

·油气藏工程·

# 煤层气藏产能动态预测方法及参数敏感性分析

邱先强<sup>1</sup>,任广磊<sup>2</sup>,李治平<sup>1</sup>,卢菊红<sup>1</sup>,刘银山<sup>1</sup>

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.中国石化集团华北石油局勘探开发研究院,河南 郑州 450006)

**摘要:**煤层气体在开发阶段经历了解吸—扩散—渗流的复杂过程,会引起孔隙结构的变化,对产能造成一定影响。因此,研究煤层气藏的物质平衡时,需要考虑自调节效应对孔隙变化的影响。通过建立模型,推导了煤层气藏的物质平衡方程,结合气、水产能方程以及相渗曲线,并且考虑偏差因子随压力的变化,对煤层气藏产能进行动态预测,预测结果通过与实际生产数据历史拟合,验证了模型具有较高的可靠性。通过参数敏感性分析,得出煤层气井生产中后期不同敏感性条件下储层压力与时间成指数对应关系及其对气井生产的影响。综合分析结果表明,自调节效应好、渗透率高、朗氏压力高和煤层厚度大的煤层气藏产能相对较高。

**关键词:**煤层气 物质平衡 自调节效应 动态预测 参数敏感性

**中图分类号:** TE341

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-9063(2012)06-0073-05

煤层气藏与常规天然气藏的地质成因及开采机理显著不同<sup>[1-2]</sup>,其中煤层气的产出经历了解吸—扩散—渗流的复杂过程<sup>[3-6]</sup>。受目前应用的开发技术限制,无法基于已有公式对煤层气井生产动态进行预测<sup>[7]</sup>。吴晓东等<sup>[8-9]</sup>采用数值模拟方法对煤层气井产能进行预测,但由于所需基础参数的数据量非常大,且计算费用高,而上述条件在气藏开发初期难以满足,所以在一定程度上影响了对气井开发动态预测的认识。Gregory率先建立了煤层气物质平衡方程<sup>[10]</sup>,但因假设条件过于理想化,矿场应用效果较差。笔者在考虑自调节效应的基础上,通过建立合理的生产动态预测数学模型,重新推导了煤层气藏物质平衡方程,通过实例分析了不同敏感性对煤层气井生产动态的影响,研究其参数的变化及控制规律,更好地认识和描述煤层气井生产动态,对有效开发煤层气藏具有重要的指导意义。

## 1 物质平衡方程的建立及动态预测

### 1.1 模型假设条件

假设煤层气藏封闭,排采过程中煤层的温度保持不变,储层和流体的物性都是均匀的,原始气藏中含有游离气,其余气体都以吸附态储集在煤基质的内表面(忽略溶解气);气体解吸后立即扩散到裂

缝中,考虑自调节效应下气、水在裂缝中形成了两相流动,煤层气的吸附解吸用朗缪尔等温方程<sup>[11]</sup>表征,其表达式为

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

式中:  $V$  为吸附体积,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $V_L$  为朗氏体积,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $p$  为目前储层压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_L$  为朗氏压力,  $\text{MPa}$ 。

### 1.2 考虑自调节效应时的裂缝孔隙度

煤层气藏在排水降压采气过程中,储层压力不断降低,基质的有效应力逐渐增大,裂缝被压缩或闭合(负效应);当储层压力降到临界解吸压力时,煤层气从基质表面不断解吸出来,基质发生收缩,裂缝被张大(正效应)。裂缝的变化取决于这2种作用的差值,因此,双重作用下的裂缝孔隙度表达式<sup>[9]</sup>为

$$\phi_f = \phi_{fi} - \phi_{fi} C_f (p_i - p) + \varepsilon_{\max} \left( \frac{p_i}{p_i + p_L} - \frac{p}{p + p_L} \right) \quad (2)$$

式中:  $\phi_f$  为目前裂缝孔隙度;  $\phi_{fi}$  为原始裂缝孔隙度;  $C_f$  为裂缝孔隙压缩率,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $p_i$  为原始储层压力,  $\text{MPa}$ ;  $\varepsilon_{\max}$  为无量纲最大体积应变。

### 1.3 物质平衡方程

煤层气体吸附于煤岩表面,随着排水降压解吸,进入裂隙系统产出地面。基于上述排采过程,可建立煤层气物质平衡方程。

收稿日期:2012-10-17。

作者简介:邱先强,男,在读博士研究生,从事油气田开发理论与方法的研究。联系电话:13426137070, E-mail:ren7070@126.com。

基金项目:国家“973”重点基础研究发展规划项目“高丰度煤层气富集机制及提高开采效率基础研究”(2009CB219600),国家科技重大专项“煤层气藏储渗空间特征与渗流机理研究”(2011ZX05038-001-01)。

### 1.3.1 气相物质平衡方程

煤储层中原始游离气体量为

$$G_1 = 0.01Ah\phi_f(1 - S_{wi}) \frac{1}{B_{gi}} \quad (3)$$

其中

$$B_{gi} = \frac{p_{sc} Z_i T}{p_i Z_{sc} T_{sc}} \quad (4)$$

式中:  $G_1$  为原始游离气地质储量,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $A$  为气藏面积,  $\text{km}^2$ ;  $h$  为煤层厚度,  $\text{m}$ ;  $S_{wi}$  为裂隙中原始含水饱和度;  $B_{gi}$  为初始体积系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $p_{sc}$  为标准状态下的压力,  $\text{MPa}$ ;  $Z_i$  为初始气体无量纲偏差因子;  $T$  为储层温度,  $\text{K}$ ;  $Z_{sc}$  为标准状态下的温度,  $\text{K}$ ;  $T_{sc}$  为标准状态下的偏差因子。

煤储层中原始吸附气体量为

$$G_2 = 0.01\rho_B AhV_L \frac{p_i}{p_i + p_L} \quad (5)$$

式中:  $G_2$  为原始吸附气体量,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $\rho_B$  为煤层密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

开采任意时间, 在煤储层平均压力下, 滞留在煤岩裂隙中的游离气体量为

$$G_3 = 0.01Ah\phi_f(1 - \bar{S}_w) \frac{1}{B_g} \quad (6)$$

其中

$$B_g = \frac{p_{sc} Z T}{p Z_{sc} T_{sc}} \quad (7)$$

式中:  $G_3$  为目前游离气体量,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $\bar{S}_w$  为裂隙中平均含水饱和度;  $B_g$  为目前体积系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $Z$  为气体无量纲偏差因子。

开采任意时间, 在煤储层平均压力下, 吸附在煤岩基质中的气体量为

$$G_4 = 0.01\rho_B AhV_L \frac{p}{p + p_L} \quad (8)$$

式中:  $G_4$  为目前吸附气体量,  $10^8 \text{ m}^3$ 。

由式(3)和式(8), 根据物质平衡原理可得任意时刻的储层累积产气量<sup>[9]</sup>为

$$G_p = G_1 + G_2 - G_3 - G_4 = G_2 \frac{p_L p_i - p_L p}{p_L p_i + p p_i} + G_1 - \frac{0.01Ah\phi_f}{B_g} + \frac{0.01Ah\phi_f \bar{S}_w}{B_g} \quad (9)$$

式中:  $G_p$  为累积产气量,  $10^8 \text{ m}^3$ 。

### 1.3.2 水相物质平衡方程

任意时刻储层压力为  $p$  时, 地下水体积等于原始储层压力为  $p_i$  时的地下水体积加上水的弹性膨胀增加的地下水体积减去累积产水量的地下体积, 其表达式为

$$0.01Ah\phi_f \bar{S}_w = 0.01Ah\phi_f S_{wi} + 0.01Ah\phi_f S_{wi} C_w (p_i - p) - W_p B_w \quad (10)$$

式中:  $C_w$  为地层水压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $W_p$  为累积产水量,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $B_w$  为地层水体积系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

将式(2)代入式(10)进行化简, 再与式(10)结合可得

$$G_p + \frac{W_p B_w}{B_g} = G_2 \frac{p_L p_i - p_L p}{p_L p_i + p p_i} + G_1 - \frac{0.01Ah\phi_f}{B_g} + \frac{0.01Ah\phi_f S_{wi} [1 + C_w (p_i - p)]}{B_g} \quad (11)$$

由式(10)可以得出相应的储层压力, 代入式(11)可以求出相应的平均含水饱和度。

### 1.4 煤层气、水产能方程

根据文献[12], 真实气体拟压力的表达式为

$$m(p) = 2 \int_{p_r}^p \frac{p}{\mu_g(p) Z(p)} dp \quad (12)$$

式中:  $m(p)$  为真实气体拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $p_r$  为参考压力,  $\text{MPa}$ ;  $\mu_g$  为地层气体粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

根据文献[13], 真实气体平面径向流动产能计算公式为

$$q_g = \frac{774.6KK_{rg} h [m(\bar{p}) - m(p_{wf})]}{T \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} \right)} \quad (13)$$

式中:  $q_g$  为平面径向流动产能,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $K$  为储层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{rg}$  为气相相对渗透率;  $\bar{p}$  为储层平均压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_{wf}$  为井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $r_e$  为供给半径,  $\text{m}$ ;  $r_w$  为井筒半径,  $\text{m}$ 。

根据文献[14], 水相产能计算公式为

$$q_w = \frac{0.54287KK_{rw} h (\bar{p} - p_{wf})}{B_w \mu_w \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right)} \quad (14)$$

式中:  $q_w$  为地面水相产能,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $K_{rw}$  为水相相对渗透率;  $\mu_w$  为地层水粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

通过式(13)、式(14)即可求得相应的气—水产量。

### 1.5 生产动态预测与可靠性验证

煤层气井生产动态预测主要分为6个步骤: ①假设时间  $t$  间隔内, 累积产气量和累积产水量已知, 对物质平衡方程采用 Newton-Raphson 迭代方法求解储层平均压力; ②利用储层平均压力求解  $t$  时刻的平均含水饱和度; ③利用煤层气相渗曲线求解  $t$

时刻水相和气相的渗透率;④根据煤层气井气相和水相的产能公式,求解 $t$ 时刻的产气量和产水量;⑤在进行下一个 $t$ 间隔时间内,利用上一个 $t$ 时间间隔内的产气量和产水量得到累积的产气量和产水量,对物质平衡方程采用Newton-Raphson迭代方法求解储层平均压力;⑥循环步骤②—⑤,可以实现对煤层气井生产进行动态预测。

根据以上理论,编写相应的计算程序,即可得到煤层气藏开采动态预测评价软件。利用该软件对沁水1井生产数据进行历史拟合,来验证该动态预测模型及软件的正确性。拟合计算结果(图1)显示,计算结果与生产数据具有很好的一致性。通过两者之间的对比,说明该气井开采煤层气动态预测模型较好地反映了煤层气的产出机理,具有较高的可靠性。

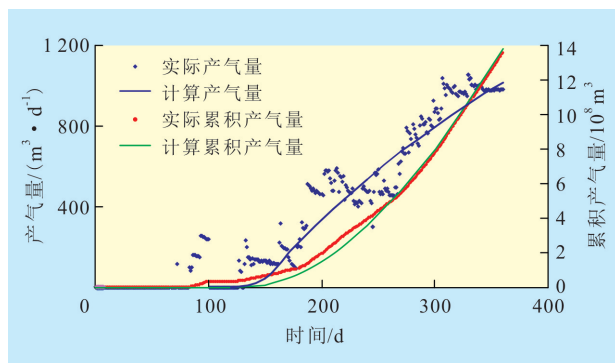


图1 沁水1井煤层气产量历史拟合计算结果与实际生产数据对比

## 2 参数敏感性分析

利用编制的煤层气藏生产动态预测软件讨论各种因素对煤层气井产能的影响。根据研究区现场数据及文献资料确定了一套基准参数,在其他参数不变的基础上选取对煤层气储量、产能影响较大的自调节效应、渗透率、朗氏压力和煤层厚度等参数进行敏感性分析。

### 2.1 自调节效应

#### 2.1.1 压力随时间的变化关系

由图2a可以看出,在不同最大体积应变条件下,开采初期煤层气藏压力下降较快;开采中、后期煤层气藏压力下降缓慢,压力与时间都成较好的指数关系。最大体积应变对煤层气开采初期、中期压力影响明显,其值越大储层压力下降越快;最大体积应变对开发后期影响不明显。

#### 2.1.2 产气量随时间的变化关系

由图2b可看出,煤层气井生产存在3个阶段。

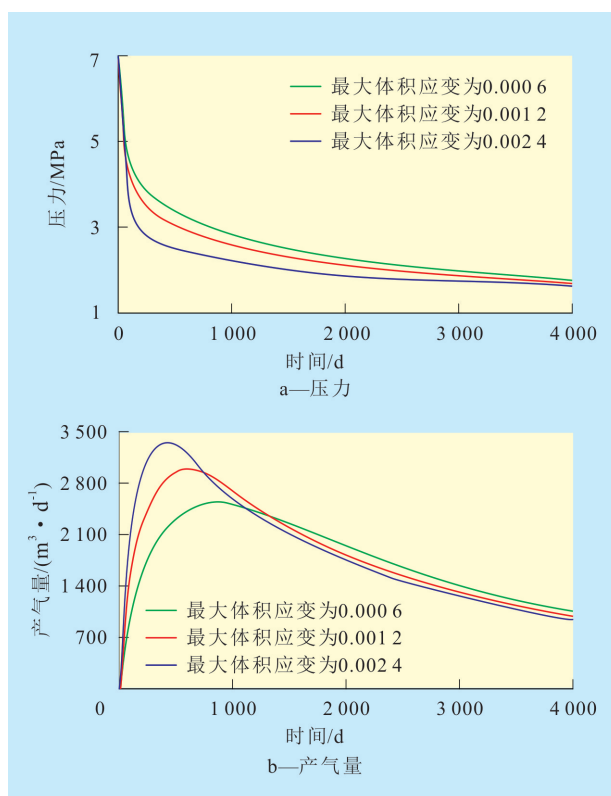


图2 不同最大体积应变条件下平均压力和产气量与时间的关系

**脱水降压阶段** 该阶段气井主要采出裂隙中的游离气和水,导致储层压力下降较快,当到达临界解吸压力吸附气开始逐渐解吸。最大体积应变对气井产量影响明显,其值越大产气量上升越快,同一时刻产气量越大。

**稳定生产阶段** 此阶段产气量较大且相对稳定,是气井生产的主要阶段。当最大体积应变为0.0006时,在890 d达到产气高峰,最大产气量为2538 m<sup>3</sup>/d;当最大体积应变为0.0012时,在610 d达到产气高峰,最大产气量为2968 m<sup>3</sup>/d;当最大体积应变为0.0024时,在375 d达到产气高峰,最大产气量为3358 m<sup>3</sup>/d。最大体积应变越大,产气量越大,越早到达产气高峰,稳产期相对变短。原因是最大体积应变越大表明基质收缩造成孔隙变大,渗透性越好。

**产气量下降阶段** 由于开采初期、中期采出的气量较多,使得后期气源供应不足,因此产气量下降较快,到达一定时间后产气量变为最小,说明气藏生产进入衰竭,应该对气层实施增产措施,来提高产量。

### 2.2 渗透率

#### 2.2.1 压力随时间的变化关系

由图3a可看出,在前300 d,渗透率对储层压力

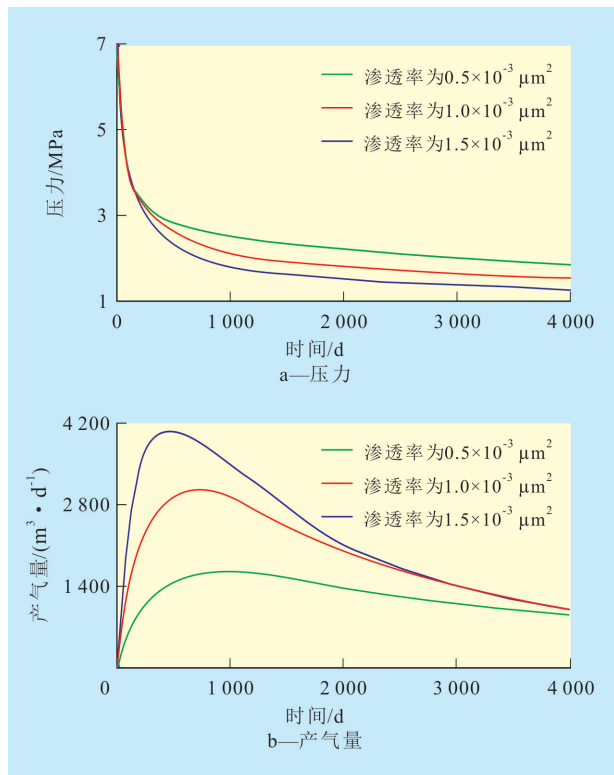


图3 不同渗透率条件下压力和产气量与时间的关系

下降影响不明显;300 d之后,渗透率越大,储层压力在同一时刻下降越多,当把不同渗透率的3条曲线拟合后储层压力与时间呈较好的指数关系。

### 2.2.2 产气量随时间的变化关系

由图3b可以看出,第1阶段渗透率越大,在脱水降压阶段产气量越大,并且上升越快。第2阶段当渗透率为 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,在500 d达到产气高峰,最大产气量为 $4\,061 \text{ m}^3/\text{d}$ ;渗透率为 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,在610 d达到产气高峰,最大产气量为 $2\,968 \text{ m}^3/\text{d}$ ;渗透率为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,在740 d达到产气高峰,最大产气量为 $1\,684 \text{ m}^3/\text{d}$ 。可以看出渗透率越大,到达产气高峰用的时间越短,产气量越大,稳产期越短,渗透率对稳产期影响明显。第3阶段为开发的后期阶段,产气量逐渐下降。由于渗透率越高使得初期和中期产出的气体就越多,这样反而使得后期产气量由于气源供给不足而降低。

## 2.3 朗氏压力

### 2.3.1 压力随时间的变化关系

由图4a可以看出,煤层气井开采初期储层压力下降较快;开采中、后期储层压力下降变缓,当把3条曲线拟合后,储层压力与时间呈较好的指数关系。随着朗氏压力增大,煤层气越容易解吸,且解吸速率变快,煤层中含气饱和度越大,所以水相对渗流能力变弱,水产量变低,导致储层压力增大。

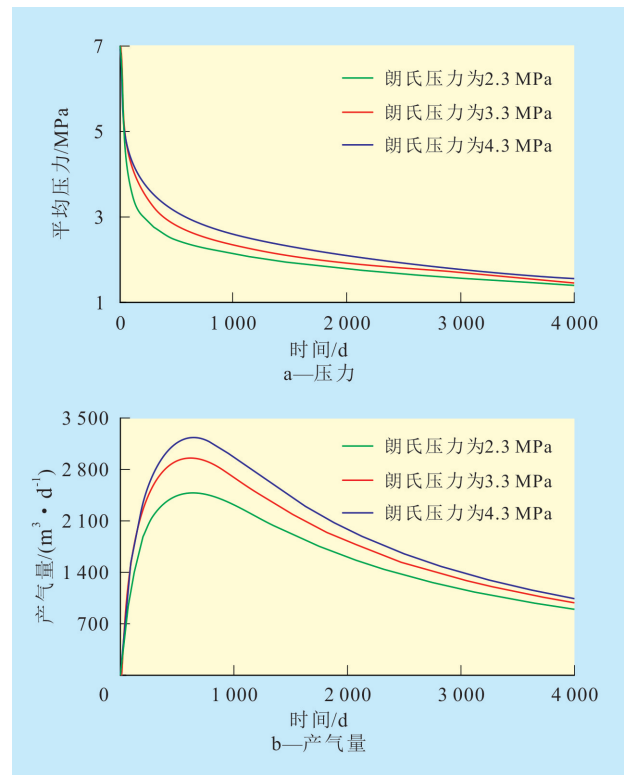


图4 不同朗氏压力条件下压力和产气量与时间的关系

### 2.3.2 产气量随时间的变化关系

由图4b可以看出,第1阶段朗氏压力对产气量影响不明显,原因是此时主要产出裂隙中的游离气和水,只有储层压力下降到临界解吸压力才有吸附气解吸,因此解吸出来的微量煤层气对产气量影响不明显。第2阶段朗氏压力越大,吸附气解吸出来的时间越早,产气量越高。朗氏压力对产气高峰出现的时间影响不大,在610~620 d达到产气高峰,朗氏压力分别为2.3, 3.3和4.3 MPa时对应的最大产气量分别为 $2\,535$ ,  $2\,968$ 和 $3\,250 \text{ m}^3/\text{d}$ 。进入第3阶段,随着煤层气井开采的进行,朗氏压力对产气量的影响越来越小。

## 2.4 煤层厚度

### 2.4.1 压力随时间的变化关系

在整个开采过程中,煤层厚度对气藏压力没有影响。由图5a可以看出,煤层气井开采初期储层压力下降较快;中、后期压力下降变缓慢。

### 2.4.2 产气量随时间的变化关系

煤层越厚,意味着生产潜力越大。煤层厚度增加意味着泄气体积增加,对于平面径向流动的煤层气向井流动,产气量随着厚度的增加应该是线性的。由图5b可以看出,3条曲线有相同的变化规律。随着煤层厚度的增加,生产井的产气量相应增加,在其他参数不变的情况下,增加煤层的厚度,产

气量基本成线性增加关系,产气高峰出现的时间不受厚度的影响,均于第610 d达到产气高峰。煤层厚度为4,6和8 m时对应的最大产气量分别是1 974,2 968和3 962  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

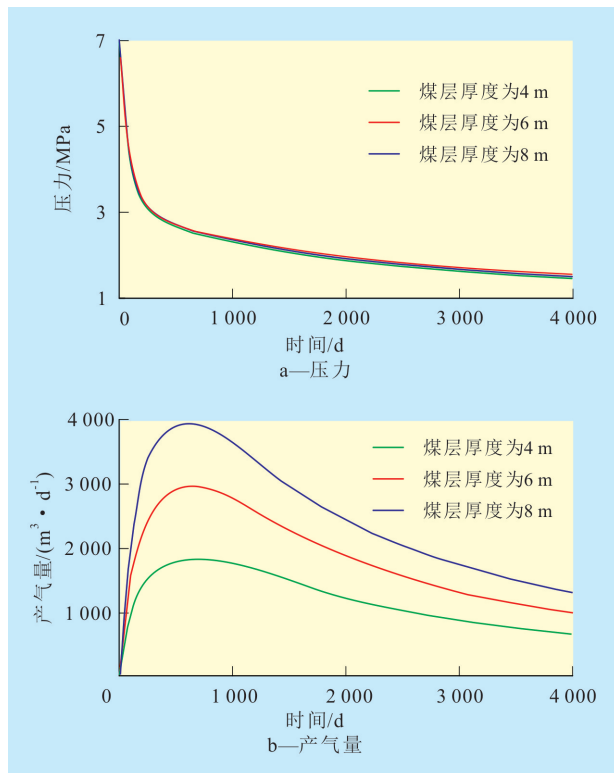


图5 不同煤层厚度压力和产气量与时间的关系

### 3 结论

利用推导的煤成气藏物质平衡方程预测沁水1井的煤层气产量历史拟合结果和生产数据具有较好的一致性,验证了煤层气藏动态预测方法的可靠性。

参数敏感性分析结果表明,开采中、后期,煤层气藏的储层压力与时间呈指数式对应关系;自调节效应和渗透率的差异对煤层气井开采初期和中期影响较大,最大体积应变越大,储层压力下降越快,脱水期越短,越早到达产气高峰,稳产期较短但是产量大,有利于气井的开采;朗氏压力越大,煤层气

越容易解吸,储层压力下降越缓慢。朗氏压力几乎不影响到达产气高峰的时间,但对产气量影响明显;不同的煤层厚度对于整个煤层气开采过程中的压力几乎没有影响,也不影响产气高峰到达的时间,随着煤层厚度的增加,生产井的产气量基本成线性增加关系。

#### 参考文献:

- [1] 任冬梅,张烈辉,陈军,等.煤层气藏与常规天然气藏地质及开采特征比较[J].西南石油学院学报,2001,23(5):29-32.
- [2] 薄冬梅,赵永军,姜林.煤储层渗透性研究方法及其主要影响因素[J].油气地质与采收率,2008,15(1):18-21.
- [3] Khaledm F. Effects of relative permeability history dependence on two-porous media [J].Transport in Porous Media, 2004, 54(1): 181-203.
- [4] 吴晓东,王国强,李安启,等.煤层气井产能预测研究[J].天然气工业,2004,24(8):82-84.
- [5] Ramong B. The physical origin of interfacial coupling in twophase flow through porous media [J].Transport in Porous Media, 2001, 44(1):109-122.
- [6] 张冬丽,王新海.煤层气降压开采机理研究[J].江汉石油学院学报,2004,26(3):124-126.
- [7] 张健,汪志明.物质平衡法在煤层气藏生产动态预测中的应用[J].煤田地质与勘探,2009,37(3):23-26.
- [8] 吴晓东,安永生,席长丰.煤层气羽状水平井数值模拟新方法[J].天然气工业,2007,27(7):76-78.
- [9] 杨新乐,张永利,肖晓春.井间干扰对煤层气渗流规律影响的数值模拟[J].煤田地质与勘探,2009,37(4):26-29.
- [10] 胡素明,李相方.考虑煤自调节效应的煤层气藏物质平衡方程[J].天然气勘探与开发,2010,33(1):38-41.
- [11] 何玮,段永刚,王喜梅,等.煤层气流动物质平衡方程的建立及应用分析[J].承德石油高等专科学校学报,2009,11(4):28-31.
- [12] 谭羽飞,廉乐明,严铭卿.真实气体拟压力的计算[J].煤气与热力,1999,19(2):31-33.
- [13] 李治平.气藏动态分析与预测方法[M].北京:石油工业出版社,2002:20-29.
- [14] 王晓东.渗流力学基础[M].北京:石油工业出版社,2006:39-43.

编辑 裴磊

欢迎广大科技人员踊跃投稿