

文章编号: 1000-7598(2009)12-3627-06

盐岩地下储气库泥岩夹层分布与组构特性研究

刘艳辉^{1,2}, 李 晓¹, 李守定¹, 赫建明¹

(1.中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2.中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘 要:以江苏金坛地下盐岩储气库为例,在区域地质与场地工程地质条件分析的基础上,通过盐岩及夹层分布与岩性分析、泥岩夹层全岩 X 光衍射试验、黏土矿物 X 光衍射试验及定量分析、泥岩夹层的粒度试验、崩解试验及水理试验研究表明,金坛地下储气库岩盐层夹层主要为层间夹层与层内夹层,盐岩层间夹层分布稳定,厚度较大,不溶物含量高;盐岩层内夹层层数多,厚度薄,分布不均,不溶物含量低。盐岩层间泥岩夹层的主要矿物为黏土矿物,黏土矿物的主要存在形式为伊利石/蒙脱石混成矿物;泥岩夹层主要为细粒颗粒;泥岩夹层沿层理面崩解,层状开裂软化,具有微膨胀性。对于储库水溶建腔速度、成腔形状与运营期的腔体蠕变具有重要影响。

关 键 词:地下储气库;泥岩夹层;分布;组构特性

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

Distribution and structural fabric features of mudstone interlayer of rock salt in underground gas storage

LIU Yan-hui^{1,2}, LI Xiao¹, LI Shou-ding¹, HE Jian-ming¹

(1.Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. China Institute for Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Taking the Jintan rock salt gas storage in Jiangsu Province of China for example, regional tectonic and engineering geologic setting are analyzed. The mineral form, fine composing and hydrophilicity of mudstone interlayer between rock salt are studied by XRD test, granularity test and slaking test. The results are as follows. Mudstone interlayer are composed by interbedded mudstone and inter mudstone of rock salt. Interbedded mudstone of rock salt is thick with connected distribution. Inter mudstone of rock salt is thin with disconnected distribution. Clay is the main mineral of interbedded mudstone of rock salt. The illites/smectite mixed-layer mineral is the main formation of clay in interbedded mudstone. Granule particle is main in interbedded mudstone. Interbedded mudstone slakes by stratification bedding and little expansion. The character of interbedded mudstone affect the safety and running of Jintan gas storage.

Key words: underground gas storage; mudstone interlayer; distribution; structural fabric features

1 前 言

在深部盐岩洞穴中储存油气资源,是进行能源地下战略储备的主要形式,与国外巨厚盐丘储库相比,我国岩盐地层埋深较浅、成层分布、夹层较多,地质条件相对复杂,这些薄夹层的存在不仅增大了形成油气渗漏通道的风险,而且增加了储库建腔期对储库库容与腔体形状控制的难度,因此,搞清储库盐岩夹层的分布与特性,对于减小能源地下储库

建设与运营的灾变风险,具有重要的科学意义与实际意义。目前,由于国外主要在巨厚盐丘区建立油气地下储库,故对于含有夹层的层状盐岩体特性研究较少,主要是针对盐丘的成因演化方面的研究,突尼斯三叠系盐丘的研究比较充分,盐丘受控于蒸发岩的岩性,盐岩体包括多层混层序,主要是盐岩和石膏,有时也夹有黏土岩、砂岩和石灰岩,但这些夹层多是有限的和不连续的。Perthuisot^[1], Snoke^[2]等, Aoudjehane^[3]等, Perthuisot 和 Rouvier^[4],

收稿日期: 2008-08-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973) (No. 2009CB724605, No. 2010CB731501); 国家自然科学基金资助项目 (No. 40702052); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KZCX2-YW-JS102, KJCX3-SW-L1, KZCX2-YW-109); 中国科学院科研装备研制项目 (No. YZ200912)。

作者简介: 刘艳辉,女,1978年生,博士生,主要从事岩石力学、工程地质与地质灾害方面的研究工作。E-mail: liuyh@mail.cigem.gov.cn

Perthuisot^[5-6]等, Hlaiem^[7], Chikhaoui^[8-9]等, 等研究了在厚层蒸发岩上部的海湖盐构造作用。Martinez^[10]等和 Chikhaoui^[11]研究了三叠系蒸发岩沿着正断层贯入形成盐丘构造的过程。国内在盐岩夹层相关方面在主要有如下研究: 杨春和^[12]等针对含夹层盐岩体, 建立了宏观平均意义下考虑细观弯曲效应的 Cosserat 介质扩展本构模型。李银平^[13]等通过对含泥岩夹层盐岩、纯泥岩和纯盐岩 3 种试样单轴和三轴试验对比, 研究了泥岩夹层对盐岩变形和破坏特征的影响。张顶立^[14]等建立了含夹层岩体组合系统力学模型, 揭示了含夹层岩体的破坏及失稳机制, 研究了含夹层岩体稳定性的判别指标。梁卫国^[15]等通过 20℃~240℃不同温度下的超声波、单轴和直剪试验, 研究了盐岩环境温度与物理力学特性之间的关系。

以我国江苏金坛地下盐岩储气库为例, 在区域地质与场地工程地质条件分析的基础上, 通过盐岩及夹层分布与岩性分析、泥岩夹层全岩 X 光衍射试验、黏土矿物 X 光衍射试验及定量分析、泥岩夹层的粒度试验、崩解试验及水理试验研究了盐岩层间夹层及层内夹层的空间分布特征、岩性特征; 盐岩层间夹层的全岩矿物组成, 黏土矿物组成、粒组特征及水理特性。

2 区域地质研究

金坛盐岩储气库位于江苏省常州市的金坛市西北, 地理坐标为 E 119° 21' ~ 119° 27', N 31° 46' ~ 31° 51'。研究区位于茅山东麓、地貌上属于太湖水网平原区, 西北部为低山丘陵, 高程为 10~30 m; 北部地形相对平坦, 地势低洼, 高程为 2.5~10 m。研究区为亚热带季风气候。金坛盆地北东向长 33 km, 北西向宽约 22 km, 面积约 526 km², 位于扬子地台的东北部, 是苏南隆起区常州拗陷带中的次一级构造单元, 茅山推覆带和上黄~大华隆起带之间, 为北东向的小型沉积盆地。常州拗陷为中、新生代沉积盆地, 总的地貌形态为中部高、四周低, 在隆起带周边形成金坛等盆地, 其中金坛盆地陷最深, 新生界沉积较厚。

盆地主要发育 3 条断层带: 西部断层发育带, 断距较大, 部分断层断穿玄武岩, 向南北两翼断距变小; 东部断层发育带, 断距较大, 大部分断层断穿玄武岩, 断距最大可达上百米, 此断层发育带控制了盆地早期的沉积演化, 决定了盐岩层的平面分布; 中部小断层发育带, 断距总体偏小, 大部分在戴南组泥岩段中消失。

金坛盆地内部钻井揭露, 上第三系在本区缺失, 第四系松散堆积覆盖全区。下第三系自下而上由阜宁组、戴南组、三垛组组成, 岩盐层分布于阜宁组上部。

阜宁组一段(E₁): 沉积时气候干燥, 氧化作用强, 是动荡环境下的浅湖相沉积, 与下伏地层呈不整合接触, 厚度为 41.3~445 m, 岩性主要为砂岩与泥岩互层; 阜宁组二段(E₂): 沉积时气候湿润, 是还原条件下的湖相沉积, 厚度为 51.35~236 m, 岩性主要为泥岩夹泥灰岩; 阜宁组三段(E₃): 弱还原~弱氧化交替浅湖相沉积, 厚度为 33.2~255 m, 岩性主要为泥岩夹泥灰岩和粉砂岩; 阜宁组四段(E₄): 早期为还原条件下静、动水交替环境下的浅湖相沉积, 晚期为蒸发岩相, 厚度为 53.5~315 m, 下部为灰色泥灰岩、泥岩, 上部为灰白色岩盐夹棕褐色含钙芒硝泥岩、盐质泥岩、钙质泥岩, 岩盐顶部普遍见泥粒岩; 顶部为深灰色钙质泥岩。

戴南组(E_d): 早期为湖滨三角洲~湖滨相和浅湖相沉积, 晚期是氧化、还原交替的浅湖相, 岩性主要为泥岩, 厚度为 138~659 m。三垛组(E_s): 岩性主要为泥岩, 玄武岩与泥岩不等厚互层, 厚度 0~496 m。金坛地下储气库区地层岩组剖面图如图 1。

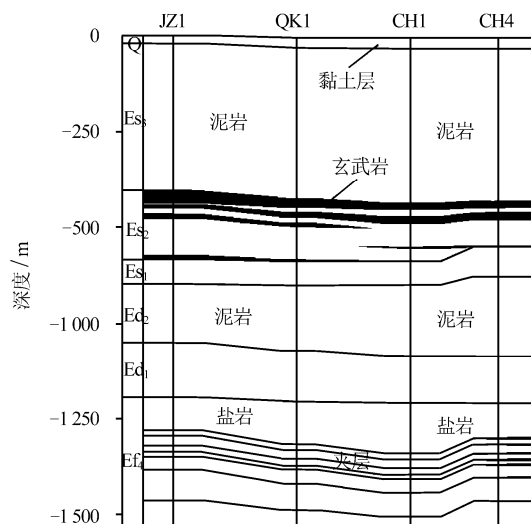


图 1 金坛地下储气库区地层岩组剖面图

Fig.1 Stratum section drawing

3 盐岩及夹层分布与岩性特征

3.1 盐岩层系地质特征

金坛盐岩区可将盐岩层系剖面分为 3 个岩性亚段, 自下而上是:

(1) 盐下硫酸盐~碳酸盐亚段: 厚度 6.0~30.0 m, 为一套灰~灰黑色含硬石膏泥岩、含钙芒

硝泥岩，由凹陷内部向边缘硬石膏增多，钙芒硝明显减少，反映盐湖沉积相带分布特征。

(2) 中部岩盐亚段：厚度 67.85~230.95 m，主要为岩盐和含泥岩盐、夹灰色、棕色薄层含盐泥岩、云质泥岩和泥岩，自下而上分 I、II、III 3 个岩盐矿层。

(3) 盐上硫酸盐~碳酸盐亚段：厚度 8.0~30 m。岩性以含钙芒硝、含膏云质泥岩及泥质云岩为主，岩性较硬，其次是钙质泥岩，岩性变化较小。金坛盐岩地下储气库盐岩层综合柱状图如图 2。地下储气库夹层分布如图 3。

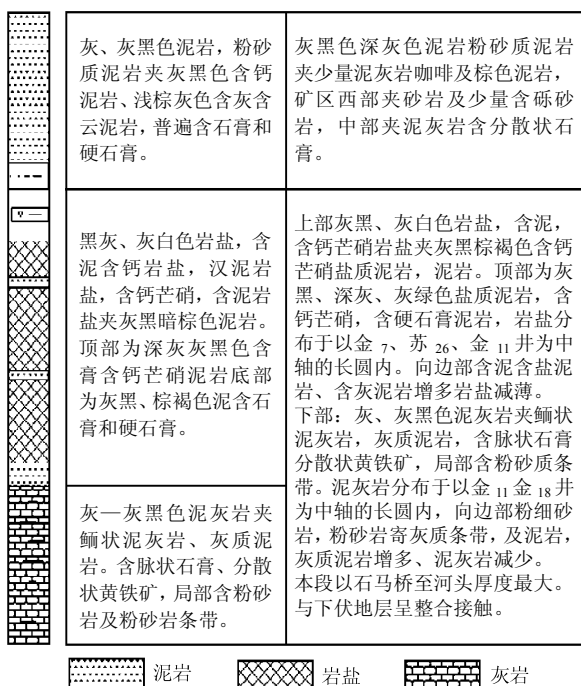


图 2 金坛盐岩地下储气库盐岩层综合柱状图

Fig.2 Rock stratum histogram of Jintan gas storage

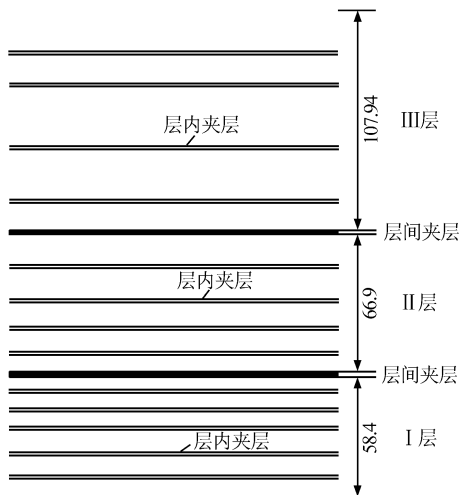


图 3 金坛地下储气库盐岩夹层空间分布图(单位: m)

Fig.3 Interlayer distribution in salt stratum(unit: m)

3.2 岩盐层层间夹层分布特征

金坛盆地自下而上由两个横向分布稳定的棕红色及灰~灰黑色夹棕红色泥岩标志层将岩盐层分隔为 I、II、III 3 个主要矿层。I、II 矿层之间的夹层（褐色泥岩夹层）厚度 0.6~4.91 m，平均为 3.02 m，质坚硬，很少见裂隙，为主要对比标志层。II、III 矿层之间的夹层（蓝灰色泥岩夹层），厚度一般 0.28~4.84 m，平均 2.5 m，裂隙不发育，为次生盐充填。岩盐层间夹层主要为盐质泥岩、泥岩和含钙芒硝泥岩，局部见小裂隙并被次生盐充填。夹层分布特征如表 1。

表 1 金坛地下储气库盐矿层间夹层数据统计表

Table 1 Interlayer thickness of salt stratum

位置 序号	盐层厚度 合计/m	层间夹层 /m I/II	层间夹层 /m II/III	小计 /m	占盐层 厚度/%	平均单层 厚度/m
1	153.18	2.10	1.90	4.00	2.61	2.00
2	108.18	4.09	3.11	7.20	6.66	3.60
3	189.14	3.96	2.75	6.71	3.55	3.36
平均	143.92	3.02	2.5	5.52	3.84	2.76

3.3 岩盐层内夹层分布

金坛盐矿中，在各岩盐层内均存在一些局部分布的夹层，岩性一般为含钙芒硝泥岩、泥岩、盐质泥岩等。第 I 岩盐层主要分布在南部地区，夹层一般为 2~8 层，平均 4.6 层，厚度 3.4~7.5 m，平均 5.14 m，单层最大厚度 2.95 m。第 II 岩盐层全区稳定分布，其中夹层分布也较均匀，层数 1~9 层，平均 3.8 层，厚度 1.08~15.2 m，平均 5.79 m；第 III 岩盐层内夹层平均 3.7 层，厚度平均 4.42 m。层内盐岩夹层一般为含钙芒硝泥岩、泥岩、盐质泥岩等，单层一般 1~3 m，平均 1.6 m，主要是泥质成份，颗粒较小。

金坛盐岩层内夹层厚度统计如表 2，厚度分布如图 4。

4 盐岩层间夹层组构及水理性质

从盐岩矿夹层分布看，盐岩层间夹层分布稳定，厚度较大，不溶物含量高；盐岩层内夹层层数多，厚度薄，分布不均，不溶物含量低。从油气地下储库建腔期对储库性状控制与腔体稳定性角度讲，层间夹层对水溶造腔影响较大，因此，采取典型的 I、II 矿层之间的褐色泥岩夹层，II、III 矿层之间的蓝灰色泥岩夹层，分别通过全岩 X 光衍射试验（XRD）、黏土矿物 X 光衍射试验及定量分析、泥岩夹层的粒度试验、崩解试验及水理试验研究了盐岩层间夹层及层内夹层的空间分布特征、岩性特征；

盐岩层间夹层的全岩矿物组成、黏土矿物组成、粒组特征及水理特性。

4.1 泥岩夹层矿物组成

采用日本理学电机 D/MAX-2400X 射线衍射仪，进行两类泥岩夹层的全岩 X 光衍射试验

(XRD)，衍射仪的最大额定功率为 12 kW，额定管压范围 20~60 kV，额定管电流 10~200 mA，稳定性 0.03%，铜靶 Cu 射线聚焦尺寸 0.5×10 mm，射线泄露小于 2.5 μSV/hr，记数线性为 500 000 cps；泥岩夹层的全岩矿物组成如表 3。

表 2 金坛盐矿层内夹层数据统计表
Tablet 2 Interlayer thickness in salt stratum

位置序号	盐层厚度	层间夹层/ m				夹层厚度合计 厚度/层数	平均单层厚度 / m	占盐层厚度 / %
	合计/ m	I 层 厚/层数	II 层 厚/层数	III 层 厚/层数	小计 厚/层数			
1	153.18	5.14/4.6	2.64/2.6	1.79/1.4	8.8/7.9	12.8/9.9	1.29	8.36
2	108.18	无	5.79/3.9	6.16/3.7	11.49/7.5	18.69/9.54	1.96	17.28
3	189.14	3.5/3.8	6.1/5.3	4.8/4.4	13.89/11.4	20.59/13.3	1.55	10.89
平均	143.92	4.8/4.3	4.01/3.7	4.42/3.7	10.76/8.6	16.44/10.3	1.6	11.50

表 3 金坛盐矿层内夹层数据统计表
Tablet 3 Interlayer thickness in salt stratum

岩石名称	全岩矿物 XRD 定量/ %							
	石英	钾长石	钠长石	方解石	方沸石	黄铁矿	非晶质	黏土矿物总量
褐色泥岩	14.4	0.9	2.4	10.3	10.4	0	24.9	36.7
蓝灰色泥岩	13.0	2.3	5.0	7.8	18.1	2.9	22.5	28.4

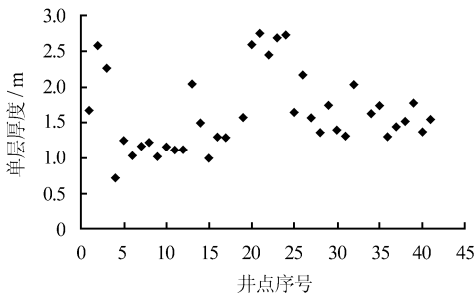


图 4 金坛地下储气库盐岩层内夹层厚度分布图
Fig. 4 Interlayer thick distribution in salt stratum

泥岩夹层全岩矿物组成的测试结果表明，褐色泥岩的主要矿物为黏土矿物、非晶质与石英；蓝灰色泥岩的主要矿物为黏土矿物、方沸石与石英。由于泥岩夹层的主要矿物为黏土矿物，黏土矿物具有亲水性和膨胀性，其含量和组成对于泥岩夹层的水理性质影响较大，因此，对泥岩夹层中的黏土矿物含量进行定量分析。

黏土矿物测试仪器采用日本 Rigaku 公司的 D/MAX-2500 型 X-Ray 衍射仪，试验标准采用 SY/T 5163-1995，采用分峰技术对 XRD 谱图进行解释并进行定量计算，测试数据使用美国 Jade MDI 软件，测试样品捣碎碾磨，使用乙二醇处理获得小于 2 的定向样品，然后进行 X-Ray 衍射测试。测试条件为，靶：Cu，有单色器，D.S=S.S=1°，R.S=0.3 mm；管压/管流：40 kV/100 mA；扫描速度：3° (2)/min；

步长：0.01° (2)。

图 5 为泥岩夹层黏土矿物定量分析的 XRD 谱图，表 4 为泥岩夹层黏土矿物的相对含量。由表 4 可知，泥岩夹层中黏土矿物的主要类型是伊利石/蒙脱石混成矿物。

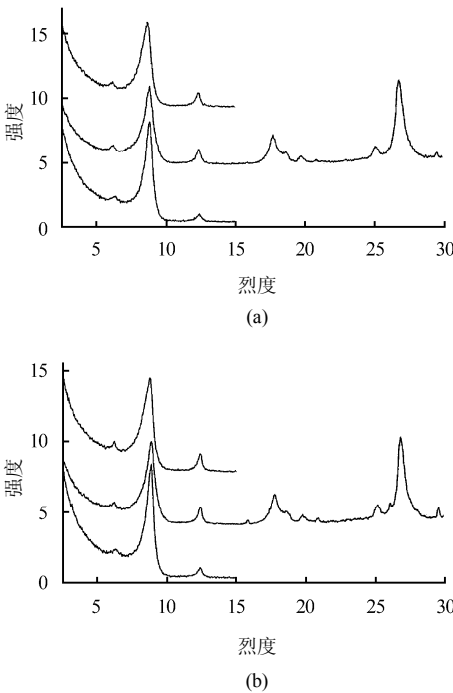


图 5 金坛地下储气库盐岩层间夹层黏土矿物定量分析 XRD 谱图

Fig.5 XRD spectrum of clay in interlayer

表 4 金坛盐矿层间夹层黏土矿物组成表
Table 4 Clay composition of mudstone interlayer
in salt stratum

岩石名称	黏土矿物相对含量/%					混层比 /%
	S	I/S	I	K	C	
褐色泥岩	0	94	0	2	4	5
蓝灰色泥岩	0	93	0	2	5	5

注：S：蒙脱石；I/S：伊利石/蒙脱石混层矿物；I：伊利石；K：高岭石；C：绿泥石

4.2 泥岩夹层粒组特征

泥岩夹层的颗粒组成特征影响着地下储库成腔过程。采用日本岛津公司 SALD-3001 型激光粒度分析仪，分析了泥岩夹层的颗粒组成，表 5 为层间夹层颗粒组成表，图 6 为层间夹层粒组分布图，主要为细粒颗粒。

表 5 金坛盐矿层间夹层颗粒组成表(单位: mm)
Table 5 Grain composition of mudstone interlayer in salt
stratum(unit: mm)

岩石名称	颗粒组成/%			
	>0.075	0.075~0.005	<0.005	<0.002
褐色泥岩	0.002	68.86	31.12	29.60
蓝灰色泥岩	12.00	40.60	47.20	33.90

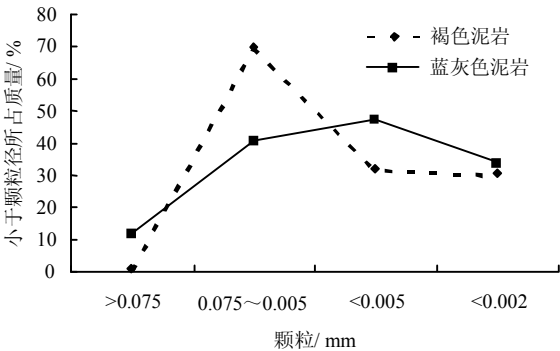


图 6 金坛地下储气库盐岩层间夹层粒组分布图
Fig.6 Fraction distribution of interlayer

4.3 泥岩夹层水理性质

盐岩地下储库腔体采用水溶造腔的方式进行，泥岩夹层的水理特性，对于造腔过程与腔体形状控制至关重要，采用岩石静态过程崩解仪、比表面积测试仪等仪器测试泥岩夹层水理特性，两种泥岩夹层的崩解特征如图 7 所示，层间夹层的水理特性如表 6。试验结果表明：泥岩夹层沿层理面崩解，层状开裂软化，具有微膨胀性。

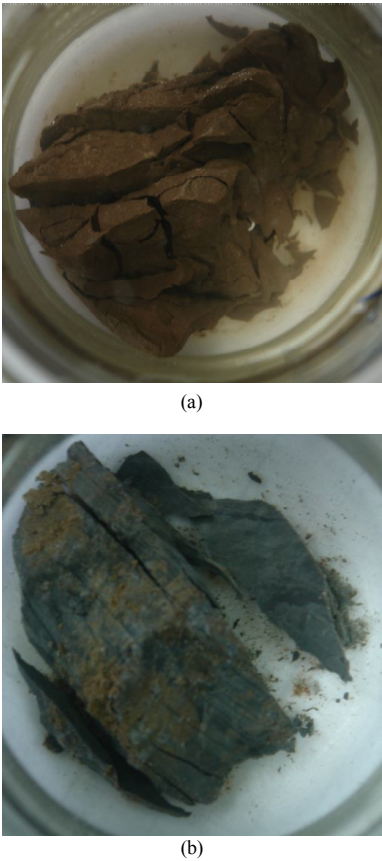


图 7 地下储气库盐岩层间夹层崩解特征
Fig 7 Slaking character of mudstone interlayer
in salt stratum

表 6 金坛盐矿层间夹层水理特性
Table 6 Hydrophile character of mudstone interlayer in salt stratum

岩石名称	干燥岩块在水中崩解后的性状	岩块干燥饱和吸水率 /%	蒙脱石 /%	比表面积 /(m ² /g)	有机质 /%	碳酸岩 /%	膨胀势
褐色泥岩	似层状开裂软化	15.86	2.58	20.81	0.61	12.38	微膨胀势
蓝灰色泥岩	似层状开裂软化	12.26	8.44	100.96	1.81	12.33	微膨胀势

5 结 论

(1)金坛地下储气库岩盐层分布于阜宁组上部，厚度 67.85~230.95 m，主要为岩盐和含泥岩盐、夹灰色、棕色薄层含盐泥岩、云质泥岩和泥岩，自下

而上分 I、II、III 3 个岩盐矿层。
(2)盐岩矿夹层主要为层间夹层与层内夹层，盐岩层间夹层主要有 2 层，分布稳定，厚度较大，平均厚度为 3.02 m 和 2.5 m，不溶物含量高；盐岩层内夹层层数多，厚度薄，分布不均，平均厚度

1.6 m, 不溶物含量低。

(3) 盐岩层间泥岩夹层的主要矿物为黏土矿物, 黏土矿物的主要存在形式为伊利石/蒙脱石混成矿物; 泥岩夹层主要为细粒颗粒; 泥岩夹层沿层理面崩解, 层状开裂软化, 具有微膨胀性。

(4) 由于泥岩夹层在盐岩层中广泛存在, 其中层间泥岩夹层厚度较大, 泥岩夹层主要成分是不溶黏土矿物, 具有崩解性与微膨胀性, 对于储库水溶建腔速度和成腔形状具有重要影响, 对于储库运营期的腔体蠕变也具有重要影响。

参 考 文 献

- [1] PERTHUISOT V. Dynamique et pe'trogene'se des extrusions triasiques en Tunisie septentrionale[D]. Paris: Ecole Normale Sup'e'rieure, 1978: 312.
- [2] SNOKE A, SCHAMEL S, KARASEK R. Structural evolution of the Jebel Debadib anticline: a clue to the regional tectonic style of the Tunisian Atlas[J]. **Tectonics**, 1998, 7: 497—516.
- [3] AOUDJEHANE M, BOUZENOUN A, ROUVIER H, et al. Halocine'se et dispositifs d'extrusions de Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE Alge'rien)[J]. **Ge'ol. Me'diterr**, 1992, XIX (4): 273—287.
- [4] PERTHUISOT V, ROUVIER H. Les diapirs du Maghreb central et oriental: des appareils varie's, re'sultant d'une e'volution structurale et pale'oge'ographique complexe[J]. **Bull. Soc. Ge'ol. Fr.**, 1992, 163 (6): 751—760.
- [5] PERTHUISOT V, AOUDJEHANE M, BOUZENOUNE A, et al. Les corps triasique des monts de Mellegue (confin alge'ro tunisien) sont-ils des diapirs ou des glaciers de sel[J]. **Bull. Soc. Ge'ol. Fr.**, 1998, 169: 53—61.
- [6] PERTHUISOT V, BOUZENOUNE A, HATIRA N, et al. Les diapirs du Maghreb oriental: part des de'formations alpines et des structures initiales Cre'tace'es et Eoce'nes dans les formes actuelles[J]. **Bull. Soc. Ge'ol. Fr.**, 1999, 170: 57—65.
- [7] HLAIEM A. Halokinesis and structural evolution of the major features in eastern and southern Tunisian Atlas[J]. **Tectonophysics**, 1999, 306: 79—95.
- [8] CHIKHAOU M, BRAHAM A, TURKI M. Preuves de la non stratification du Trias dans le Turonien de la Koudiat Sidii (Nord Ouest de la Tunisie)[J]. **C. R. Geosci.**, 2001, 332: 689—694.
- [9] CHIKHAOU M, JALLOULI C, TURKI M, et al. L'affleurement triasique du Debadib-Ben Gasseur (Nord Ouest de la Tunisie): diaper enracine' a' e'panchements late'raux dans la mer albienne, replisse'e au cours des phases de compression tertiaires[J]. **C. R. Geosci.**, 2002, 334: 1129—1133.
- [10] MARTINEZ C, CRIKHAOU M, EISSASS P. Le diapir de Nebeur: ge'ome'trie des accidents synse'dimentaires cre'tace's et leurs ro'les lors des serrages alpins[J]. **Rev. Sci.**, 1987, 6: 25—36.
- [11] CHIKHAOU M. Succession distension compression dans lesillon tunisien, secteur de Nebeur- El Kef, ro'le des extrusions triasiques pre'coce lors des serrages alpins[D]. France: Universite' de Nice, 1988: 143.
- [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): 4226—4232.
YANG Chun-he, LI Ying-ping. Expanded cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4226—4232.
- [13] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩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): 2461—2466.
LI Ying-ping, LIU Jiang, YANG Chun-he. 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.
- [14] 张顶立, 王悦汉, 曲天智. 夹层对层状岩体稳定性的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 140—144.
ZHANG Ding-li, WANG Yue-han, QU Tian-zhi. Influence analysis of interband on stability of stratified rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(2): 140—144.
- [15] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240℃内盐岩物理力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2461—2466.
LI Wei-guo, ZHAO Yang-sheng, XU Su-guo. Testing study on physical and mechanical properties of heated salt rock within 240 °C[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(14): 2461—2466.