

文章编号: 0253-9985(2007)04-0516-04

低渗透煤层气产能影响因素评价

杜志敏, 付玉, 伍勇

(西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要: 采用数值模拟方法, 从煤层气的流动机理入手, 利用 Langmuir 等温吸附方程描述煤层气从煤表面的解吸过程, 用 Fick 定律描述煤层气在煤基质和微孔隙中的扩散, 综合考虑了煤层气的解吸、扩散和渗流 3 个过程, 建立了煤层气储层数学模型, 推导数值模型并进行了模拟计算。计算结果表明: 裂缝半长越长产能越高, 当裂缝半长增加 100 m 后, 裂缝半长对产能的影响较小; 裂缝的导流能力越大产能越高, 当裂缝导流能力超过 $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 后, 产能增加不明显; 分子扩散系数对产能影响较小, 而割理的渗透率对产能影响较大; 对于不同的煤层气井在投产时, 应合理优选压裂缝半长和导流能力。

关键词: 压裂; 数值模拟; 产能; 煤层气

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Evaluation of factors affecting productivity of low-permeability coalbed methane reservoirs

Du Zhimin, Fu Yu, Wu Yong

(State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500)

Abstract Beginning with flow mechanism of coal methane, a mathematical model for coalbed methane reservoirs is established by utilizing the Langmuir isothermal adsorption equation to describe the desorption of methane from coal surface and the Fick's law to delineate the diffusion of methane in coal matrix and micropores. The calculated results of this model show that the productivity steps up with the increase of fracture half length and flow conductivity. However, when the fracture half length is increased to 100m and the fracture flow conductivity is beyond $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$, their effects upon the productivity becomes less evident. Molecular diffusion coefficient has no big influence over the productivity while the permeability of cleaps, on the contrary, is closely connected with productivity changes. A rational selection of fracture half length and flow conductivity is strongly recommended when put a coalbed methane gas well into production.

Key words fracturing; numerical simulation; productivity; coalbed methane

我国煤层气资源丰富, 分布广泛^[1~7]。高效开发煤层气, 有利于缓解我国天然气的供需矛盾、减少煤矿生产安全事故和改善环境^[8]。与常规天然气藏不同, 煤层气的产出过程涉及到解吸和渗流两种机制: 前者遵循 Fick 扩散定律; 后者遵循 Darcy 定律。煤层气的吸附量与压力的关系通常由 Langmuir 等温吸附公式描述。所有这些特点使得描述煤层气渗流的数学模型变得更加

复杂。

由于煤层气含气区大都具有低压、低渗、低饱和的特点^[3], 需压裂投产, 因此合理预测煤层气的产能可避免盲目生产开发、提高经济效益。煤层气数值模拟方法可以描述煤层气的解吸、扩散和气液渗流过程, 并考虑煤层物性及压力工艺等各种因素对煤层气产能的影响, 这对煤层气的开发有一定的指导作用。

收稿日期: 2007-06-08

第一作者简介: 杜志敏 (1953—), 女, 教授, 博士生导师, 油气开发工程和油藏数值模拟

1 煤层气储集及产出特征

1.1 煤层气储集特征

煤层气在煤储层中以溶解态、游离态和吸附态赋存于煤储层的裂隙、基质孔隙和水中。

1) 煤层气溶解态

煤层的裂隙中含水, 在一定压力作用下有少部分煤层气溶解于水中, 其溶解度可用亨利定律描述。在一定温度条件下, 气体在液体中的溶解度与压力成正比。

2) 煤层气游离态

游离态煤层气存在于煤储层的裂隙中。与水混相共存的游离状态煤层气在等温条件下可按真实气体状态方程来描述。

3) 煤层气吸附态

煤层气吸附在煤岩表面上, 煤层气吸附符合 Langmuir 方程:

$$V = \frac{V_L p}{p_L + p} \quad (1)$$

式中: V ——吸附量, $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

V_L ——吸附常数, 也称为 Langmuir 体积, $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

p_L ——吸附常数, 也称为 Langmuir 压力, MPa

p ——煤层气储层压力, MPa

据统计, 目前吸附态煤层气占煤层气总量的 95% 以上。

1.2 煤层气产出特征

1) 基质中的煤层气扩散

由于煤基质块中孔隙的孔径很小, 煤层气在煤基质块孔隙中运移或质量传递的方式主要是扩散作用^[9], 符合 Fick 定律。

根据 Fick 第一扩散定律, 在浓度差的作用下, 煤基质块中煤层气向外扩散量的数学表达式为:

$$q_m = D \sigma V_m [C_m - C(p)] \quad (2)$$

式中: q_m ——从煤基质块中扩散出来的煤层气量, m^3/d

D ——扩散系数, m^2/d

σ ——煤基质块的 Warren 和 Root 形状因子, $1/\text{m}^2$;

表 1 形状因子与煤基质形状的关系

Table 1 Relationship between form factor and shape of coal matrix

形 状	圆 柱 状	球 状	板 状
σ/m^{-2}	$8/a^2$	$15/a^2$	$3/a^2$

注: a 为圆柱、球的半径或板的半宽

V_m ——煤基质块的体积, m^3 ;

C_m ——煤基质岩块的平均煤层气浓度, m^3/m^3 ;

$C(p)$ ——煤基质块与煤中裂隙界面上的煤层气浓度, m^3/m^3 。

式 (2) 中的形状因子 σ ^[10] 与煤基质块的尺寸大小和形状有关, 对于不同几何形态的煤基质块, 其取值如表 1。

2) 裂隙中的煤层气渗流

裂隙内流体的流动符合达西定律:

$$K_f = \frac{Q_f \mu L}{w h \Delta p_f} \quad (3)$$

式中: Q_f ——在压差 Δp 下通过裂隙的流量, m^3/s

w ——裂隙的宽度, m;

h ——裂隙的高度, m;

μ ——流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$

Δp_f ——裂隙中的压力差, MPa

L ——裂隙的长度, m;

K_f ——裂隙的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 煤层气储层数学模型

煤层气的几何模型建立在 Warren-Root 模型^[10]的基础上, 考虑双孔单渗。煤层气储层的数学模型^[11, 12]如下。

气相方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K_{fx} K_{fmg} \rho_g}{\mu_g} \cdot \frac{\partial \Phi_{fg}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K_{fy} K_{fmg} \rho_g}{\mu_g} \cdot \frac{\partial \Phi_{fg}}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K_{fz} K_{fmg} \rho_g}{\mu_g} \cdot \frac{\partial \Phi_{fg}}{\partial z} \right] + q_{m \text{ des}} - q_{fg} = \frac{\partial (\rho_g S_{fg} \Phi_f)}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

水相方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K_{fx} K_{fw} \rho_w}{\mu_w} \cdot \frac{\partial \Phi_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K_{fy} K_{fw} \rho_w}{\mu_w} \cdot \frac{\partial \Phi_w}{\partial y} \right]$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K_{fz} K_{fw} \rho_w}{\mu_w} \cdot \frac{\partial \Phi_{fw}}{\partial z} \right] - q_{fw} = \frac{\partial (\rho_w S_{fw} \Phi_f)}{\partial t} \quad (5)$$

辅助方程:

$$S_{fg} + S_{fw} = 1 \quad (6)$$

$$p_{fcgw}(S_{fw}) = p_{fg} - p_{fw} \quad (7)$$

$$S_{fgc} \leq S_{fg} \leq 1 - S_{fwc} \quad (8)$$

$$S_{fwc} \leq S_{fw} \leq 1 - S_{fgc} \quad (9)$$

式中: K_{fng} ——裂隙中气体的相对渗透率, 无量纲;

K_{fnw} ——裂隙中水的相对渗透率, 无量纲;

K_{fx}, K_{fy}, K_{fz} ——裂隙 x, y, z 方向的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

$\partial x, \partial y, \partial z$ —— x, y, z 方向的网格步长, m;

∂t ——时间步长, d

q_{fg}, q_{fw} ——裂隙内日产气量、日产水量, m^3/d

q_{mdes} ——煤基质中扩散到裂隙内的气量, m^3/d

p_{fcgw} ——裂隙中气、水界面上的毛管压力, MPa

p_{fg}, p_{fw} ——裂隙中的气相压力、水相压力, MPa

S_{fg}, S_{fw} ——裂隙内气、水的饱和度, 小数;

S_{fgc}, S_{fwc} ——残余气、束缚水的饱和度, 小数;

μ_g, μ_w ——气体、水的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$

ρ_g, ρ_w ——气体、水的密度, kg/m^3 ;

Φ_f ——裂隙的孔隙度, 小数;

$\bullet_{fg}, \bullet_{fw}$ ——裂隙中气体、水的势, MPa

式 (4) — (9) 加上边界条件、初始条件, 就构成了完整的煤层气储层数学模型。

3 数值模型的建立及求解

对割理系统的微分方程进行有限差分, 采用隐式格式进行求解。完善一个气、水两相双重介质数值模拟器源代码, 对煤层气井产能进行评价。

对压裂缝所在网格, 在保证裂缝内流量不变的前提下, 适当放大缝宽而相应地调整渗透率。缝宽放大是以不影响地层内部的网格划分和实际计算为原则的。

4 实例计算

取某一实际煤层气数据, 对一口煤层气井的产能进行预测和分析。

模型中输入的参数: 煤层深度 350 m, 煤层厚度 3 m, 原始地层压力 5.24 MPa 临界解吸压力 4.40 MPa 煤岩密度 $1.47 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$, 割理渗透率 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含气量 $19.23 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 扩散系数 $0.002 \text{ m}^2/\text{d}$ 含气饱和度 93%, 井网为正方形, 单井控制半径 150 m, 井底流压取 1 MPa 压裂缝半长为 100 m, 导流能力取 $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$, 压裂缝所在网格为 5 m, 该网格的渗透率为 $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

1) 裂缝半长对产能的影响

图 1、图 2 为裂缝半长对对产能影响图。从图

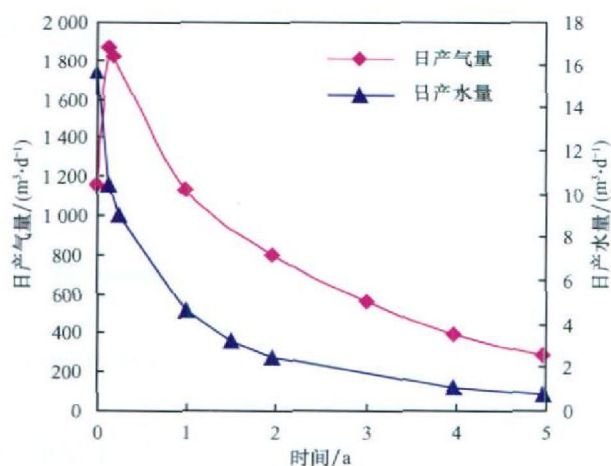


图 1 日产气量和日产水量的变化

Fig. 1 Daily rate of oil/water vs. time

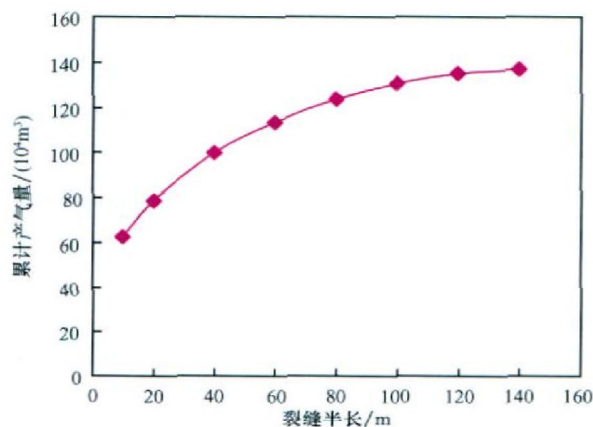


图 2 不同裂缝半长与累计产气量的关系

Fig. 2 Fracture half length vs. cumulative gas production

1中可以看出, 由于煤层中含有大量的水, 所以煤层气井日产气量先升高、后降低, 日产水量逐渐降低; 累计产气量随压裂缝半长的增加逐渐增加, 当裂缝半长在 100 m 时出现拐点, 累计产气量增加变缓。本井的压裂缝半长在 100 m 比较合适, 压裂缝长度进一步增加对产量的贡献较小。

2) 裂缝导流能力对产能的影响

图 3 为裂缝导流能力与累计产气量关系图。由图中可以看出, 随裂缝导流能力的增加, 累计产气量逐渐增加; 当裂缝导流能力达到 $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 时出现拐点, 累计产气量增加变缓。本井的裂缝导流能力在 $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 效果较好, 导流能力继续增加对产量增加影响不大。

3) 扩散系数对产能的影响

图 4 为扩散系数与累计产气量关系图。从图

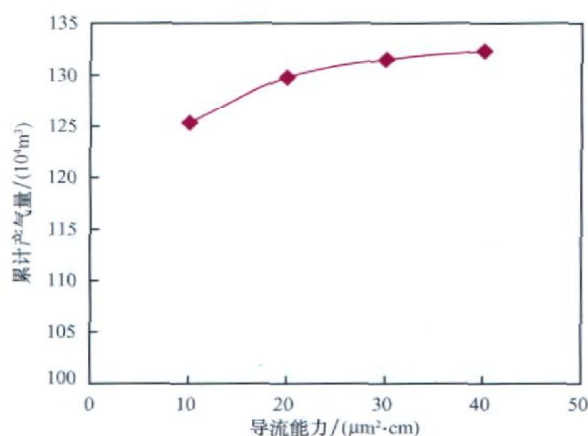


图 3 裂缝导流能力与累计产气量的关系

Fig. 3 Fracture conductivity vs. cumulative gas production

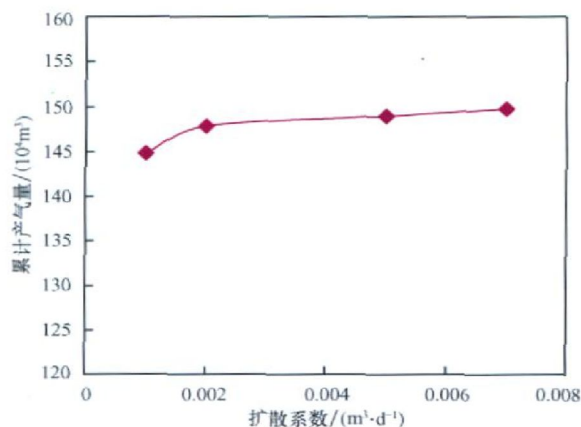


图 4 扩散系数与累计产气量的关系

Fig. 4 Gas diffusion coefficient vs. cumulative gas production

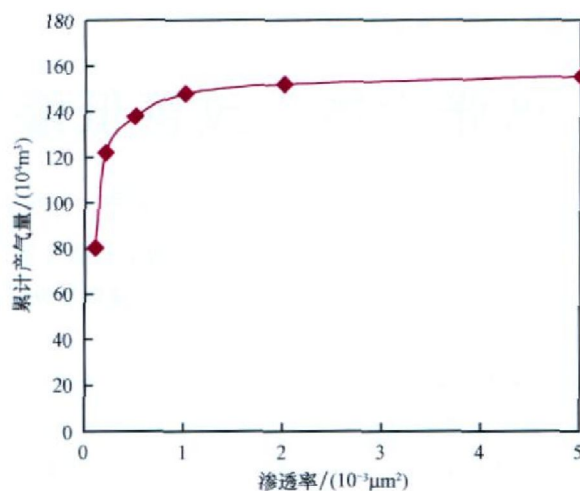


图 5 割理渗透率与累计产气量的关系

Fig. 5 Permeability of cleat vs. cumulative gas production

中可以看出, 随扩散系数的增加, 累计产气量增加; 当扩散系数为 $0.002 \text{ m}^2 / \text{d}$ 时曲线出现拐点, 累计产气量增加变缓; 扩散系数从 $0.001 \sim 0.007 \text{ m}^2 / \text{d}$ 累计产气量增加不到 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 可见扩散系数对产量影响较小。

4) 割理渗透率对产能的影响

图 5 为割理渗透率与累计产气量关系图。从图中可以看出, 割理渗透率增加, 累计产气量增加; 在割理渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时出现拐点, 产量增加变缓; 割理渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 后, 割理渗透率的增加对产量贡献较小。

5 结论

1) 文中建立的模型可以模拟煤层气的解吸、扩散和渗流等产出过程。

2) 裂缝半长不是越长越好。当裂缝半长增加到一定程度后, 裂缝半长对产能的影响较小。文中实例的裂缝半长在 100 m 时较好。

3) 裂缝的导流能力越大, 产能增加越高。文中实例的裂缝导流能力超过 $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 后, 产能增加不明显。因此, 裂缝的导流能力为 $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 就能达到较好的开发效果。

4) 分子扩散系数对煤层气产能影响较小; 割理渗透率对煤层气产能影响较大。

5) 对于不同的煤层气井在投产时, 应合理优选压裂缝半长和导流能力。

(下转第 527 页)

线向上翘起的幅度增大。

3) 压降测试的双对数曲线会出现导数曲线上翘的应力敏感特征, 而压力恢复则可能出现下掉。因此, 压力恢复测试资料的解释需要参考岩心分析结论和地质认识, 才能确定正确的解释模型。

4) 当开、关井过程中压力变化对渗透率的影响是不可逆时, 由于压力恢复阶段储层平均渗透率更低, 而使得压降和压力恢复过程气井井底压力响应曲线差异更大。

参 考 文 献

- 1 付维署, 何顺利, 冉盈志, 等. 多区不等厚横向非均质复合气藏试井分析模型及压力特征 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (1): 124~130
- 2 王安辉, 宇淑颖, 张英魁, 等. 神经网络在低渗透油田试井解释中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25 (3): 338~343
- 3 黄学锋, 杨世刚. 深层低渗凝析气藏试井解释方法及其应用探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25 (3): 333~337, 343
- 4 Ostensen R W. Microcrack permeability in tight gas sandstone [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983, 919~927
- 5 Vairogs J. Effect of rock stress on gas production from low permeability reservoirs [J]. Journal of Petroleum Technology, 1971, 23

(9): 1 171~1 167

- 6 廖新维, 王小强, 高旺来. 塔里木深层气藏渗透率应力敏感性研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (6): 93~94
- 7 Pedrosa O A Jr. Pressure transient response in stress-sensitive formation [R]. Oakland USA: The 1986 SPE California regional meeting (SPE 15115), 1986, 2~4
- 8 Kikani J, Pedrosa O A Jr. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6 (4): 379~386
- 9 同登科, 姜东梅, 陈钦雷. 变形双重介质油藏动态特征 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25 (5): 53~56
- 10 石丽娜, 同登科. 具有井筒储集的变形介质双孔模型压力动态分析 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24 (2): 50~52
- 11 段永刚, 黄诚, 陈伟, 等. 应力敏感裂缝性油藏不稳态压力动态分析 [J]. 西南石油学院学报, 2001, 23 (5): 19~22
- 12 廖新维, 冯积累. 超高压低渗气藏应力敏感试井模型研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (2): 110~112
- 13 宁正福, 廖新维, 高旺来, 等. 应力敏感裂缝性双区复合气藏压力动态特征 [J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28 (2): 34~36
- 14 赵冬梅, 姚军, 王子胜. 压敏三重介质油藏压力响应特征 [J]. 计算物理, 2005, 22 (5): 444~448
- 15 王文环. 应力敏感砂岩地层三区复合凝析气藏不稳定试井模型 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32 (3): 117~119

(编辑 李 军)

(上接第 519 页)

参 考 文 献

- 1 Guo Xia, Du Zhi in. Coalbed methane development in China [R]. Beijing China The WPC 1st Youth Forum (Session 5), 2004
- 2 Guo Xia, Fu Yu, Du Zhi in. Coupled flow simulation in coalbed methane reservoirs [R]. Charleston West Virginia USA: The 2004 SPE Eastern Regional Meeting (SPE 91397), 2004
- 3 孙万禄, 陈召佑, 陈霞, 等. 中国煤层气盆地地质特征与资源前景 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (2): 141~146, 154
- 4 中国煤田地质总局. 中国煤层气资源 [M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1998
- 5 孙万禄, 应文敏, 樊明珠, 等. 我国煤层气储量、资源量级别分类 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18 (4): 305~308
- 6 汤达祯, 秦勇, 胡爱梅. 煤层气地质研究进展与趋势 [J]. 石油

与天然气地质, 2003, 25 (6): 644~647

- 7 张建博, 汪泽成. 中国煤层气勘探开发前景分析 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17 (3): 217~220
- 8 林宗虎. 煤层气——一种亟待开发利用的清洁能源 [J]. 工业锅炉, 2006 (3): 1~5
- 9 Gray I. Reservoir engineering in coal seams (Part 2) — observations of gas movement in coal seams [J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 28~34
- 10 Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs [J]. SPE, 1963, 245~255
- 11 郭肖, 付玉. 一个煤层气储层数值模拟器 [J]. 天然气工业, 2003, 23 (1): 75~77
- 12 付玉. 煤层气储层数值模拟研究 [D]. 四川成都: 西南石油大学, 2004

(编辑 李 军)