岩体剪切破坏, 此种破坏多出现在三轴压缩试验中。含夹层盐岩试件中泥岩夹层的强度一般会高于盐岩的强度, 且泥质夹层的泊松比

小于盐岩体, 即泥质夹层的径向应变能力小于盐岩体, 因此, 泥质夹层处的径向位移较小, 盐岩体的径向位移很大, 泥质夹层的存在对盐岩体的径向应变存在限制作用。当泥质夹层抗拉强度较高, 或泥



试件 20 试件 41 试件 55 - 1
(a) 形式 1



试件 17 - 1 试件 30 试件 33
(b) 形式 2

图 12 含夹层盐岩破坏形式

Fig.12 Failure modes of salt-mudstone interlayers

质夹层厚度较大, 盐岩体厚度较小时, 泥质夹层的径向应力达不到其抗拉强度, 试件破坏将仍然在盐岩体内发生剪切破坏。然而由于在盐岩体与泥岩的夹层位置处存在限制盐岩体径向应变的侧向约束从而提高含泥质夹层盐岩试件的整体强度值。图 12(b) 为部分出现此种破坏形式的试件试验后照片。

5 结 论

本文以江苏淮安某地区层状盐矿为研究对象, 对纯盐岩、纯泥质夹层、含夹层盐岩 3 种试件进行单轴及三轴压缩试验, 可得到以下结论:

(1) 含夹层盐岩及纯盐岩在较小的围压甚至是单轴条件下, 便已经出现明显的塑性应变趋势, 即均表现出少量的弹性应变及较大的塑性应变, 且其应力 - 应变曲线表现出明显的应变硬化 - 软化性质。

(2) 由于盐岩及纯盐岩的塑性应变趋势, 因而传统的采用直接从初始加载曲线上升部分的斜率作为弹性模量值的做法并不可靠, 应该采用通过进行卸载 - 再加载试验的方法得到更准确的弹性模量值。

(3) 对于纯盐岩试件, 盐岩颗粒较大, 盐岩颗粒之间充填物的黏聚作用是盐岩试件黏聚力大小的重要影响因素, 随着加载的进行, 黏聚力随着塑性剪应变的增加而越来越小, 内摩擦角则先增大后减小。

(4) 泥质夹层的存在对盐岩试件的力学性质有很大的影响, 由于盐岩试件中的泥质夹层对盐岩体的径向应变起到径向约束作用, 无论是单轴还是三轴条件下, 含夹层盐岩试件的弹性极限, 弹性模量以及峰值抗压强度均比纯盐岩试件有不同程度地提高。泥质夹层的抗拉强度及厚度决定了含夹层盐岩试件的破坏形式。

参考文献(References):

[1] HUNSCH 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.
[2] HUNSCH U, HAMPEL A. Rock salt-the mechanical properties of

the host rock material for a radioactive waste repository[J]. Engineering Geology, 1999, 52(3): 271 - 291.

- [3] HAMAMI M. Simultaneous effect of loading rate and confining pressure on the deviator evolution in rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(6): 827 - 831.
[4] ALKAN H, CINAR Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(1): 108 - 119.
[5] SKROTZKI W. An estimate of the brittle to ductile transition in salt[C]// The 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 1984: 381 - 388.
[6] KERN H, FRANKE J H. The effect of temperature on the chemical and mechanical behavior of Carnallite-Halite rocks[C]// The 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal-Zellerfeld: Tans. Tech. Publications, 1984: 181 - 191.
[7] FARMER I W, GILBERT M J. Dependent strength reduction of rock salt[C]// Proceedings of the 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal: Tans. Tech. Publications, 1984: 4 - 18.
[8] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升, 等. 层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 22 - 27.(LIANG Weiguo, YANG Chunhe, ZHAO Yangsheng, et al. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 22 - 27.(in Chinese))
[9] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹层对盐岩应变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))
[10] 李银平, 蒋卫东, 刘江, 等. 湖北云应盐矿深部层状盐岩直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1 767 - 1 772.(LI Yinping, JIANG Weidong, LIU Jiang, et al. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 767 - 1 772.(in Chinese))
[11] 徐素国, 梁卫国, 赵阳升. 钙芒硝盐岩物理力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1 054 - 1 059.(XU Suguo, LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng. Study of physico-mechanical property of glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1 054 - 1 059.(in Chinese))
[12] 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. The 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))
[13] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩短期强度和应变特性试验研究[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. Experimental 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] 中华人民共和国行业标准编写组. SL31 - 2003 水利水电工程钻孔
压水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(The Professional
Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL31 -
2003 Code of high water pressure test for water resources and
hydropower engineering[S]. Beijing: China Water Power Press,
2003.(in Chinese))
- [15] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 科学出版社,
2007.(WANG Zhiyin, LI Yunpeng. Rheological theory and numerical
simulation of rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese))