

碳酸盐岩气藏的渗流模型和产量递减分析方法

康莉霞¹, 叶礼友², 刘华勋², 张振东³, 张蓉⁴

- 1. 中国石油勘探开发研究院非常规研究所 北京 100089
- 2. 中国石油勘探开发研究院渗流流体力学研究所 河北廊坊 065007
- 3. 辽宁红阳燃气开发有限公司 辽宁沈阳 110000
- 4. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院技术服务中心 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: klx18515652062@163.com
项目支持: 中国石油勘探开发研究院廊坊分院和中国石油大学(北京)合作项目: “碳酸盐岩气藏产能评价和试井解释”(2017X1502)
引用: 康莉霞, 叶礼友, 刘华勋, 等. 碳酸盐岩气藏的渗流模型和产量递减分析方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 8-15.
Cite: KANG Lixia, YE Liyou, LIU Huaxun, et al. Percolation model and production decline analysis method for carbonate gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 8-15.

摘要 为明确应力敏感性和高速非达西效应对双重介质气藏不稳定渗流的影响,建立了同时考虑二者影响的碳酸盐岩气藏渗流模型;引入摄动原理,在拉氏空间下对模型进行求解,获得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转换为实空间的解,根据求解结果绘制产量递减分析图版,结合产量递减分析图版进行了参数敏感性分析。结果表明,应力敏感性和非达西效应都会显著降低气藏产量。应力敏感系数越大,应力敏感性越强,气藏产量递减越快;非达西系数越小,非达西效应越强,气藏初期产量递减越快。建立的渗流模型和产量递减分析方法提高了对碳酸盐岩气藏渗流规律的认识,为分析该类气藏的产量规律提供了理论支持。

关键词 应力敏感; 非达西效应; 双重介质; 渗流模型; 产量递减分析; 产能评价; 碳酸盐岩; 渗流特征

中图分类号: TE353 **文献标识码**: A **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.002

Percolation model and production decline analysis method for carbonate gas reservoirs

KANG Lixia¹, YE Liyou², LIU Huaxun², ZHANG Zhendong³, ZHANG Rong⁴

- 1. Unconventional Research Institute, RIPED, Beijing 100089, China
- 2. Research Institute of Percolation Fluids Mechanics, RIPED, Langfang, Hebei 065007, China
- 3. Liaoning Hongyang Gas Development Limited Company, Shenyang, Liaoning 110000, China
- 4. Technical Service Center of Exploration and Development Research Institute of PetroChina Xinjiang Oilfield Branch, Kelamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: In order to clarify the effect of stress sensitivity and non-Darcy effect on unstable seepage in dual-media gas reservoirs, a seepage model of carbonate gas reservoirs considering both effects was established. The perturbation principle was introduced to solve the model in Laplace space, and the analytical solution in Laplace space was obtained. The solution in Laplace is transformed into real space solution by using Stehfest numerical inversion algorithm. Based on the solution result, the production decline analysis chart was drawn, and the sensitivity of parameters was analyzed using the production decline analysis chart. The results show that both stress sensitivity and non-Darcy effect can significantly reduce gas reservoir production. The larger the stress sensitivity coefficient is, the stronger the stress sensitivity is, and the faster the decline of gas reservoir production is. The smaller the non-Darcy coefficient is, the stronger the non-Darcy effect is, and the faster the decline of gas reservoir initial production is. The established seepage model and production decline analysis method can improve the understanding of the percolation law of carbonate gas reservoirs, which provides a theoretical support for the analysis of the production law of such gas reservoirs.

Keywords: stress sensitivity; non-Darcy effect; dual media; seepage model; production decline analysis; productivity evaluation; carbonates; seepage characteristics

在储层应力敏感性特征及应力敏感表征方面,前人进行了大量的研究。Fatt I.等^[1]通过实验提出,上覆岩层的压力对储层渗透率的影响不可忽略,并且压力对于渗透率的影响在计算储层产能时

也是不可忽略的。Jones F. O.^[2]采用碳酸盐岩实际岩心和人造岩心做实验。通过实验结果发现,渗透率的立方根与围压成半对数关系。Duan Y.T.等^[3]通过计算机仿真模拟实验,得到了一种评价含裂缝的双重介质油藏应力敏感性的新方法。樊怀才等^[4]在考虑储层双重介质和变形特性的基础上,建立了双重变形介质气藏不稳定渗流模型。Zhao L.等^[5]进行了应力敏感实验发现,渗透率和孔隙度与压力呈指数型关系。冯青^[6]通过应力敏感性分析,建立了启动压力梯度及应力敏感效应影响下的气水两相数值试井模型,明确了应力敏感效应对流体渗流阻力的影响。温伟明等^[7]通过对实验和产能测试资料的分析,探讨了应力敏感对储层物性和气井产量的影响问题。张睿等^[8]通过对5种应力敏感公式进行实验和理论对比,建议裂缝性储层应力敏感模型可以采用幂律公式描述。同样,在非达西渗流的特征和表征方面,前人也进行了一定的研究。程时清等^[9]对油水两相低速非达西渗流的问题进行了研究。研究结果表明,在同等含水率下,非达西渗流时的采油指数要小于达西渗流。贾振岐等^[10]通过实验研究,将得到的低渗透油藏非线性渗流特征的产能公式与达西线性渗流情形相比发现,流体在非线性渗流时,压力损失量大,并且产能大幅降低。黄亮^[11]基于低渗透注水开发油藏内外区渗流特征的不同,建立了变渗透率效应下的达西-非达西非耦合渗流试井模型,解释结果符合实际地层流动条件。朱维耀等^[12]建立了含可动水、不动水和束缚水影响下的3类低速非达西渗流数学模型,推导出了相应的气井产能公式。卢占国^[13]开展了各种裂缝网络模型和缝洞模型的单相流动规律研究,引入福希海默数确定非线性渗流临界参数,并建立相应的单相流动数学模型。张芑强等^[14]建立了启动压力梯度、滑脱效应、应力敏感、地层伤害,以及近井地带高速非达西影响的低渗透气藏气水同产水平井产能方程。

在建立气藏渗流模型和产能评价模型方面,Raghavan R.等^[15]提出压力变化会引起储层压缩系数、孔隙度及渗透率的变化,从而对于开发中后期的气藏试井结果产生影响。陈立平等^[16]根据气井的产能与地质参数和测井解释参数的关系的统计分析,提出了建立气井产能预测模型的技术思路和方法,建立了本区气井产能早期预测模型系统。贾永禄等^[17]建立了三孔双渗油气藏产量变化的有效井径渗流模型,在Laplace空间对模型进行求解,并

利用Stehfest数值反演绘制了产量递减曲线和累积产量曲线。Jordan C.等^[18]应用传统的“镜像井”方法,克服了大量常规分析方法的限制,并通过拟压力和拟时间的转换建立了考虑物质平衡单相煤层气产能计算模型。郭晶晶等^[19]针对异常高压气藏开发实践,利用气体稳定渗流理论,推导得到考虑异常高压气藏应力敏感性的产能方程。单钰铭^[20]通过对含裂缝致密砂岩的力学变形和渗透能力实验,分析了不同类型裂缝的变形规律和渗透率的变化特征。安志斌等^[21]提出一种新的二项式压力指数法来处理应力敏感对异常高压气藏产能的影响。刘华勋等^[22]分析了应力敏感性和非达西效应对单纯介质气藏气井产能的影响。高树生等^[23]建立了考虑应力敏感与高速非达西系数的二项式气体渗流模型和产能方程。

本文在前人研究的基础上,考虑碳酸盐岩气藏为双重介质气藏,并同时考虑应力敏感性和非达西效应的影响,建立了碳酸盐岩气藏的渗流模型和产量递减分析方法。

1 双重介质气藏的渗流特征

安岳气田龙王庙组碳酸盐岩双重介质气藏有别于常规储层,它由基质和裂缝系统组成,低孔高渗的裂缝系统是流体的主要渗流通道^[24],而高孔低渗的基质系统是气体的主要储集场所,其孔喉结构与常规孔隙型气藏存在明显差异,渗流规律较为复杂^[25]。碳酸盐岩气藏在开发过程中,随着天然气的不断采出,导致储层孔隙压力降低,上覆岩石压力增加,使岩石骨架发生变形^[26],最终会导致渗透率、孔隙度等储层物性参数发生变化,表现为应力敏感性特征^[27]。并且,随着开采的进行,储层渗透率和产能都有所下降。同时,受储层性质的影响,碳酸盐岩气藏存在非达西渗流特征^[28],非达西渗流对产能评价的影响也是不可忽略的。因此,在建立碳酸盐岩双重介质气藏的渗流模型时,不能忽略应力敏感性和非达西效应的影响,要同时考虑二者对于气井产能的影响,建立真正适用于双重介质气藏的渗流模型。

2 渗流模型的建立

假设圆形封闭碳酸盐岩双重介质气藏内存在一口直井,地层及流体条件满足:

①单井定井底压力生产;

- ②储层厚度全部打开,流体径向流入井筒;
- ③考虑岩石渗透率应力敏感;
- ④考虑储层流体流动为非达西渗流;
- ⑤忽略毛管力和重力的影响;
- ⑥考虑裂缝与井筒连通性,基质向裂缝发生拟稳态窜流;
- ⑦考虑封闭外边界条件。

应力敏感性可以采用指数表达式^[29],即

$$K_f = K_{fi} e^{-\gamma_f(\psi_i - \psi_f)} \quad (1)$$

其中,拟渗透模量为

$$\gamma_f = \frac{1}{K_f} \frac{\partial K_f}{\partial \psi_f} \quad (2)$$

式中: K_f 为裂缝系统渗透率, mD; K_{fi} 为裂缝系统在原始地层条件下的渗透率, mD; γ_f 为渗透率模量, MPa^{-1} ; ψ_i 为地层初始拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; ψ_f 为裂缝系统拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

非达西效应的表示可以通过引入一个与流速有关的修正参数^[30],即

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{\mu_g u_g}{K} + \delta \rho u_g^2 \quad (3)$$

式中: μ_g 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; u_g 为渗流速度, cm/s ; δ 为非达西系数, cm^{-1} ; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

建立同时考虑应力敏感性和高速非达西效应的渗流模型,即

①基质系统

$$\begin{cases} v_{mx} = -\delta \frac{K_m}{\mu} \frac{\partial p_m}{\partial x}, v_{my} = -\delta \frac{K_m}{\mu} \frac{\partial p_m}{\partial y} \\ C_g(p_m) = \frac{1}{p_m} - \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dp_m} \\ \frac{\partial}{\partial x}(-\rho v_{mx}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho v_{my}) = \frac{\partial(\rho \phi_m)}{\partial t} - q_{mf} \\ \psi_m(r, t) \big|_{t=0} = \psi_i, \psi_m(r, t) \big|_{r=r_e} = \psi_i \\ -qB_p = \frac{K_f h r_w}{\mu} \delta \frac{\partial \psi_f}{\partial r} \bigg|_{r=r_w} \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_m 为基质系统渗流速度, cm/s ; K_m 为基质系统渗透率, mD; p_m 为基质系统压力, MPa; μ 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; C_g 为气体压缩系数, MPa^{-1} ; Z 为气体偏差系数, 小数; ϕ_m 为基质系统孔隙度, 小数; q_{mf} 为裂缝和基质系统间的窜流量, m^3/s ; ψ_m 为基质系统拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; t 为流体流动时间, h; q 为气井产量, m^3/d ; B_p 为气体拟体积系数, 10^8s^{-1} ; h 为储层厚度, m; r_w 为气井半径, m; r_e 为储层边界半径, m。

②裂缝系统

$$\begin{cases} v_{fx} = -\delta \frac{K_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial x}, v_{fy} = -\delta \frac{K_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial y} \\ C_g(p_f) = \frac{1}{p_f} - \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dp_f} \\ \frac{\partial}{\partial x}(-\rho v_{fx}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho v_{fy}) = \frac{\partial(\rho \phi_f)}{\partial t} - q_{mf} \\ \psi_f(r, t) \big|_{t=0} = \psi_i \\ -qB_p = \frac{K_f h r_w}{\mu} \delta \frac{\partial \psi_f}{\partial r} \bigg|_{r=r_w} \\ \psi_f(r, t) \big|_{r=r_e} = \psi_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_f 为裂缝系统的渗流速度, cm/s ; K_f 为裂缝系统的渗透率, mD; p_f 为裂缝系统压力, MPa; ϕ_f 为裂缝系统的孔隙度, 小数; ψ_f 为裂缝系统拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

引入拟压力函数,即

$$\psi_m = 2 \int_0^p \frac{P_m}{\mu Z} dp \quad (6)$$

$$\psi_f = 2 \int_0^p \frac{P_f}{\mu Z} dp \quad (7)$$

将(6)式和(7)式分别代入(4)式和(5)式中,化简得基本控制方程,即

$$-\alpha_m K_m (\psi_m - \psi_f) = \frac{\phi_m \mu_m C_{tm}}{3.6} \frac{\partial \psi_m}{\partial t} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \psi_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_f}{\partial r} + \gamma_f \left(\frac{\partial \psi_f}{\partial r} \right)^2 + \\ & \frac{\alpha_m K_m}{\delta} (\psi_m - \psi_f) = \frac{\phi_f \mu_f C_{tf}}{3.6 \delta K_f} \frac{\partial \psi_f}{\partial t_a} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: α_m 为窜流形状因子, m^2 ; C_{tm} 为基质系统综合压缩系数, MPa^{-1} ; C_{tf} 为裂缝系统综合压缩系数, MPa^{-1} ; t_a 为物质平衡时间, 无因次。

无因次定义如下:

$$\gamma_{fD} = \frac{Tq}{78.489 K_{fi} h} \gamma_f \quad (10)$$

$$t_D = \frac{3.6 K_{fi}}{\mu_i r_w^2 (\phi_m C_m + \phi_f C_f)_i} t_a \quad (11)$$

$$r_D = \frac{r}{r_w e^{-s}} \quad (12)$$

$$\psi_{fD} = \frac{78.489 K_{fi} h}{Tq} (\psi_i - \psi_f) \quad (13)$$

$$\psi_{mD} = \frac{78.489 K_{fi} h}{Tq} (\psi_i - \psi_m) \quad (14)$$

$$\lambda = \alpha_m r_w^2 \frac{K_{mi}}{K_{fi}} \quad (15)$$

$$\omega = \frac{\phi_{if} C_{if}}{(\phi_m C_m + \phi_f C_f)_i} \quad (16)$$

式中: γ_{fd} 为无因次应力敏感系数; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; t_D 为无因次时间; μ_i 为流体初始黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; r_D 为无因次半径; S 为表皮系数, 无因次; ψ_{fd} 和 ψ_{md} 分别为裂缝和基质系统的无因次拟压力; λ 为窜流系数, 无因次; K_{mi} 和 K_{fi} 分别为基质和裂缝系统的初始渗透率, mD ; ω 为裂缝储容比, 无因次; ϕ_{if} 为裂缝系统初始孔隙度, 小数; C_{if} 为裂缝系统初始压缩系数, MPa^{-1} 。

经无因次变换后, 可得:

①无因次基质系统基本控制方程

$$-\lambda(\psi_{md} - \psi_{fd}) = e^{\gamma_{fd}\psi_{md}}(1 - \omega) \frac{\partial \psi_{md}}{\partial t_D} \quad (17)$$

②无因次裂缝系统基本控制方程

$$\frac{\partial^2 \psi_{fd}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \psi_{fd}}{\partial r_D} - \gamma_{fd} \left(\frac{\partial \psi_{fd}}{\partial r_D} \right)^2 = e^{\gamma_{fd}\psi_{fd}} e^{-2S} \left[\frac{\omega}{\delta} \frac{\partial \psi_{fd}}{\partial t_D} + \frac{\lambda}{\delta} (\psi_{fd} - \psi_{md}) \right] \quad (18)$$

初始条件:

$$\psi_{fd}(r_D, t_D) \Big|_{t_D=0} = \psi_{md}(r_D, t_D) \Big|_{t_D=0} = 0 \quad (19)$$

内边界条件:

$$\left(e^{-\gamma_{fd}\psi_{fd}} \delta \frac{\partial \psi_{fd}}{\partial r_D} \right) \Big|_{r_D=1} = -1 \quad (20)$$

外边界条件:

$$\frac{\partial \psi_{fd}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (21)$$

式中: r_{eD} 为无因次边界半径。

引入摄动原理^[31], 得

$$\psi_{fd}(r_D, t_D) = -\frac{1}{\gamma_{fd}} \ln[1 - \gamma_{fd}\eta_{fd}(r_D, t_D)] \quad (22)$$

$$\psi_{md}(r_D, t_D) = -\frac{1}{\gamma_{md}} \ln[1 - \gamma_{md}\eta_{md}(r_D, t_D)] \quad (23)$$

式中: η_{fd} 和 η_{md} 分别为裂缝和基质系统的无因次变量。

取零阶摄动解后, 得到基质和裂缝系统的基本控制方程:

①基质系统

$$-\lambda(\eta_{0md} - \eta_{0fd}) = (1 - \omega) \frac{\partial \eta_{0md}}{\partial t_D} \quad (24)$$

②裂缝系统

$$\frac{\partial^2 \eta_{0fd}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \eta_{0fd}}{\partial r_D} = \frac{\omega}{\delta} \frac{\partial \eta_{0fd}}{\partial t_D} + \frac{\lambda}{\delta} (\eta_{0fd} - \eta_{0md}) \quad (25)$$

内边界条件:

$$\left(\delta \frac{\partial \eta_{0fd}}{\partial r_D} \right) \Big|_{r_D=1} = -1 \quad (26)$$

外边界条件:

$$\frac{\partial \eta_{0fd}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (27)$$

式中: η_{0fd} 和 η_{0md} 分别为裂缝和基质系统无因次变量的零阶摄动解。

3 模型求解

将无因次模型进行 Laplace 变化, 在拉氏空间进行求解。

引入拉普拉斯变换, 即

$$L[\eta_D(r_D, t_D)] = \bar{\eta}_D(r_D, u) = \int_0^\infty \eta_D(r_D, t_D) e^{-ut_D} dt_D \quad (28)$$

将(28)式代入(24)式, 得基质系统拉氏空间下的控制方程, 即

$$-\lambda e^{-2S} (\bar{\eta}_{0md} - \bar{\eta}_{0fd}) = (1 - \omega) e^{-2S} u \bar{\eta}_{0md} \quad (29)$$

将(28)式代入(25)式, 得裂缝系统拉氏空间下的控制方程, 即

$$\frac{d^2 \bar{\eta}_{0fd}}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{d \bar{\eta}_{0fd}}{dr_D} + \frac{\lambda}{\delta} e^{-2S} (\bar{\eta}_{0md} - \bar{\eta}_{0fd}) - \frac{\omega}{\delta} e^{-2S} u \bar{\eta}_{0fd} = 0 \quad (30)$$

将(28)式代入(26)式, 得拉氏空间下的内边界条件, 即

$$\left(\delta \frac{d \bar{\eta}_{0fd}}{dr_D} \right) \Big|_{r_D=1} = -\frac{1}{u} \quad (31)$$

将(28)式代入(27)式, 得拉氏空间下的外边界条件, 即

$$\frac{\partial \bar{\eta}_{0fd}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (32)$$

联立(29)-(32)式, 求解得到:

$$\eta_{0D} = - \frac{1}{u\delta\sqrt{e^{-2S}uf(u)} \left[\frac{I_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})}{I_0(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})} - \frac{I_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})K_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})}{I_0(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})K_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})} \right]} - \frac{1}{u\delta\sqrt{e^{-2S}uf(u)} \left[\frac{I_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})K_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})}{I_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})K_0(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})} - \frac{K_1(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})}{K_0(\sqrt{e^{-2S}uf(u)})} \right]} \quad (33)$$

上述(33)式即为双孔单渗模型圆形封闭条件下的 Laplace 空间解析解,利用 Stehfest 数值算法进行数值反演,得到实空间的解 η_{0D} ,代入(34)式,从而得到压力解 ψ_D ,即

$$\psi_D(r_D, t_D) = - \frac{1}{\gamma_D} \ln[1 - \gamma_D \eta_{0D}(r_D, t_D)] \quad (34)$$

引入无因次物质平衡时间,即

$$t_{Dd} = t_D \times \frac{1}{\frac{1}{2}(r_{eD}^2 - 1) \left(\ln r_{eD} - \frac{1}{2} \right)} \quad (35)$$

式中: t_{Dd} 为无因次物质平衡时间。

最终得到模型的解:

①无因次产量

$$q_D = - \left(\frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right) \bigg|_{r_D=1} \quad (36)$$

②无因次递减产量积分

$$q_{Ddi} = \frac{1}{t_{Dd}} \int_0^{t_{Dd}} q_D(\tau) d\tau \quad (37)$$

③无因次递减产量积分导数

$$q'_{Ddi} = \frac{dq_{Ddi}}{d \ln t_{Dd}} \quad (38)$$

根据上述模型编程并绘制出碳酸盐岩双重介质气藏的无因次产量递减样版曲线(图1)。

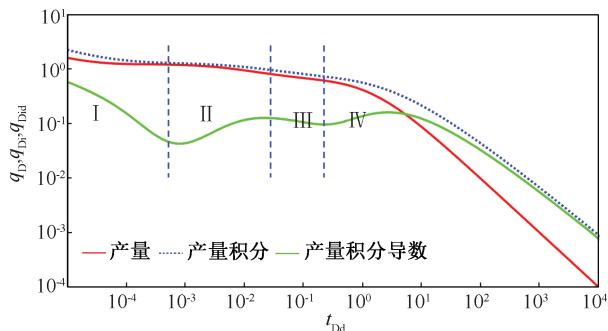


图1 双重介质气藏产量递减样版曲线

Fig.1 Production decline model curve of dual-medium gas reservoir

碳酸盐岩双重介质气藏共有4个流动阶段。第一阶段为裂缝系统向井筒的流动;第二阶段为基质

向裂缝窜流阶段,无因次产量积分导数曲线出现一个“凹子”,由于有基质的补给,产量递减较慢;第三个阶段为裂缝系统整体向井筒流动阶段,产量递减加快;第四个阶段为边界反应阶段,产量剧减,产量积分导数表现为一个驼峰。

4 影响因素分析

如图2所示,无因次渗透率模量 γ_D 反应了应力敏感对样版曲线的影响,无因次渗透率模量越大,应力敏感影响越明显,产量递减越快。对于碳酸盐岩气藏来说,裂缝发育,在开采过程中,随着上覆岩石压力的增大,岩石骨架变形,渗透率降低,导致产量递减快。

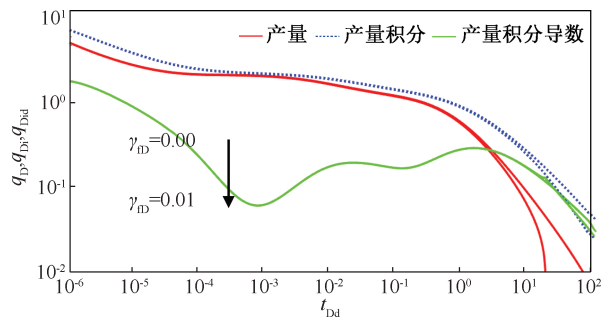


图2 应力敏感性对双重介质气藏产能的影响

Fig.2 Effect of stress sensitivity on gas productivity in dual-medium gas reservoirs

如图3所示,高速非达西系数 δ 反应了高速非达西对样版曲线的影响,高速非达西系数越小,非达西效应越明显,初期产量越低,曲线位置越往下掉。

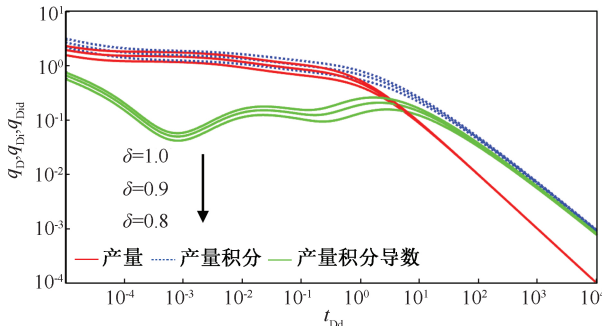


图3 高速非达西效应对双重介质气藏产能的影响

Fig.3 Effect of high-speed non-Darcy effect on gas productivity in dual-medium gas reservoirs

5 实例分析

M1 井于 2012 年 12 月 6 日投入试采,储层中部深度 4 679.0 m,初期日产气量为 $30\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,2013 年 1 月试采产量上调到 $60\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。2013 年 10 月 12 日,日产气 $77.0\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,日产水量为 $6.18\text{ m}^3/\text{d}$,水气比为 $0.08\text{ m}^3/10^4\text{ m}^3$,其基础数据如下: $\phi=4.64\%$, $h=38.4\text{ m}$, $\mu_{\text{g}}=0.025\text{ mPa}\cdot\text{s}$, $B_{\text{g}}=0.002\,57$, $C_{\text{t}}=6.1\times10^{-3}\text{ MPa}^{-1}$, $r_{\text{w}}=0.061\text{ m}$, $q_{\text{i}}=30\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

图 4 为 M1 井的产量递减解释拟合图。根据该井的生产动态特征,应用建立的产能评价模型对该井钻遇的储层进行拟合解释,拟合解释结果: $K=0.48\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$, $S=14.7$, $\omega=0.004\,8$, $\lambda=1.53\times10^{-4}$, $r_{\text{eD}}=8.06\times10^3$, $\gamma_{\text{D}}=0.01$, $\delta=0.61$ 。

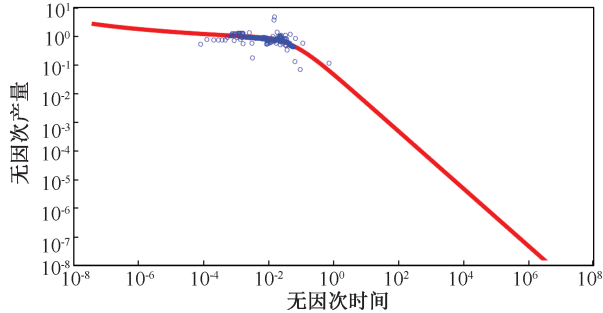


图 4 M1 井产量递减解释拟合曲线图
Fig.4 Fitting curve of production decline interpretation in Well M1

运用理论模型解释实例井的生产动态资料后,给定一时间可预测未来气井的产量。图 5 为 M1 井的产能预测曲线。表 1 为 M1 井的产量预测结果。

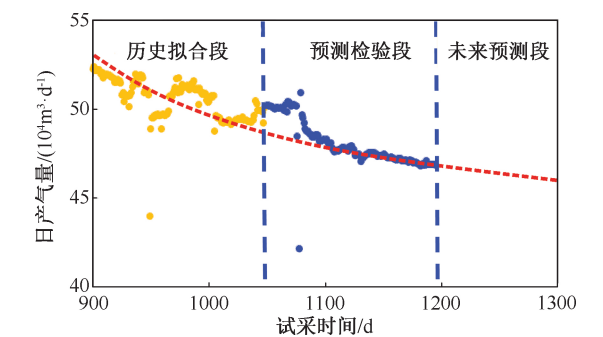


图 5 M1 井的产能预测曲线图
Fig.5 Productivity prediction curve of Well M1

表 1 M1 井产量预测结果			
Table 1 Production prediction results in Well M1			
时间/ d	井底流压/ MPa	预测产量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	预测累积产量/ (10 ⁸ m ³)
900	67.94	—	—
1 000	64.18	—	—
1 100	63.43	49.03	5.05
1 200	58.19	47.97	5.12

对预测的产量进行误差分析,时间为 1 200 d 时,M1 井预测的产量为 $47.97\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,实际产量为 $48.19\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,计算得到的误差为 3.7%。计算结果表明,产能预测结果符合工程标准,误差在允许范围以内。

同样地,用建立的模型对 7 口实例井进行产量预测,结果见表 2。从预测结果可以看出,按照真实产量值与预测产量值误差在 10%以内的井为符合规定的,碳酸盐岩气藏中长期产能预测误差均在工程误差允许范围以内。

表 2 产量预测结果				
Table 2 Production prediction results				
井号	时间/ d	预测产量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	真实产量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	误差/%
M2	900	63.48	60.22	5.4
M3	900	34.33	35.97	4.5
M4	500	10.19	11.26	9.5
M5	600	20.11	21.67	7.2
M6	160	25.01	25.31	1.2
M7	800	62.22	60.69	2.5
M8	400	15.89	15.01	5.9

6 结论

(1)碳酸盐岩双重介质气藏与常规气藏在储集空间和渗流特征方面存在较大差异,在建立渗流模型时,应同时考虑应力敏感性和高速非达西效应的影响。

(2)在对双重介质气藏的渗流模型进行求解时,引入应力敏感系数和非达西系数导致渗流方程非线性,利用摄动原理消除非线性,并将渗流方程转化为拉氏空间下的方程进行求解,最后进行 Stehfest 数值反演得到产量解。

(3)通过对碳酸盐岩双重介质气藏的产量递减样版曲线进行分析可知,应力敏感性越明显,双重介质气藏的产量递减越快;高速非达西效应越明显,双重介质气藏的初期产量越低。

(4)运用建立的模型对实例井进行应用分析,分析结果表明,8 口实例井的产量预测结果误差均在工程误差允许范围以内,表明模型适用性好。

致谢:感谢中国石油大学(北京)油藏数值模拟组黄世军老师和王苏冉师兄的帮助;感谢中国石油勘探开发研究院廊坊分院项目“碳酸盐岩气藏产能评价和试井解释”资助。

参考文献

[1] FATT I, DAVIS D H. Reduction in permeability with overburden pressure [J]. Journal of Petroleum Technology,

- 1952,4(12):34-41.
- [2] JONES F O. A Laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rocks [J]. Society of Petroleum Engineers, 1975,27(4):21-27.
- [3] DUAN Yuting, MENG Yingfeng, LUO Pingya, et al. Stress sensitivity of naturally fractured-porous reservoir with dual-porosity [C]. SPE-50909-MS, 1998.
- [4] 樊怀才,李晓平,窦天财,等. 双重变形介质储层气井流量动态特征研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(2):115-120.
- FAN Huaicai, LI Xiaoping, DOU Tiancai, et al. Study on the flowing performance of gas wells in dual-porosity deformable fractal reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011,33(2):115-120.
- [5] ZHAO Lun, CHEN Yefei, NING Zhengfu, et al. Stress sensitive experiments for abnormal overpressure carbonate reservoirs: A case from the Kenkiyak fractured-porous oil field in the littoral Caspian basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2013,40(2):208-215.
- [6] 冯青. 低渗含水气藏非线性数值试井解释模型及压力特征分析[J]. 油气井测试,2019,28(2):6-13.
- FENG Qing. Nonlinear numerical well test interpretation model and pressure characteristics analysis for low permeability water bearing gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019,28(2):6-13.
- [7] 温伟明,朱绍鹏,李茂. 海上异常高压气藏应力敏感特征及产能方程——以莺歌海盆地为例[J]. 天然气工业,2014,34(9):59-63.
- WEN Weiming, ZHU Shaopeng, LI Mao. Stress sensitivity features and productivity equations of offshore abnormal high-pressure gas reservoirs: A case study from the Yinggehai basin [J]. Natural Gas Industry, 2014,34(9):59-63.
- [8] 张睿,宁正福,张海山,等. 裂缝性致密储层应力敏感机理新认识[J]. 天然气地球科学,2016,27(5):918-923.
- ZHANG Rui, NING Zhengfu, ZHANG Haishan, et al. New insights and discussions on stress sensitivity of fractured tight reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(5):918-923.
- [9] 程时清,陈明卓. 油水两相低速非达西渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发,1998,25(1):41-43.
- CHENG Shiqing, CHEN Mingzhuo. Numerical simulation of two-dimensional two-phase non-Darcy slow flow [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998,25(1):41-43.
- [10] 贾振岐,王志平,赵辉. 低渗透油藏非线性渗流下的油井产能[J]. 大庆石油学院学报,2006,30(1):101-103.
- JIA Zhenqi, WANG Zhiping, ZHAO Hui. Oil well productivity of non-linear flow in low-permeability oil reservoirs [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006,30(1):101-103.
- [11] 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 & non-Darcy coupled flow model and its pressure analysis in injection well of low-permeability reservoirs [J]. Well Testing, 2017,26(4):12-15.
- [12] 朱维耀,宋洪庆,何东博,等. 含水低渗气藏低速非达西渗流数学模型及产能方程研究[J]. 天然气地球科学,2008,19(5):685-689.
- ZHU Weiyao, SONG Hongqing, HE Dongbo, et al. Low-velocity non-Darcy gas seepage model and productivity equations of low-permeability water-bearing gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2008,19(5):685-689.
- [13] 卢占国. 缝洞型介质流体流动规律研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2010.
- LU Zhanguo. Fluid flow law in fractured vuggy media [D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina), 2010.
- [14] 张芟强,李晓平,袁淋,等. 非达西渗流对低渗透气藏气水同产水平井产能的影响[J]. 岩性油气藏,2014,26(6):120-125.
- ZHANG Jiqiang, LI Xiaoping, YUAN Lin, et al. Influence of non-Darcy flow on deliverability of gas-water producing horizontal well in low permeability gas reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2014,26(6):120-125.
- [15] RAGHAVAN R, SCORER J D T, MILLER F G. An investigation by numerical methods of the effect of pressure-dependent rock and fluid properties on well flow tests [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1972,12(3):267-275.
- [16] 陈立平,董敏淑,李志良. 川东石炭系气藏气井产能早期预测模型[J]. 天然气工业,2000,20(2):31-35.
- CHEN Liping, DONG Minshu, LI Zhiliang. An early forecast model of gas well deliverability of the carboniferous gas reservoirs in east Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 2000,20(2):31-35.
- [17] 贾永禄,曾桃,林涛,等. 缝洞型碳酸盐岩双渗油气藏产量的变化规律[J]. 天然气工业,2008,28(5):74-76.

- JIA Yonglu, ZENG Tao, LIN Tao, et al. The yield-change laws of dual-permeability oil and gas reservoirs of fracture-cavity type in carbonate formations [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(5):74-76.
- [18] JORDAN C, JACKSON R, SMITH C. Simplifying gas production modeling [C]. SPE 114954, 2008.
- [19] 郭晶晶,张烈辉,涂中. 异常高压气藏应力敏感性及其对产能的影响[J]. 特种油气藏,2010,17(2):79-81.
- GUO Jingjing, ZHANG Liehui, TU Zhong. Stress sensitivity and its influence on productivity in gas reservoirs with abnormally high pressure [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010,17(2):79-81.
- [20] 单钰铭. 致密砂岩中裂缝的变形特性及对渗流能力的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010,37(4):457-462.
- SHAN Yuming. Deformation of fractures in tight sandstone and its control on seepage ability [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010,37(4):457-462.
- [21] 安志斌,贾爱林,位云生,等. 考虑应力敏感的异常高压气藏产能新方程[J]. 石油天然气学报,2013,35(11):141-144.
- AN Zhibin, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. A new method of deliverability equation considering stress sensitivity in abnormal pressure gas reservoirs [J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2013,35(11):141-144.
- [22] 刘华勋,任东,胡志明,等. 四川盆地龙王庙组气藏渗流数学模型的建立与应用[J]. 天然气工业,2014,34(3):110-114.
- LIU Huaxun, REN Dong, HU Zhiming, et al. Establishment and application of seepage mathematical model of Longwangmiao Fm gas reservoirs in the Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2014,34(3):110-114.
- [23] 高树生,刘华勋,任东,等. 缝洞型碳酸盐岩储层产能方程及其影响因素分析[J]. 天然气工业,2015,35(9):48-54.
- GAO Shusheng, LIU Huaxun, REN Dong, et al. Deliverability equation of fracture-cave carbonate reservoirs and its influential factors [J]. Natural Gas Industry, 2015,35(9):48-54.
- [24] 李熙喆,郭振华,万玉金,等. 安岳气田龙王庙组气藏地质特征与开发技术政策[J]. 石油勘探与开发, 2017,44(3):398-406.
- LI Xizhe, GUO Zhenhua, WAN Yujin, et al. Geological characteristics and development strategies for Cambrian Longwangmiao formation gas reservoir in Anyue gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(3):398-406.
- [25] 贾爱林,闫海军,郭建林,等. 不同类型碳酸盐岩气藏开发特征[J]. 石油学报,2013,34(5):914-923.
- JIA Ailin, YAN Haijun, GUO Jianlin, et al. Development characteristics for different types of carbonate gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(5):914-923.
- [26] 李大奇,康毅力,游利军. 碳酸盐岩储层渗透率应力敏感性实验研究[J]. 天然气地球科学,2014,25(3):409-413.
- LI Daqi, KANG Yili, YOU Lijun. Experimental study on permeability stress sensitivity of carbonate rocks [J]. Natural Gas Geoscience, 2014,25(3):409-413.
- [27] PENG Xiaodong, LU Yan, LIU Xin, et al. Rock stress sensitivity and its influence on productivity of over pressured gas reservoir: A case study in Yinggehai basin, China [J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering, 2015,3(3):33-40.
- [28] CHEN Yifeng, ZHOU Jiaqing, HU Shaohua, et al. Evaluation of Forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529:993-1006.
- [29] PEDROSA O A. Pressure transient response in stress sensitive formation [C]. SPE 15115, 1986.
- [30] 黄炳光,冉新权,李晓平. 气藏工程分析方法[M]. 北京:石油工业出版社,2004:87-90.
- [31] WANG Huan, RAN Qiquan, LIAO Xinwei. Pressure transient responses study on the hydraulic volume fracturing vertical well in stress-sensitive tight hydrocarbon reservoirs [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017,42(29):18343-18349.

编辑 刘振庆

第一作者简介:康莉霞,女,1993年出生,硕士,2019年毕业于中国石油大学(北京)石油工程学院油气田开发专业,现主要从事非常规油气方面的研究。电话:010-83596857,18515652062;Email:klx18515652062@163.com。通信地址:北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院,邮政编码:100089。