

文章编号: 1009-6248(2002) 03-0106-07

鄂尔多斯盆地地下古生界气藏地质建模技术

康 贤

(长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 针对鄂尔多斯盆地中部气田下古碳酸盐岩储层非均质性强的主要矛盾, 以随机模拟建模为主要方法, 对该区地质研究和气藏描述成果进行定量化转变, 形成了包括构造模型、物性模型和流体分布模型的鄂尔多斯盆地地下古碳酸盐岩整体地质模型。以此模型为基础, 进行储量的风险估计、归纳气井产能与地质情况的关系、提供井位优选的参考依据及提供气藏数值模拟的网格参数场。

关键词: 地质模型; 储层; 非均质

中图分类号: TE19 文献标识码: A

1 建模区地质背景及资料

所研究的建模区是鄂尔多斯盆地中部在奥陶世马家沟期沉积的一套碳酸盐岩储层, 属海相沉积, 分布面积广而连片, 但在沉积后期, 地层遭受了漫长的风化剥蚀作用, 形成了复杂的风化壳地貌, 沟槽切割造成了储层空间分布的非均质性, 复杂的成岩环境造成了储层物性的局部非均质性。建模区特殊的地质背景要求地质建模方法有其特殊性。

鄂尔多斯盆地中部气田建模以主力气层马五₁为对象, 建模区是中部气田先期探明的区块, 可引用资料的探井 80 多口, 建模区面积约 2 000 km²。

建模所依据的地质资料有:

(1) 马五₁底部凝灰岩(k₁)构造图。这是一张依据地震资料所作的气藏底面构造图, 是建立构造模型的基础。

(2) 马五₁4 个小层的边界线图。包含了地质结合地震研究所给定的各小层尖灭线及潜沟、潜坑造成地层缺失的形状与面积。

(3) 井眼小层分层数据。包括各小层顶界深度、底界深度、补心海拔、井位坐标等, 这些数据用于建立构造模型。

(4) 储层段测井解释的孔隙度、渗透率、含水饱和度结果数据。数据按测井分辨率给出(每米 8 个点), 与深度坐标对应。该数据用于建立储层物性模型。

(5) 根据气井产水情况标定的地层条件下可动气体积百分数。不产水的有效段取值 100%,

收稿日期: 2002-02-04; 修回日期: 2002-05-13

作者简介: 康贤(1955-), 男, 陕西乾县人, 1982年毕业于成都地质学院, 长期从事数学地质、储层建模等方面的研究工作和计算机应用方面教学工作。

产水的有效段取值由气水比换算给出。该数据用于建立流体分布模型。

2 地质模型

鄂尔多斯盆地中部气田下古马五₁储层分为4个小层。根据储层非均质性强的特征,模型的重点是定量描述层间非均质性和层内非均质性。分别建立气藏的构造模型、储层物性模型和流体分布模型。研究之初,气田正式试采资料很少,适宜建立储层的静态模型^[1]。这种模型要求把气藏地质面貌依据资料控制点实测数据加以如实描述,并不追求局部之预测精度,而是着眼整体分布规律。利用静态模型,可以从宏观上定量把握气藏整体物性及流体分布;筛选高产富集区块,提供井位优选的参考依据;分析单井产能与地质因素间的定量关系;结合试井资料确定气井附近地质结构;定量研究储层非均质性;为数值模拟提供网格参数场以便进行动态预测;进行开发方案优化设计等。

各类模型的表现形式为储层空间网格化后的三维数据体。

2.1 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(鼻隆鼻凹),可以推演出储层沟槽分布及地层厚度展布。构造模型三维数据体的形成步骤如下:

(1) 把凝灰岩构造图数字化,给网格系统的第一层赋对应点上的 k_1 海拔高度值。

(2) 把小层边界图及地层缺失面积线图数字化。

(3) 依据各井点所处网格的凝灰岩海拔高度、小层厚度及边界沟槽点之坐标,确定这些控制点上4个小层顶面之海拔值。

(4) 对这些控制点利用5次曲面拟合分别形成各小层顶面海拔高度的网格值。

图1是建模区构造模型的三维形态图。

2.2 物性模型

储层建模的关键技术是如何根据已知资料内插、外推井间及外围储层物性参数。目前采用的建模方法有两类,一类是确定性方法,如克里金方法、手工作图等;另一类是随机建模方法,该方法承认地质参数的分布及人的认识都具有随机性,建模中不直接应用控制点资料本身,而是按控制点在储层空间的方位得到空间分布特征,按控制点已知数据得到其统计特征(均值、方差、转移概率、分布密度等),使用分布特征和统计特征模拟随机性引起的多种可能“实现”,启发地质人员进行认识与选择。随机建模方法

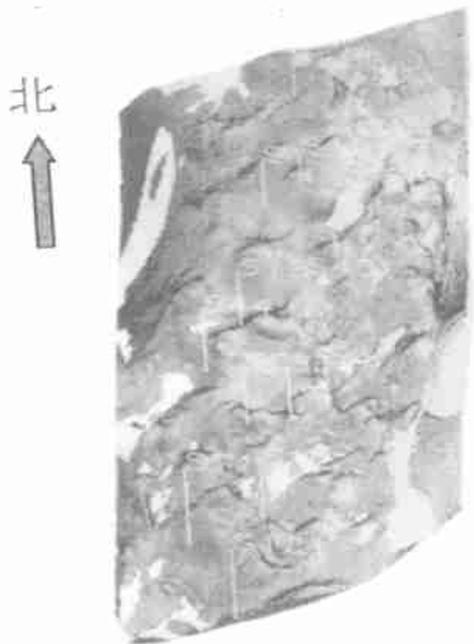


图1 马五₁底凝灰岩三维分布构造模型

Fig. 1 the 3D structure model of base formation

能很好地再现地质问题的不确定性,对井间物性展布具有良好的预测性。

对于井距较大、非均质性强的油气藏,随机建模方法更为合适。因为这种情形下,井间变化更难以预料,认识上的不确定性更大。因而,对靖边区的物性模型采用了随机建模方法,过程如下:

2.2.1 建立井模型

逐井分小层准备好测井解释数据,包括孔隙度、渗透率和含水饱和度。数据按测井格式给出(每米 8 点),非储层点物性数据取 0 值,有效点取真实物性数据。对于准备好的数据,统计出以下指标:

- ① 由非储层点变为有效储层点的频率 P_{01} (即物性值由 0 变为非 0 的转移概率);
- ② 由非储层点跳入非储层点的频率 $P_{00} = 1 - P_{01}$;
- ③ 由有效储层点变为非储层点的频率 P_{10} (即物性值由非 0 变为 0 的转移概率);
- ④ 由有效储层点跳入有效储层点的频率 $P_{11} = 1 - P_{10}$;
- ⑤ 该小层有效厚度与储层厚度比 λ (有效储层点初始概率分布密度);
- ⑥ 该小层有效段物性数据(孔隙度、渗透率、含水饱和度)的均值及标准差。

例如表 1 是陕 A 井马五₁小层测井结果数据,表 2 和表 3 是这些数据的上述统计指标。确定性建模直接应用表 1 的数据,随机建模则采用表 2 和表 3 的统计数据,这是两类方法的根本区别之一。

表 1 陕 A 井马五₁测井有效段结果数据

Tab. 1 Effective reservoir stratum part result of well SA

起始深度 (m)	终止深度 (m)	孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	含水饱和度 (%)
3 003.0	3 004.4	4.5	0.217	27.36
3 006.2	3 006.8	4.5	0.217	24.28
3 009.2	3 009.7	3.5	0.102	34.16
3 009.7	3 012.2	8.5	3.805	15.05
3 012.2	3 013.2	3.8	0.102	25.91

表 2 陕 A 井有效储层段分布频率

Tab. 2 Distribution frequency of effective reservoir stratum part of well SA

小层	P_{00}	P_{01}	P_{10}	P_{11}	λ
马五 ₁	0	0	0	0	0
马五 ₂	0.95	0.048	0.125	0.875	0.287
马五 ₃	0.8	0.2	0	1.0	0.880 5
马五 ₄	1.0	0.0	0.2	0.8	0.102 6

2.2.2 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。插值方法采用克里金法。注意转移概率在 0~1 之

间, λ 值在 $0 \sim 1$ 之间, $P_{01+} + P_{00} = 1$ 和 $P_{10+} + P_{11} = 1$ 。

层模型建立后, 小层平面每个网格就有了 11 个属性值来表征本小层该区域的物性统计特征。

表 3 陕 A 井有效储层段统计指标

Tab. 3 Statistics index of effective reservoir stratum part of well SA

小层	孔隙度		渗透率		含水饱和度	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
马五 ₁	0	0	0	0	0	0
马五 ₂	4.5	0	0.217	0	26.4	1.47
马五 ₃	7.15	2.162	2.747	1.703	19.3	7.25
马五 ₄	3.8	0	0.102	0	25.9	0

2.2.3 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。主要过程步骤如下:

- ① 选定层模型中的一个层, 称作当前层;
- ② 按顺序选定当前层的一个网格, 称作当前网格;
- ③ 由构造模型得到当前网格对应的地层厚度, 并除以测井分辨率(0.125)换算为测井数据点数 n ;

④ 在一组 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数中任意抽取一个数 τ , 如果 τ 不大于当前网格的 λ , 则第 1 个数据点为有效储层点, 执行物性赋值子过程; 否则为非储层点, 物性数据一律为零;

⑤ 称下一数据点为当前数据点, 模拟当前数据点之物性数据。在一组 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数中任意抽取一个数 τ 。

如果上一数据点为有效储层点, 则把随机数 τ 与当前网格的 P_{10} 比较, 如果不大于 P_{10} , 则意味着储层由有效储层点转入非储层点, 当前数据点之物性数据一律取零; 如果大于 P_{10} , 则意味着当前储层点仍然是有效储层点, 执行物性赋值子过程。

如果上一数据点为非储层点, 则把随机数 τ 与当前网格的 P_{01} 比较, 如果不大于 P_{01} , 则意味着储层由非储层点转入有效储层点, 执行物性赋值子过程给当前数据点赋值; 如果大于 P_{01} , 则意味着当前储层点仍然是非储层点, 物性数据一律取零。

⑥ 反复步骤 ⑤ 直到完成当前网格的 n 个数据点;

⑦ 选取当前层的下一网格为当前网格, 从步骤 ③ 开始反复, 直到当前层所有网格都模拟取值完毕;

⑧ 选定下一层为当前层, 从步骤 ② 反复, 直到所有层处理完毕。

物性赋值子过程步骤如下:

① 从一组均值为零, 标准差为 1, 满足对数正态分布的随机数中任意抽取一个数 ξ ;

② 当前网格的物性值(孔隙度、渗透率、含水饱和度)由下式分别求出

$$\text{当前网格物性值} = \xi \times \text{当前网格物性标准差} + \text{当前网格物性均值}。$$

纵向上达到测井分辨率的物性模型本质上是模拟生成未钻井位置的“测井曲线”。既可以生成原始测井曲线,也可以生成解释结果曲线。这一模拟方法使用的前提是认为现有的测井解释结果已经反映了整个储层的物性全貌。在利用地震资料对物性预测较为困难的区块,不失为客观公正的方法。因为它充分利用了测井曲线中蕴涵的地质信息,考虑了物性分布和地质认识上的随机性,对物性的横向、纵向展布有较好的预测功能^[2]。

需要指出:按上述参数模型形成方法得到的是“客观情形”下的物性模型,因为储层有效点之分布完全是由有效储层点概率分布密度和转移概率决定的,其可信度比较高。

为了得到“乐观情形”下的物性模型,在建立参数模型的过程中,通过调整各网格的转移概率 P_{01} 和 P_{10} , 保证该网格非储层点数与总点数之比等于 $1-\lambda$, 即在随机模拟中,把非储层点限制在最小可能概率上。“乐观情形”下的物性模型,代表了储层物性的最好上限,可信度比较低。

“悲观情形”下的物性模型也是通过调整各网格的转移概率 P_{01} 和 P_{10} , 保证该网格储层有效点数与总点数之比等于该网格的 λ 值,即在随机模拟中,把有效储层点限制在最小可能概率上。“悲观情形”下的物性模型,代表了储层物性的最差下限,可信度为比较低。

三种情形下的模型在含气面积一定的条件下,从不同角度定量描述了气藏整体,有助于对气田开发做更好地决策。

2.3 流体分布模型

生成流体分布模型所依据的数据是根据气井产水情况所标定的地层条件下可动气体积百分数。数据格式与物性模型所用的格式完全一致,建模步骤也与物性模型完全一致,在软件实现中,可与物性模型归在一起,一并完成。

3 地质储量风险评估

在给定的探明含气面积内,按照前述的条件模拟建模原理,分别形成了“客观情形”、“乐观情形”和“悲观情形”3种物性模型。经比较发现:这3种物性模型的主要区别在于有效厚度的分布不同,导致模型地质储量的不同,原因在于有效厚度统计方差大,不确定性大。根据3种情形下建模区(马五₁储层)地质储量风险评估表(根据企业保密规定,具体数据从略)得出,“乐观情形”与客观情形相差33.25%;“悲观情形”与客观情形相差22.8%。3种情形的地质储量差距较大,这是因为储层物性非均质性强和目前井距大,使得认识上的不确定性大。在地层存在的前提下,气藏的某些部位由于复杂的地质背景,可能不含有效产气层段,这一点已被开发评价井所证实。根据地质统计学,认为有效层段的分布信息已经蕴涵在测井曲线中了,提取这些曲线的统计特征,就可以指导井间储层的物性预测。基于这种思路建立地质模型并计算的储量,与探明地质储量存在一定的差距,尤其物性空间分布差距较大,但它较为真实地反映了非均质性储层的面貌,特别是它从概率角度对地质风险进行评估。

4 认识及结论

图2是一条典型的构造模型和物性模型叠合剖面。反映了马五₁储层4个小层的构造起伏、厚度展布、孔隙度非均质性、有效储层连续程度以及层间非均质性。从中可以看出:马五₁

小层之所以成为主力气层,一方面是因为它大面积分布,更重要的是因为它的有效储层连续性好;马五¹小层地层分布更为稳定,但它的有效储层连续性差,就决定了它难以成为主力气层。

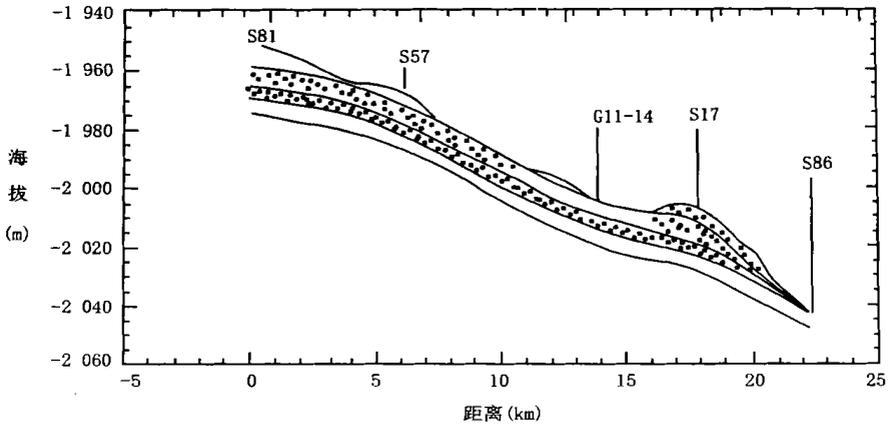


图2 所建模型的一条“构造+孔隙度”剖面

Fig.2 Structure and porosity section of the model

在气井产能分析中,应以近井地带有效储层连续性作为判断气井生产能力的重要依据;有效储层连续程度是气井稳产的物质基础,裂缝发育是气井高产的主要因素。

马五³小层内部有效层段分布很不均匀,在目前给出的有效面积内,还不同程度地存在着因岩性致密而形成的“麻点状”非储层或薄储层。这种情形造成了气井产能相差悬殊。

总结模型所反映的储层特征,有非均质性强、层薄、面积大、低渗透、低丰度这5个方面。但主要特征还是储层非均质性,特别是横向非均质性,表现为有效储层段的连续性和储层渗透率的离散程度。弄清储层物性横向变化规律,是伴随气田开发全过程的问题。基于地质统计学的“随机模拟建模”方法,可以客观地预测井间有效储层连续性,这是其他确定性建模方法所不能的。而有效储层连续状况正是低孔低渗碳酸盐岩储层的要害所在。

“客观情形”下所得到的地质模型数据体,经过网格粗化处理(Up Scale),就是气藏数值模拟可靠的初始参数场,可以引导数值模拟正确把握气藏动态。

在充分理解建模区地质研究成果的基础上,基于储层随机建模理论设计的算法完全适应该区的地质背景和特征。储层随机建模提供了一类认识不确定性问题的基础方法,但都是针对不同的地质背景和特征而设计的。鉴于地质问题的复杂性,对不同的研究区,必须考虑设计不同的算法来反映研究对象主要的沉积成岩特征。

参考文献:

- [1] 穆龙新. 油藏早期评价阶段储层建模技术的发展方向[J]. 石油勘探与开发, 21(5), 1994.
- [2] Berteig V., Halvorsen K. and H. Omre H. Prediction of hydrocarbon pore volume with uncertainties. 1988, SPE 18325, 633-643.

Geological model on the Lower Paleozoic carbonate reservoir in Ortos basin

KANG Xian

(Information Engineering College of Chang'an University, Xi'an, 710054, China)

Abstract: In view of the main feature of strong anisotropism of reservoir Stratum of the Paleozoic Era carbonate rock in the middle part of Ortos basin gas field, mainly by means of random analog formation, this paper makes a quantitative tranformation on the geological study on the area and the descriptive results of the gas pool, and finishes the whole geological model of underground carbonate rock in Ortos basin, including the structure model/phy-sical model and fluid distribution model. Based on the model, the paper also makes a risk evaluation of the reserves, genevaizes the relationship between the gas well capacity and the geological condition, and provides reference data about the best location of well and network parameter about gas pool numerical simulation.

Key words: geological model; reservoir stratum; anisotrope