

水平井渗流模型分析评价及发展方向

廉黎明¹,秦积舜¹,杨思玉¹,杨永智¹,李延松²

[1. 中国石油 勘探开发研究院 提高石油采收率国家重点实验室,国家能源二氧化碳驱油与埋存技术研发(实验)中心,石油采收率研究所,北京 100083; 2. 中国石油 吉林油田公司 乾安采油厂 地质所,吉林 乾安 131400]

摘要:为了进一步发展水平井技术以应对目前老油田产能下降及新增低渗储量比例不断提高的状况,需要对水平井理论进行进一步的深入研究。从最基础的渗流理论出发,总结分析国内外有关水平井的多种渗流模型,将这些模型按照所对应的渗流状态分为稳态渗流模型、拟稳态渗流模型、非稳态渗流模型以及井筒与地层耦合流动模型4类。通过对各类模型的适用条件及优缺点进行分析评价,认为稳态模型具开创性意义,但假设过于理想,与实际相差较远;拟稳态模型形式简单,却只描述了一个很短时间的形态;非稳态模型具有普遍性,但没有考虑到近井地带井筒流动的影响;而耦合模型在实际和精度方面具有优势,但却存在计算复杂的问题。在此项研究的基础上,提出了模型下一步发展方向,即以井筒与地层耦合模型为基础,进一步引入实际参量,并根据实际条件对参量进行拟合,固定部分计算参量的数值,在保证精度的前提下简化计算过程;同时,结合追踪流线及矢量井网等方法的应用,丰富研究手段。

关键词:稳态;非稳态;拟稳态;渗流模型;水平井;提高采收率

中图分类号:TE21

文献标识码:A

Analysis and evaluation on horizontal well seepage models and their developing trends

Lian Liming¹, Qin Jishun¹, Yang Siyu¹, Yang Yongzhi¹, Li Yansong²

(1. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery & National Energy(Experiment) Research Centre of CCUS & Department of Enhanced Oil Recovery, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Department of Petroleum Geology, Qian'an Exploit of Jilin Oilfield Company, PetroChina, Qian'an, Jilin 131400, China)

Abstract: As productivity of mature oilfields lowers and the proportion of reserves in low-permeability reservoirs increases, horizontal-well theory needs to be improved to innovate horizontal well technologies. Beginning with the basic seepage flow theory, this paper reviews different seepage models of horizontal wells at home and abroad. These models are divided into 4 types, including steady state model, pseudo steady state model, unsteady state model and wellbore-reservoir coupled flow models. The applicable conditions as well as advantages and disadvantages of every model are analyzed and evaluated. The results show that the steady state model is of pioneering significance, but their assumptions are too ideal to be in accordance with the actual situations; the pseudo steady state model is simple in forms, but can only describe seepage flow in a short-period; the unsteady state model is universal, but does not take the influences of wellbore flow in near wellbore areas into consideration; the wellbore-reservoir coupled flow model is high in accuracy, but also high in complexity of computation. Based on the study above, the paper presents the trend of seepage model development. Actual parameters will be introduced based on the wellbore-reservoir coupled flow model and will be fitted according the actual conditions. Some of the parameters will be determined to simplify the calculation procedure. Moreover, methods such as tracking streamline and vector well pattern will be incorporated to enrich research tools.

Key words: steady state, unsteady state, pseudo steady state, seepage model, horizontal well, enhanced oil recovery

目前,国内外油田开发正面临老油田产能逐渐下降、新增储量中低渗透所占比例逐渐上升的情况^[1],而水平井技术作为减缓生产井见水速度、增加注入井注入能力以及增大波及体积、减小地层压力伤害的高效

开发技术,得到了越来越广泛的应用^[2-3]。在水平井技术出现、发展和普及的过程中,对水平井渗流理论的研究是其强大的后盾和技术支撑,也是众多学者研究的热点和重点。一直以来,国内外学者对水平井渗流

收稿日期:2012-09-12;修订日期:2013-11-01。

第一作者简介:廉黎明(1985—),男,博士,油气田开发工程。E-mail:LLMXH@163.com。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司超前储备项目(2011A-1005);中国石油“十二五”油气田开发科技项目(2011B-1308)。

理论的研究大多采用数学解析法配合物理建模的方式^[4]。笔者总结了水平井渗流理论四大类模型共十几种公式,并进行了分析评价。

1 水平井稳态渗流模型

在渗流过程中,当压力变化速度为零($dp/dt=0$)的时候,即为稳态渗流^[5]。这是一种理想的情况,一般在实际情况下很少出现。

对于水平井的研究,国外的学者进行较多,起步也较早。1958年,前苏联学者B. Л. Меркулов(英文写法为Merkulov)^[6]首次发表了关于水平井的产能预测公式。此公式在处理径向流动或拟径向流动(在泄油半径以内不存在油藏边界,即水平井流动无边界效应的影响或可看作是无限大地层中一口水平井的流动)以及平行流动(井底不存在液流边界,即水平井井底可看作为裂缝井,具有无限导流能力且井底附近无压力突变)时,具有一定的实用性。

对于圆形油藏,得到的水平井产能公式如下所示:

$$q = \frac{2\pi K_h h L}{\mu_o B_o} \times \frac{\Delta p}{h \left[\frac{\pi b_1}{h} + \ln \frac{h}{2\pi r_w} \left(\ln \frac{a_1 + c}{2c} + \lambda \right) \right] + L \ln \frac{2r_e}{a_1 + b_1}} \quad (1)$$

对于带状油藏,得到的水平井产能公式如下所示:

$$q = \frac{2\pi K_h h L}{\mu_o B_o} \times \frac{\Delta p}{h \left[\frac{\pi b_1}{h} + \ln \frac{h}{2\pi r_w} \left(\ln \frac{a_1 + c}{2c} + \lambda \right) \right] + L \ln \frac{\frac{\pi H}{\sigma}}{\frac{\pi}{2\sigma} \left(\frac{a_1 + b_1}{2} \right)}} \quad (2)$$

式中: q 为产量, cm^3/s ; K_h 为储层有效渗透率, μm^2 ; h 为油层有效厚度, cm ; L 为水平段长度, cm ; μ_o 为原油有效粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B_o 为原油体积系数, cm^3/cm^3 ; Δp 为生产压差, atm ; r_w 为水平井井筒半径, cm ; r_e 为水平井泄油半径, cm ; H 为距直线供给边缘的距离, cm ; σ 为水平井排内的井距,如果只存在一口水平井,则此项数值为零; $a_1 = \frac{L}{2} + \frac{h}{2}$, $b_1 = 2h \sqrt{L+1}$, $c = \frac{L}{2}$; $\lambda = f(\alpha, \omega)$, $\alpha = \frac{L}{2h}$, $\omega = \frac{\delta}{h}$, δ 是水平井垂向偏心距, cm ,表示水平井水平段的井轴距油层中部的垂向距离,对于水平井而言,有 $\lambda = 0.462\alpha - 9.7\omega^2 + 1.284\omega + 4.45$ 。

另一位前苏联学者Borisov在Merkulov的基础之上^[7],提出了新的假设条件:油藏为箱状油藏,均质并

各向同性;储层流体为单相不可压缩流体,渗流过程属于稳态渗流过程;目标水平井位于油层中心,泄油区域形状为椭球或椭圆。但由于公式考虑假设过多,存在一定缺陷,即水平井的长度相对于泄油半径不能太大。

法国的Giger在1983年首次将物理实验模拟应用到研究油藏工程中的水平井产能、压力及渗流问题中,并于1984年^[8]提出了基于物理实验模拟的产能公式,利用水、电相似原理,通过物理的电模拟,对位于油藏含油储层中心的水平井进行了研究。Giger公式很好地利用了物理模拟实验结果,但也存在一定缺陷,只能对位于立体油藏中央部位的水平井进行描述,这就使得公式的应用范围大大减小。

为了使得理论能够应用于非均质储层,1984年,以同年Giger提出的公式为基础,Giger, Reiss和Jourdan又共同提出了改进的水平井产能公式^[8]。其思想是在Giger水平井产能公式的基础之上,将公式中水平方向上的渗透率 K_h 用一个等效渗透率的概念 K' 来表示,等效渗透率 K' 为地层垂直方向上的渗透率 K_v 和水平方向上的渗透率 K_h 的几何平均值,即 $K' = \sqrt{K_h K_v}$ 。在这一公式中,学者们依旧没有考虑水平井水平段长度、水平井水平段内的压降、水平井井筒储集效应以及表皮效应的影响。

1986年,美国学者Joshi在前人的研究基础之上,利用水、电相似原理,通过运用电场流理论,对水平井产量计算公式作了比较详细的推导,提出了著名的Joshi公式^[9]。Joshi创造性地提出水平井泄油体是以水平井段两端点为焦点的椭圆体。同时,他又根据学者Muskat关于油层非均质性和水平井位置偏心距的概念和计算,推导出了考虑因素更为全面的水平井产能公式,得到如下公式:

$$q = \frac{2\pi K_h h}{\mu_o B_o} \times \frac{\Delta p}{\left[\ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2r_w} \right]} \quad (3)$$

式中: a_2 为水平井泄油体所形成椭圆球体的长半轴,其计算公式为 $a_2 = \frac{L}{2} \left[\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{(L/2r_e)^4}} \right]^{1/2}$;其余符号意义同前。

对于非均质油藏或各向异性油藏,Joshi又提出了修正系数(采用有效渗透率)的概念^[10],在原适用于均质且各向同性油藏的Joshi公式中引入一个非均质修正系数,表征非均质油藏水平方向渗透率和垂直方向渗透率存在的差异。这一方法将原来应用于均质各向同性油藏的Joshi公式的范围大大推广。Joshi公式虽然应用广泛,但依然存在水平井的长度与泄油边界到井的距离之间的矛盾,两者相差不能太大($L < 1.8r_e$)。

1990年, Renard 和 Dupuy 在 Joshi 和 Giger 的水平井产能方程的基础之上, 对水平井产能进行了进一步探讨和研究^[11], 并重新按照学者 Joshi 的假设推导了水平井产能公式。此公式与 Joshi 公式几乎完全相同, 只是在近井阻力项的分母上多了一个 π , 而且仍然没有摆脱水平井长度和泄油边界到井距离的限制。

同年, 为了表征水平井井筒附近地层伤害对水平井产能的影响^[11], Renard 和 Dupuy 在他们推导的水平井产能公式的基础上引入了表皮因子或称表皮系数的概念来修正水平井稳态产能方程。由于水平井的生产为近似线性生产, 与直井的近似点状生产不同, 水平井井筒产量不集中, 其单位长度产量较低, 而表皮因子与井筒附近的单位长度产能有很大关系, 因而计算出来的表皮因子对水平井产能的影响并不大。此外, 由于推导假设, 本方程只可以适用于泄油区域为圆形、椭圆形以及正方形或矩形的水平井, 得到如下公式:

$$q = \frac{2\pi K_h h}{\mu_o B_o} \times \frac{\Delta p}{\left[\cos^{-1} x + \beta \frac{h}{L} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - (L/2a_2)^2}}{L/2a_2} + \beta \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} + \beta \frac{h}{L} s \right]} \quad (4)$$

式中: $x = 2a_2/L$; $\cos^{-1} x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$; β 为修正系数, 无因次; s 为表皮系数, 无因次; 其余符号意义同前。

1991年, 为表征水平井水平段见液规律^[12], Frick 和 Economides 引入水平井渗流表皮效应概念。

1996年, 针对位于不规则泄油区域的水平井的产能^[13], Elgaghad, Osisanya 和 Tiab 等人提出了对油藏整体形状的假设, 认为它是由一系列半圆和两个矩形所组成的。

在国外学者 Giger, Renard 和 Joshi 等人研究的基础上, 在随后水平井渗流计算的发展过程中, 随着数学方法和物理模型的进步, 国内外众多学者通过使用新的数学方法和物理建模^[14], 获得了此类条件下更精确的水平井渗流模型。

我国学者陈元千^[15]、范子菲、吕劲公和程林松^[16]等人也通过数学物理方法, 应用叠加原理、镜像反映和复变函数、势函数变换的方法与水、电相似原理结合, 建立并改善了水平井稳态渗流模型。

水平井稳态渗流模型是水平井渗流模型的先驱, 它应用经典渗流理论揭开了水平井理论计算的篇章, 在水平井渗流理论计算的发展过程中具有重要作用。但是这一阶段的模型大都假设过多, 局限于稳态渗流, 并且把水平井简化为无限导流能力的裂缝井, 与实际情况相差较远, 因而在使用过程中常常受到局限。

2 水平井拟稳态渗流模型

在渗流过程中, 当压力变化速度为常数 ($dp/dt = \text{常数}$) 的时候, 为拟稳态渗流^[5]。

尽管水平井稳态模型在水平井产能预测中得到了广泛应用, 但实际上, 任何油藏都不可能以稳态形式出现。当生产井所产生的压力扰动传到该井的泄油面积边界时, 拟稳态开始。下面就对拟稳态的水平井计算公式进行评述。

在水平井拟稳态渗流的描述过程中, 国外学者还是走在了前列。Mutalik 和 Joshi 等人在利用数学物理模型建立水平井稳态渗流模型之后, 又通过物理模拟的方法建立了水平井拟稳态渗流模型^[17], 得到的水平井产能公式如下所示:

$$q = \frac{0.007\,078eK_h h}{\mu_o B_o} \times \frac{\Delta p}{\left[\ln(r'_e/r_w) - A' + s_f + s_m + s_{cah} - c' + D_q \right]} \quad (5)$$

式中: r'_e 为等效供给半径, $m, r'_e = \sqrt{A'/\pi}$, A' 为与水平井泄油形状相关的系数, 无因次, 对于将泄油面积视作椭圆形, $A' = 0.750$, 而对于将泄油面积视作正方形或矩形, $A' = 0.738$; s_f 为长度 L 为在厚度上完全穿透的无限导流裂缝的表皮系数, 无因次, $s_f = -\ln[L/(4r_w)]$; s_m 为机械表皮系数, 无因次; s_{cah} 为形状相关表皮系数, 无因次; c' 为形状因子转换常数, 无因次, $c' = 1.386$; D_q 为水平井底非达西流动引起的附加表皮系数, 无因次; 其余符号意义同前。

Mutalik 和 Joshi 的公式虽然较早研究了水平井拟稳态渗流, 但是却不能很好地适用于一些边界条件较为复杂的油藏, 因而一些学者提出了新的修正方法对水平井的渗流方程进行修正, 用以将无边界限制的水平井渗流模型推广至有边界限制的水平井渗流中去。

1988年, Babu 和 Odeh 针对任意箱形油藏^[18], 通过物理模型分析, 建立了水平井不稳定渗流的数学模型:

$$q = \frac{2\pi b_3 \sqrt{K_h K_v}}{\mu_o B_o} \times \frac{\Delta p}{\left[\ln(\sqrt{a_3 h}/r_w) + \ln c - 0.75 + s \right]} \quad (6)$$

式中: a_3, b_3 分别为泄油椭圆体的长轴和短轴, $m; c$ 为形状因子, 无因次; s 为表皮系数, 无因次; 其余符号意义同前。

除了学者 Babu 和 Odeh 建立的水平井渗流模型以外, 之前许多学者建立的水平井渗流模型都是不考虑水平井水平段压降的, 因为当时存在这样一个共识: 水平井井筒压降的值远远小于油藏压降的值, 因此相比

之下,水平井井筒压降可以忽略不计。但是,Babu 和 Odeh 认为这一假设是错误的^[18]。他们认为,水平井在渗流过程中的井筒压降不能忽略,因此他们在建立模型时考虑了水平井井筒压降对水平井拟稳态渗流的影响。

水平井拟稳态渗流模型在前人的基础上考虑了拟稳态,比稳态模型更进了一步,但是却延续了对水平井无限导流能力的假设,并且依然不能很好地描述水平井实际渗流状态。

3 水平井非稳态渗流模型

目前,水平井、多分支井的实际渗流主要以非稳态为主,因而产能预测也以非稳态预测为主,而这种预测一般比较困难,主要是由于井筒被钻井液和完井液污染,而且油藏中的流体流入、流出时,产生的压力降很难预测。

运用水平井的解析产能方程对产能进行评价和预测的优点是使用方便,并且能满足工程精度的要求。但它的不足之处也非常明显的。这种方法一般只能应用于单相流体的流动,而且需要掌握完备的油藏数据资料,因此导致了其应用的局限性。

由于水平井的实际生产原理及在油藏中的流态与直井相比有很大差异,所以必须对直井流动动态方程(IPR 方程)进行修正后,才可能对水平井的稳态产能进行预测。

Sherrad(1986)等人采用数值模拟方法得出了水平井的无因次 IPR 方程^[19],所获得的无因次 IPR 曲线的形状与 Vogel 和 Fetkovich 预测出的直井无因次 IPR 曲线十分相似。Bendakhlia 和 Aziz(1989)采用两种三维三相的黑油模型生成了水平井的 IPR 曲线,并作了各因素的敏感性分析。

Bendakhlia 将修正的 Vogel 方程和 Fetkovich 方程组合起来^[19],与实际曲线吻合得很好:

$$\frac{q_o}{q_{o\max}} = \left[1 - V \frac{p_{wf}}{p_r} - (1 - V) \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \right]^n \quad (7)$$

式中: q_o 表示油井实际产量, cm^3/s ; $q_{o\max}$ 表示油井的理论最大产量, cm^3/s (完善井,流动效率为 1,表皮系数为 0); p_{wf} 为井底流压, atm ; p_r 为供给边界的压力, atm ; V 和 n 为随采收率变化而变化的常数。

水平井的 IPR 曲线的研究方法均为 Vogel 和 Fetkovich 方法。这些经验 IPR 方程虽然简便实用,却在理论上存在一定的欠缺,而且它们的适用范围受到模型假设条件的限制,具有较大的局限性。预测水平井油气两相渗流的 IPR 曲线方法还有待作进一步研究。

水平井非稳态渗流模型将非稳态渗流纳入考虑的

范围,与实际的情况更加接近,但是由于在假设中依然没有考虑井筒的作用,因而对于井筒附近的渗流不能很好地描述。

4 水平井井筒管流与油藏流体渗流耦合流动模型

一直以来,油藏地质模型中对水平井渗流的研究,大多借用“热传导线汇理论”,除去少部分采用等水头的第一类井孔边界条件,其他都应用等强度线汇(均匀入流)的第二类井孔边界条件。

尽管对于渗流而言,水平井井孔滤管壁面是渗流边界,原油通过地层孔隙渗入井筒后就不再是渗流而属于管流界限,但在以前的研究中,并未给出滤管壁面作为渗流边界的边界条件。

伴随数学、物理方法的发展和水平井技术的提高,中外学者逐渐意识到将水平井单纯考虑为具有无限导流能力的裂缝井或者是排油坑道与水平井在油藏中的实际渗流规律不符,已无法满足计算精度。于是,基于磁场耦合模型的启发,水平井井筒管流与油藏渗流的耦合流动模型就应运而生了。

4.1 水平井流动等效为油藏渗流的耦合流动模型

Therrien 和 Sudicky 在假定井孔中水流遵守线性流的条件下,建立了井孔-含水系统的数值模型^[20]。陈崇希等为建立地下水向混合井(多层井)流动的模型,提出“渗流-管流耦合模型”刻画井孔-含水层水流系统^[20]。该研究全面考虑了井管中不同流态下水头损失与流速间的关系,得到如下公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_c \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_c \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial H}{\partial z} \right) = S_o \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) \\ H(x, y, z, t) |_{B_1} = H_R(x, y, z, t) \\ \frac{\partial H}{\partial n}(x, y, z, t) |_{B_2} = 0 \\ Q(x, y, z, t) |_{\text{wout}} = Q_o(t) \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: K_c 为连同水平井筒在内的等效渗透率系数,

$$K_c = \begin{cases} K, \text{含水层孔隙介质达西流的渗透率系数} \\ K_1, \text{水平井井筒层流的等效渗透率系数} \\ K_n, \text{水平井井筒紊流的等效渗透率系数} \end{cases}, K_1 =$$

$\frac{d^2 \gamma}{32 \mu}, K_n = \frac{2gd}{fv}$; d 为水平井管内径, m ; γ 为流体的相对密度, $^\circ \text{API}$; μ 为流体的动力粘滞系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; f 为摩擦系数, 无因次; v 为水平井管概化为圆柱形非均质孔隙介质的渗流速率, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; S_o 为

单位储油系数,无因次; H 为水头,m; H_0 为初始水头,m; H_R 为上部河流边界的水位,m; n 为二类边界外法线方向; Q 为水平井井筒内流量, m^3 ; Q_0 为水平井流量(或产量), m^3 ; $B_1, B_2, wout$ 分别为第一类边界、第二类边界和水平井井口边界; x, y, z 为直角坐标系的坐标, $(x, y, z) \in D, D$ 为研究区域; t 为时间,s, $0 < t \leq t_e$; t_e 为研究时间,s。

在此类公式中,水平井可以理解为地下渗流透镜体,即将地下流体渗流与光线在介质中传播类比,将流体渗流过程中多孔介质的渗透率与光线传播过程中介质的疏密程度类比,认为水平井是一个透镜体,给出其等效渗透率,从而将水平井井筒内的流动等效为地下渗流。这种思想可以把井筒流动等效为地层流动,较好地进行考虑;但是,这种等效不能完全描述井筒效应,特别是无法较好地考虑井筒压降的影响。

4.2 水平井井筒分段的耦合渗流模型

Dikken 和 Novy 提出,流体流入水平井后,会在水平井跟部和趾部存在一个压力降,且此压力降在高渗储层、紊流或两相流以及水平段较长时不能忽略^[21]。

国内外学者认为,流体在水平井井筒内的流动与在地层内的渗流相互影响,存在一种流动的耦合,因而可以用微分的思想进行考虑,将水平井井筒分为若干小段,将每个小段的流动视为一定,对每个小段进行分析,最后将各个小段的流动叠加,得到如下公式。

1) 水平井生产段沿程径向流量与流压关系模型:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{X11} - \varphi_{Xe1} & \varphi_{X12} - \varphi_{Xe2} & \cdots & \varphi_{X1N} - \varphi_{XeN} \\ \varphi_{X21} - \varphi_{Xe1} & \varphi_{X22} - \varphi_{Xe2} & \cdots & \varphi_{X2N} - \varphi_{XeN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{XN1} - \varphi_{Xe1} & \varphi_{XN2} - \varphi_{Xe2} & \cdots & \varphi_{XNN} - \varphi_{XeN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{Xr}(1) \\ q_{Xr}(2) \\ \vdots \\ q_{Xr}(N) \end{bmatrix} = \frac{4\pi K}{\mu_o} \begin{bmatrix} p_{Xe} - p_{Xwf}(1) \\ p_{Xe} - p_{Xwf}(2) \\ \vdots \\ p_{Xe} - p_{Xwf}(N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式可变形为:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\mu_o}{4\pi K} q_{Xr}(i) \psi_{Xij} = p_{Xe} - p_{Xwf}(j) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{Xi} &= \xi_{Xi}(z_{Xi}, x, y, z) + \xi_{Xi}(-z_{Xi}, x, y, z) + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \xi_{Xi}(2nh_X + z_{Xi}, x, y, z) + \sum_{n=1}^{\infty} \xi_{Xi}(-2nh_X + z_{Xi}, x, y, z) + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \xi_{Xi}(2nh_X - z_{Xi}, x, y, z) + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \xi_{Xi}(-2nh_X - z_{Xi}, x, y, z) + C_{Xi} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\xi_{Xi}(z_{Xi}, x, y, z) = \ln \frac{r_{X1i} + r_{X2i} + L/N}{r_{X1i} + r_{X2i} - L/N} \quad (12)$$

$$r_{X1} = \left\{ \left[x_0 + (i-1) \frac{L}{N} \sin \theta_X - x \right]^2 + (y_0 - y)^2 + \left[z_0 + (i-1) \frac{L}{N} \sin \theta_X - z \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$r_{X2} = \left\{ \left(x_0 + i \frac{L}{N} \sin \theta_X - x \right)^2 + (y_0 - y)^2 + \left(z_0 + i \frac{L}{N} \sin \theta_X - z \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中: X 表示将水平井分为 N 段中的第 X 段; $\varphi_{Xi}, \xi_{Xi}, r_{X1}, r_{X2}$ 都为与计算相关的中间变量; x_0, y_0, z_0 为水平井生产段跟部的坐标值; L 为水平段长度,m; N 为水平段长度等分的段数; θ_X 为水平段井斜角,弧度; i, j 为任意一段或一个, $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N$; q_{Xr} 为油藏流向水平井井筒的流量, m^3/s ; h_X 为油藏的有效厚度,m; p_{Xe} 为油藏恒压边界处的压力,MPa; p_{Xwf} 为水平井井底流压,MPa; ψ_{Xij} 为与油藏边界类型、 i 点与 j 点之间的距离以及 i 点与油藏边界之间的距离有关的系数,无因次。

2) 水平井沿程压降计算模型:

$$-\frac{dp_{Xwf}(s)}{ds} = \frac{8\rho}{\pi^2 D^5} [f_{X2} \phi + f_{X1}(1-\phi)] q_{X1}^2(s) + \rho g \cos \theta_X + \frac{32\rho}{\pi^2 D^4} q_{Xr}(s) q_{X1}(s) \quad (15)$$

通过微分,上式可变形为:

$$\begin{aligned} \Delta p_{Xwf}(i) &= \frac{L}{N} \left\{ \frac{2\rho}{\pi^2 D^5} [f_{X2} \phi + f_{X1}(1-\phi)] \left[2q_{X1}(i) - q_{Xr}(i) \frac{L}{N} \right]^2 + \rho g \cos \theta_X + \right. \\ &\quad \left. \frac{16\rho}{\pi^2 D^4} q_{Xr}(i) \left[2q_{X1}(i) - q_{Xr}(i) \frac{L}{N} \right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: s 为水平井生产段跟部所在位置,无因次; q_{X1} 为水平井井筒内部断面流量, m^3/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; f_{X1} 为水平井生产段井筒管壁摩擦阻力,N; f_{X2} 为径向流入水平井生产段井筒的流体与轴向流体之间的摩擦阻力,N; ϕ 为摩擦阻力分配系数,无因次, $0 \leq \phi \leq 1$; D 为水平井井筒直径,m。

在此类公式中,水平井井筒被划分为若干小段,流动及沿程阻力被充分考虑,并且与地层内流动相耦合,能够较好地反应流体在地层和井筒内的流动,是目前较准确的一种模型。但是,这类模型计算较为复杂,一般没有解析解,而且在推导过程中同样不能实现完全的三维化。

5 总结

水平井渗流模型的发展经历了从稳态到非稳态、从无限导流到考虑井筒效应、从单一流动到耦合流动等一系列过程,模型越来越复杂,对水平井渗流过程的

描述也越来越接近实际。各类模型在发展过程中,都有其一定的适用性和局限性。因而,模型下一步应该如何发展,是现在研究过程中最为人所关心的问题。

在对水平井渗流理论和水平井渗流模型进行深入研究的基础上可以推断,水平井渗流模型下一步的发展分为以下几个方面:

1) 进一步提高模型与实际情况的契合度,在现有模型的基础上再次改进,引进新方法,包括流线追踪法、界面追踪法、电容/电阻模型(现主要用于水驱直井)以及矢量模型等,将它们综合应用于井筒与地层耦合模型中,使得这类模型对流动的描述更加清晰、精度更加接近实际。

2) 进一步提高模型的运算速度,简化模型的形式与计算过程,通过对实际数据的历史拟合,调整参数,使得模型在保持其满足精度需要的同时,运算速度进一步提高。

3) 通过新技术引入,实现真实三维模型甚至拟四维(加入时间轴)构建,从而使得模型能够更加直观地反映水平井及水平井网在应用过程中的渗流规律。

参 考 文 献

- [1] 侯瑞云,刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):118-128.
Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology,2012,33(1):118-128.
- [2] 陈志海,任利军,陈亮宇,等. 复杂断块超低渗油气藏试采动态评价与开发对策——以松辽盆地南部十屋油田营城组及沙河子组一段油藏为例[J]. 石油与天然气地质,2011,32(1):133-141.
Chen Zhihai, Ren Lijun, Chen Liangyu, et al. Performance evaluation on production tests in the extra low permeability reservoirs of complex fault blocks and development strategies—examples from oil reservoirs in the Yingcheng Formation and the first member of the Shahezi Formation in Shiwu oilfield of the southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology,2011,32(1):133-141.
- [3] 詹俊阳,马旭杰,何长江. 塔河油田缝洞型油藏开发模式及提高采收率[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):655-660.
Zhan Junyang, Ma Xujie, He Changjiang. Development scheme and EOR technique of fracture-vug reservoirs in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology,2012,33(4):655-660.
- [4] 布赖恩 F 托勒尔. 油藏工程基本原理[M]. 闫建华,赵万优,马乔,等,译. 北京:石油工业出版社,2006:6-13.
Towler B F. Fundamental principles of reservoir engineering[M]. Yan Jianhua, Zhao Wanyou, Ma Qiao, et al, trans. Beijing, China: Petroleum Industry Press,2006:6-13.
- [5] 袁士义. 油气藏工程技术进展[M]. 北京:石油工业出版社,2006:54-63.
Yuan Shiyi. Technical developments in oil & gas reservoir engineering[M]. Beijing, China: Petroleum Industry Press,2006:54-63.
- [6] 陈志海. 底水油藏的水平井开发[J]. 石油与天然气地质,2000,9,21(3):214-219.
Chen Zhihai. Developing bottom water pools with horizontal well[J]. Oil & Gas Geology,2000,9,21(3):214-219.
- [7] 陈军斌. 谈 Joshi 水平井产量公式[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),2003,18(1):15-16.
Chen Junbin. Discussion on Joshi's production formula for a horizontal well[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition),2003,18(1):15-16.
- [8] Giger F M. Horizontal wells production techniques in heterogeneous reservoir[C]. SPE 13710MS,1985:239-246.
- [9] Joshi S D. Augmentation of well production using slant and horizontal wells[J]. SPE 15375PA, Journal of Petroleum Technology,1988,40(6):729-739.
- [10] Joshi S D. A review of horizontal well and drainhole technology[C]. SPE 16868MS,1988:613-629.
- [11] Renard G L, Dupuy J M. Influence of formation damage on the flow efficiency of horizontal well[J]. SPE 19414PA, Journal of Petroleum Technology,1991,43(7):786-789,868-869.
- [12] Frick T P, Economides M J. Horizontal well damages characterization and removal[C]. SPE 21795MS,1991:649-658.
- [13] Elgaghad S A, Osisanya S O, Tiab D. A simple productivity equation for horizontal wells based on drainage area concept[J]. SPE 35713MS,1996:617-627.
- [14] 李苗,李晓平,郭平. 阶梯水平井产能预测方法[J]. 石油与天然气地质,2010,31(4):499-503.
Li Miao, Li Xiaoping, Guo Ping. Deliverability prediction for stepped horizontal wells[J]. Oil & Gas Geology,2010,31(4):499-503.
- [15] 陈元千,郭二鹏. 对 Joshi 各向异性水平井产量公式的质疑、推导与对比[J]. 新疆石油地质,2008,29(3):331-334.
Chen Yuanqian, Guo Erpeng. Query, derivation and comparison about Joshi's production rate formula for horizontal well in anisotropic reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2008,29(3):331-334.
- [16] 程林松,李春兰,朗兆新. 分支水平井产能的研究[J]. 石油学报,1995,16(2):49-54.
Cheng Linsong, Li Chunlan, Lang Zhaoxin. The productivity study of branch a horizontal well with multiple branched wells[J]. Acta Petrolei Sinica,1995,16(2):49-54.
- [17] 袁迎中,张烈辉,王健,等. 非线性渗流地层水平气井二项式产能方程[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):122-126.
Yuan Yingzhong, Zhang Liehui, Wang Jian, et al. A binomial deliverability equation for horizontal gas wells in formations with nonlinear seepage flow features[J]. Oil & Gas Geology,2009,30(1):122-126.
- [18] Babu D K, Odeh A S. Productivity of a horizontal well[J]. SPE 18298PA, SPE Reservoir Engineering,1989,4(4):417-421.
- [19] 段永刚,陈伟,黄诚,等. 井筒与油藏耦合条件下的水平井非稳态产能预测(I)——数学模型[J]. 西南石油学院学报,2004,26(1):23-25.
Duan Yonggang, Chen Wei, Huang Cheng, et al. Transient performance prediction of horizontal well with coupled in wellbore and reservoir, Part 1: mathematic model[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute,2004,26(1):23-25.
- [20] 陈崇希,胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. 水文地质工程地质,2008,35(3):70-75.
Chen Chongxi, Hu Litang. A review of the seepage-pipe coupling model and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2008,35(3):70-75.
- [21] 刘想平,郭呈柱,蒋志祥,等. 油层中渗流与水平井筒内流动的耦合模型[J]. 石油学报,1999,20(3):82-86.
Liu Xiangping, Guo Chengzhu, Jiang Zhixiang, et al. The model coupling fluid flow in the reservoir with flow in the horizontal wellbore[J]. Acta Petrolei Sinica,1999,20(3):82-86.

(编辑 李 军)