

启动压力梯度对低渗气藏不稳定渗流特征的影响

张小龙, 杨志兴

中海石油(中国)有限公司上海分公司研究院 上海 200335

通讯作者:Email:zhangxl30@enooc.com.cn

项目支持:国家重大专项“东海厚层非均质性大型气田有效开发关键技术”(2016ZX05027-004)

引用: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.

Cite: 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.

摘要 为了准确描述启动压力梯度对低渗气藏不稳定渗流特征的影响,在广义达西定律基础上,通过考虑启动压力梯度的非达西渗流特征,分别建立了无限大、圆形封闭及圆形定压外边界低渗气藏的不稳定渗流数学模型。采用格林函数法获得各渗流模型的拉普拉斯空间解析解,利用 Stehfest 数值反演算法,将拉普拉斯空间解反演变换得到实空间解,通过实例绘制了不同启动压力梯度下的无限大低渗气藏井底压力与时间的双对数曲线。研究发现,气井定产量生产时,当启动压力梯度分别为 0、0.001MPa/m、0.003MPa/m 及 0.005MPa/m,生产 97h 后,井底压力分别下降 16.6%、19.6%、26.3%、33.4%,表明启动压力梯度越大,对井底压力影响越显著,井底压力下降越快,地层能量衰竭越严重,低渗储层动用越困难,单井有效动用范围越有限。该特征分析对加深启动压力梯度对低渗气藏不稳定渗流机理的研究与认识有一定的借鉴。

关键词 启动压力梯度;低渗气藏;非达西渗流;不稳定渗流;渗流模型;压力动态分析

中图分类号:TE353 文献标识码:A DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.03.002

Impacts of start-up pressure gradient on features of transient seepage flow in low-permeability gas reservoirs

ZHANG Xiaolong, YANG Zhixing

Research Institute of CNOOC (China) Co., Ltd.-Shanghai Branch, Shanghai 200335, China

Abstract: To accurately reflect the impacts of start-up pressure gradient on features of transient seepage flow in low-permeability gas reservoirs, the mathematical models for transient seepage flows in low-permeability gas reservoirs with infinite, circularly enclosed and circular constant-pressure outer boundaries were built on the basis of general Darcy's law, and with consideration to non-Darcy flow features of start-up pressure gradient. By using the Green's function, the Laplace spatial solutions of these models were derived. Then, with the Stehfest numerical inversion algorithm, the Laplace spatial solutions were inverted to derive the analytical solutions in real space. Finally, the log-log curve of bottom-hole pressure and time for infinite low-permeability gas reservoirs with different start-up pressure gradients were generated for certain examples. As revealed by the research results, when the gas well with start-up pressure gradient of 0, 0.001 MPa/m, 0.003 MPa/m and 0.005 MPa/m produces at a single rate for 97 h, the bottom-hole pressure reduces by 16.6%, 19.6%, 26.3% and 33.4%, respectively. Obviously, the higher the start-up pressure gradient is, the more significant the impacts on bottom-hole pressure are, the faster the bottom-hole pressure drops, the more severely the formation energy depletes, the more difficult the development of low-permeability reservoirs is, and the more limited the effective well drainage area is. The study results can provide necessary references for deeply identifying the impacts of start-up pressure gradient on transient seepage flow in low-permeability gas reservoirs.

Keywords: start-up pressure gradient; low-permeability gas reservoir; non-Darcy flow; transient seepage flow; seepage model; pressure behavior analysis

低渗透气藏由于其低孔隙度、低渗透率等特点,渗流机理与常规气藏相比有明显的区别,具有非线性渗流的特点。国内外很多学者对低渗透气

藏储层的渗流机理和特征开展了很多理论和室内评价实验研究,提出了启动压力梯度的概念和理论。

冯文光^[1]提出了天然气藏气体低速非达西渗

流观点,认为气体非达西渗流的因素包括:流体与岩石表面间的界面作用、有效应力、孔隙大小、孔喉几何结构及其分布、井底附近污染效应等。贺伟等^[2]研究了低渗储层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征,探讨了低渗储层气体低速非达西渗流的物理实质和一般规律,认识到“启动压差”和“临界压力梯度”可用于描述含水状态下岩样的非线性渗流规律现象。谭雷军等^[3]从试井方法的角度,研究了低速非达西渗流启动压力梯度的确定方法。张居增等^[4]对低渗透变形介质气藏数值模拟进行了研究,研究表明,启动压力梯度和介质变形对气藏开发动态有不同程度的影响。李宁等^[5]通过实验研究认识到低渗储层中单相气体低速渗流具有非达西渗流特征,在一定含水饱和度下,气体低速非达西渗流特征更为明显,随渗透率的增大和残余水饱和度的降低,气体低速非达西渗流逐渐向达西渗流过渡。任晓娟等^[6]研究了陕甘宁中部低渗气田某储层岩心中存在残余水时气体的渗流规律,研究表明,当含水饱和度较低时(小于30%),仅在一定的压力梯度范围内存在达西渗流,当含水饱和度较高时(大于30%至束缚水饱和度以下),气体渗流存在非达西渗流现象。姚广聚等^[7]通过对鄂尔多斯盆地大牛地气田低渗透砂岩气藏含水岩心的实验室研究,研究结果表明,含水岩心由于存在水膜封闭小孔喉而使启动压力梯度明显,随着含水饱和度的增大,气体渗流特征曲线逐渐向压力梯度轴靠拢,只有在压力梯度达到一定值后气体流速才明显增大。闫建等^[8]利用苏里格低渗气田岩心,通过大量室内气体渗流实验,分析了渗透率对渗流曲线的影响,并得出了拟初始流速、临界压力平方梯度与岩心物性参数之间的函数关系。黄亮^[9]基于低渗透油藏试井变渗透率的概念,考虑注水井为内区达西渗流、外区为非达西渗流、建立了耦合试井模型,绘制了低渗油藏达西-非达西耦合典型试井曲线模板。陈余等^[10]针对低渗气藏存在高速非达西流动和启动压力梯度的特点,考虑气井的高速非达西流动范围和半径,推导了考虑高速非达西渗流和启动压力梯度的低渗气藏单井控制储量的计算方法,分析了井控半径及储量随时间变化规律。

现在前人研究成果基础上,从广义达西定律出发,通过考虑启动压力梯度的非达西渗流特征,系统全面的建立了不同外边界低渗气藏不稳定渗流数学模型,采用格林函数法和 Stehfest 数值反演算

法对渗流模型进行求解,结合实例绘制了无限大低渗气藏不同启动压力下井底压力与时间的双对数曲线,并对启动压力梯度对井底压力响应曲线影响进行了分析。

1 不稳定渗流数学模型

不稳定渗流数学模型由渗流微分方程加上适当的初始条件和边界条件构成,渗流微分方程由一定假设条件下的连续性方程^[11]、状态方程^[12]和运动方程构成^[13]。考虑启动压力梯度的低渗气藏不稳定渗流基本假设条件如下:

①气层均质等厚,各向同性,气井以定产量 q_{sc} 生产;

②储层中的流体为单相气体,且作平面径向等温非线性渗流;

③考虑启动压力梯度的影响,忽略重力和毛管力影响;

④孔隙介质弱可压缩,渗透率和孔隙度为常数。连续性方程^[14]:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) = \frac{\partial(\phi \rho)}{\partial t} \quad (1)$$

式中: v 为渗流速度, m/h ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; r 为径向距离, m ; ϕ 为孔隙度, 百分数; t 为时间, h 。

气体状态方程:

$$pV = ZnRT \quad (2)$$

气体密度:

$$\rho = \frac{M}{RT} \frac{p}{Z} \quad (3)$$

气体等温压缩系数:

$$C_g = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \bigg|_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} \bigg|_T = \frac{M}{RT} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{p}{Z} \right) \bigg|_T = \frac{M}{RT} \left[\frac{1}{Z} + p \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{Z} \right) \right] \bigg|_T \quad (5)$$

因此,有

$$C_g = \frac{1}{p} + Z \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{Z} \right) \bigg|_T = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p} \bigg|_T \quad (6)$$

式中: p 为压力, MPa ; C_g 为气体等温压缩系数, MPa^{-1} ; V 为体积, m^3 ; Z 为气体偏差因子, 小数; M 为气体相对分子量; R 为气体常数, T 为温度, K 。

考虑启动压力梯度的低渗透气藏气体渗流运动方程为^[15]

$$v = \begin{cases} -\frac{3.6K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{\lambda}{|\nabla p|} \right) & |\nabla p| > \lambda \\ 0 & |\nabla p| \leq \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中: v 为渗流速度, m/h ; K 为渗透率, μm^2 ; μ 为气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; λ 为启动压力梯度, MPa/m ; ∇p 为压力梯度, MPa/m 。

将运动方程(7)和状态方程(2)式、(3)式、(6)式代入连续性方程(1)式中,化简可得

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{p}{Z} \frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - \lambda \right) \right] = \frac{\varphi C_g}{3.6K} \frac{p}{Z} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8)$$

由于气体的黏度、压缩系数及偏差因子等参数都是压力的函数,致使(8)式是非线性的,必须进行线性化处理,定义气体拟压力函数为^[14]

$$\psi(p) = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (9)$$

(8)式可变为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\partial \psi(p)}{\partial r} - \frac{2p}{\mu Z} \lambda \right) \right] = \frac{\varphi \mu C_g}{3.6K} \frac{\partial \psi(p)}{\partial t} \quad (10)$$

由于 λ 很小,而 $\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p}{\mu Z} \right)$ 也很小,因此可以忽略

$2\lambda \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p}{\mu Z} \right)$, (10)式可以化简为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial \psi(p)}{\partial r} \right] - \frac{1}{r} \frac{2p}{\mu Z} \lambda = \frac{\varphi \mu C_g}{3.6K} \frac{\partial \psi(p)}{\partial t} \quad (11)$$

定义启动拟压力梯度:

$$\lambda_\psi = \frac{2p}{\mu Z} \lambda \quad (12)$$

考虑启动压力梯度的低渗透气藏不稳定渗流微分方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial \psi(p)}{\partial r} \right] - \frac{1}{r} \lambda_\psi = \frac{\varphi \mu C_g}{3.6K} \frac{\partial \psi(p)}{\partial t} \quad (13)$$

定义如下无因次变量:

无因次拟压力:

$$\psi_D = \frac{Kh \Delta \psi(p)}{12.734 \times 10^{-3} q_{sc} T} = \frac{Kh(\psi_i - \psi)}{12.734 \times 10^{-3} q_{sc} T}$$

无因次时间:

$$t_D = \frac{3.6K}{\varphi \mu C_g r_w^2} t$$

无因次距离:

$$r_D = \frac{r}{r_w}$$

无因次启动拟压力梯度:

$$\lambda_{\psi D} = \frac{Khr_w}{12.734 \times 10^{-3} q_{sc} T} \lambda_\psi$$

将无因次量代入不稳定渗流微分方程,则(13)式可化简为如下无因次形式:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right] + \frac{1}{r_D} \lambda_{\psi D} = \frac{\partial \psi_D}{\partial t_D} \quad (14)$$

初始条件:

$$p(r, t=0) = p_i \text{ 或 } \psi_D(r_D, t_D=0) = 0 \quad (15)$$

内边界条件:

$$r_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w} - \lambda_\psi = \frac{12.734 \times 10^{-3} q_{sc} T}{Kh} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = -1 - \lambda_{\psi D} \quad (17)$$

式中: p_i 为原始地层压力, MPa ; q_{sc} 为产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.1 无限大低渗气藏不稳定渗流数学模型

当低渗透气藏外边界为无限大边界时,外边界条件为^[14]

$$p(r \rightarrow \infty, t) = p_i \text{ 或 } \psi_D(r_D \rightarrow \infty, t_D) = 0 \quad (18)$$

由于低渗透气藏渗流过程存在启动压力梯度,压力波不能瞬时传播到无限远处,渗流过程存在流体流动边界^[16],且流动边界不断向外扩展。流动边界由启动压力梯度确定,流体在流动边界以内发生流动,而在流动边界以外不发生流动,在流动边界上满足 $\nabla p = \lambda$ 。因此,考虑流动边界时的无限大外边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{FD}(t_D)} = -\lambda_{\psi D} \\ \psi_D(r_D > r_{FD}(t_D)) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $r_{FD}(t_D)$ 为流体流动边界。

于是,考虑启动压力梯度的无限大低渗透气藏不稳定渗流数学模型为

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right] + \frac{1}{r_D} \lambda_{\psi D} = \frac{\partial \psi_D}{\partial t_D} \\ \psi_D(r_D, t_D=0) = 0 \\ \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = -1 - \lambda_{\psi D} \\ \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{FD}(t_D)} = -\lambda_{\psi D} \\ \psi_D(r_D > r_{FD}(t_D)) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

1.2 圆形封闭低渗气藏不稳定渗流数学模型

当低渗透气藏外边界为圆形封闭边界时,外边界条件为^[14]

$$\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{(r \rightarrow r_e, t)} = 0 \quad (21)$$

其中

$$R_D = r_e/r_w$$

式中: R_D 为无因次外边界半径。

考虑启动压力梯度的圆形封闭低渗透气藏不稳定渗流数学模型为

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right] + \frac{1}{r_D} \lambda_{\psi D} = \frac{\partial \psi_D}{\partial t_D} \\ \psi_D(r_D, t_D = 0) = 0 \\ \left. \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -1 - \lambda_{\psi D} \\ \left. \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{FD}(t_D)} = -\lambda_{\psi D} \quad 1 < r_{FD}(t_D) < R_D \\ \psi_D|_{r_D > r_{FD}(t_D)} = 0 \\ \left. \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=R_D} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

1.3 圆形定压低渗透气藏不稳定渗流数学模型

当低渗透气藏外边界为圆形定压边界时,外边界条件为^[14]

$$p(r \rightarrow r_e, t) = p_i \quad (23)$$

考虑启动压力梯度的圆形定压低渗透气藏不稳定渗流数学模型为

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right] + \frac{1}{r_D} \lambda_{\psi D} = \frac{\partial \psi_D}{\partial t_D} \\ \psi_D(r_D, t_D = 0) = 0 \\ \left. \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -1 - \lambda_{\psi D} \\ \left. \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{FD}(t_D)} = -\lambda_{\psi D} \quad 1 < r_{FD}(t_D) < R_D \\ \psi_D|_{r_D > r_{FD}(t_D)} = 0 \\ \psi_D|_{r_D=R_D} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

2 渗流模型求解

目前对于考虑启动压力梯度的低渗透气藏不稳定渗流数学模型的求解方法大致分为三类:(1)格林函数法^[17],该方法近似的认为压力波瞬时传播到无限远处,以此求解模型的拉普拉斯空间解析解;(2)离散化计算方法^[18],主要是根据流动边界随时间向外推移的特点求解渗流模型的数值解;(3)幂级数解析解与数值逼近相结合法^[19],用以研究压力传播前缘与时间相关的问题。

本文主要采用格林函数法,通过求解拉普拉斯空间解析解来分析启动压力梯度对不同外边界低渗透气藏的不稳定渗流特征的影响。

2.1 无限大低渗透气藏不稳定渗流模型求解

针对无限大外边界,对(14)式、(15)式和(17)式构成的模型进行拉普拉斯变换得

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[r_D \frac{\partial \bar{\psi}_D}{\partial r_D} \right] + \frac{1}{gr_D} \lambda_{\psi D} = g \bar{\psi}_D \\ \bar{\psi}_D(r_D \rightarrow \infty, g) = 0 \\ \left. \frac{\partial \bar{\psi}_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -\frac{1}{g} - \frac{\lambda_{\psi D}}{g} \end{cases} \quad (25)$$

式中基本微分方程的通解为

$$\bar{\psi}_D(r_D, g) = aI_0(r_D\sqrt{g}) + bK_0(r_D\sqrt{g}) + \int_1^\infty G(r_D, \tau) d\tau \quad (26)$$

式中: $G(r_D, \tau)$ 为格林函数。

$$G(r_D, \tau) = \begin{cases} \frac{\lambda_{\psi D}}{g} K_0(r_D\sqrt{g}) I_0(\tau\sqrt{g}) & (1 < \tau < r_D) \\ \frac{\lambda_{\psi D}}{g} K_0(\tau\sqrt{g}) I_0(r_D\sqrt{g}) & (r_D < \tau < \infty) \end{cases} \quad (27)$$

由无限大外边界条件可得 $a=0$, 则(26)式为

$$\bar{\psi}_D(r_D, g) = bK_0(r_D\sqrt{g}) + \int_1^\infty G(r_D, \tau) d\tau \quad (28)$$

将函数 $\bar{\psi}_D(r_D, g)$ 对 r_D 求偏导, 并设 $r_D=1$, 得

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \bar{\psi}_D(r_D, g)}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} &= -b\sqrt{g} K_1(\sqrt{g}) + \\ \frac{\lambda_{\psi D}}{\sqrt{g}} I_1(\sqrt{g}) \int_1^\infty K_0(\sqrt{g}\tau) d\tau &= -b\sqrt{g} K_1(\sqrt{g}) + \frac{\pi\lambda_{\psi D}}{2g} I_1(\sqrt{g}) \end{aligned} \quad (29)$$

将(29)式代入内边界条件, 得

$$b = \frac{1 + \lambda_{\psi D} + \pi\lambda_{\psi D} I_1(\sqrt{g})/2}{g\sqrt{g} K_1(\sqrt{g})} \quad (30)$$

将(30)式代入(28)式, 得

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_D(r_D, g) &= \frac{1 + \lambda_{\psi D} + \pi\lambda_{\psi D} I_1(\sqrt{g})/2}{g\sqrt{g} K_1(\sqrt{g})} K_0(r_D\sqrt{g}) + \\ &\int_1^\infty G(r_D, \tau) d\tau \end{aligned} \quad (31)$$

在(31)式中, 取 $r_D=1$, 然后代入(27)式, 得到井底无因次拟压力的拉普拉斯空间解, 即

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{wD}(g) &= \frac{1 + \lambda_{\psi BD} + \pi\lambda_{\psi D} I_1(\sqrt{g})/2}{g\sqrt{g} K_1(\sqrt{g})} K_0(\sqrt{g}) + \\ &\frac{\pi\lambda_{\psi D}}{2g\sqrt{g}} I_0(\sqrt{g}) \end{aligned} \quad (32)$$

2.2 圆形封闭低渗气藏不稳定渗流模型求解

采用类似的方法,可以得到启动压力梯度对圆形封闭低渗气藏不稳定渗流的拉普拉斯空间解,即

$$\bar{\psi}_D = \frac{E(r_D)}{\sqrt{g}F(r_D=1)} \left(\frac{1 + \lambda_{\psi D}}{g} + e + d \right) + H(r_D) + \int_1^{R_D} G(r_D, \tau) d\tau \quad (33)$$

其中

$$E(r_D) = \frac{I_0(\sqrt{g}r_D)K_1(\sqrt{g}R_D) + K_0(\sqrt{g}r_D)I_1(\sqrt{g}R_D)}{I_1(\sqrt{g}R_D)} \quad (34)$$

$$F(r_D) = \frac{-I_1(\sqrt{g}r_D)K_1(\sqrt{g}R_D) + K_1(\sqrt{g}r_D)I_1(\sqrt{g}R_D)}{I_1(\sqrt{g}R_D)} \quad (35)$$

$$H(r_D) = \frac{cI_0(\sqrt{g}r_D)}{I_1(\sqrt{g}R_D)} \quad (36)$$

$$c = \frac{\lambda_{\psi D}}{g} K_1(R_D \sqrt{g}) \int_1^{R_D} I_0(\tau \sqrt{g}) d\tau \quad (37)$$

$$d = \frac{\lambda_{\psi D}}{\sqrt{g}} I_1(\sqrt{g}) \int_1^{R_D} K_0(\tau \sqrt{g}) d\tau \quad (38)$$

$$e = \frac{c\sqrt{g}I_1(\sqrt{g})}{I_1(\sqrt{g}R_D)} \quad (39)$$

在(33)式中取 $r_D = 1$, 然后代入(27)式, 得到井底无因次拟压力的拉普拉斯空间解, 即

$$\bar{\psi}_{wD} = \frac{E(r_D=1)}{\sqrt{g}F(r_D=1)} \left(\frac{1 + \lambda_{\psi D}}{g} + e + d \right) + H(r_D=1) + f \quad (40)$$

其中

$$f = \frac{\lambda_{\psi D}}{g} I_0(\sqrt{g}) \int_1^{R_D} K_0(\tau \sqrt{g}) d\tau \quad (41)$$

2.3 圆形定压低渗气藏不稳定渗流模型求解

考虑启动压力梯度的圆形定压低渗气藏不稳定渗流的拉普拉斯空间解为

$$\bar{\psi}_D = \frac{E(r_D)}{\sqrt{g}F(r_D=1)} \left(\frac{1 + \lambda_{\psi D}}{g} + e + d \right) + H(r_D) + \int_1^{R_D} G(r_D, \tau) d\tau \quad (42)$$

其中

$$E = \frac{-I_0(\sqrt{g}r_D)K_0(\sqrt{g}R_D) + K_0(\sqrt{g}r_D)I_0(\sqrt{g}R_D)}{I_0(\sqrt{g}R_D)} \quad (43)$$

$$F = \frac{I_1(\sqrt{g}r_D)K_0(\sqrt{g}R_D) + K_1(\sqrt{g}r_D)I_0(\sqrt{g}R_D)}{I_0(\sqrt{g}R_D)} \quad (44)$$

$$H(r_D) = -\frac{cI_0(\sqrt{g}r_D)}{I_0(\sqrt{g}R_D)} \quad (45)$$

$$c = \frac{\lambda_{\psi D}}{g} K_0(R_D \sqrt{g}) \int_1^{R_D} I_0(\tau \sqrt{g}) d\tau \quad (46)$$

$$d = \frac{\lambda_{\psi D}}{\sqrt{g}} I_1(\sqrt{g}) \int_1^{R_D} K_0(\tau \sqrt{g}) d\tau \quad (47)$$

$$e = -\frac{c\sqrt{g}I_1(\sqrt{g})}{I_0(\sqrt{g}R_D)} \quad (48)$$

同样, 在(48)式中取 $r_D = 1$, 然后代入(27)式, 得到井底无因次拟压力的拉普拉斯空间解, 即

$$\bar{\psi}_{wD} = \frac{E(r_D=1)}{\sqrt{g}F(r_D=1)} \left(\frac{1 + \lambda_{\psi D}}{g} + e + d \right) + H(r_D=1) + \frac{\lambda_{\psi D}}{g} I_0(\sqrt{g}) \int_1^{R_D} K_0(\tau \sqrt{g}) d\tau \quad (49)$$

式中: g 为拉氏变量; K_0 、 K_1 为零阶和一阶变形贝塞尔函数; $\bar{\psi}_D$ 为拉氏空间无因次拟压力; $\bar{\psi}_{wD}$ 为拉氏空间无因次井底拟压力。

3 不稳定渗流压力动态分析

利用 Stehfest 数值反演算法, 将拉普拉斯空间解反演变换得到实空间解^[20], 以海上某低渗气藏为例, 绘制井底压力与时间的半对数曲线, 以分析启动压力梯度对无限大边界低渗气藏不稳定渗流压力动态特征的影响。

该气藏位于东海 XH 凹陷, 井位于构造高部位, 为典型低渗气藏, 平均绝对渗透率 $0.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 隔夹层不发育, 储层平均有效厚度 10 m, 平均孔隙度 12%, 综合压缩系数 $1.0 \times 10^{-1} \text{MPa}^{-1}$, 原始地层压力 10 MPa, 气体临界压力 4.8 MPa, 临界温度 200 K, 储层平均温度 363.5 K, 气体相对密度 0.62。水体能量弱, 水体倍数 5 倍, 气藏类型属于弱水驱-定容气藏, 天然气地质储量 $5.2 \times 10^8 \text{m}^3$ 。该气藏于 2010 年 10 月投产, 定向井开发, 井筒半径 0.1 m, 平均日产气 $0.8 \times 10^4 \text{m}^3$, 截止到 2017 年 12 月底累产气 $0.23 \times 10^8 \text{m}^3$, 天然气采出程度 4.4%。

根据该气藏储层参数及生产数据, 以无限大气藏边界为例, 采用 Stehfest 数值反演算法将井底无因次拟压力的拉普拉斯空间解((48)式)反演变换得到实空间解, 采用 Mathematics 语言编制程序, 绘

制启动压力对井底压力与时间的半对数影响曲线。

图1反映了启动压力梯度对无限大低渗气藏井底压力响应曲线的影响。

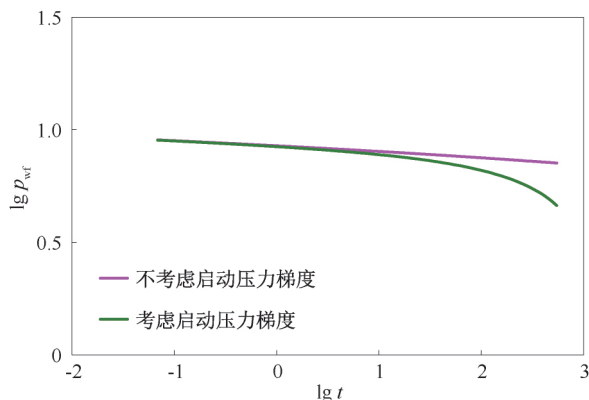


图1 启动压力梯度对无限大地层井底压力的影响曲线
Fig.1 Influence curve of starting pressure gradient on bottom hole pressure of infinite formation

从图1中可知,不考虑启动压力梯度时,随着生产的不断进行,井底压力不断降低,流动状态为无限大地层径向流动。考虑启动压力梯度时,启动压力梯度增加了气体渗流过程中的阻力,双对数曲线的下降速度逐渐增大,对井底压力的影响越来越显著。考虑启动压力梯度为0.005 MPa/m时,生产97 h后,井底压力降为26.3%,较不考虑启动压力梯度时井底压力降16.6%增加了9.7%,表明当气井定产量生产时,考虑启动压力梯度影响时的井底压降要高于不考虑启动压力梯度时。

图2反映了不同启动压力梯度下的无限大低渗气藏井底压力变化特征。

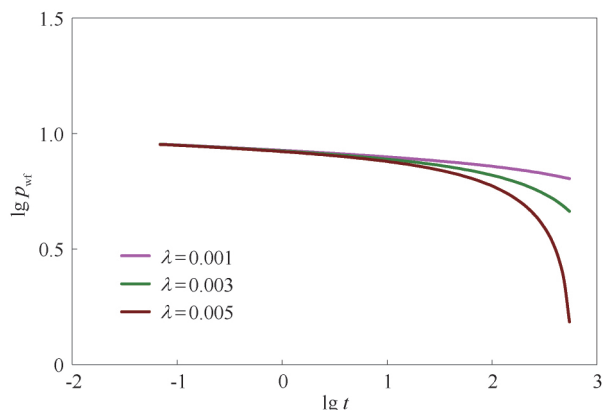


图2 不同启动压力梯度下无限大地层井底压力响应曲线
Fig.2 Response curves of bottom hole pressure in infinite formation under different starting pressure gradients

从图2中可知,启动压力梯度的影响主要体现在晚期井底压力较低的情况,当启动压力梯度分别为0.001 MPa/m、0.003 MPa/m、0.005 MPa/m时,

生产97 h后,井底压力降分别为19.6%、26.3%、33.4%,表明启动压力梯度越大,对井底压力的影响越显著,井底压力下降越快,地层能量衰竭越严重,低渗储层动用越困难,单井有效动用范围有限。因此在低渗气藏开发中后期应保持合理的生产压差,减少启动压力梯度对开发的影响。

4 结论

(1)分别建立了考虑启动压力梯度的无限大、圆形封闭及圆形定压外边界低渗气藏不稳定渗流数学模型,采用格林函数法对模型进行了求解,得到了拉氏空间解析解,利用Stehfest数值反演方法求得了不稳定渗流模型的实空间解,实例分析了启动压力梯度对无限大低渗透气藏不稳定渗流压力动态特征的影响。

(2)启动压力梯度增加了气体渗流过程中的阻力,气井定产量生产时,考虑启动压力梯度影响时的井底压降要高于不考虑启动压力梯度时,启动压力梯度越大,井底压力下降越快,地层能量衰竭越严重,低渗储层动用越困难,单井有效动用范围有限,因此保持合理的生产压差对低渗气藏开发中后期尤为重要。

(3)研究认识适用于低渗气藏非线性渗流特征研究及试井分析,对加深启动压力梯度对低渗气藏不稳定渗流机理的研究与认识有一定的借鉴意义。

致谢:感谢国家重大专项“东海厚层非均质性大型气田有效开发关键技术”项目组领导和同事的大力支持和帮助。

参考文献

- [1] 冯文光. 天然气非达西低速不稳定渗流[J]. 天然气工业, 1986, 6(3): 41-47.
FENG Wenguang. Non-darcy low-velocity unsteady-state seepage flow of natural gas [J]. Natural Gas Industry, 1986, 6(3): 41-47.
- [2] 贺伟, 冯曦, 钟孚勋. 低渗储层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征探讨[J]. 天然气工业, 2002, 22(S1): 91-94.
HE Wei, FENG Xi, ZHONG Fuxun. Discussion on the special percolation mechanism of low permeability reservoir and the performance characteristics of low permeability gas well [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(S1): 91-94.
- [3] 谭雷军, 贾永禄, 冯曦, 等. 低速非达西流启动压力梯度的确定[J]. 油气井测试, 2000, 9(4): 5-7.
TAN Leijun, JIA Yonglu, FENG Xi et al. Determination of starting pressure gradient for low velocity non-darcy flow [J]. Well Testing, 2000, 9(4): 5-7.
- [4] 张居增, 张烈辉, 魏立新, 等. 低渗透变形介质气藏数值

- 模拟[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(4): 421-423.
- ZHANG Juzeng, ZHANG Liehui, WEI Lixin *et al.* Numerical simulation of low permeability deformable medium gas reservoir [J]. *Petroleum Geology of Xinjiang*, 2005, 26(4): 421-423.
- [5] 李宁, 唐显贵, 张清秀, 等. 低渗透气藏中气体低速非达西渗流特征实验研究[J]. 天然气勘探与开发, 2003, 26(2): 49-55.
- LI Ning, TANG Xiangui, ZHANG Qingxiu *et al.* Experimental study on low velocity non-darcy flow characteristics of gas in low permeability gas reservoirs [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2003, 26(2): 49-55.
- [6] 任晓娟, 阎庆来, 何秋轩, 等. 低渗气层气体的渗流特征实验研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1997, 12(3): 22-25.
- REN Xiaojuan, YAN Qinglai, HE Qiuxuan *et al.* Experimental study on percolation characteristics of low permeability gas layer [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 1997, 12(3): 22-25.
- [7] 姚广聚, 熊钰, 朱琴, 等. 特低渗透砂岩气藏不同原生水下渗流特征研究[J]. 油气地质与采收率, 2008, 22(4): 84-86.
- YAO Guangju, XIONG Yu, ZHU Qin *et al.* Study on different primary underwater seepage characteristics of ultra-low permeability sandstone gas reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery*, 2008, 22(4): 84-86.
- [8] 闫健, 张宇生, 任晓娟, 等. 低渗气藏单相气体渗流特征分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2010, 25(1): 41-44.
- YAN Jian, ZHANG Ningsheng, REN Xiaojuan *et al.* Characteristics of single-phase gas percolation in low permeability gas reservoirs [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2010, 25(1): 41-44.
- [9] 黄亮. 低渗油藏注水井达西-非达西耦合试井模型及压力分析[J]. 油气井测试, 2017, 26(4): 12-15.
- HUANG Liang. Darcy and non-darcy coupled well test model and pressure analysis for injection wells in low permeability reservoirs [J]. *Well Testing*, 2017, 26(4): 12-15.
- [10] 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 control reserves of low permeability gas reservoirs [J]. *Well Testing*, 2017, 26(6): 14-18.
- [11] 成绥民, 成珍, 杨勤涛, 等. 气水两相渗流稳定与不稳定试井分析[J]. 油气井测试, 2006, 15(3): 4-8.
- CHENG Suimin, CHENG Zhen, YANG Qintao *et al.* Well test analysis of gas-water two-phase seepage stability and instability [J]. *Well Testing*, 2006, 15(3): 4-8.
- [12] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 341-354.
- KONG Xiangyan. *Higher seepage mechanics* [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2010: 341-354.
- [13] 冯文光, 葛家理. 单一介质、双重介质非定常非达西低速渗流问题[J]. 石油勘探与开发, 1985, 12(1): 56-62, 67.
- FENG Wenguang, GE Jiali. Unsteady non-darcy low velocity percolation in single medium and double medium [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1985, 12(1): 56-62, 67.
- [14] 李晓平. 地下油气渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 112-126.
- LI Xiaoping. *Seepage mechanics of underground oil and gas* [M]. Beijing: petroleum industry press, 2008: 114-118.
- [15] 王晓冬, 侯晓春, 郝明强. 低渗透介质有启动压力梯度的不稳态压力分析[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 847-851.
- WANG Xiaodong, HOU Xiaochun, HAO Mingqiang. Unsteady pressure analysis of low permeability media with starting pressure gradient [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 847-851.
- [16] 冯国庆, 刘启国, 石广志, 等. 考虑启动压力梯度的低渗透气藏不稳定渗流模型[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 457-460.
- FENG Guoqing, LIU Qiguo, SHI Guangzhi *et al.* Unstable percolation model for low permeability gas reservoirs considering start-up pressure gradient [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(4): 457-460.
- [17] 程时清, 徐论勋, 张德超. 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): 50-53.
- CHENG Shiqing, XU Lunxun, ZHANG Dechao. Typical curve fitting method for low-speed non-darcy percolation well test [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(4): 50-53.
- [18] 李凡华, 刘慈群. 含启动压力梯度的不定常渗流的压力动态分析[J]. 油气井测试, 1997, 6(1): 1-4.
- LI Fanhua, LIU Ciqun. Pressure dynamic analysis of unsteady seepage flow with starting pressure gradient [J]. *Well Testing*, 1997, 6(1): 1-4.
- [19] 冯曦, 钟孚勋. 低速非达西渗流试井模型的一种新的求解方法[J]. 油气井测试, 1997, 6(3): 16-21.
- FENG Xi, ZHONG Fuxun. A new method for solving low-speed non-darcy flow well test model [J]. *Well Testing*, 1997, 6(3): 16-21.
- [20] STEHFEST H. Numerical inversion of Laplace transform [J]. *Communication of the ACM*, 1970, 13(1): 47-49.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 张小龙, 男, 1985 年出生, 硕士, 2012 年毕业于西南石油大学, 目前主要从事油气田开发工程方面生产科研工作。电话: 15601769062; Email: zhangxl30@cnoc.com.cn。地址: 上海市市长宁区通协路 388 号中海油大厦, 邮政编码: 200335。