

非均质储层夹层控油作用初论

——非均质储层油气分布规律及测井响应特征

毛志强

(石油大学资源与信息学院,北京 102249)

摘要: 根据毛细管压力理论,分析了具有复杂孔隙结构的非均质储层油气聚集和分布规律,提出了非均质储层夹层对油气聚集和分布有重要控制作用的观点。分析表明,物性较差的非均质储层一般具有较长的油—水或气—水过渡段,形成油气藏的必要条件是要具备较大的圈闭高度。圈闭高度有限的非均质储层中夹层对油气流体有遮挡作用,储层纵向上容易形成大段的不饱和含油(气)水层或油水同层、气水同层。根据相对渗透率数据,这类储层的有效产液能力受两相渗流的影响和本身渗透能力差的限制,往往表现为低产甚至偏干的事实。导致气测录井、测井和试油测试之间存在矛盾。对非均质储层测井响应规律和特点进行了分析,复杂孔隙结构非均质储层中含油性物性与储层物性的相关关系变得模糊。储层纵向上含油性物性的复杂变化导致其油气层和水层的测井特征不易区分,测井油气识别与评价面临很多困难和挑战。结合我国西部 M 盆地一个非均质油气藏的典型实例,实际分析了非均质储层油气聚集和分布规律及测井响应特征。

关键词: 非均质储层;夹层;油气聚集与分布;测井响应。

中图分类号: P618.130.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2003)02-0196-05

作者简介: 毛志强(1962—),男,教授,1995年毕业于北京石油勘探开发科学研究院,获工学博士学位,主要从事岩石物理研究、地球物理测井资料解释方法及应用的研究与教学工作。

E-mail: petrolog@sina.com

复杂孔隙结构砂岩储层具有成熟度低、物性差和非均质性强的特点,特别是储层纵向非均质性对油气的运移和聚集有显著控制作用,导致了其独特的油气聚集和分布规律。根据毛细管压力理论分析表明,非均质储层的油—水、气—水过渡带较长。非均质储层形成良好油(气)层的必要条件是要有足够大的圈闭幅度。在有限的圈闭高度条件下,应特别重视非均质储层中局部“遮挡层”或夹层对油气分布的控制作用。作为夹层控油作用的结果,非均质储层中油气显示井段长且测井电阻率纵向变化程度小。从测井响应上,很难有效区分纯油(气)层、差油(气)层、同层和干层,给测井油气评价带来了很大困难。

根据对一些非均质储层实际资料的分析,应用毛细管压力理论,讨论分析了非均质储层夹层控油作用的物理机制。对油(气)、水纵向分布规律进行了初步分析,同时对其电阻率测井响应特征以及非均

质储层测井油气评价所面临的挑战进行了讨论。

1 非均质储层——圈闭幅度足够高

1.1 储层纵向非均质性

非均质储层有 2 个含义:首先,储层物性相对较差,主要由中等—低孔隙度和渗透率的 II b、II c 甚至 III 类储层组成;其次,纵向非均质性强。影响物性纵向非均质性的原因包括粒度变化、分选性、胶结物含量和泥质或泥岩夹层。如图 1,储层由砂岩层(B_1 , B_2 和 B_3)和一些薄层状、渗透性更差的砂质泥岩或胶结致密的泥质、钙质夹层(C_1 和 C_2)组成,层 A 是区域性盖层。砂层和夹层具有不同的毛细管压力曲线特征,夹层由于具有较高的排替压力,在一定条件下对下覆砂岩层中的非润湿相流体有一定的遮挡或封堵作用。储层具有明显的纵向非均质性。

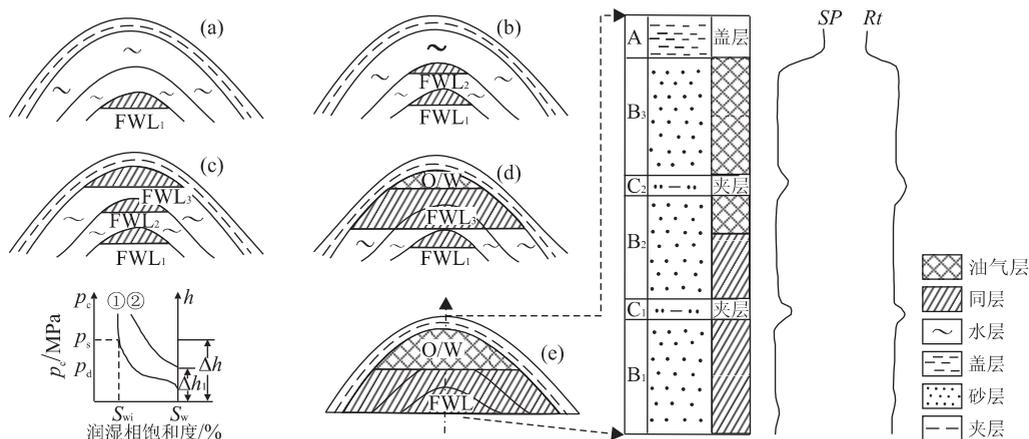


图1 非均质储层油气分布及测井响应特征示意图(模式1)

Fig. 1 Distribution of hydrocarbon in inhomogeneous formation and its log responses

①夹层毛管压力曲线;②储层毛管压力曲线

1.2 油气运聚与分布规律——运移过程中的夹层遮挡作用

如图1,这种模式的油气藏构造圈闭幅度足够大,大大超过形成纯油(气)层所需要的最小油气柱高度.假定油气二次运移的动力主要是来自油气柱的浮力^[1].根据毛细管压力理论和油气成藏的基本理论^[2~4],不难演绎这种圈闭的油气运移和聚集规律.

假设夹层 C_1 的排替压力 p_d 大于砂层 B_1 的排替压力,但小于砂层 B_1 的饱和压力 p_s .由于夹层 C_1 具有一定的封堵能力,油气首先进入砂层 B_1 并在其中聚集.砂层 B_1 中聚集的最大油气柱高度为 Δh_1 ,该油气柱所产生的浮力等于夹层 C_1 的排替压力,其自由水界面用 FWL_1 表示(图1a).此后向砂层 B_1 继续运移的油气将穿越夹层 C_1 ,而在砂层 B_2 中聚集.由于夹层 C_1 的排替压力小于砂层 B_1 的饱和压力,所以用夹层 C_1 作为局部遮挡层在砂层 B_1 中圈闭的油气达不到饱和油(气)层的程度,形不成纯油(气)层.砂层 B_2 内的油气聚集规律与砂层 B_1 相同,只要上部夹层 C_2 的排替压力小于它的饱和压力,以夹层 C_2 作为遮挡层的砂层 B_2 内聚集的油气就达不到纯油(气)层的饱和程度(图1b).图1c所示砂层 B_3 中的油气聚集规律与上述规律类似,随着油气的继续聚集,以层A作为区域性盖层的油(气)层的自由水界面(FWL_3)将向下方移动.当自由水界面(FWL_3)之上的油(气)柱高度足够大,其浮力超过砂岩饱和压力(p_s)后,在顶部开始形成纯油(气)层,其油(气)一水界面为O/W,如图1d所示.该圈闭油气聚集的最终结果如图1e所示,此时,中、上部位的

夹层不再起封堵作用,油藏具有同一个自由水界面FWL,它对应圈闭的最低闭合平面.自由水平面油(气)一水过渡段的高度 Δh 受砂岩层平均饱和和毛细管压力控制.储层平均饱和和毛细管压力愈大,自由水平面油气一水过渡段愈长.纯油(气)层的厚度除了受储层平均饱和和毛细管压力影响外,主要受圈闭高度控制.其他条件相同,圈闭幅度愈高,圈闭顶部形成的纯油(气)层厚度愈大.若圈闭幅度小于油(气)一水过渡段的高度 Δh ,则肯定不能形成纯油(气)层.

在同一个圈闭构造中,几乎不存在纯水层物性差、且夹层发育的非均质储层油气分布规律的另一个特点.

1.3 测井响应

这种油藏模式的测井响应特征比较复杂(图1).顶部纯油(气)层段的电阻率相对值是否较高取决于储层的孔隙度是否足够高,或者取决于储层孔隙结构.实际资料及理论模拟均表明^①,由于复杂孔隙结构非均质储层的束缚水饱和度较高,油(气)层和水层的电阻率差别不像均质储层那样明显,并且其油(气)层段几乎不存在储层物性愈好,测井电阻率愈高或者愈靠近油藏顶部,测井电阻率愈高的明显规律.这种规律性的测井响应特征在物性良好的均质油气储层中普遍存在,它构成了测井识别评价油气层的重要基础^[5].相反,在非均质储层含油(气)层段,在一定的孔隙度范围反而可能出现物性好、测井电阻率反而愈低的“异常”现象.

①毛志强,高楚桥,胡英杰.复杂孔隙结构砂岩储层岩石物理研究及产能预测(内部研究报告),1999.

在油(气)—水过渡段中,由于砂岩被油气部分饱和,其电阻率比纯水层要高.局部夹层由于孔隙度低,其电阻率也比物性较好的纯水层电阻率高.油气和物性的双重影响使得过渡段内的电阻率与储层物性相关性变差,经常出现随孔隙度增加电阻率降低的现象.

2 非均质储层——有限的圈闭幅度

2.1 油气运聚与分布规律——夹层遮挡起重要作用

在构造比较复杂,多套储层具有不同的圈闭高度且圈闭高度有限的条件下,油气的聚集和分布将更加复杂(图 2).由于构造幅度有限,储层中的夹层将对油气的运移起到遮挡作用.与前一节论述的类似,当夹层 C_1 、 C_2 、 C_3 的排替压力小于下覆储层的饱和压力,它们所遮挡圈闭的油气处于一种非饱和状态,即储层空隙空间中存在至少 3 种状态的流体:束缚水、自由水和油气,形不成纯油(气)层.每一个夹层所圈闭的油气均具有自己的自由水界面,根据夹层的分布和圈闭高度可能会形成多套含水油(气)层(或含油气水层)和水层.

假设 $B_1 \sim A$ 储盖组合的圈闭高度大于形成纯油(气)层的最小圈闭高度,即圈闭的油气柱所产生的浮力远大于储层的饱和压力,一定会在砂层 B_1 的顶部形成纯油(气)层.

总之,夹层控油作用及储层物性差的特点控制

着非均质储层具有独特的油气运移和聚集规律,导致了其油气显示井段长、油(气)—水过渡段长的特点.这类储层成藏的重要条件之一是要有足够的油气柱高度(即圈闭高度).在圈闭高度有限的情况下,由于非均质储层中的夹层将起到一定的油气封堵作用,容易形成不饱和的油(气)—水同层.

2.2 测井响应

这种模式的测井响应规律与上节阐述的类似.需要强调一点,若圈闭幅度不足以形成油(气)层,由于纵向上储层非均质性会导致整个圈闭处于含油(气)水层或油(气)水同层的流体分布格局.结果录井上表现为在较长井段内均有良好油气显示的现象.电阻率测井则表现为在油气显示井段几乎没有变化,不存在由于含油饱和度上高下低导致的电阻率上高下低的变化.但由于录井良好油气显示,在预探井或区域甩开探井中,测井油气层识别及判断的难度非常大.在尽可能不漏掉油气层的指导思想下,解释结论往往偏高.

如图 2 中 B_3 砂层下部的纯水层,若其物性较好,其测井电阻率一定相对较低.换句话说,若对一个构造的圈闭性质还不清楚,对于一个有大段油气(录井)显示的构造,若在其顶部或中上部出现明显的水层(即测井电阻率之低足以明确判定为水层),则应重视分析储层的非均质性以及夹层对油气分布的控制作用,同时认真落实构造的圈闭能力,以期对其含油性作出正确的判断.

3 实例

图 3 为我国西部 M 盆地 T_2 井所钻遇的一个非均质油气藏测井响应特征典型实例.图中第 1 道为井径(CAL)、自然电位(SP)和自然伽玛(GR,单位:API—美国石油学会制定)曲线.第 3 道为 3 条 0.6 m 分辨率的阵列感应电阻率曲线,AT10、AT30 和 AT90 分别表示探测深度为 0.25、0.75 和 2.25 m.第 4 道分别为声速(DT)、密度(RHOB)和补偿中子(NPHI)等 3 条孔隙度曲线,第 5 道为流体相对体积解释结果.

该油气藏为背斜圈闭,圈闭幅度约 40 m. $x_{030} \sim x_{041}$ m 为一套膏泥岩地层,是区域性盖层.该盖层以下发育大套非均质砂岩储层.储层孔隙度 8%~15%,渗透率 $1 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$.储层在纵向上的非均质性主要表现为:随钙质或泥质胶结物的

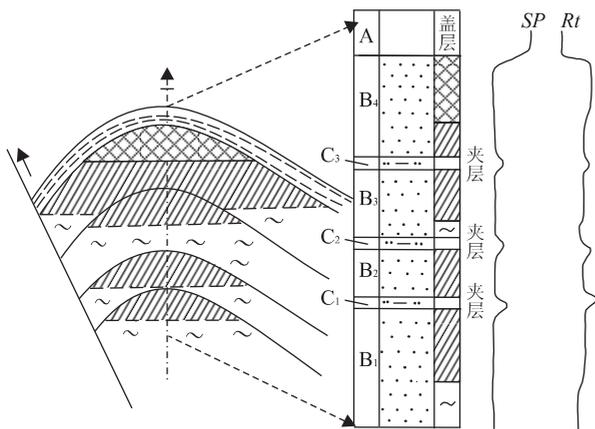


图 2 非均质储层油气分布与测井响应特征示意图(模式 2)

Fig. 2 Distribution of hydrocarbon in inhomogeneous formation and its log responses

层 A 表示区域性盖层; C_1 、 C_2 和 C_3 为 3 个夹层;断层侧向不具有封堵能力;图例同图 1

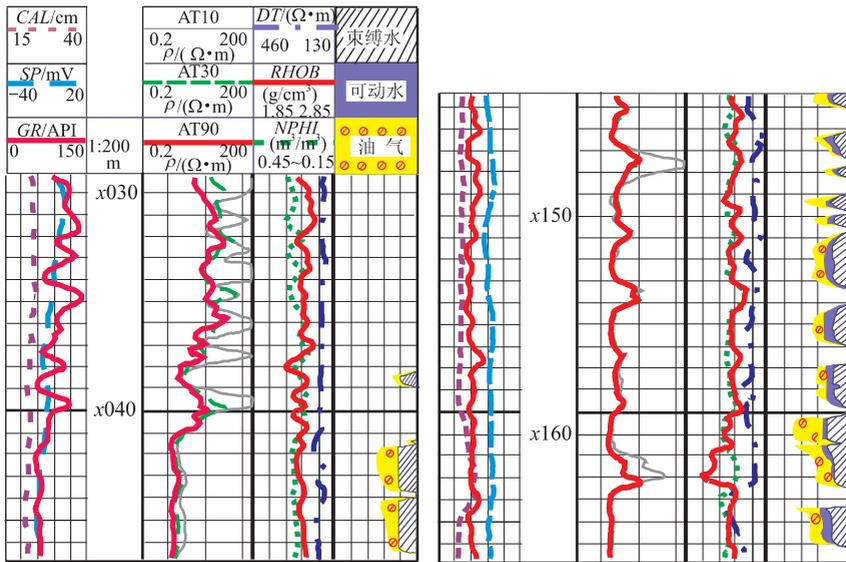


图 3 西部 M 盆地 T₂ 井非均质油气藏测井响应特征

Fig. 3 Log responses of inhomogeneous reservoir of well T₂ in basin M, Northwest China

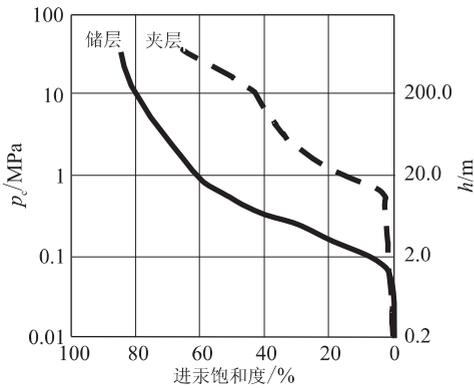


图 4 储层砂岩与夹层砂岩毛管压力曲线

Fig. 4 Capillary pressure curves measured on plug samples with good and poor permeabilities

增加,砂岩的物性明显变差,形成所谓渗透性较差的夹层.这种由于物性变差所形成的极低或非渗透夹层在图 3 中 $x145 \sim x163$ m 井段表现为电阻率升高、密度测井值增加.由于大部分夹层是由含钙引起,所以其伽玛值并无明显升高.

在钻井过程中,从区域性盖层以下的 100 余 m 的砂岩储层气测录井油气显示非常活跃.但完井试油结果表明,除了在比邻区域性盖层下的砂层中获得了工业油气流外(图 3 中 $x041.5 \sim x046.5$ m),下部其他层段均为低产含水气层或气水同层.

结合前面论述的关于非均质储层油气成藏的基本规律,对于图 3 所示示例中,气测显示、测试结果以及测井响应特征之间的内在联系就非常容易理解

了.图 4 为该井非均质储层物性较好和较差砂岩,即储层和夹层的典型毛管压力曲线.图 4 中右侧数据为不同含油气饱和度所需的自由水平面之上油气柱高度.假设物性较好储层的束缚水饱和度为 40%,根据图中曲线可知,完全饱和这种储层需要约 20 m 的油气柱高度.换句话说,对于这种物性较好的储层,形成纯油气层(成藏)所需最小圈闭幅度为 20 m.从图中可以看出,夹层的突破压力约为 0.5 MPa.当夹层作为下伏砂岩的“盖层”时,0.5 MPa 突破压力对应的油气柱高度约为 10 m.也就是说,当夹层下伏砂岩中的油气柱高度超过 10 m,油气将开始通过夹层继续向上部储层中聚集.而此时夹层下伏砂岩中的含油气饱和度仅为 40%左右,若束缚水饱和度约 40%,则储层中含有 20%的自由水,形成含水油气层或油气—水同层.

由于该套储层本身的绝对渗透率不高,当储层空隙空间中存在可以自由流动的水和烃类两相流体时,根据相对渗透率理论,储层岩石的有效渗透率将大幅度下降,因此造成同层的产液能力(或产液量)较低的客观事实.

4 结论

用毛细管压力理论,分析了非均质储层夹层对油气聚集和分布的控制作用.视其物性好坏,非均质储层圈闭成藏的必要条件之一是需要较高的圈闭高

度. 圈闭高度有限的条件下, 夹层控油作用显著, 纵向上容易形成大段不饱和的油(气)水同层.

非均质储层孔隙结构和油气分布特点导致了其独特的测井响应特征. 与物性好的均质储层对比, 非均质储层油气层、水层的测井响应特征比较模糊和“异常”. 需要开辟新的思路寻找有效的测井油气评价手段.

参考文献:

- [1] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
ZHANG H F, FANG C L, GAO X Z, et al. Petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [2] Dullien F A L. 多孔介质—流体渗移与孔隙结构[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
Dullien F A L. Porous medium-fluid flow and pore structure [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.

- [3] 曾溅辉, 王洪玉. 输导层和岩性圈闭中石油运移和聚集模拟实验研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24(2): 193—196.
ZENG J H, WANG H Y. An experimental study of petroleum migration and accumulation in carrier bed and lithological trap [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(2): 193—196.
- [4] 康永尚, 郭黔杰. 论油气成藏流体动力系统[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(3): 281—284.
KANG Y S, GUO Q J. On oil and gas migration and accumulation fluid dynamic systems [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(3): 281—284.
- [5] 段康, 谭廷栋, 林峰, 等. 测井学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
DUAN K, TAN T D, LIN F, et al. Well logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.

Controlling Effects of Poor Permeable Layers upon Accumulation and Distribution of Hydrocarbon in Inhomogeneous Sandstone Reservoir

MAO Zhi-qiang

(Faculty of Natural Resources & Information Technology, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on capillary pressure theory, the accumulation and distribution of hydrocarbon in inhomogeneous sandstone reservoir with complicated pore structures were analyzed. It was concluded that the accumulation and distribution of hydrocarbon in inhomogeneous reservoir were predominated by the poor permeable layers (barrier beds). The analysis demonstrated that the transition intervals would be long in inhomogeneous reservoir with moderate to low porosity and permeability. The entrapment in this kind of reservoir requested larger closure height. In the situation of limited closure, the poor permeable layers resulted in sealing process and formed non-saturated, both hydrocarbon and free water-bearing stratum with broader distribution vertically. The production ability was much limited because of the low effective permeability in the porous media with two-phase liquid system. All those features bring about a contradiction between the gas logs, well logs and the well testing. The well log responses and characteristics of this reservoir were also discussed in this paper both theoretically and by the case study. Generally, the correlation in well logs between the hydrocarbon saturation and the porosity in this formation became obscure and difficult to distinguish due to the great changes in porosity and saturation of the reservoir vertically. A case study was also presented and proved a good evidence of the above theoretical deductions.

Key words: inhomogeneous reservoir; barrier bed; hydrocarbon accumulation and distribution; log response.