

低渗透油藏变渗透率非达西试井模型

刘斌¹, 兰卫星², 万芬³, 张雷¹, 刘春艳¹

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300459
2. 中石油辽河油田分公司 辽宁盘锦 124010
3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300452

通讯作者: Email: liubin74@cnoc.com.cn

项目支持: “十三五”国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058)

引用: 刘斌, 兰卫星, 万芬, 等. 低渗透油藏变渗透率非达西试井模型[J]. 油气井测试, 2022, 31(2): 1-6.

Cite: LIU Bin, LAN Weixing, WAN Fen, et al. Permeability-variable non-Darcy well test model of low-permeability reservoir[J]. Well Testing, 2022, 31(2): 1-6.

摘要 为建立与实际非线性渗流一致的试井解释模型,在考虑低渗透油藏变渗透率渗流效应的基础上,建立了二维低渗透油藏变渗透率非达西试井模型,给出了差分方程组数值求解方法,绘制了考虑不渗透边界影响的试井典型曲线,进行了不渗透边界与低速非达西对低渗透油藏试井曲线的敏感性分析。研究结果表明,对于非达西流动情形,压力导数曲线在径向流动阶段便开始偏离 0.5 水平线而逐渐上翘,非达西作用越强,上翘幅度越大,在遇到不渗透边界后上翘幅度加快;对于低渗透油藏,井附近存在不渗透边界时,非达西流动有可能掩盖不渗透边界的影响。该模型可以有效的解决低渗透油藏试井曲线非达西上翘与不渗透边界上翘难以区分的问题,对低渗透油藏的试井解释具有较大的实用意义。

关键词 低渗透油藏;试井解释模型;非达西流动;变渗透率;不渗透边界;试井解释曲线;径向流动

中图分类号: TE353 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.02.001

Permeability-variable non-Darcy well test model of low-permeability reservoir

LIU Bin¹, LAN Weixing², WAN Fen³, ZHANG Lei¹, LIU Chunyan¹

1. Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China
2. PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning 124010, China
3. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China

Abstract: In order to establish a well test model consistent with actual nonlinear flow pattern, considering the permeability-variable flow effect of low-permeability reservoir, a two-dimensional permeability-variable non-Darcy well test model of low-permeability reservoir was established, the numerical solution method of difference equations was given, the well test type curve considering the influence of impermeable boundary was plotted, and the sensitivity of impermeable boundary and low-velocity non-Darcy flow to the well test curve of low-permeability reservoir was analyzed. The results show that for non-Darcy flow, the pressure derivative curve begins to deviate from the 0.5 horizontal line and gradually warps upward in the radial flow stage. The stronger the non-Darcy effect, the greater the warping amplitude; the warping is faster after reaching the impermeable boundary. For low-permeability reservoirs, when there is an impermeable boundary near the wellbore, non-Darcy flow may cover up the influence of the impermeable boundary. The model proposed can help effectively distinguish between non-Darcy warping and impermeable boundary warping of well test curve of low-permeability reservoirs, and has great practical significance for well test interpretation of low-permeability reservoirs.

Keywords: low-permeability reservoir; well test model; non-Darcy flow; permeability-variable; impermeable boundary; well test curve; radial flow

低渗透多孔介质孔道小,微观结构复杂,国内外大量研究证明在低渗透多孔介质中流体的渗流特征表现为非达西渗流^[1-3]。为了较好的研究与描述低渗透油藏非达西渗流过程,多数研究者引入启

动压力梯度来描述流体在低渗透油藏中特殊流动。冯文光,葛家理等^[4-5]推导出存在启动压差时试井井底压力解,这是国内最早研究低速非达西渗流问题的文章,但未给出典型曲线及分析;程时清等^[6]

建立考虑井筒储集和表皮效应的有效井径数学模型,求解出了启动压力梯度下的压力解,并给出了非达西渗流条件下的典型试井曲线及拟合方法;张小龙等^[7]在广义达西定律基础上,考虑启动压力梯度的非达西渗流特征,建立了多种低渗气藏的不稳定渗流数学模型,讨论了启动压力梯度对低渗油气藏渗流特征的影响;贾永禄等^[8]、付春权等^[9]建立了压裂井、酸化等特殊开采方式低速非达西渗流试井模型,拓宽了低渗透油气藏地层参数反求的模型和方法;罗二辉等^[10]、程时清等^[11]建立了考虑启动压力梯度的双重介质低渗储层非达西渗流模型,进一步丰富了低渗透油藏试井模型。

然而,实验研究和矿场实践表明,流体在低渗透多孔介质中的流动表现为明显的非线性特征。黄延章^[12]对低速非达西规律的研究表明,仅考虑启动压力梯度的试井模型只是低速非达西非线性渗流的一种近似。杨仁锋等^[13]根据毛细管模型及边界层理论,从力学角度推导出了一个非线性渗流新模型,并根据岩心室内渗流实验结果验证了非线性渗流的客观存在及非线性渗流新模型的准确性和合理性,同时进一步从数值模拟研究的角度指出了考虑非线性渗流的必要性。

因此,研究与实际非线性渗流一致的试井解释模型及分析方法尤为必要。姚军等^[14]、郑春峰等^[15]提出了变渗透率效应概念,并以此建立了基于变渗透率效应的低渗透油藏非达西试井解释模型,该模型曲线在后期段压力和压力导数双对数曲线呈现出考虑启动压力梯度方法的上翘特征,但相比启动压力梯度模型更加符合实际情况。然而,该模型是一维无限大油藏模型,其后期压力导数双对数曲线非达西上翘特征与存在不渗透边界的二维油藏边界反映的上翘特征难以区分,在实际解释应用中存在不确定性。本文基于变渗透率概念,建立了存在不渗透边界的涵盖非线性段和线性段渗流规律的二维低渗透油藏渗流数学模型,并对存在边界影响时的非达西压力导数曲线进行分析。

1 物理模型及数学模型的建立

基于原油在低渗透油藏中流速低,出现非达西流动的研究认识,立足于低渗透油藏变渗透率基本理论,建立物理模型,并依据渗透率的数学含义将渗流问题转化为数学方程,进而建立相应的低渗透油藏二维非达西变渗透率数学模型。

1.1 试井物理模型假设条件

- (1) 均质等厚低渗透储层中的一口井以定产油量生产;
- (2) 储层岩石及流体微可压缩,压缩系数均为常数;
- (3) 流体在储层中为等温非线性非达西渗流,地层渗透率在小于某一临界压力梯度时随压力梯度的变化而变化;
- (4) 考虑井筒储集及表皮的影响;
- (5) 不考虑重力及毛管力。

1.2 数学模型的建立

考虑变渗透率效应,将低渗透非达西渗流特征曲线 $v \sim \Delta p$ 转化为非线性渗流 $K \sim \Delta p$ 曲线,此时渗流方程中的渗透率为压力梯度的函数,即

$$K = K\left(\frac{dp}{dr}\right) \quad (1)$$

式中: $K(dp/dr)$ 为储层变渗透率, mD; p 为地层中任意点压力, MPa; r 为距井的径向距离, m。

将一维径向变渗透率试井模型拓展到二维问题,其变渗透率试井数学模型如下

① 控制方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K(dp/dx)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K(dp/dy)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \varphi C_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{② 初始条件} \quad p(x, y, t) \big|_{t=0} = p_i \quad (3)$$

③ 内边界条件

$$Bq = \frac{2\pi KH}{\mu} \frac{p - p_{wf}}{\ln \frac{r_e}{r_w e^{-S}}} - 24C \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (4)$$

$$p_{wf} = \left[p_w - S \left(\Delta x \frac{\partial p_w}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial p_w}{\partial y} \right) \right]_{x=x_o, y=y_o} \quad (5)$$

④ 外边界条件

$$\lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} p(x, y, t) = p_i \quad (6)$$

式中: C_t 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; φ 为孔隙度, 小数; p_i 为原始地层压力, MPa; p_w 为井壁处压力, MPa; p_{wf} 为考虑井储与表皮后的井底压力, MPa; H 为储层厚度, m; q 为油井产量, m^3/d ; μ 为地层原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; r_w 为井半径, m; r_e 为泄油半径, m; B 为原油体积系数, m^3/m^3 ; C 为井储系数, m^3/MPa ; S 为表皮系数, 无量纲; x, y 为二维油藏平面任意一点距生产井点在 x, y 方向上的距离, m。

(2) 式~(6) 式构成二维低渗透油藏变渗透率非达西试井模型。

2 试井模型的数值求解

基于建立的二维非达西数学模型,利用隐式有限差分法对非线性渗流差分方程进行离散化,采用交替迭代方法对变渗透率效应差分方程组进行求解,最终得到井底压力,可绘制典型试井曲线。

2.1 数学模型离散化

①渗流控制方程差分离散化

$$d_{i,j}p_{i+1,j}^{n+1} + b_{i,j}p_{i-1,j}^{n+1} + e_{i,j}p_{i,j+1}^{n+1} + a_{i,j}p_{i,j-1}^{n+1} + c_{i,j}p_{i,j}^{n+1} = -g_{i,j}p_{i,j}^n - 11.57\mu Bq_{i,j} \quad (7)$$

$$\text{其中 } d_{i,j} = \frac{\Delta y_{i,j}}{0.5(\Delta x_{i,j} + \Delta x_{i+1,j})} H_{i,j} K_{xi+\frac{1}{2},j}$$

$$b_{i,j} = \frac{\Delta y_{i,j}}{0.5(\Delta x_{i,j} + \Delta x_{i-1,j})} H_{i,j} K_{xi-\frac{1}{2},j}$$

$$e_{i,j} = \frac{\Delta x_{i,j}}{0.5(\Delta y_{i,j} + \Delta y_{i,j+1})} H_{i,j} K_{yi,j+\frac{1}{2}}$$

$$a_{i,j} = \frac{\Delta x_{i,j}}{0.5(\Delta y_{i,j} + \Delta y_{i,j-1})} H_{i,j} K_{yi,j-\frac{1}{2}}$$

$$g_{i,j} = 277.78\mu H_{i,j} \Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} \varphi C_t / \Delta t$$

$$c_{i,j} = -d_{i,j} - b_{i,j} - e_{i,j} - a_{i,j} - g_{i,j}$$

式中: Δx 为空间步长, m ; Δt 为时间步长, d 。

井点网格 $q_{i,j} = q$, 非井点网格 $q_{i,j} = 0$ 。

②内边界条件差分离散化

对于内边界条件,将井当作所在网格的汇源项处理,由于井底附近压力梯度较大,对非边界网格作线性化处理。

$$Bq_{i,j} = 0.54 \left(\frac{KH}{\mu} \right)_{i,j} \frac{p_{i,j}^{n+1} - p_{wf}^{n+1}}{\ln(r_e/r_w) + S} - 24C \frac{p_{wf}^{n+1} - p_{wf}^n}{\Delta t} \quad (8)$$

其中 对于长方形网格 $r_e = 0.14\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$

正方形网格 $r_e = 0.208\Delta x$

③外边界条件离散

$$p_{1,j} = p_{m,j} = p_e \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$p_{i,1} = p_{i,n} = p_e \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

④压力梯度的处理

$$\frac{\partial p}{\partial x}(i,j) = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{0.5(\Delta x_{i+1,j} + \Delta x_{i,j})} \right| + \left| \frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{0.5(\Delta x_{i,j} + \Delta x_{i-1,j})} \right| \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}(i,j) = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{0.5(\Delta y_{i,j+1} + \Delta y_{i,j})} \right| + \left| \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{0.5(\Delta y_{i,j} + \Delta y_{i,j-1})} \right| \right) \quad (12)$$

(7)式~(10)式形成一组非线性方程组,应用 Seidel 迭代法逐点求解不同时刻对应的方程组,可求得每一时刻的油藏压力分布,进而求得每一时刻的井底压力。

2.2 变渗透率效应的处理及方程组的求解

(1)首先根据低渗透渗流实验得到渗流速度与驱动压力梯度关系曲线。

(2)将渗流曲线细分为足够小的若干段,求取每一小段(近似直线段)斜率,此斜率值即为小曲线段中点驱动压力梯度对应的渗透率值,得到渗透率与驱动压力梯度关系曲线。

(3)求解非线性方程组首先需要给定方程组各未知数迭代初值以及渗透率初值,然后通过逐点 Seidel 迭代法求得 n 时刻 $M \times N$ 个网格块中心点的压力,从而可求取各网格块中心点对应的驱动压力梯度,通过渗透率与驱动压力梯度关系曲线便可求取 $n+1$ 时刻各网格块中心点的渗透率,并与 $n+1$ 时刻上一迭代步的渗透率相比较,若渗透率误差小于某个允许精度值 η ,则 $n+1$ 时刻的迭代结束,返回 $n+1$ 时刻各网格块中心点的压力。反之,将新计算的渗透率和上一迭代步求得的渗透率值求平均后作为新的渗透率值重新迭代求解非线性方程组,直到满足精度要求后进入 $n+2$ 时刻求取 $n+2$ 时刻各网格块中心点的压力值。如此反复迭代,直到求出每个时刻各个网格块中心点的压力为止,进而求出每个时刻的井底压力。

求解流程见图1,采取上述方法,求得到井底压力,然后采用试井无量纲的定义,将有因次的量无量纲化后制无因次井底压力 p_{WD} 和无因次时间 t_D/C_D 双对数曲线,分析其曲线特征。

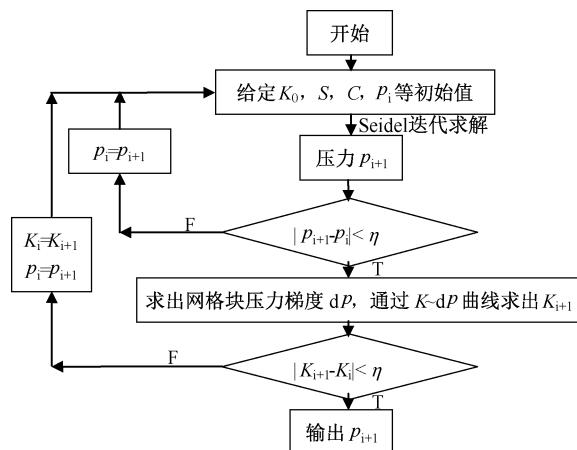


图1 网格压力求解流程图

Fig. 1 Flow chart of grid pressure solution

3 典型曲线及分析

根据低渗透岩心实验资料绘制四条不同渗透速度 v 与驱动压力梯度 Δp 关系的渗流曲线(图2)。

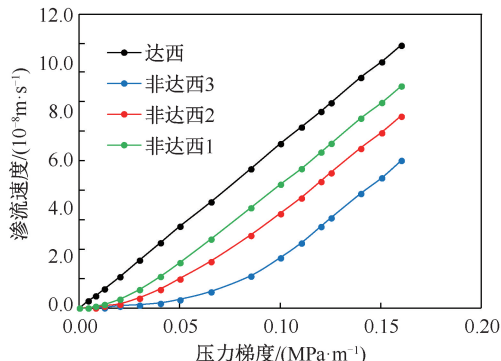


图2 渗流速度与驱动压力梯度关系曲线

Fig. 2 Relationship between flow velocity and driving pressure gradient

根据渗透率 K 的数学含义,渗透率 K 是 $v \sim \Delta p$ 曲线的斜率,在达西渗流中 $v \sim \Delta p$ 曲线为线性直线,斜率为常数;在非达西渗流曲线中 $v \sim \Delta p$ 曲线为非线性曲线,该曲线上任一点的斜率即为该对应压力梯度下的渗透率。由此将渗透率的物理意义转化为数学含义,由 $v \sim \Delta p$ 曲线就可得到不同渗透率与驱动压力梯度关系曲线 $K \sim \Delta p$ (图3)。

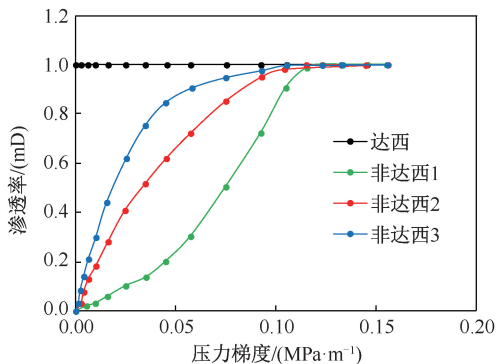


图3 渗透率与驱动压力梯度关系曲线

Fig. 3 Relationship between permeability and driving pressure gradient

实际生产数据及地层参数: $q = 5.0 \text{ m}^3/\text{d}$, $p_i = 16.5 \text{ MPa}$, $C_i = 0.0014 \text{ MPa}^{-1}$, $\varphi = 0.12$, $\mu = 1.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $B = 1.3$, $r_w = 0.1 \text{ m}$, $S = 0$, $K = 1.0 \text{ mD}$ 。编制程序求解上述模型,将距井一定距离 L 的网格设为死网格可以得到含不渗透边界的非达西变渗透率数值解。定义井距不渗透的无因次距离 $L_D = L/r_w$,考虑存在单一不渗透的情况,绘制距不渗透距离 $L_D = 500$ 时的达西模型(渗透率与压力梯度呈线性关系)与非达西变渗透率模型(渗透率与压力梯度

呈非线性关系)对比试井曲线(图4)。

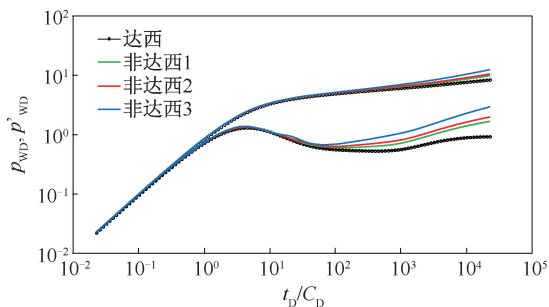


图4 不同渗流曲线单一不渗透非达西典型试井曲线
Fig. 4 Well test type curve for single impermeable boundary and non-Darcy flow derived from different flow curves

从图4可以看出,对于达西流动情形,若井周围存在一不渗透边界,在未遇不渗透边界之前流体流动达到平面径向流时,压力导数曲线表现为0.5水平线,当压力波传播到不渗透边界后压力导数曲线上翘,直至再次达到平面径向流1.0水平线,这与经典的试井理论认识是一致的。对于非达西流动情形,压力导数曲线在径向流动段便开始偏离0.5水平线而逐渐上翘,非达西作用越强,上翘幅度越大,在遇到不渗透后上翘幅度加快。渗流曲线对应非达西作用越小,非达西双对数曲线越接近达西流动条件下的单一不渗透边界的双对数曲线,达西渗流试井模型只是本文低渗透油藏变渗透率非达西试井模型在渗流速度与驱动压力梯度呈线性关系时(非达西作用非常弱时)的特例。

绘制不渗透距离 L_D 分别为500、900、1500时的达西模型与非达西变渗透率模型对比试井曲线(图5)。

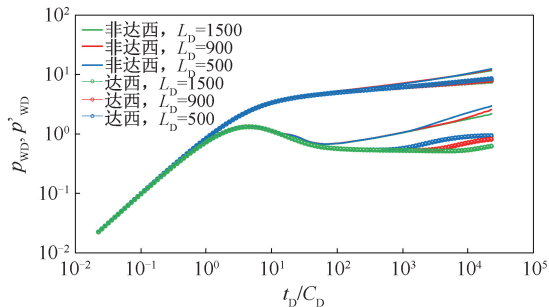


图5 不渗透距离对试井曲线的影响

Fig. 5 Influence of impermeable distance on well test curve

由图5三种不同距离的不渗透表现出的上翘趋势可以看出,对于达西流动情形,当井距不渗透距离越小,上翘出现的时间越早,这与经典的试井理论认识是一致的。对于非达西流动情形,当井距不

渗透距离越小、非达西作用越强,上翘就越早、幅度也越大;随着井距不渗透边界距离增大,末端上翘越来越不明显。

因此,对于低渗透油藏,井附近存在不渗透时,在试井测试及解释过程中非达西流动有可能掩盖不渗透边界的影响,应用多个模型结合动静态资料多方面分析解释结果,以免误导油藏认识。

4 应用实例

渤海 X 油田一口评价井 A 井,在一低渗透储层中进行了二开二关的测试(图 6)。基础参数为: $q=29.4\text{ m}^3/\text{d}$, $\mu=0.9\text{ mPa}\cdot\text{s}$, $B=1.24$, $h=15.5\text{ m}$, $p_i=45.6\text{ MPa}$, $C_i=0.001\text{ 1 MPa}^{-1}$, $\varphi=16.8\%$, $r_w=0.1\text{ m}$ 。

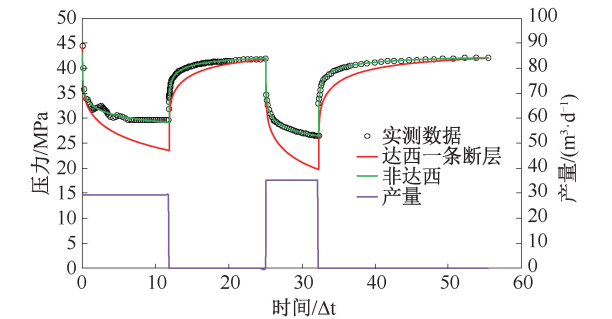


图 6 A 井测试压力历史拟合图
Fig. 6 History match plot of test pressure for Well A

选择开井流动时间较长的恢复段进行试井解释(图 7),从压力导数曲线上可以看出后期压力导数曲线有不同程度的上翘,按照常规达西渗流解释,上翘可能是不渗透边界反应。采用常规达西方法选择一条不渗透边界模型进行解释,解释结果如表 1 所示,解释距井 5.8 m 处存在不渗透边界,虽然压力及压力导数双对数曲线(图 7)取得较好拟合,但是根据该模型外推的压力历史曲线(图 6)却拟合不好。

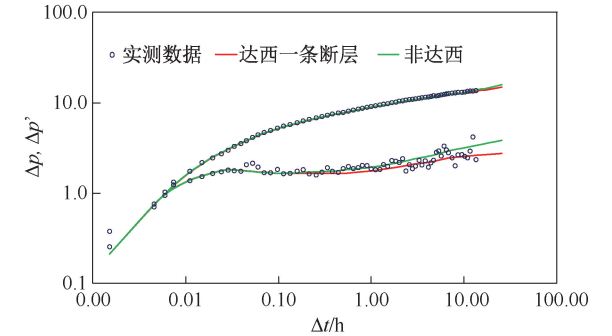


图 7 A 井测试双对数拟合图
Fig. 7 Log-log match plot of test for Well A

表 1 A 井不同方法的解释结果对比表					
Table 1 Interpretation results for Well A by different methods					
方法及结果	渗透率/ mD	表皮系数	井储系数/ ($\text{m}^3\cdot\text{MPa}^{-1}$)	边界认识	备注
常规达西方法	1.01	0.09	0.000 6	上翘为不渗透反应,解释 1 条不渗透距井 5.8 m	压力历史拟合不上,也不符合静态地质认识
变渗透率非达西方法	1.07	0.10	0.000 6	未见明显不渗透边界,上翘为非达西反应	压力史拟合较好,符合静态地质认识

实测数据曲线显示流动压力较为平缓,而该模型显示开井生产后流压曲线下降较快,为有限油藏特征,说明如此近的不渗透距离模型与油藏生产实际不匹配;通过地质研究认识,三维地震资料在该井附近也没有发现明显不渗透边界,说明该模型不一定合理。

结合本文研究成果进一步分析,认为后期压力导数曲线上翘并非不渗透边界反应,而是低渗透非达西上翘反应,考虑采用本文低渗透非达西模型进行拟合解释,其双对数曲线与压力历史曲线均取得较好拟合。其解释结果与生产动态及地质认识相符,模型选择合理。

5 结论

- (1) 基于变渗透率概念,建立了存在不渗透边界的涵盖非线性段和线性段渗流规律的低渗透油藏二维非达西试井模型,并给出了数值求解方法。
- (2) 绘制了含不渗透边界的低渗透油藏变渗透率非达西典型试井曲线,研究表明,变渗透率效应径向流段的压力导数曲线上翘偏离 0.5 水平线,非达西效应越强,上翘幅度越大;存在不渗透边界的非达西渗流导数曲线表现出进一步上翘的特征,距不渗透越近,上翘幅度越大。
- (3) 由于非达西作用与不渗透作用相互影响,非达西作用可能掩盖不渗透边界的影响,在低渗透油藏试井解释过程中,应当用多个模型结合动静态资料多方面分析以避免误判,实例解释应用表明本文模型方法具有较大的实用意义。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司同意本文公开发表,感谢中国石油大学(北京)程时清教授在论文成文过程中给与的指导。

参考文献

- [1] 闫庆来,何秋轩,尉立岗,等.低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究[J].西安石油学院报:自然科学版,1990,5(2):1-6.
YAN Qinglai, HE Qiuxuan, WEI Ligang, et al. A laboratory study on percolation characteristics of single phase flow in low-permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou Institute, 1990, 5(2):1-6.
- [2] 马勇军,王瑞飞.超低渗浅层砂岩油藏储层非线性渗流模型[J].断块油气田,2017,24(4):514-517.
MA Yongjun, WANG Ruifei. Non-linear seepage models for sandstone reservoirs of ultra-low permeability and shallow layers[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(4): 514-517.
- [3] 陈余,付玉,卞小强,等.非达西效应及范围对低渗透气藏井控储量的影响[J].油气井测试,2017,26(6):14-18.
CHEN Yu, FU Yu, BIAN Xiaoqiang, et al. Influence of non darcy effect and range on well controlled reserves of low permeability gas reservoir[J]. Well Testing, 2017,26(6): 14-18.
- [4] 冯文光,葛家理.单一介质、双重介质中非正常达西低速渗流问题[J].石油勘探与开发,1985,12(1):56-62.
FENG Wenguang, GE Jiali. Unsteady darcy low velocity flow in single and dual media[J]. Petroleum Exploration and Development, 1985,12(1):56-62.
- [5] 冯文光,葛家理.单一介质低速非达西渗流时续流和表皮效应的影响[J].大庆石油地质与开发,1988,7(2):45-50.
FENG Wenguang, GE Jiali. Influence of wellbore storage effect and skin effect on low velocity non darcy flow in a single medium[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1988,7(2):45-50.
- [6] 程时清,徐论勋.低速非达西渗流试井典型曲线拟合法[J].石油勘探与开发,1996,23(4):50-54.
CHENG Shiqing, XU Lunxun. Type curve matching of well test data for non darcy flow at low velocity[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(4):50-54.
- [7] 张小龙,杨志兴.启动压力梯度对低渗气藏不稳定渗流特征的影响[J].油气井测试,2018,27(3):7-13.
ZHANG Xiaolong, YANG Zhixing. Impacts of start-up pressure gradient on features of transient seepage flow in low-permeability gas reservoirs[J]. Well Testing, 2018, 27(3):7-13.
- [8] 贾永禄,李允,吴小庆,等.特殊开采方式低速非达西渗流试井模型研究[J].西南石油学院学报.2002,22(4):38-40.
JIA Yonglu, LI Yun, WU Xiaoqing, et al. Well test model of low-velocity non-darcy flow in special exploitation situations[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 22(4):38-40.
- [9] 付春权,尹洪军,刘宇,等.低速非达西渗流垂直裂缝井试井分析[J].大庆石油地质与开发,2007,26(5):53-56.
FU Chunquan, YI Hongjun, LIU Yu, et al. Well testing analysis for vertical fracture wells with low-velocity non-darcy flow[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(5):53-56.
- [10] 罗二辉,王晓冬.双重低渗介质含启动压力梯度不定常渗流研究[J].中国海上油气,2011,23(5):318-321.
LUO Erhui, WANG Xiaodong. A study on transient flow under threshold pressure gradient in dual-poremedia with low permeability[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(5):318-321.
- [11] 程时清,李功权,卢涛,等.双重介质油气藏低速非达西渗流试井有效井径数学模型及典型曲线[J].天然气工业,1997,17(2):35-37.
CHENG Shiqing, LI Gongquan, LU Tao, et al. Mathematical model and typical curve for calculating effective hole diameter in the low velocity non-darcy flow testing of dual-media reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 1997, 17(2):35-37.
- [12] 黄延章.低渗透油层非线性渗流特征[J].特种油气藏,1997,4(1):9-14.
HUANG Yanzhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997, 4(1):9-14.
- [13] 杨仁锋,姜瑞忠,刘世华.低渗透油藏考虑非线性渗流的必要性论证[J].断块油气田,2011,18(4):493-497.
YANG Renfeng, JIANG Ruizhong, LIU Shihua. Demonstration of essentiality of considering nonlinear flow in low permeability reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(4):493-497.
- [14] 姚军,刘顺.基于动态渗透率效应的低渗透油藏试井解释模型[J].石油学报,2009,30(3):430-433.
YAO Jun, LIU Shun. Well test interpretation model based on mutative permeability effects for low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3):430-433.
- [15] 郑春峰,程时清.低渗透油藏通用非达西渗流模型及压力曲线特征[J].大庆石油地质与开发,2009,28(4):60-63.
ZHENG Chunfeng, CHENG Shiqing. General non-darcy flow model and type curve of pressure in low-permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2009, 28(4):60-63.

编辑 穆立婷

第一作者简介:刘斌,男,1986年出生,2013年获中国石油大学(北京)硕士研究生学位,现主要从事油气藏开发研究工作。电话:022-66500881,13207631129,Email:liubin74@cnooc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局B座,邮政编码:300459。