

煤层气定向羽状水平井开采数学模型的建立*

郭立波^{1;2} 李治平¹ 王新海²

(1. 中国地质大学(北京)能源学院; 2. 长江大学地球科学学院)

摘要: 通过对煤层气定向羽状水平井开采方式进行分析, 结合煤层气在煤层中的吸附解析及渗流特征, 得到了在孔隙—裂缝双重介质下煤层气和水在煤层中的流动方程, 建立了孔隙度和渗透率随压力变化的压力敏感性数学模型, 为进一步研究煤层气羽状水平井的增产机理提供了数学基础。

关键词: 煤层气; 水平井; 双重介质; 数学模型

1 前言

煤层气开发同常规油气藏开发有着很大的区别, 煤层气主要吸附在煤的内表面, 只有将煤割理与裂隙中的水排出, 使煤层压力降低到解吸压力以下, 甲烷气才能解吸出来^[1]; 另外, 由于我国煤层为低渗透和低吸附气饱和度储层, 因此大多数未经改造的单井日产量都较低。为了提高煤层气井的产量, 需要采取一些增产措施。

定向羽状水平井是指在一个主水平井眼两侧再钻出多个分支井眼作为泄气通道, 分支井筒能够穿越更多的煤层裂缝系统, 最大限度地沟通裂缝通道, 增加泄气面积和地层的渗透率, 从而提高单井产量^[2]。为了降低成本并满足不同需要, 有时在一

个井场朝对称的三或四个方向各布一组水平井眼, 有时还利用上下两套分支井同时开发两层煤层^[3]。用该技术开发煤层气可以大大减少常规钻井井数, 减少占地面积和铺设地面管线费用, 从而综合提高经济效益。

2 数学模型的建立

煤层气无论是采用直井还是羽状水平井开采, 气体在煤层中流动都将遵循相同的规律。从数学的角度出发, 其控制流动的偏微分方程组、初始条件和外边界条件相同, 只是内边界条件即井处理方式不同。

2.1 双重介质下煤层气、水流动方程

煤层视为孔隙—裂缝双重介质, 原始状态裂缝中由水充满并含少量的游离气, 大量气体以吸附形式存在于基质中, 考虑重力, 忽略毛管力^[4]。裂缝中气体满足真实气体状态方程。气体运动速度视为宏观渗流速度与遵从 Fick 定律的气体扩散速度之和, 即

$$\vec{v}_g = - \left(\frac{K_g}{\mu_g} \beta_{gs} \nabla \Phi_g + \frac{D_i}{C_i} \nabla C_i \right) \quad (1)$$

对于裂缝中的水相:

$$\vec{v}_w = - \frac{K_w}{\mu_w} \beta_{ws} \nabla \Phi_w$$

主要有两种类型: 第一类是具有微孔隙和微裂隙的断裂; 第二类是无微孔隙存在的沿晶断裂。

(3) 在煤层气钻井过程中, 钻井液对煤层气储层的伤害主要来源包括煤体对钻井液的吸附或吸收, 以及钻井液中固相颗粒对煤中裂隙通道的充填堵塞。它们通过应力敏感和水锁现象对煤层气储层进行伤害。

(4) 根据煤层气储层特点分析, 适当减小钻井液的密度, 可以降低钻井液滤失量, 减少滤液侵入储层, 从而可有效地保护煤层气储层。

(5) 为了防止钻井过程中发生煤层气储层伤害, 最大限度地保护储层, 应选择合适的钻井工艺技术,

在满足钻井安全的条件下, 尽量选用欠平衡钻井与微过平衡钻井工艺技术措施, 从而提高产能。

参考文献

- [1] 姚艳斌, 刘大猛. 煤储层孔隙系统发育特征与煤层气可采性研究[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(3): 64-68.
- [2] 王明寿, 汤达祯, 魏永佩, 等. 沁水盆地北端煤层气储层特征及富集机制[J]. 石油地质, 2006, 28(5): 440-444.
- [3] 叶建平, 秦勇, 林大扬. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [4] Di Jkao. Investigatmn of Dynamic Mud Cake Formation[M]. The Concept of Minimum Overbat ~ nce Pressure. SPE26323, 1993.

(栏目主持 杨 军)

β_{ls} 为达西定律修正系数, 当 $\left| \frac{\partial \Phi_l}{\partial s} \right| > \lambda$ 时, $\beta_{ls} = 1 - \frac{\lambda}{\left| \frac{\partial \Phi_l}{\partial s} \right|}$; 当 $\left| \frac{\partial \Phi_l}{\partial s} \right| < \lambda$ 时, $\beta_{ls} = 0$ 。其中 λ 为临界压力梯度; l 表示气、水; s 表示 X , Y , Z 方向。

将基质中气体解吸过程视为拟稳态扩散, 即满足 Fick 第一定律

$$\begin{aligned} \frac{dC(t)}{dt} &= D_m F_s [V_E(p_g) - C(t)] \\ &= 1/\tau [V_E(p_g) - C(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $V_E(p_g)$ 为与裂缝中气体压力相平衡的浓

度, 当 $p_g \geq p_d$ 时

$$V_E(p_g) = V_E(p_d) \quad (3)$$

当 $p_g < p_d$ 时, 满足朗缪尔方程

$$V_E(p_g) = V_L \frac{p_g}{p_L + p_g} \quad (4)$$

由基质块流出到裂缝中的流量作为裂缝中气相流动方程的源

$$q_m = -F_G \frac{dC(t)}{dt} \quad (5)$$

由于整个井段均为裸眼完井, 把流入各主支和分支井段的产量作为气、水相流动方程的汇项, 则裂缝中气相流动方程和水相渗流方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi_l S_g \Phi_g}{Z} \right) = \nabla \left[\frac{p_g}{Z} \beta_{gs} \frac{K_g}{\mu_g} \nabla \Phi_g + \frac{D_l}{S_g} \nabla \left(\frac{S_g p_g}{Z} \right) \right] + \frac{RT}{M} q_m - q'_g \frac{p_g}{Z} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi_l S_w}{B_w} \right) = \nabla \left(\frac{K_w}{B_w \mu_w} \beta_{ws} \nabla \Phi_w \right) - \frac{q'_w}{B_w} \quad (7)$$

式中 Φ_g , Φ_w 为气、水两相流动势; q'_g , q'_w 分别为以体积计的单位时间内单位体积地层产出量 (m^3/s)。

$$q'_g = \frac{q_g}{\Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k} \quad q'_w = \frac{q_w}{\Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k} \quad (8)$$

式中 q_g , q_w 为以体积计的单位时间内一个网格体积内地层的产出量 (m^3/s)。

$$\begin{aligned} q_g &= PID \beta_{gs} \frac{k_{rg}(p_g - p_{wf})}{\mu_g} \\ q_w &= PID \beta_{ws} \frac{k_{rw}(p_w - p_{wf})}{\mu_w} \end{aligned}$$

式中 p_{wf} 为各微井段井筒内流压; PID 为井指数。

$$PID = 2\pi \frac{K_e L_p}{\ln \frac{r_b}{r_w} + S}$$

式中 K_e 为各向异性介质等价的各向同性渗透率; L_p 为变换的空间上网格内井段的长度; r_b 为井格块等效半径; r_w 为等效井径, S 为表皮因子。

饱和度方程

$$s_w + s_g = 1 \quad (9)$$

2.2 孔隙度、渗透率压力敏感性模型

在煤层裂缝地层, 煤孔隙的可压缩性比碎屑岩和碳酸盐岩大得多, 因此煤层孔隙度和渗透率有更为显著的压力敏感性^[3]。除了有效应力的影响外, 气体解吸也会引起基质块的收缩, 式 (10) 后一项反映了基质收缩的影响。

$$\begin{aligned} \varphi_l &= \varphi_l [1 + c_p(p - p_i)] - c_m(1 - \varphi_l) \\ &\frac{p_d - p_{sc}}{C(p_b) - C(p_{sc})} [C(p) - C(p_d)] \end{aligned} \quad (10)$$

在一般压力敏感性储层, 渗透率与压力变化近似呈指数关系, 即 $k = k_i e^{-\alpha_{ki}(p_i - p)}$ 。而在煤层, 受

有效应力的影响和气体解吸的影响, 分别导致渗透率降低或增大, 并在压力降低的前期和后期分别占主导地位, 故可近似用式 (11) 表示压差与渗透率的关系。

$$K = \begin{cases} K_i e^{-\alpha_{k1}(p_i - p)} & p \geq p_k \\ K_i e^{-\alpha_{k1}(p_i - p_k)} e^{\alpha_{k2}(p_k - p)} & p < p_k \end{cases} \quad (11)$$

式中 α_{k1} , α_{k2} 为压力敏感系数; p_k 为压力敏感曲线上渗透率最低点所对应的压力, 可由实验测得。

3 结语

通过对煤层气定向羽状水平井开采过程和渗流特征进行分析, 得到了在孔隙—裂缝双重介质下煤层气和水在煤层中的流动方程, 建立了孔隙度和渗透率随压力变化的压力敏感性模型, 为进一步研究煤层气定向羽状水平井的增产机理提供了数学基础。

参考文献

- [1] 崔永君, 李育辉, 张群, 等. 煤吸附甲烷的特征曲线及其在煤层气储集研究中的应用[J]. 科学通报, 2005, 50(S1): 76-81.
- [2] Su Z, Gudmundsson JS. Perforation inflow reduces frictional pressure loss in horizontal well bores[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, 19(3): 223-232.
- [3] 刘想平, 张兆顺, 崔桂香, 等. 鱼骨形多分支井井向流动态关系[J]. 石油学报, 2002, 21(6): 57-60.
- [4] 张冬丽, 王新海. 煤层气单井开采数值模拟研究[J]. 长江大学学报, 2004, 26(1): 76-77.
- [5] 程林松, 兰俊成. 考虑水平井筒压力损失数值模拟方法[J]. 石油学报, 2002, 23(1): 67-71.

(栏目主持 杨 军)