

# 榆林气田山<sub>2</sub>段气藏描述技术及应用

孙小平 徐文 黄有根 姬鹏程 张彦琳

(中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院)

孙小平等. 榆林气田山<sub>2</sub>段气藏描述技术及应用. 天然气工业, 2005; 25(4): 53~56

**摘要** 在榆林气田的地质研究中, 首先提出了山<sub>2</sub>段三分的小层划分方案, 指出了山<sub>2</sub><sup>3</sup>砂体稳定分布为气井获得高产的物质基础, 并以此为主要目的层段分析了砂岩储层孔隙发育的控制因素, 指出砂岩中高石英含量是形成榆林气田山<sub>2</sub>低孔高渗储层关键因素, 而以粒间孔、粒间溶孔及高岭石晶间孔为主的特殊的孔隙组合方式是形成高渗储层的主要因素之一。针对榆林气田沙漠和黄土塬的地表条件复杂性, 形成了以波形归纳分析、Strata反演等储层厚度预测为主, AVO分析、吸收系数等含气性检测为辅的山<sub>2</sub>段含气砂岩横向预测技术系列。储层地质建模以GRIDSTAT和GMSS为软件平台, 将确定性地质建模和随机建模方法相结合, 建立了储层参数和构造三维模型。通过山<sub>2</sub>段气藏精细描述, 先后优选开发目标区块6个, 提供开发井位120余口, 已实施井钻井成功率达到了85%以上, 应用效果良好。

**关键词** 榆林气田 早二叠世 气藏描述 储集层 地质评价 模型

## 一、地质概况

鄂尔多斯盆地隶属于华北地台的一部分, 其中石炭—二叠系成气系统属海陆过渡相沉积的煤系地层。晚石炭世早期, 由于祁连—中亚海槽的再度拉开, 盆地区域性下降, 在奥陶系区域分化侵蚀面上开始接受沉积。经历了本溪期、太原期后, 在华里西末期, 由于南北海槽再度对挤夹击, 海水被迫退出该区, 从而结束了早二叠世太原期海相沉积, 进入早二叠世山西期、中二叠世下石盒子期的陆相沉积, 形成了以早二叠世山西组和下石盒子组为主要含气层的石炭—二叠系成气系统。榆林地区的山西组山<sub>2</sub>储层就是在这样的背景下形成的。

榆林气田位于鄂尔多斯盆地东北部, 行政区划属于陕西省榆林市和横山县境内, 面积约8500 km<sup>2</sup>。在榆林区内, 地形东北高、西南低, 地面海拔一般在950~1400 m之间。山西组山<sub>2</sub>段是榆林气田的主要产气层段, 主要沉积的是一套浅灰色中—粗粒石英砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑砂岩及细砾岩、灰黑色泥岩及煤层, 厚度一般为40~60 m, 气层埋深2650~3100 m。依据沉积旋回和砂体发育特征, 可将山西组山<sub>2</sub>段从下而上划分为山<sub>2</sub><sup>3</sup>层、山<sub>2</sub><sup>2</sup>层、山<sub>2</sub><sup>1</sup>层等3个小层。

## 二、砂体解剖技术

### 1. 沉积体系与沉积微相划分

岩心、野外剖面观察以及室内岩石薄片鉴定和测井相分析表明, 榆林气田山<sub>2</sub>段属辫状河三角洲沉积体系, 由辫状河三角洲平原、三角洲前缘亚相组成, 且以发育辫状河三角洲平原为主。三角洲平原亚相进一步可划分为河底滞留沉积、心滩、分流河道、天然堤、洪泛盆地和河漫沼泽等7种微相类型, 其中以心滩、河道填积、洪泛盆地、河漫沼泽4种微相为主要微相类型。辫状河三角洲前缘亚相由水下分流河道、河口砂坝、水下支流间湾等3种微相组成。

### 2. 沉积相分布特征

心滩微相主要表现为砂岩粒度粗, 砂岩颜色以灰白色、褐灰色为主, 沉积构造以大型槽状交错层理为主, 并可见楔状和板状交错层理、块状构造; 单砂体厚度大, 沉积层序具正粒序或多个正粒序砂岩相互叠置, 砂岩层间细粒岩夹层薄。在榆林区心滩微相总体呈南北向大小不一的孤立的舌形、心形分布。

河道填积沉积分布于心滩沉积之间和周围, 主要表现为砂岩粒度比较粗, 沉积构造多见砂丘迁移形成的各种交错层理, 有时在砂岩顶部可见小波浪层理; 单砂体厚度一般大于2 m, 叠合厚度分布范围

**作者简介:** 孙小平, 女, 1970生, 工程师; 1994年毕业于石油大学(华东); 现从事天然气开发地质研究工作。地址: (710021) 陕西省西安市长庆兴隆园小区。电话: (029) 86594832。E-mail: sxp\_cq@petrochina.com.cn

10~25 m。沉积层序主要为正粒序或多个正粒序的叠加,河道充填沉积在榆林区南北部呈带状分布。

### 3. 含气砂体地震预测技术

针对榆林气田沙漠和黄土塬的地表条件复杂性、低孔低渗河流三角洲相砂岩气藏的隐蔽性等特点,地震资料叠前目标处理重点采取了交互折射波静校正及分层分频和多次迭代剩余静校正技术、多域信噪分离技术、地表一致性处理技术,为后续岩性反演处理和解释提供了高保真度、高信噪比和高分辨率的地震叠加资料。储层横向预测在层位精细标定的基础上,利用波形波组特征定性分析储层特征,采用地震递归反演—SeisLog反演、测井约束反演—Strata反演、模拟退火反演—ISIS反演、带限波阻抗反演等技术进行储层厚度定量预测,然后运用储层反射振幅的“亮点”法、吸收系数、多参数约束联合反演、AVO分析等技术进行含气性检测,取得了良好效果。

### 4. 山<sub>2</sub>段砂体空间展布

榆林区 175 口井砂体统计表明(表 1),山<sub>2</sub>段以山<sub>2</sub><sup>3</sup>小层砂体最为发育,山<sub>2</sub><sup>2</sup>层次之,山<sub>2</sub><sup>1</sup>层规模最小,山<sub>2</sub><sup>3</sup>层砂体在横向上有着很好的连续性,气层分布稳定,是榆林区主要储集砂体。

表 1 榆林气田各小层砂体厚度及钻遇率统计表

层位	厚度 (m)			钻遇率 (%)	钻遇砂体井数(口)	钻遇地层井数(口)
	最大	最小	平均			
山 <sub>2</sub> <sup>1</sup>	15.8	0.9	5.7	51.4	90	175
山 <sub>2</sub> <sup>2</sup>	21.3	0.7	6.3	70.3	122	175
山 <sub>2</sub> <sup>3</sup>	25.9	1.0	10.1	87.4	153	175

平面上,山<sub>2</sub>段砂体沿近南北向呈带状分布。榆林区内主要发育三支砂带,宽 6~15 km,砂岩累积厚度一般在 10~25 m。其中,以榆林气田中部主砂带最为发育,厚度多在 20 m 以上,最厚达 43.4 m。榆林南区三条大砂带交汇、分流,形成了沿东西向呈宽带状展布的砂体群。

## 三、储层精细评价技术

### 1. 储层岩矿组合特征

岩矿分析表明,榆林气田山<sub>2</sub>段砂岩储层的碎屑成分以石英为主(包括燧石、石英岩岩屑),其次为岩屑成分,长石含量很少,平均不足 2%。从山<sub>2</sub><sup>1</sup>—山<sub>2</sub><sup>3</sup>层石英颗粒平均含量逐渐增加,岩屑含量逐渐减少,岩屑组分以火成岩屑、变质砂岩、粉砂岩、云母及中浅变质的片岩、千枚岩、板岩为主,少量的钙化

和泥化碎屑。石英砂岩主要分布在山<sub>2</sub><sup>3</sup>层,石英颗粒的平均含量在 90% 以上,岩屑砂岩主要分布在山<sub>2</sub><sup>2</sup>和山<sub>2</sub><sup>1</sup>层。

从榆林地区山<sub>2</sub>段砂岩石英—岩屑—杂基组分图(图 1)中可以更直观地看出,从山<sub>2</sub><sup>1</sup>—山<sub>2</sub><sup>3</sup>层石英含量逐渐增加、岩屑和杂基含量逐渐减少变化趋势。

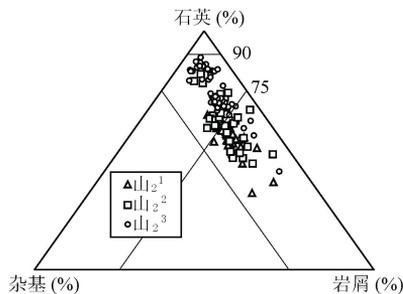


图 1 榆林地区山<sub>2</sub>段砂岩石英—岩屑—杂基组分图

### 2. 物性分布特征

据榆林气田 2000 余块岩心分析孔、渗数据统计分析,山<sub>2</sub>段储层孔隙度一般为 4%~10%,平均孔隙度 6.2%;渗透率一般为  $(0.2\sim 20)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均为  $8.865\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (去掉渗透率大于  $100\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  的 36 块样品,平均渗透率为  $4.521\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ )。渗透率分布表现出双峰态特征,渗透率大于  $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  样品分布频率占 45.6%。

### 3. 孔隙类型及孔隙结构特征

榆林区山<sub>2</sub>储层段 153 块砂岩铸体薄片的统计表明,不同岩性储层孔隙组合方式不同,平均孔径和面孔率也有很大差别。石英砂岩以粒间孔为主,其次为晶间孔和粒间溶孔,面孔率最大为 11.5%,平均 5.0%;岩屑石英砂岩以晶间孔—溶蚀孔组合方式为其特征,只有极少部分储层为晶间孔—粒间孔型,面孔率最大为 8.2%,平均 3.1%;岩屑砂岩以岩屑溶孔最为发育,其次为晶间孔,面孔率最大为 6.0%,平均 2.5%。

山<sub>2</sub>段石英砂岩压汞曲线和岩屑砂岩压汞曲线形态有着显著的差别(图 2),石英砂岩压汞曲线斜度小,且具有较宽的曲线平台,排驱压力值较低,一般为 0.02~0.18 MPa,喉道中值半径大部分分布在 0.89~3.98  $\mu\text{m}$ ,最大可达 15.12  $\mu\text{m}$ ,变异系数分布在 0.29~0.5 之间,反映了石英砂岩储层大孔喉、粗歪度、孔隙结构相对较好的特点。而岩屑砂岩压汞曲线斜度大,无明显的曲线平台。

### 4. 储层参数测井精细评价技术

传统测井解释采取分区块、按层段建立模型的

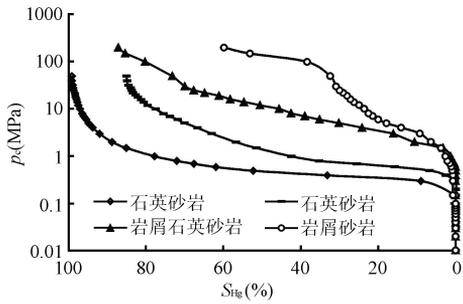


图 2 不同砂岩储层典型毛细管压力曲线图

办法解决非均质问题,其前提是认为同一区块或层段的储层是均质的,或其不均质性可以用线性方式进行描述。在低渗透储层中这一问题变得复杂化,主要原因是储层的宏观和微观非均质性大大超过了“区块”或“层段”所表述的储层单元界限。为了解决这一问题,在山<sub>2</sub>气层测井评价中,采用了 ELanPlus 方法。

ElanPlus 是 GeoFrame 软件平台上的测井精细处理解释软件,它采用优化的模型组合技术进行测井评价。其原理是将各种测井响应方程联立求解,计算各种矿物和流体的体积。利用优化技术,通过调节各种输入参数,如矿物测井响应参数,输入曲线权值等,使方程矩阵的非相关性达到最小,最后通过运算得到储层参数。

#### (1) 饱和度计算

ElanPlus 采用印度尼西亚方程计算地层含水饱和度。含水饱和度的计算涉及到地层水电阻率和岩电参数等关键数据。山<sub>2</sub>段的地层水电阻率取值  $0.05 \Omega \cdot m$ 。岩电参数根据岩心测试结果分岩屑砂岩、石英砂岩两种类型分别选值。

石英砂岩:

$$a=1, m=4.751\varphi+1.3586, b=0.93, n=1.26$$

岩屑砂岩:

$$a=1, m=4.751\varphi+1.3586, b=1.15, n=1.87$$

利用上述方法计算得到含水饱和度与压汞、相对渗透率、密闭取心等结果对比,三者之间误差最大不超过 5%。测井解释榆林气田山<sub>2</sub>段石英砂岩气层的含水饱和度在 70%~85%,岩屑砂岩为 50%~65%。

#### (2) 渗透率计算

采用 HERRON 公式计算基质孔隙渗透率 ( $K_{基}$ ):

$$K_{基} = \frac{10^4 \varphi_{有}^3}{(1 - \varphi_{有})^2} \exp\left(\sum B_i M_i\right)$$

式中:  $M_i$  为固体岩石中每种矿物的重量含量;  $B_i$  为每种矿物的渗透率常数;  $\varphi_{有}$  为有效孔隙度。

渗透率 HERRO 解释模型将储集层中矿物成分与渗透率建立关系,它的优点是可操作性强,适用范围广,稳定性好。

## 四、地质建模

气藏描述是对特定的气藏地质特征进行抽象与概括,其最终目标是建立定量气藏地质模型,即对该气藏的整体形态、地质结构、物性参数、流体分布等本质特征按比例缩影,是气藏模拟研究的基础。

### 1. 建模思路

地质模型是指有效储层特征及其所含流体在油气藏三维空间中分布和变化的综合表述。建立地质模型实际上是从研究气藏原始资料开始,并将各种可利用信息综合起来,将分散的井点资料形成剖面的、平面的以及立体的三维系统,最终形成所需要的地质模型。其中,井间地质参数预测是建模的核心。

### 2. 地质模型建立

#### (1) 构造模型

构造模型的三维数据体为各层面的海拔高度。这一数据体描述了储层的空间形态,反映出储层整体构造(低缓背斜)与局部构造,可以推演出砂体分布及地层厚度展布。彩色图版 8 是榆林气田南区山西组三维构造图,从图中看出,榆林南区山西组构造形态为一东高西低的西倾单斜,构造变化比较平缓,多排小幅度的鼻隆呈北西南东向展布。

#### (2) 储层参数模型

1) 建立井模型。逐井分小层准备好测井测井解释数据,包括孔隙度、渗透率和含水饱和度,依据砂体的形态,建立单井模型。非储层点物性数据取 0 值,有效点取真实物性数据。

2) 建立层模型。井模型得到的统计指标是按单井分小层给出的,把这些统计指标按小层平面插值,赋给划定的小层平面网格系统,即建立了层模型。

3) 建立参数模型。就是依据层模型的物性统计特征值逐网格进行随机模拟赋值,最终形成测井分辨率级的物性网格参数场。砂体厚度展布、有效厚度、孔隙度、渗透率和饱和度分布认识比较明确,可以采用克里金方法建立确定性模型。彩色图版 9 为榆林南区山<sub>2</sub>气层厚度模型。模型分析表明,其气层分布主要受中粗粒石英砂岩控制,二者分布形态、变化趋势及其相似,石英砂岩发育区域,气层厚度大、物性好,石英砂岩不发育区,气层厚度薄、物性较差。

## 五、应用效果

在榆林气田南区天然气开发进程中,通过开展山<sub>2</sub>段气藏精细描述,先后优选开发井位122口,目前已实施98口,完试井89口,其中,百万立方米井5口,工业气井70口,钻井成功率达到86.5%。榆林南区天然开发取得了储量和产能双丰收,探明地质储量由开发初期的 $203 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $877.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,形成了 $12.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气年生产能力。

## 六、认识和结论

(1)榆林气田山西组山<sub>2</sub>段储层最为发育。根据层序界面界定和砂岩沉积特征,山<sub>2</sub>段由下而上可以细分为山<sub>2</sub><sup>3</sup>、山<sub>2</sub><sup>2</sup>和山<sub>2</sub><sup>1</sup>层三个砂层组,山<sub>2</sub><sup>3</sup>为主力产气层段。

(2)沉积相分析表明,榆林气田山<sub>2</sub>段为河流控制的辫状河三角洲沉积,分流河道砂体极为发育,向南延伸较远,河道的频繁摆动和迁移,形成垂向重复叠置,平面上大面积分布的砂体群。

(3)中—粗粒石英砂岩控制着有效储层的分布。储层研究表明,高石英含量是形成优质储层的基础,

低孔高渗是其主要特征,石英类矿物较强的抗压能力和烃类的早期充注是原始粒间孔保存的主要因素,石英砂岩发育区为有利开发目标区。

(4)从地质统计学的角度,充分运用地质研究和气藏描述成果,形成了包括构造模型、气层厚度和物性参数模型,为井位优选的提供参考依据,为动态跟踪分析和气藏数值模拟研究提供了网格参数场模型。

### 参 考 文 献

- 1 王允诚等.气藏精细描述.四川成都:四川科技出版社,2002
- 2 赵澄林等.中国天然气储层.北京:石油工业出版社,1999
- 3 于兴河等.碎屑岩系油气储层沉积学.北京:石油工业出版社,2002
- 4 吴胜和等.油气储层地质学.北京:石油工业出版社,1998
- 5 裘亦楠等.油气储层评价技术.北京:石油工业出版社,1994

(收稿日期 2005-01-18 编辑 韩晓渝)