

文章编号:0253-9985(2012)01-0118-11

鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗 储层评价与开发对策

侯瑞云,刘忠群

(中国石化 华北分公司,河南 郑州 450006)

摘要:鄂尔多斯盆地大牛地气田为典型致密低渗气田,具有低渗、低压、低产的特点,经济有效开发难度大。针对气田不同层段储层开展了储集岩相、岩石学、物性、孔隙结构、含气性等特征研究,在此基础上划分出四大类六小类储层,其中Ⅰ类为高产型储层,Ⅱ类为中产型储层,Ⅲ类为低产型储层,Ⅳ类为非储层。根据不同储层类型及其空间分布的特点,采取了不同的开发策略,Ⅰ类储层物性好、厚度大、单层产量高,采用直井单层开采;Ⅱ类储层物性中等、厚度小、单层产量较低,选择发育两层以上叠合区,采用直井多层合采;对以单层发育的Ⅱ类和Ⅲ类储层,采用水平井分段压裂进行开采。通过不同的开发对策,有效提高了单井产量,实现致密低渗气田的经济开发,目前气田已建成天然气年产能 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

关键词:致密低渗储层;储层评价;开发对策;上古生界;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE112.3 文献标识码:A

Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin

Hou Ruiyun and Liu Zhongqun

(SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450007, China)

Abstract: Daniudi gas field in Ordos Basin is typical tight sand gas reservoirs with low permeability, low pressure and low production rate. It has been a challenge to develop this kind of gas field economically. This paper covers lithofacies, lithology, petrophysical property, pore structure and gas bearing potential of different formations. On this basis, four types of reservoirs have been identified. In terms of production rate, Type I is the highest, followed by Type II and then Type III, while Type IV has no productivity. According to the types and distribution of reservoirs, different development strategies have been adopted. Single layer production through vertical well fits Type I, whose porosity and permeability are better, net pay is thicker and production rate is higher. Commingled system through vertical well for overlapped layers suits Type II, whose porosity and permeability are moderate, net pay is thinner and production rate of single layer is lower. Staged fracturing through horizontal well matches both Type II and Type III with only one widely distributing layer. Applying different development strategies to different types of reservoirs, we have succeeded in improving the individual-well production rate and achieving economical development of this gas field. Annual production capacity of $25 \times 10^8 \text{ m}^3$ has been built up there.

Key words: tight sand reservoir with low permeability, reservoir evaluation, development strategy, Upper Palaeozoic, Daniudi gas field, Ordos Basin

大牛地气田为大型致密低渗岩性气田,具有低渗、低压、低产的特点^[1],储层平均渗透率 $0.54 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$,气藏压力系数为 $0.8 \sim 1.0$,平均单井产量为 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为经济开发边际气田,有效

收稿日期:2011-10-19;修订日期:2012-01-15。

第一作者简介:侯瑞云(1964—),女,高级工程师,石油地质。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05045)。

开发难度大。为有效开发气田,开展了精细的储层综合评价,在总体致密低渗的储层背景下,划分出了不同类型的储层,建立识别标准。并针对不同类型储层,采用不同的工艺和开发对策,有效地提高了单井产量,从而实现了大牛地致密低渗气田的有效开发。

1 勘探开发现状

大牛地气田位于内蒙古自治区伊克昭盟伊金霍洛旗、乌审旗和陕西省榆林市交界处(图1),构造上位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部中段。目前探明储量为 $4\,093\times10^8\text{ m}^3$ 。2005年投入开发,至2010年底建成天然气年产能 $25\times10^8\text{ m}^3$,目前向内蒙古自治区、河南、山东等地供气,取得良好的经济效益,是低渗气田成功有效开发的典型范例^[2]。

2 地层

气田主要目的层为二叠系下石盒子组、山西组和石炭系太原组。太原组岩性主要为深灰色、黑色泥岩、炭质泥岩、煤层与灰白色中-粗砂岩互层,局部夹灰岩透镜体,分为太一、太二段;山西组岩性主要为灰色中-粗粒砂岩、砂砾岩、砾岩与黑

色、深灰色泥岩、黑色炭质泥岩互层,下部含煤层、煤线,分为山一段和山二段;下石盒子组岩性主要为浅灰、灰白色砂砾岩、含砾粗砂岩、中粗砂岩与灰色、棕褐色泥岩互层,分为盒一、盒二、盒三段。

3 致密储层评价

3.1 有利储集岩相

3.1.1 岩石相

根据气田92井的取心资料,结合录井、岩心化验分析、测井和产能资料,对太原组一下石盒子组共划分出16种岩石相类型:块状砾岩相、块状砂砾岩相、含砾粗砂岩相、交错层理粗-含砾粗砂岩相、灰白色交错层理石英砂岩相、平行层理砂岩相、板状交错层理砂岩相、小型交错层理中-细砂岩相、沙纹层理细砂岩相、水平层理粉砂岩相、深灰-灰黑色泥岩相、褐红-棕红色泥岩相、灰岩相、灰白色厚层状石英砂岩相、灰色薄层状石英砂岩相和煤岩相。其中,有利的岩石相类型有6种:块状砂砾岩相、含砾粗砂岩相、交错层理粗-含砾粗砂岩相、平行层理砂岩相、浅灰色交错层理石英砂岩相和灰白色厚层状石英砂岩相(表1)。

3.1.2 测井相

在岩心资料精细刻度测井的基础上,对太原组一下石盒子组划分出4种基础测井相和4种组合测井相^[3]。基础测井相有箱形、钟形、指形和漏斗形,组合测井相有箱形和指形组合、箱形和钟形组合、箱形和漏斗形组合及钟形和漏斗形组合。其中有利测井相类型为箱形及其组合类型,主要为心滩、分流河道和障壁砂坝沉积,岩石相主要类型为块状砂砾岩相、含砾粗砂岩相、浅灰色交错层理石英砂岩相和灰白色厚层状石英砂岩相;较有利测井相类型为钟形及其组合类型,主要为分流河道和障壁砂坝沉积,岩石相主要类型为含砾粗砂岩相、交错层理粗-含砾粗砂岩相、平行层理砂岩相(表2)。

3.1.3 储层微相

太原期、山西期和下石盒子期是一套海相、海陆过渡相和陆相的连续沉积,其中太原组为滨海

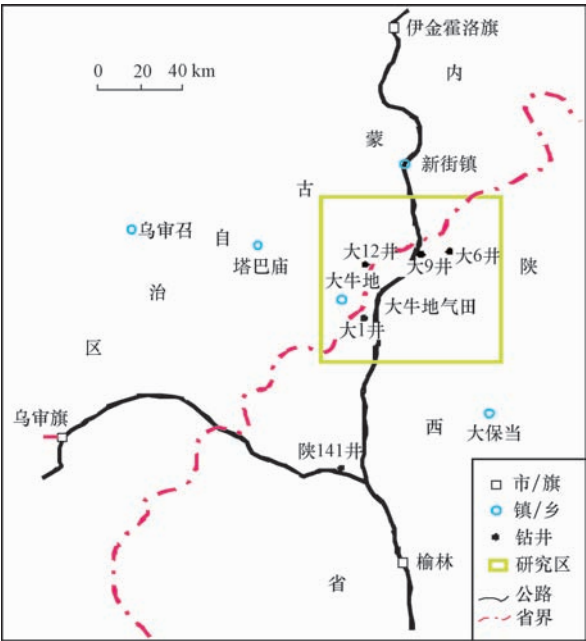


图1 鄂尔多斯盆地大牛地气田地理位置

Fig.1 Location of Daniudi gasfield in Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地大牛地气田太原组一下石盒子组有利岩石相划分

Table 1 Favorable lithofacies identified in the Taiyuan-Xiashihezi Formations in Daniudi gas field, Ordos Basin					
岩相名称	描述	成因解释	平均孔隙度, %	平均渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	分布层位
块状砂砾岩相	厚层块状产出,砾石呈漂浮状分布其间	心滩下部	12	1.10	下石盒子组
含砾粗砂岩相	砾石排列具有方向性,向上砾石含量逐渐减少	心滩下部、分流河道下部	10	0.90	下石盒子组、山西组
交错层理粗-含砾粗砂岩相	多为槽状交错层理,也可是板状交错层理	心滩中下部、分流河道下部	9	0.85	下石盒子组、山西组
平行层理砂岩相	平行层理发育,但是在平行层理不清时,呈块状	心滩中上部、分流河道上部	7	0.50	下石盒子组、山西组
浅灰色交错层理石英砂岩相	多为槽状交错层理,呈块状	分流河道中下部	10	1.00	山西组
灰白色厚层状石英砂岩相	由分选、磨圆好的粗-含砾粗石英砂岩组成	障壁砂坝	9	0.70	太原组

相沉积,主要发育障壁岛砂坝亚相、潮坪亚相和沼泽亚相,主要储集岩为障壁砂坝;山西组为三角洲平原亚相沉积,主要发育分流河道、分流间湾和沼泽微相,主要储集岩为分流河道砂;下石盒子组为辫状河流相沉积,主要发育辫状河道和泛滥平原亚相,微相类型有心滩、决口扇、天然堤、河漫滩,主要储集岩为心滩砂。通过分析,有利储层微相为障壁砂坝、分流河道和心滩。

3.1.4 储集岩相

不同岩石相的组合,构成了不同微相类型,同一种微相也可以由不同的岩石相构成。由于不同的岩石相具有不同的物性,从而造成同一种微相类型,其物性或产能有很大的差别^[4-5]。比如大牛地气田盒3段发育不同时期的两条辫状河道,其中一条河道沉积时水体能量强,心滩沉积的砂岩碎屑颗粒粗,泥质含量低,以砂砾岩相和含砾粗砂岩相为主,物性好,产能高。而另一条辫状河道沉积时水体能量弱,以平行层理砂岩相为主,心滩沉积的砂岩碎屑颗粒较细,泥质含量较高,物性较差,产能低。可见,同是心滩微相,但在物性和产能上有很大的差别。

在综合分析太原组一下石盒子组岩石相、测井相和微相的基础上,结合物性、岩性及产能,共划分出6类有利储集岩相,分别为A类心滩中高产型、B类分流河道中高产型、C类障壁砂坝中低产型、D类分流河道中低产型、E类分流河道低产型和F类心

滩低产型。其中最有利储集岩相为A和B两类,目前气田的高产气井均出自这两种类型。在建成的 $25 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 产能中,有 $18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的产能是在A和B两类储集岩相中建成。可见,划分储集岩相类型对开发具有重要的指导意义(表3)。

3.2 岩石学特征

储层岩石类型可分为两大类。一类为石英砂岩,分布在太1、太2段和山1段,其中山1段的石英砂岩主要分布在下部,只在气田局部地区发育。平均石英含量为93.0%~96.4%,平均岩屑含量为3.6%~6.0%,泥质杂基含量很少,一般小于2%,砂岩纯净,自生矿物主要有石英、高岭石、伊利石、方解石;另一类为岩屑石英砂岩和岩屑砂岩,平均石英含量为73.1%~74.8%,平均岩屑含量为16.6%~25.4%,泥质杂基为2.4%~6.2%,填隙物主要有高岭石、绿泥石、伊利石、方解石、石英(表4)。

总体看,石英砂岩和岩屑石英砂岩含气性较好,岩屑砂岩含气性较差^[6]。在石英砂岩和岩屑石英砂岩中均有高产气层,其中石英砂岩高产气层分布在山1段下部,岩屑石英高产气层主要分布在盒3、盒2段。

3.3 物性特征

3.3.1 岩屑石英砂岩

对2978个岩屑石英砂岩和岩屑砂岩的孔渗分析样品结果进行统计,孔隙度值分布在0.3%~

表 2 鄂尔多斯盆地大牛地气田太原组一下石盒子组测井相分类

Table 2 Logging facies identified in the Taiyuan-Xiashihezi Formations in Daniudi gas field, Ordos Basin

曲线类型			深度/m	GR/API	旋回	岩性特征	沉积相特征	沉积环境解释
基础测井相	箱形	锯齿状	2 622 2 624 2 626 2 628 2 630 2 632	40 80 120 160 200 大4井			顶部均为突变接触,通常由多个向上逐渐变细的正粒序组成,反映了水动力条件频繁交替的沉积特征	分流河道、心滩、障壁砂坝
		光滑	2 668 2 670 2 672 2 674 2 676 2 678	0 40 80 120 160 200 大开17井			砂体顶部、底部与泥岩是突变接触,反映了稳定的水动力条件和充足的物源供应	分流河道、心滩、障壁砂坝
	钟形		2 656 2 660 2 664 2 668 2 672	0 20 40 60 80 100 大开8井			底部为突变接触,顶部渐变接触,具正粒序结构,反映了水动力逐渐减弱的沉积特征	分流河道、障壁砂坝
	指形		2 730.8 2 731.2 2 731.6 2 732.0 2 732.4 2 732.8 2 733.2	80 100 120 140 160 180 大30井			砂岩与上下泥岩均呈突变接触,厚度薄	河漫滩、天然堤
	漏斗形		2 642 2 644 2 646 2 648 2 650	40 80 120 160 大开17井			顶部突变接触,底部渐变趋势,上部的幅度高,下部低幅度,有时候出现锯齿状	决口扇、障壁砂坝
	箱形和指形组合		2 728 2 732 2 736 2 740 2 744 2 748	40 80 120 160 200 大30井			上部为指形,下部为箱形,反映水动力条件逐渐减弱,物源供给逐渐减少;反之亦然	分流河道、心滩、障壁砂坝
组合测井相	箱形和钟形组合		2 680 2 684 2 688 2 692 2 696	80 120 160 200 240 大开5井			上部为钟形,下部为箱形也有齿化现象,反映水动力条件逐渐减弱,有齿化的时候表明水体的变化频率	分流河道、心滩、障壁砂坝
	箱形和漏斗形组合		2 634 2 636 2 638 2 640 2 642 2 644	20 40 60 80 100 120 140 大开15井			上部为箱形,下部为漏斗形,锯齿现象中等,表明水体能量向上增强	河道、决口扇、障壁砂坝
	钟形和漏斗形组合		2 676 2 680 2 684 2 688 2 692	40 80 120 160 200 240 大4井			上部为钟形,下部为漏斗型,表明水体向上逐渐增强后又逐步减弱	决口扇、天然堤

表 3 鄂尔多斯盆地大牛地气田太原组一下石盒子组有利储集岩相划分

Table 3 Favorable reservoir facies identified in the Taiyuan-Xiashihezi Formations in Daniudi gasfield, Ordos Basin

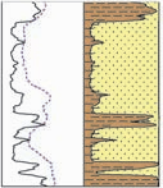
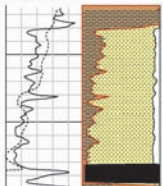
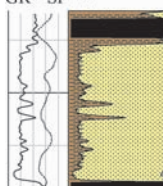
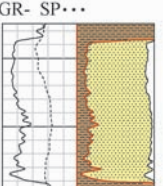
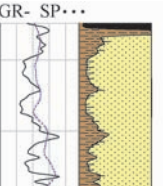
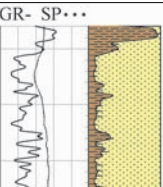
储集岩相	微相	岩石相	测井相	孔隙度, %	渗水率/ (10 ⁻³ μm ²)	岩石 类型	泥质 含量, %	直井产能		层位	典型井
								平均无阻 流量/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	平均产量/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)		
A 类中 高产	心滩	块状砂 砾岩相、 含砾粗 砂岩相	箱形	11	0.95	岩屑、 石英、 砂岩	<5	8	1.0	盒 3 盒 2	GR- SP...  DK13 井, 盒3段, 无阻流量59×10 ⁴ m ³ /d
B 类中 高产	分流 河道	浅灰色 交错层 理石英 砂岩相	箱形、 钟形	10	1.00	石英、 砂岩	<3	10	1.1	山 1 (下部)	GR- SP...  D4-71 井, 山1段, 无阻流量22×10 ⁴ m ³ /d
C 类中 低产	障壁 砂坝	灰白色 厚层状 石英砂 岩相	箱形、 钟形	9	0.70	石英、 砂岩	<3	4	0.5	太 2 太 1	GR- SP...  D35 井, 太2段, 无阻流量6×10 ⁴ m ³ /d
D 类中 低产	分流 河道	含砾粗 砂岩相	箱形、 钟形、 漏斗形	9.5	0.70	岩屑、 石英、 砂岩	<6	4	0.5	山 1 山 2	GR- SP...  D3-27 井, 山2段, 无阻流量4.6×10 ⁴ m ³ /d
E 类低产	分流 河道	交错层 理粗-含 砾粗砂 岩相、平 行层理 砂岩相	箱形、 钟形、 漏斗形	7	0.50	岩屑、 石英、 砂岩	<8	2	0.3	山 1 山 2	GR- SP...  D1 井, 山1段, 无阻流量3.7×10 ⁴ m ³ /d
F 类低产	心滩	平行层 理砂岩 相、交错 层理粗- 含砾粗 砂岩相	锯齿 箱形、 钟形	7	0.50	岩屑、 石英、 砂岩	<10	2	0.3	盒 1 盒 2 盒 3	GR- SP...  D3 井, 盒1段, 无阻流量2.6×10 ⁴ m ³ /d

表4 鄂尔多斯盆地大牛地气田储层岩石学特征

Table 4 Statistics of the petrological characteristics of the Taiyuan-Xiashihezi Formations in Daniudi gas field, Ordos Basin

层位	碎屑颗粒含量, %			填隙物含量, %								定名
	石英	长石	岩屑	泥质 杂基	自生矿物							
					高岭石	绿泥石	伊利石	菱铁矿	方解石	石英	白云石	
盒3	74.8	8.6	16.6	2.4	4.5	1.4			3.2	1.5		岩屑 石英砂 岩、岩 屑砂岩
盒2	73.1	4.6	22.3	3.3	1.8	4.0	1.7		1.5	1.1		
盒1	73.3	2.4	24.3	4.3	0.9	2.2	3.0		1.9	1.3		
山2	73.2	1.4	25.4	4.9	1.7	1.2	2.5	0.9	3.3	0.8	0.4	
山1	73.2	2.8	24.0	6.2	1.9	0.2	3.8	1.8	1.6	1.0	1.5	
	93.0	1.0	6.0	1.0	2.0		0.2		0.5	2.5		石英 砂岩
太2	96.0	0.2	3.8	1.3	0.4		2.8		1.2	3.5	0.7	
太1	96.4	0.1	3.6	1.4	1.9		0.4		0.8	3.0	1.4	

22.2%,平均值为7.80%,孔隙度峰值分布在4%~10%,占总样品数的84.21%(图2a)。

渗透率分布在(0.01~15.30)×10⁻³ μm²,平均值为0.54×10⁻³ μm²,渗透率峰值分布在(0.08~1.25)×10⁻³ μm²的样品占总样品数的76.4%,为典型的低渗和特低渗储层(图2b)。

通过研究,影响岩屑石英砂岩物性的主要因素为碎屑石英含量和碎屑粒度,从石英碎屑含量、碎屑粒度与渗透率相关图上可看出,石英碎屑含量越高、碎屑粒度越大,储层物性越好(图3)。目前产气井统计结果来看,一般只有中-粗粒以上的砂岩是气层^[7]。

3.3.2 石英砂岩

对406个石英砂岩的孔渗分析样品结果进行统计,孔隙度值分布在0.2%~14.50%,平均值为7.18%,孔隙度峰值分布在4%~10%的样品占总样品数的71.67%(图4a)。

渗透率分布在(0.014~3.72)×10⁻³ μm²,平均值为0.55×10⁻³ μm²,渗透率峰值分布在(0.08~1.25)×10⁻³ μm²的样品占总样品数的75.62%,为典型的低渗和特低渗储层(图4b)。

通过研究,影响石英砂岩物性的主要因素为碎屑颗粒的大小,粒度越大,储层物性越好,反之,粒度越小,物性越差。

3.4 孔隙结构特征

3.4.1 孔隙类型

根据薄片和铸体资料分析,储层为颗粒支撑,孔隙式胶结,储集空间主要为粒间余孔和粒内溶孔,少量裂缝和晶间孔。

3.4.2 孔隙特征

利用168块铸体薄片资料,分别对岩屑石英砂岩和石英砂岩的孔隙特征进行统计,从统计结

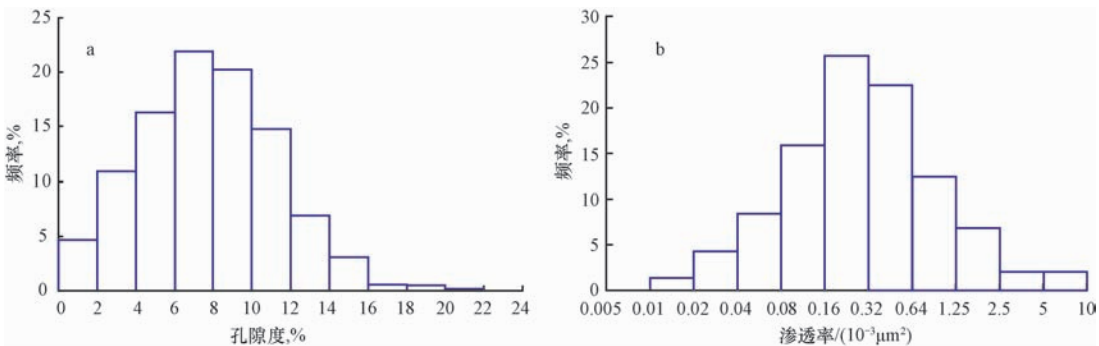


图2 鄂尔多斯盆地大牛地气田岩屑石英砂岩储层物性直方图

Fig. 2 Petrophysical property histogram of lithic quartz sandstone in Daniudi gasfield, Ordos Basin

a. 孔隙度分布直方图; b. 渗透率分布直方图

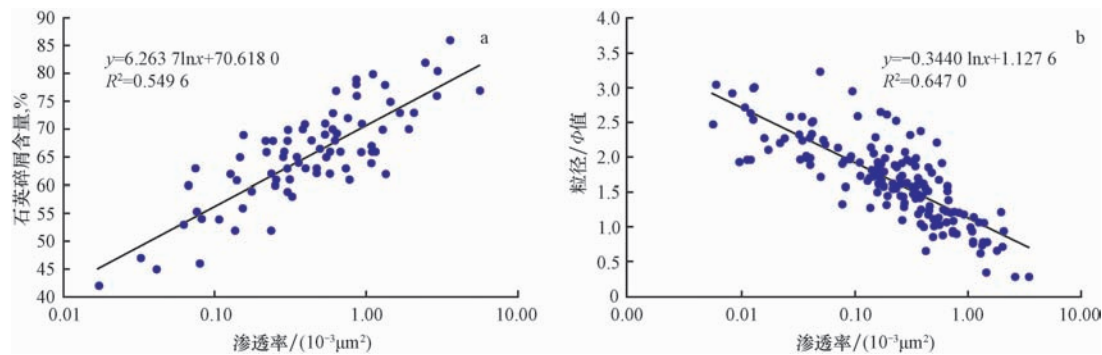


图 3 鄂尔多斯盆地大牛地气田储层石英碎屑含量、碎屑粒度与渗透率的关系

Fig. 3 Relationship of quartz grain content and grain size vs. permeability in Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 石英碎屑含量与渗透率相关图; b. 碎屑粒度与渗透率相关图

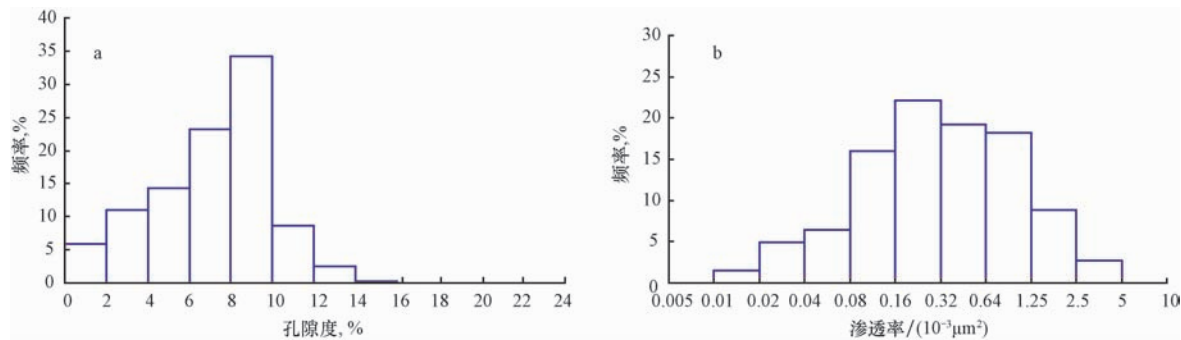


图 4 鄂尔多斯盆地大牛地气田石英砂岩储层物性直方图

Fig. 4 Petrophysical property histogram of quartzose sandstone in Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 孔隙度分布直方图; b. 渗透率分布直方图

表 5 鄂尔多斯盆地大牛地气田储层孔隙特征统计

Table 5 Statistics of reservoir pore characteristics in Daniudi gas field, Ordos Basin

岩石类型	孔隙半径/ μm	配位数	分选系数	均质系数	面孔率, %	孔喉比	样品数/个
岩屑石英砂岩	29.67	0.48	15.64	0.49	1.86	5.18	146
石英砂岩	36.09	0.62	21.39	0.44	2.77	5.92	22

表 6 鄂尔多斯盆地大牛地气田储层喉道特征

Table 6 Statistics of reservoir pore throat characteristics in Daniudi gas field, Ordos Basin

岩石类型	平均喉道半径/ μm	中值压力/MPa	中值半径/ μm	排驱压力/MPa	进汞饱和度, %	最大连通半径/ μm	退汞效率, %	偏度	峰态	样品数/个
岩屑石英砂岩	0.35	23.24	0.12	0.72	79.40	1.80	39.21	1.68	4.80	484
石英砂岩	0.49	9.97	0.23	0.69	86.08	2.37	35.20	1.68	3.43	84

果看,石英砂岩孔隙特征好于岩屑石英砂岩,表现为孔隙半径较大、配位数较高、分选性较好。但总体来看,岩屑石英砂岩和石英砂岩孔隙均属于细孔^[8](表 5)(引用标准:SY/T 6285—1997 油气储层评价方法)。

3.4.3 喉道特征

利用 568 块压汞资料,分别对岩屑石英砂岩

和石英砂岩的喉道特征进行统计,从统计结果看,石英砂岩喉道特征好于岩屑石英砂岩,表现在平均喉道半径较宽、中值压力较低、中值半径大、排驱压力较低等方面。但总体看,岩屑石英砂岩和石英砂岩喉道均属于中喉(表 6)(引用标准:SY/T 6285—1997 油气储层评价方法)。岩屑石英砂岩和石英砂岩的孔喉配置均为细孔中喉型。

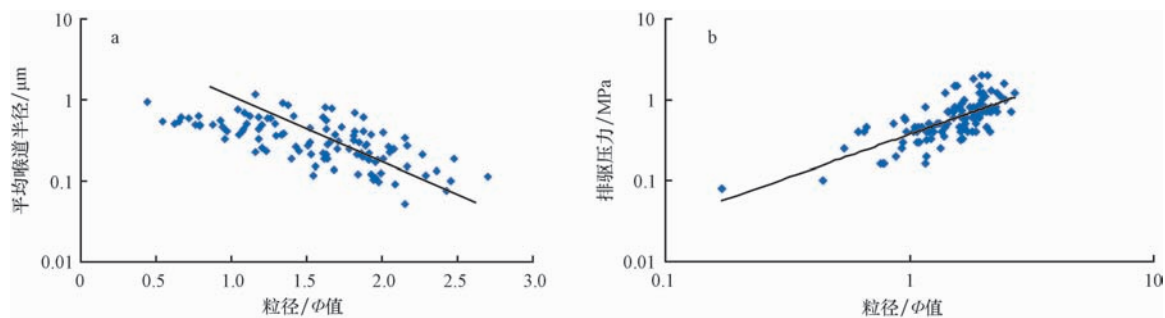


图 5 鄂尔多斯盆地大牛地气田砂岩粒度与喉道半径、排驱压力相关图
Fig. 5 Sandstone grain size vs. throat radius & displacement pressure in Daniudi gas field, Ordos Basin
a. 砂岩粒度与平均喉道半径相关图; b. 砂岩粒度与排驱压力相关图

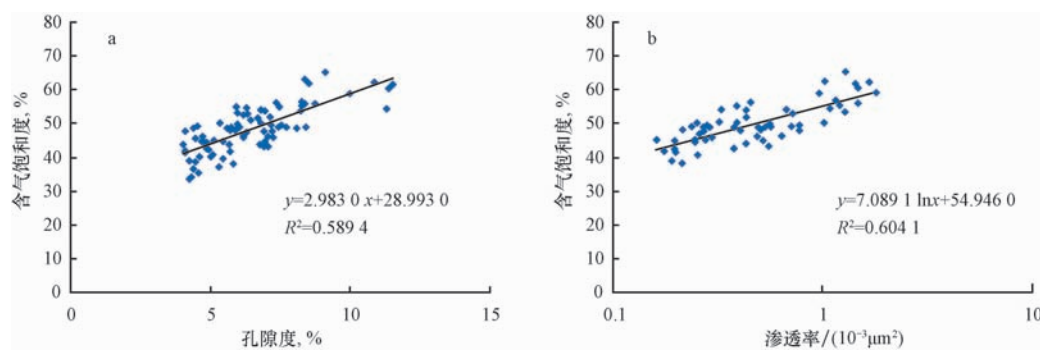


图 6 鄂尔多斯盆地大牛地气田储层物性与含气饱和度相关图
Fig. 6 Reservoir petrophysical property vs. gas saturation in Daniudi gas field, Ordos Basin
a. 孔隙度与含气饱和度相关图; b. 渗透率与含气饱和度相关图

3.4.4 影响储层孔隙结构因素

通过分析,影响储层孔隙结构的主要因素为碎屑颗粒的粒度,从碎屑粒度与平均喉道、排驱压力相关图明显可看出,碎屑颗粒粒度越粗,储层平均喉道越大,排驱压力越小,孔隙结构越好(图 5)。

3.5 储层含气性控制因素

大牛地气田为弹性驱动、无边底水、大型岩性圈闭气藏,主要靠周围泥岩和砂岩物性变差带封堵天然气,从而形成岩性圈闭^[9-10]。在天然气富集带内,决定天然气富集程度的主要因素为储层物性,呈现物性越好,含气饱和度越高,产能越高的特点。DK7 井下石盒子组密闭取心资料也验证了这一点,图 6 是利用 DK7 井密闭取心化验分析资料做的物性与含气饱和度的相关图,可明显看出,物性越好,储层含气饱和度越高。

从这个角度上看,大牛地气田开发的核心问题就是储层预测,找到了物性好的储层,就找到了

天然气富集有利区,就找到了相对高产富集区。

3.6 储层综合评价

综合有利储集岩相、岩石学特征、物性、孔隙结构等因素,结合产能资料,对太原组、山西组和下石盒子组储层进行了综合评价和划分^[11-12],共划分出四大类、六小类(表 7)。

- 1) I_a 类储层:为高产型储层,主要电性特征为中等声波时差、高电阻率,岩性为岩屑石英砂岩,平均孔隙度为 12%,平均渗透率为 $1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均含气饱和度为 68%,平均气层厚度为 8 m,平均无阻流量为 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均单层产量为 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,有利储集岩相为 A 类心滩中高产型,层位为盒 3、盒 2 段,主要分布在气田西南角,储层平均厚度为 13 m,多期叠合砂体呈条带状展布,连续性好,砂体宽度为 0.8~2.5 km。
- 2) I_b 类储层:为高产型储层,主要电性特征为中低声波时差、高电阻率,岩性为石英砂岩,平均孔隙度为 10%,平均渗透率为 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,

表 7 鄂尔多斯盆地大牛地气田储层综合分类指标

Table 7 Composite index list of reservoir division in Daniudi gas field,Ordos Basin																
类型	岩性	物性		电性					孔喉结构	含气饱和度,%	压裂后产能			储集岩相	层位	综合评价
		平均孔隙度,%	平均渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	自然伽马/API	声波时差/(μs·m ⁻¹)	电阻率/(Ω·m)	补偿密度/(g·cm ⁻³)	补偿中子,%			平均无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	平均产量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	气层平均厚度/m			
I	I _a 岩屑石英砂岩	12.0	1.1	<65	>210	>100	<2.6	<20	0.60	68	13	1.3	8	A类心滩高产型	盒3 盒2	高产型
	I _b 石英砂岩	10.0	1.0	<50	>190	>60	<2.6	<8	0.55	68	10	1.1	8	B类分流河道中高产型	山1	高产型
II	II _a 岩屑石英砂岩	11.5	0.7	<65	>235	<100	<2.5	<20	0.40	60	4	0.5	5	A类心滩中高产型、D类分流河道中低产型	盒3 盒2 盒1 山2 山1	中产型
	II _b 石英砂岩	9.0	0.7	<50	>190	>60	<2.6	<8	0.23	60	4	0.5	15	C类障壁砂坝中低产型	太2 太1	中产型
III	岩屑石英砂岩	7.0	0.5	<80	210~235	<100	<2.6	<20	0.25	55	2	0.3	7	D类分流河道低产型、E类心滩低产型	盒3 盒2 盒1 山2 山1	低产型
IV	岩屑石英砂岩	<5.0	<0.2	>80	<210	<100	>2.6	<20	<0.10	<50				非有利储层岩相	盒3 盒2 盒1 山2 山1	非储层

平均含气饱和度为 68%,平均气层厚度为 8 m,平均无阻流量为 10 × 10⁴ m³/d,平均单层产量为 1.1 × 10⁴ m³/d,有利储集岩相为 B 类分流河道中高产型,层位为山 1 段(下部),主要分布在气田的西南角,储层平均厚度为 12 m,多期叠合砂体呈条带状展布,连续性好,砂体宽度为 0.3 ~ 2.0 km。

3) II_a 类储层:为中产型储层,主要电性特征为高声波时差、低电阻率,岩性主要为岩屑石英砂岩,平均孔隙度为 11.5%,平均渗透率为 0.7 × 10⁻³ μm²,平均含气饱和度为 60%,平均气层厚度为 5 m,平均无阻流量为 4 × 10⁴ m³/d,平均单层产量为 0.5 × 10⁴ m³/d,有利储集岩相为 A 类心滩中高产型和 D 类分流河道中低产型,层位为盒 3、盒 2、盒 1、山 2、山 1 段,储层平均厚度为 6 m,砂体呈土豆状分布,宽度为 100 ~ 500 m。

4) II_b 类储层:为中产型储层,主要电性特征为中低声波时差、中高电阻率,岩性为石英砂岩,平均孔隙度为 9%,平均渗透率为 0.7 × 10⁻³ μm²,平均含气饱和度为 60%,平均气层厚度为 15 m,

平均无阻流量为 4 × 10⁴ m³/d,平均单层产量为 0.5 × 10⁴ m³/d,有利储集岩相为 C 类障壁砂坝中低产型,层位为太 2、太 1 段,太 2 段储层平均厚度为 18 m,多期叠合砂体呈条带状展布,砂体宽度为 1 ~ 4.5 km,太 1 段储层平均厚度为 6 m,砂体呈土豆状分布,规模较小。

5) III 类储层:为低产型储层,主要电性特征为中低声波时差、中低电阻率,岩性主要为岩屑石英砂岩,平均孔隙度为 7%,平均渗透率为 0.5 × 10⁻³ μm²,平均含气饱和度为 55%,平均气层厚度为 7 m,平均无阻流量为 2 × 10⁴ m³/d,平均单层产量为 0.3 × 10⁴ m³/d,有利储集岩相为 D 类分流河道低产型和 E 类心滩低产型,主要分布层位为盒 3、盒 2、盒 1、山 2、山 1 段。

6) IV 类储层:为非储层,主要电性特征为低声波时差、中低电阻率,岩性主要为岩屑石英砂岩、岩屑砂岩,孔隙度小于 5%,渗透率小于 0.2 × 10⁻³ μm²,含气饱和度小于 50%,分布层位为盒 3、盒 2、盒 1、山 2、山 1 段。

4 开发对策

4.1 极限经济单井产量

根据大牛地气田的单井投资,在气价 1.2 元/ m^3 (含税)条件下,计算出大牛地气田直井的单井极限产量为 $0.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据储层评价结果,只有 I_a 和 I_b 储层可以单层有效动用。

4.2 开发对策

大牛地气田由下自上,共发育太 1、太 2、山 1、山 2、盒 1、盒 2 和盒 3 段 7 套储层,7 套储层在空间分布上呈现出纵向上互相叠置,平面上互相叠合的特点^[10,12]。根据这些特点,依据“先肥后瘦、先易后难”的开发原则,大牛地气田形成了直井单层开采、直井多层合采和水平井开采的三种模式,如图 7 所示。

4.2.1 直井单层开采

由于 I_a 和 I_b 储层单层平均产量分别为 1.3×10^4 和 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在直井极限产量之上,对此类储层,采用直井,大规模水力压裂,单层或多层直接动用。2005 年大牛地气田以此类储层为主要建产对象,当年建产天然气年产能 为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$,截止 2009 年底此类储层中共建成天然气产能为 $17 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均单井产量为 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

4.2.2 直井多层合采

对于 II_a 和 II_b 类储层,由于单层产量达不到经济极限,不能直井单层开发。但考虑气藏无水层,并且处于同一压力系统,多层同时生产时,层间干扰很小,可采用多层合采的方式进行开发。

直井多层合采就是通过气藏精细描述,评价出具有 2 层以上的 II 类储层叠合区,采用直井,不动管柱多层压裂方式,同时打开多套气层,进行合采。虽然 II 类储层单层产量在经济极限之下,但二层或二层之上的 II 类储层同时打开后,合层产量超过了经济极限产量,从而可以有效开发。此类储量于 2007 年开始动用,截止 2009 底以此类方式已建成天然气年产能 $7 \times 10^8 \text{ m}^3$,单井平均产量 $0.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

4.2.3 水平井开采

对于纵向以单层发育为主的 II 类储层和 III 类储层,由于直井技术条件下,低于经济极限产量,无法有效开发,对于此类低品质致密天然气储量,只有通过新技术新工艺才能有效开发。

此类储层目前主要采用水平井、多段分段压裂技术进行动用,水平段长 1 000 ~ 2 000 m,压裂段数 5 ~ 20 段,已成功实施过 14 段压裂。截止目前气田已完成长水平段分段压裂井 9 口,平均单井产能为 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最高产为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而同类直井产量为 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,产能提高倍数近 13 倍,证明了水平井技术动用单层 II 类、III 类储层的可行性。

5 结论

1) 大牛地气田共划分出 5 类有利的储集岩相,其中 A 类为心滩中高产储集岩相,B 类为分流河道中高产储集岩相,C 类为障壁砂坝中低产储集岩相,D 类为分流河道中低产储集岩相,E 类为分流河道低产储集岩相,F 类为心滩低产储集岩相。

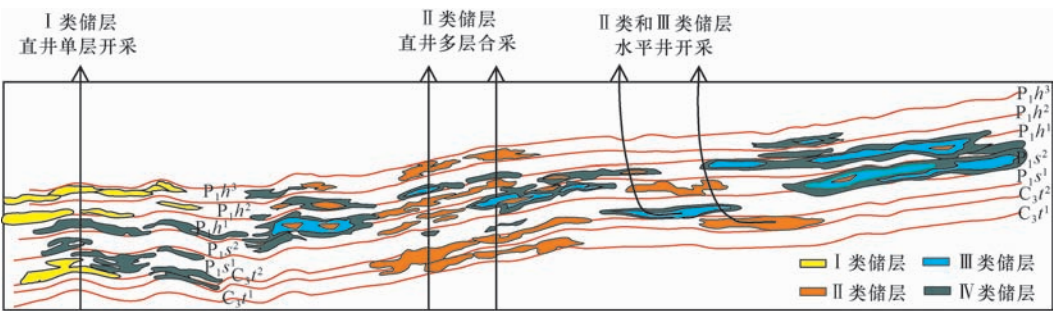


图 7 鄂尔多斯盆地大牛地气田不同储层类型开发对策示意图

Fig. 7 Sketch map showing development strategies for different reservoir types in Daniudi gas field, Ordos Basin

2) 储层岩石类型分为两种,其中盒3、盒2、盒1、山2和山1段为岩屑石英砂岩和岩屑砂岩,太2、太1和山1(下部)段为石英砂岩。岩屑石英砂岩平均孔隙度为7.80%,平均渗透率为 $0.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;石英砂岩储层平均孔隙度值为7.18%,平均渗透率为 $0.55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,均为典型低渗和特低渗储层。

3) 通过含气性控制因素研究,认为天然气富集的主要控制因素为储层物性,物性越好,储层含气饱和度越高,产量越高。

4) 通过储层综合评价,共划分出四大类六小类储层。对不同类型的储层,形成了不同的开发对策,I类储层采取直井单层开采,对两层以上叠合的II类储层采取直井多层合采,对以单层发育为主的II类和III类储层,采取水平井开采。

参 考 文 献

- [1] 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 gasfield with low permeability and exploration and development technology of Daniudi gasfield in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 762-768.
- [2] 郝蜀民.鄂尔多斯盆地油气勘探的回顾与思考[J].天然气工业,2001,21(增刊):1-4.
Hao Shumin. Retrospect and consideration of oil and gas exploration in Ordos Basin[J]. Nature Gas Industry, 2001, 21(S): 1-4.
- [3] 赵军,王森,闫爽,等.自然电位测井在低阻油气层识别中的应用——以塔里木盆地吉拉克地区三叠系低阻油气层为例[J].石油与天然气地质,2011,32(2):245-250.
Zhao Jun, Wang Miao, Yan Shuang, et al. Application of spontaneous potential logging to identification of low resistivity reservoir—an example from Triassic low resistivity reservoir in Jilake, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 245-250.
- [4] 高青松,刘忠群,郭耀华.塔巴庙区块下石盒子组盒一段沉积相分析[J].天然气工业,2001,21(增刊):27-29.
Gao Qingsong, Liu Zhongqun, Guo Yaohua. Sedimentary facies analysis of the 1st member, Xiashihezi Formation, Tabamiaio Block[J]. Gas Industry, 2001(S), 21: 27-29.
- [5] 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):338-396,403.
Zhang Guangquan, Chen Shuwei, Guo Shuyuan. Sedimentary facies of Shanxi Formation in Daniudi gas field, northeastern Ordos[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 338-396, 403.
- [6] 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.
- [7] 刘忠群,陈俊亮,杨超华.大牛地复式气田基本地质特征[C]//周玉琦.复杂油气田勘探开发技术新进展.北京:石油工业出版社,2003:20-28.
Liu Zhongqun, Chen Junliang, Yang Chaochua. Fundamental geological characteristics of Daniudi complex gasfield[C]//Zhou Yuqi. New advance in complicated oil and gasfield exploration and development. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 20-28.
- [8] 刘忠群,高青松,张健.大牛地气田山西组储层孔隙结构特征[J].天然气工业,2001,21(增刊):53-55.
Liu Zhongqun, Gao Qingsong, Zhang Jian. Pore texture characteristics of Shanxi Formation of Daniudi gasfield[J]. Nature gas Industry, 2001, 21(S): 53-55.
- [9] 李良,袁志详,惠宽洋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J].石油与天然气地质,2000,21(3):268-271,282.
Li Liang, Yuan Zhixiang, Hui Kuanyang, et al. Gas accumulation rules in Upper Palaeozoic of northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 268-271, 282.
- [10] 李仲东,郝蜀民,李良,等.鄂尔多斯盆地上古生界压力封存箱与天然气的富集规律[J].石油与天然气地质,2007,28(4):466-472.
Li Zhongdong, Hao shumin, Li Liang, et al. Pressure storage box and gas accumulation rules in Upper Palaeozoic in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 466-472.
- [11] 叶成林,王国勇,何凯,等.苏里格气田储层宏观非均质性——以苏53区块石盒子组8段和山西组1段为例[J].石油与天然气地质,2011,32(2):236-244.
Ye Chenglin, Wang Guoyong, He Kai, et al. Macro heterogeneity of reservoir in Sulige Gasfield—a case study of the 8th member of the Shihezi Formation and the 1st member of the Shanxi Formation in the Su53 Block[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 236-244.
- [12] 李道品.低渗透砂岩油田开发[M].北京:石油工业出版社,1997:9.
Li Daopin. Oilfield development with low permeability sandstone[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 9.