

层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力

梁卫国^{1, 2}, 杨春和², 赵阳升¹

(1. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024;

2. 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: 分析研究层状盐岩中盐岩与夹层的孔隙率与渗透率, 指出在未遭受变形破坏条件下, 盐岩及其夹层本质致密, 不会对储气库安全造成影响。但是, 对盐岩与夹层的单轴和三轴力学特性、长期蠕变性进行实验研究与理论分析认为, 盐岩与夹层间存在的力学特性差异及变形不协调, 会造成 2 种岩性交界处的剪切破坏, 影响储库安全性。在此基础上, 提出层状盐岩储气库极限运行压力确定原则, 包括顶板稳定、蠕变控制、腔体致密及裸井致密等, 并结合实例进行分析研究。所得结果对我国层状盐岩中天然气储库的建造与运行具有一定指导意义及应用价值。

关键词: 岩石力学; 层状盐岩; 物理力学特性; 蠕变特征; 天然气储库; 极限运行压力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)01 - 0022 - 06

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND LIMIT OPERATION PRESSURE OF GAS DEPOSIT IN BEDDED SALT ROCK

LIANG Weiguo^{1, 2}, YANG Chunhe², ZHAO Yangsheng¹

(1. *Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;*

2. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

Abstract: Bedded salt deposit is originated from cyclical sedimentation of salt rock and mudstone, anhydrite, or other non-salt rock interlayers; and the physico-mechanical properties determine limit operation pressure of gas deposit to some degree. The authors investigated the penetrability of salt rock and the interlayers; and it was pointed out that the naturally compacted salt rock and interlayers would not affect the safety of the gas storage, provided that they were not damaged. Then, some experimental investigations and theoretical analyses of mechanical and rheological properties of salt rock and the interlayers were carried out. It was concluded that the difference of mechanical properties between salt rock and interlayers could be found with some deformation variances of different lithologies and even shear damage on their interfaces. On the basis of the above studies, a set of laws were proposed for determining the minimum and the maximum operation pressures in bedded salt rock gas storage, including roof stability law, creep control law, cavern wall and naked well tightness law. Finally, an in-situ example for determining the limit operation pressure was analyzed with the given laws. The results are able to guide the construction and operation of the oil and gas deposits in bedded salt rock in China.

Key words: rock mechanics; bedded salt rock; physico-mechanical properties; creep property; gas deposit; limit operation pressure

收稿日期: 2007 - 03 - 26; **修回日期:** 2007 - 04 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50174040, 50304011, 50434050); 山西省青年学术带头人项目(2006)

作者简介: 梁卫国(1972 -), 男, 博士, 1994 年毕业于太原理工大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学与采矿工程方面的教学与研究工作。E-mail: master_lwg@yahoo.com.cn

1 引言

盐岩矿床的形成与历史的地质运动密切相关, 其产状形态因地而异。根据构造形式, 盐岩矿床可分为 4 种类型^[1]: 沉积平坦型、构造曲折型、挤冲盐丘型、内部构造脉状型。根据矿床厚度, 盐岩矿床又可简单地分为 2 种类型: 层状沉积型(bedded salt deposits)和盐丘型(salt domes)。层状沉积型矿床单层厚度通常为数米至数十米, 相邻矿层之间常夹有从数米至数十米厚度不等的泥岩、石膏、钙芒硝等夹层; 盐丘型矿床则是由于盐岩相对低密度(2.1~2.2 g/cm³)、在横向构造应力作用下沿相邻岩层的断裂构造向上挤冲而成。

盐岩矿床采后溶腔被公认为是石油、天然气储存的理想场所^[2, 3]。由于盐丘型矿床的稀缺, 我国油气储库的选址只能局限在层状盐岩矿床中。在层状盐岩矿床中建造油气储库, 盐岩及夹层的渗透性影响着储气库的渗漏安全性; 夹层的物理力学特性以及盐岩与夹层间特性的差异, 对储库运行参数的确定及稳定性起着十分重要的影响。关于盐岩的力学特性已取得了一定的研究成果^[4~8], 但关于盐岩及夹层物理力学特性的差异性, 以及据此确定层状盐岩储气库运行压力方面的研究成果还不多。

本文从盐岩及其夹层的物理力学特性角度出发, 对层状盐岩储气库的稳定性进行分析, 在力学特性研究的基础上, 进行了储气库极限运行压力分析, 并给出了算例分析。

2 盐岩及夹层物理力学特性

2.1 孔隙率与渗透率

孔隙率是岩石中孔隙所占体积与岩石总体积的百分比。盐岩体(包括盐岩及其夹层)的孔隙率大小直接决定着天然气储存的安全性。

对于纯盐岩而言, 由于其晶体结构的致密性, 通常认为其孔隙率非常低。纯盐岩晶体的孔隙, 主要由晶体内部微孔和晶体内部边界(也称晶间)裂隙构成, 通常饱含气体或饱和卤水。常规体积测量法很难测出其孔隙率, 只能通过质量测量法, 并加以一定校正来进行。J. Billiotte 等^[9]的测定结果表明, 纯岩盐的孔隙率一般为 0.24%~0.50%, 而且盐岩的

孔隙率与晶体颗粒尺寸密切相关, 晶体颗粒越大, 其孔隙率也相应越大。对于数厘米大颗粒晶体盐岩, 其孔隙率高达 1.66%; 而小颗粒晶体的孔隙率低的为 0.10%。

层状盐岩中非盐类矿物夹层的孔隙率取决于其岩性、地质埋藏深度、变质程度等。邓祖佑等^[10]发现, 埋深在 1 391.5~1 881.4 m 的泥岩孔隙率为 3.79%~12.50%, 为盐岩的 2.28~7.53 倍。与页岩(10%~35%)、砂岩(3%~30%)、石灰岩(5%~20%)等^[11]相比, 泥岩孔隙率仍然较低, 通常为油气藏的良好盖层, 作为储气库夹层不会造成气体泄漏。

渗透率是表征流体在一定压力梯度下通过孔隙介质的能力, 除取决于岩体孔隙率外, 还与作用于岩体上的渗透压力及孔隙中饱含介质密切相关。

J. Billiotte 等^[9]的实验成果表明, 盐岩的渗透率一般为 10^{-21} ~ 10^{-17} m², 对于饱和盐水, 其渗透率低于 10^{-19} m²。邓祖佑等^[10]的研究结果表明, 随其中饱含介质从空气、煤油、到水的变化, 同一类泥岩渗透率逐渐降低。其中饱含空气的渗透率为 5.50×10^{-19} ~ 6.94×10^{-17} m², 饱含水的渗透率为 2.4×10^{-21} ~ 1.43×10^{-19} m²。在油气储库中, 该类夹层的存在不会对油气的渗漏造成重大影响。钙芒硝也为常见夹层, 其中的 Na₂SO₄ 成分不被溶解条件下极其致密, 渗透率极低, 但在水溶液溶解之后, 其渗透性会发生很大改变。其溶解渗透性具体可参阅作者^[12]的相关研究成果。

2.2 单轴及三轴力学特性

表 1 给出了常见盐岩及夹层单轴强度与变形特性^[4~7, 13]。从表 1 中可以看出: 岩盐(NaCl)的抗压强度为 20.0~22.0 MPa, 单轴抗拉强度为 0.8~1.3 MPa; 芒硝(Na₂SO₄)的强度与盐岩的接近; 钙芒硝(CaSO₄·Na₂SO₄)的单轴抗压与抗拉强度均高于岩盐与芒硝盐岩; 泥岩的强度最低。

表 1 常见盐岩及夹层单轴强度与变形特性^[4~7, 13]

Table 1 Uniaxial strength and deformation properties of ordinary salt rocks and interlayers^[4~7, 13]

岩性	单轴抗压强度 /MPa	单轴抗拉强度 /MPa	泊松比
岩盐(NaCl)	20.0~22.0	0.8~1.3	0.30~0.40
芒硝(Na ₂ SO ₄)	16.3~19.5	1.1~1.6	
钙芒硝(CaSO ₄ ·Na ₂ SO ₄)	13.8~27.5	2.5~2.7	
泥岩	2.9	0.1	0.27

在实验时观察试件破坏形态发现，岩盐与芒硝表现为韧性破坏，而钙芒硝则为脆性破坏。另外，所有盐岩均表现出较强的横向变形能力，在弹性变形阶段泊松比为 0.3~0.4，而在塑性变形阶段泊松比则高达 0.5。在三轴压缩作用下，岩盐与夹层的力学差异更加明显。图 1 给出了三轴压缩作用下岩盐与夹层的偏应力 - 应变曲线。与强度高、横向变形能力弱的夹层(如石膏、钙芒硝)相比，这种强度低、横向变形强的特征会导致盐岩与其夹层交界面上出现变形不协调现象，从而影响油气储库的致密、稳定及安全性。

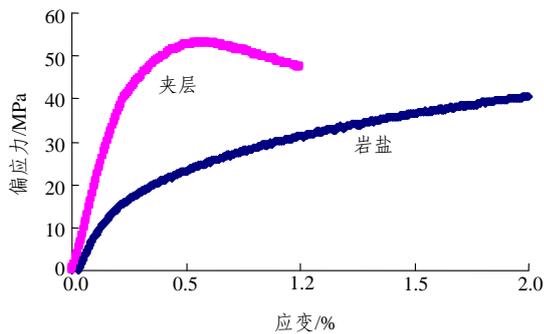


图 1 三轴压缩作用下岩盐与夹层的偏应力 - 应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of salt rock and interlayer under triaxial compression

在三轴应力作用下，随偏应力的增大，岩盐与夹层的应变均增加^[14]。在相同载荷作用下，二者的应变却相差较大，随偏应力水平的提高，二者差距也越趋明显。如在 10 MPa 时，岩盐应变为夹层的 2.2 倍；20 MPa 时，岩盐应变为夹层的 3.6 倍；30 MPa 时，岩盐应变为夹层的 5.7 倍。在三轴压缩作用下，岩盐的变形表现出其典型的流变特征，而含泥石膏夹层则表现为弹塑性材料的变形特征。

这些在单轴及三轴作用下岩盐及其夹层的强度及变形特征的差异性，会导致相邻岩层的变形不协调及交界面出现剪切破坏，对储气库运行的安全性造成一定影响。在储气库运行参数设计中，必须认真考虑那些强度低、脆性特征明显的非盐夹层。

3 盐岩及夹层蠕变特性

天然气储库，除考虑腔体结构稳定以外，还要考虑其未来服役期限(数十年至数百年)内运行的安全稳定性。由于周期性注气、采气的原因，储库腔体内部压力呈周期性变化特征。因此，研究盐岩及夹层在不同应力边界条件下的蠕变特性，确定其在

不同应力条件下的蠕变率及蠕变量，对储气库稳定性分析至关重要。

通过对不同盐岩及夹层在不同应力条件下的蠕变实验研究发现，盐岩蠕变与应力水平密切相关^[15]。随偏应力水平的提高，盐岩及夹层的蠕变率均单调升高。单轴应力分别为 4 和 7 MPa 时，盐岩的稳态蠕变率分别为 3.77×10^{-5} 和 $2.38 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$ 。而钙芒硝盐岩在 7 和 12 MPa 时，稳态蠕变率相对较低，分别为 8.72×10^{-6} 和 $1.12 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$ 。J. Slizowski 和 L. Lankof^[14]的实验结果表明，在偏应力为 10 MPa 条件下，泥岩的稳态蠕变率为 $(2.2 \sim 6.5) \times 10^{-6} \text{ d}^{-1}$ 。

除应力之外，温度对盐岩蠕变也有明显影响，与盐岩蠕变率呈指数关系。常用盐岩稳态蠕变率表达式为 BGRa 稳态蠕变率表达式^[16]，即

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{R_0 T}\right) \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad (1)$$

式中： A 为材料系数； n 为应力指数，通常取 3~5； Q 为活化能，通常取 $Q = 54 \text{ kJ/mol}$ ； σ^* 为参照应力，通常取 $\sigma^* = 1 \text{ MPa}$ ； R_0 为通用气体常数，通常取 $R_0 = 8.314 \text{ kJ/(mol} \cdot \text{K}^{-1})$ ； T 为温度。

由式(1)可见，应力与温度对盐岩稳态蠕变率具有十分显著的影响。假定钙芒硝及泥岩的蠕变特征也符合式(1)，则可得常温($T = 293 \text{ K}$)条件下，岩盐、钙芒硝盐岩及泥岩相对应的稳态蠕变表达式中的材料系数分别为： $A_h = (0.6 \sim 0.7) \times 10^{-6} \text{ d}^{-1}$ ， $A_g = (0.07 \sim 0.26) \times 10^{-7} \text{ d}^{-1}$ ， $A_m = 0.445 \times 10^{-8} \text{ d}^{-1}$ 。因此，在相同偏应力作用下，3 种岩石的稳态蠕变率之比为 $\dot{\epsilon}_h : \dot{\epsilon}_g : \dot{\epsilon}_m = A_h : A_g : A_m = 146 : 4 : 1$ 。盐岩与夹层的应变率相差较远，近 2 个数量级。

盐岩物性致密、含水率低，对其蠕变特性影响小，而泥岩夹层则不同。唐立强等^[17]的研究结果表明，泥岩的黏性应变率随含水率的变化会急剧增大，在原泥岩含水率为 15% 的前提下，含水率增加到 20% 时，黏性应变率的增加幅度近 5 倍，而含水率增加到 25% 时，黏性应变率的增加幅度近 70 倍。因此，岩盐与高含水率泥岩之间的蠕变率差距会更小一些，变形协调性会更好，有利于储气库腔体的致密稳定。

另外，X. Allemandou 和 M. B. Dusseault^[18]对岩盐循环加载蠕变进行实验研究，研究结果表明在第二应力偏量 $J_2 (J_2 = 20 \text{ MPa})$ 不变条件下，随八面体

应力的增加, 瞬态蠕变变形量减小, 稳态蠕变速率降低。这意味着在强度一定的情况下, 随深度增加和应力水平的升高, 岩盐蠕变在逐渐收敛, 有利于储气库的稳定。

4 盐岩溶腔储气库极限压力

为满足季节性调峰, 储气库必然要进行周期性注采气。通常储气越多、垫气越少、注采频率越高, 则储库运行越经济。但是, 为保证储库腔体的长期致密安全及经济运行, 必须进行运行极限压力的科学合理设计。在层状盐岩矿床中, 除考虑盐岩蠕变性外, 还必须考虑夹层的强度及变形特征^[19]。

4.1 最小内压确定原则

(1) 顶板稳定原则

由于储库腔体内压低于所处围岩地应力, 腔体顶板必然要向腔内下沉, 包括在建腔过程中的弹性变形及储库建成后的蠕变变形。为防止顶板的过度变形及其底部出现张应变开裂, 储库内最小压力必须满足上述的变形约束要求。显然, 储库内残余气体压力越高, 顶板变形量越小, 顶板越稳定。但是, 对于周期性注采气的气库而言, 残余气体压力越高, 意味着垫气量大、采气量少, 储库运营的经济性较差。因此, 为平衡储库运行的稳定性及经济性, 必须对最小压力的确定进行综合分析 with 合理确定。

(2) 蠕变控制原则

对于盐岩溶腔核废料处置, 在蠕变作用下废物会被盐岩越来越密实包围, 蠕变的作用有利于核废料的密封与外界的安全隔离。而对于石油及天然气储库, 为保证储库腔体稳定、防止顶板过度变形及保持腔体的有效容积, 需要对蠕变进行合理控制。

由式(1)可见, 有效应力越高, 腔壁盐岩的蠕变率越大, 腔体的有效容积将越小。因此, 有效容积是对最小内压的一个约束。

在等温条件下, 式(1)中盐岩蠕变率与应力的关系可表示为

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{3\sigma'_{ij}}{2\sigma} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^n \quad (2)$$

式中: σ'_{ij} 为应力偏量, σ 为有效应力, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应力 σ^* 作用下的蠕变率(0.1%~0.2%), $\dot{\epsilon}_0 \left(\frac{3\sigma'_{ij}}{2\sigma} \right)$

相当于式(1)中的材料系数 A 。

在盐岩体为不可压缩应变场及储库形状球对称

条件下, 腔体边界的变形速度为

$$v_0 = \frac{a\dot{\epsilon}_0}{2} \left(\frac{3\sigma_\infty - p}{2n\sigma_0} \right)^n \quad (3)$$

式中: a 为球形腔体半径, p 为腔体内压。由此可得球形储库腔体的体积变化率为

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{3}{2} \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{3\sigma_\infty - p}{n\sigma_0} \right)^n \quad (4)$$

即

$$p = \sigma_\infty - \frac{n\sigma_0}{3} \sqrt[n]{\frac{2\dot{V}}{3\dot{\epsilon}_0 V}} \quad (5)$$

因此, 当一定深度储库腔体的最终理想体积及一定年限内的体积变化率确定后, 即可获得储库的最小内压。

4.2 最大内压确定原则

(1) 裸井致密原则

裸井(俗称裸脖子)指的是位于井底套管靴以下、储库腔体和管串的连接过渡部位, 一般位于腔顶盐岩层中, 长度几米至十几米不等。由于该部位不仅与套管靴相连, 而且紧邻盖层, 套管靴是通过水泥与盐岩井壁黏合, 材料间极易发生变形不协调而破裂, 储库与盖层连通, 气体泄漏的可能性增加。因此, 腔体裸井部位的致密性极其重要。要保证裸井的致密, 腔体内气压必须满足一定应力条件。

根据弹性平面理论, 裸井可以看成是在无限平板中的一个圆孔, 则孔周径向应力分量、切向应力分量以及剪切应力分量可分别表示为

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{pR^2}{r^2} + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{pR^2}{r^2} - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (8)$$

式中： σ_1 、 σ_2 分别为平面内最大、最小水平应力； R 为井半径。

为保证裸井致密、不开裂，井筒内压(也即腔体压力)应当低于切向应力，即 $p < \sigma_\theta$ ，也即 $p < (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ 。

(2) 腔壁致密原则

腔壁致密，指的是除裸井之外的整个储库腔体保持致密不开裂，这就要求储库内压不得大于最小地应力，即 $p < \sigma_{\min}$ 。一般而言，在浅部(小于 1 500 m)地层，由于构造应力的存在，最小地应力为垂向地应力；而随深度的加大，最小地应力方向可能变为水平方向，也即垂向地应力不再是最小应力。因此，若储库腔体位于浅部地层，且最小应力为垂向地应力，这样即使由于腔体压力增高，超过最小地应力而产生水平裂缝，也不会造成大的威胁。因为气体的泄漏仍然在盐岩矿层中，除有构造存在的情况下，一般不会与上部地层连通，泄漏至地表。而对于深部地层储库腔体，一旦腔体内压超过最小地应力(水平方向)产生垂向裂缝，极有可能与上部地层连通，造成严重泄漏。

储气库最大内压需对上述 2 个条件进行综合比较来确定。

5 算例分析

图 2 给出了某盐矿床地质柱状图。由图 2 可见，在 119.1 m 的层状盐岩矿床中，含有 10 个页岩夹层(其中 2 个夹层厚度较大，分别为 2.5, 2.7 m)、1 个硬石膏夹层(厚度 2.7 m)、1 个白云岩夹层(厚度 1.2 m)。根据图 2，设计储气库为圆柱形硐室，深度为 405.4~468.8 m，高为 63.4 m，直径为 30~90 m。

根据地应力测量结果，该区域铅垂地应力梯度为 23.8 kPa/m，最小水平地应力梯度为 17 kPa/m。如果取 393.2~405.4 m 深、12.2 m 厚盐岩层为储气库顶板，则由浅到深，厚度分别为 0.3, 2.5 m 的页岩，2.7 m 的硬石膏，1.2 m 的白云岩夹层为关键夹层。根据弹性理论及地应力测算，最顶部 0.3 m 厚页岩为决定性夹层，其顶部最小水平地应力 $\sigma_h = 6.90$ MPa。因此，根据腔壁致密原则，最大储气库运行压力为 6.90 MPa；根据裸井致密原则，设盐岩层中裸井长度为 6.1 m，则可计算得最大压力为 6.72 MPa。二者中取最小值 6.72 MPa 为该地质条件下储气库的最大运行压力。但是，在设计中仍然要根据具体理论计算结果，乘以一定安全系数(0.90~0.95)。

深度/m	柱状	厚度/m	岩性
379.2~383.7		4.5	盐岩
383.7~384.3		0.6	页岩
384.3~392.6		8.3	盐岩
392.6~393.2		0.6	页岩
393.2~405.4		12.2	盐岩
405.4~405.7		0.3	页岩
405.7~409.0		3.3	盐岩
409.0~411.5		2.5	页岩
411.5~414.2		2.7	盐岩
414.2~414.5		0.3	页岩
414.5~420.6		6.1	盐岩
420.6~423.3		2.7	页岩
423.3~437.7		14.4	盐岩
437.7~438.0		0.3	页岩
438.0~454.1		16.1	盐岩
454.1~455.0		0.9	页岩
455.0~468.8		13.8	盐岩
468.8~471.5		2.7	硬石膏
471.5~472.7		1.2	白云岩
472.7~474.2		1.5	页岩
474.2~492.5		18.3	盐岩
492.5~493.4		0.9	页岩
493.4~498.3		4.9	盐岩

图 2 某盐矿床地质柱状图

Fig.2 Geological histogram of a bedded salt deposit

根据顶板稳定性原则，计算得最小储气库压力与硐室直径密切相关，直径越大，要求最小压力越高。根据弹性板理论，计算得直径为 30~90 m 储气库的最小内压为 7.95~9.44 MPa，高于计算最大压力，显然弹性板理论中的一些假设不适用。而根据蠕变控制原则(式(5))，取储气库腔体中部平均地应力为 8.40 MPa，最终体积收缩率为 20%，可得最小储气库压力为 4.30 MPa。

由以上分析可知，根据不同计算准则，所得极限运行压力存在一定差距。因此，在储气库参数设计过程中，必须运用多种分析手段，在综合分析中取舍，最终确定出合理的储库运行参数。

6 结 论

层状盐岩矿床是由盐岩与夹层交互沉积而成，盐岩与夹层的物理力学特性(包括孔隙率、渗透率、单轴及三轴力学特性、蠕变特性等)的差异，会对层状盐岩储气库运行的安全稳定性构成影响。在层状盐岩储气库运行压力确定时，必须充分考虑上述因素。本文对层状盐岩物理力学特性综合分析后认为：

- (1) 盐岩及常见夹层天然孔隙率低，在没有遭

受变形破坏之前, 不会对油气储库安全稳定性造成影响。

(2) 盐岩与夹层间存在的力学特性差异会造成变形不协调, 在一定压力条件下, 在交界面上产生剪切破坏, 影响储库的安全与稳定性。

(3) 层状盐岩储气库极限运行压力确定时, 必须考虑如下几方面原则: 顶板稳定原则、蠕变控制原则、腔壁致密原则及裸井致密原则。

“夹层多、单层厚度薄”是层状盐岩典型特征, 在层状盐岩矿床中建造天然气储库必须进行详细的地质、物理、力学特性分析与评价, 在综合分析研究的基础上, 以储气库能够长期、安全、稳定、经济运行原则, 进行运行参数设计。

参考文献(References):

- [1] JEREMIC M L. Rock mechanics in salt mining[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994: 78 - 93.
- [2] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国, 等. 盐岩矿床内油气储备和核废料处置[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(4): 440 - 443.(LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng, XU Sugu, et al. Oil and gas storage and nuclear waste disposal in salt rock deposit[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(4): 440 - 443.(in Chinese))
- [3] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(YANG Chunhe, LIANG Weiguo, WEI Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(in Chinese))
- [4] SLIZOWSKI J, LANKOF L. Salt-mudstones and rock-salt suitabilities for radioactive-waste storage systems: rheological properties[J]. Applied Energy, 2003, 75(1/2): 137 - 144.
- [5] 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. An experimental study on short-term strength and deformation properties of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 104 - 3 109.(in Chinese))
- [6] 梁卫国, 赵阳升. 岩盐力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 391 - 394.(LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng. An experimental study on mechanical properties of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 391 - 394.(in Chinese))
- [7] 徐素国, 郜保平, 梁卫国, 等. 钙芒硝岩盐力学特性的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 1 125 - 1 128.(XU Sugu, XI Baoping, LIANG Weiguo, et al. Study on mechanical properties of glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 1 125 - 1 128.(in Chinese))
- [8] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩蠕变特性和本构关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 267 - 1 271.(LIU Jiang, YANG Chunhe, WU Wen, et al. Study on creep characteristics and constitutive relation of rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 267 - 1 271.(in Chinese))
- [9] BILLIOTTE J, LEGUEN C, DEVEUGHELE M, et al. On laboratory measurement of porosity and permeability of salt rocks(Bressan Basin-France)[C]// The Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the Third Conference. [S. l.]: [s. n.], 1993: 221 - 236.
- [10] 邓祖佑, 王少昌, 姜正龙, 等. 天然气封盖层的突破压力[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 136 - 138.(DENG Zuyou, WANG Shaochang, JIANG Zhenglong, et al. Breach pressure of natural gas cap rock[J]. Oil and Gas Geology, 2000, 21(2): 136 - 138.(in Chinese))
- [11] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.(ZHAO Yangsheng. Rock fluid mechanics in mining[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [12] 梁卫国, 徐素国, 赵阳升. 钙芒硝盐岩溶解渗透力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 951 - 955.(LIANG Weiguo, XU Sugu, ZHAO Yangsheng. An investigation on dissolution and seepage mechanical properties of glauberite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 951 - 955.(in Chinese))
- [13] 吉随旺, 张倬元, 邓荣贵, 等. 川中红色砂泥岩岩石力学特性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 72 - 74.(JI Suiwang, ZHANG Zhuoyuan, DENG Ronggui, et al. On the rock mechanical properties of mudstones and sandstones in the middle part of Sichuan red basin[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(1): 72 - 74.(in Chinese))
- [14] LIANG W G, YANG C H, ZHAO Y S. Experimental investigation on mechanical properties of bedded salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(3): 400 - 411.
- [15] 梁卫国, 徐素国, 赵阳升, 等. 盐岩蠕变特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 386 - 1 390.(LIANG Weiguo, XU Sugu, ZHAO Yangsheng, et al. Experimental investigation on creep property of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 386 - 1 390.(in Chinese))
- [16] HUNSCHKE 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.
- [17] 唐立强, 谭英杰, 郑贵. 泥岩本构方程的研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(1): 90 - 93.(TANG Liqiang, TAN Yingjie, ZHENG Gui. Study on the constitutive equation of mudstone[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(1): 90 - 93.(in Chinese))
- [18] ALLEMANDOU X, DUSSEAULT M B. Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results and discussion[C]// The Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the Third Conference. [S. l.]: [s. n.], 1993: 207 - 218.
- [19] 梁卫国. 盐类矿床控制水溶开采理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.(LIANG Weiguo. Controlled solution mining theory for salt deposit and its application[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese))