

文章编号:1673-5005(2006)01-0082-04

考虑流动边界影响的气井非达西效应评价

康晓东, 李相方, 程时清

(中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249)

摘要:基于高产气井向井流的流动规律,从描述非达西流动的 Forchheimer 二次方程出发,建立了考虑非达西流动边界影响的产能方程,给出了相应的非达西流动系数与表皮系数的计算方法,从而完善了由稳定试井评价气井非达西流动效应的方法。流动边界对非达西流动系数影响的分析结果表明,当非达西流动半径与井筒半径可比时,忽略该流动边界影响,非达西流动系数明显偏大,会导致高估非达西流动效应。实例计算结果证实了非达西流动边界对非达西流动效应评价有显著影响。

关键词:气井; 流动边界; 非达西效应; 产能; 稳定试井

中图分类号:TE 375

文献标识码:A

Evaluation of non-Darcy flow effect in gas well considering influence of flow boundary

KANG Xiao-dong, LI Xiang-fang, CHENG Shi-qing

(Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: According to the flow law of gas through reservoir with non-Darcy flow around wellbore and Darcy flow far from wellbore of gas well with high production, the deliverability equation was found in consideration of the influence of flow boundary and derived from the Forchheimer formula for non-Darcy flow. The calculation method of non-Darcy flow coefficient and the skin factor was given, and the evaluation method of non-Darcy flow effect based on the steady state well testing was improved. The effects of flow boundary on non-Darcy flow coefficient were analyzed. The result shows that the non-Darcy flow effect is overrated because higher non-Darcy flow coefficient without considering the influence of flow boundary is given when the radius of non-Darcy flow and the radius of wellbore are comparable. The flow boundary of non-Darcy flow has obvious influence on the evaluation of non-Darcy flow effect.

Key words: gas well; flow boundary; non-Darcy flow effect; productivity; steady state well testing

气井中气体向井流过程中,越接近井轴垂直于流动方向的过流断面越小,渗流速度越大。井轴周围的流体高速流动相当于紊流流动,称为非达西流动。高速非达西流动产生附加压降,这会降低气井产能^[1-4]。为了分析非达西流动对气井产能的影响,通常需要进行多次不同产量下的压力恢复试井。笔者基于气井向井流的流动规律,提出考虑流动边界影响气井非达西流动效应的评价方法。

1 问题的提出

通过对稳定试井数据进行回归可确定出气井产

能方程,进而评价非达西流动效应,其评价基础为气井二项式产能方程^[5],表达式为

$$\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2 = Aq_{sc} + Bq_{sc}^2$$

其中

$$A = \frac{1.291 \times 10^{-3} T_{\mu} \bar{Z}}{kh} \left(\ln \frac{0.472 r_e}{r_w} + S \right),$$

$$B = \frac{1.291 \times 10^{-3} T_{\mu} \bar{Z}}{kh} D,$$

$$D = 2.191 \times 10^{-18} \frac{\beta \gamma_g k}{\mu h r_w}$$

式中, $\bar{p}_R$, p_{wf} 分别为地层平均压力和井底流动压力, MPa; q_{sc} 为气井产量(标准状况 $T_{sc} = 293.15$ K,

收稿日期:2005-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90210018)

作者简介:康晓东(1978-),男(汉族),河南禹州人,博士研究生,主要从事油气田开发研究。

万方数据

$p_{sc}=0.101325\text{ MPa}$), $10^4\text{ m}^3/\text{d}$; D 为非达西流动系数; T 为地层温度, K ; $\bar{\mu}$ 为气体平均动力粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; $\bar{Z}$ 为气体平均压缩系数; k 为地层绝对渗透率, $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$; h 为储集层有效厚度, m ; r_e , r_w 分别为地层供给半径和井半径, m ; S 为表皮系数, 无因次; β 为紊流速度系数, m^{-1} ; γ_g 为凝析油的相对密度。

产能方程中对积分边界的处理一般为: $r_w \rightarrow r_e$

时, $p_{wf} \rightarrow p_e$ (p_e 为边界压力), 且忽略 $\frac{1}{r_e}$, 其隐含条件为整个渗流区域均为非达西流动。对于高产气井, 气体在地层中的流动为径向流, 由于过流断面面积由供气边界沿流线方向不断减小, 使得气体流速不断增大, 导致在供气区内的流动为近井区高速非达西流动与远井区线性流动的耦合流动。在一定气井产量条件下 (近井地带非达西流动半径与井径可比时), 忽略非达西流动边界的影响将导致比较大的偏差, 其结果不能准确反映非达西流动效应, 进而影响气井真实产能的评价。

2 考虑流动边界影响的产能方程

通常情况下, 非达西流动只出现在近井地带。因此, 笔者从非达西流动基本方程出发, 基于气体在储层中的分区流动模型, 通过引入雷诺数确定非达西流动边界, 建立考虑非达西流动边界影响的气井产能方程。

2.1 分区流动模型

图1为气体在地层中的流动分区示意图。其中, 区域I为高速非达西流动区 (r_w, r_{nD}), r_{nD} 为非达西流动半径, 该区由于气体过流面积减小和气体膨胀, 气体的流动不再服从达西流动规律; 区域II为达西流动区 (r_{nD}, r_e), 该区气体渗流速度较小, 服从达西流动规律。

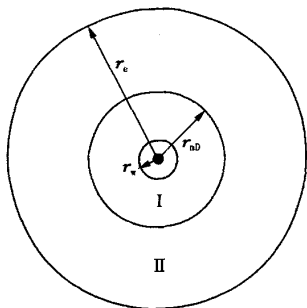


图1 地层中气体流动分区示意图

2.2 非达西流动附加压降

Forchheimer^[6]通过实验拟合出描述非达西流动压降的二次方程, 表达式为

$$-\frac{dp}{dl} = \frac{\mu}{k}u + \beta \rho u^2.$$

式中, u 为渗流速度, m/s ; ρ 为标准状况下气体密度, kg/m^3 ; l 为位移, m 。

对于平面径向流, 上式中的二次项即为非达西流附加压降^[5], 即

$$dp_{nD} = \beta \rho u^2 dr. \quad (1)$$

其中

$$\beta = C/k^\alpha, \quad \rho = \frac{M_{\text{air}} \gamma_g p}{ZRT}, \quad u = \frac{ZT}{p} \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{q_{sc}}{2\pi rh}.$$

式中, C 和 α 为系数, $C = 7.644 \times 10^{10}$, $\alpha = 1.2$; Z 为气体压缩系数。

将各参数带入式(1)得

$$2p dp_{nD} = 2\beta M_{\text{air}} \gamma_g ZT \left(\frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{q_{sc}}{2\pi rh} \right)^2 \frac{1}{r} dr.$$

积分边界为 $r_w \rightarrow r_{nD}$, 对上式积分得

$$\Delta p_{nD}^2 = 2.828 \times 10^{-21} \frac{\beta \gamma_g ZT q_{sc}^2}{h^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{nD}} \right).$$

令

$$\Delta p_{nD}^2 = \frac{1.291 \times 10^{-3} q_{sc} T_{sc} \bar{Z}}{kh} D' q_{sc},$$

则有

$$D' = 2.191 \times 10^{-18} \frac{\beta \gamma_g k}{\mu h} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{nD}} \right).$$

式中, D' 为修正后的非达西流动系数。

2.3 非达西流动边界的确定

许多学者研究发现, 可以用雷诺数来判断流体在地层中的渗流是否服从达西定律。雷诺数 Re 有许多求法, 目前公认比较合理的是苏联学者 $\Phi. H.$ 卡佳霍夫^[7]提出的表达式, 即

$$Re = \frac{1}{1.75 \times 10^{3.5}} \frac{uk^{0.5} \rho}{\mu \varphi^{1.5}}. \quad (2)$$

其中

$$u = \frac{q}{2\pi rh}, \quad q = \frac{p_{sc} ZT}{T_{sc} p} q_{sc}.$$

式中, φ 为孔隙度, 小数; q 为地层条件下流体的体积流量, m^3/s 。

通过实验获得的临界雷诺数 Re_c 为 $0.2 \sim 0.3$ 。 $Re < Re_c$ 时, 流体服从达西渗流规律; $Re > Re_c$ 时, 流体服从非达西渗流规律。取标准状况下 $\rho = 9.8 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ (空气密度), $Re_c = 0.3$, 压力、粘度与偏差因子采用平均值, 则由式(2)得非达西流动边界表达式为

$$\frac{1}{r_{nD}} = \frac{9.738 \times 10^{9.5} \mu h \varphi^{1.5} p}{Z T k^{0.5} q_{sc}}.$$

2.4 产能方程

在拟稳态条件下, 气井的产能方程可以表示为

$$\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2 = \frac{1.291 \times 10^{-3} q_{sc} T \bar{\mu} \bar{Z}}{kh} \left(\ln \frac{0.472 r_e}{r_w} + S_i \right). \quad (3)$$

其中

$$S_i = S + D' q_{sc}.$$

式中, S_i 为总表皮系数。

气井产能方程仍为二项式方程,即

$$\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2 = A' q_{sc} + B' q_{sc}^2. \quad (4)$$

其中

$$A' = \frac{1.291 \times 10^{-3} T \bar{\mu} \bar{Z}}{kh} \times \left(\ln \frac{0.472 r_e}{r_w} + S - \frac{9.738 \times 10^{9.5} \bar{\mu} h \varphi^{1.5} \bar{p}}{\bar{Z} T k^{0.5}} \right),$$

$$B' = \frac{1.291 \times 10^{-3} T \bar{\mu} \bar{Z}}{kh} D',$$

$$D' = D - 8.263 \times 10^{1.5} \frac{\varphi^{1.5} \bar{p}}{\bar{Z} T k^{0.7} q_{sc}}.$$

式(4)即为考虑高速非达西流动边界影响的产能方程,与忽略非达西流动边界影响的产能方程相比,该方程一次项系数多了一项。方程中的系数可以通过稳定试井确定。该方程能更客观地反映气体在储层中的实际流动形态,故能更准确地评价高速非达西效应对气井产能的影响。

考虑流动边界的非达西流动表皮系数 S' 与忽略流动边界影响的非达西流动表皮系数 S 的关系为

$$S' = S - 8.263 \times 10^{1.5} \frac{\varphi^{1.5} \bar{p}}{\bar{Z} T k^{0.7}}.$$

3 非达西流动效应评价

非达西流动效应可以通过计算非达西流动系数 D' 或表皮系数 S' 进行评价。根据建立的产能方程与产能试井数据可以计算出 D' 与 S' 。

3.1 非达西流动系数的计算

根据稳定试井资料可以得到 A' 与 B' , 由 A' 的表达式可以计算渗透率 k , 然后可以计算出非达西流动系数 D 和 D' 。但计算 k 需已知表皮系数 S , 但该值是未知的。通过一次不稳定试井(压力恢复或压力降落)可以求得总表皮系数 S_i , 这样式(3), (4)组成超越方程组, 可以用试凑法求解 D' 。计算步骤为:

(1)先假设一个初始表皮系数 S_i (通常取 $S_i = 0$), 代入 A' 的表达式求得 k , 然后将 k 代入 D 及 D' 表达式, 计算 D' , 最后将 D' 代入总表皮系数 S_i 的表达式, 计算出一个表皮系数 S_j 。

(2)将两个表皮系数和的 $1/2$ (即 $S_i = \frac{S_i + S_j}{2}$)

万方数据

作为初始表皮系数, 进行步骤(1)的循环计算, 当前后两个表皮系数的差值小于允许的误差(如 0.001)时停止运算, 这时得到的 D' 即为所求值。

(3)计算非达西流动表皮系数, $S' = D' q_{sc}$ 。

3.2 流动边界对非达西效应的影响

由 D' 的表达式可以看出, 考虑流动边界影响的非达西流动系数 D' 小于忽略流动边界影响的非达西流动系数 D , 二者的差值与气井产量成反比。当气体在井壁处出现非达西流动时, 由于非达西流动区半径很小, 使得 D' 与 D 差值很大; 随着气井产量的增加, D' 与 D 差值逐渐减小, 当整个供气区均为非达西流动(即产量为无穷大)时, $D' = D$ 。

4 实例应用

以大港油田千米桥碳酸岩气藏板深 8 井完井测试为例, 利用稳定试井资料进行非达西流动效应分析。板深 8 井基本参数: 天然气平均粘度为 0.0356 mPa·s, 平均偏差因子为 1.078 2; 储层绝对温度为 441.02 K, 平均孔隙度为 0.059, 平均地层压力为 40.29 MPa, 有效厚度为 44.4 m; 气井半径为 0.1 m, 供气半径为 300 m。天然气产量为 15.8×10^4 m³/d 时, 总表皮系数为 -0.49。

于 1999 年 9 月 1 日至 9 月 28 日对板深 8 井进行了回压试井, 测试结果见表 1。

表 1 板深 8 井回压试井数据

油嘴直径 d/mm	地层压力 p_i/MPa	流动压力 p_{wf}/MPa	产气量 $q_{sc}/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
5.96	41.00	40.19	11.03
7.14	41.00	39.63	16.18
7.95	41.00	39.15	19.60
9.53	41.00	37.86	26.06

本井次回压试井的二项式产能曲线见图 2。产能方程为

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 0.2365 q_{sc}^2 + 3.1554 q_{sc}, R^2 = 0.9872.$$

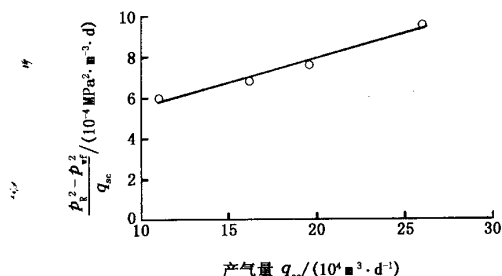


图 2 回压试井二项式产能曲线

非达西效应分析结果见表 2。由表 2 可以看出, 考虑非达西流动边界影响后的有效渗透率和表

皮系数与不考虑时相差比较大,有效渗透率增加 21.07%,而非达西流动表皮系数减小 17.65%。本例中,忽略非达西流动边界影响将过高估计非达西流对产能的影响。

表 2 非达西效应分析结果

分析项目	有效渗透率 $k_e/10^{-3} \mu\text{m}^2$	非达西 流动系数 $D/(10^4 \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	表皮 系数 S	非达西流 动表皮系 数 S'
忽略 r_{mD}	4.75	0.2322	-4.16	3.67
考虑 r_{mD}	5.75	0.1913	-3.51	3.02
相对偏差 $E_R/\%$	21.07	-17.63	-15.62	-17.65

5 结 论

(1)考虑非达西流动边界的气体径向流动规律为近井区高速非达西流动与远井区达西流动的耦合流动。

(2)考虑非达西流动边界影响的非达西流动系数小于忽略流动边界影响的非达西流动系数,其差值与气井产量成反比。计算实例中,考虑非达西流动边界影响的有效渗透率增加了 21.07%,而非达西流动系数减小了 17.63%。

参考文献:

[1] 许少松,陈钦雷.井筒附近地层高速非达西渗流的数值分析[J].石油大学学报:自然科学版,1994,18(5):53-59.
XU Shao-song, CHEN Qin-lei. Numerical simulation of unsteady flow in an infinite composite reservoir with turbulence near the wellbore [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994,

18(5):53-59.
[2] 康晓东,李相方,郝伟.气井非达西流动附加压降计算方法[J].油气井测试,2004,13(5):4-5.
KANG Xiao-dong, LI Xiang-fang, HAO Wei. Pressure drop calculation of non-Darcy flow at high velocity for gas well[J]. Well Testing, 2004, 13(5):4-5.
[3] 张黔川,吕涛,吕劲.气藏水平井非达西流动二项式产能试井公式[J].天然气工业,2004,24(10):83-85.
ZHANG Qian-chuan, LÜ Tao, LÜ Jin. Non-Darcy binomial deliverability testing formula of horizontal gas wells[J]. Nature Gas Industry, 2004, 24(10): 83-85.
[4] 康晓东,覃斌,李相方,等.凝析气藏考虑毛管数和非达西效应的渗流特征[J].石油钻采工艺,2004,26(4):41-45.
KANG Xiao-dong, QIN Bin, LI Xiang-fang, et al. Characteristics of gas condensate flow in porous media considering capillary number and non-Darcy effect[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(4): 41-45.
[5] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000:128-129.
[6] FORCHHEIMER Abbas and KATZ Donald L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media[R]. SPE 6827, 1979.
[7] 喻西崇,赵金洲,郭亚玲,等.深部凝析气井流入动态分析研究[J].石油勘探与开发,2002,29(3):72-73.
YU Xi-chong, ZHAO Jin-zhou, WU Ya-ling, et al. A study on deep condensate gas well inflow performance equation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(3): 72-73.

(编辑 李志芬)

(上接第 81 页)

[2] HARDY H H. Mathematical model of microscopic fluid flow in porous media [J]. Transport in Porous Media, 1990, 4:24-27.
[3] JERAULD G R, SCRIVEN L E, DAVIS H T. Percolation and conduction on the 3D regular networks: a second case study in topological disorder [J]. J Phys Chem, 1984, 17:3429-3439.
[4] 秦积舜,李爱芬,孙仁远.油层物理学[M].东营:石油

大学出版社,2001:178-180.
[5] RANSOHOFF T C, RADKE C J. Laminar flow of a wetting liquid along the corners of a predominantly gas-occupied noncircular pore[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1987, 121(2):392-401.
[6] STINCHCOMBE R B. Conductivity and spin-wave stiffness in disorder system: an exactly soluble model[J]. Journal of Physic (C): Solid State Physics, 1974, 7:179-203.

(编辑 李志芬)