

# 基于吸水剖面资料的油藏层间平均 剩余油饱和度计算方法

张世明<sup>1,2</sup>, 吴晓东<sup>1</sup>, 李坤<sup>3</sup>, 崔传智<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东 东营 257015; 3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**层间采出程度差异大是多层合采油藏在高含水期面临的主要问题之一, 正确认识层间采出程度状况对开发措施的制定具有重要的指导意义。吸水剖面资料是反映层间吸水状况差异的重要信息, 分层吸水量的差异主要受各小层的储层物性和剩余油饱和度的差异影响。利用吸水剖面资料, 以水电相似原理和非活塞式水驱油理论为基础, 建立了多层合采油藏各小层平均剩余油饱和度的计算方法, 并将计算结果与油藏数值模拟结果进行对比, 两者的相对误差小于5%。

**关键词:** 多层油藏 层间矛盾 吸水剖面 渗流阻力 剩余油饱和度

**中图分类号:** TE319

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)05-0098-03

陆相沉积油藏纵向层系多, 储层物性差异大, 通常采用多个小层组合成一套层系进行开发, 层间采出程度差异较大。油田开发措施制定的重点之一就是正确认识层间采出程度差异状况, 主要包括室内物理实验、油藏数值模拟和矿物监测等方法。近年来中国学者先后开展了基于室内物理实验或矿场监测方法获取层间动用状况的研究, 马圣贤等通过室内实验对桥口油田多层水驱油藏进行研究, 认识到储层物性差异致使层间具有不同的动用程度<sup>[1]</sup>; 崔英琢等利用监测资料, 从平面、层间及储层特征3个方面分析水驱油藏动用状况变化规律及其原因<sup>[2]</sup>; 冯其红等以单层注采平衡为依据, 综合考虑地质和开发条件, 分阶段预测单层剩余油饱和度<sup>[3]</sup>; 李淑霞等研究了利用井间示踪剂确定剩余油饱和度的方法<sup>[4]</sup>。

油藏数值模拟是非均质油藏剩余油定量化研究的重要手段, 中外学者多采用油藏数值模拟技术对剩余油分布特征进行研究<sup>[5-8]</sup>。对比分析表明, 利用饱和度测井、产液剖面和取心井资料等矿场测试资料分析纵向剩余油分布特征直观准确可靠, 但取心井资料少, 仅能分析井点纵向剩余油分布; 采用油藏数值模拟求取剩余油饱和度能够反映多种因素的影响, 但由于该方法需要大量的基础数

据准备和专业的油藏动态历史拟合技术, 且研究周期长, 矿场普及应用难度较大。

吸水剖面测试工艺简单易行, 是反映层间吸水状况以及调剖堵水措施效果而采取的常规监测手段。分层的吸水状况直接反映了层间的吸水能力, 也间接反映了储层物性及采出程度。目前利用吸水剖面资料确定纵向剩余油分布的研究较少, 为此, 笔者利用吸水剖面资料, 建立了求取各小层平均剩余油饱和度的计算方法, 以期为深化认识水驱油藏剩余油分布及制定合理的开发调整措施提供依据。

## 1 分层平均剩余油饱和度计算方法

### 1.1 基本思路

以注水井为中心, 并将注水井及其所对应的油井视为一个注采井组, 计算中将该井组作为一个整体来考虑, 利用注水井的吸水剖面资料求取井组各层平均剩余油饱和度。为简单起见, 将注采井组等效为一注一采的注采单元, 其注采井距为井组中各注采井距的平均值, 按照注采单元的控制面积与井组的控制面积相等原则, 得到该单元的宽度; 根据井组中各油井产水量和产油量计算得到油井的含

收稿日期: 2014-07-08。

作者简介: 张世明, 男, 高级工程师, 博士, 从事油田开发研究及油藏数值模拟工作。联系电话: (0546) 8715085, E-mail: zhangshm855.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“整装油田特高含水期提高水驱采收率技术”(2011ZX05011-002)。

水率。

计算方法的假设条件包括:①有 $n$ 个小层合采合注;②已知各小层的渗透率、油层厚度和孔隙度等储层物性参数;③通过吸水剖面测试获得每个小层的吸水量;④已知生产井含水率;⑤各小层采用相同的相对渗透率曲线。

根据各小层储层物性和吸水剖面求取其平均剩余油饱和度的主要步骤包括:①将 $n$ 个合采小层作为一个整体,根据油井含水率求得地层中的平均剩余油饱和度,结合相对渗透率曲线求得地层的总渗流阻力;②应用水电相似原理和水井的总注水量得到单元的等效生产压差;③再根据等效生产压差和每个小层的吸水量求得每个小层的渗流阻力,继而求得各小层油水相的视粘度;④根据建立的视粘度与平均含水饱和度的关系曲线,即可求得各小层的平均剩余油饱和度。

## 1.2 注采单元相关数据的求取

### 1.2.1 储层参数平均值

多层合采时的单元总流量等于各小层流量之和,按照等效渗流的原理,其注采单元的平均有效厚度、平均渗透率和平均孔隙度计算式分别为

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^n h_i \quad (1)$$

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (3)$$

式中: $\bar{h}$ 为注采单元的平均有效厚度,cm; $i$ 为小层序号; $n$ 为总层数; $h_i$ 为第 $i$ 小层的有效厚度,cm; $\bar{K}$ 为注采单元的平均渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $K_i$ 为第 $i$ 小层的渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $\bar{\phi}$ 为注采单元的平均孔隙度; $\phi_i$ 为第 $i$ 小层的孔隙度。

### 1.2.2 平均含水饱和度

根据已知相对渗透率曲线建立注采单元储层含水率与含水饱和度的关系曲线,并由油井含水率可得到油井处的含水饱和度。根据水驱油时岩心平均含水饱和度和岩心出口端含水饱和度之间的关系<sup>[9-11]</sup>可求得注采单元中平均含水饱和度为

$$\bar{S}_w = S_{w2} + \frac{1-f_w(S_{w2})}{f_w'(S_{w2})} \quad (4)$$

式中: $\bar{S}_w$ 为平均含水饱和度; $S_{w2}$ 为油井处的含水饱和度; $f_w(S_{w2})$ 为出口端含水率。

在已知油井含水饱和度的条件下,利用注采单元储层含水率与含水饱和度的关系曲线,通过作图法或者迭代法求得该饱和度下的含水率。根据式(4)可得到地层的平均含水饱和度。

### 1.2.3 等效生产压差

注采单元等效生产压差并不是井组的实际生产压差,而是依据注采单元的渗流阻力和注水量计算得到的生产压差。

根据油水相对渗透率曲线,可得到平均含水饱和度下相应的相对渗透率,进而求取注采单元的总渗流阻力为

$$R_i = \frac{L}{B\bar{h}\bar{K}} \left( \frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)^{-1} \quad (5)$$

式中: $R_i$ 为注采单元总渗流阻力, $\text{MPa}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ ; $L$ 为注采单元的长度,cm; $B$ 为注采单元的宽度,cm; $K_{ro}$ 为油相相对渗透率; $\mu_o$ 为地层原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ; $K_{rw}$ 为水相相对渗透率; $\mu_w$ 为地层水粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

根据水电相似原理,由注水井总注水量可得到注采单元的等效生产压差为

$$\Delta p = Q_i R_i \quad (6)$$

式中: $\Delta p$ 为等效生产压差, $10^{-1} \text{MPa}$ ; $Q_i$ 为总注水量, $\text{cm}^3/\text{s}$ 。

### 1.2.4 分层平均含水饱和度

根据水电相似原理,多层合采时各小层的生产压差相同,皆等于注采单元的等效生产压差,由此求出各小层的渗流阻力为

$$R_i = \frac{\Delta p}{Q_i} \quad (7)$$

式中: $R_i$ 为第 $i$ 小层的渗流阻力, $\text{MPa}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ ; $Q_i$ 为第 $i$ 小层的吸水量, $\text{cm}^3/\text{s}$ 。

根据达西定律,各小层的渗流阻力表达式为

$$R_i = \left( \frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)^{-1} \times \frac{L}{Bh_i K_i} \quad (8)$$

令

$$\mu_a = \left( \frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)^{-1} \quad (9)$$

式中: $\mu_a$ 为油水相的视粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

式(8)和式(9)整理后得到各小层视粘度为

$$\mu_{ai} = \frac{R_i B h_i K_i}{L} \quad (10)$$

式中: $\mu_{ai}$ 为注采单元第 $i$ 小层的视粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。由式(10)可以看出,当油水粘度一定时,各小层的视粘度是其含水饱和度的函数。为此,可先建立注采单元油水相对渗透率曲线,且各小层采用相

同的相对渗透率曲线(图1),再根据油水相对渗透率曲线建立各小层在油、水粘度分别为40和0.45 mPa·s时的视粘度与含水饱和度的关系曲线(图2)。

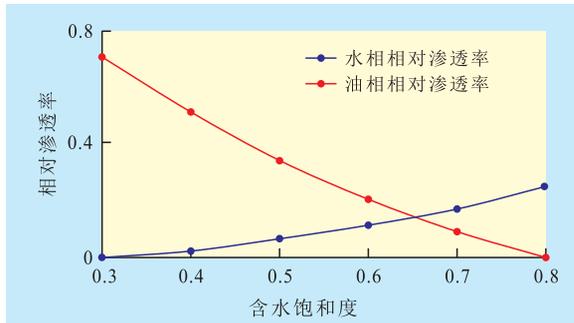


图1 注采单元油水相对渗透率

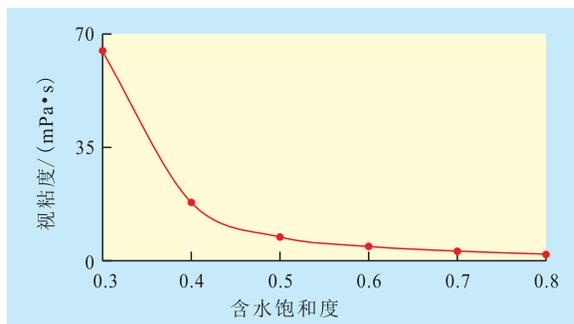


图2 注采单元小层含水饱和度与视粘度的关系

当小层的视粘度一定时,其对应的平均含水饱和度是一定的,所以根据式(10)确定的各小层的视粘度,结合小层视粘度与含水饱和度关系曲线可以得到各小层的平均剩余油饱和度。

## 2 应用实例

在实际矿场应用过程中,分层平均剩余油饱和度无法直接通过检测手段获取,需要采用油藏数值模拟技术对所建方法进行验证。建立了一注四采五点法井组模型,模型规模为300 m×300 m。纵向上分为5个小层,小层厚度分别为1,2,3,4和5 m;渗透率分别为 $100 \times 10^{-3}$ ,  $200 \times 10^{-3}$ ,  $500 \times 10^{-3}$ ,  $800 \times 10^{-3}$ 和 $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;孔隙度均为0.2。各小层之间不连通,没有油水串流。5个小层合采合注,油井采用定液量方式生产。当油藏含水率达到90%时,根据油藏模拟中各小层的吸水量,采用新建方法计算得到各小层的平均剩余油饱和度,并与油藏数值模拟计算得到的各小层的平均剩余油饱和度进行对比(表1)。从表1中可以看出,两者的相对误差在5%以内,表明新建方法计算结果准确,可以快速准确地对层间剩余油饱和度进行预测。

表1 各小层平均剩余油饱和度计算结果对比

小层序号	吸水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	渗流阻力/ ( $\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ )	视粘度/ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	平均含水饱和度		
				计算值	数值模拟值	相对误差, %
1	0.036	17.540	43.850	0.639	0.654	2.29
2	0.154	4.137	41.374	0.611	0.621	1.61
3	1.610	0.396	14.834	0.501	0.506	0.99
4	6.086	0.105	8.369	0.436	0.433	-0.69
5	12.114	0.053	6.570	0.383	0.397	3.53

## 3 结束语

分层吸水量的差异主要是由各小层渗流阻力的差异决定的,而各小层的渗流阻力受小层储层物性和剩余油饱和度的综合影响,在储层物性一定的情况下渗流阻力随剩余油饱和度的变化而变化。因此基于小层吸水量得到的渗流阻力,建立小层平均剩余油饱和度的预测方法是可行的。吸水剖面测试是评价油藏层间采出程度差异的重要方法。利用吸水剖面资料建立了层间平均剩余油饱和度的快速计算方法,经油藏数值模拟验证,方法准确可靠,为油田制定合理的开发措施提供了依据。

### 参考文献:

- [1] 马圣贤,呼舜兴,耿师江,等.多层水驱油实验在桥口油田开发中的应用[J].西安石油学院学报:自然科学版,2003,18(6):48-50.
- [2] 崔英琢,冯佩真,陈代秀,等.胡12块水驱油藏储层动用状况变化分析[J].江汉石油学院学报,2000,22(4):66-68.
- [3] 冯其红,隋园园,陈先超,等.单层剩余油饱和度定量预测研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(6):117-120.
- [4] 李淑霞,陈月明.利用井间示踪剂确定剩余油饱和度的方法[J].石油勘探与开发,2001,28(2):73-75.
- [5] 俞启泰.关于剩余油研究的探讨[J].石油勘探与开发,1997,24(2):46-50.
- [6] 陈岑,胡望水,徐博,等.高集油田高6块阜宁组剩余油分布规律[J].油气地质与采收率,2013,20(4):88-90,93.
- [7] 张少波.特高含水期剩余油分布的油藏数值模拟研究[J].长江大学学报:自然科学版,2010,7(3):218-220.
- [8] 冯其红,王守磊,白军伟,等.层间非均质油藏提液效果数值模拟[J].油气地质与采收率,2013,20(3):49-52.
- [9] Buckley S E, Leverett M C. Mechanism of fluid displacement in sands[J]. Trans A M E, 1942, 14(46): 107-116.
- [10] 徐庆岩,杨正明,何英,等.特低渗透多层油藏水驱前缘研究[J].油气地质与采收率,2013,20(2):74-76.
- [11] 张建国,杜殿发,侯建,等.油气层渗流力学[M].2版.东营:中国石油大学出版社,2010.