

滑脱效应对气井产能评价的影响

徐兵祥 李相方 尹邦堂

中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室

徐兵祥等.滑脱效应对气井产能评价的影响.天然气工业,2010,30(10):45-48.

摘 要 低渗低压气藏存在滑脱效应,但在气井产能试井及解释过程中一般考虑得较少,可是在某些特低渗低压情况下,滑脱效应的影响却不可忽略。因此,通过引入常规气井产能方程,建立了考虑滑脱效应的稳态和拟稳态气井产能方程,并在此基础上分析了滑脱效应对气井产能曲线的影响,同时给出了考虑滑脱效应时产能试井资料处理的新方法,并以实际产能试井资料为例,研究了滑脱效应对气井产能的影响程度。结果表明:滑脱效应是造成气井产能曲线上升缓慢甚至出现负斜率的一个因素,当滑脱效应影响因子大于0.05时,滑脱效应对气井产能评价引起的误差超过5%。考虑滑脱效应的产能评价新方法的建立,提高了低渗低压气井产能评价的精度,有利于气井合理有效配产,对气藏开发具有积极作用。

关键词 低渗透油气藏 开发 滑脱效应 生产能力 数学模型 曲线 评价

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.10.011

滑脱效应作为影响低渗气藏非达西渗流规律的因素之一,国内外学者已做过大量研究^[1-8],但由于滑脱效应对气藏开发是个有利因素,在气藏开发过程中往往忽略其影响。而在低渗低压气藏产能评价过程中,滑脱效应影响产能曲线形状,甚至会导致产能曲线异常。若不能正确认识这种异常,将它归因于其他因素,会影响产能评价的准确性,从而不能合理预测气井生产动态。笔者通过研究滑脱效应对产能试井及分析的影响,旨在建立考虑滑脱效应的产能评价新方法,提高低渗低压气藏产能评价准确性。

1 考虑滑脱效应气井产能方程的建立

1.1 稳态条件下产能方程

1.1.1 层流状态下产能方程

假设气体的流动满足达西公式,其稳态时产能方程为:

$$q_{sc} = \frac{774.6 K_g h (p_e^2 - p_{wf}^2)}{T \mu \bar{Z} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \quad (1)$$

考虑滑脱效应的影响,即

$$K_g = K_\infty (1 + b/\bar{p})$$

这里 $\bar{p} = (p_e + p_{wf})/2$, K_∞ 可用绝对渗透率(K)代替。

定义滑脱效应影响因子为:

$$\omega = b/\bar{p}$$

考虑滑脱效应的气井稳态产能公式为:

$$q_{sc} = \frac{774.6 K h (p_e^2 - p_{wf}^2) (1 + \omega)}{T \mu \bar{Z} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \quad (2)$$

1.1.2 紊流状态下产能方程

用 Forchheimer 提出的二次方程来描述压力降。

即

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K} + \beta u^2 \quad (3)$$

其中: $\beta = 7.644 \times 10^{10} / K_g^{1.5}$

式(3)中的第二项即高速非达西流动部分的压降,可用符号表示为:

$$dp_{nd} = \beta \omega^2 dr$$

$$\text{将 } p = \frac{M_{air} \gamma_g p}{ZRT}, v = \frac{q}{2\pi rh}, q = B_g q_{sc} = \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \frac{ZT}{p} q_{sc}$$

代入,积分求解并忽略 $1/r_e$ 项,便可得到:

$$\Delta p_{nd}^2 = \frac{1.291 \times 10^{-3} q_{sc} T \mu \bar{Z}}{K_g h} D' q_{sc} \quad (4)$$

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)“低渗透碎屑岩天然气藏有效储层分布与渗流规律”(编号:2007CB209506)。

作者简介:徐兵祥,1985年生,博士研究生;主要从事油气田开发方面的研究工作。地址:(102249)北京市昌平区府学路18号219信箱。电话:(010)89734340。E-mail:xubingxiang8526@163.com

其中:

$$D' = \frac{K_g h}{1.291 \times 10^{-3} \mu Z T} \times 2.828 \times 10^{-21} \frac{\beta' \gamma_g Z T}{r_w h^2} = 2.191 \times 10^{-18} \frac{\beta' \gamma_g K_g}{\mu h r_w} = D \omega^{-0.5}$$

式(4)表示高速非达西流动产生的能耗,即非达西流动部分产生压降的定量表达式。合并到式(3)中可以得到:

$$q_{sc} = \frac{774.6 K h (p_e^2 - p_{wf}^2) (1 + \omega)}{T \mu Z \left[\ln \frac{r_e}{r_w} + S + D (1 + \omega)^{-0.5} q_{sc} \right]} \quad (5)$$

或

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{A}{(1 + \omega)} q_{sc} + \frac{B}{(1 + \omega)^{1.5}} q_{sc}^2 \quad (6)$$

其中: $A = \frac{1.291 \times 10^{-3} T \mu Z}{K h} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)$

$$B = \frac{2.282 \times 10^{-21} \beta' \gamma_g Z T}{r_w h^2}$$

$$\beta' = 7.644 \times 10^{10} / K^{1.5}$$

可以看出,方程式的形式与不考虑滑脱效应是相同的,只是其中涉及渗透率都用气测渗透率(K_g)代替。

1.2 拟稳态条件下产能方程

参照本文参考文献[9]推导拟稳态产能方程式的方法,并结合上述稳态产能方程的建立过程,得到考虑滑脱效应拟稳态产能公式为:

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = \frac{A}{(1 + \omega)} q_{sc} + \frac{B}{(1 + \omega)^{1.5}} q_{sc}^2 \quad (7)$$

其中: $A = \frac{1.291 \times 10^{-3} T \mu Z}{K h} \left(\ln \frac{0.472 r_e}{r_w} + S \right)$

$$B = \frac{2.282 \times 10^{-21} \beta' \gamma_g Z T}{r_w h^2}$$

因为拟稳态时地层平均压力近似等于边界压力,这里取 $\bar{p} = (p_R + p_{wf})/2$ 。

2 滑脱效应对产能试井的影响

由式(7)可知:在考虑滑脱效应情况下,不同工作制度下平均压力(\bar{p})并不相等,所以不同测点的 A_i 、 B_i 并不相等,二项式产能曲线不满足线性关系。其中:

$$A_i = \frac{A}{(1 + \omega)}; B_i = \frac{B}{(1 + \omega)^{1.5}}$$

产能测试工作制度一般从小到大。即

$$q_1 < q_2 < q_3 < q_4$$

井底压力应满足:

$$p_{wf1} > p_{wf2} > p_{wf3} > p_{wf4}$$

由于 $\bar{p} = (p_R + p_{wf})/2$, 则

$$\bar{p}_1 > \bar{p}_2 > \bar{p}_3 > \bar{p}_4$$

$$A_1 > A_2 > A_3 > A_4, B_1 > B_2 > B_3 > B_4$$

在产能曲线上,从 $q_1 \sim q_4$,截距越来越小,斜率越来越小,造成产能曲线上升缓慢甚至负斜率(图1)。

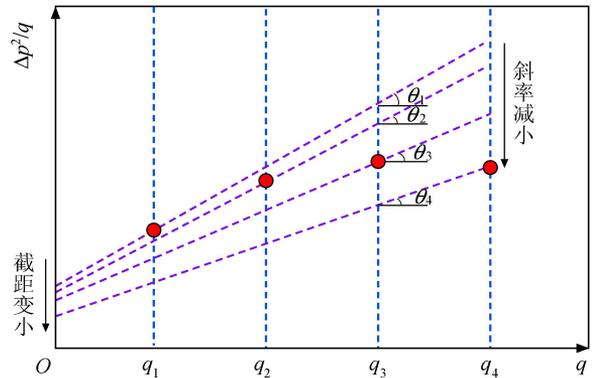


图1 滑脱效应对产能曲线的影响示意图

3 考虑滑脱效应的产能试井资料处理方法

3.1 处理方法一(已知滑脱因子)

由式(7)可得:

$$\frac{p_R^2 - p_{wf}^2}{q_{sc}} (1 + \omega) = A + B q_{sc} (1 + \omega)^{-0.5}$$

令 $y = \frac{p_R^2 - p_{wf}^2}{q_{sc}} (1 + \omega)$, $x = q_{sc} (1 + \omega)^{-0.5}$, 便可

得到:

$$y = A + Bx$$

通过各测试点的井底压力及产量值,求得 y_i 、 x_i ($i = 1, 2, 3, 4$),通过曲线回归,求得 A 、 B 值。

绝对无阻流量为:

$$Q_{AOF} = \frac{\sqrt{A^2 \left(1 + \frac{2b}{p_R}\right) + 4B \left(1 + \frac{2b}{p_R}\right)^{1.5} p_R^2 - A \left(1 + \frac{2b}{p_R}\right)^{0.5}}}{2B}$$

3.2 处理方法二(滑脱因子不能确定)

根据罗瑞兰^[5]实验结果,滑脱因子(b)与渗透率间的关系为:

$$b = 0.0315 K_{\infty}^{-0.6192}$$

渗透率在 0.001~1 mD 时, b 为 0.03~2.27 MPa, 而 \bar{p} 一般为几十兆帕, b/\bar{p} 值很小, 则

$$\left(1 + \frac{b}{p}\right)^{-0.5} \approx 1, \text{ 式(7)可简化为:}$$

$$A q_{sc} + B q_{sc}^2 - \frac{2(p_R^2 - p_{wf}^2)}{p_R - p_{wf}} b = p_R^2 - p_{wf}^2$$

4 个测试工作制度下,满足矛盾方程组:

$$Aq_i + Bq_i^2 - \frac{2(p_{Ri}^2 - p_{wfi}^2)}{p_{Ri} - p_{wfi}}b = p_{Ri}^2 - p_{wfi}^2$$

(i = 1, 2, 3, 4)

采用最小二乘方法,可得 A、B、b 的值,滑脱因子 (b)可通过这种方法反求。故无阻流量为:

$$Q_{AOF} = \frac{\sqrt{A^2 + 4B\left(1 + \frac{2b}{p_R}\right)p_R^2} - A}{2B}$$

4 实例计算及敏感性分析

4.1 实例计算

以实际 2 口气井为例,原始地层压力分别为 28.4 MPa、28.81 MPa,利用罗瑞兰^[5]得到的滑脱因子与渗透率间的关系,求得 2 口井的滑脱因子(表 1),产能试井资料如表 2 所示。

表 1 气井基本参数表

井号	渗透率/mD	滑脱因子/MPa
井 1	0.987	0.032
井 2	1.127	0.029

表 3 气井产能试井结果表

参数类别	产能方程	无阻流量/10 ⁴ m ³
不考虑滑脱	井 1: 20.78 ² - p _{wf} ² = 20.944 8q _{sc} + 0.091 6q _{sc} ²	19.032
考虑滑脱	井 1: 20.78 ² - p _{wf} ² = $\frac{20.977}{(1+\omega)}q_{sc} + \frac{0.0918}{(1+\omega)^{1.5}}q_{sc}^2$	19.061
不考虑滑脱	井 2: 23.85 ² - p _{wf} ² = 33.132q _{sc} + 0.275 8q _{sc} ²	15.236
考虑滑脱	井 2: 23.85 ² - p _{wf} ² = $\frac{33.178}{(1+\omega)}q_{sc} + \frac{0.2764}{(1+\omega)^{1.5}}q_{sc}^2$	15.251

4.2 敏感性分析

根据本文参考文献[1-5]关于滑脱因子实验研究结果,渗透率为 1.0 mD 左右时,滑脱因子在 0.3~0.9 MPa 之间。但气藏开发过程中地层压力一直衰竭,滑脱效应影响因子(ω)值变化可能会很大。

假设井 1、井 2 生产过程中 ω 值不变,研究 ω 为 0.03~0.3 不同值时滑脱效应对产能的影响。图 2、3 为井 1、井 2 在不同 ω 值时 IPR 曲线。图 4 为不同 b 值引起的相对误差。

从图 2、3、4 可看出:井 1、井 2 在 ω=0.05 时,无阻流量分别为 19.92×10⁴ m³、15.94×10⁴ m³,若不考虑滑脱,产生的相对误差分别为 4.5% 和 4.4%;而当 ω=0.1 时,无阻流量分别为 20.79×10⁴ m³、16.59×10⁴ m³,产生的相对误差分别为 9.2% 和 8.9%。若

表 2 产能测试数据表

井号	产量/10 ⁴ m ³	开前压力/MPa	关前压力/MPa
井 1	10	28.40	27.50
	15	28.04	26.35
	20	27.56	25.27
	25	26.95	23.7
	20	26.22	15.23
井 2	5	28.81	27.87
	10	28.61	26.46
	15	28.24	24.60
	20	27.73	21.69
	10	27.03	19.28

利用产能试井资料,求得气井产能方程及无阻流量(表 2)。地层平均压力用的是测试后的目前地层压力,井 1 为 20.78 MPa,井 2 为 23.85 MPa。

由表 3 可知,2 种产能方程所求的无阻流量差别很小(偏差均为 0.1%),这是因为这里很小,因此有必要研究不同 ω 值大小对产能的影响程度。

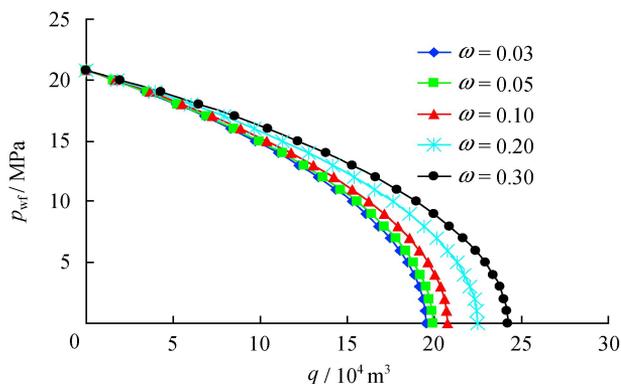


图 2 井 1 不同滑脱影响因子下 IPR 曲线图

以误差 5% 为限,则 ω≤0.05 时滑脱效应影响小,可不考虑;当 ω>0.05 时,需考虑滑脱效应对气井产能的影响。

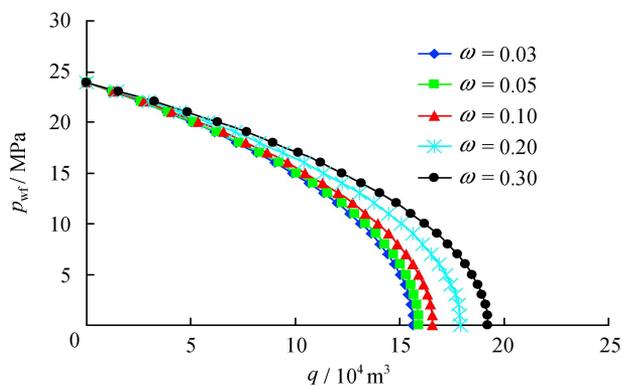


图 3 井 2 不同滑脱影响因子下 IPR 曲线图

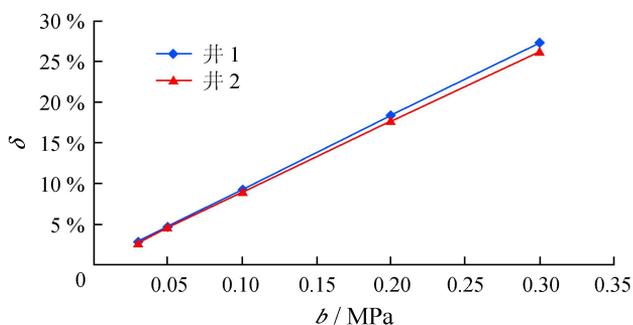


图 4 不同滑脱因子引起的相对误差图

5 结 论

1)考虑滑脱效应的气井产能方程与常规二项式方程形式上是一致的,只是方程中的渗透率用的是气测渗透率,它受滑脱因子和平均压力的影响,实际生产过程中是个变量。

2)滑脱效应造成产能曲线不稳定测点的截距和斜率变小,产能曲线上升缓慢甚至出现负斜率,这在一定程度上可解释产能曲线异常现象。

3)实际低渗气藏产能评价过程中,应首先估算滑脱效应影响因子(ω)值大小,分析滑脱效应对气井产能的影响。研究表明:当 $\omega > 0.05$ 时,不考虑滑脱效应时计算的无阻流量相对误差超过5%。

符 号 说 明

K_g 为气测渗透率, mD; K_w 为克氏渗透率, mD; K 为绝对渗透率, mD; b 为滑脱因子, 取决于气体性质和岩石结构, MPa; ω 为滑脱效应影响因子, 无因次; v 为气体流速, m/s; q_e 为标准状态下的产气量, m^3/d ; μ 为气体黏度, $mPa \cdot s$; Z 为气体偏差系数; $\bar{\mu}$ 为平均地层压力下的气体黏度, $mPa \cdot s$; Z 为平均地层压力下的偏差因子; \bar{p}_R 为流动平均压力, MPa; T 为气层温度, K; h 为气层有效厚度, m; r_w 为井底半径, m; r_e 为距井轴的任意半径, m; p_e 为边界压力, MPa; p_{wf} 为井底流压, MPa; D' 为等效紊流系数, $(m^3/d)^2$; D 为紊流系数, $(m^3/d)^2$; S 为表皮系数, 无因次; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; λ_g 为气体相对密度, 无因次。

参 考 文 献

- [1] JONES F O, OWENS W W . A laboratory study of low-permeability gas sands [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32(9): 1631-1640 .
- [2] SAMPATH K, KEIGHIN C W . Factors affecting gas slippage in tight sandstones of Cretaceous age in the Uinta Basin [J]. Journal of Petroleum Technology, 1982, 34(11): 2715-2720 .
- [3] 吴景春, 袁满, 张继成, 等. 大庆东部低渗透油藏单相流体低速非达西渗流特征 [J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(2): 82-84 .
- [4] 吴英, 程林松, 宁正福. 低渗气藏克林肯贝尔常数和达西系数确定新方法 [J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 78-80 .
- [5] 罗瑞兰, 程松林, 朱华银, 等. 研究低渗气藏气体滑脱效应需注意的问题 [J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 92-94 .
- [6] 张烈辉, 梁斌, 刘启国, 等. 考虑滑脱效应的低渗低压气藏的气井产能方程 [J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 76-78 .
- [7] 薛国庆, 李闽, 罗碧华, 等. 低渗透气藏低速非线性渗流数值模拟研究 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(2): 163-166 .
- [8] 杨凯, 郭肖, 肖喜庆, 等. 修正的低渗透气藏产能方程 [J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 68-70 .
- [9] 李士伦. 天然气工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 117-153 .

(修改回稿日期 2010-08-02 编辑 韩晓渝)