

分形介质煤层气藏产能动态分析

王磊

中国石油集团大庆油田有限责任公司第二采油厂 黑龙江大庆 163711

通讯作者:Email:w11164667919@163.com

引用:王磊. 分形介质煤层气藏产能动态分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 7-13.

Cite: WANG Lei. Production performance analysis for fractal CBM reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 7-13.

摘要 为计算复杂条件下的煤层气井井底压力及产能变化,以分形几何学为基础,通过 Langmuir 等温吸附公式、Fick 扩散定律、拉普拉斯变换等,建立了考虑井筒储集和表皮效应的双重分形介质煤层气不稳定渗流数学模型。利用混合拉普拉斯变换有限差分方法,通过 Stehfest 反演公式,计算出圆形封闭地层中心一口井定产量生产时无因次井底压力,利用拉普拉斯空间下压力和产量的关系,求出定压条件下的无因次产量,分析了分形维数、分形指数、储能比、窜流系数和吸附因子对煤层气产能动态的影响。结果表明,分形维数越大,产能曲线下降趋势越明显;分形指数与分形维数对产能的影响相反;储能比越大,早期产能越大;窜流系数越小,产能下降出现的越晚;吸附因子越大,供给能力越强,产能越大。该方法计算任意时刻井底压力和产量时,对空间网格具有良好的适应性,并且不依赖其它时刻的计算结果,误差较小,适用于一些无法求取解析解的数值模拟问题,以及复杂条件下煤层气井井底压力的计算。

关键词 煤层气;产能动态分析;分形介质;拉普拉斯变换;有限差分法;试井分析

中图分类号:TE353

文献标识码:A

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.02.002

Production performance analysis for fractal CBM reservoirs

WANG Lei

No.2 Oil Production Plant of PetroChina Daqing Oilfield Company Limited, Daqing, Heilongjiang 163711, China

Abstract: To highlight changes in bottom-hole pressure and deliverability of CBM wells under complicated conditions, a mathematical model for transient seepage flow in dual-fractal CBM reservoir was established on the basis of fractal geometry by using Langmuir equation, Fick's law and Laplace transform, and this model considers wellbore storage and skin effects. By using the Laplace transform finite difference method and Stehfest reversion formula, the dimensionless bottom-hole pressure of a well in the central part of circular enclosed formations during single-rate production was determined. Then, depending on the correlation between pressure and production rate in Laplace space, the dimensionless production rate at constant pressure was determined, and the impacts of fractal dimension, fractal index, stored energy ratio, inter-porosity flow coefficient and adsorption factor on CBM production performance were analyzed. As revealed by the study results, the higher fractal dimension is, the faster the deliverability declines. Fractal index and fractal dimension have opposite impacts on the deliverability. The higher the stored energy ratio is, the higher the initial deliverability is. The lower the inter-porosity flow coefficient is, the later the deliverability drop occurs. The higher the adsorption factor is, the stronger the supply capacity is and the higher the deliverability is. The technique can be used to calculate bottom-hole pressure and deliverability at any moment with satisfactory adaptability to spatial mesh. Independent of calculation results at other moments and with minor errors, the technique can be deployed in numerical simulation with no analytical solution and in determination of bottom-hole pressure of CBM wells under complicated conditions.

Keywords: CBM; production performance analysis; fractal; Laplace transform; finite difference method; well test analysis

煤层气试井是获取煤层气储层参数的重要手段^[1-2],也是对煤层中的渗流机理进行直接验证的有效方法。煤层介质是由割理和基质构成的典型天然裂缝系统,梁冰等^[3]利用分形理论和实验室测试方法,研究了煤层的渗透性规律。杨宇等^[4]根据

分形理论,推导了一种利用毛管压力曲线、导数法计算煤层孔隙分形维数的方法。傅雪海等^[5]计算了煤中孔隙体积的分形维数,分析了其与煤层孔隙度、裂隙发育程度和煤变质程度的关系。赵爱红等^[6]、傅雪海等^[7]用分形维数对煤的孔隙结构进行

了定量研究,探讨了煤孔径结构的分形分类与自然分类。秦跃平等^[8]通过对煤孔隙分形特性及其吸水性能的研究,建立了吸、失水速度随孔隙分形维数和最大孔隙直径变化的回归方程,为煤层注水提供了必要的理论基础。罗政^[9]基于煤层气井的结构特征,优选出适用不同煤田的试井基础数据。以上研究表明,煤储层多孔介质系统在不同的尺度上也具有不同的非均质结构,表现出某种形式的自相似性,具有分形特征。Schwerer F. C.等^[10]、Guo C.等^[11]、Ertekin T.等^[12]、Velazquez R. C.等^[13]、Anbarci K.等^[14]、同登科等^[15]分别建立了煤层气非稳态数学模型。1990年,Chang J.等^[16]便建立了分形油气藏理论分析模型,开创了分形油气藏渗流力学的先河。之后,Beier R. A.^[17]、Acuna J. A.等^[18]、Olaewaju J. S.^[19]运用分形油藏渗流模型解释了传统模型无法解释的复杂油藏试井结果。2009年,彭占刚等^[20]采用数值方法研究了具有分形特性的煤层气藏渗流规律。但是有限差分法最大的问题就是网格效应严重,对时间和网格划分步长十分敏感,影响计算结果的精度。2007年,高慧梅等^[21]使用解析法对变形介质煤层气藏压力动态进行了分析。2008年,张先敏等^[22-24]通过解析法研究了分形介质煤层气的压力动态。但是对于一些复杂的非线性偏微分方程组,有时无法用解析法直接求解,这使得解析法在求解复杂条件下煤层气藏井底压力时有一定的局限性。2012年,刘洪等^[25]用拉普拉斯变换差分法求解了试井分析中的一维渗流问题,证明了该方法在渗流问题计算中的适用性。

本文通过引入分形维数和分形指数,建立了考虑表皮和井储的双重分形介质煤层气渗流数学模型,应用拉普拉斯变换差分法求解,消去时间变量,削弱网格效应,计算结果比有限差分更精确,也适用于计算复杂条件下的煤层气井底压力,并分析了分形维数、分形指数、表皮因子、井筒储集系数、储能比、窜流系数和吸附因子对煤层气产能动态的影响。

1 非线性渗流数学模型

从煤层气藏的特点出发,建立数学模型时作如下假设:

(1)煤层气储层上下边界均为封闭边界,储层具有分形特征,分形维数为 d_f 的分形裂缝网络嵌入到2维欧几里德基岩中;

(2)割理中流动为径向流动,割理中的气体流动为层状流动,并且遵循 Darcy 渗流定律;

(3)忽略重力影响;

(4)煤层气等温吸附模型采用 Langmuir 模型;

(5)裂缝网络在压力作用下发生小变形后仍具有分形特征且维数变化可忽略。

具有分形特征的煤层气储层的渗透率和孔隙度为

$$K = K_w \left(\frac{r}{r_w} \right)^{d_f - \theta - 2}$$

$$\phi = \phi_w \left(\frac{r}{r_w} \right)^{d_f - 2}$$

式中: d_f 为分形维数; θ 为分形指数; r_w 为井筒半径,m; K_w 为井筒附近地层渗透率, m^2 ; ϕ_w 为井筒附近地层孔隙度。

原始储层非均质且渗透率各向异性,由运动方程、连续性方程以及真实气体状态方程,可得分形介质煤储层中煤层气的无因次渗流方程,即

$$\frac{\partial^2 m_D}{\partial r_D^2} + \frac{\beta}{r_D} \frac{\partial m_D}{\partial r_D} = r_D^\theta \left[\omega \frac{\partial m_D}{\partial t_D} - (1 - \omega) \frac{\partial V_D}{\partial t_D} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_D}{\partial t_D} = \frac{1}{\lambda} (V_{ED} - V_D) \quad (2)$$

其中

$$m_D = \frac{2\pi K_w h (p_i^2 - p^2)}{q_{sc} \mu p_{sc}}$$

$$t_D = \frac{K_w t}{v' r_w^{d_f}}$$

$$V_D = \frac{V - V_i}{V_i}$$

$$V_{ED} = \frac{V_E - V_i}{V_i}$$

$$\omega = \frac{\phi_w \mu C_g}{v'}$$

$$\lambda = \frac{K_w \tau}{v' r_w^{d_f}}$$

$$v' = \phi_w \mu C_g + \frac{2\pi K_w h V_i T Z_i F_G}{q_{sc} T_{sc}}$$

$$\beta = d_f - \theta - 1$$

式中: m_D 为无因次压力; p 为压力,Pa; p_i 为原始压力,Pa; q_{sc} 为标准状况下产量, m^3/s ; p_{sc} 为标准状况下压力,Pa; T_{sc} 为标准状况下开氏温度,K; V 为煤体中煤层气浓度, m^3/m^3 ; V_i 为 p_i 下气体浓度, m^3/m^3 ;

V_E 为平衡状态下气体浓度, m^3/m^3 ; V_L 为极限吸附量, m^3/m^3 ; τ 为吸附时间, s ; C_g 为煤层气压缩系数, Pa^{-1} ; μ 为煤层气黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; h 为地层厚度, m ; Z_i 为气体偏差因子; F_G 是基质块形状因子, m^{-2} 。

Langmuir 等温吸附方程为

$$V_E = \frac{V_L p}{p_L + p} \quad (3)$$

$$V_i = \frac{V_L p_i}{p_L + p_i} \quad (4)$$

式中: p_L 为吸附量达到极限吸附量的 50% 时的压力, MPa 。

定解条件:

$$\left[C_D \frac{\partial m_{wD}}{\partial t_D} - r_D^\beta \frac{\partial m_D}{\partial r_D} \right] \bigg|_{r_D=1} = 1 \quad (5)$$

$$m_{wD} = \left[m_D - Sr_D^\beta \left(\frac{\partial m_D}{\partial r_D} \right) \right] \bigg|_{r_D=1} \quad (6)$$

$$\frac{\partial m_D}{\partial r_D} (r_D = R_{eD}) = 0 \quad (7)$$

式中: C_D 为无因次井筒储存系数; S 为表皮系数。

拉普拉斯变换 (Laplace Transform) 是工程数学中常用的一种积分变换。函数 $f(t)$ 的拉普拉斯变换定义为

$$L[f(t)] = \bar{f}(z) = \int_0^\infty f(t) e^{-zt} dt$$

式中: z 为拉普拉斯变量。

对 (1) 式、(2) 式进行拉普拉斯变换, 并整理得拉普拉斯空间下的数学模型为

$$z \bar{V}_D = \frac{1}{\lambda} (\bar{V}_{ED} - \bar{V}_D) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial r_D^2} + \frac{\beta}{r_D} \frac{\partial \bar{m}_D}{\partial r_D} = r_D^\theta [\omega z \bar{m}_D - (1 - \omega) z \bar{V}_D] \quad (9)$$

令

$$\alpha = \frac{q_{sc} p_{sc} \mu m_L}{2\pi K_w h m_i (m_L + m) (m_L + m_i)}$$

那么

$$V_{ED} = -\alpha \bar{m}_D \quad (10)$$

于是, 式 (8) 可写为

$$\bar{V}_D = -\frac{\alpha \bar{m}_D}{\lambda \cdot z + 1} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (9), 得

$$\frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial r_D^2} + \frac{\beta}{r_D} \frac{\partial \bar{m}_D}{\partial r_D} = r_D^\theta f(z) \bar{m}_D \quad (12)$$

其中

$$f(z) = \left[\omega + \frac{\alpha(1 - \omega)}{\lambda \cdot z + 1} \right] z$$

对定解条件式 (5) - (7) 进行拉普拉斯变换, 得

$$\left[C_D z \bar{m}_{wD} - \frac{\partial \bar{m}_D}{\partial r_D} \right] \bigg|_{r_D=1} = \frac{1}{z} \quad (13)$$

$$\bar{m}_{wD} = \left[\bar{m}_D - Sr_D^\beta \left(\frac{\partial \bar{m}_D}{\partial r_D} \right) \right] \bigg|_{r_D=1} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \bar{m}_D}{\partial r_D} (r_D = R_{eD}) = 0 \quad (15)$$

2 分形介质煤层气渗流数学模型求解

利用混合拉普拉斯变换有限差分法对数学模型进行求解。

2.1 数学模型求解

对渗流区域进行不等距剖分, 采用块中心网格系统, 则式 (12) 变为

$$\frac{1}{r_i^2} \frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial x^2} + \frac{(\beta - 1)}{r_i^2} \frac{\partial \bar{m}_D}{\partial x} = f(z) r_i^\theta \bar{m}_D \quad (16)$$

将式 (16) 进行差分, 则可以得到

$$\frac{1}{r_i^2} \frac{\bar{m}_{i+1,D} - 2\bar{m}_{i,D} + \bar{m}_{i-1,D}}{\Delta x^2} + \frac{(\beta - 1)}{r_i^2} \frac{\bar{m}_{i+1,D} - \bar{m}_{i,D}}{\Delta x} = r_i^\theta f(z) \bar{m}_{i,D} \quad (17)$$

当 $i=1$ 时:

$$\begin{aligned} & [1 + \Delta x(\beta - 1)] \bar{m}_{2,D} - \\ & \left[1 + \Delta x(\beta - 1) + f(z) r_1^\theta + \frac{r_1 \Delta x C_D z^2}{C_D z^2 S + z} \right] \bar{m}_{1,D} \\ & = -\frac{r_1 \Delta x}{C_D z^2 S + z} \end{aligned} \quad (18)$$

当 $i=2, 3, \dots, N-1$ 时:

$$\begin{aligned} & [1 + \Delta x(\beta - 1)] \bar{m}_{i+1,D} - \\ & [2 + \Delta x(\beta - 1) + f(z) r_i^{2+\theta} \Delta x^2] \bar{m}_{i,D} + \bar{m}_{i-1,D} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

当 $i=N$ 时:

$$- [1 + f(z) r_N^{2+\theta} \Delta x^2] \bar{m}_{N,D} + \bar{m}_{N-1,D} = 0 \quad (20)$$

通过解上面的三对角矩阵, 可得到 Laplace 空间的井底压力分布公式。

利用拉普拉斯空间下无因次压力和无因次产量的关系, 由定产生井底压力解求出定压生产的产量 \bar{q}_D , 即

$$\bar{q}_D = \frac{1}{z^2 \cdot \bar{m}_{wD}} \quad (20)$$

通过 Stehfest 反演公式就可以求得井底压力分布和产能变化情况^[26-27]。

2.2 方法正确性验证

当取分形维数为2,分形指数为0时,数学模型可以通过解析法进行求解,即参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000$, $d_f = 2$, $\theta = 0$, $\omega = 0.5$, $\lambda = 10^4$, $\alpha = 10$ 时,通过求解数学模型,得到井底压力,即

$$\bar{m}_{wD} = \frac{1}{z} \frac{1}{C_D z} \times \left[\begin{aligned} & \{ K_0(\sqrt{f(z)}) + MI_0(\sqrt{f(z)}) + \\ & S\sqrt{f(z)} [K_1(\sqrt{f(z)}) - MI_1(\sqrt{f(z)})] \} / \\ & \{ [K_0(\sqrt{f(z)}) + MI_0(\sqrt{f(z)})] + \\ & (C_D z S + 1) \sqrt{f(z)} [K_1(\sqrt{f(z)}) - \\ & MI_1(\sqrt{f(z)})] \} \end{aligned} \right]$$

其中

$$M = \frac{K_1(R_{eD} \sqrt{f(z)})}{I_1(R_{eD} \sqrt{f(z)})}$$

式中: $I_0(x)$ 为第一类零阶 Bessel 函数; $K_0(x)$ 为第二类零阶 Bessel 函数; $I_1(x)$ 为第一类一阶 Bessel 函数; $K_1(x)$ 为第二类一阶 Bessel 函数。

通过 Stehfest 反演公式可以求得井底压力分布。将本文方法与解析方法的计算结果进行对比,如图1所示。

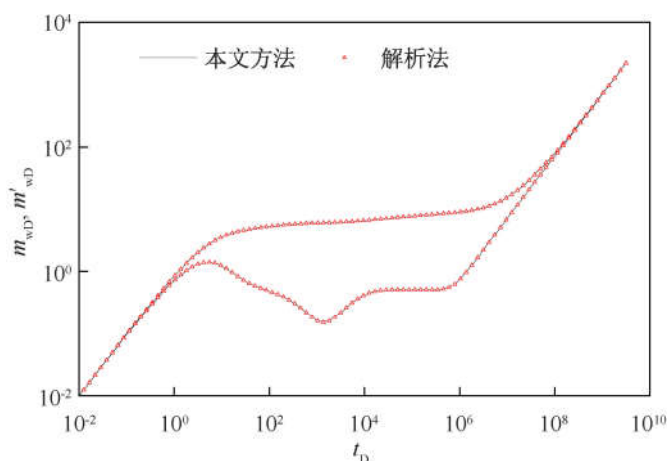


图1 解析法和本文方法对比曲线

Fig.1 Comparison between analytical method and this method

从图1中两种方法计算结果曲线的对比可以看出,利用解析法和数值法所求数据画出的压力动态曲线基本上重合。这正验证了混合拉普拉斯变换有限差分法求解结果的正确性。

3 产能曲线影响因素分析

当参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000$, $d_f = 1.75$, $\theta = 0.3$, $\omega = 0.5$, $\lambda = 10^4$, $\alpha = 10$ 时,通过求解数学模型,可以得到煤层气井井底压力和产能特征曲线,如图2

所示。

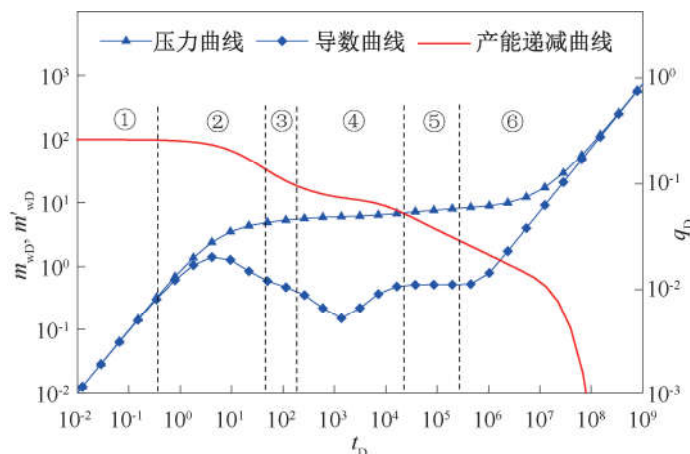


图2 煤层气压力动态与产能曲线

Fig.2 CBM pressure dynamics and capacity

从图2可以看出,煤层气在煤层中流动可划分为六个阶段:

①井筒储集阶段:压力及压力导数曲线沿45°线变化;产能曲线呈水平线,下降缓慢。

②过渡阶段:压力曲线上升,压力导数曲线先上升后下降;产能曲线先缓慢下降,后快速下降。

③割理系统流动阶段:当井筒储集效应强时,就会将割理系统流动阶段的特性部分或全部掩盖;该段产量呈快速递减趋势。

④介质间拟稳定流动阶段:压力变化由原来的上升变为平稳,然后又变为上升。因此这个阶段压力导数曲线下降,然后上升,形成一个“凹子”;产能曲线下降速率减缓,基岩发生解吸和扩散,出现小台阶。

⑤整个系统流动阶段:在其径向流动阶段,压力和压力导数曲线沿着水平直线变化;产能曲线斜率为1/4。该阶段无外来能量补充,产量递减加快。

⑥受封闭边界影响阶段:压力曲线斜率无限接近于1,压力导数曲线是一条斜率为1的直线,即45°线;产能曲线急速下降。

3.1 空间网格划分对计算结果的影响

当参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000$, $d_f = 1.75$, $\theta = 0.3$, $\omega = 0.5$, $\lambda = 10^4$, $\alpha = 10$ 时,在取不同网格数时,通过求解数学模型,可以得到不同空间网格划分下的产能曲线,如图3所示。

从图3可以看出,网格数分别取40、60、80、100时,曲线呈现形态几乎相同。因此可以看出,拉普拉斯变换差分法对不同网格划分具有很好的适应性,具有一定的优势。

3.2 不同分形指数对产能曲线的影响

当参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000$, $d_f = 1.75$, $\omega = 0.5$, λ

$=10^4, \alpha = 10$ 时,在取不同分形指数 θ 时,通过求解数学模型,可以得到不同分形指数下的产能曲线,如图 4 所示。

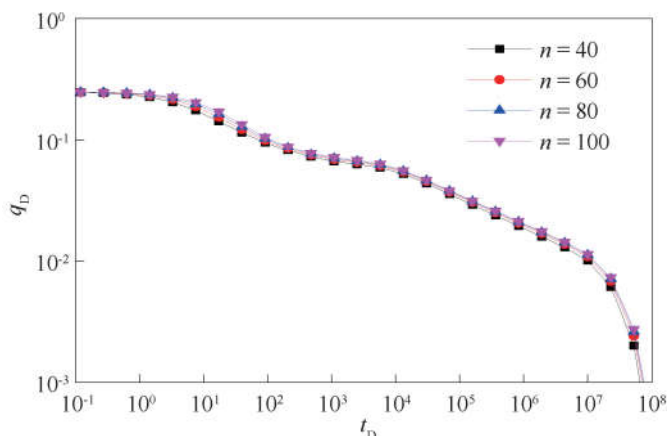


图 3 空间网格划分对计算结果影响

Fig.3 Effect of spatial grid division on calculation results

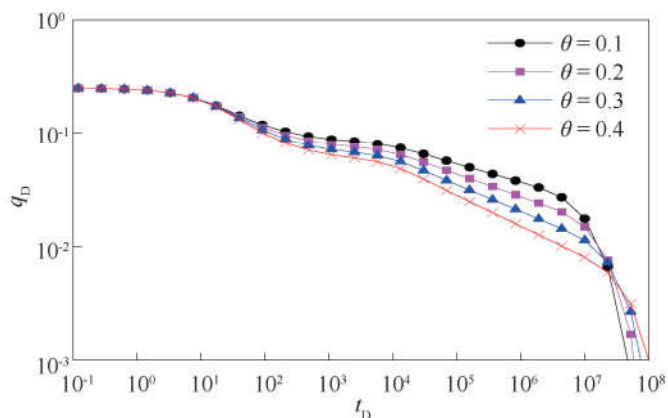


图 4 不同 θ 下产能递减曲线

Fig.4 Production decline at different θ

由图 4 可以看出,分形指数 θ 的影响主要表现在广义径向流阶段,分形指数 θ 刻画了分形网络的连通情况,其值越大,产能曲线下降趋势越明显,这说明裂隙网络越扭曲复杂,连通性越差。

3.3 不同分形维数对产能曲线的影响

当参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000, \theta = 0.3, \omega = 0.5, \lambda = 10^4, \alpha = 10$ 时,在取不同分形维数 d_f 时,通过求解数学模型,可以得到不同分形维数下的产能曲线,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,分形维数 d_f 的影响主要表现在广义径向流阶段, d_f 值越大,产能曲线后期越平缓; d_f 值越小,产能曲线后期则越陡,产量下降越明显。

3.4 不同储能比对产能曲线的影响

当参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000, d_f = 1.75, \theta = 0.3, \lambda = 10^4, \alpha = 10$ 时,在取不同储能比 ω 时,通过求解数

学模型,可以得到不同储能比下的产能曲线,如图 6 所示。

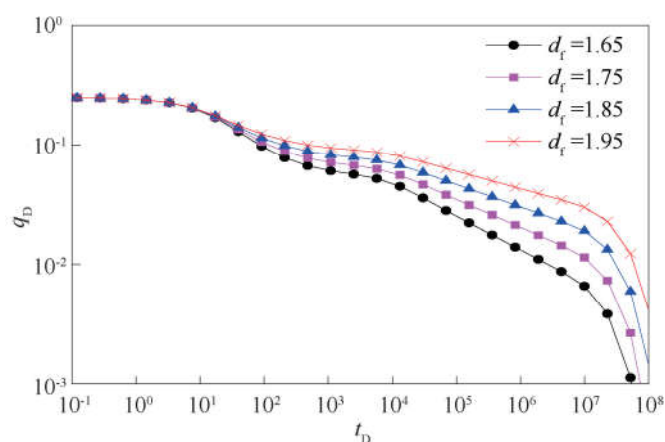


图 5 不同 d_f 下产能曲线

Fig.5 Production decline at different d_f

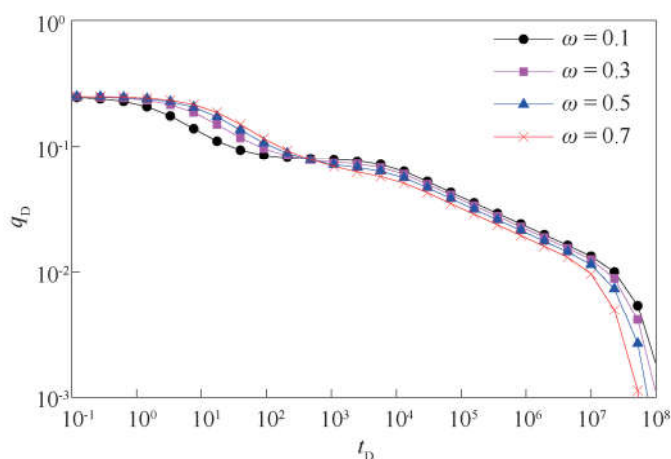


图 6 不同 ω 下产能曲线

Fig.6 Production decline at different ω

从图 6 中可以看出,储能比 ω 对于煤层气早期产能影响较大,且 ω 越大,早期产能越大,快速递减阶段出现的越晚,早期供给能力越强。

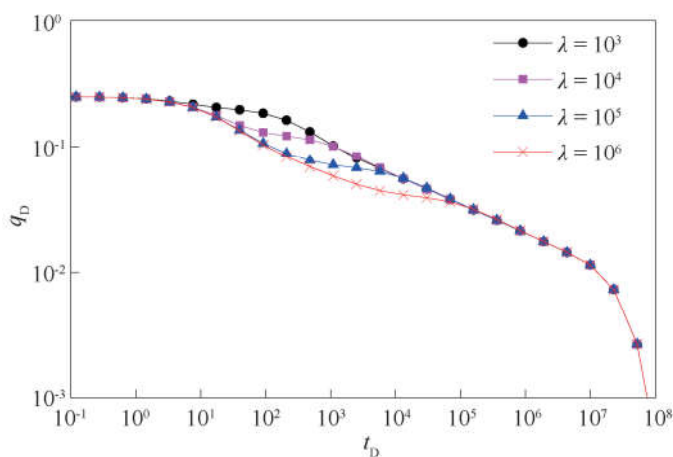
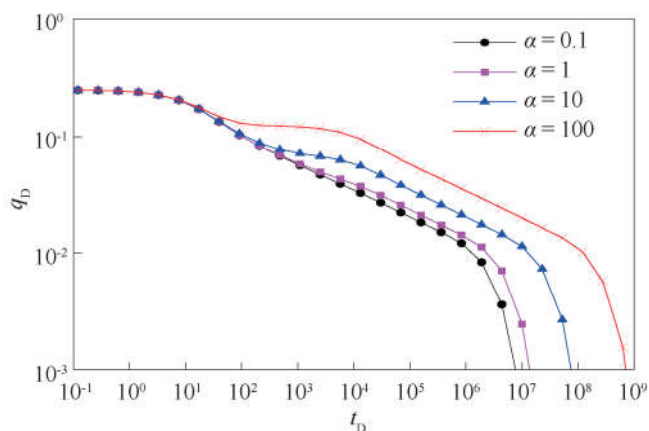
3.5 窜流系数对产能曲线的影响

当参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000, d_f = 1.75, \theta = 0.3, \omega = 0.5, \alpha = 10$ 时,在取不同窜流系数 λ 时,通过求解数学模型,可以得到不同窜流系数下的产能曲线,如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,窜流系数 λ 值主要影响拟稳定流动阶段、影响早期和中期产量。 λ 越小,解吸时间越短,产能补给发生的越早,产能下降出现的越晚。

3.6 吸附因子对产能曲线的影响

当参数取为: $C_D e^{2S} = 1\,000, d_f = 1.75, \theta = 0.3, \omega = 0.5, \lambda = 10^4$ 时,在取不同吸附因子 α 时,通过求解数学模型,可以得到不同吸附因子下的产能曲线,如图 8 所示。

图7 不同 λ 下产能曲线Fig.7 Production decline at different λ 图8 不同 α 下产能曲线Fig.8 Production decline at different α

从图8中可以看出,吸附因子 α 值主要影响煤层气整个生产阶段, α 越大,拟稳定流动阶段出现的越早越明显,供给能力越强,产能越大。

4 结论

(1)通过引入分形维数和分形指数,建立了考虑表皮和井储的分形介质煤层气渗流数学模型,应用混合拉普拉斯变换有限差分法分别求得了封闭边界条件下的拉普拉斯空间解及实空间上的解,并分析了分形维数、分形指数、表皮因子、井筒储集系数、储能比、窜流系数和吸附因子对煤层气产能曲线的影响。

(2)相比于有限差分法,拉普拉斯变换差分法消去时间变量,计算任意时刻压力不依赖其他时刻压力,可以直接计算特定某一时刻压力和产量,而且网格步长划分对拉普拉斯空间差分法影响小,计算误差小。对于有些数值模拟问题无法求取解析解时,采用拉普拉斯变换的差分法是一个可选方法。

(3)分形维数 d_f 和分形指数 θ 主要影响广义径向流直线段, d_f 值越大,则产能曲线下下降趋势越明

显,反之越陡; θ 的影响恰与分形维数相反。

致谢:感谢大庆油田采油二厂领导对本文发表给予的支持和帮助。

参考文献

- [1] 任宜伟,王文升,郝磊,等. 煤层气井试井与动态预测软件的设计与实现[J]. 油气井测试, 2016, 25(2): 28-30.
REN Yiwei, WANG Wensheng, HAO Lei *et al.* Design and implementation of well test and dynamic prediction software for CBM [J]. Well Testing, 2016, 25(2): 28-30.
- [2] 杜承强,陈帅,吴英新. 水平井定向射孔分段压裂在煤层气井中的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(4): 66-69.
DU Chengqiang, CHEN Shuai, WU Yingxin. Application of horizontal well's directional perforation fracturing tech in coal bed gas methane well [J]. Well Testing, 2017, 26(4): 66-69.
- [3] 梁冰,赵明鹏,高战武. 煤层气储集层渗透性的分形理论和实验室研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S): 882-884.
LIANG Bing, ZHAO Mingpeng, GAO Zhanwu. Study of permeability of coal seam by the fractal theory and lab testing [J], Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S): 882-884.
- [4] 傅雪海,秦勇,薛秀谦,等. 煤储层孔、裂隙系统分形研究[J]. 中国矿业大学学报(自然科学版), 2001, 30(3): 225-228.
FU Xuehai, QIN Yong, XUE Xiuqian *et al.* Research on fractals of pore and fracture-structure of coal reservoirs [J]. Journal of China University of Mining & Technology (Natural Science Edition), 2001, 30(3): 225-228.
- [5] 傅雪海,秦勇,张万红,等. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J]. 科学通报, 2005, 50(S1): 51-55.
FU Xuehai, QIN Yong, ZHANG Wanhong *et al.* Classification of coal pore fractal and natural classification based on coal bed gas migration [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S1): 51-55.
- [6] 杨宇,孙晗森,彭小东,等. 煤层气储层孔隙结构分形特征定量研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 31-33.
YANG Yu, SUN Hansen, PENG Xiaodong *et al.* Quantitative study on fractal characteristics of the structure of CBM reservoir [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2013, 20(1): 31-33.
- [7] 赵爱红,廖毅,唐修义. 煤的孔隙结构分形定量研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(4): 439-442.
ZHAO Aihong, LIAO Yi, TANG Xiuyi. Quantitative analysis of pore structure by fractal analysis [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(4): 439-442.
- [8] 秦跃平,傅贵. 煤孔隙分形特性及其吸水性能的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 55-59.
QIN Yueping, FU Gui. Study on fractal characteristic of

- pore in coal and moisture-absorbing property of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 55-59.
- [9] 罗政. 贵州煤层气试井解释基础参数优选[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 68-72.
- LUO Zheng. Optimization of basic parameters for Guizhou coalbed gas well test interpretation [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 68-72.
- [10] SCHWERER F C, PAVONE A M. Effect of pressure-dependent permeability on well test analyses and long-term production of methane from coal seams [C]. SPE 12857, 1984.
- [11] GUO C, XU J, WEI M *et al.* Pressure transient and rate decline analysis for hydraulic fractured vertical wells with finite conductivity in shale gas reservoirs [J]. Journal of Petroleum Exploration & Production Technology, 2015, 5(4): 435-443.
- [12] ERTEKIN T, SUNG W. Pressure transient analysis of coal seams in the presence of multi-mechanistic flow and sorption phenomena [C]. SPE 19102, 1989.
- [13] VELAZQUEZ R C, VASQUEZ-CRUZ M A, CASTREJON-AIVAR R *et al.* Pressure transient and decline curve behaviors in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(2): 95-112.
- [14] ANBARCI K, ERTEKIN T. A comprehensive study of pressure transient analysis with sorption phenomena for single-phase gas flow in coal seams [C]. SPE 20568, 1990.
- [15] 同登科, 刘珊. 变形介质煤层气不稳定渗流问题[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 74-76.
- TONG Dengke, LIU Shan. Unsteady percolation flow of coalbed methane through deformed coal seam [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 74-76.
- [16] CHANG J, YORTSOS Y C. Pressure-transient analysis of fractal reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1990, 5(1): 31-38.
- [17] BEIER R A. Pressure transient model of a vertically fractured well in a fractal reservoir [J]. SPE Formation Evaluation, 1994, 9(2): 122-128.
- [18] ACUNA J A, ERSAGHI I, YORTSOS Y C. Practical application of fractal pressure transient analysis in naturally fractured reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1995, 10(3): 173-179.
- [19] OLAREWAJU J S. Modeling fractured reservoirs with stochastic fractals [C]. SPE 36207, 1996.
- [20] 彭占刚, 高慧梅, 何应付. 变形介质分形煤层气藏不稳定渗流问题[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 28(1): 74-77.
- PENG Zhangang, GAO Huimei, HE Yingfu. Transient flow of fractal coal-bed gas reservoir in deformed medium [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2009, 28(1): 74-77.
- [21] 高慧梅, 何应付, 曹丽丽, 等. 变形介质煤层气压力动态特征分析[J]. 特种油气藏, 2007, 14(1): 66-68.
- GAO Huimei, HE Yingfu, CAO Lili *et al.* Analysis of pressure performance of coal-bed methane through deformable medium [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2007, 14(1): 66-68.
- [22] 张先敏, 同登科. 分形介质煤层气压力动态分析[J]. 油气井测试, 2008, 17(6): 1-4.
- ZHANG Xianmin, TONG Dengke. Analysis for pressure transient of coalbed methane reservoir [J]. Well Testing, 2008, 17(6): 1-4.
- [23] 张先敏, 同登科. 考虑井储和表皮效应的分形介质煤层气压力动态分析[J]. 力学季刊, 2009, 30(4): 602-606.
- ZHANG Xianmin, TONG Dengke. Pressure transient analysis of fractal coalbed methane reservoir with wellbore storage and skin effects [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2009, 30(4): 602-606.
- [24] 张先敏, 冯其红, 同登科, 等. 基于分形理论的煤层气非达西流动分析[J]. 应用力学学报, 2010, 27(4): 635-639.
- ZHANG Xianmin, FENG Qihong, TONG Dengke *et al.* Non-Darcy flow analysis of coalbed methane based on the fractal theory [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(4): 635-639.
- [25] 刘洪, 王新海, 张福祥, 等. 用拉普拉斯变换差分法求解试井分析中的一维渗流问题[J]. 计算物理, 2012, 29(2): 245-249.
- LIU Hong, WANG Xinhai, ZHANG Fuxiang *et al.* Laplace transform finite difference method for well-test problem with one-dimensional seepage flow [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2012, 29(2): 245-249.
- [26] 郑爱维, 李继庆, 卢文涛, 等. 涪陵页岩气田分段压裂水平井非稳态产能评价方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 22-30.
- ZHENG Aiwei, LI Jiqing, LU Wentao *et al.* Unsteady productivity evaluation method of multi-stage fractured horizontal well for shale gas in Fuling shale gas field [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 22-30.
- [27] 于书新, 程晓刚. 水平井多级压裂后分段测试产能评价技术及应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 13-15, 19.
- YU Shuxin, CHENG Xiaogang. Evaluation technology and application of segmented productivity test to horizontal well after multiple layer fracturing [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 13-15, 19.

编辑 王 军

第一作者简介:王磊,男,1990年出生,助理工程师,2016年获得东北石油大学油气田开发工程专业硕士研究生学位,现从事油井生产动态分析方面工作。电话:18646687696; Email:wl1164667919@163.com。地址:黑龙江省大庆市龙凤区第二采油厂第四作业区,邮政编码:163711。