

考虑滑脱效应的低渗低压气藏的气井产能方程^{*}

张烈辉¹ 梁斌² 刘启国¹ 熊钰¹

1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2.中海石油研究中心

张烈辉等.考虑滑脱效应的低渗低压气藏的气井产能方程.天然气工业,2009,29(1):76-78.

摘 要 考虑了气体在低渗低压气藏中的滑脱效应,定义了考虑滑脱效应的滑脱表皮系数($S_{\text{滑脱}}$),建立了形式简洁的气井产能方程。 $S_{\text{滑脱}}$ 介于 $-1\sim 0$ 之间,即滑脱效应可以增加气井产能。在已知其他参数的条件下,只需计算出 $S_{\text{滑脱}}$ 就可以确定出存在滑脱效应的气井产能。由于实际气藏往往会表现出其他非线性渗流特征(如启动压力梯度效应和高速非达西效应),因此实际应用时还需要考虑这些因素。现场实例分析表明:对于存在滑脱效应的低渗气藏气井而言,用该新的产能公式计算出的产能大于用常规产能公式计算出的产能,且与实际产能比较吻合,表明了公式的正确性和适用性。

关键词 低渗透油气藏 产能评价 滑脱效应 表皮系数 方程

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.01.021

0 引言

气体在低压低渗气藏中渗流时,管壁处气体分子速度不为零,渗流曲线为一条上凸型曲线(图1),且气体渗透率与压力倒数成正比,这种现象称为滑脱现象^[1]。滑脱现象导致气体渗流曲线在早期偏离达西线性渗流曲线^[2],使气体的实际渗透率增加,但很少有人研究滑脱现象对低渗低压气藏气井产能的影响。

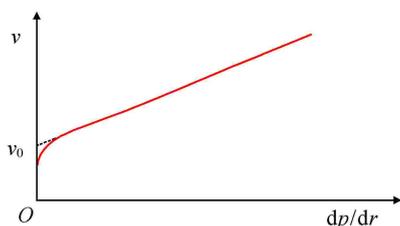


图 1 考虑滑脱效应的渗流曲线图

1 常规产能方程

不考虑地层污染的圆形气藏中心 1 口气井的稳态达西产能方程^[3]为:

$$q_{sc} = \frac{774.6 Kh (\rho_g - \rho_{gr})}{T \ln(r_e / r_w)} \quad (1)$$

2 考虑滑脱效应的产能方程

基于常规稳态产能方程,结合气体的滑脱效应,可以建立考虑滑脱效应的低渗低压气藏气井产能方程。

由图 1 可以写出考虑滑脱效应的气体渗流方程:

$$v = v_0 + \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (2)$$

由式(2)可以得到距井轴任意距离 r 处的地面标态下的气体产量:

$$q_{sc} = \frac{Z_{sc} T_{sc} p}{p_{sc} Z T} q_r = \frac{Z_{sc} T_{sc} p 2\pi r h}{p_{sc} Z T} \left(v_0 + \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dr} \right) \quad (3)$$

将式(3)分离变量并从 $p_{wf} \rightarrow p_e$ 进行积分得到:

$$\frac{\pi Kh Z_{sc} T_{sc}}{q_{sc} p_{sc} T} \int_{p_{wf}}^{p_e} \frac{2p}{\mu Z} dp = \int_{p_w}^{p_e} \frac{dr}{r} - \frac{\int_{r_w}^{r_e} \frac{2\pi h v_0 p}{Z T} dr}{\frac{q_{sc} p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}}} \quad (4)$$

结合实际气体的状态方程^[4],式(4)中最后一项可以表示为:

^{*} 本文受到国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号:2006CB705808)、教育部博士点基金项目(编号:20040615004)、四川省学术和技术带头人培养基金(编号:2200320)项目和高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(TRAPOYT)的联合资助。

作者简介:张烈辉,1967年生,教授,博士生导师,博士;现从事油气藏渗流、油气藏工程及数值模拟等领域的教学和科研工作。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)83032241。E-mail:zlhdyzbr@126.com

$$\int_{r_w}^{r_c} \frac{2\pi h w_0}{ZT} dr = \frac{n_{\text{滑脱}}}{n} \quad (5)$$

$$\frac{q_{\text{sc}} p_{\text{sc}}}{Z_{\text{sc}} T_{\text{sc}}} = \frac{n_{\text{滑脱}}}{n}$$

公式的物理意义是,由滑脱效应增加的气体摩尔数占气井总的气体摩尔数的比值,以反映滑脱效应的强弱。将 $T_{\text{sc}}=293 \text{ K}$ 、 $p_{\text{sc}}=0.101\ 325 \text{ MPa}$ 、 $Z_{\text{sc}}=1$ 代入式(4),结合拟压力^[5]的定义,可以得到考虑滑脱效应的气井产能方程:

$$q_{\text{sc}} = \frac{774.6 \text{ Kh}(\psi - \psi_{\text{fi}})}{T \left(\ln \frac{r_c}{r_w} - \frac{n_{\text{滑脱}}}{n} \right)} \quad (6)$$

与常规产能方程相比,该式分母中多了一项 $\left(-\frac{n_{\text{滑脱}}}{n}\right)$,该值很难定量确定,需考虑用其他方法求出。借鉴表皮系数的定义,可以将 $\left(-\frac{n_{\text{滑脱}}}{n}\right)$ 视为滑脱效应造成的表皮系数。

Klinkenberg 通过实验得到了考虑滑脱效应的气测渗透率^[1]:

$$K_g = K \left(1 + \frac{b}{p} \right) \quad (7)$$

Jones 和 Owens 提出如下滑脱因子相关式^[6]:

$$b = 0.86 \text{ K}^{-0.33} \quad (8)$$

Hawkins 定义的表皮系数^[7]为:

$$S = \left(\frac{K}{K_a} - 1 \right) \ln \frac{r_a}{r_w} \quad (9)$$

结合式(7)~(9),可以得到滑脱表皮系数:

$$S_{\text{滑脱}} \approx -\frac{n_{\text{滑脱}}}{n} = -\frac{b}{p+b} \ln \frac{r_c}{r_w} \quad (10)$$

注意,式(10)中的 $S_{\text{滑脱}}$ 是气体渗流达到稳态时的表皮系数,若为拟稳态渗流,相应的拟稳态时的滑脱表皮系数为:

$$S_{\text{滑脱}} \approx -\frac{n_{\text{滑脱}}}{n} = -\frac{b}{p+b} \ln \frac{0.472 r_c}{r_w} \quad (11)$$

上式表明,由滑脱效应引起的表皮系数为负值,该值介于 $-1 \sim 0$ 之间,即滑脱效应改善了气体的渗流能力,增加了气井产能,但增加幅度不是很显著。

根据式(10),可以得到考虑滑脱效应的气井产能方程:

$$q_{\text{sc}} = \frac{774.6 \text{ Kh}(\psi - \psi_{\text{fi}})}{T \left[\ln \left(\frac{r_c}{r_w} \right) + S_{\text{滑脱}} \right]} = \frac{\bar{p} \pm b \ 774.6 \text{ Kh}(\psi - \psi_{\text{fi}})}{\bar{p} \ T \ln \left(\frac{r_c}{r_w} \right)} \quad (12)$$

与稳态产能方程相比,式(12)多了 $\frac{\bar{p} \pm b}{\bar{p}}$ 项,即滑脱效应使低渗低压气藏气井的产能增大了 $\frac{b}{p}$ 倍。如

果为拟稳态流动,相应的产能方程为:

$$q_{\text{sc}} = \frac{774.6 \text{ Kh}(\psi - \psi_{\text{fi}})}{T \left[\ln \left(\frac{0.472 r_c}{r_w} \right) + S_{\text{滑脱}} \right]} = \frac{\bar{p} \pm b \ 774.6 \text{ Kh}(\psi - \psi_{\text{fi}})}{\bar{p} \ T \ln \left(\frac{0.472 r_c}{r_w} \right)} \quad (13)$$

若为高速非达西流动,不考虑地层污染的产能方程为:

$$q_{\text{sc}} = \frac{774.6 \text{ Kh}(\psi - \psi_{\text{fi}})}{T \left[\ln \left(\frac{r_c}{r_w} \right) + S_{\text{滑脱}} + Dq_{\text{sc}} \right]} \quad (14)$$

相应的拟稳态产能方程为:

$$q_{\text{sc}} = \frac{774.6 \text{ Kh}(\psi - \psi_{\text{fi}})}{T \left[\ln \left(\frac{0.472 r_c}{r_w} \right) + S_{\text{滑脱}} + Dq_{\text{sc}} \right]} \quad (15)$$

3 实例分析

为了检验本方法的有效性,用常规产能方程和本方法对某一存在滑脱效应的气藏气井产能进行了验算。气藏气井基本数据如下:有效厚度为 10 m ,地层温度为 340 K ,地层压力为 20 MPa ,渗透率为 $0.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,井底压力为 16 MPa ,井距为 800 m ,气体相对密度为 0.56 ,井筒半径为 0.1015 m 。地层没有污染,完井方式为裸眼完井,实际产能为 $11\ 700 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

结合式(8)和式(10)计算出 $S_{\text{滑脱}}$ 为 -0.488 ,拟压力差为 $9\ 265 \text{ MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$,最终由式(12)计算出考虑滑脱效应的气井产能约为 $12\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$;而由式(1)计算出不考虑滑脱效应的气井产能约为 $11\ 200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

由此表明,由本方法计算的气井产能比常规产能方程计算的气井产能高出了约 6.7% ,且与实际产能比较吻合,这表明本方法的正确性。但由本方法计算的气井产能与实际气井产能仍有一定的偏差,其原因是没有考虑地层的其他污染和介质变形的影响。因此,在实际运用中,还需综合考虑地层其他污染和介质变形对气井产能的影响^[8]。

4 结论

1)结合气体滑脱效应和克氏渗透率,定义了滑脱效应表皮系数,建立了考虑滑脱效应的形式简洁的气藏气井产能方程。

2)滑脱效应对气井产能有一定影响。为了更准确地确定低渗低压气藏气井产能,还需综合考虑其他因素。

符号说明

b 为滑脱因子; D 为惯性或紊流系数, $(\text{m}^3/\text{d})^2$; h 为有效厚度,m; K 为气藏渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; K_a 为污染区渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; K_g 为克氏渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; n 为气体摩尔数; $n_{\text{滑脱}}$ 为滑脱效应增加的气体摩尔数; p 为气藏压力,MPa; \bar{p} 为平均压力,MPa; p_c 为气藏地层压力,MPa; p_{sc} 为标准大气压力,MPa; p_{wf} 为井底压力,MPa; q_r 为距井筒 r 处地下产气量, $10^4\text{m}^3/\text{d}$; q_{sc} 为标态下产气量, $10^4\text{m}^3/\text{d}$; r 为距井筒的任意半径,m; r_a 为污染区半径,m; r_c 为泄气半径,m; r_w 为井筒半径,m; R 为气体常数, $0.008471\text{MPa}\cdot\text{m}^3/(\text{kmol}\cdot\text{K})$; S 为气藏表皮系数,无因次; $S_{\text{滑脱}}$ 为滑脱表皮系数,无因次; T 为地层温度,K; T_{sc} 为标准大气温度,K; v 为渗流速度,m/s; v_0 为拟初始速度,m/s; V 为气体体积, m^3 ; Z 为气体偏差因子,无因次; Z_{sc} 为标态下的气体偏差因子,无因次; μ 为气体黏度,mPa·s; ψ 为与 p_c 相对应的拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; ψ_{sc} 为与 p_{sc} 相对应的拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 。

参考文献

[1] KINKENBERG L J. The permeability of porous media to

liquids and gases[J]. API Drilling and Production Practice, 1941.

- [2] 李治平. 油气层渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.
- [3] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
- [4] MCCAIN JR W D. The properties of petroleum fluids [M]. Second edition. Tulsa, OK: PennWell Publishing Co, 1990.
- [5] HUSSAIRY R AL, RAMEY JR H J, CRAWFORD P B. The flow of real gases through porous media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1966(5):624-636.
- [6] JONES F O, OWENS W W. A laboratory study of low permeability gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32(9):1631-1640.
- [7] HAWKINS JR M F. A note on the skin effect[J]. Journal of Petroleum Technology, 1956, 8(12):65-66.
- [8] 李龙, 熊钰, 张烈辉, 等. 特低渗气藏非均衡开采动态预测方法的研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(s2):65-67.

(修改回稿日期 2008-11-18 编辑 韩晓渝)