

[引著格式] 宋留清. 煤层气试井模型拟压力处理方法探讨 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (7+8): 49~53.

煤层气试井模型拟压力处理方法探讨

宋留清 (中石油大庆油田有限责任公司呼伦贝尔分公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

[摘要] 气井不稳态试井数学模型一般采用拟压力进行处理求解, 而煤层气采用拟压力处理扩散项时, 将拟压力代替兰氏方程中压力, 这不仅不符合兰氏方程定义, 在数值上也不能得到近似, 由此产生较大误差。通过拟压力兰氏方程计算值与真实吸附数据误差分析得到, 在压力较低时, 即煤层气生产中后期, 随着压力降低, 拟压力兰氏方程引起的误差会越来越大。重新拟合吸附曲线, 建立吸附量与拟压力关系式。结果表明: 运用兰氏方程进行曲线拟合时, 压力越高, 拟合精度越好, 但低压时拟合误差最大能达到 90%; 运用 Weibull 函数进行拟合, 拟合效果好, 误差在 10% 以内。对韩城象山 5 号煤吸附数据进行 Weibull 函数拟合, 相关系数达 0.997, 说明该拟合关系式可用于实际应用。

[关键词] 煤层气; 试井模型; 拟压力; 兰氏方程; Weibull 函数

[中图分类号] TE373 [文献标志码] A [文章编号] 1000-9752 (2015) 07+08-0049-05

煤层气单相气试井数学模型按照其发展阶段分为两大类: 第一类是瞬态解吸模型, 采用修正的综合压缩系数去表征吸附气对割理气体流动的影响, 将煤层气模型简化成常规单相气试井模型进行求解^[1~4]; 第二类是非稳态解吸模型, 尤其是采用拟稳态解吸模型^[5~10], 将煤层气试井模型转化成常规双重介质试井数学模型的形式进行求解。为考虑气体参数随压力变化, 国外学者^[5~7]采用压力平方处理的方法, 推导了煤层气双重介质不稳定试井模型, 但该方法有其局限性: 第一, 该方法应用的前提是气体黏度 μ 与压缩因子 Z 乘积近似等于常数, 应用试井模型时须预先分析压力与 μZ 的关系, 使得问题复杂化; 第二, 该方法在储层压力较高时不适用, 不能应用于所有煤层。国内学者^[8~10]针对上述问题, 借鉴常规气藏试井数学模型, 采用拟压力处理方法, 使得模型适用性更强, 问题也得到了简化, 但是在处理扩散项的时候将拟压力代替兰氏方程中的压力项, 这种代换没有依据, 可能造成较大误差。笔者在分析拟压力代换产生误差的基础上, 提出煤层气扩散方程拟压力处理方法。

1 扩散项处理时存在的问题

建立煤层气双重介质试井模型时, 将割理控制方程与基质解吸扩散方程联立, 运用拟压力对方程进行线性化, 但如何建立吸附量与拟压力的关系呢? 前人^[8~10]给出了吸附量与拟压力关系, 但处理过程中存在问题。

1.1 煤层气试井模型扩散项处理方法

假定煤层中为单相气流动且满足径向流, 则割理中控制方程^[8]为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi C_i p}{3.6 K Z} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p_{sc} T}{3.6 K T_{sc}} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1)$$

式中: p 为压力, MPa; p_{sc} 为标准状况下压力, MPa; K 为渗透率, mD; μ 为气体黏度, mPa·s; Z 为气体偏差因子, 1; T 为气层温度, K; T_{sc} 为标准状况下温度, K; ϕ 为割理孔隙度, 1; C_i 为综合压缩系数, MPa⁻¹; V 为压力 p 时基质吸附气量, m³/t (煤); t 为生产时间, h; r 为径向流半径, m。

[收稿日期] 2015-12-03

[作者简介] 宋留清 (1979-), 男, 硕士, 工程师, 现从事油田开发研究, songlq2000@163.com。

式(1)等号右边第2项为源项,表征从基质进入割理的气体量。由于煤层气从基质到割理的传递遵循扩散定律,采用拟稳态扩散方程^[8,11]表示为:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\tau}(V_E - V) \quad (2)$$

式中: τ 为吸附时间,d; V_E 为平衡时基质与割理面吸附气量, m^3/t 。

煤层气吸附量与压力成正相关关系,满足兰氏方程^[11]:

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

式中: V_L 为兰氏体积,最大吸附量, m^3/t (煤); p_L 为兰氏压力,即达到最大吸附量一半时对应的压力,MPa。

对式(1)可用拟压力方法进行求解,拟压力 m (这里称为标准压力)^[8]定义为:

$$m = \frac{\mu_i Z_i}{p_i} \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (4)$$

式中: p_0 为参考压力,MPa;下标 i 表示初始条件。

联立式(1)、(2),式(1)左边项和右边一项均可转化成拟压力的形式,需将式(1)中的源项和式(2)转化成拟压力形式,根据文献[8~10]的做法,将煤层气吸附方程写成拟压力的形式:

$$V_E = \frac{V_L m}{m_L + m} \quad (5)$$

式中: m_L 为 p_L 对应的拟压力,MPa。

将式(5)代入式(2)中,得到吸附气量与拟压力之间的关系,进而代入连续性方程,可对方程进行求解。但式(5)是否成立,文献中并未讨论。

1.2 问题分析

1.2.1 煤层气吸附量与拟压力有关,但不一定满足原兰氏方程

由式(3)结合兰氏方程的推导过程^[11],气体吸附量与压力 p 、固气分子间力、气体分子质量、吸附解吸比例有关,因气体黏度 μ 、气体偏差系数 Z 为压力函数,可以说吸附量与拟压力函数相关,但并不表示它们之间也满足原兰氏方程。拟压力与压力量纲一致,但拟压力与压力并不成正比关系,不能简单代入原兰氏方程。

1.2.2 拟压力处理时引起气体吸附数据失真

运用实际吸附数据对式(5)进行误差分析。某区块煤层参数为: $V_L = 20\text{m}^3/\text{t}$, $p_L = 2.0\text{MPa}$, $p_i = 2.8\text{MPa}$, $\mu_i = 0.0113\text{mPa} \cdot \text{s}$, $Z_i = 0.94$ 。根据式(3)可计算得到不同压力下对应的实际吸附量。为了判断实际吸附量是否满足式(5),根据式(4)计算拟压力,做出拟压力与实际吸附量的关系图,见图1(a)中离散点。另外,根据式(5)计算得到对应拟压力 $m(p)$ 时的计算吸附量,如图1(a)中实线。可见计算吸附量与实际吸附量存在明显差异,当拟压力小于1MPa(折合压力2MPa)时,计算值小于实际值;当拟压力大于1MPa(折合压力2MPa)时,计算值大于实际值,绝对误差最大约为 $3\text{m}^3/\text{t}$ 。说明式(5)计算得到的吸附量与实际相差较大。

为了进一步说明,对其进行误差分析,相对误差计算结果如图1(b),曲线分3段:

I段,压力0~2MPa,随着压力增大,相对误差越来越小。

II段,压力2~4MPa,随着压力增大,相对误差越来越大。

III段,压力大于4MPa,相对误差基本稳定在20%左右,略有波动,随着压力增大,相对误差有减小的趋势。

该煤储层压力处于I、II段,压力2~2.8MPa时,相对误差平均为10%;压力0~2MPa时,相对误差变化较大,从0变化到90%以上。说明在煤层气生产中后期,随着压力降低,拟压力兰氏方程造成的误差会越来越大,影响气井产能预测及试井。

误差分析案例虽仅是一个特例,但不论从绝对误差还是相对误差来说,运用拟压力兰氏方程会造成吸附解吸数据严重失真,带来不必要的分析错误。

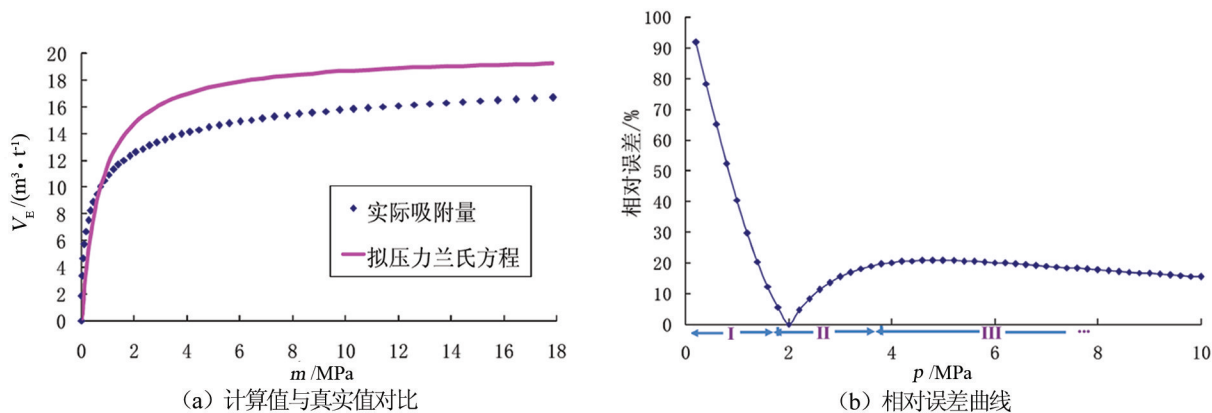


图 1 拟压力兰氏方程误差分析

2 吸附量与拟压力关系模型

尝试重新拟合吸附数据与拟压力关系，减小直接运用式 (5) 带来的误差，对比了 3 种函数拟合结果，并进行讨论。

2.1 兰氏方程拟合

拟压力兰氏方程造成原吸附数据失真，要使用拟压力，同时又要保证吸附数据的真实性，必须重新拟合吸附曲线，得到吸附量与拟压力之间的关系。图 2 (a) 为运用兰氏方程拟合吸附数据结果，拟合关系式为：

$$V_E = \frac{am}{b+m} \tag{6}$$

拟合得到参数： $a = 16.032\text{m}^3/\text{t}$ ， $b = 0.379\text{MPa}$ ，相关系数为 0.944。这里的 a 不再是原兰氏方程中的最大吸附量 V_L ， b 也不是拟压力定义中的 $m_L \left(m_L = \frac{\mu_i Z_i}{p_i} \int_{p_0}^{p_L} \frac{p}{\mu Z} dp \right)$ ，两者都只是拟合关系式中的参数，不具有原来的物理意义。对兰氏方程拟合结果进行误差分析，如图 2 (b) 所示，压力在 2~4MPa 范围内，相对误差平均值为 6%，比未拟合时降低了 4%；而当压力小于 2MPa 时，相对误差仍然变化很大，变化范围为 0~89%，运用该拟合关系预测气井生产后期产能及试井误差大。

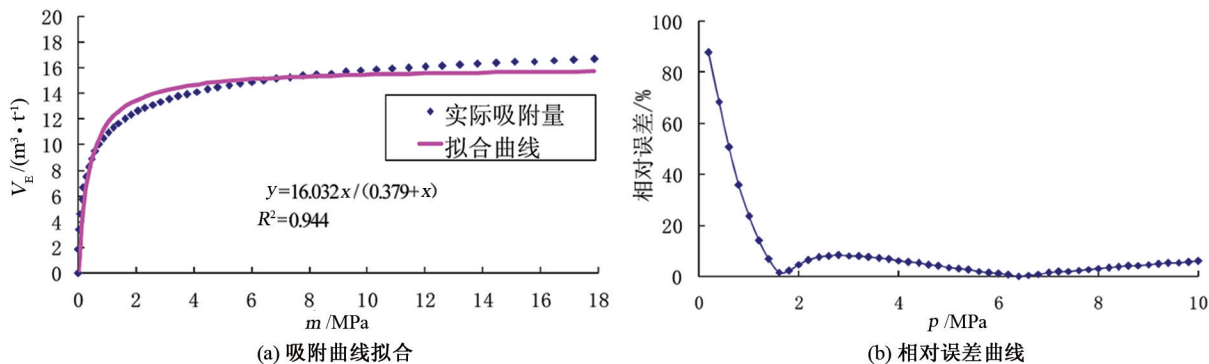


图 2 运用兰氏方程拟合吸附气量与拟压力关系

2.2 对数函数拟合

图3(a)是运用对数曲线拟合的吸附数据结果,拟合关系式为:

$$V_E = a \ln m + b \tag{7}$$

拟合得到参数: $a = 2.0749, b = 10.945$, 相关系数为 0.9909 。图3(b)为相应的误差曲线,当压力大于 2MPa 时,相对误差平均为 2% 左右,压力小于 2MPa 时,相对误差为 10% 左右,特别地,当压力接近地层废弃压力时 (0.3MPa) 时,相对误差 90% 以上,但整体来说,拟合效果较好。

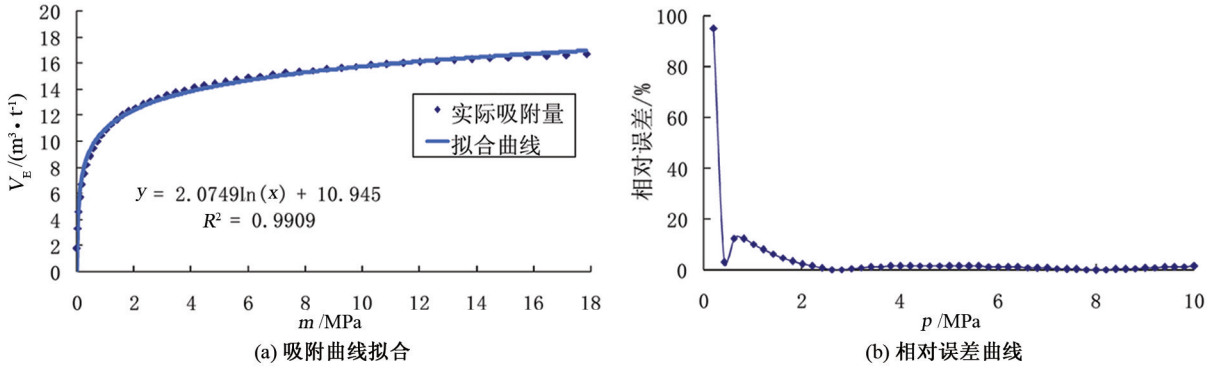


图3 运用对数曲线拟合吸附气量与拟压力关系

2.3 Weibull 函数拟合

图4(a)是运用 Weibull 函数拟合的吸附数据结果,拟合关系式为:

$$V_E = a(1 - e^{-b \cdot m^c}) \tag{8}$$

拟合得到参数: $a = 17.378, b = -0.964, c = 0.398$, 相关系数为 1.000 。图4(b)为相应的误差曲线,当压力大于 1MPa 时,相对误差均在 1% 以下,压力小于 1MPa 时,相对误差不超过 8.5% ,与对数曲线比较,拟合效果更好。

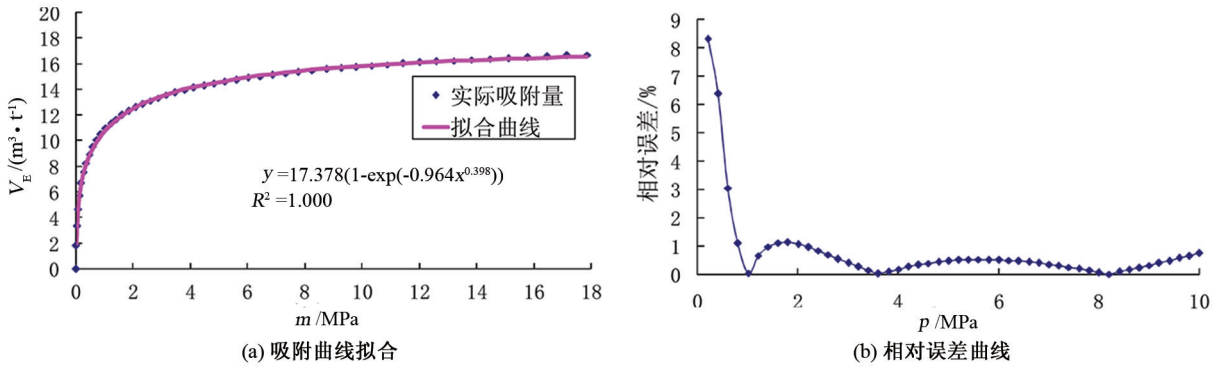


图4 运用 Weibull 函数拟合吸附气量与拟压力关系

2.4 讨论

对比以上3种函数拟合相关系数及误差曲线可以看出,通过兰氏方程拟合吸附量与拟压力关系可以减小吸附量评价误差,对于生产早中期压力较高时,只要保证误差在 10% 以内,可运用兰氏方程拟合;而当生产中后期压力较低时误差较大,不建议应用。Weibull 函数拟合效果最好,对于不同压力范围吸附量误差均最小,应用时不受生产时期限制,推荐应用。

3 实际应用效果验证

选用韩城象山 5 号煤吸附数据^[12], 储层压力为 2.39MPa。计算相应压力下的拟压力, 用 Weibull 函数拟合吸附量与拟压力之间关系, 如图 5 所示, 得到关系式:

$$V_E = 618.371(1 - e^{-0.027 \cdot m^{0.208}}) \quad (10)$$

相关系数为 0.997, 表明 Weibull 函数拟合精度较高, 能够用于实际应用。

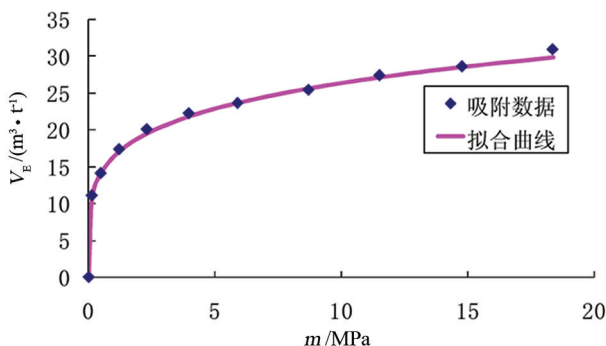


图 5 Weibull 函数拟合韩城象山 5 号煤等温吸附数据结果

4 结论与认识

1) 煤层气扩散方程拟压力处理时, 采用拟压力代替兰氏方程中的压力没有依据, 会引起计算吸附量与真实吸附数据出现偏差。模拟表明: 压力较大 (2MPa 以上) 时, 相对误差为 10%~20%; 压力较小时 (2MPa 以下), 相对误差变化较大, 最大能达到 90% 以上。说明在煤层气生产中后期, 随着压力降低, 拟压力兰氏方程造成的误差会越来越大。

2) 煤层气试井数学模型采用压力处理会使问题复杂化, 且不能适用于所有煤层; 采用拟压力处理适应性更强, 但为了保证吸附数据的真实性, 须拟合吸附量与拟压力之间的关系。通过研究发现: 运用兰氏方程进行曲线拟合时, 压力越高, 拟合精度越好, 但低压时误差较大; 运用 Weibull 函数进行拟合时, 拟合效果最好, 误差 10% 以内, 能够运用于气藏全部生产历史。

[参考文献]

- [1] Kolesar J E. The unsteady-state nature of sorption and diffusion phenomena in the micropore structure of coal [J]. SPE15233, 1986.
- [2] Seidle J P. Long-term gas deliverability of a dewatered coalbed [J]. JPT, 1993, 45 (6): 564~569.
- [3] Spivey J P, Semmelbeck M E. Forecasting long-term gas production of dewatered coal seams and fractured gas shales [J]. SPE29580, 1995.
- [4] Bumb A C, Mckee C R. Gas well testing in the presence of desorption for coalbed methane and Devonian shale [J]. SPE15227, 1986.
- [5] Ertekin T, Sung W. Pressure transient analysis of coal seams in the presence of multi-mechanistic flow and sorption phenomena [J]. SPE19102, 1989.
- [6] Anbarici K, Ertekin T. A comprehensive study of pressure transient analysis with sorption phenomena for single-phase gas flow in coal seams [J]. SPE20568, 1990.
- [7] Anbarici K, Ertekin T. Pressure transient behavior of fractured wells in coalbed reservoirs [J]. SPE24703. 1992.
- [8] 卢德唐, 文延东, 曾亿山, 等. 定产量煤层气井底瞬时压力计算 [J]. 天然气工业, 1998, 18 (3): 47~52, 8.
- [9] 李涛, 何应付, 曹丽丽. 煤层气渗流规律与压力特征分析 [J]. 中国煤层气, 2006, 3 (2): 16~20.
- [10] 栾振辉, 蒋伟. 单相煤层气井底瞬时压力 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2006, 26 (2): 30~32.
- [11] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 96~115.
- [12] 马东民. 煤层气吸附解吸机理研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2008.

[编辑] 黄鹂