

扇前辫状河储层地质模型建立初探

——以阜新盆地海洲露头砂体研究为例

王建国 王林凤

(大庆石油学院秦皇岛分院 066000)

王德发

(中国地质大学 北京 100083)

提 要 本文选择阜新盆地海洲矿野外露头砂体研究为例,对四个主砂体及一些辅助砂体进行了大比例尺实测及密集取样。根据储层建模的四项基本原则,以沉积序列、成岩作用与孔隙演化、物性特征及非均质性研究为基础,建立了60m、20m、10m、3m、1m(A型及B型)一维储层地质模型;再结合结构单元分析、沉积模式、成岩模式和物性模式,建立了扇上、扇端、扇前辫状河二维储层地质模型。所建立的模型是岩性与物性的统一,是原型地质模型或概念模型。

关键词 辫状河砂体 结构单元 非均质性 建模

第一作者简介 王建国 男 33岁 博士 从事储层沉积学研究

储层地质模型的建立是储层表征研究的最终目的。近年来,储层地质模型的建立已引起人们极大兴趣。

三次采油急需解决的问题是致力于滞留的可动油开采。由于钻井井距较大难以揭示砂体全貌,特别是对砂体内部的非均质性反映更差;地震方法离有效地解释砂体物性和定量评价砂体连通性还相差甚远,所以搞清剩余油的分布依赖于精细的储层地质模型建立。依靠地下信息建立的模型难以揭示井间的砂体变化,而野外露天研究的直观性、大比例尺、高精细度等优点是油田其它建模方法所无法比拟的。

野外露头建立的地质模型属于概念模型。它是通过选择与油田类似的露头(Analogues),进行大比例尺实测、密集取样、恢复地质原型模型基础上,来建立储层模型的。

阜新盆地是我国重要的中生代聚煤盆地,海洲露天矿巨大的砂泥岩开采界面为砂体实测提供了良好条件。本文主要选择了四种主砂体成因类型($S_1 \sim S_4$)进行研究,它们在附近东梁构造钻探中见有油气显示,这为地下与地表对比奠定了基础,含油气储层的出露也是建模的有利条件。目前,近源辫状河储层地质建模研究甚少。

1 建模指导思想

野外露头研究最大特点是其直观性,砂体的形态、展布、连通等可通过大比例尺测量得到;对其沉积及成岩特征可直接观察和间接测试;对物性变化规律可通过密集取样得到有关信息等。通过野外露头研究所建立的地质模型应具有高精细度。野外露头建模指导思想可归纳为以下四点:

1.1 以沉积学理论为基础

储层沉积学研究日益受到人们的重视,通过动力沉积学、过程沉积学、事件沉积学、比较

沉积学及沉积岩石学研究,解决储层成因,建立沉积模型,这是成岩模型和物性模型的基础。

1.2 忠实地再现野外露头的储层原型特点

露头研究最终目的是提供精细的地质模型,通过野外大比例尺写实性研究,对砂体宏观及微观特征进行直接观察和实测,模型应是这些特征忠实反映,这也是野外露头储层表征研究的优势所在,是地下建模难以做到的。

1.3 以计算机模拟技术做为表现手段

计算机模拟首先是建立在地质原型基础上,应强调尽可能减少理想化、公式化,因为应用的数理统计方法本身就有相对误差,同时也把储层的各种变化“平均”及“模糊”化了,这有违于建立精细地质原型的基本思想,人为的带进来各种误差,这也正是野外露头研究优势应得以强调的;但并不否认统计规律及计算机成图的可靠性,若把数理模型计算机运行过程中的正确(结果)当做结论或证据来描述储层,这是值得商榷的。计算机模拟是体现地质模型的手段和工具,而不是目的。

1.4 发挥所建立储层模型的作用

以沉积学为基础,以计算机技术为手段所建立的精细储层地质模型首先应具有对比意义,这种对比是由模型广义性所决定的,但并不是万能的,对比是有条件的(狭义性);其次,才是指导及预测意义。

本文介绍一维储层非均质性地质模型及二维储层非均质性地质模型。

2 一维储层地质模型建立

一维储层非均质性地质模型建立是以四个主砂体 36 条侧线为基础,综合了纵向上沉积序列、成岩演化、物性特征、非均质程度等变化,采用计算机模拟及做图,建立了四个级别的辫状河砂体一维储层地质模型,分述如下:

2.1 60m 级一维储层地质模型

建模基础砂体为 S_4 (图 1)。它沉积特点是扇中上部辫状河流沉积。由于近物源,地形

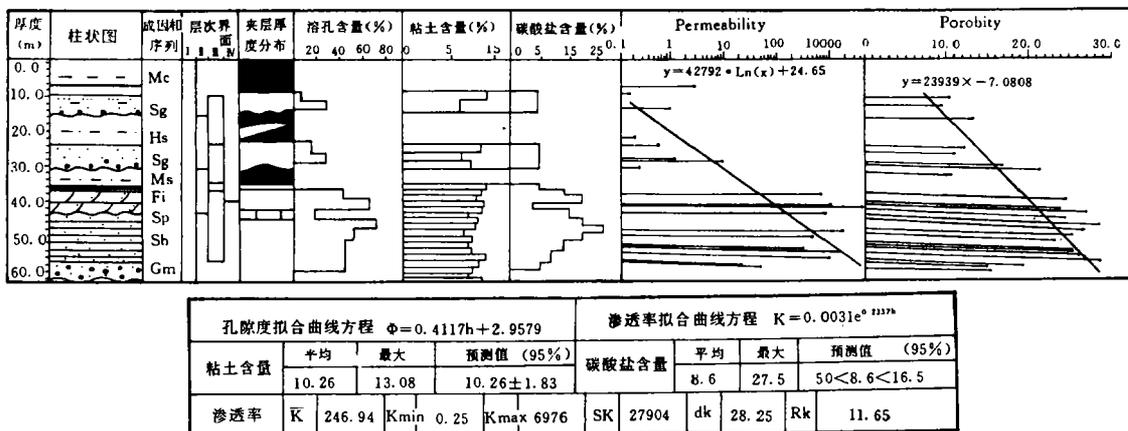


图 1 60m 级一维储层地质模型

Fig. 1 1-D reservoir geological models of 60 m grade

(扇基至扇中)坡度大,河流搬运及沉积速度快,以前积及垂向加积为沉积方式,形成快速废弃的河道类型。纵向上,单砂体以垂向叠覆为主,叠覆砂体厚度大,一般 60m 左右,主要成因相序列为 Gm→Sh→Sp→F1,界面层次清楚,夹层以含煤泥岩(Mc)及钙质砂岩为主。泥岩夹层从下至上产状变化为透镜状—尖灭状—水平状。

成岩变化较复杂,除碳酸盐含量、粘土含量及压实作用降低原生孔隙外,溶解作用是次生孔隙形成的主要作用。残留的原生孔隙及次生孔隙决定物性条件,物性参数是二者综合的定量表现。所以,表明次生孔隙在储层中的作用很有必要的。次生孔隙百分含量是指在薄片中所占总孔隙数的百分比,也可间接地反映溶蚀作用的强度。将具有成岩标志的参数引用到一维模型中来,这只是一种尝试,由于成岩作用的阶段性及多样性均可在一块样品中表现出来,所以,很难用单因素来表示成岩作用特点。

孔隙度、渗透率变化规律是模型的核心。根据粒序层理—单河道砂体—叠覆河道砂体自相似性,孔隙度、渗透率在辫状河砂体中呈正韵律变化。根据数理统计,用计算机模拟,求出最佳拟合曲线,以便做孔隙度及渗透率的预测。

该模型孔隙度(φ)、渗透率(K)与深度(h)拟合曲线方程分别为: $\varphi=0.4117h+2.9579$ 及 $K=0.0031e^{0.2337h}$ 。

非均质性可通过渗透率极值(K_{max} 、 K_{min})、均值(\bar{K})、级差(S_k)、突进系数(d_k)、变异系数(R_k)定量表示。 $K_{max}=6976 \times 10^{-3} \mu m^2$, $K_{min}=0.25 \times 10^{-3} \mu m^2$, $\bar{K}=246.94 \times 10^{-3} \mu m^2$, $S_k=27904$, $d_k=28.25$, $R_k=11.65$ 。

该模型适用于扇上辫状河流储层预测,它具有较高的非均质性。有利的储采层位是主洪峰河道砂体的 Sh 及 Sp 相,多形成高孔中—高渗储集特点。向上退洪水或河道沉积段为有效夹层,上部略有冲刷。上覆小型河道砂体与主砂体没有继承性,表现为悬浮式垂向叠加;中孔低渗为小型河道砂体主要孔隙结构类型,按扇中辫状河发育特点,宽厚比 15~20。

2.2 20m 级一维储层地质模型

建模基础砂体为 S_3 。据沉积环境分析, S_3 砂体代表了扇端辫状河沉积,比 S_4 辫状河更向湖盆推进。河流发育已脱离扇体,进入滨湖沼泽,达到侵蚀基准面。河床宽浅,垂向加积显著,主要成因相序列为 Gm→Sm→Sh→St→Sp→Sr→F1→Mc,相序完整。界面层次清楚,泥岩夹层不发育,以钙质砂岩发育为特征;次生溶孔百分含量高、与物性配合好,显示了它对储集贡献意义。高钙层具有低粘土含量,说明两者的互相排斥作用。

物性变化趋势具有正韵律特征,大的正韵律含有次一级正韵律的叠加,孔、渗变化相对平缓,曲线陡说明两者波动幅度小,具有指数或对数关系,拟合曲线方程 $\varphi=5.672\ln(2.928h)$, $K=0.1280e^{0.3152h}$ 。非均质程度高, $K_{max}=24.00 \times 10^{-3} \mu m^2$, $K_{min}=0.25 \times 10^{-3} \mu m^2$, $\bar{K}=8.02 \times 10^{-3} \mu m^2$, $S_k=96$, $d_k=2.99$, $R_k=2.33$ 。

该模型适用于扇端辫状河储层预测,储集有利层段为砂体中下部,以 Sm、Sg、St、Sp 为主;孔隙结构类型以中孔中渗型为主;上部的 Sr、F1、Mc 物性差,河道冲刷界面具有高渗透率,是层间串水一个主要原因。主砂体内缺少连续夹层。宽厚比大于 40。

2.3 10m 级一维储层地质模型

建模基础砂体为 S_2 。它是扇前辫状河流沉积,发育于滨湖沼泽之上,河流宽浅, S_2 比 S_3 更向湖盆推进。主要成因相序列为 Gm→Sm→Sg→Sh→Sp→St→Sr→F1→Mc,相序完整,单个成因相厚度小,界面层次清楚。夹层以钙质砂岩及上部泥岩为主,单层厚度为 0.35~1。

0m, 钙质砂岩多分布于 Sp 相。

溶蚀作用强烈, 以中部溶蚀孔隙发育为特征。粘土含量中部低、上下高, 钙质胶结物含量呈层状富集。

物性参数拟合曲线孔隙度与厚度呈直线变化, 渗透率呈指数变化, 具有明显正韵律, 拟合曲线方程为 $\varphi = 2.1820h + 3.8268$, $K = 0.1613e^{0.6251h}$ 。非均质系数较高, 但低于 60m 级、20m 储层的非均质系数, $K_{\max} = 72.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $K_{\min} = 0.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $\bar{K} = 17.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $S_k = 266.67$, $d_k = 4.10$, $R_k = 1.25$ 。

该模型适用于扇前辫状河储层预测, 储集有利层段是砂体下部及中部, 约占砂体厚度的 2/3, 厚度达 6~7m。孔隙结构类型下部以高孔中渗—中孔中渗为主, 中部以中孔低渗为主。有利的成因相为 Sg、Sm、Sh、Sp、St, 类型多, 单层厚度小。宽厚比大于 40。

2.4 3m 级—维储层地质模型

建模基础砂体为 S₁ 及分流河道砂体。沉积方式以冲刷—充填(Cut—filling)沉积为主, 河道短而直, 从河道形成、沉积物快速充填到断流转移是在一个短暂的时间内完成的, 沉积物有正韵律特征。砂体具有透镜状, 顶平底凸, 界面清楚, 顶底岩性多为突变。沉积相序列 Gm → St → Sg → Mc, 类型单调, 界面层次也是单砂体内重要的非均质因素, 夹层不发育。

溶蚀孔隙主要发育于砂体中部, 向顶、底均有降低趋势。粘土含量变化不明显, 顶、底略有增加; 碳酸盐含量向中部略呈增加趋势。

物性拟合曲线均呈对称半椭圆形, 即表明中间好、顶底差的特点, 与粒度正韵律相关不明显, 表明孔隙发育受成岩控制显著, 拟合曲线方程为:

$$\frac{(h - 1.5)^2}{1.5^2} + \frac{(\varphi - 14.5)^2}{6.5^2} = 1$$

$$\frac{(h - 1.5)^2}{1.5^2} + \frac{(K - 0.3)^2}{1^2} = 1$$

非均质程度低, $K_{\max} = 20.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $K_{\min} = 0.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $\bar{K} = 3.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $S_k = 46.59$, $d_k = 5.45$, $R_k = 0.95$ 。

该模型适用于扇前辫状河储层预测, 储集有利层段为砂体中部, 厚度 1.5~2.0m, 孔隙结构类型中孔低渗型为主, 成因相类型为 St, 宽厚比 12~15。

2.5 1m 级—维储层地质模型

建模基础为米级正粒序分流河道单砂体。沉积方式以垂向加积为主。成因相序列为 Sg → Mc 或 Sg → Sr → F1 → Mc, 它们反映了水流消退方式的差异, 这与辫状河流上部结顶方式是相似的, 反映了主河道及分支河道与水体消退关系, 按成因相组合建立了二个 1m 级模型, A 型具有 Sg → Mc 序列; B 型具有 Sg → Sr → F1 → Mc 序列。

A 型夹层不发育, B 型发育; 界面层次清楚, 两者成岩作用相似, 都具有较强的溶蚀作用, 次生溶孔含量高。

A 型与 B 型物性拟合曲线为直线及指数形式: A 型为 $\varphi = 17.25h + 8.55$, $K = e^{4.605h}$; B 型为 $\varphi = 12.5h + 12.5$, $K = e^{0.908h}$ 。

具有正韵律特点。非均质程度高: A 型为 $K_{\max} = 110 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $K_{\min} = 0.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, \bar{K}

$= 28.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, S_k = 186.44, d_k = 3.86, R_k = 2.35$; B 型为 $K_{\text{max}} = 79.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, K_{\text{min}} = 0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, \bar{K} = 24.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, S_k = 1980, d_k = 3.26, R_k = 2.83$ 。

有利储集部位为 Sg 相下部, 厚约 0.3~0.5m, 属于薄储层, 孔隙结构为中孔中渗型。

综上所述, 由 1m 级模型直至 60m 级模型可以看出: 近源辫状河砂体孔、渗一维呈正韵律变化为主, 非均质程度高, 有利部位为砂体中下部, 并可根椐拟合曲线方程做物性及非均质性预测。

3 二维储层地质模型建立

二维储层(非均质性)地质模型建立是以四个主砂体结构单元划分为基础, 以沉积模式、成岩模式、物性模式及非均质性特征为根据, 以横切面上物性变化规律做为表示, 通过计算机模拟及做图, 建立了四个辫状河流砂体二维储层地质模型。

建模过程中充分考虑单砂体及叠覆砂体的形态、大小、分布及连通等情况, 主要采用下面的统计参数:

(1)有效砂岩系数 测线上渗透性砂岩(渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 累计厚度与砂体厚度之比, 等于 1 为均质; 越小, 非均质程序越高, 一般 0.20~0.55。

(2)砂岩分布系数 切面上可渗透性砂岩面积与砂体面积之比, 等于 1 为均质; 越小, 非均质程度越高, 一般 0.10~0.35。

(3)砂体连通系数 可渗透性砂岩累计厚度大于平均有效厚度的测线数与总测线数之比, 一般介于 0.65~0.25 之间, 说明砂体连通性较好, 匹配合理。

(4)夹层系数 测线上夹层总数与总测线数之比, 值越大夹层越多, 砂体内分层越多, 非均质程度也就越高。

通过上面参数统计、纵向上成因相及结构单元组合特征分析, 模型中采用的结构单元为 Gms, Gp-h, Gm, SB, OF, Mc-s; 再根据物性模型, 综合建立了储层地质模型, 这样的模型充分体现了岩性及物性特点, 有别于他人的统计模型。

3.1 扇中一辫状河二维储层地质模型

建模基础砂体为 S₁(图 2)。该模型由扇中砂体及辫状河砂体二部分组成。

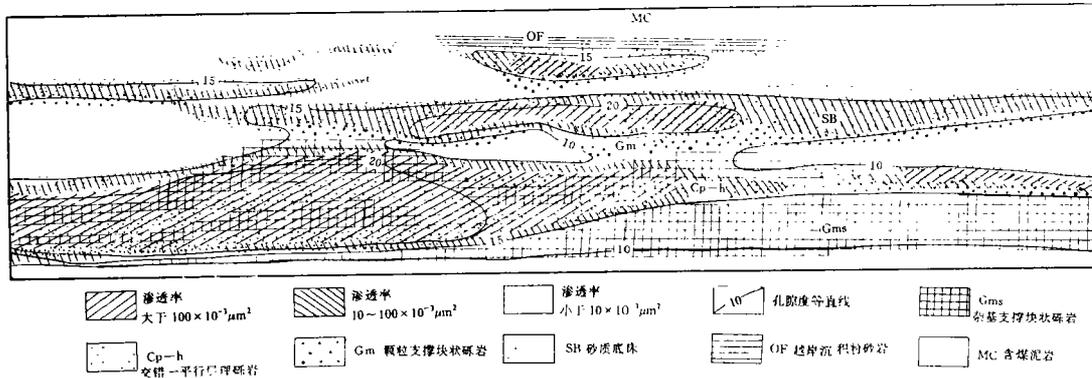


图 2 扇中一辫状河二维储层地质模型

Fig. 2 2-D reservoir geological models of midfan-braided sandbodies

扇中一般具有平坦底界,顶面起伏显著,厚度介于 20.5~46.0m,内部具有 Gms 相、Gp 相、Gh 相。据实测,含有 Gp—Gh 相的扇中部位具有较好的物性,孔隙结构为高孔高渗,局部为中孔中渗,整个扇中具有较好的储集空间;但由于原生喉道堵塞,溶解不均造成横切面上非均质程度高、中高渗流区分布局限的特点。

辫状河流砂体有三种连通方式,即侧迁式、叠覆式和孤立式,厚度 6.0~80.0m。河道砂体密度介于 30~50%。泥岩夹层产状由下至上从透镜状、分叉状到层状,逐渐趋于稳定;钙质砂岩分布不稳定,具有一定的储集意义,个别做“夹层”。根据已建立起的成因相与物性关系得知:Gm、Sp、St、Sg 具有高渗透率,变异系数较小,是河流砂体有利的储集部位;部分 Gm 及 Sm 具有低渗透率,变异系数为 1.24~1.50;Sr、F1 也具有低渗透率,变异系数 0.88~1.92。所以,主河道砂体物性具有明显的对称性,向上及向下物性参数降低。纵向上由于河道叠加,物性变化较大,最好物性区为砂体厚度最大部位;横向上,由于夹层及低渗层的作用,使中、高渗区具有带状展布,受沉积及成岩双重控制显著。

3.2 扇端—辫状河二维储层地质模型

建模基础砂体为 S₃。

底部具有孤立扇端砂,间隔一段泥岩后出现辫状河流砂体,说明辫状河流超前,已脱离扇体,扇端砂具有反韵律,反映了扇体前积作用特点。扇端由于充分的搅拌作用,渗透率值较低,均匀程度较高。

中、上部辫状河砂体表现了河道垂向超覆的特点。夹层不发育,致密钙质砂岩分布局限,成层性差,主要分布于 Sm、Sh、Sp 中上部。砂体中 Gm、Sp、Sh、St 为有利相(带),流通性好,具有中渗特征。顶部的 Sr、F1、Sg 具有低渗特征。

由于砂体的垂向叠加,使它具有多旋回的单砂体组合特点,厚度 17.7~31.5m。单砂体的有利相带及界面层次的发育,使垂向上形成较厚的储层,且连通性好;横向上,砂体具有带状展布,物性特征表明中部相带较好。稳定的相带如较厚的 Gm 或 SB 均是有利储层发育相带。

3.3 扇前辫状河二维储层地质模型(I型)

建模基础砂体为 S₂。

砂体呈席状,具有多层结构,间夹 Gm 相,缺少夹层,厚度 6.5~13.65m。孔隙度及渗透率分布具有上、下对称性,中部有利相带 Gm、Sg、Sp、Sh、St 均具有中渗透率,形成宽厚的有利储集相带组合;储层孔隙结构为中孔—中渗型、高孔—中渗型、高孔—高渗型。该砂体上覆及下伏均为滨湖泥炭沼泽相,封闭性能好,可形成有利的盖层。

3.4 扇前辫状河二维储层地质模型(II型)

建模基础砂体为 S₁。

S₁ 砂体代表了入湖辫状河最下游。河道窄,单砂层厚度小,顶部成因相及夹层发育。纵向上有三次大的河道砂叠加,厚度 10.5~18.0m。

物性条件差,有利相为 Gm 及 Sp,具有中渗透率,分布于单河道砂体最厚部位。可渗透层分布局限,多为透镜状,连通性很差,反映该模型非均质程度高。有利储集相带位于砂体的中部,孔隙结构为具有中孔—中渗型。该类储层物性多变。

从上面二维储层模型不难看出,扇中—辫状河砂体组合可形成二种类型的储层,扇中储集物性较好,其上辫状河砂体呈席状展布时,也是较好的储层。扇端—扇前辫状河砂体具有

席状或薄带状,物性变化较大。当前积作用为主时,砂体叠覆,储集层段厚度大;当侧向迁移时砂体侧翼接触,连通好,有利部位为厚度较大的单砂体中部。孤立的废弃河道砂体宽厚比是评价储集性能重要的指标。

收修改稿日期:1994-2-18

参 考 文 献

- (1) 王德发,邓宏文,1992,陆源碎屑沉积环境及沉积体系,中国地质大学。
- (2) 裘亦楠,1991,储层地质模型,石油学报,12(4)。
- (3) Beston, N. B., 1986, Reservoir geological modelling of the north rankinfield, North—west Australia. Petroleum Engineering Division. 375~389.
- (4) Miall, A. D., 1988, Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones; lessons from outcrop studies. AAPG, 72(8); 882~897.
- (5) Bloch, S., 1991, Empirical prediction of porosity and permeability in sandstones. AAPG, 75(7); 1145~1160.
- (6) Wardlaw, N. C., 1990, Quantitative determination of pore structure and application to fluid displacement in reservoir rock. North sea oil and gas reservoirs— I. 229~243.
- (7) Ashton, M., 1993, Advances in Reservoir Geology.

A Preliminary Research of the Establishment of Reservoir Geological Model of Fanfront Braided River—An Example of Haizou Outcrop Sandbodies in Fuxin Basin

Wang Jianguo Wang Linfeng

(Qin Huangdao Branch Daqing Petroleum Institute)

Wang Defa

(China University of Geoscience Beijing)

Abstract

This paper takes the Haizhou outcrop sandbody in Fuxin Basin as an example. Four main sandbodies and some supplementary sandbodies are practically measured in a large scale and sampled densely. According to four basic principles of the establishment of reservoir geological model, based on the researches of sedimentary sequence, diagenesis and pore evolution, physical property and heterogeneity, one—dimensional reservoir geological models of 60m、20m、10m、30m、1m(A—type and B—type) grades are established. Combined with architectural—element analysis, sedimentary model, diagenesis model and physical model, four two—dimensional reservoir geological models of fan, fanend and front—fan braided stream are established. The models established are of unified lithologies and physical properties. Thus, they are prototype models or concept models.