

# 无夹层底水油藏直井水锥定量描述

谷建伟<sup>1,2</sup>, 姜汉桥<sup>1</sup>, 吴义志<sup>3</sup>, 郭敏<sup>3</sup>, Yi Bai<sup>4</sup>

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 2.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266555;  
3.中国石化股份胜利油田分公司地质科学研究院,山东 东营 257015; 4.University of Wyoming,Laramie WY 82071)

**摘要:**针对无夹层底水油藏,基于剩余油分布预测的目的,进行水锥定量描述非常必要。由于影响水锥范围的因素众多,采用渗流力学方法和数值模拟技术分别定性和定量研究了各因素的影响规律。根据静力学和渗流力学原理,分别考虑远井地带平面径向流和近井地带半球状向心流渗流特征,采用解析方法推导了水锥高度与水锥半径的关系,定性分析了影响水锥范围的主要因素,包括产液量、油水粘度比和避射高度。在此基础上建立典型底水油藏数值概念模型,计算了多种影响因素下的水锥形态,利用多元非线性回归方法得到水锥高度计算公式,通过积分得到水锥体积计算公式。以Z1油藏1口生产井为例,比较并分析了解析方法和定量计算公式的结果,定量计算公式更适用于水锥高度和体积的计算,可以广泛应用于无夹层底水油藏直井水锥范围的计算和预测。

**关键词:**底水油藏 解析方法 数值概念模型 多元非线性回归 水锥定量描述

**中图分类号:**TE347

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2012)06-0078-04

对于具有充足底水能量且垂向上无夹层的油藏,采用直井开采时,不可避免地会形成底水锥进。在水锥体内部,水驱程度较高,而在水锥体之外的储量基本未动用,形成大量的剩余油。对于底水油藏,若能准确描述水锥高度和体积,即意味着能寻找到剩余油富集区域,因此,水锥定量描述一直是底水油藏研究的热点。

朱圣举假设水锥是1个侧面呈直线的圆锥体,推导了水锥高度和水锥半径之间的计算公式<sup>[1]</sup>;李传亮则假设水锥是1个曲线锥,推导了水锥表达式<sup>[1]</sup>。侯君等假设水锥体侧面为曲线且流动为稳定平面径向流动,基于静力学原理,建立了水锥高度模型的隐函数<sup>[2]</sup>。Guo等利用平面径向流和半球状向心流的组合,对水锥的形状及高度进行了研究,得到水锥位置与产量和井筒位置间的函数<sup>[3]</sup>。唐人选同样利用2种渗流模型的假设,推导出油井见水前水锥形态的隐式函数<sup>[4]</sup>。蒋平等沿用了Guo的模型,但是通过假设不同的边界条件重新推导了临界产量、水锥高度和形态的表达式,模型中考虑了油水两相流,但在油藏高含水开发期计算效果不理想<sup>[5-6]</sup>。黄咏梅等针对碳酸盐岩油藏推导了变液量情况下水锥高度计算公式<sup>[7]</sup>。杨元亮等采用数值模拟方法研究了单家寺稠油油藏注氮气控制底水锥

进的方法<sup>[8]</sup>。笔者假设远井地带为平面径向流,近井地带为半球状向心流,并将油相和水相流动分开进行研究,重新推导了水锥高度定量计算公式。

## 1 直井水锥解析求解

假设地层均质且各向同性,不考虑毛管压力影响,底水能量充足,油层底部的原始油水界面为恒压边界,流体和岩石不可压缩,渗流为稳定渗流。假设油藏中流体流动是从径向流过渡到半球状向心流,即从远处地层向水锥界面的渗流为平面径向流,主要考虑油相流动;水锥界面内向井底的渗流是半球状向心流,主要考虑水相流动;选取生产井垂直方向上与原始油水界面交点处为原点,从原点上为 $z$ 方向,向外为 $r$ 方向(图1)。

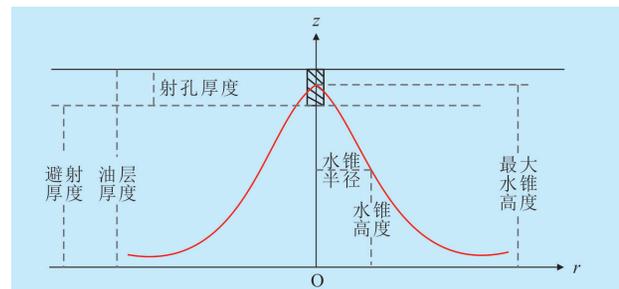


图1 底水锥进模型示意

收稿日期:2012-09-18。

作者简介:谷建伟,男,教授,博士,从事油藏工程教学与科研工作。联系电话:13963366604, E-mail: gjwlep@upc.edu.cn。

基金项目:国家重大专项“整装油田特高含水期提高采收率技术”(2011ZX05011-002)。

根据静力学原理,在稳定渗流条件下可以分别得到油相平面径向流和水相半球状向心流的重力差<sup>[9]</sup>,该重力差等于生产压差。

根据渗流力学原理,油相平面径向流和水相半球状向心流的压力梯度分别为

$$\frac{dp}{dr} = \frac{q\mu_o(1-f_w)}{2\pi K_o r(h-z)} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu_w}{K_w} \times \frac{qf_w}{2\pi r^2} \quad (2)$$

式中:  $p$  为地层中任意点处的压力,  $10^{-1}$  MPa;  $r$  为水锥半径, cm;  $q$  为产液速度,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $\mu_o$  为油相粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $f_w$  为含水率;  $K_o$  为油相渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $h$  为油层厚度, cm;  $z$  为任意处水锥高度, cm;  $\mu_w$  为水相粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $K_w$  为水相渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

对压力梯度沿  $r$  方向进行积分,可以得到生产压差,该生产压差应与采用静力学原理得到的压差相等,油相平面径向流和水相半球状向心流的表达式分别为

$$-\Delta\rho_{wo}gz = \int_{r_e}^r \frac{q\mu_o(1-f_w)}{2\pi K_H K_{ro} r(h-z)} dr \quad (3)$$

$$-\rho_w g(z_{\max} - z) = \int_r^{r_w} \frac{q\mu_w f_w}{2\pi K_H K_{rw} r^2} dr \quad (4)$$

式中:  $\Delta\rho_{wo}$  为油水密度差,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ , 取值为 9.8;  $r_e$  为供给半径, cm;  $K_H$  为水平渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $K_{ro}$  为油相相对渗透率;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $z_{\max}$  为最大水锥高度, cm;  $r_w$  为油井半径, cm;  $K_{rw}$  为水相相对渗透率。

当  $r=r_e \rightarrow \infty$  时,水锥高度为 0;当  $r=r_w$  时,水锥高度达到最大值。矿场资料和实验结果表明,在高含水开发期,底水锥进时最大水锥高度为

$$z_{\max} = h_b + \frac{1}{2}h_p \quad (5)$$

式中:  $h_b$  为从原始油水界面到生产井射孔底界的垂直高度,即油层避射高度, cm;  $h_p$  为生产井射孔部分的油层垂向高度, cm。

以式(5)为定解条件,可以得到任意水锥半径处油相平面径向流和水相半球状向心流的水锥高度公式分别为

$$z = -\frac{q\mu_o(1-f_w)}{2\pi K_H K_{ro} \Delta\rho_{wo} g} \times \frac{\ln \frac{r_e}{r_w}}{r_e z_{\max}} \ln \left( 1 - \frac{z_{\max} \ln \frac{r_e}{r}}{h \ln \frac{r_e}{r_w}} \right) \quad (6)$$

$r > 1.5h_b$

$$z = z_{\max} - \frac{q\mu_w f_w}{2\pi K_H K_{rw} \rho_w g} \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r} \right) \quad (7)$$

$r \leq 1.5h_b$

远井地带流体流动为平面径向流,而近井地带流动为半球状向心流,从电解模型实验中证实<sup>[10]</sup>:当  $r=1.5h_b$  时,球面流很快退化为平面径向流,所以式(6)和式(7)的适用界限为  $r=1.5h_b$ 。

根据解析水锥公式可得,影响直井水锥范围的因素有:产量、流体粘度、避射高度、油层厚度、渗透率、流体密度等。其中产量、流体粘度、避射高度是主要影响因素。

## 2 直井水锥定量描述

在解析方法中未考虑井距、垂直渗透率与水平渗透率比值对开发效果的影响,这2个因素对水锥影响非常大<sup>[11]</sup>。在公式推导过程中,假设渗流为稳定流动,但实际生产中为满足经济效益的需求,油井产液量要远高于临界产量,且渗流多为不稳定流动,会导致解析水锥公式计算结果与实际水锥状况有差异。采用数值模拟方法可以考虑以上所有因素的影响,因此,可以在建立底水油藏数值概念模型的基础上,研究各种因素对水锥范围的影响,进而得到水锥定量表达式。

底水油藏数值概念模型采用均匀网格系统, Fetichovich 分析水体,划分为  $100 \times 50 \times 18$  共 90 000 个网格的网格系统,网格  $x$  方向和  $y$  方向步长均为 8 m,纵向上网格步长为 1 m,纵向上 1—15 层为油层,16—18 层为水层。模型中共有 6 口生产井,无注水井;中心井产量设置为全井产量的 1/2,角井产量设置为全井产量的 1/4。

考虑各种参数对水锥的影响,对其范围分别进行设置:井距为 100~400 m,地层垂向渗透率与水平渗透率比值为 0.01~0.4,油层厚度为 3~30 m,油水粘度比为 100~400,地层原油密度为 0.80~0.96  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,采液速度为 1%~10%,水油体积比为 20~200。对以上参数进行组合得到多种方案,每种方案都是生产井含水率达到 98% 时关井。

首先确定水锥符合的函数形式。分别利用抛物线形式、指数形式、多项式等函数对概念模型计算的水锥剖面形状进行拟合,最后优选确定表达式为

$$f(r) = a_1 + a_2 e^{-a_3 r^2} \quad (8)$$

式中:  $a_1$ ,  $a_2$  和  $a_3$  均为公式的回归系数,其中  $a_1$  相当于水锥形成后从原始油水界面开始整体上升的高度, cm;  $a_2$  相当于上部锥体的高度, cm;  $a_3$  为回归系数,  $\text{cm}^{-2}$ 。

在一种水锥状态下,将拟合公式和数值模拟计算的水锥高度进行对比,从结果(图2)可见,2种方式计算结果一致,说明得到的水锥拟合公式可行。

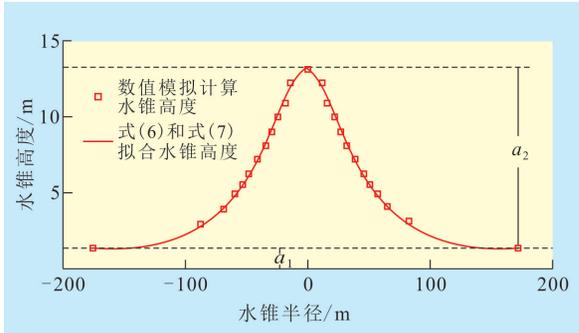


图2 数值模拟计算水锥与拟合公式计算水锥对比

式(8)描述了任意水锥半径处水锥的高度,沿  $r$  方向进行积分可得到水锥的体积。水锥体可以分为2部分,下面整体抬升部分近似为1个长方体,上面部分是1个旋转体,水锥体积为旋转体体积与长方体体积之和。

以  $z$  轴为旋转轴的旋转体体积和长方体体积分别为

$$V_1 = 2\pi \int_0^{r_{\max}} r a_2 e^{-a_3 r^2} dr = \frac{a_2}{a_3} \pi \left(1 - e^{-a_3 r_{\max}^2}\right) \quad (9)$$

$$V_2 = L D a_1 \quad (10)$$

式中:  $V_1$  为旋转体体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_2$  为长方体体积,  $\text{cm}^3$ ;  $L$  为底水油藏井网的井距,  $\text{cm}$ ;  $D$  为排距,  $\text{cm}$ 。

则水锥体积为

$$V = \frac{a_2}{a_3} \pi \left(1 - e^{-a_3 r_{\max}^2}\right) + L D a_1 \approx \frac{a_2}{a_3} \pi + L D a_1 \quad (11)$$

式中:  $V$  为水锥体积,  $\text{cm}^3$ 。

通过分析水锥的形状,给出了水锥高度和水锥体积的计算公式,在公式中包括系数项  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ 。这3个参数决定了水锥的形状和体积,因此所有影响水锥大小的参数都会对它们造成影响。当水锥半径为0时,生产井井底的水锥高度为最大水

锥高度,此时

$$f(r) = a_1 + a_2 = h_b + \frac{1}{2} h_p = \frac{1}{2} (h + h_b) \quad (12)$$

对于一个生产井,  $h$ ,  $h_p$ ,  $h_b$  这3个参数是已知的,即  $a_1$  和  $a_2$ , 知道其中1个即可确定另外一个参数,即只需再确定  $a_2$  和  $a_3$  即可得到水锥剖面的表达式。

确定  $a_2$  和  $a_3$  的方法为:首先进行单因素分析,以建立的数值概念模型为基础,对影响水锥的因素设置不同的水平,利用概念模型计算得到水锥形状,然后采用式(8)对水锥进行拟合,得到  $a_2$  和  $a_3$  与该因素的关系式;按上述方法,得到  $a_2$  和  $a_3$  与每个影响因素的相关关系式;采用多元回归方法,对影响  $a_2$  和  $a_3$  的每个因素进行综合分析,得到多因素回归关系式。

以井距为例说明研究过程:在其他因素不变的情况下,分别采用100, 150, 200, 250, 300, 350, 400和450 m共8种井距,利用概念模型计算水锥形状,用式(8)对水锥剖面进行拟合,得到不同井距条件下的  $a_2$  和  $a_3$ 。采用多种函数形式分析  $a_2$  和  $a_3$  与井距的关系,优选最佳的回归关系式。研究发现  $a_2$  和  $a_3$  与井距的倒数成线性关系(图3)。

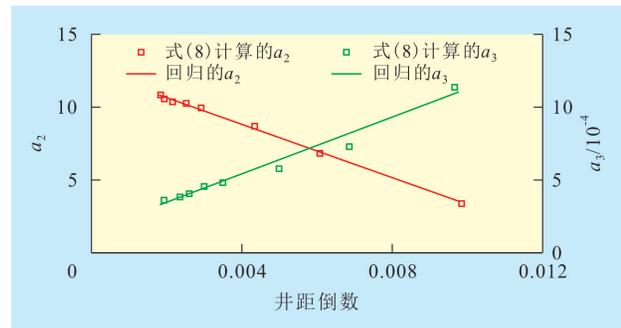


图3  $a_2$  和  $a_3$  与井距的关系

采用同样研究思路,对其他影响因素进行分析,得到  $a_2$  和  $a_3$  与各个影响因素之间关系(表1)。

表1 $a_2$ 和 $a_3$ 与各因素间的关系式		
影响因素	$a_2$	$a_3$
井距	$a_2 = -\frac{903.09}{L} + 14.48$	$a_3 = \frac{0.149}{L} - 0.241 \times 10^{-4}$
油水粘度比和油水密度差	$a_2 = -0.0722 \frac{\Delta\rho_{wo}}{\ln\mu_r} + 12.815$	$a_3 = 0.0352 \times 10^{-4} \frac{\Delta\rho_{wo}}{\ln\mu_r} + 3.59 \times 10^{-4}$
产液量	$a_2 = -\frac{7.088}{\ln q} + 14.677$	$a_3 = \frac{3.36 \times 10^{-3}}{q} + 3.323 \times 10^{-4}$
垂向渗透率与水平渗透率比值		$a_3 = 3.34 \times 10^{-3} \frac{K_z}{K_H} + 5.0 \times 10^{-5}$
油层厚度和避射程度	$a_2 = 0.978 h_b + 2.36$	$a_3 = \frac{1.32 \times 10^{-2}}{h} - 4.43 \times 10^{-4}$
含水率		$a_3 = \frac{9.53 \times 10^{-4}}{f_w} - 5.61 \times 10^{-4}$

注:  $\mu_r$  为油水粘度比;  $K_z$  为垂向渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

采用LSTOPT软件(多元非线性处理软件)进行多元回归,得到 $a_2$ 和 $a_3$ 与影响因素的关系,即底水油藏水锥的定量描述公式

$$a_2 = 0.724h_b - 506.493 \frac{\Delta p_{wo}}{hL \ln \mu_r} - \frac{1.909}{\ln q} + 6.776 \quad (13)$$

$$a_3 = 5.47 \times 10^{-5} \frac{\Delta p_{wo}}{qf_w \ln \mu_r} + \frac{8.83 \times 10^{-3}}{h_b} + \frac{1.25 \frac{K_z}{K_H}}{L} - 8.14 \times 10^{-4} \quad (14)$$

利用定量描述公式可以实现不数值模拟的情况下,仅采用油藏储层参数、流体参数和开井控制条件即可计算水锥范围的目的。

### 3 应用实例

Z1油藏为典型的底水普通稠油油藏,油层物性较好,平均孔隙度为32.3%,平均空气渗透率为 $1.047 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为高孔、高渗透储层,以Z1井为例,该井油层厚度为11.6 m,射孔程度为80%,垂向渗透率与水平渗透率比值为0.1,油水粘度比为354,地层原油密度为 $0.903 \text{ g/cm}^3$ 。1988年11月投产初期产液量为 $40 \text{ m}^3/\text{d}$ ,含水率为2.5%,截至2011年10月产液量为 $45 \text{ m}^3/\text{d}$ ,含水率为96.5%。

分别利用解析公式和水锥定量描述公式计算Z1井在目前条件下的水锥高度分布。从图4中可以看出,采用解析公式得到的水锥高度要低于采用定量描述公式计算的水锥高度,造成这种现象的原因主要是解析公式求解过程中没有考虑垂向渗透率与水平渗透率比值对水锥的影响,因此水锥呈现快速上升的特征。

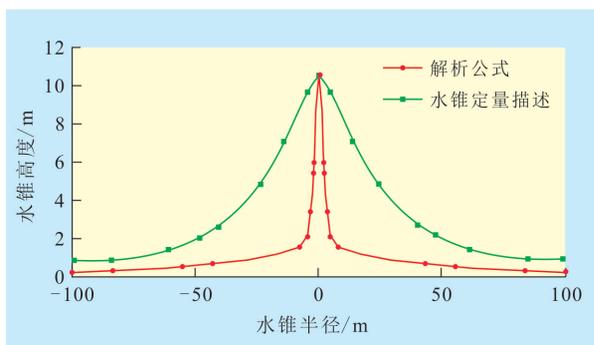


图4 Z1井水锥高度计算结果

Z1井附近有1口生产其他层系的油井,2011年10月测井解释Z1井所投产层位水淹高度为3.7 m;而利用定量描述公式得到相同位置上的水锥高度为3.9 m,误差为5.4%;采用解析公式计算的水锥高度为1.8 m,误差为-45.9%。实例比较说明,水锥定量描述公式计算结果满足矿场应用要求。

### 4 结束语

针对没有夹层、直井开采的底水油藏,推导出的水锥解析公式表明,产液量、油水粘度比和射孔高度是影响水锥范围的主要因素;但是解析方法中没有考虑到垂向渗透率与水平渗透率比值对水锥的影响,造成计算的水锥范围与实际动态有偏差。采用数值模拟方法建立的水锥定量描述公式,考虑的因素全面,计算结果与实际符合程度较高。此外利用该定量公式可以实现不同开发阶段水锥范围的预测,应用简单方便,可以进行矿场应用。

#### 参考文献:

- [1] 李传亮.水锥形状分析——与朱圣举先生商榷[J].新疆石油地质,2002,23(1):74-75.
- [2] 侯君,程林松.常规底水油藏水锥高度计算方法研究[J].西安石油大学学报,2006,21(3):23-26.
- [3] Guo Boyun, Lee R L-H. A simple approach to optimization of completion interval in oil/water coning systems[R].SPE 23994, 1993: 249-255.
- [4] 唐人选.底水油藏水锥动态模拟及见水时间预测[J].新疆石油地质,2003,24(6):572-573.
- [5] 蒋平,张贵才,何小娟,等.底水锥进的动态预测方法[J].钻采工艺,2007,30(2):71-73.
- [6] 蒋平,张贵才,葛际江,等.采用供给边界压力预测底水突破前水锥参数[J].油气地质与采收率,2006,13(6):76-78.
- [7] 黄咏梅,王子胜.产液量变化对水锥的作用机制[J].油气地质与采收率,2008,15(6):83-85.
- [8] 杨元亮,沈国华,宋文芳,等.注氮气控制稠油油藏底水水锥技术[J].油气地质与采收率,2002,9(3):83-84,88.
- [9] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠.油藏工程原理与方法[M].东营:中国石油大学出版社,2006:91-94.
- [10] 张建国,雷光伦,张艳玉.油气层渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2006:49-50.
- [11] 喻高明,凌建军,蒋明焯,等.砂岩底水油藏开采机理及开发策略[J].石油学报,1997,18(2):61-65.

编辑 刘北羿