

储气库不同类型砂岩储层压敏特征及其影响因素

李 猛^{1,2}, 郑得文^{1,2}, 邱小松^{1,2}, 刘满仓^{1,2}

1. 中国石油勘探开发研究院 地下储库研究中心, 北京 100086;

2. 中国石油天然气集团有限公司 油气地下储库工程重点实验室, 河北 廊坊 065007

摘要: 储气库库容和产能受多种因素影响, 孔隙度和渗透率是其中的主要因素。为了揭示储气库不同类型砂岩储层在储气库工况下孔隙度和渗透率变化特征, 针对渤海湾盆地辽河坳陷 S 储气库 5 块不同类型砂岩样品, 开展应力敏感对比实验研究。结果表明, 该储气库储层孔隙度与渗透率随有效应力的增加而减小, 进而影响储气库的库容与产能, 可以用孔隙度和渗透率的损害率来表征储气库库容和产能的损害程度。首次提出了表征库容与产能的损害因子, 可用于定量评价交变载荷工况下储气库的库容和产能。S 储气库储层孔隙度和渗透率损害率随有效应力的增加呈线性增加, 泥质粉砂岩储层孔隙度应力损害率最大, 中砂岩储层孔隙度应力损害率最小。该储气库泥质粉砂岩储层渗透率损害率同样也最大, 且自身渗透率过低, 应急保供时这类储层贡献较小; 中砂岩储层渗透率损害率最小, 对调峰保供能力影响不大。通过研究, 明确了应力对储气库库容的量化损害程度。依据不同类型储层的损害率合理优化储气库运行工况, 可实现储气库库容和产能最大化。

关键词: 地下储气库; 覆压; 孔隙度; 渗透率; 应力敏感性

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Stress sensitivity characteristics and influencing factors of different types of sandstone reservoirs in gas storage

LI Meng^{1,2}, ZHENG Dewen^{1,2}, QIU Xiaosong^{1,2}, LIU Mancang^{1,2}

1. *Underground Oil and Gas Storage Research Center of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100086, China;*

2. *Key Laboratory of Underground Oil and Gas Storage Engineering, CNPC, Langfang, Hebei 065007, China*

Abstract: The storage capacity and productivity of gas storage are affected by many factors, among which porosity and permeability are the main factors. To reveal the variation characteristics of porosity and permeability of different types of sandstone reservoirs in gas storage, five different types of sandstone samples were collected from the S gas storage in the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin, and stress sensitivity comparative experiments were carried out. The results show that the porosity and permeability decrease with the increase of effective stress, which affects the storage capacity and productivity of the gas storage. The porosity and permeability damage rate can be used to characterize the damage degree of the storage capacity and productivity. A damage factor characterizing storage capacity and productivity was proposed for the first time, which can be used to quantitatively evaluate storage capacity and productivity of gas storage under alternating load conditions. The porosity and permeability damage rate of the S gas storage increase linearly with the increase of effective stress. The porosity stress damage rate of the argillaceous siltstone reservoir is the largest, and the porosity stress damage rate of the medium-grained sandstone reservoir is the lowest. The argillaceous siltstone reservoir also has the largest permeability damage rate and its own permeability is too low, so it contributes less during emergency supply assurance. The medium-grained sandstone reservoir has the smallest permeability damage rate, and it has little influence on the capacity of peak regulating and supply assurance. Through this study, the quantified damage degree of stress to gas storage capacity was determined. According to the damage rate of different types of reservoirs, the storage capacity and productivity of gas storage can be maximized by optimizing the operation condition of gas storage reasonably.

Key words: underground gas storage; overburden pressure; porosity; permeability; stress sensitivity

地下储气库是应急调峰保供的最有效设施, 储气库在高强度多周期的工作条件下, 储层所受应力

发生周期性变化, 储层岩石物性在交变应力作用下受到损害, 一定程度上对储层的孔隙度和渗透率有

破坏作用,从而影响储气库库容、调峰能力和储气库安全运行^[1]。而储气库库容和产能都与储层孔隙度和渗透率的关系非常密切。因此,厘清储气库储层孔隙度和渗透率随多周期有效应力的变化规律,为储气库优化注采与高效运行提供依据。

针对地下储气库储层孔隙度和渗透率与有效应力的单周期关系,国内外学者做了大量的实验,认为当有效应力逐渐变大时,储层压缩变形越明显,其孔隙度和渗透率逐渐降低^[2-7]。实际应用中,多周期注采工况下的储气库储层孔隙度和渗透率变化特征意义较为重大。张广权等^[8]研究了岩石在循环载荷作用下的变化情况,结果表明在外力作用下,砂岩因孔隙被破坏而失效,泥岩由于发生膨胀造成渗透率减小,随有效应力周期数的增多,岩石的损伤越来越大;李继强等^[9]选取文 23 储气库储层岩心进行多周期渗透率应力敏感实验,研究得出,岩石的渗透率随储气库运行周期数的增多而减小,岩石渗透率越低,其渗透率损害率越大,应力敏感性越强;孔茜等^[10]研究砂岩在循环载荷作用下孔隙度和渗透率变化规律,结果表明砂岩在高围压下渗透率变化程度较小,反之,变化程度较大。虽然在循环载荷的条件下,对储层孔隙度和渗透率随有效应力和注采周期的变化取得了一些初步认识,但尚未建立起表征储气库储层库容和产能损害率的定量评价模型。

本文选取渤海湾盆地 S 储气库储层的多块样品,开展不同类型砂岩多周期注采条件下的应力敏感研究。该储层以灰白色砾岩、砾状砂岩、含砾砂岩为主,夹带灰白色粉砂岩、深灰色泥岩,砂岩中以石英和斜长石为主,其孔隙度大多在 15%~20%之间,渗透率在 $(50\sim 500)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,沉积微相以河口坝和下水分流河道为主。实验采用 CMS-400 覆压孔渗自动测试仪,对岩样进行孔隙度和渗透率测量。分析该储气库储层砂岩随有效应力的变化,得到其孔隙度、渗透率的变化曲线,揭示储层孔隙度、渗透率随有效应力变化的差异性,建立储

气库库容和产能的损害率定量评价模型,为实现储气库注采效率最大化提供依据。

1 样品准备与实验设计

运用 RINT-TTR3 型 X 射线衍射仪对 S 储气库储层 20 余块样品进行 X 衍射全岩分析。结果显示,S 储气库储层粗砂岩的石英含量为 32%~35%,长石含量为 43%~48%,黏土含量为 16%~20%,以孔隙式胶结为主;中砂岩的石英含量为 30%~35%,长石含量为 41%~45%,黏土含量为 13%~15%,以孔隙式胶结为主;细砂岩的石英含量为 30%~33%,长石含量为 40%~43%,黏土含量为 13%~15%,孔隙式胶结和接触式胶结所占比重相差不大;粉砂岩的石英含量为 24%~30%,长石含量为 26%~32%,黏土含量为 15%~20%,以接触式胶结为主;泥质粉砂岩的石英含量为 38%~40%,长石含量为 35%~40%,黏土含量为 18%~25%,以接触式胶结为主。根据 S 储气库所在地区地质特征,储层岩石颗粒磨圆差,以次圆—一次棱角为主,储层成熟度不高,反映了岩石近源、快速堆积的特点。

实验样品分别取自渤海湾盆地辽河油田 S 储气库某井 8 号、10 号、11 号、12 号、15 号筒岩心,每个筒取样各 1 块,共计 5 块样品(表 1),各样品的主要矿物成分见表 2。

按照实验要求钻取柱状岩样,岩样长度与直径比大于 1.0,确保岩样的两个端面平行且两个端面垂直于轴线。在实验前按照国家标准《岩心分析方法:GB/T 29172—2012》^[11]的要求进行岩样清洗和岩样烘干;按照石油天然气行业标准《覆压下岩石孔隙度、渗透率测试方法:SY/T 6385—2016(7622)》^[12],模拟覆压条件下储层的孔隙度和渗透率物理条件。测定样品的设备是 CMS-400 覆压孔渗自动测试仪,孔隙体积由气体膨胀法^[13]确定。

S 储气库为气藏型储气库,储层埋深为 2 200~2 550 m,上覆地层压力为 52 MPa,设计运行上限压力为 26 MPa,对应最小有效应力为 26 MPa;设计运行下限压力为 8 MPa,对应最大有效应力为

表 1 渤海湾盆地辽河油田 S 储气库砂岩储层样品基本信息

Table 1 Basic information of sandstone reservoir samples in S gas storage in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

样品编号	直径/cm	长度/cm	采样深度/m	岩性	初始孔隙度/%	初始渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
10-29-1	2.46	5.10	2 476.0	粗砂岩	20.5	271
15-26-1	2.46	5.02	2 511.0	中砂岩	23.1	92.1
12-28-2	2.48	5.14	2 494.0	细砂岩	14.9	1.00
8-18-1	2.47	5.10	2 451.0	粉砂岩	18.8	0.254
11-31-2	2.47	4.00	2 486.0	泥质粉砂岩	16.5	0.038 3

表2 渤海湾盆地辽河油田S储气库砂岩储层样品全岩定量分析
Table 2 Whole rock quantitative analysis of sandstone reservoir samples
in S gas storage in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

样品编号	岩性	矿物含量/%							
		黏土	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿
10-29-1	粗砂岩	16.5	32.5	14.1	30.7	0.5	2.0	3.7	
15-26-1	中砂岩	13.9	32.0	9.4	31.8	0.9	3.0	6.1	2.9
12-28-2	细砂岩	14.5	30.2	15.1	25.8		14.4		
8-18-1	粉砂岩	19.7	25.8	7.8	19.9	2.9	13.7	9.6	0.6
11-31-2	泥质粉砂岩	18.3	38.9	8.1	28.6	1.2	2.7	2.2	

44 MPa。为了探究超出S储气库实际运行压力区间时储层会发生怎样的变化,额外设置两个有效应力点47 MPa和22 MPa,所以初始应力点为47 MPa;实验设计有效应力间隔为3.0 MPa(每个周期最少5个压力测试点),实验最小有效应力为22 MPa。

实验步骤为:将样品装入岩心夹持器中,对岩样施加3.5 MPa围压(该仪器最小压力加持为3.5 MPa),测试初始孔隙度和渗透率,然后将围压升至47 MPa,测得相应的孔隙度和渗透率后,逐渐降低围压至22 MPa,并测定各个压力点孔隙度和渗透率,共9个点。然后由22 MPa压力下,增加至44 MPa,按上述步骤测定样品的孔隙度和渗透率,共8个点,每个样品共测定5个周期。

2 实验结果与分析

2.1 孔隙度与有效应力的关系

实验测得3.5 MPa下样品的初始孔隙度和渗透率见表1,该储气库岩样的孔隙度随有效应力的增加而降低(图1)。当有效应力为22 MPa时,样品10-29-1的平均孔隙度为18.86%,覆压条件下样品10-29-1的孔隙压缩系数(C_p)为0.002 28 MPa^{-1} (C_p 是样品弹性程度的度量,即样品孔隙体积在有效应力增大或减小1 MPa时的变化量^[7])。其他样品实验结果见表3。

表3 渤海湾盆地辽河油田S储气库
储层样品22 MPa下孔隙压缩系数

Table 3 Pore compression coefficient of reservoir
samples at 22 MPa, S gas storage
in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

样品编号	岩性	平均孔隙度/%	孔隙压缩系数 C_p/MPa^{-1}
10-29-1	粗砂岩	18.86	0.002 28
15-26-1	中砂岩	21.90	0.002 57
12-28-2	细砂岩	14.07	0.002 39
8-18-1	粉砂岩	17.30	0.006 00
11-31-2	泥质粉砂岩	15.10	0.005 68

从图1a-d可以看出,随周期数的增加,4个样品孔隙度有微弱的增大趋势,而样品11-31-2的孔隙度与周期数之间无明显变化规律,说明S储气库储层岩石物性较好,在运行压力范围内,不会出现疲劳现象,可以保证储气库高效运行。

2.2 渗透率与有效应力之间的关系

从渗透率与有效应力之间的关系(图2)可以看出,随着样品的颗粒变细,样品的渗透率随有效应力的增大而明显减小。但随周期数的增加,样品的渗透率并未下移,说明S储气库储层随周期应力变化发生较多的弹性变形,使得样品渗透率随周期数变化影响不大。

2.3 储层应力敏感性及其对运行参数的影响分析

从上述实验结果分析中可以看出,应力敏感对不同类型储层的影响差别较大,也就是对储气库库容与产能的影响程度不同,运用这一变形规律,可以评价应力敏感对库容与产能的影响。例如S储气库生产过程中,地层压力随着运行工况发生周期性变化,构成储气空间的粗砂岩、中砂岩、细砂岩及粉砂岩等储层岩石受到的有效应力随之变化。依据不同类型储层岩石发生的变形规律,可以对影响库容的孔隙度与调峰能力的渗透率进行精细评价,进而核实储气库运行过程中的库容与产能等重要指标^[14],有效指导储气库运行与应急预案的编制。

本文在孔隙度和渗透率应力损害率^[15-16]基础上,首次提出应用储气库库容和产能的损害因子,表征储气库工况下库容和产能的变化。传统意义上的孔隙度和渗透率应力损害率表现的是岩石对应力变化的敏感程度,不能直接反映储气库交变载荷工况下对储层的影响。本文通过分析储气库储层的岩石成分,结合孔隙度和渗透率应力损害率,建立起能直观反映储气库库容和产能变化的模型。

储气库库容损害因子(D_s)是指某一类型储层,在上下限压力作用下孔隙度的差与上限运行压力作用下孔隙度数值之比,与该类储层在整个储层

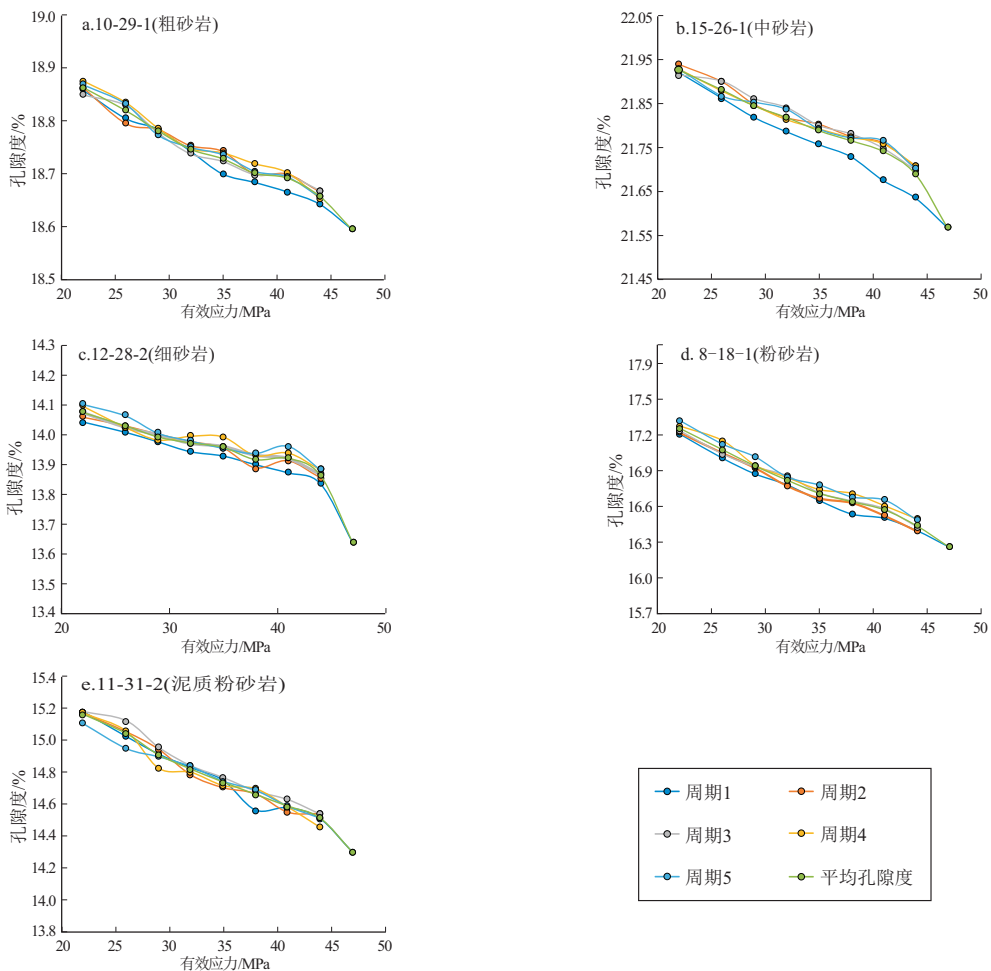


图 1 渤海湾盆地辽河油田 S 储气库砂岩储层样品孔隙度和有效应力的关系

Fig.1 Relationship between porosity and effective stress of sandstone reservoir samples in S gas storage in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

中的占比的积之和,即:

$$D_s = \sum \frac{\varphi_i^0 - \varphi_i}{\varphi_i^0} \times \varepsilon_i \quad (1)$$

式中: D_s 为储气库库容损害因子; φ_i^0 为某一类型储层上限压力下的孔隙度; φ_i 为某一类型储层下限压力下的孔隙度; i 代表某一类型储层; ε_i 代表某一类型储层在整个储层中的占比。

储气库产能损害因子 (D_p) 是指某一类型储层,在上下限压力作用下渗透率的差与上限运行压力作用下渗透率数值之比,与该类储层在整个储层中的占比的积之和,即:

$$D_p = \sum \frac{k_i^0 - k_i}{k_i^0} \times \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: D_p 为储气库产能损害因子; k_i^0 为某一类型储层上限压力下的渗透率; k_i 为某一类型储层下限压力下的渗透率。

当有效应力越来越大时,样品在覆压下孔隙度应力损害率(图 3a)和渗透率应力损害率(图 3b)均呈增大趋势。当有效应力达到 44 MPa 时,粗砂岩样(样品 10-29-1)孔隙度应力损害率为 8.9%;中砂岩样(样品 15-26-1)孔隙度应力损害率为 6.3%;细砂岩样(样品 12-28-2)孔隙度应力损害率为 6.9%;粉砂岩样(样品 8-18-1)孔隙度应力损害率为 10.5%;泥质粉砂岩样(样品 11-31-2)孔隙度应力损害率为 12.1%。其中泥质粉砂岩储层孔隙度应力损害率最大;中砂岩储层孔隙度应力损害率最小。由于中砂岩以孔隙式胶结为主,岩石抗压性强,所以孔隙度变化不明显;而泥质粉砂岩以接触式胶结为主,抗压性较弱,受应力变化影响大,所以孔隙度损害率高。储层孔隙度应力损害率越高,说明该类型储层应力敏感性越强,在调峰中应该注意该类储层合理工况生产。

从渗透率损害率曲线可以看出(图 3b),当有效应力达到 44 MPa 时,粗砂岩样渗透率应力损害

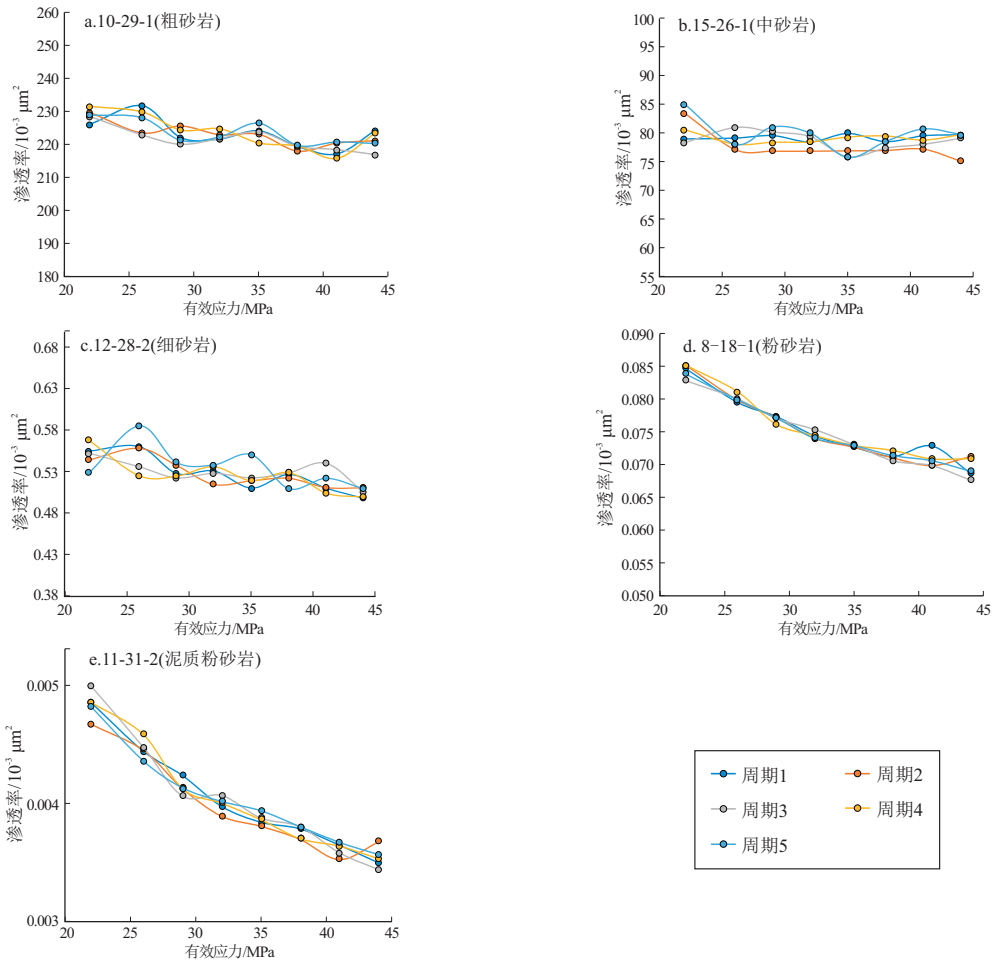


图 2 渤海湾盆地辽河油田 S 储气库砂岩储层样品渗透率和有效应力之间的关系

Fig.2 Relationship between permeability and effective stress of sandstone reservoir samples in S gas storage in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

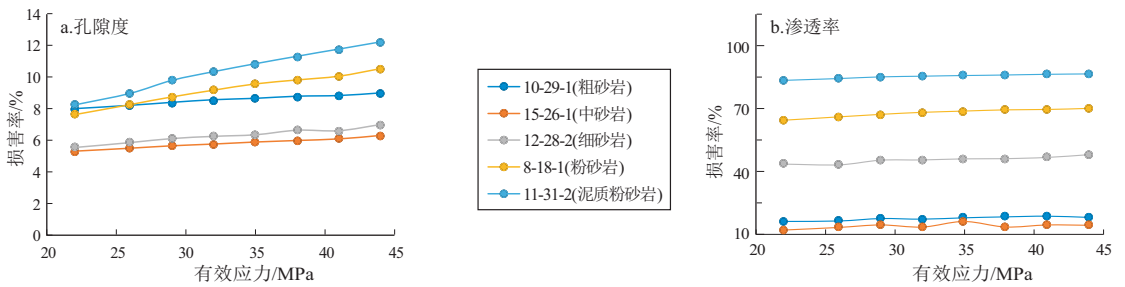


图 3 渤海湾盆地辽河油田 S 储气库砂岩储层各样品孔隙度和渗透率应力损害率与有效应力的关系

Fig.3 Relationship between porosity and permeability stress damage rate and effective stress of sandstone reservoir samples in S gas storage in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

率为 18.4%;中砂岩样渗透率应力损害率为 14.5%;细砂岩样渗透率应力损害率为 49.5%;粉砂岩样渗透率应力损害率为 72.6%;泥质粉砂岩样渗透率应力损害率为 89.9%。砂岩储层颗粒越细,应力敏感性越强,其中泥质粉砂岩储层渗透率应力损害率最大,粉、细砂岩储层渗透率应力损害率次之,中、粗砂岩储层渗透率应力损害率最小。同理,由于中砂岩以孔隙式胶结为主,岩石抗压性强,所

以渗透率变化小,因而渗透率损害率小;而泥质粉砂岩以接触式胶结为主,抗压性较弱,受应力变化影响大,所以渗透率损害率高。参照石油天然气行业标准《储层敏感性流动实验评价方法:SY/T 5358—2010》,S 储气库储层细砂岩,粉砂岩和泥质粉砂岩部分渗透率受应力损害程度较强(表 4),即细砂岩储层、粉砂岩储层、泥质粉砂岩储层对 S 储气库产能影响最大。

表 4 渤海湾盆地辽河油田 S 储气库储层样品孔隙度和渗透率应力损害率

Table 4 Porosity and permeability stress damage rate of reservoir samples in S gas storage in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

样品编号	岩性	孔隙度/%			$D_{\varphi_2}/\%$	$D_{\varphi_3}/\%$	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			$D_{K_2}/\%$	$D_{K_3}/\%$
		φ_1	φ_2	φ_3			K_1	K_2	K_3		
10-29-1	粗砂岩	20.5	18.6	18.5	8.9	9.7	271	221	209	18.4	22.8
15-26-1	中砂岩	23.1	21.6	21.5	6.3	6.9	92.1	78.7	73.8	14.5	19.7
12-28-2	细砂岩	14.9	13.8	13.6	6.9	8.7	1.00	0.504	0.512	49.5	48.8
8-18-1	粉砂岩	18.7	16.7	16.6	10.5	11.2	0.254	0.069 5	0.068 1	72.6	73.1
11-31-2	泥质粉砂岩	16.5	14.5	14.2	12.1	13.9	0.038 3	0.003 80	0.003 72	89.9	90.2

注： φ_1 是初始孔隙度， φ_2 是 44 MPa 下的孔隙度， φ_3 是 47 MPa 下的孔隙度； K_1 是初始渗透率， K_2 是 44 MPa 下的渗透率， K_3 是 47 MPa 下的渗透率； D_{φ_2} 是 44 MPa 下的孔隙度损害率， D_{φ_3} 是 47 MPa 的孔隙度损害率； D_{K_2} 是 44 MPa 下的渗透率损害率， D_{K_3} 是 47 MPa 的渗透率损害率。

由表 4 可以看出，有效应力达到 47 MPa 时的孔隙度损害率和渗透率损害率与 44 MPa 时相比，两者差别不大，可以考虑将 S 储气库实际运行下限压力降到 5 MPa (S 储气库地层压力 52 MPa，其与有效应力之差为实际运行压力) 左右。

S 储气库钻井取心深度为 2 370~2 561 m，位于 S 储气库 III 油组，储层厚度约为 50~120 m，其中以细砂岩储层居多，粉砂岩储层次之。S 储气库粗砂岩储层、中砂岩储层、细砂岩储层、粉砂岩储层、泥岩 (泥质粉砂岩) 储层占比为 0.14 : 0.20 : 0.30 : 0.25 : 0.11，则 S 储气库储层库容损害率为 2.3%，产能损害率为 9.2% (表 5)。目前日注气量 $1\ 566 \times 10^4\ \text{m}^3$ ，库容日损害为 $3.60 \times 10^4\ \text{m}^3$ ；日采气量为 $1\ 655 \times 10^4\ \text{m}^3$ ，只考虑达西流动的情况下，日产能损害为 $15.23 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。

3 S 储气库储层应力敏感性对比

当有效应力越来越大时，不同岩性的孔隙度应力损害率和渗透率应力损害率变化均呈现出线性增大趋势。总体来说，泥质粉砂岩储层的孔隙度应力损害率最大，即其孔隙度对应力敏感性最强；粗砂岩、细砂岩、粉砂岩储层孔隙度应力损害率比泥质粉砂岩储层稍小；中砂岩储层孔隙度应力损害率最小，其孔隙度应力敏感性在砂岩储层中最弱。泥质粉砂岩储层的渗透率应力损害率最大，其渗透率

对应力敏感性最强；粗砂岩、细砂岩、粉砂岩储层次之，中砂岩最小。这种现象表明，中砂岩储层渗透率对应力的敏感性在 5 种砂岩储层类型中最弱。

为了进一步验证实验结果，选择敏感性最强与最弱的样品进行 CT 扫描实验，图 4 为泥质粉砂岩样和中砂岩样实验前和进行 5 个周期应力后的 CT 扫描对比图。样品 11-31-2 实验前后，其孔隙体积减小了 23.1%，样品的内部结构被压实，孔隙结构更加紧密，因而泥质粉砂岩储层孔隙度和渗透率损害率高；样品 15-26-1 实验前后，其孔隙体积减小了 5.7%，实验前后孔隙体积有略微减小，说明样品内部结构受周期应力的影响不大，中砂岩储层孔隙度和渗透率损害率小，即 S 储气库交替注采工况下，对中砂岩储层影响较小。

目前 S 储气库正处于第 9 个注气期，如果 S 储气库注采时，井底附近地层压力快速变化，会造成储层应力敏感性伤害，这种伤害不可逆，会严重影响储气库使用效率和使用安全。因此在储气库注采过程中，需严格控制储气库储层压力变化。由图 4 可见，泥质粉砂岩储层对应力敏感性最强，着重监测泥质粉砂岩储层压力变化；同时针对不同类型的储气库储层采用不同的生产压差，合理优化储气库的注采方案，找到储气库工况与应力敏感性最佳临界范围。

表 5 渤海湾盆地辽河油田 S 储气库各类型储层库容和产能损害因子

Table 5 S gas storage capacity and productivity damage factors of each type of reservoir

样品编号	岩性	孔隙度/%		库容损害因子 $D_s/\%$	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$		产能损害因子 $D_p/\%$
		φ_i^0	φ_i		K_i^0	K_i	
10-29-1	粗砂岩	18.8	18.6		226	221	
15-26-1	中砂岩	21.9	21.6		81.1	78.7	
12-28-2	细砂岩	14.1	13.8	2.3	0.529	0.51	9.2
8-18-1	粉砂岩	17.3	16.7		0.084	0.069	
11-31-2	泥质粉砂岩	15.1	14.5		0.005 1	0.003 8	

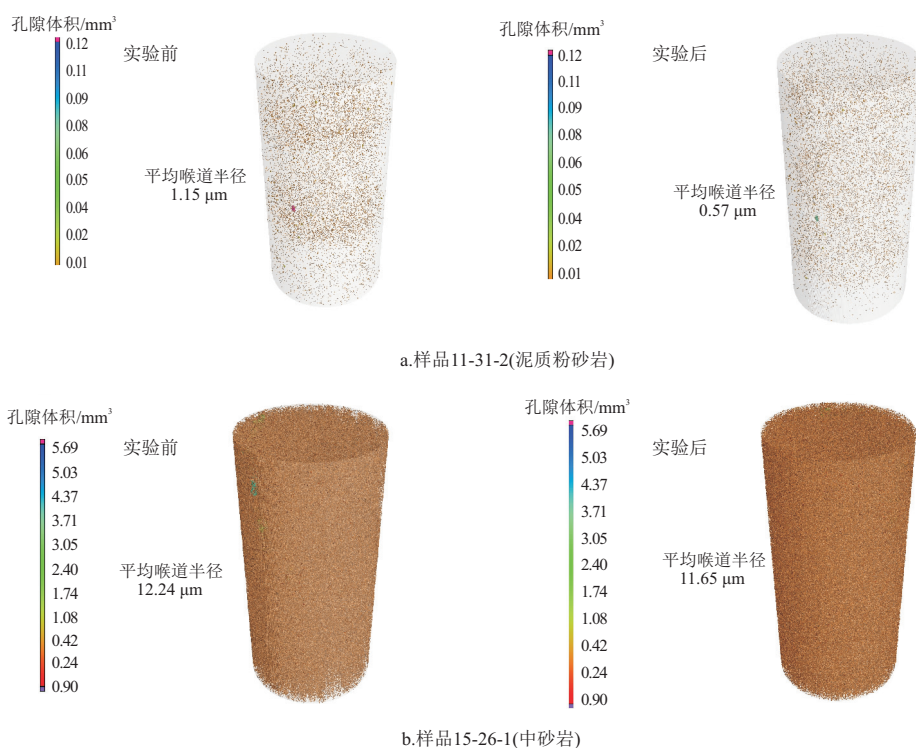


图4 渤海湾盆地辽河油田S储气库砂岩储层样品实验前和进行5个周期应力后CT对比

Fig.4 CT contrast of sandstone reservoir samples before experiment and after periodic stress, S gas storage in Liaohe Oilfield, Bohai Bay Basin

4 结论

(1)渤海湾盆地辽河油田S储气库储层覆压下孔隙度、渗透率随有效应力的增加而衰减,孔隙度随周期数的增加有微弱的增大趋势;随着作用在样品上的有效应力增大,样品被压缩,发生变形,整体情况下,样品渗透率随有效应力的增大而减小,而随周期数的变化无明显变化规律。

(2)不同类型储层孔隙度和渗透率损害率随有效应力的变化损害程度不同,其中泥质粉砂岩储层孔隙度应力损害率最大,中砂岩储层孔隙度应力损害率最小;泥质粉砂岩储层渗透率应力损害率最大,中砂岩储层渗透率应力损害率最小。

(3)从储气库库容和产能的损害因子来看,S储气库泥质粉砂岩储层对储气库库容和产能影响最大,粗砂岩储层对储气库库容和产能影响最小。

(4)应针对不同类型的储气库储层采用不同的生产压差,合理优化储气库的注采方案,探索储气库工况与应力敏感性最佳临界范围,实现储气库注采效率最大化。

参考文献:

[1] 阳小平,程林松,何学良,等.地下储气库多周期运行注采气

能力预测方法[J].天然气工业,2013,33(4):96-99.

YANG Xiaoping, CHENG Linsong, HE Xueliang, et al. A prediction method for multi-stage injection and recovery capacity of underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(4): 96-99.

[2] 李相臣,康毅力,罗平亚.煤层气储层变形机理及对渗流能力的影响研究[J].中国矿业,2009,18(3):99-102.

LI Xiangchen, KANG Yili, LUO Pingya. Rock deformation mechanisms and its influence on poecolation ability for CBM reservoirs[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(3): 99-102.

[3] 贾文瑞,李福岩,肖敬修.低渗透油田开发部署中几个问题的研究[J].石油勘探与开发,1995,22(4):47-51.

JIA Wenrui, LI Fukai, XIAO Jingxiu. A study on some issues of development disposition of a low permeability oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(4): 47-51.

[4] 卢家亭,李闯.低渗砂岩渗透率应力敏感性实验研究[J].天然气地球科学,2007,18(3):339-341.

LU Jiating, LI Min. Experimental research on permeability sensitivity of low-permeability sand rock [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 339-341.

[5] 伍向阳,陈祖安,孙德明,等.静水压力下砂岩孔隙度变化实验研究[J].地球物理学报,1995,38(S1):275-280.

WU Xiangyang, CHEN Zu'an, SUN Deming, et al. An experimental study of changes of porosity of sandstones with pressure [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S1): 275-280.

[6] 游利军,孟森,康毅力,等.气藏型储气库储层损害机理与保护技术对策[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):395-403.

YOU Lijun, MENG Sen, KANG Yili, et al. Formation damage mechanism and protection measures for gas field storage [J].

- Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):395-403.
- [7] 曹耐, 雷刚. 致密储集层加压—卸压过程应力敏感性[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1):132-138.
CAO Nai, LEI Gang. Stress sensitivity of tight reservoirs during pressure loading and unloading process[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1):132-138.
- [8] 张广权, 范照伟, 曾大乾, 等. 交变载荷下储气库储层与盖层损伤规律[J]. 断块油气田, 2021, 28(6):769-774.
ZHANG Guangquan, FAN Zhaowei, ZENG Daqian, et al. Damage law of reservoir and cap rock of gas storage under alternating load[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(6):769-774.
- [9] 李继强, 赵冠群, 戚志林, 等. 气藏型储气库多周期注采储集层应力敏感效应[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4):835-842.
LI Jiqiang, ZHAO Guanqun, QI Zhilin, et al. Stress sensitivity of formation during multi-cycle gas injection and production in an underground gas storage rebuilt from gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4):835-842.
- [10] 孔茜, 王环玲, 徐卫亚. 循环加卸载作用下砂岩孔隙度与渗透率演化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10):1893-1900.
KONG Qian, WANG Huanling, XU Weiya. Experimental study on permeability and porosity evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10):1893-1900.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 29172-2012, 岩心分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and
- Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 29172-2012, Practices for core analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [12] 国家能源局. SY/T 6385-2016, 覆压下岩石孔隙度和渗透率的测定方法[S]. 东营: 胜利石油管理局地质科学研究所, 1999.
National Energy Administration. SY/T 6385-2016, Porosity and permeability measurement under overburden pressure[S]. Dongying: Institute of Geological Sciences, Shengli Petroleum Administration, 1999.
- [13] 杨巍, 薛莲花, 唐俊, 等. 页岩孔隙度测量实验方法分析与评价[J]. 沉积学报, 2015, 33(6):1258-1264.
YANG Wei, XUE Lianhua, TANG Jun, et al. Analysis and evaluation of different measuring methods for shale porosity[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6):1258-1264.
- [14] 钟高润, 张小莉, 杜江民, 等. 致密砂岩储层应力敏感性实验研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3):1300-1306.
ZHONG Gaorun, ZHANG Xiaoli, DU Jiangmin, et al. Experiment of the stress sensitivity of tight sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3):1300-1306.
- [15] 孟召平, 侯泉林. 煤储层应力敏感性及其影响因素的试验分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3):430-437.
MENG Zhaoping, HOU Quanlin. Experimental research on stress sensitivity of coal reservoir and its influencing factors[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3):430-437.
- [16] 陈术源, 秦勇, 申建, 等. 高阶煤渗透率温度应力敏感性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9):1845-1851.
CHEN Shuyuan, QIN Yong, SHEN Jian, et al. Temperature-stress sensitivity of high-rank coal permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9):1845-1851.

(编辑 黄娟)

(上接第 279 页)

- [34] 何长坡, 邱争科, 罗官幸, 等. 准噶尔盆地西北缘五八区乌尔禾组沉积相分析[J]. 新疆石油天然气, 2014, 10(3):1-8.
HE Changpo, QIU Zhengke, LUO Guanxing, et al. The sedimentary facies research of Wu'erher Formation in Wuba area in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2014, 10(3):1-8.
- [35] 石巨业, 樊太亮, 于东方, 等. 南图尔盖盆地 1057 区块滑塌扇体地质特征分析[J]. 特种油气藏, 2016, 23(1):11-15.
SHI Juye, FAN Tai liang, YU Dongfang, et al. Geology analysis of slump fans in block 1057 of south Turgai Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(1):11-15.
- [36] 张坦, 齐育楷, 姚威, 等. 塔里木盆地库车坳陷南斜坡三叠系烃源岩热演化特征及油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6):1018-1027.
ZHANG Tan, QI Yukai, YAO Wei, et al. Thermal evolution characteristics of Triassic source rocks and their petroleum geological significance on the southern slope of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(6):1018-1027.
- [37] 黄克难, 詹家祯, 邹义声, 等. 新疆库车河地区三叠系和侏罗系沉积环境及古气候[J]. 古地理学报, 2003, 5(2):197-208.
HUANG Kenan, ZHAN Jiazhen, ZOU Yisheng, et al. Sedimentary environments and palaeoclimate of the Triassic and Jurassic in Kuqa River area, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(2):197-208.
- [38] 刘春, 陈世加, 赵继龙, 等. 库车前陆盆地南部斜坡带中—新生界油气运移输导体系与运聚模拟[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10):1450-1462.
LIU Chun, CHEN Shijia, ZHAO Jilong, et al. Hydrocarbon transportation system and accumulation simulation of Mesozoic-Cenozoic in south slope of Kuqa foreland basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10):1450-1462.
- [39] 朱光有, 杨海军, 张斌, 等. 油气超长运移距离[J]. 岩石学报, 2013, 29(9):3192-3212.
ZHU Guangyou, YANG Haijun, ZHANG Bin, et al. Ultra-long distance migration of hydrocarbon[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9):3192-3212.

(编辑 徐文明)