

文章编号: 0253-9985(2006)06-0762-07

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

郝蜀民, 惠宽洋, 李 良

(中国石油化工股份有限公司 华北分公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 大牛地气田是位于鄂尔多斯盆地北部的一个大型致密-低渗透气田。主要含气层位自下而上为上石炭统太原组、下二叠统山西组和下石盒子组, 是一套完整的海相潮坪-近海三角洲-陆相辫状河沉积层序, 厚度 250~280 m, 横向稳定, 宏观形态呈一巨大的“箱型”, 受上石盒子组区域盖层物性和异常压力的双重封盖作用, 工业气藏的发育被严格限制在该箱体内, 多层大型岩性圈闭叠合发育, 具有“近源箱型”成藏模式。针对岩性圈闭、致密-低渗透砂岩储层、自然产能低等难点, 在气田的勘探开发中, 形成了叠合岩性圈闭描述与评价、煤系地层地震储层预测等关键技术, 并建立了以保护气层为重点的快速钻井综合技术、以提高产能为核心的致密气层大规模压裂改造技术等配套技术体系。

关键词: 致密储层; 岩性圈闭; 近源箱型成藏模式; 储层预测; 大规模压裂; 大牛地气田

中图分类号: T112.2 文献标识码: A

Reservoiring features of Daniudi low-permeability gas field in Ordos basin and its exploration and development technologies

Hao Shumin, Hui Kuanyang, Li Liang

(North China Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006)

Abstract The giant Daniudi gas field, located in the north of Ordos basin, is of a tight and low-permeability type. Its main gas-bearing horizons from bottom to top are the Taiyuan Formation of the Upper Carboniferous and Shanxi Formation and lower Shihezi Formation of the Lower Permian, forming a complete set of sedimentary sequences of marine tidal flat-paralic-delta-terrestrial braided channel. The sequences with a thickness of 250 m to 280 m and a stable lateral distribution, are in a shape of a huge box, to which the commercial gas pools are confined due to a dual tight sealing of favorable lithophysics and anomalous pressure of the regional cap in the upper Shihezi Formation. Layered lithologic traps overlap with one another and hydrocarbon reservoiring in them is characterized by near-source and box-like traps. To solve the problems caused by lithologic trap, tight and low-permeability sand reservoirs, and low natural production of the field, core technologies, such as description and evaluation of stacked lithologic traps and seismic prediction of coal bed reservoirs, have been developed during the exploration and development of the Daniudi gas field. And corresponding technologies of quick drilling aiming at protecting gas reservoirs and large-scale fracturing intending to promote gas production of tight reservoirs have also been advanced.

Key words Daniudi gas field; near-source box-type reservoiring mode; tight reservoir; lithologic trap; reservoir prediction; large-scale fracturing

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部 东段(图 1), 储量规模已跨入大型气田行列。含

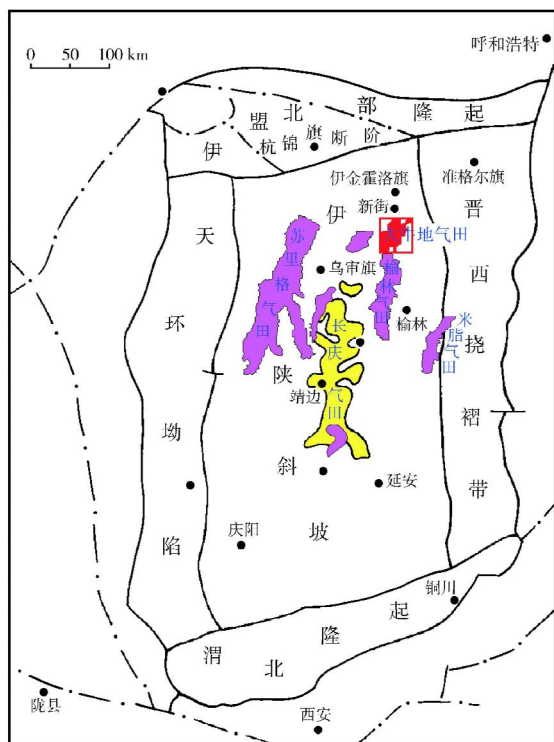


图 1 大牛地气田位置

Fig. 1 Location of the Danidi gas field

气层位为上石炭统一下二叠统。气田的基本特征是纵向上 7 个大型岩性圈闭叠合、横向上复合连片; 储集层主要为潮坪-砂坝、三角洲平原分流河道及冲积平原辫状河河道成因的粗粒岩屑石英砂岩, 孔隙度主要分布在 $4\% \sim 10\%$ 、渗透率主要分布在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。大牛地气田这种圈闭隐蔽、储层致密的特点给勘探、开发带来了极大的挑战^[1]。

从 1998 年提出大牛地大型岩性圈闭的地质概念^[2,3], 经过 6 年的勘探, 已查明上石炭统一下二叠统海、陆相含煤碎屑岩层序中 6 个层段岩性圈闭的发育范围及其含气状况, 形成了相应的勘探、开发核心配套技术体系。

1 成藏特征与近源箱型成藏模式

1.1 成藏特征

鄂尔多斯盆地伊陕斜坡, 是一个地史中相对稳定的构造单元, 孕育了多个大型天然气田, 以含气面积大、圈闭隐蔽、储层致密著称。大牛地气田的成藏特征可以概括为“主源定型、相控储层、高压封闭、近源成藏”。

1.1.1 主源定型

主源定型为具备大面积分布的煤系气源岩。鄂尔多斯盆地上古生界以石炭系和山西组煤层为主的气源岩, 表现为多中心的广覆式生烃格局^[4], 生烃强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的分布面积达 $13.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占现今盆地总面积 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的 55.2%, 大牛地气田范围生烃强度为 $30 \times 10^8 \sim 50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 构成大气田形成的物质基础。

1.1.2 相控储层

相控储层发育海相、海陆过渡相、陆相 3 套储集岩系, 以大型岩性圈闭为特征。石炭系上统太原组、二叠系下统山西组和下石盒子组是大牛地气田的主要成藏层位, 分别发育潮坪-障蔽砂坝、三角洲分流河道、辫状河道砂岩储集层。纵向上储集层多套叠合、平面上复合连片, 在倾角不足 1° 的西倾单斜构造背景上形成大型岩性圈闭。含气范围受河道复合体发育的范围控制, 规模往往较大, 一般为数百平方公里。

上石炭统太原组、下二叠统山西组和下石盒子组, 是一套完整的由海相潮坪-近海三角洲-陆相辫状河沉积层序, 厚度 250~280 m, 横向稳定, 宏观形态呈一巨大的“箱型”, 受上石盒子组区域盖层的封盖, 工业气藏的发育被严格限制在该箱体内, 箱体内多层大型岩性气藏叠合 (图 2), 构成大牛地气田基本框架。

1.1.3 高压封闭

高压封闭即良好的区域封盖条件。油气保存单元在垂向上必须为区域性封盖层所界定, 区域

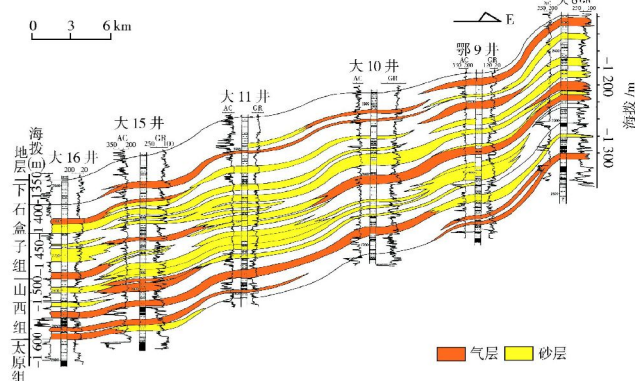


图 2 大牛地气田气藏剖面

Fig. 2 Reservoir section in the Danidi gas field

性封盖层覆盖了油气运移的路径, 决定了油气运移或渗漏的上边界^[5]。大牛地气田上石盒子组为红色泥岩与砂质泥岩互层, 泥岩总厚约 50~150 m, 单层泥岩厚度约 20~80 m, 且连续性较好, 构成了太原组—山西组—下石盒子组的区域性盖层。

在早白垩世末期, 上古生界达到历史最大埋深, 上石盒子组泥岩在三叠系快速沉积以及巨大沉积厚度的影响下, 由于压实作用、粘土矿物脱水以及孔隙流体的热膨胀等因素的作用下, 产生了异常高压, 并明显形成了一套高压封盖层。这种压力封盖作用在盆地内部普遍存在^[6-7]。

根据泥岩“欠压实”的基本理论、等效深度法、真实气体状态方程、物质平衡原理计算了各种成因产生异常压力的大小, 结果表明: 现今石千峰组—上石盒子组“欠压实”的剩余地层压力在 5~20 MPa。

1.1.4 近源成藏

近源成藏具有短距离运移成藏的特征。太原组—山西组烃源岩总体处于湿气演化阶段, 在烃源岩不发育的下石盒子组, 特别是盒 2、盒 3 段甲烷含量明显高于下伏层, 呈干气特征, 符合天然气运移的分异原理。说明盒 2、盒 3 段是天然气经过二次运移聚集成藏的。垂向二次运移由二叠系下统太原组、山西组向下石盒子组进行, 运移的距离在 100~250 m 左右。

1.2 近源箱型成藏模式

盆地演化末(晚)期及其之后, 是各类能源矿产成藏、定位和相互作用的主要时期^[8], 白垩纪及其后期是鄂尔多斯盆地古生界气藏形成、定位的关键时期。根据大牛地气田成藏组合特征、区域盖层特征、流体性质在剖面上的变化, 提出太原组—山西组—下石盒子组气藏的成藏模式如下(图 3):

①太原组—山西组气源岩在侏罗纪—白垩纪大量生气后, 由于缺乏大规模侧向运移的条件, 天然气以就近、择优(储层)聚集, 近距离成藏为主; ②晚白垩世以后天然气的运聚是限定在高压流体封闭箱内(太原组—山西组—下石盒子组)的缓慢调整和再分配为主, 山西组、太原组气藏为初次运移形成的源内型气藏, 下石盒子组气藏为经过短距离二次运移聚集的近源型气藏; ③在断裂不发育的情况下, 上石盒子组下部厚层泥质岩形成的

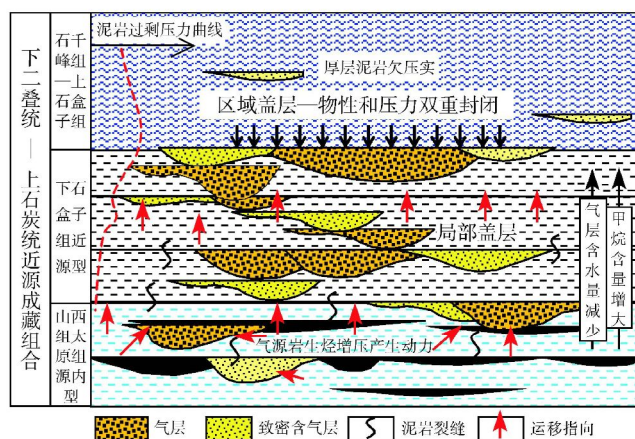


图 3 大牛地气田成藏模式

Fig. 3 Reservoir mode of the Daniudi gas field

高压封闭阻止了流体进一步向上散失; ④天然气以垂向短距离运移为主, 运移的动力为烃源岩内形成的异常高压, 异常高压产生的微裂缝成为运移的主要通道, 排烃方式表现为幕式排烃和涌流式外泄; ⑤向上运移的主要障碍来自上覆盖层(上石盒子组和石千峰组)的毛细管力和异常压力带的联合阻隔, 造成天然气主要在山西组和下石盒子组聚集成藏; ⑥高压异常带的压力幅度最大处构成纵向压力封闭边界, 从而与远源成藏组合分界。

2 叠合岩性圈闭描述与评价

隐蔽油气藏勘探必须解决隐蔽圈闭的精确定位和含油气潜力的准确评估两个问题。陆相盆地的隐蔽油气藏从单油藏形成到区带分布均受到多种因素的复合控制, 其勘探的有效方法则是层序地层学框架下的多学科综合研究方法^[9]。大牛地气田乃至鄂尔多斯盆地北部, 古生界含气层位多, 以层圈闭为单元的圈闭识别评价工作是区带评价、勘探目标评价和开发前期评价的主要技术环节。

层圈闭识别评价的基础是建立在高分辨率层序地层格架划分之上的层段沉积相研究; 依据有利相带的分布可以确定层圈闭的基本轮廓; 层圈闭的基本表达方式是一个地层单元的砂岩厚度等值线图, 边界数值在各层段不尽相同; 层圈闭的主要储层能够依据地震资料确定其横向变化。层圈闭的形态描述随着勘探的进程和认识的深入在不断地修正^[10-11]。

3 地震储层预测技术

大牛地气田成藏层段为砂、泥岩互层夹煤层剖面, 砂岩单层厚度较薄, 一般为 5~20 m, 泥岩压实作用强, 与砂岩阻抗差值小; 煤层反射强, 在一定程度上掩盖了砂层的反射特征, 给储层预测、岩性圈闭评价、富集高产带的预测带来巨大困难^[12]。采用地质模式控制、多方法相互印证、结合实际逐步优化的技术思路, 形成有针对性的大牛地气田储层预测技术体系(图 4), 该体系由 10 项核心技术组成, 其中包含 3 项核心技术。

3.1 地震反射结构分析基础上的多属性提取及综合分析技术

针对下石盒子组陆相河流层序, 通过提频、分频处理, 突出目的储层的信息, 提取 T_0f (上、下石盒子组分界) 反射波的均方根振幅, 预测盒二、盒三段砂岩储层的分布, 有效地揭示了盒二与盒三段气藏储层的分布特征; 与地质模式结合准确地刻画了中、高产富集区的河道展布形态(图 5), 在开发部署中发挥了重要作用。

针对含煤层段, 通过提频、分频及压制煤层影响的处理, 突出目的储层信息, 提取 T_0d (山西组、太原组分界) 反射波的平均振幅, 预测山西组、太原组含煤系储层砂体, 实钻证实预测效果较好。

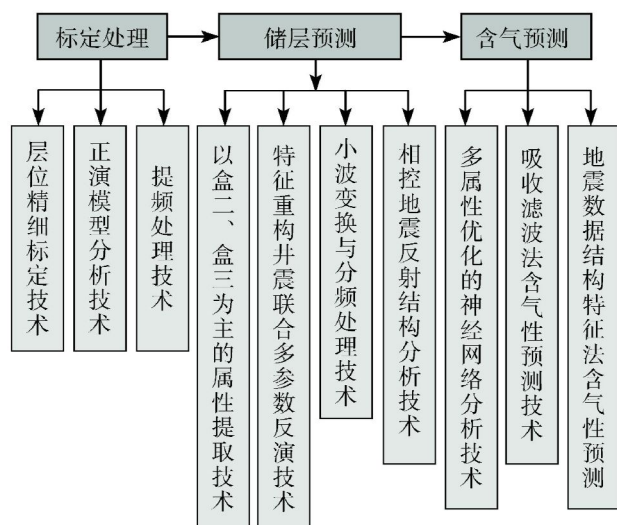


图 4 大牛地气田地震储层预测技术构成框架

Fig. 4 Schematic diagram showing the components of the seismic reservoir prediction technology in the Danudi gas field

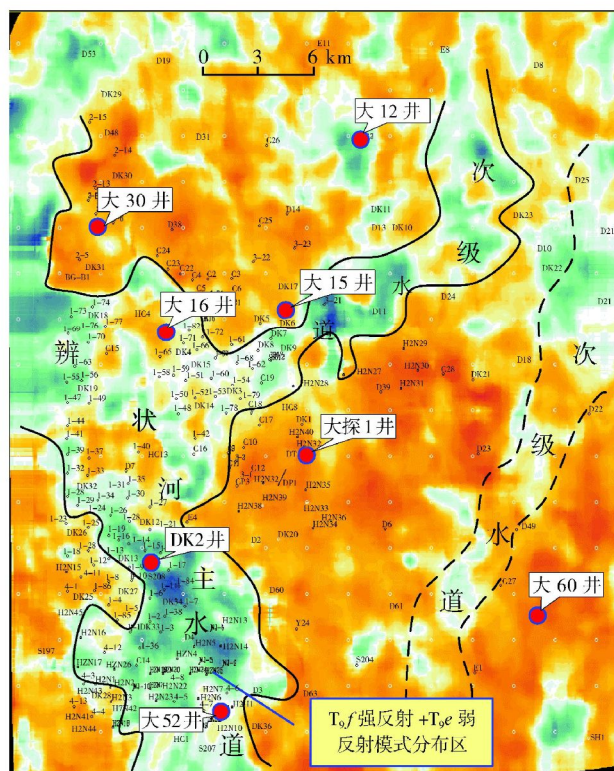


图 5 石盒子组三段高产区河道预测

Fig. 5 Prediction of channels in the third member of the Shizezi Formation

3.2 测井曲线重构基础上的井震联合反演技术

通过波阻抗、电阻率、孔隙度等多参数井震联合反演, 定量预测储层厚度和含气性有利区(图 6), 为井位部署提供可靠的地球物理资料。

3.3 提频处理、小波变换与分频处理技术

通过分频处理, 将地震剖面中能较好反映储层特征的不同频段的信息提取出来, 更为突出地反映储层的频率信息。剖面的分辨率显著提高, 为储层预测提供了扎实的资料基础。

4 核心配套技术

大牛地气田具有以下气藏特征: ①6套气层平均地层压力系数 0.89~0.99, 为低压-常压系统; ②砂岩储层低孔隙度、低渗透率、高有效应力和高毛管压力, 平均孔隙度 8.38%、平均渗透率 $0.99 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 1); ③气层自然产能低, 必须实施压裂改造后才能达到工业产量; ④纵向上分布多个气层, 在储层物性、粘土矿物含量、地层水性质、储层敏感性和伤害机理等存在一定差异^[13]。

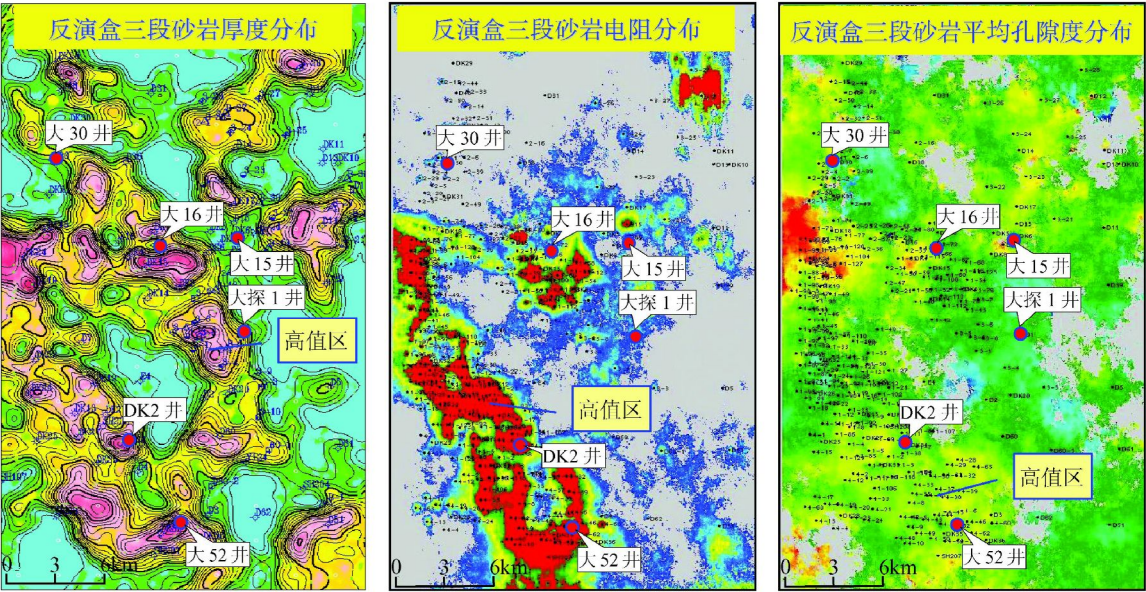


图 6 大牛地气田石盒子组三段高产区多参数测井-地震联合反演

Fig.6 Multiparameter combined logging and seismic inversion of the third member of the Shihezi Formation in Danludi gas field

表 1 大牛地气田储层物性统计表

Table 1 Statistics of reservoir physical properties of Danludi Gasfield

物性参数		全区	盒三段	盒二段	盒一段	山二段	山一段	太原组
孔隙度, %	最大值	21.4	18.9	17.0	20.1	21.4	18.9	15.7
	最小值	0.3	0.7	1.1	0.3	0.9	1.3	2.1
	平均值	8.4	8.4	9.0	9.1	8.0	7.4	8.4
	主要区间	4.0~ 12.0	4.0~ 12.0	8.0~ 12.0	6.0~ 12.0	4.0~ 10.0	4.0~ 10.0	6.0~ 10.0
	样数 /个	2 611	220	167	579	563	614	468
渗透率 / (10 ⁻³ μm ²)	最大值	58.2	33.3	58.2	15.3	53.6	10.9	27.9
	最小值	0.001	0.006	0.050	0.001	0.001	0.001	0.014
	平均值	0.99	1.67	1.64	0.62	0.64	0.69	0.69
	主要区间	> 0.1	> 0.2	> 0.2	> 0.1	> 0.1	> 0.1	> 0.1
	样数 /个	2 565	216	167	564	552	604	462

针对上述气藏特征,以提高单井产能为目的的综合工程工艺核心配套技术已经建立,保障了大牛地气田高效勘探开发。

4.1 以气层保护为目的的钻井综合技术

4.1.1 快速钻井技术

非目的层段全面使用 PDC 钻头,平均机械钻速逐年提高,平均钻井周期逐年缩短,既达到了保护储层的目的,又节约了钻井直接成本 5.2%。

4.1.2 屏蔽暂堵技术

钻井进入目的层段后,根据储层孔喉结构和粘土矿物分布,针对性地实施储层屏蔽暂堵,有效

表 2 屏蔽暂堵技术使用前后表皮系数对照

Table 2 Correlation of skin factors before and after the implementation of the technology of shielding and diverting fluid

层 位	井号	渗透率 /(10 ⁻³ μm ²)		表皮系数	屏蔽暂堵
		气	水		
山一段	大 8	0.003 0	0.019 6	33.5	无
	大 26	0.001 0	0.001 0	4.13	是
山二段	大 8	0.002 4		8.71	无
	DK5			1.35	是
盒三段	大 7	0.001 7	0.009 5	22.67	无
	DK2			5.88	是

地保护了低压致密气层。表现在以下三方面:储层表皮系数明显减小(表 2);气层泥浆侵入带明显变浅。统计显示,没有使用屏蔽暂堵措施的气

表 3 大型压裂和适度压裂数据对比

Table 3 Correlation of data from large-scale fracturing and moderate-scale fracturing

	气层有效厚度 / m	平均加砂量 / m ³	平均砂比, %	平均加砂强度 / (m ³ · m ⁻¹)	平均无阻流量 / (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)
大型压裂	15.8	99.7	26.2	6.18	12.01
适度压裂	16.2	54.0	25.2	3.36	5.71

层泥浆侵入深度平均 145 cm, 采用该技术后平均为 64 cm; 气层测井响应更加明显。

4.1.3 一次注入双凝水泥浆体系平衡压力固井技术

固井质量显著提高, 合格率 100%, 优良率 97.44%。

4.2 以提高产能为目的的气层改造技术

针对大牛地气田低压致密储层的地质特点, 建立了低伤害压裂液体系优化、支撑剂优化、压裂优化设计技术、压裂工艺技术等为主的压裂改造技术体系, 为提高单井产量和气田的高效开发提供技术保障。

4.2.1 低伤害液氮增能羟丙基瓜胶水基压裂液体系

该体系具有较好的携砂性、流变性、破胶性、配伍性、热稳定性、低滤失性等性能, 残渣含量低, 而且易返排、低伤害、成本较低。到目前为止, 使用该压裂液体系在上古生界六套气层进行了 370 余层次压裂改造, 取得了明显效果, 破胶液对储层伤害率小于 21%。

4.2.2 大型水力压裂技术

加大压裂规模有利于加大压裂缝长度, 是一项极具潜力的提高致密砂岩气藏产量的压裂工艺措施。在试验获得成功后, 在气田开发井中推广应用。加砂规模最大达到 151 m³, 平均达到 99.7 m³, 最大入井液量达到 885 m³, 平均入井液量 647.8 m³。

根据对 46 层次大型压裂与类似气层适度压裂效果的统计对比 (表 3), 实施大型压裂井层的无阻流量明显大于“适度压裂”, 平均增加 2.1 倍, 增产效果十分明显。

4.2.3 不动管柱连续分层压裂

应用于层间距大于 15 m 的多层叠置低产气

层压裂, 有效地实现了各层均衡改造。

5 攻关方向

大牛地气田上古生界天然气探明储量数千亿立方米, 低压、低渗、低产是气藏的基本特点, 如何寻找高产富集带和提高单井产能仍是勘探开发永恒的主题。

地质-地震联合攻关, 提高薄储层的预测精度。以开发层系为单元, 深化沉积微相研究, 建立精细储层地质模型, 刻划气藏展布规律, 为多层合采提供可靠依据。

进一步开展以提高单井产能为主要目的的配套工艺技术攻关。包括水平井、尤其是分支井开发技术是经济而提高单井产能的重要方式; 针对不同气层研究不同规模、不同方式以造长缝为目的的压裂技术实验, 为多层合采开发低产气层提供技术支持。

加快下古生界海相地层勘探。前期已在奥陶系风化壳及“内幕”见到天然气流, 应是气田未来的重要接替层位。

通过技术的不断进步, 将进一步实现大牛地低渗气田高效勘探开发的目标, 建立难动用储量勘探开发的新模式。

6 结论

大牛地气田为一大型致密碎屑岩低渗气田, 具有“主源定型”、“相控储层”、“高压封闭”和“近源成藏”的基本成藏模式, 并以构造稳定、多层叠合和大面积横向连片的岩性气藏为特点。

叠合岩性圈闭描述评价技术与储层地震预测技术是勘探开发中形成的特色关键技术。

以保护气层为目的的快速钻井技术、屏蔽暂堵技术和平衡压力固井技术以及以提高产能为目的的气层改造技术 (即大型水力压裂和不动管柱连续分层压裂技术系列), 构成了大牛地气田勘探

开发的核心配套技术系列。

参 考 文 献

- 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 Review and thinking on the oil and gas exploration in E' Erduosi basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(S0): 1~4
- 李良, 袁志祥, 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 Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in north E' Erduosi basin [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 268~271, 282
- 袁志祥. 鄂北塔巴庙、杭锦旗地区古生界天然气勘探前景分析 [J]. 天然气工业, 2001, 21(增刊): 5~9
Yuan Zhixiang An analysis of the natural gas exploration potential of Paleozoic at Tabaniao and Hangjin banner regions in north E' Erduosi basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(S0): 5~9
- 杨华, 张军, 王飞雁, 等. 鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征 [J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 7~11
Yang Hua Zhang Jun Wang Feiyan et al Characteristics of Paleozoic gas system in E' Erduosi basin [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(6): 7~11
- 何登发, 马永生, 杨明虎. 油气保存单元的概念与评价原理 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 1~8
He Dengfa Ma Yongsheng Yang Minghu Concept and appraisal principles of hydrocarbon preservation unit [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 1~8
- 孙东胜, 金之钧, 吕修祥, 等. 沉积盆地超压体系划分及其与油气运聚关系 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 14~20
Sun Dongsheng Jin Zhijun Lü Xiuxiang et al Classification of overpressure systems in sedimentary basins and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 14~20
- 刘池阳, 赵红格, 谭成仟, 等. 多种能源矿产赋存与盆地成藏(矿)系统 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 131~142
Liu Chiayang Zhao Hongge Tan Chengqian et al Occurrences of multiple energy mineral deposits and mineralization/reservoiring system in the basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 131~142
- 吴东胜, 杨申谷, 刘少华. 陆相盆地隐蔽油气藏综合勘探方法与应用初探 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 118~123
Wu Dongsheng Yang Shengu Liu Shaohua Preliminary approach to the integrated exploration method of subtle reservoirs in nonmarine basin and its application [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 118~123
- 李良. 鄂北塔巴庙地区山西组层序地层研究与圈闭识别 [J]. 天然气工业, 2001, 21(增刊): 10~13
Li Liang Sequence stratigraphic study and trap identification of Shanxi formation at Tabaniao region in North E' Erduosi basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(S0): 10~13
- 李良. 大牛地气田多层叠合岩性圈闭的发育特征及其勘探潜力评价 [C]. 见: 周玉琦. 复杂油气田勘探开发技术新进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 30~37
Li Liang The geologic feature and evaluation of exploration prospect for multilayered lithologic trap with superposition in Daniudi gas field Ordos basin [C]. In: Zhou Yuqi New evolution for the technique of exploration and development in complex oil and gas fields [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2003, 30~37
- 李文玉, 戈复兴, 秦锐. 大牛地气田上古生界储集层地震预测方法技术与效果 [C]. 见: 周玉琦. 复杂油气田勘探开发技术新进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 119~126
Li Wenyu Ge Fuxing Qin Rui The seismic prediction of Upper Paleozoic reservoir and its effect in Daniudi gas field Ordos basin [C]. In: Zhou Yuqi New evolution for the technique of exploration and development in complex oil and gas fields [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2003, 119~126
- 李志刚, 郝蜀民, 邢振辉, 等. 鄂尔多斯北部低压低渗气藏保护储集层屏蔽暂堵钻井完井液技术研究及其应用 [C]. 见: 周玉琦. 复杂油气田勘探开发技术新进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 187~193
Li Zhigang Hao Shumin Xing Zhenhui et al The study and application of temporary blocking technique to protect low pressure tight gas reservoir during drilling and well completion in North Ordos basin. In: Zhou Yuqi New evolution for the technique of exploration and development in complex oil and gas fields Beijing Petroleum Industry Press, 2003, 187~193

(编辑 武新民)