

# 利用毛管压力预测碳酸盐岩油藏油水界面

罗厚义<sup>1</sup>, 汤达祯<sup>1</sup>, 汤永梅<sup>2</sup>

(1.中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2.中国石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083)

**摘要:**油水界面深度的准确确定对油藏原始储量计算、早期开发方案制定具有重大意义。非均质性较强的碳酸盐岩油藏确定油水界面尤其困难,毛管压力资料能提供很多信息,可用来研究油水界面。利用 Interactive Petrophysics 软件,结合中东某复合型碳酸盐岩油田第1口早期开发井(X井)的8条压汞毛管压力资料,运用多种非线性方程方法,回归拟合流体饱和度与毛管压力的函数关系,对比组合出最佳函数;再结合常规测井解释结果,拟合最佳自由水面的深度;利用自由水面与油水界面的关系,确定油水界面的深度。根据邻近探井测试的油水资料,预测X井的油水界面深度为3 043.9 m。预测X井附近X<sub>1</sub>井的油水界面深度为3 008.7 m,与岩心照片显示相吻合,证实了此方法的有效性和实用性,可作为确定油水界面方法的有益补充。

**关键词:**毛管压力 碳酸盐岩油藏 油水界面 自由水面 流体饱和度

**中图分类号:** TE319

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)02-0071-03

油水界面对于油藏评价、油气储量估算必不可少<sup>[1-9]</sup>。目前,油水界面深度主要是根据录井、测井及试油资料确定,在勘探初期井资料较少的情况下受到较大限制。由于油藏原始油水分布状态是毛管压力与重力平衡的结果,利用毛管压力实验,可模拟油水重力驱替和油藏形成过程。通过毛管压力曲线,不仅能换算孔喉半径及其分布曲线,还能模拟出含水饱和度与高度的函数,进而确定自由水面和油水界面的深度。勘探初期,该方法可以根据少量探井取心资料,较早地对油水界面深度进行估计,对指导油田早期勘探开发具有重要意义。

利用毛管压力资料预测油藏油水界面成为重要的研究领域,前人虽取得了不少成果<sup>[1-4,10-12]</sup>,但对非均质性较强的碳酸盐岩油藏的相关应用研究较少。为此,笔者在总结前人研究成果的基础上,利用 Interactive Petrophysics (IP) 软件,结合毛管压力资料,对国外某碳酸盐岩油藏油水界面深度进行预测,以期为该油藏的勘探开发提供参考。

## 1 方法原理

孔喉半径与毛管压力、界面张力及岩石润湿性有关<sup>[4-5]</sup>,其表达式为

$$r_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{p_c} \quad (1)$$

式中:  $r_c$  为孔喉半径,  $\mu\text{m}$ ;  $\sigma$  为表面张力,  $\text{dyne/cm}$ ;  $\theta$  为润湿接触角, ( $^\circ$ );  $p_c$  为毛管压力,  $\text{psi}$ 。

在油藏条件下,油水过渡带的毛管压力与油水密度差异、孔喉半径、岩石润湿性密切相关。在油水密度差异和岩石润湿性已知的情况下,孔喉半径越小,油水过渡带越高,运用毛管压力资料可将油水过渡带的油或水的饱和度表示为高度(油水过渡带某深度在自由水面以上的高度)的函数<sup>[6-7]</sup>。若已知流体密度、界面张力、接触角、孔隙度及渗透率等从实验室条件转换到油藏条件的转换系数,则可通过毛管压力曲线拟合出润湿相饱和度与高度的函数,再结合常规测井资料解释的含水饱和度随深度变化的剖面,利用最佳拟合方法,计算自由水面的深度<sup>[8]</sup>,进而确定油水界面。

## 2 油水界面的求取

以中东某复合型碳酸盐岩油田X井为目标井,其主要含油层系的沉积环境为浅海碳酸岩台地,储层岩性主要为灰岩,储集空间主要为原生粒间孔、次生溶孔洞及裂缝。该井是第1口早期开发井,取

收稿日期:2013-01-09。

作者简介:罗厚义,男,高级工程师,在读博士研究生,从事碳酸盐岩油气勘探开发资料评价与管理工。联系电话:15811005958, E-mail: luohouyi@msn.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2008ZX05000)。

心井段达60多米,目的层包括8组压汞法分析的毛管压力资料。

### 2.1 原始毛管压力数据的校正

按IP软件对毛管压力数据输入格式的要求,整理了8组毛管压力的原始数据。为将实验室条件下的参数转换为油藏条件下的参数,加载原始数据后,进行了以下校正:①将实验室条件下汞和空气的接触角(140°)和界面张力(480 dyne/cm)校正为油藏条件下油相和水相的接触角(30°)及界面张力(30 dyne/cm);②地面原油和水的密度分别为0.83和1.05 g/cm<sup>3</sup>(来自于邻近探井试油数据);③利用孔隙度校正因子对孔隙度进行校正;④如果此岩心泥质含量高,须根据地层水等效NaCl矿化度和阳离子交换能力进行粘土束缚水饱和度的校正,此次研究所用岩心为纯灰岩,故而未作该项校正。校正前后的毛管压力曲线如图1所示,校正后毛管压力明显下降,最高约为3 000 psi。

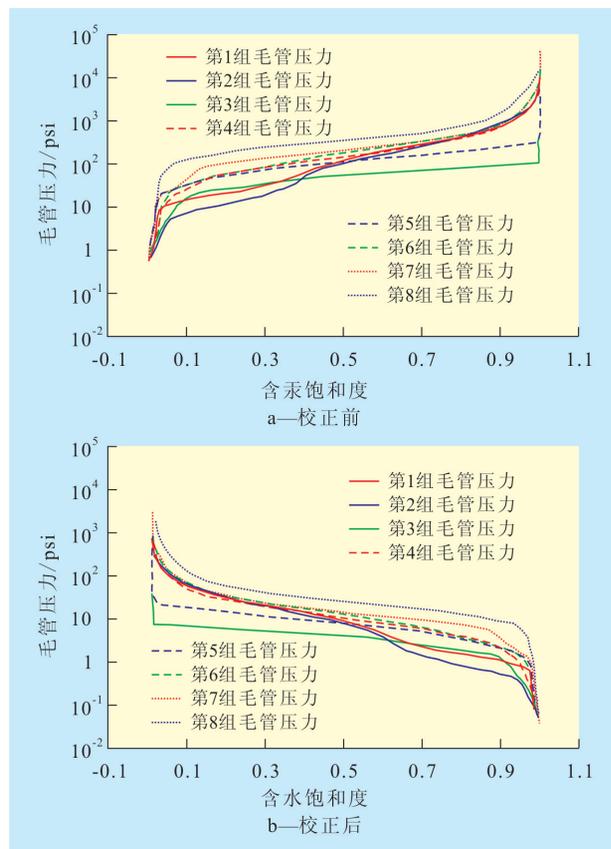


图1 中东某复合型碳酸盐岩油田X井毛管压力校正前后对比

### 2.2 毛管压力方程的拟合

校正后的毛管压力曲线可用来拟合含水饱和度与毛管压力的关系,IP软件共提供了3种非线性回归拟合方程,分别为

$$S_w = ap_c^{-\lambda} + b \quad (2)$$

$$S_w = \frac{a}{p_c - b} + c \quad (3)$$

$$S_w = ae^{bp_c} + c \quad (4)$$

式中:  $S_w$  为含水饱和度;  $a, b, c$  和  $\lambda$  为拟合系数。

每种方程对每条毛管压力曲线都可拟合得到1个系数,将8条毛管压力曲线单独拟合的8个方程组合成1个方程(拟合系数为8个系数的平均值),对应的拟合方程分别为

$$S_w = 28.81455p_c^{-0.70194} - 0.07509 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9889, S = 0.0049$$

$$S_w = \frac{9.48472 \times 10^{10}}{p_c + 5.61639 \times 10^{14}} + 0.20485 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.2579, S = 0.808$$

$$S_w = 0.99958e^{-0.0992p_c} + 0.07628 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.99153, S = 0.0095095$$

式中:  $S$  为标准偏差。

由相关系数和标准偏差可知,指数形式的方程即式(7)拟合最好,故确定其为该目的层段的最佳毛管压力方程。

### 2.3 油水界面的计算

得到拟合系数之后,将常规测井解释的有效孔隙度、含水饱和度及深度等参数输入子模块。根据邻近探井Z井(位于X井南约1.5 km处)的试油资料,建立流体模型。该碳酸盐岩油藏流体为油和水两相,密度分别为0.83和1.05 g/cm<sup>3</sup>。根据录井显示,给定最为可能的自由水面深度为2 900~3 140 m,计算得到累积误差最小时对应的自由水面深度为3 043.9 m,是最可能的自由水面深度。

自由水面通常在油水界面以下,其关系式为<sup>[8]</sup>

$$FWL = OWC + 144 \frac{p_d}{\Delta\rho} \quad (8)$$

式中:  $FWL$  为自由水面深度, m;  $OWC$  为油水界面深度, m;  $p_d$  为排驱压力, psi;  $\Delta\rho$  为油水密度差, g/cm<sup>3</sup>。

该油藏分析数据中排驱压力有2个,取其平均值,油水密度差参考Z井,代入式(8)可推算X井油水界面的深度为3 008.7 m。如果储层孔喉较大,则油水界面和自由水面的埋深基本相等。

## 3 实例应用

Z井试油结果表明,该油藏油水系统的油层底界深度为3 008 m,其下水层顶面深度为3 069 m,该

井补心海拔为13.4 m,故油水界面深度可确定为2 994.6 m,比较接近X井计算出的油水界面深度(3 008.7 m)。中东地区碳酸盐岩储层的非均质性较强<sup>[9-10]</sup>,油水界面不是平直的。根据小层对比资料可知,Z井和X井对应的小层顶面深度分别为2 937和2 956 m,相差约19 m,2口井油水界面相差14.1 m。

X<sub>1</sub>井位于X井东偏南约12 km处,是1口评价井,参考X井自由水面和油水界面深度,预测X<sub>1</sub>井油水界面深度约为3 015 m。X<sub>1</sub>井岩心照片显示,在预测油水界面以上3 000~3 003 m处为油层,说明预测的油水界面较为准确。

## 4 结束语

通过IP软件的高级解释模块,首次尝试对复合型碳酸盐岩油藏进行油水界面的确定。利用中东某复合型碳酸盐岩油田第1口早期开发井——X井特殊岩心分析的8组压汞毛管压力资料,运用3种非线性方程,对该井的自由水面和油水界面进行了拟合计算,得到了油水过渡带饱和度与毛管压力的函数关系,并用邻近探井Z井的试油资料进行了分析、对比和验证。结果表明,可利用毛管压力资料和油藏油样、水样测试数据,在油藏早期开发时对自由水面和油水界面进行拟合计算,对布井、射孔生产都有重要的指导作用。

### 参考文献:

- [1] 鲁国明,朱家俊.利用毛细管压力预测油水界面位置的一种回归分析方法[J].石油勘探与开发,1995,22(4):70-73.
- [2] 周涌沂,李阳,孙焕泉.用毛管压力曲线确定流体界面[J].油气地质与采收率,2002,9(5):37-39.
- [3] 张玲,侯庆宇,庄丽,等.储量估算方法在缝洞型碳酸盐岩油藏的应用[J].油气地质与采收率,2012,19(1):24-27.
- [4] 魏兴华.压汞资料在确定油水界面中的应用[J].新疆石油天然气,2005,1(2):29-34.
- [5] 洪世铎.油藏物理基础[M].北京:石油工业出版社,1985:100-115.
- [6] Djebbar, Erle C Donaldson. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties [M]. 2nd edition. UAE: Gulf Professionals Publishing, 2004: 313-414.
- [7] Jerry F Lucia. Carbonate reservoir characterization [M]. Germany: Springer, 2007: 10-110.
- [8] Tarek Ahmed. Reservoir engineering handbook [M]. 4th edition. UAE: Gulf Professionals Publishing, 2010: 189-330.
- [9] 卢西亚 F J. 碳酸盐岩储层表征[M]. 2版. 夏义平, 黄忠范, 李明杰, 等, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011: 44-72.
- [10] 胡小冬, 唐善法, 葛林文, 等. 阴离子双子表面活性剂GA8-4-8油水界面张力研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 67-69.
- [11] 王健, 彭小容, 黄云, 等. 关家堡海上油田开发早期ASP三元复合驱注入参数优选[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 108-110.
- [12] 冯德成, 刘蔚清, 刘同敬, 等. 应用半解析方法进行试油资料解释研究[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(2): 60-62.

编辑 武云云

(上接第70页)

- [6] 孙焕泉. 胜利油田不同类型油藏水驱采收率潜力分析[J]. 油气采收率技术, 2000, 7(1): 33-37.
- [7] 彭长水, 高文君, 李正科, 等. 注采井网对水驱采收率的影响[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(4): 315-317.
- [8] 李林祥. 孤东油田七区西Ng5<sup>2+3</sup>储层内部构型[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(4): 20-23.
- [9] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 2-63.
- [10] 程会明. 孤岛油田曲流点坝构型[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 20-23.
- [11] 何文祥, 吴胜和, 唐义疆. 河口坝砂体构型精细解剖[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 42-46.
- [12] 方伟, 张居和, 冯子辉, 等. 水驱不同注采位置油藏特征——以萨尔图油田北二西区块油藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 100-103.
- [13] 唐晓红. 埕岛油田中高含水期综合调整对策研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 90-93.
- [14] 孙臻敏, 卢云之, 李林祥, 等. 注水开发后期提高油砂体采收率方法探讨[J]. 断块油气田, 2003, 10(4): 23-26.
- [15] 令文学, 靳恒涛, 王立治, 等. 冀中兴9区块小井眼钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(5): 22-24.

编辑 武云云