

鄂尔多斯盆地榆林区山西组砂岩气藏岩性地震勘探

韩申庭* 杨 华 王大兴 赵玉华
(长庆石油勘探局)

韩申庭等. 鄂尔多斯盆地榆林区山西组砂岩气藏岩性地震勘探. 天然气工业, 1998; 18(5): 10~ 13

摘 要 鄂尔多斯盆地长庆气田榆林区(陕 141 井区)的主要产气层是上古生界下二叠统山西组, 1996 年起地震工作提前介入该区的天然气勘探及井位部署。从高分辨率采集地震资料入手, 重点采取了人机交互折射波静校正和分频处理等 6 项特色技术, 利用测井约束地震高分辨率反演和高阻抗砂岩储层 AVO 分析等 9 项储层横向预测技术, 创立了一套有效的山西组砂岩储层厚度解释及天然气检测技术, 对山₂ 段砂岩储层提供探井井位 14 口, 预测成功率达 85.7%。由此, 盆地上古生界天然气勘探接连获得重要发现和重大进展, 1997 年榆林区提交了相对独立的近千亿立方米的天然气探明和控制储量。

主题词 鄂尔多斯盆地 早二叠世 砂岩 储集层 天然气 地震分辨率 横向 预测 应用 效果

鄂尔多斯盆地榆林区位于陕西省榆林市西侧, 邻近长庆气田东北端, 勘探面积 3 000 km²。1996 年由勘探下古生界转向上古生界, 以下二叠统山西组砂岩储层横向预测为重点, 超前实施地震工作, 加强目标处理与解释, 开展地震、地质综合预测研究, 以实现稀井广探和上古生界天然气勘探的良性循环。

储层地质、地球物理特征及预测可行性分析

1. 地质特征

本区山西组储集层的沉积类型以三角洲平原网状河分流河道砂体为主, 岩性主要为含砾、中粗粒或不等粒岩屑砂岩、岩屑石英砂岩和石英砂岩, 孔隙类型以微孔隙、粒间孔、溶蚀粒间孔、微裂缝为主。其储层物性属低孔低渗致密砂岩, 孔隙度一般为 5%~ 8%, 渗透率一般为 $0.7 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 叠合砂岩体厚 8~ 37 m, 气层厚度一般为 5~ 8 m, 最厚可达 24.7 m, 储层埋深 2 800~ 2 950 m。

2. 地球物理特征及预测可行性分析

整个山西组厚 90~ 110 m, 储层主要发育于山西组二段 (P_{1s}^2), 在北部主要发育一个砂岩层, 南部

由 2~ 4 个砂岩层构成一个复合砂岩体。

P_{1s}^2 砂岩储层属高阻抗砂岩体, 与上部暗色泥岩和下部煤层可分别形成中振幅反射波。研究发现, 地震反演的高阻层厚度与实钻砂岩厚度有着很好的相关性($r = 0.94$)。因此 P_{1s}^2 高阻抗砂岩层的横向预测精度就相对较高, 可采用常规剖面波形识别和高分辨率反演技术相结合对储层的厚度进行横向预测。

山西组气层电性特征归纳起来为“三低二高一”, 即低自然伽马、低密度、低补偿中子, 高电阻率、高波阻抗, 大自然电位幅度。虽然个别井钻遇单气层厚逾 20 m, 但据该区 10 余口井测井解释资料统计, 单气层平均厚度为 6 m。按振幅强弱可识别的最小厚度 $N/8$ 计算, 地震主频需达 100 Hz 以上方能识别上述厚度, 这与陕 143 井用 30~ 150 Hz 里克子波作模型检测气层厚度所需地震主频的结果一致, 所以气层的检测难度很大。分析计算鄂尔多斯盆地仅有的 3 口测到上古生界井的 CSU 测井资料, 山西组含气砂岩与含砂泥岩、泥岩和煤层的泊松比差值还是很大的(0.10~ 0.20)。因此可充分利用陕 141 井区山西组含气砂岩与周围地层泊松比差值大、储层

* 韩申庭, 1944 年生, 高级工程师; 1967 年毕业于原北京石油学院物探专业; 长期从事地震勘探的研究和管理工作, 曾获部级一、三等奖和局级奖励, 现任长庆石油勘探局勘探处处长。地址: (710021) 陕西省西安市未央区兴隆园。电话: (029) 3500360。

反射易于追踪对比的特点,采用高阻抗 AVO 分析法进行储层钻前含气性预测。

储层横向预测技术

通过实践,已初步总结形成了一套山西组高阻抗储层横向预测流程,其主要内容是:以高分辨率地震采集技术和目标处理技术为基础、岩性反演技术(STRATA、ANN、RM 等)为骨干、砂岩体综合解释技术为核心,将高阻抗微降法与高阻抗砂岩储层 AVO 分析法相结合进行钻前含气性检测。采取的关键技术如下。

1. 储层反射波波形特征分析

以太原组厚煤层顶部反射波为标准,标定山西组砂岩储层反射,并依据 4 类砂岩储层反射波形与储层厚度的关系,建立 4 种解释模式。

2. 匹配处理

通过该项处理使二维主测线与相交测线,井旁地震道与合成记录达到最佳拟合。

3. 拟 P 波叠加

由此可获得纵波的正入射波形剖面。常规多次覆盖水平叠加技术得出的振幅值是不同炮检距的振幅叠合,用它近似为零炮检距处的振幅肯定有一定误差——C. L. Liner(1997)认为此误差可达 30% 左右(石景:关于波阻抗反演问题的讨论,1997),由此反演的波阻抗剖面也存在着一定的误差。由拟 P 波叠加技术得到的零炮检距反射系数真实地反映了岩层界面两侧的波阻抗变化。陕 141 井区 1997 年提供井位的地震测线均采用了此项技术,提高了地震预测的精度。

4. 测井约束地震反演

这是一种基于模型的高分辨率迭代反演技术。用高分辨率测井资料建立初始波阻抗模型,通过合成地震剖面与实际地震剖面的误差分析,采用最优化合共轭梯度法,不断修正初始波阻抗模型,将最终的模型与初始模型按给定的权值合成为反演输出的结果。据此,在陕 141 井区可定量预测 8 m 以上的砂岩层厚度。

5. 测井—地震自适应联合反演

由此实现了高分辨率多地层参数(速度、泥质含量等)剖面的直接反演。以测井参数(曲线)作为反演目标,地震数据(道)作为待反演的原始数据,在地震标准反射层或标定层的约束下,应用人工神经网络技术建立测井与地震两类数据体的相互映射或联

想的基本网络模型和组合系统,实现高分辨率多地层参数如速度、密度、孔隙度、泥质含量等剖面的 STRATA、PARM 及 WSI(ANN)直接反演。

6. 地震约束井间岩性模拟

可进行岩性剖面模拟或气藏剖面建造。把 STRATA 高分辨率的波阻抗反演剖面输入 RM 包中做时—深转换,在深度域波阻抗反演剖面背景下,结合钻井地质沉积相分析,进行 RM—STRATA 地震约束井间岩性剖面模拟或气藏剖面建造。在陕 141 井区,结合岩性反演预测的砂岩体平面分布,可在三维空间上立体描述山西组砂岩储集体的空间展布形态。

7. 吸收系数计算

用于定性判断储层的含气性能。吸收系数可用于岩性解释和油气预测及地震资料处理中的衰减补偿。其主要特点包括:①吸收系数具有一定的分辨率和单一性,许多岩石物理研究成果表明,不同岩性其吸收系数最大可相差两个以上数量级;②岩石的吸收系数与岩石的含砂量以及孔隙率有着密切的关系,即岩石的含砂量越高或孔隙率越大,则吸收系数越大;③砂岩的吸收系数比泥岩和石灰岩的大。

通过对比陕 141 井区 L95953 测线 P_{1s}^2 视吸收系数剖面与该测线常规水平叠加剖面发现,吸收系数大于 0.4 的范围与该区探明的含气区带基本相符。

8. 高阻抗微降法含气性检测

用于定性判断含气储层的发育程度。陕 141 井区 P_{1s}^2 砂岩储集体属高阻抗砂岩,流体对纵波速度的影响小,气层与非气层间的平均速度差只有 100 ms 左右。据 Biot—Geertsma 理论公式计算和实验测定的结果,纵波速度与砂岩含气饱和度不呈线性关系^[1],只含有少量天然气的砂岩波速降低与高含气饱和度的砂岩波速降低并无明显差别,对于埋深近 3 000 m 砂岩基质骨架(含砾石英砂岩)速度高的储层更是如此。高阻抗微降法就是在反演波阻抗剖面解释的高阻抗砂岩层中寻找波阻抗稍微下降的低阻抗带,作为含气储层发育的证据。该方法简单直观,但无法区分高阻抗砂质泥岩、泥质砂岩和含气砂岩储层。对陕 141 井区最先提供的 5 口井,以此法作为检测含气性的手段,获工业气井成功率为 60%。

9. 高阻抗砂岩储层 AVO 分析法

在超 CDP 道集上寻找极性反转点,根据其出现的炮检距大小,可半定量预测储层的含气性。用入射角与反射系数间的关系来估计介质的弹性参数(P

波速度、S 波速度和密度) 是由 Zoeppritz 方程给定的。80 年代以来国内外学者对该方程作了简化, 虽然这些公式不能简明扼要地说明反射系数与物性的直接关系, 但却是 AVO 分析处理模块中常用的公式。对此, 1990 年 Fred Hilterman 对物探界普遍使用的 Shuey 公式作了修正^[2]。修正后的公式, 简明地反映了反射系数与波阻抗差值和泊松比差值的物理关系, 即: 法线入射反射系数 $[R(0)]$ 与界面两侧泊松比差值($\Delta\delta$) 符号同向时, 入射角(θ) 增大, 不同入射角下的反射系数 $[R_c(\theta)]$ 增大; $R(0)$ 与 $\Delta\delta$ 符号反向, $\theta = \theta_0$ 时, $R_c(\theta_0) = 0$, 亦即入射角为 θ_0 时发生极性反转。

高阻抗含气砂岩的理论 AVO 响应模型研究表明, 在一定法向入射反射系数和泊松比差值的砂岩界面上会出现振幅随炮检距增大而减小, 并在一定

的炮检距处发生极性反转的现象^[3]。结合陕 141 井区山西组砂岩石英含量高、含气饱和度高的特点, 设计出砂岩底界面上、下物性参数模型, 计算出了一组砂岩底界面反射系数随泊松比差值和入射角的变化曲线簇(见本期潘存焕文章图 3), 表明本区出现极性反转的入射角为 30° 左右(炮检距为 2 000 m 左右), 对于中间放炮 5 km 排列观测系统也是可以观察到的。

1997 年用高阻抗砂岩 AVO 分析法结合高阻抗微降法, 再配合高分辨率岩性反演, 提供井位。完钻 9 口井有 7 口获工业气流(表 1), 另 2 口钻遇气层厚度分别为 6. 8 m 和 11 m, 预计通过试气也可获得工业气流。陕 141 井区应用 AVO 技术预测收到了明显的效果, 表明这种方法在山西组高阻抗砂岩的含气性检测中有推广应用的价值。

表 1 陕 141 井区山西组砂岩地震提供完钻井位效果分析表(以 P_{1s}^2 为目的层) m

提供井位	地震预测 砂岩厚度	实钻砂岩 厚度	厚度预测 误差	天然气 检测方法	试气结果	预测失败原因
陕 143	26	27	+ 1	高阻微降法	工业气井	测线头, 跨相带约束反演横向井距太大 原始记录质量差, 砂岩层含泥质成分多
陕 118	21	23	+ 2	高阻微降法	工业气井	
陕 119	20	16	- 4	高阻微降法	工业气井	
陕 201	17	2	- 15	高阻微降法	气显示井	
陕 202	17	8	- 9	高阻微降法	气显示井	
陕 117	18	14	- 4	高阻抗 AVO	工业气井	
陕 203	20	22	+ 2	高阻抗 AVO	工业气井	
陕 116	20	18	- 2	高阻抗 AVO	工业气井	
陕 205	30	37	+ 7	高阻抗 AVO	工业气井	
陕 211	34	37	+ 3	高阻抗 AVO	工业气井	
陕 207	35	37	+ 2	高阻抗 AVO	工业气井	
陕 212	20	6	- 14	高阻抗 AVO	工业气井	
陕 208	30	32	+ 2	高阻抗 AVO	气层 11 m 待试	
陕 213	18	8	- 10	高阻抗 AVO	气层约 7 m 待试	

地震横向预测的主要地质成果

(1) 查明了陕 141 井区山西组砂岩储集体的展布特征。 P_{1s}^2 主砂岩体形态呈南北向延伸, 厚 15 m 以上的砂岩体南北贯通, 厚 20 m 以上的砂岩体北宽南窄。局部地区多期河床垂向叠加, 形成厚度大于 35 m 的巨厚砂岩体(南区和北区均已被钻井所证实)。反映了这一大型网状河三角洲沉积体系河流从分流到汇聚, 多期交错发生, 沉积的砂体在垂向和

侧向不断加积叠合, 由北到南其三角洲平原沉积逐渐向前缘和湖区推进。

(2) 依据山西组砂岩储层的反射波波形特征, 参考砂岩体波阻抗特征属性, 结合地质测井综合评价结果划分出了有利的含气储集带。1996~ 1997 年有利含气带共提供 15 井位口, 现已完钻 14 口井。

(3) 1997 年在该井区山西组提交天然气探明和控制储量 $949. 6 \times 10^8 m^3$, 首次在鄂尔多斯盆地上古生界拿下了一个大型的复合圈闭气藏。

地震横向预测的效果分析

陕 141 井区山西组储层的地震横向预测是一项高保真度、高信噪比、高分辨率地震勘探野外采集、资料处理、特殊处理和岩性解释四大环节联系为一个整体的系统工程。资料处理中,在认真搞好各项基础工作的同时,针对陕 141 井区原始资料的特点,重点采取了人机交互折射波静校正和分频剩余静校正及分频叠加等特色技术;特殊处理应用了以测井约束的地震高分辨率波阻抗反演为主、拟 P 波叠加和叠前超道集 AVO 处理为辅等五项高新技术;岩性解释采用了地震叠前、叠后的相关数据体分析,高阻抗储层 AVO 分析及测井、地震、地质综合一体化等五项综合研究技术,其突出特点是从各类成果资料的综合,逐渐发展到对原始资料的综合处理,这是国内外储层综合研究的最新趋势。

这四大环节关键技术及措施的实施,有力地保证了陕 141 井区地震资料的质量,整体上提高了储层横向预测的可信度和精度。陕 141 井区从提供陕 143 井开始,利用储层横向预测的 9 项技术,特殊反演处理资料 99 条测线 2 805.4 km。针对 P_{1s}^2 砂岩储集体,依据地震资料提供探井井位 15 口(其最小井距 5 km,最大井距 13 km),完钻井 14 口(表 1),取得了如下的效果:①地震提供井位的钻探成功率达 85.7%。其中陕 211 井获井口产量 $32.054 \times 10^4 m^3/d$,无阻流量 $70.543 \times 10^4 m^3/d$ 的高产气流;6 口井获 $10 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4 m^3/d$ 的工业气流;3 口井获 $2 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 m^3/d$ 的工业气流;2 口正试气井,砂岩层厚 7~37 m,气层厚 7~11 m,预计可获工业气流;只有 2 口井因定在测线头及建模时沉积相

带变化未预料到而失败。②在山西组提交天然气探明和控制储量 $949.6 \times 10^8 m^3$ 。

结 论

- (1)在陕 141 井区上古生界天然气勘探中,推广以“三小、三高、两个一致”为主要特点的高分辨率采集技术,并结合毛乌素沙漠及无定河流域复杂地表的实际情况,采用了因地制宜、灵活多变的施工方法和严格的质量监控,提高了第一手资料的质量和可信度。
- (2)对新老资料均采用统一的高分辨率处理流程,针对原始资料的特点,重点采取了人机交互折射波静校正和分频处理等六项特色技术,为后续特殊处理及岩性解释提供了可靠、有力的保证。
- (3)在陕 141 井区应用以储层反射波型特征分析、测井约束地震反演和 AVO 分析为代表的九项储层横向预测技术,创立了一套有效的山西组砂岩储层厚度解释及天然气检测技术,发现并落实了东胜—靖边三角洲和刀兔—榆林西三角洲。

参 考 文 献

1 殷八斤等. AVO 技术的理论与实践. 北京:石油工业出版社,1995

2 Hilterman Fred J. AVO 是岩性的地震特征吗. 见:美国勘探地球物理学家学会第 59 届年会论文集. 北京:石油工业出版社,1991

3 郭同翠译. 高阻抗砂岩储层的 AVO 分析. 国外油气勘探, 1996;(8)4

(收稿日期 1998-04-13 编辑 居维清)

ABSTRACTS AND AUTHORS

PROCESSING AND INTERPRETATION TECHNIQUES OF THE GAS-BEARING SAND BODY COMPREHENSIVE PREDICTION OBJECTIVES IN THE UPPER PALEOZOIC IN EERDUOSI BASIN AND THEIR APPLICATION

Pan Cunhuan, Guo Zhongming, Wang Daxing and Xia Zhengyuan (Exploration and Development Research Institute of Changqing Petroleum Exploration Bureau). *NAT UR. GAS IND.* v. 18, no. 5, pp. 5~ 9, 9/25/98. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

ABSTRACT: The gas-bearing sand bodies in the Upper Paleozoic in Eerduosi Basin belong to the distributary channel deposits of lake delta plain, being of the properties of low porosity, low permeability and high impedance. In accordance with such a geological objective, 4 categories(15 items) of the methods and techniques were developed and summarized, and the processing and interpretation technical series of the gas-bearing sand body comprehensive prediction objectives in the Upper Paleozoic in Eerduosi Basin were set up. In the series, by taking the objective-oriented large comprehensive database as the basis, the computer technique as the means, and the processing and interpretation techniques of seismic formation lithology as the core, the organic combination of multiple disciplines as geology, well logging and seismics and the processing-interpretation integration under the same geological objective are realized. Under the guidance of AVO theory, on the basis of information theory a new logging-constrained multi-parameter inversion technique is proposed, which may avoid the lithologic interpretation errors caused by decrease of impedance of the gas-bearing sandstone. The lithology of seismic high impedance formation can be effectively identified by use of AVO property response caused by different lithological Poisson ratios. Under the encouragement of practical drilling benefits, a step-by-step deep going property description is carried out for the objective sandstone reservoirs by use of a rolling mode processing-interpretation method and other techniques. Through the examination of drilling, it is shown that the spacial distribution of the sandstone reservoirs with a thickness of about 10 meters can be precisely predicted by the technical series. The coincidence ratio of predicting the sand bodies is more than 70% and the drilling success ratio is up to 81. 8%.

SUBJECT HEADINGS: Eerduosi Basin, Late Palaeozoic

Era, Gas bearing sandstone, Sand body, Prediction, Seismic data processing, Seismic interpretation, Seismic model, Synthetic seismogram.

Pan Cunhuan(*female, senior engineer*), born in 1947, graduated from Daqing School of Geology in 1967. Add: Xinglong Yuan, Weiyang, Xi'an, Shaanxi(710021) , China

.....

LITHOLOGICAL SEISMIC EXPLORATION FOR THE SANDSTONE RESERVOIRS IN SHANXI FORMATION OF THE LOWER PERMIAN AT YULIN REGION IN EERDUOSI BASIN

Han Shenting, Yang Hua, Wang Daxing and Zhao Yuhua(Changqing Petroleum Exploration Bureau). *NAT UR. GAS IND.* v. 18, no. 5, pp. 10~ 13, 9/25/98. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

ABSTRACT: The main gas-bearing formations at Yulin region(well-Shaan 141 area) of Changqing gas field in Eerduosi Basin are the high impedance sandstone reservoirs in Shanxi Formation, Lower Permian, Upper Paleozoic. The seismic works were beforehand involved in the natural gas exploration and well location disposition at the region in 1996. On the basis of the high-resolution acquisition of seismic data, a set of techniques of effectively interpreting the thickness of the sandstone reservoirs in Shanxi Formation and detecting the natural gas in them are founded through emphatically adopting 6 items of characteristic techniques as the interactive refraction wave static correction and frequency division processing, etc. , and applying 9 items of reservoir lateral prediction techniques as the logging-constrained seismic high-resolution inversion and high-impedance sandstone reservoir AVO analysis, etc. 14 locations of exploration wells were provided for the sandstone reservoir of the second member of Shanxi Formation and the prediction success ratio was up to 85.7%. Because of this, some important discoveries and significant advances have been obtained in natural gas exploration in Upper Paleozoic in the basin and the proved and controlled gas reserves of near $1\,000 \times 10^8 \text{m}^3$ were found at Yulin region in 1997.

SUBJECT HEADINGS: Eerduosi Basin, Early Permian Epoch, Sandstone, Reservoir, Natural gas, Seismic resolution, Lateral, Prediction, Application, Effect.