

气井多层合采渗流特征及接替生产物理模拟

谭玉涵¹,郭京哲²,郑 锋³,徐卫峰³

(1. 西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室,陕西 西安 710069; 2. 中国石油 长庆油田分公司 采油十一厂,陕西 西安 710069; 3. 中国石化 华北分公司 第一采气厂,河南 郑州 450042)

摘要:对于低孔、低渗气藏,为了提高单井产能和改善气田开发效益,许多生产井都采用了多层合采方式进行生产。为了更真实地认识低渗气藏多层合采的渗流特征以及确定最佳合采接替时机,通过设计室内物理模拟实验,模拟气藏多层合采开发过程,研究了地层压力、渗透率及主控因素共同作用下的气藏渗流特征对开发效果的影响以及合采接替生产时机,认为多层合采时,高压、高渗层产量贡献率始终高于低压、低渗层;而对于低压、高渗层,实验初始阶段低压、高渗层的产量贡献率高于高压、低渗层,实验后期从主产气层变为次产气层;在不同的接替时机下,随着接替点压力的降低,采出程度呈现出降低的趋势;低渗层接替生产要比高渗层接替生产效果要好。采用物理模拟实验研究多层合采气渗流特征尚属新的尝试,其研究成果对制定类似气藏的合理开发技术策略提供了参考依据。

关键词:合采接替生产;渗流特征;多层合采;致密低渗透气藏;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE37 **文献标识码:**A

Physical simulation on seepage features of commingled production and right time of production conversion for gas wells

Tan Yuhan¹, Guo Jingzhe², Zheng Feng³, Xu Weifeng³

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;
2. The No. 11 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710069, China;
3. The No. 1 Gas Production Plant, North China Branch, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450042, China)

Abstract: In order to increase single-well productivity and improve development economics of low porosity and low permeability gas reservoirs, many production wells adopt the way of commingled production. By laboratory physical experimental analysis, the development process of commingled production was simulated to study the influences of seepage features of gas reservoir under the combined action of formation pressure, permeability and the main controlling factors on the development effect, and also the timing of production conversion. The results suggest that when commingled production is adopted in gas reservoirs, the yield contribution rate of high pressure and high permeability layers is always higher than that of low pressure and low permeability layers; As for low pressure and high permeability layers, their yield contribution rate is higher than that of high pressure and low permeability layers in the initial phase of the experiment, and they turn from the primary gas pay zones to the secondary gas pay zones in the later phase; Along with the pressure at the conversion points going down, the degree of reserve recovery presents a decreasing trend among different times of production conversion; the effect of production conversion of low permeability layers is better than that of high permeability layers. This is still a new attempt to analyses the seepage features of commingled production through physical simulation experiment and the results provide a reference for making a reasonable development technology strategy for similar gas reservoirs.

Key words: commingled production conversion, seepage feature, commingled production, low-permeability tight gas reservoir, Daniudi gas field, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地大牛地气田属于典型的低孔、低渗气藏,其气井单层产能普遍偏低,为了获得经济产能,

很多气井都采用多层合采的方式进行生产。这种开发方式不仅能够提高单井产能,而且能改善整个气田的开发效益。多层合采在现场上已应用多年,虽在井下管柱及合采方式等方面进行了较深入的研究,但对多层合采渗流特征、产量预测以及合理配产等方面的研究相对较少,特别在低渗气藏方面更是如此。本文通过开展气井多层合采和接替生产室内物理模拟实验研究,初步掌握了多层合采井层间产出特征、渗流规律与合采接替生产最佳时机,可进一步指导多层合采井的有效开发,提高气田开发效益。

1 研究背景

大牛地气田位于陕西省榆林市与内蒙古自治区伊金霍洛旗交界地区,总面积 2 003 km²,构造上位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡北部东段,是一个大型致密低渗透砂岩岩性气藏^[1-2]。研究区 B1 井区位于大牛地气田的东区,面积约 200 km²,其地质储量为 614.01 × 10⁸ m³,共有合采井 204 口。该区目前开发有盒 3、盒 2、盒 1、山 2、山 1、太 2^[3]及太 1 等 7 套地层。主力产气层为盒 3 和太 2,次产层为盒 1、山 2 和太 1,储层物性整体较差^[4-13],单层单采经济效益较低,故采用多层合采的形式进行开发,以提高经济效益^[13-23]。

2 多层合采渗流特征室内实验

设计气藏物理实验,模拟气藏的多层合采开发过程,计算最终达到气藏报废压力时的采收率。总结归纳气藏多层合采在主要影响因素下的渗流特征及最佳合采接替时机,研究成果对类似气藏的开发将起到一定指导作用。

2.1 实验装置

该套实验装置由泵、并联岩心夹持器、气瓶、压力控制与监测系统、气液分离与计量系统组成(图 1)。

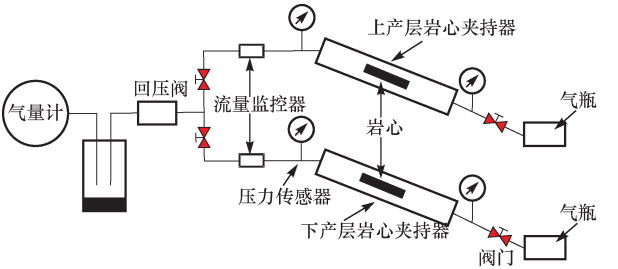


图 1 多层合采渗流实验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram showing equipment of multilayer commingled production seepage experiment

2.2 实验样品

进行实验之前,需根据实际地层参数选择适宜的实验模拟参数值,使得各参数接近研究区地层真实情况,以确保实验结果的准确性和适用性(表 1)。

本次实验选取大牛地气田 B1 井区和邻区的 4 口探井及评价井,分别取心,测试各样品的常规物性(表 2)。

2.3 实验步骤

① 装配并标记装有不同岩心的并联双岩心夹持器,打开气源阀,待岩心初始条件达到稳定状态后关闭气源阀。

② 以回压阀模拟井口采气装置,控制不同的开启时机,模拟气藏初期合采及不同时机产层合采接替的生产方式,记录实验数据,评价不同合采方式对气藏开发效果的影响。

③ 采气端压力达到气藏废弃压力后,将残余气体放出,分别统计各层模拟实验气藏的地质储量,计算各开采阶段的采收率,模拟开采实验结束。

3 多层合采模拟实验

在进行多层合采模拟实验之前,先进行单层开采实验。对实验数据进行统计和整理,发现渗透率和地

表 1 气藏参数实验模拟值统计

Table 1 Statistics of the experimental simulation value for parameters of gas reservoirs

层位	气层中段深度/m	平均地层压力/MPa	压力系数	地层压力范围/MPa	地层温度/℃	含水饱和度范围/%
盒 3	2 559	25	0.99	23 ~ 27	83	20 ~ 30
盒 2	2 600	25	0.96	23 ~ 27	83	20 ~ 30
盒 1	2 645	24	0.91	23 ~ 27	83	20 ~ 30
山 2	2 693	25	0.94	23 ~ 27	85	20 ~ 30
山 1	2 743	23	0.85	23 ~ 27	86	20 ~ 30
太 1	2 780	27	0.99	23 ~ 27	87	20 ~ 30

表 2 实验样品常规物性参数统计

Table 2 Statistics of conventional physical parameters of samples

样品编号	井号	层位	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙体积/ cm^3	岩石密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1-1	B2	山 2	3.274	2.482	9.3	1.496	1.442	2.45
1-2	B2	山 2	3.297	2.487	10.6	1.158	1.657	2.40
3-2	B2	太 1	3.338	2.508	5.0	1.593	0.818	2.97
4-3	B3	盒 2	3.354	2.481	12.8	0.401	2.032	2.35
6-1	B4	盒 1	3.318	2.489	7.7	0.157	1.228	2.49
7-1	B4	山 2	3.291	2.495	4.8	0.700	0.759	2.54
10-1	B5	盒 3	3.302	2.482	6.6	0.269	1.024	2.50
11-2	B5	盒 1	3.382	2.493	9.3	0.319	1.506	2.44
13-3	B2	山 2	3.285	2.485	9.9	1.501	1.447	2.46

层压力是影响开发效果的主要因素,其次为采气速度、岩石围压和含水饱和度。故在进行多层合采实验模拟时设置两个变量,即地层压力和渗透率。

3.1 地层压力对开发效果的影响

第一组实验样品为 1-1 号和 13-3 号,压力分别为 27.34 MPa 和 24.13 MPa,模拟地层原始压力比值为 1.1;第二组实验压力为 27.34 MPa 和 21.69 MPa,模拟地层原始压力比值为 1.3,模拟产层孔隙度、渗透率相似、压力不同的开采效果。

在第一组模拟开采实验过程中,可观察到两产层气体流速达到峰值之后均以指数趋势递减(图 2a);上产层(高压层)气体平均流量略高于下产层(低压层),累计产量也略高于下产层。可见上产层压力较高,开发效果优于下产层(表 3)。

模拟地层压力比值为 1.3 时,与压力比值为 1.1

时的开发效果相比,高压层的优势更为明显(图 2b),可见对于物性相似的合采层位,层间原始地层压力差异越大,开发效果差异就越明显(表 3)。

第一组整个实验过程中,高压层产量贡献率始终高于低压层(图 3a);第二组实验与前一组实验相比,高压层的产量贡献率较低压层更高(图 3b)。从两组实验各层产量贡献率可以看出,层间原始地层压力差异越大,产量贡献率差异就越明显。实验开始阶段,高、低压产层产量贡献率差异最大,随实验的进行,各层产量贡献率逐渐接近。

3.2 渗透率对开发效果的影响

第一组实验样品为 1-2 和 11-2 号,保证原始压力一致,渗透率比值为 3.6,分别放入上、下岩心夹持器,模拟上、下产层;第二组实验样品为 1-2 和 6-1 号,保证原始压力一致,渗透率比值为 7.4,分

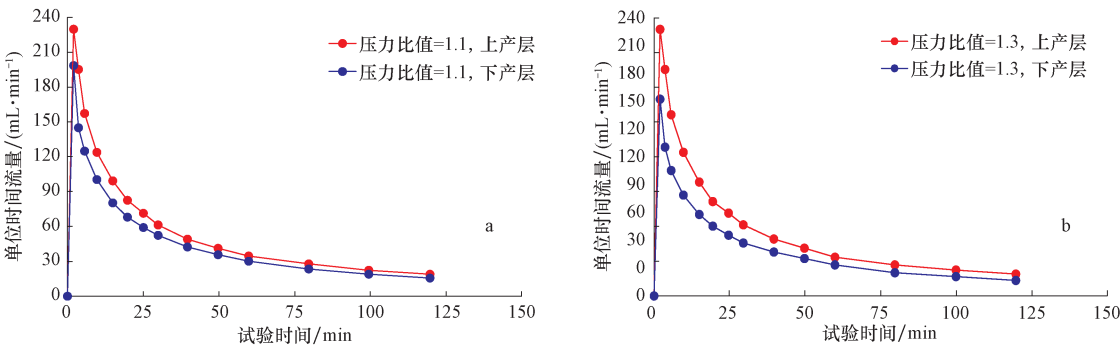


图 2 压力比值为 1.1 和 1.3 时气体流速随试验时间变化趋势

Fig. 2 Change trend of gas flow velocity with the testing time when the pressure ratio are 1.1 and 1.3

表 3 模拟地层压力比值为 1.1 时和 1.3 各层开发效果统计

Table 3 Statistics of development effects for each layer when the simulative formation pressure ratio are 1.1 and 1.3

压力比值	生产层位	平均流量/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	累积产量/mL	采出程度/%
1.1	上产层(高压层)	82.43	1 648.6	73.68
	下产层(低压层)	65.49	1 357.4	69.64
1.3	上产层(高压层)	82.43	1 648.6	73.68
	下产层(低压层)	59.25	1 185.0	66.76

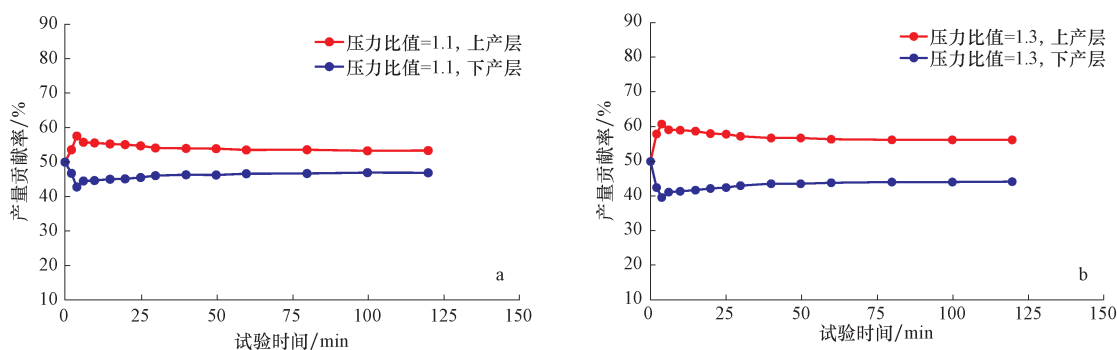


图3 压力比值为1.1和1.3时各产层产量贡献率变化趋势

Fig. 3 Change trend of the yield contribution rate of each production layer when the pressure ratio are 1.1 and 1.3

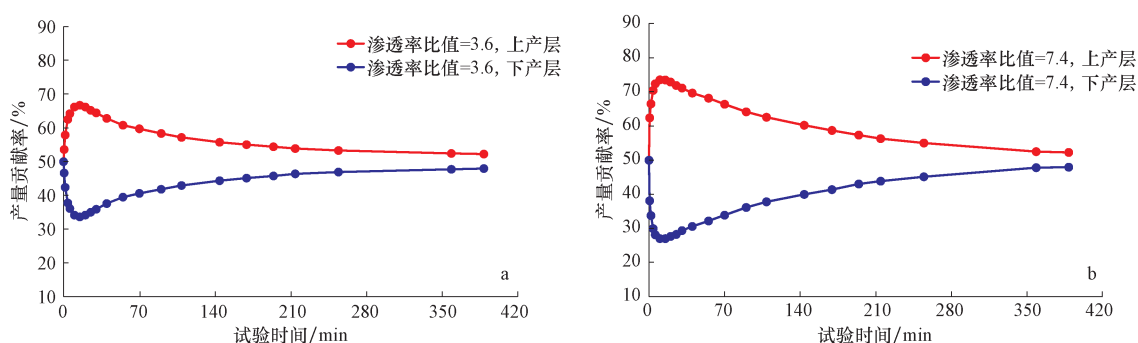


图4 渗透率比值为3.6和7.4时各产层产量贡献率变化趋势

Fig. 4 Change trend of the yield contribution rate of each production layer when the permeability ratio is 3.6 and 7.4

别放入上、下岩心夹持器。

当模拟层间渗透率比值为3.6时,实验初期气体流速迅速达到峰值,之后以指数趋势递减,上产层(高渗层)渗透率较高,平均流量、累计产量和最终采收率均高于下产层(低渗层),开发效果优于下产层。

当渗透率比值为7.4时,实验初期气体流速迅速达到峰值,之后以指数趋势递减,上产层(高渗层)渗透率较高,平均流量、累计产量和最终采收率均高于下产层(低渗层)。与渗透率比值为3.6时的开发效果相比,高渗层的优势更为明显,可见对于原始地层压力相当的合采层位,层间渗透率比值越大,开发效果差异就越明显。

第一组整个实验过程中,高渗层产量贡献率始终高于低渗层(图4a);第二组实验与前一组实验相比,高渗层的产量贡献率较低渗层更高(图4b)。从两组实验各层产量贡献率可以看出,层间渗透率比值越大,产量贡献率差异就越明显。实验开始阶段,高、低渗产层产量贡献率差异最大,且比值越大,差异越大。随实验的进行,各层产量贡献率逐渐接近。其原因在于相近生产压差下,高渗层会抑制低渗层产气。但随着生产的进行,高渗层压力降低、可采储量减少,而低渗层

地层压力下降幅度较小,且仍有较多储量未被动用,因而通过压力及剩余储量的差异来弥补渗透率的差异。

3.3 主控因素共同作用对开发效果的影响

选定样品1-1号和4-3号,渗透率比值为3.7,第一组实验压力为27.34 MPa和25.34 MPa,模拟地层原始压力比值为1.1,分别放入上、下岩心夹持器;第二组实验压力为21.69 MPa和25.34 MPa,模拟地层原始压力比值为0.9,分别放入上、下岩心夹持器。

当渗透率比值为3.7、压力比值为1.1时,上产层(高压高渗层)气体平均流量、累计产量、采出程度均比下产层(低压低渗层)高。可见上产层物性较好、压力较高,开发效果优于下产层(表4)。

当渗透率比值为3.7、压力比值为0.9时,实验初期气体流速达到峰值,之后以指数趋势递减。由于原始地层压力的减小,上产层(低压高渗层)的开发效果较前一组实验差,但因物性较好,平均流量仍高于下产层(高压低渗层),最终采收率较高(表4)。可见对于多层合采层位,日产量的主控因素为物性,最终采收率的主控因素为压力。

表 4 各层开发效果统计
Table 4 Statistics of development effects for each layer

渗透率比值	压力比值	生产层位	平均流量/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	累积产量/ mL	采出程度/%
3.7	1.1	上产层(高压高渗层)	82.43	1 648.6	73.68
		下产层(低压低渗层)	30.22	1 480.7	69.35
3.7	0.9	上产层(低压高渗层)	59.25	1 185.0	66.76
		下产层(高压低渗层)	30.22	1 480.7	69.35

第一组整个实验过程中,高压高渗层产量贡献率始终高于低压低渗层(图 5a);第二组实验初始阶段,低压高渗层的产量贡献率高于高压低渗层,实验后期,低压高渗层的产量贡献率不断下降,从主产气层变为次产气层,而高压低渗层的产量贡献率不断上升,从次产气层变为主产气层(图 5b)。

4 合采接替生产模拟实验

4.1 低渗层接替高渗层

首先生产渗透率较高的 3-2 号样品,当模拟地层压力下降至 18.0 MPa 和 13.5 MPa 时,以接替生产的方式合采渗透率较低 7-1 号样品,记录实验结果并与初期合层开采实验结果进行对比。达到地层废弃压力时,合层开采对应的试验时间为 23 min,接替生产对应

的实验时间分别为 25 min 和 28 min。
从开发效果的角度来看,合层开采采出程度和气体单位时间流量,均高于接替生产(图 6a;表 5),且在不同的接替时机下,随着接替点压力的降低,气体流量与采出程度均呈现出降低的趋势。因此,针对 B1 井区各气层埋深接近,原始地层压力相近的特点,应尽快将主力层合层开采,以获得最佳的开发效果,并保证供气稳定。

4.2 高渗层接替低渗层

首先生产渗透率较低的 7-1 号样品,当模拟地层压力下降至 18.0 MPa 和 13.5 MPa 时,以接替生产的方式合采渗透率较高的 3-2 号样品,记录实验结果并与初期合层开采实验结果进行对比。达到地层废弃压力时,合层开采对应的试验时间为 23 min,接替生产对应的实验时间分别为 27 min 和 31 min。

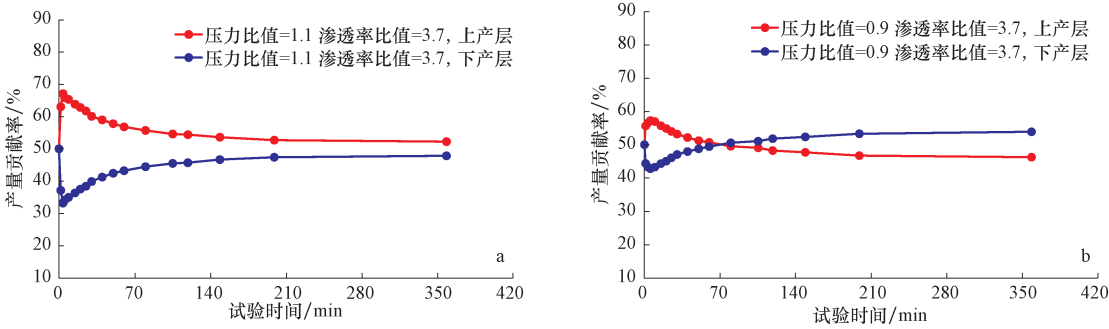


图 5 各产层产量贡献率变化趋势
Fig. 5 Change trend of the yield contribution rate of each production layer

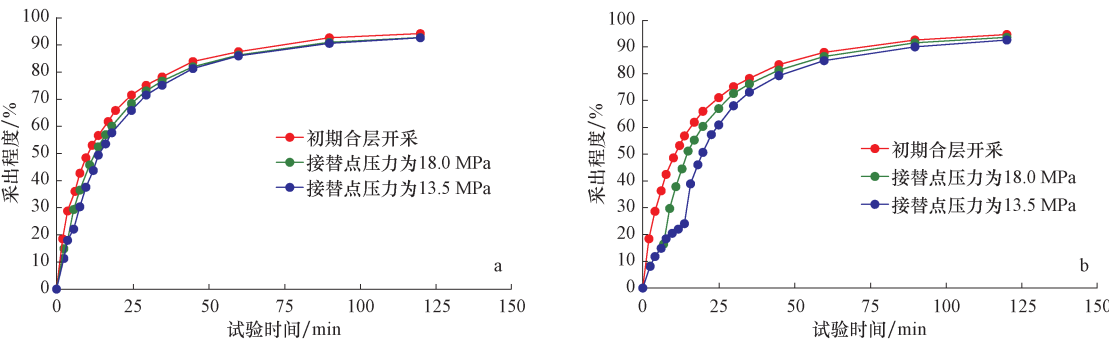


图 6 试验时间与采出程度关系
Fig. 6 Relation between testing time and reserve recovery degree
a. 低渗层接替高渗层; b. 高渗层接替低渗层

表 5 低渗层接替高渗层时不同接替时机
对开发效果的影响程度统计

Table 5 Statistics of the influences of production conversion
time on development effect when low permeability layers
replacing high permeability layers

接替时机	平均流量/(mL·min ⁻¹)	累积产量/mL	采出程度/%
合采	131.04	3 077.3	69.62
18.0 MPa	120.77	3 045.1	68.89
13.5 MPa	110.17	3 039.6	68.77

表 6 高渗层接替低渗层时不同接替时机
对开发效果的影响程度统计

Table 6 Statistics of the influences of production conversion
time on development effect when high permeability layers
replacing low permeability layers

接替时机	平均流量/(mL·min ⁻¹)	累积产量/mL	采出程度/%
合采	131.04	3 077.3	69.62
18.0 MPa	114.12	3 043.4	68.85
13.5 MPa	99.64	3 038.1	68.74

与低渗层接替生产实验相比,高渗层接替生产采出程度和气体单位时间流量,较合层开采更低(图 6b;表 6)。而在实际生产中,当存在层间压力差较大时,会发生气体的倒灌现象,高压气层中的气会因压差流入低压气层中。当高压气层物性越好时,高压层向低压层倒灌气量越大,层间干扰越严重。故低渗层接替高渗层和高渗层接替低渗层相比,低渗层接替生产要比高渗层接替生产效果要好,而且还可以较好地回避层间干扰问题的存在。

5 结论

1) 对于原始地层压力相当的合采层位,渗透率大的储层,产量贡献大,层间渗透率比值越大,开发效果差异就越明显。

2) 在储层物性相同的条件下,原始地层压力大的储层,产量贡献大,层间原始地层压力差异越大,产量贡献率差异就越明显。在实际生产中,当合采气层初始压差过大时,会造成低压层产气不利。

3) 对于多层合采井,储层物性较好的产层,平均产量贡献率相对较大,累计产气量相对较高。部分物性相对较差的产层,生产中后期多数呈产量贡献率上升的趋势,可为生产中后期提供稳产的保障,为后期调整指明了方向。

4) 在不同的接替时机下,随着接替点压力的降低,采出程度也随之降低。使合采效果最好,接替生产时机越早越好。所以在决定进行多层合采时,最好在气藏开发初期就进行。

5) 低渗层接替高渗层和高渗层接替低渗层相比,

低渗层接替生产要比高渗层接替生产效果要好,而且还可以较好地回避层间干扰问题的存在。所以当补开的潜力层位的物性差于正在生产的层位时,可以直接打开潜力层进行合采。

参 考 文 献

[1] 罗东明,陈舒薇,张广权. 大牛地气田上古生界沉积相与天然气富集规律的再认识[J]. 石油与天然气地质,2011,32(3):368-374.
Luo Dongming, Chen Shuwei, Zhang Guangquan. New understandings of the Upper Paleozoic sedimentary facies and gas accumulation rules in Daniudi gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3):368-374.

[2] 杨智,何生,邹才能,等. 鄂尔多斯盆地北部大牛地气田成岩成藏耦合关系[J]. 石油学报,2010,31(3):373-378,385.
Yang Zhi, He Sheng, Zou Caineng, et al. Coupling relationship between reservoir diagenesis and natural gas accumulation of Daniudi gas field in North Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3):373-378.

[3] 杨辰雨,田景春,张翔,等. 基于砂体构型精细刻画潮坪砂坝优质砂体——以大牛地气田 D17 井区太原组 2 段为例[J]. 石油与天然气地质,2015,36(2):248-254.
Yang Chenyu, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Configuration-based fine description of high-quality sand bodies in tidal-flat bar; Taking the tight sandstone reservoir in the 2nd Member of the Taiyuan Formation in D-17 wellblock in Daniudi gasfield as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2):248-254.

[4] 田景春,刘伟伟,王峰,等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):183-189.
Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. Heterogeneity of the Paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao Area of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):183-189.

[5] 尹昕,应文敏. 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界低孔低渗砂岩储层评价[J]. 矿物岩石,2005,25(2):104-109.
Yin Xin, Yin Wenmin. Reservoir evaluation for the low porosity and permeability sandstone of upper paleozoic in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(2):104-109.

[6] 罗月明,刘伟新,谭学群,等. 鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用评价[J]. 石油实验地质,2007,29(4):384-390.
Luo Yue ming, Liu Weixin, Tan Xuequn, et al. Diagenesis and reservoir evaluation on the upper palaeozoic reservoir sandstones in Daniudi gas field, the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(4):384-390.

[7] 郭建民,刘忠群,谢婷. 大牛地气田盒 3 段致密储层评价与预测[J]. 天然气工业,2007,27(12):55-57.
Guo Jianmin, Liu Zhongqun, Xie Ting. Evaluation and prediction for compacted reservoirs in He-3 member of Daniudi gas field[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12):55-57.

[8] 许杰,何治亮,董宁,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田盒 3 段河道砂岩相控储层预测[J]. 石油与天然气地质,2009,30(6):692-696.
Xu Jie, He Zhiliang, Dong Ning, et al. Facies - constrained reservoir

- prediction of P_1h^3 channel sandstone in Daniudi gas field, the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(6): 692–696.
- [9] 侯瑞云. 大牛地气田盒一段低孔渗砂岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 467–478.
- Hou Ruiyun. Reservoir characteristics of low porosity and permeability sandstone of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 467–478.
- [10] 吴娟娟, 李仲东, 陈威, 等. 大牛地气田太2段致密砂岩气层识别研究[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(1): 102–106.
- Wu Juanjuan, Li Zhongdong, Chen Wei, et al. Recognition of compacted sandstone gas reservoirs of Tai 2 member in Daniudi gas field[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(1): 102–106.
- [11] 张广权, 陈舒薇, 郭书元. 鄂尔多斯地区东北部大牛地气田山西组沉积相[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 388–396.
- Zhang Guangqua, Chen Shuwei, Guo Shuyuan. Sedimentary facies of the Shanxi Formation in Daniudi gas field, northeastern Ordos area[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 388–396.
- [12] 刘双莲, 李浩, 周小鹰. 大牛地气田大12—大66井区沉积微相与储层产能关系[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 45–49.
- Liu Shuanglian, Li Hao, Zhou Xiaoying. Relationship between sedimentary microfacies and reservoir productivity in Da12–Da66 well-block, Daniudi gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 45–49.
- [13] 郝蜀民, 惠宽洋, 李良. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 762–768.
- Hao Shumin, Hui Kuanyang, Li Liang. Reservoir characteristics of large gas field with low permeability and exploration and development technology of Daniudi gasfield in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 762–768.
- [14] 刘莉莉, 徐文, 石石, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏有效储层建模方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 47–51.
- Liu Lili, Xu Wen, Shi Shi, et al. A new effective reservoir modeling method for tight sandstone gas reservoir in Sulige gasfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 47–51.
- [15] 杜玉山, 杨勇, 郭迎春, 等. 低渗透油藏地层压力保持水平对油水渗流特征的影响[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 72–76.
- Du Yushan, Yang Yong, Guo Yingchun, et al. Impact of formation pressure maintenance on oil-water seepage characteristics in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 72–76.
- [16] 侯瑞云, 刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 118–128.
- Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 118–128.
- [17] 税蕾蕾, 彭平安, 黄合庭, 等. 合采井分层产量贡献地球化学实验监测技术[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 314–320.
- Shui Leilei, Peng Ping'an, Huang Heting, et al. Geochemical monitoring technology of single layer production in commingled producing wells[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 314–320.
- [18] 王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 超低渗透油藏分段多簇压裂水平井产能影响因素与渗流规律——以鄂尔多斯盆地长8超低渗透油藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 107–110.
- Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. A study on productivity and flow regimes of segmented multi-cluster fractured horizontal well in ultra-low permeability reservoir—a case of Chang8 ultra-low permeability reservoir in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 107–110.
- [19] 杨学锋, 刘义成, 李进, 等. 两层组气藏分采、合采效果和开采方式优选[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 57–60, 122–123.
- Yang Xuefeng, Liu Yicheng, Li Jin, et al. Effect of separate layer recovery or multilayer commingled production and the optimal selection of development methods for two-layer gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 57–60, 122–123.
- [20] 郑浩, 苏彦春, 张迎春, 等. 裂缝性油藏渗流特征及驱替机理数值模拟研究[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 79–83.
- Zheng Hao, Su Yanchun, Zhang Yingchun, et al. The numerical simulation study on percolation characteristics and displacement mechanism of fractured reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 79–83.
- [21] 马洪, 李建忠, 杨涛, 等. 中国陆相湖盆致密油成藏主控因素综述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 668–677.
- Ma Hong, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Main controlling factors for tight oil accumulation in continental lacustrine basins in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 668–677.
- [22] 李易隆, 贾爱林, 吴朝东. 松辽盆地长岭断陷致密砂岩成岩作用及其对储层发育的控制[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 698–705.
- Li Yilong, Jia Ailin, Wu Chaodong. Diagenesis of tight sandstones and its controls on reservoirs genesis, Changling Faulted Depression, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 698–705.
- [23] 熊燕莉, 冯曦, 杨雅和, 等. 多层合采气井动态特征及开发效果分析[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(1): 21–24.
- Xiong Yanli, Feng Xi, Yang Yahe, et al. Analysis on performance features and exploitation results of gas wells with multiple-zone production[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2005, 28(1): 21–24.

(编辑 张玉银)