

板中北砂岩型储气库压力应变规律分析

石磊¹,熊伟¹,高树生¹,吴宏双²

1. 中国科学院渗流流体力学研究所,河北廊坊 065007
2. 廊坊师范学院管理学院,河北廊坊 065000

摘要 地下储气库(UGS)是解决天然气供给与需求不平衡问题的重要设施。枯竭气藏是建设 UGS 的理想储层,而储层的综合性能决定了建立 UGS 的可行性。气藏的存储能力是衡量 UGS 运行效果的重要指标,为正确判断板中北 BZ 气库存储能力变化特征,文章综合分析了研究区储层发育特征,对 BZ 气库主力储层压力应变数据进行了统计和对比。借助数学模型分析储层孔隙结构压力应变的影响因素,提出原始孔隙度、气库运行压力与气库储层压力应变特征存在相关性。实际生产历史拟合检验结果表明,所提出的分析方法和数学模型有助于正确地定量认识气库运行规律,为实际生产管理中制定相应的运行方案提供了一种有利的分析手段。

关键词 地下储气库;枯竭气藏;压力应变;有效应力

中图分类号 P554

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.08.004

Analysis of Pressure Strain of Sandstone-type Gas Storage in North Banzhong Area

SHI Lei¹, XIONG Wei¹, GAO Shusheng¹, WU Hongshuang²

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Management School, Langfang Teachers College, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract Underground Gas Storages (UGS) are widely used to store the surplus of produced natural gas during periods of low demand, and to relieve the pressure during periods of high demand. A depleted natural gas reservoir is generally the ideal choice for the UGS. The proper selection of a depleted gas reservoir is essential to the stability of the UGS in the long run. The storage ability is an important index for the performance of the gas storage. In order to analysis the stability of the storage ability of the UGS in BZ area, the development characteristics of the main reservoir are studied, with the pressure strain data of the reservoir analyzed and compared. The effect of the pressure strain on the porosity is evaluated by using mathematical formulas, and it is believed that the original porosity and the operation pressure are related with the effect of the pressure strain on the UGS. The case production history fitting of the gas storage has verified the analytical method and the mathematical chart board, which may offer an accurate and quantitative analysis of the storage ability in the UGS, and provide an analytical tool in the practical production management.

Keywords UGS; depleted gas reservoir; pressure strain; effective stress

0 引言

地下气库运行过程中,库内压力循环波动,储层的孔隙度也相应发生改变(图 1)^[1]。冬季气库内部压力增加,储层孔隙结构承受的有效应力降低,储层孔隙度相应增加,代表气库存储能力的库存量增大,当达到储气高峰时,孔隙度接近最高值。夏季气库内部运行压力衰减,储层有效应力增加,孔隙度逐步降低,导致库存量下降,当达到储气低谷时,孔隙度

接近最低值。气库储层对此现象反映的敏感程度受到多种因素的综合影响,储层岩性、裂缝状况、胶结情况、含水饱和度及地层温度共同决定了储气库储层的压力应变效果。在储气库工程项目实施之前应首先考虑这些问题。2004 年 Kanaga 等^[2]分析了澳大利亚地区地下储气库运行历史,发现库容随地层压力波动而相应改变;2005 年 Duncan 等^[3]利用微重力法实现了储层流体运移监测,并提出岩石弹性膨胀与气库回采率存

收稿日期:2011-08-11;修回日期:2012-02-28

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05013-002)

作者简介:石磊,博士研究生,研究方向为油气田开发方面的研究工作,电子信箱:jimfish19821230@163.com

在相关性;Langlais 等^[4]建立了地下储气库 4 维地质模型,并对气库运行中储层岩石的变形做出了预测;2006 年 Guo 等^[5]利用三维黑油模型分析了含裂缝油藏型储气库储层岩石的应力敏感性;2008 年 Azin 等^[6]针对枯竭气藏型储气库运行效果,提出储层岩石应变是影响地下气库运行效果的主要因素。

气库内压力的增加,不断改变着储层岩石的受力状态。根据岩石力学理论,从一个应力状态改变到另一个应力状态必然会引起固体物质的压缩或拉伸,产生变形^[7-10]。储层岩石的变形主要表现为孔隙和岩石骨架的压缩和拉伸。一般来说,岩石骨架的变形非常微小,可以忽略不计;但储层岩石孔隙的变形随库内压力的变化非常明显,不能忽略不计。储层岩石孔隙的变化越大,孔隙压力应变越强,表明气库存储能力变化越大^[11]。本文对比分析了 BZ 枯竭气藏型储气库储层在天然气注采过程中的孔隙度压力应变数据,研究储气库储层压力应变规律的主要影响因素。

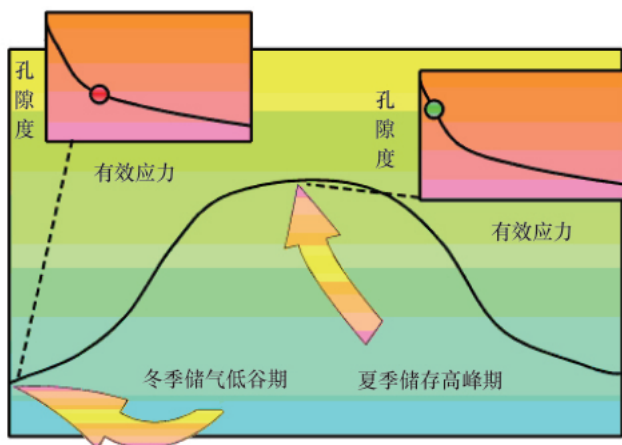


图 1 储气库孔隙度压力循环效应

Fig. 1 Effect of pressure cycling on porosity in UGS

1 区块地质特征

板中北 BZ 气藏主力层沉积微相由西向东依次为潮上含膏云坪向潮间含膏云坪过渡,以潮上带沉积单元为主。地层厚度稳定,除侵蚀沟谷剥蚀外,主力储层厚度变化范围为 1.4—13.7m,平均 5.6m。分布于 S25 与 Y11 井间区域的主力储层 P1S 岩性主要为砂岩,为储气库高速注采奠定了物质基础。从储集空间看,孔隙以溶蚀孔为主,晶间孔及膏模孔次之。孔隙组合类型方面,根据图像分析、铸体薄片分析的描述,储层孔隙组合类型主要有溶孔型、晶间孔型、晶间孔型和晶间微孔型。BZ 气田储层中的孔隙喉道主要由机械、物理风化、岩溶坍塌及成岩收缩等作用形成。储层孔隙度反映了气库储气空间的规模,喉道的储集意义不大,但对沟通溶孔、提高储层渗流能力及气井产能起到了重要作用,是气井高速注采的保证(图 2)。

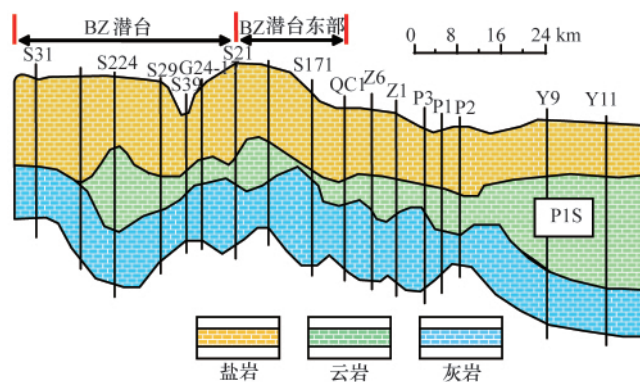


图 2 BZ 气藏构造分布图

Fig. 2 Distribution of reservoir in BZ area

2 压力应变实验

储层岩石的有效应力是上覆压力与库内孔隙内流体压力的差值。孔隙度压力应变效果反映了储层岩石孔隙度随有效应力改变的变化程度。通过岩心夹持器内两个独立的静压力系统模拟真实储层环境。利用岩心的围压模拟地下储层的上覆压力,通过孔隙内压力模拟储气库内的流体的压力。在实验检测过程中,通过改变注入压力模拟储气库天然气注采循环中的运行压力的改变,并采集储层岩石的孔隙度变化动态数据。实验数据见表 1。

表 1 储层压力应变数据

Table 1 Pressure strain data on porosity

层位	层深/m	初始孔隙度/%	最终孔隙度/%	孔隙度变化率/%
P1S1	2887.9	8.6	8.8	2.3
P1S2	2892.9	9.9	10.3	4.5
P1S3	2894.1	7.7	7.8	1.2
P1S4	2895.9	8.2	8.3	1.7

多次注采会使储层岩心孔隙度发生改变。有效应力由 45MPa 降至 20MPa,孔隙度增加;有效应力再由 20MPa 增至 45MPa,孔隙度下降,但孔隙度值仍高于初始值,并无法恢复。说明储气库经过多次注采后,储气空间变大,相同的有效应力下气库库容量相应增加。实验结果如图 3 所示。

3 压力应变规律

对各主力层的多轮次注采的孔隙度压力应变数据进行回归分析,结果表明随储层有效应力的降低,孔隙度有明显的上升趋势。具体表现为,在压降初期,孔隙度缓慢增加,接近压力下限时,上升幅度明显加大。原因在于,起初随着有效应力的下降,孔隙结构受力拉伸效果不明显,可供增加的空间减少,孔隙度增加缓慢;随着有效应力的继续降低,孔隙结构弹性变形加大,岩样中可供增加的空间增加,孔隙度快速

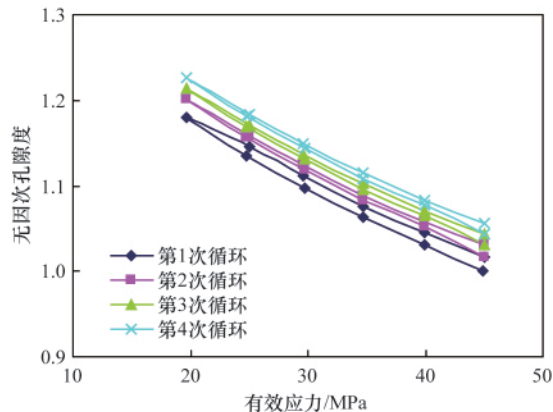


图3 层P1S1 孔隙度压力应变测试曲线

Fig. 3 Pressure strain curve on porosity in P1S1

上升。而且原始孔隙度较高的储层,其岩石骨架比较疏松,随有效应力下降,孔隙度变化幅度较大。研究区主力层的岩石的孔隙度与有效应力的关系拟和曲线如图4所示。

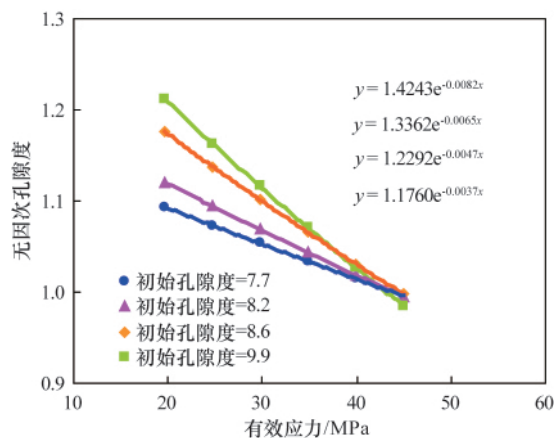


图4 有效应力与孔隙度关系

Fig. 4 Effect of pressure on porosity

根据研究区压力应变实验结果,建立了该地区储层岩石孔隙度与孔隙度敏感系数的关系,孔隙度敏感系数反映了孔隙度变化程度。从统计数据可以看出,孔隙度 ϕ 与有效应力之间具有很好的相关关系,建立数学模型,发现满足如下的指数关系:

$$\phi = ae^{-\alpha_{\phi}(p_i - p)} \quad (1)$$

其中, α_{ϕ} 为孔隙度敏感系数; p_i 为孔隙压力; p 为地层上覆压力; a 为回归常数。

根据初始孔隙度与孔隙度敏感系数之间的关系可知,岩石的初始孔隙度越低,采气、注气过程中孔隙度变化越小。根据初始孔隙度 ϕ_0 和得出的孔隙度敏感系数的拟合数据,对二者进行回归分析(图5),发现它们满足如下对数关系:

$$\alpha_{\phi} = 0.0183 \ln \phi_0 - 0.0336 \quad (2)$$

依据测试样品的初始孔隙度与孔隙度变化率的对应关系(图6),得出:

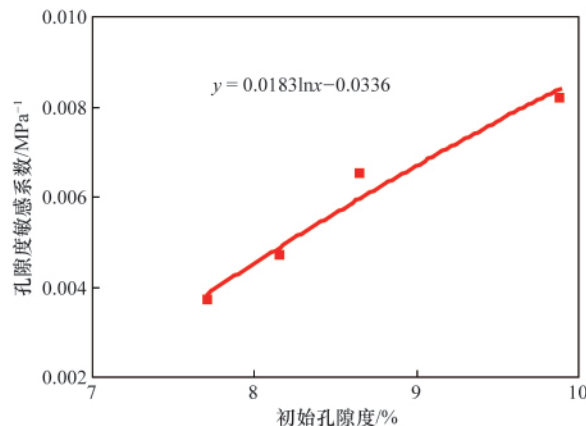


图5 初始孔隙度与孔隙度敏感系数关系

Fig. 5 Effect of primary porosity on porosity coefficient

$$\eta = -0.0844 \phi_0^2 + 4.601 \phi_0 - 23.709 \quad (3)$$

其中, η 为孔隙度变化率。

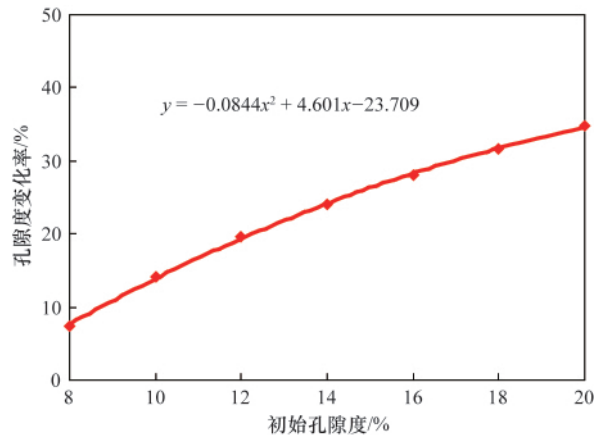


图6 孔隙度变化率与初始孔隙度关系

Fig. 6 Effect of primary porosity on the changing rate of porosity

由于地下气库储层的孔隙度变化率直接反应了气库注采运行过程中存储能力对地层有效应力的响应,系统分析结果证明孔隙度变化率与初始孔隙度、运行压以及孔隙度敏感系数之间存在相关性。由式(1)~(3)得到BZ储气库储层孔隙度压力应变模型

$$\begin{cases} \eta = -0.0844 \phi_0^2 + 4.601 \phi_0 - 23.709 \\ \alpha_{\phi} = 0.0183 \ln \phi_0 - 0.0336 \\ \phi = ae^{-\alpha_{\phi}(p_i - p)} \end{cases} \quad (4)$$

BZ气库的实际运行的库内上限压力为30MPa,下限压力为15MPa,有效应力变化范围为20~5MPa,根据孔隙度压力应变模型建立BZ储气库孔隙度压力应变特征图(图7),图中显示储层孔隙度损失率区间范围为6%~15%。

储气库储层孔隙度在有效应力上下浮动的过程中发生改变,储层初始孔隙度越高,孔隙度压力应变越强。

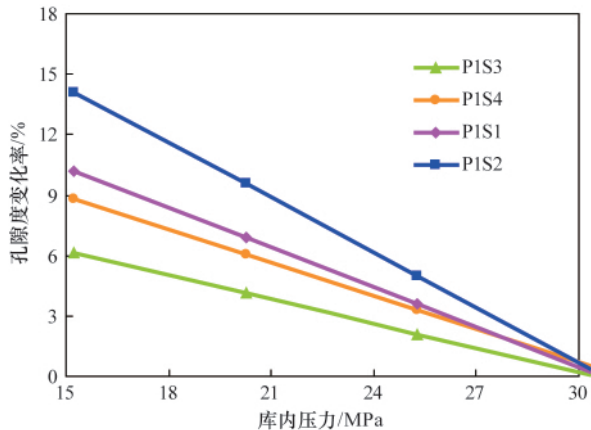


图7 BZ 储气库孔隙度压力应变特征识别图版
Fig. 7 Chart board of stress-sensitivity on porosity in BZ area

4 实际应用

针对将 BZ 储气库不同运行阶段, 实际主力储层不同深度位置的孔隙度变化率对应点放于 BZ 储气库孔隙度压力应变特征图中(图 8), 显示了很好的可对比性。

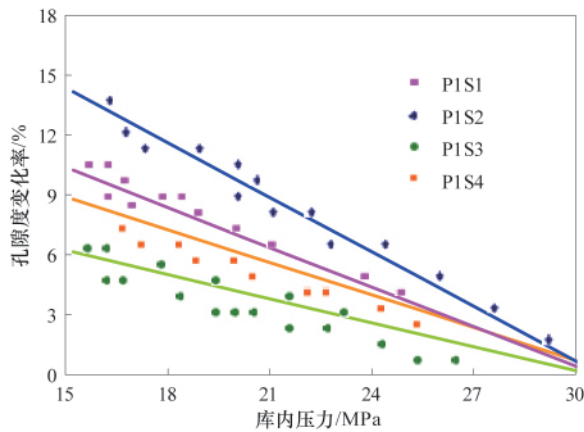


图8 BZ 储气库孔隙度敏感性特征
Fig. 8 Chart board for identifying stress-sensitivity on porosity in BZ area

通过实例井生产历史拟合检验, 提出的分析方法和识别图版有助于正确地定量认识气库存储能力变化规律, 为储气库生产管理中制定相应的措施提供了一种有利分析手段。

5 结论

通过以上分析, 可以得到以下结论。

- (1) BZ 储库储层为蒸发潮坪相带控制的砂岩, 优质储层分布于 S25 与 Y11 的井间区域。
- (2) BZ 储库储层主力储层压力应变数据对比分析结果表明, 研究区储层初始孔隙度越高, 库内压力越低, 储层压力应变越强, 主力储层孔隙度损失率可达 6%—15%。
- (3) 通过室内实验所提出的分析方法和数学模型是行之有效的, 有助于正确地定量认识气库运行存储能力变化规

律, 为实际生产中制定相应的运行方案提供了一种有利的分析手段。

参考文献 (References)

- [1] Witherspoon P A. Evaluating a slightly permeable caprock in aquifer gas storage I. Caprock of infinite thickness [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1967, 19(7): 949-955.
- [2] Kanaga D. Underground gas storage: Issues beneath the surface [C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, 18-20 October 2004.
- [3] Duncan B, Gaud P, Nick H. 4D Microgravity feasibility study at the Izaute underground gas storage facility [C]. EAGE 67th Conference & Exhibition, Feria de Madrid, Spain 13-16 June 2005.
- [4] Langlais V, Mezghani M, Lucet N, *et al.* 4D Monitoring of an underground gas storage case using an integrated history matching technique [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 9-12 October 2005.
- [5] Guo X, Du Z M, Guo P, *et al.* Design and demonstration of creating underground gas storage in a fractured oil depleted carbonate reservoir [C]. SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, 3-6 October 2006.
- [6] Azin R, Nasiri A, Entezari A J, *et al.* Investigation of underground gas storage in a partially depleted gas reservoir [C]. CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference, Calgary, Alberta, Canada, 16-19 June 2008.
- [7] Wang Z, Holditch S A. A comprehensive parametric simulation study of the mechanisms of a gas storage aquifer [C]. Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Jun 7-9, 2005.
- [8] Fourmaintraux D M, Bois A P, Le G C, *et al.* Detailed in situ stress measurements for qualifying the safety of underground gas storage overburden [C]. SPE Europe/EAGE Annual Conference, Madrid, Spain, 13-16 June 2005.
- [9] 陈祖安, 伍向阳, 孙德明, 等. 砂岩渗透率随静压力变化的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 155-159.
Chen Zu'an, Wu Xiangyang, Sun Deming, *et al.* *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(2): 155-159.
- [10] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415-419.
He Yulong, Yang Lizhong. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 415-419.
- [11] 张守良, 沈琛, 邓金根. 岩石变形及破坏中渗透率变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 885-888.
Zhang Shouliang, Shen Chen, Deng Jingen. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(S1): 885-888.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件, 以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等, 撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿, 每篇文章约 2000 字, 同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱: kjdbjb@cast.org.cn。