

·油气采收率·

## 考虑煤层气扩散作用的物质平衡模型

刘银山<sup>1</sup>,王聚团<sup>2</sup>,刘飞<sup>1</sup>,王苛宇<sup>1</sup>,张杨<sup>1</sup>,向瑞<sup>3</sup>

(1.陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西西安 710075; 2.中海石油(中国)深圳分公司,广东深圳 518000;  
3.中国石化中原石油工程有限公司固井公司,河南濮阳 457000)

**摘要:**对煤层气的开发首先通过排水降压使其从基质孔隙中解吸出来,然后在割理中渗流至井筒产出。针对煤层气的开发特点,重点考虑煤层气扩散作用在其开发过程中起到的重要作用,综合煤层割理压缩效应和基质收缩效应的影响,建立基于体积平衡方程的煤层气物质平衡模型的数学方程式,确定煤层压力与时间的关系函数,进而通过编程求解,得到煤层气产量随时间的变化规律,据此进行煤层气开发动态预测。以延长油气区生产井为实例进行计算,结果表明,煤层气扩散作用越强烈,对应的产气量峰值越大且峰值出现的时间越早,煤层气扩散作用对煤层气开发后期产气量的稳定具有很重要的作用。

**关键词:**煤层气扩散作用 物质平衡模型 动态预测 延长油气区

中图分类号:TE312

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)06-0068-06

## A material balance model considering the effect of coal bed methane diffusion

Liu Yinshan<sup>1</sup>, Wang Jutuan<sup>2</sup>, Liu Fei<sup>1</sup>, Wang Keyu<sup>1</sup>, Zhang Yang<sup>1</sup>, Xiang Rui<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710075, China;  
2. Shenzhen Branch, China National Offshore Oil Corporation (China), Shenzhen City, Guangdong Province, 518000, China;  
3. Cementing Company, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Puyang City, Henan Province, 457000, China)

**Abstract:** During the production of coal bed methane (CBM), the CBM first is desorbed from coal matrix after the reservoir pressure is dropped by pumping water, and then seepages into the wellbore from the cleat to be produced. According to the production characters of CBM, especially considering the gas diffusion, the compression effect of coal cleat and the shrinkage effect of matrix during the stage of development, a mathematics expression for a CBM material balance model was established based on CBM volumetric balance equation by which an important relation function between CBM reservoir pressure and time was set up to find the change rules of CBM production over time. The solution was achieved through programming to predict dynamic production of CBM. The calculation was done based on a case study of production wells drilled at Yanchang oil and gas field, and the results obtained show that: diffusion of CBM has a remarkable influence on CBM development, and the stronger the diffusion is, the higher the production peak is and the earlier the peak appears. CBM diffusion has a critical role to help stabilize production at later period.

**Key words:** coal bed methane; gas diffusion; material balance model; dynamic prediction; Yanchang oil and gas field

煤层气是一种资源量巨大的非常规天然气资源,新一轮煤层气资源评价显示埋深小于2 000 m的煤层气地质资源量约为 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,开发潜力巨大<sup>[1-2]</sup>。对其合理开发利用是对中国常规能源的有

效补充,且对杜绝瓦斯事故有着十分重要的意义<sup>[3-6]</sup>。利用物质平衡模型进行煤层气产能预测<sup>[7-10]</sup>,不仅具有理论依据,而且可以将复杂问题简单化。不同于常规气藏,煤层是一种典型的双重介质,由基质

收稿日期:2015-09-21。

作者简介:刘银山(1988—),男,湖北孝感人,工程师,硕士,从事石油开发战略规划及潜力评价研究。联系电话:18829558587, E-mail: linjiangyantiao@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“煤层气排采工艺技术与数值模拟”(2011ZX05034-001)。

系统和割理系统构成,煤层气以吸附态附着于煤基质表面,当通过排水降压使煤层压力降至临界吸附压力点时,煤层气开始从煤基质表面解吸,通过扩散作用进入割理系统,进而渗流产出地面。因而煤层气的扩散作用在煤层气产出过程中具有重要作用,但目前的研究很少考虑到该因素<sup>[11-16]</sup>。为此,笔者基于煤层气的赋存和运移规律,重点考虑煤层气的扩散作用,建立以体积变化为平衡基准的物质平衡模型,并确定该模型的数值解法,开发相应的模拟软件,进而讨论扩散作用对煤层气藏开发的影响。以期更准确地预测煤层气开发的动态变化规律,指导煤层气井建立更有效的生产制度。

## 1 物质平衡模型的建立

建立物质平衡模型的基本假设条件如下:①煤层由基质系统和割理系统组成,且均匀分布,流体在煤层中也均匀分布。②基质系统中仅含有吸附气和游离气,水分子因为煤基质的孔隙太小而无法进入;煤割理系统则含有水和游离气,不考虑吸附气和溶解气。③煤层供气面积稳定,煤层有效厚度不随生产时间而发生变化。④煤层没有边底水。⑤煤层和水微可压缩,且煤层气为真实气体,煤层的含水饱和度与含气饱和度之和为1。⑥煤层存在天然割理裂缝,为煤层气渗流的主要通道;煤层气从基质扩散到割理裂缝服从Fick第一定律,⑦煤层温度保持不变。

当煤层处于静态条件下时,其孔隙体积内被煤层气和地层水充填;当煤层处于动态条件下时,由物质平衡原理可知,当气井的生产时间为 $\Delta t$ ,煤层孔隙体积变化量应等于煤层游离气体积变化量与地层水体积变化量之和,其表达式为

$$\Delta V_p = \Delta V_g + \Delta V_w \quad (1)$$

### 1.1 煤层孔隙体积变化量的求取

煤层孔隙体积会随着煤层气运移产出而发生变化,引起变化的原因分别为煤层割理压缩效应和基质收缩效应。煤层孔隙体积变化量可以表示为

$$\Delta V_p = -Ah\phi(p_i)C_i\Delta p + AhV_{ps\max}\left(\frac{p_i}{p_i + p_L} - \frac{p_{i+1}}{p_{i+1} + p_L}\right) \quad (2)$$

### 1.2 煤层游离气体积变化量的求取

$t$ 和 $t+1$ 生产时刻煤层游离气体积分别表示为

$$V_g(p_i) = Ah\phi(p_i)[1 - S_w(p_i)] \quad (3)$$

$$V_g(p_{t+1}) = B_g(p_{t+1})\left[\frac{V_g(p_t)}{B_g(p_t)} + \Delta V_{gc} + \Delta V_{gr} + q_{mf} - \Delta G_p\right] \quad (4)$$

当煤层压力降低时,会导致煤层气发生膨胀。因煤层压力降低导致游离气膨胀体积的表达式为

$$\Delta V_{gc} = \frac{Ah\phi(p_i)[1 - S_w(p_i)]C_g\Delta p}{B_g(p_{t+1})} \quad (5)$$

由假设条件②可知,煤层逸出气体积 $\Delta V_{gr}$ 为0。

$\Delta t$ 生产时间内煤层采至地面的游离气体积为

$$\Delta G_p = q_g\Delta t \quad (6)$$

由于煤层游离气体积变化量为 $t$ 与 $t+1$ 生产时刻游离气体积的差值,则煤层游离气体积变化量可表示为

$$\begin{aligned} \Delta V_g &= V_g(p_t) - V_g(p_{t+1}) = \\ & Ah\phi(p_i)[1 - S_w(p_i)]\left[1 - \frac{B_g(p_{t+1})}{B_g(p_t)} - C_g\Delta p\right] - \\ & B_g(p_{t+1})(q_{mf} - q_g\Delta t) \end{aligned} \quad (7)$$

### 1.3 煤层地层水体积变化量的求取

与煤层游离气体积变化量的求取方法类似, $t$ 和 $t+1$ 生产时刻煤层的的地层水体积可以分别表示为

$$V_w(p_i) = Ah\phi(p_i)S_w(p_i) \quad (8)$$

$$V_w(p_{t+1}) =$$

$$B_w(p_{t+1})\left[\frac{V_w(p_t)}{B_w(p_t)} + \Delta V_{wc} + \Delta V_{wr} + \Delta V_{e} - \Delta V_p\right] \quad (9)$$

其中,当煤层压力降低 $\Delta p$ 时,由于溶解气逸出导致地层水体积发生变化,根据假设条件②可知,煤层中溶解气逸出导致的地层水体积变化量为0;根据假设条件④可知,煤层压力降低 $\Delta p$ 时导致地层水侵入体积也为0;而在 $\Delta t$ 生产时间内从煤层采至地面的地层水体积可以表示为

$$\Delta V_p = q_w\Delta t \quad (10)$$

由于煤层地层水体积变化量可以表示为 $t$ 与 $t+1$ 生产时刻煤层地层水体积的差值,则可以得到煤层地层水体积变化量的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta V_w &= V_w(p_t) - V_w(p_{t+1}) = \\ & Ah\phi(p_i)S_w(p_i)\left[1 - \frac{B_w(p_{t+1})}{B_w(p_t)} - C_w\Delta p\right] + B_w(p_{t+1})q_w\Delta t \end{aligned} \quad (11)$$

### 1.4 物质平衡方程的建立

将式(2)、式(7)和式(11)代入式(1)整理可得

$$\Delta t = \frac{A(\Delta p)}{B(\Delta p)} \quad (12)$$

$$A(\Delta p) = \Delta V_p + B_g(p_{t+1})q_{mf} - Ah\phi(p_t) \left\{ 1 - [1 - S_w(p_t)] \frac{B_g(p_{t+1})}{B_g(p_t)} - S_w(p_t) \frac{B_w(p_{t+1})}{B_w(p_t)} - [C_g + (C_w - C_g)S_w(p_t)] \Delta p \right\} \quad (13)$$

其中

$$B(\Delta p) = B_g(p_{t+1})q_g + B_w(p_{t+1})q_w \quad (14)$$

由于孔隙度、体积系数和含水饱和度等参数均与煤层压力有关,因此可以写成  $\Delta p$  的函数,即式(12)也可以表示为

$$\Delta t = f(\Delta p) \quad (15)$$

## 2 物质平衡模型的求解

由于所建煤层气物质平衡模型是随生产时间

$$S_w(p_{t+1}) = 1 - \frac{Ah\phi(p_t)[1 - S_w(p_{t+1})] \left[ \frac{B_g(p_{t+1})}{B_g(p_t)} + C_g \Delta p \right] + B_g(p_{t+1})(q_{mf} - q_g \Delta t)}{Ah\phi(p_{t+1})} \quad (18)$$

### 2.1.2 相对渗透率和孔隙度

相对渗透率可以根据气—水相对渗透率曲线读取,而相对渗透率曲线可以通过煤岩心实验获取。确定相对渗透率的关键在于首先确定含水饱和度,然后通过插值等数值方法确定不同含水饱和度下的相对渗透率。

煤层的孔隙度有多种不同形式的求解方程<sup>[17]</sup>。依据所推导的煤层孔隙体积变化量,可以将  $t+1$  生产时刻的煤层孔隙度表示为  $t$  生产时刻的煤层孔隙度与  $\Delta t$  生产时间内煤层孔隙体积变化量之间的差值,即

$$\phi(p_{t+1}) = \phi(p_t) + \left[ -\phi(p_t)C_t \Delta p + V_{ps \max} \left( \frac{p_{t+1}}{p_{t+1} + p_L} - \frac{p_t}{p_t + p_L} \right) \right] \quad (19)$$

### 2.1.3 煤层气扩散量

煤层气在煤层中的赋存状态、煤基质的成分组成以及孔隙结构特征等决定了煤层气必须通过扩散作用才能运移产出。煤层气在基质孔隙中解吸,会使基质与割理之间的游离气存在体积浓度差,煤层气从高体积浓度区向低体积浓度区扩散,使体积浓度达到平衡。因此,扩散作用在煤层气的产出过程中起着重要的衔接作用<sup>[18-19]</sup>。

根据 Fick 第一定律来描述煤层气的扩散作用,即单位生产时间内经过单位面积的气体扩散量与体积浓度梯度成正比,煤层气的扩散速率可以表示为

$$\frac{dq_{mf}}{dt} = -DS \frac{dc}{dL} \quad (20)$$

变化的动态平衡模型且较复杂,因此须分步求解。

### 2.1 模型参数求解

#### 2.1.1 含水饱和度

已知  $t$  生产时刻的煤层含水饱和度,求取  $t+1$  生产时刻的煤层含水饱和度。由假设条件⑤可知

$$S_w(p_{t+1}) = 1 - S_g(p_{t+1}) \quad (16)$$

由于

$$S_g(p_{t+1}) = \frac{V_g(p_{t+1})}{Ah\phi(p_{t+1})} \quad (17)$$

可得到  $t+1$  生产时刻煤层含水饱和度计算式为

由式(20)可知,煤层气在煤层中的扩散速率主要取决于扩散系数和体积浓度梯度。当煤层气从煤基质解吸的体积浓度与煤基质孔隙中的体积浓度之间的差值越大,或者基质与割理之间的体积浓度差值越大,相应的扩散速率和扩散量就越大。

在  $\Delta t$  生产时间内对式(20)积分,则煤基质在  $\Delta t$  生产时间内压力降低  $\Delta p$  导致的煤层气扩散量为

$$q_{mf} = DS \frac{c_{t+1} - c_t}{L} \Delta t \quad (21)$$

假设从  $t$  至  $t+1$  生产时刻煤层压力从  $p_t$  降至  $p_{t+1}$ ,根据 Langmuir 等温吸附模型,结合真实气体状态方程,可以得到  $t$  和  $t+1$  生产时刻煤层气体积浓度分别为

$$c_t = \frac{V_L p_t}{p_L + p_t} \quad (22)$$

$$c_{t+1} = \frac{V_L p_{t+1}}{p_L + p_{t+1}} \quad (23)$$

将式(23)与式(22)相减,即可得到  $\Delta t$  生产时间内煤层气体积浓度变化量为

$$\Delta c = c_{t+1} - c_t = \frac{V_L p_{t+1}}{p_L + p_{t+1}} - \frac{V_L p_t}{p_L + p_t} \quad (24)$$

将式(24)代入式(21),得到  $\Delta t$  生产时间内从煤基质扩散至割理的煤层气扩散量的表达式为

$$q_{mf} = D \frac{S}{L} \Delta t \left( \frac{V_L p_{t+1}}{p_L + p_{t+1}} - \frac{V_L p_t}{p_L + p_t} \right) \quad (25)$$

### 2.2 模型求解步骤

考虑煤层气扩散作用的物质平衡模型的求解步骤为:①假设煤层气开发初始生产时刻为0,煤层原始压力为  $p_i$ ,煤层气由基质向裂缝的扩散量为0。



②求取煤层气开发初始生产时刻的煤层气体积系数、煤层气相对渗透率、地层水相对渗透率、煤层气压缩系数等参数。③设定  $\Delta t$  为求解时间步长,由煤层气单井产气量计算公式求取  $\Delta t$  生产时间内煤层的产气量和产水量,进而求取  $t+1$  生产时刻煤层的含水饱和度。④计算在  $\Delta t$  生产时间内的煤层压力变化量。⑤计算  $\Delta t$  生产时间内煤层气的产量和累积产量,以及  $t$  生产时刻的累积产量。⑥循环步骤②至⑤,即可得到煤层气井的生产动态模型。根据以上考虑煤层气扩散作用的物质平衡模型的求解步骤,编写相应的计算程序,就可以得到煤层气开发动态预测评价软件。

### 3 扩散作用对煤层气开发的影响

根据延长油气区某生产井的地质资料和动态资料,利用煤层气开发动态预测评价软件研究扩散作用对煤层气开发的影响。研究区煤层气开发基础特征参数为:原始压力为7 MPa,基质孔隙度为0.06,Langmuir压力为3.2 MPa,Langmuir体积为30 m<sup>3</sup>,气藏面积为0.15 km<sup>2</sup>,煤层温度为300 K,煤层厚度为10 m,井底流压为0.7 MPa,初始含水饱和度为95%。

#### 3.1 扩散作用对产气量的影响

由不同煤层气扩散系数下产气量与生产时间的关系曲线(图1)可以看出,在整个煤层气开发过程中,扩散作用对煤层气产量具有一定影响。特别是煤层气开发后期,扩散系数越大,煤层气产气量峰值越高,后期产气量越高,且稳产时间越长。煤层气的扩散作用可以推迟产气量峰值出现的时间,但其影响较小。当不考虑扩散作用时,在生产时间为870 d时达到产气量峰值,最大产气量为3 637.5 m<sup>3</sup>/d;当煤层气的扩散系数为4×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s时,在生产时间为890 d时达到产气量峰值,最大产气量为

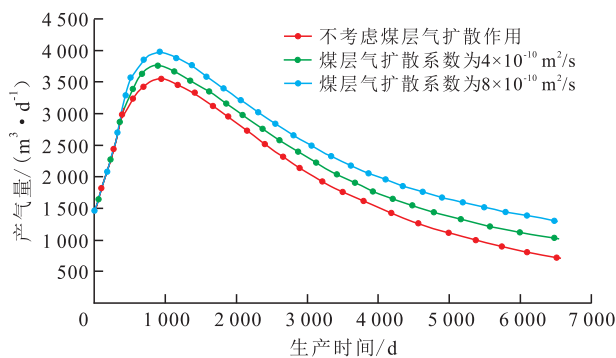


图1 不同煤层气扩散系数下产气量与生产时间的关系

Fig.1 Relationship between daily gas production and time with different CBM diffusivities

3 758.4 m<sup>3</sup>/d;当煤层气的扩散系数为8×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s时,在生产时间为930 d时达到产气量峰值,最大产气量为3 881.9 m<sup>3</sup>/d。因此,不同煤层气扩散系数下产气量峰值出现的时间几乎相同,但扩散作用越强烈,后期产气量的递减速率越低,稳产时间越长。

#### 3.2 扩散作用对煤层平均压力的影响

不同煤层气扩散系数下煤层平均压力与生产时间的关系(图2)表明,煤层气开发初期煤层平均压力下降较快,中、后期煤层平均压力下降变缓。考虑煤层气扩散作用时,煤层平均压力下降趋势更缓,特别是在煤层气开发后期,扩散作用越强烈,煤层平均压力下降越平缓,煤层气稳产时间越长。

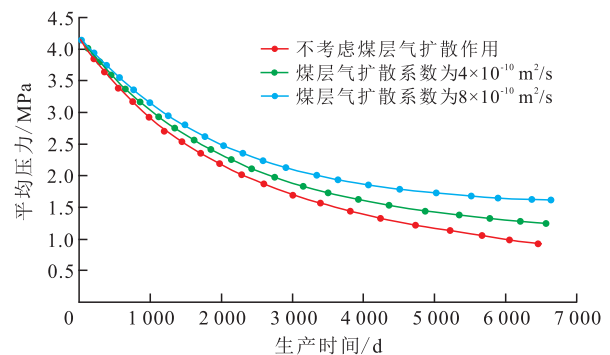


图2 不同煤层气扩散系数下煤层平均压力与生产时间的关系

Fig.2 Relationship between average pressure and time with different CBM diffusivities

#### 3.3 扩散作用对累积产气量和累积产水量的影响

由不同煤层气扩散系数下累积产气量与生产时间的关系(图3a)可以看出,煤层气开发初期累积产气量增长速度较快,但初期煤层气扩散作用对累积产气量的影响较小,而到开发后期,煤层气扩散作用使煤层气产气量的递减速率明显减小,有效地稳定了产气量,且更强烈的扩散作用致使气井获得更大的累积产气量。截至生产时间为6 000 d,不考虑煤层气扩散作用的影响,研究区煤层气累积产气量为1 265.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,而当煤层气扩散系数为8×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s时,煤层气累积产气量为1 517.1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,累积产气量相对提高19.9%。

从不同煤层气扩散系数下累积产水量与生产时间的关系曲线(图3b)可以看出,煤层气扩散作用对累积产水量的影响也主要表现在开发后期,但相比于对累积产气量的影响程度,较大的煤层气扩散作用仅导致最终累积产水量的微幅增大。截至生产时间为6 000 d,不考虑煤层气扩散作用的影响,研究区煤层气累积产水量为0.39×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;而当煤层气扩散系数为8×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s时,煤层气累积产水量为

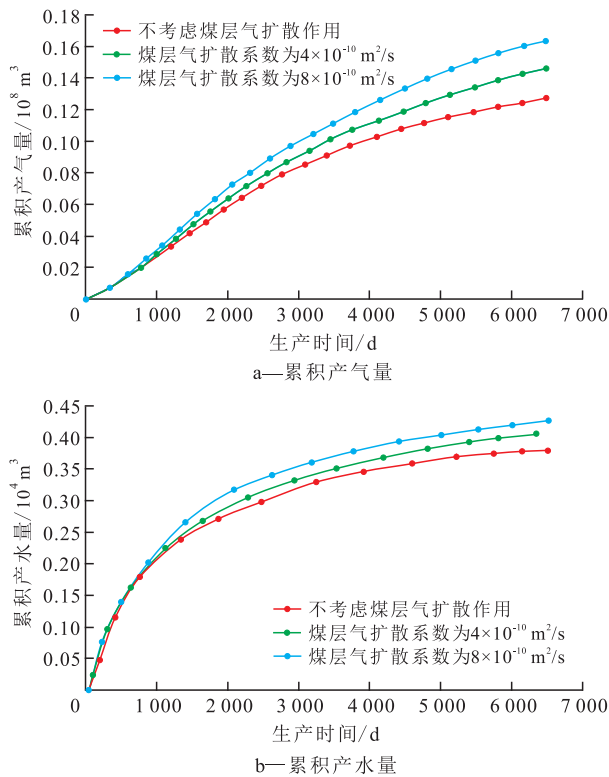


图3 不同煤层气扩散系数下累积产气量和累积产水量与生产时间的关系

Fig.3 Relationship between cumulative gas & water production and time with different CBM diffusivities

$0.41 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 累积产水量相对提高4.85%,由此可见煤层气扩散作用对累积产水量的影响较小。

## 4 结论

煤层气的扩散作用在煤层气产出过程中具有重要作用。煤层气的扩散作用导致煤层压力下降趋缓,特别是在煤层气开发后期,煤层气的扩散作用越强烈,煤层压力下降越平缓,煤层气稳产时间越长。煤层气的扩散作用可使单井产气量的峰值增大,特别是在煤层气开发后期产气量递减速率变小,因此可以延长气井的开发时限,并获得更大的累积产气量。当煤层气扩散系数为 $8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,相比不考虑煤层气的扩散作用,累积产气量提高19.9%,累积产水量提高4.85%。由此可见煤层气的扩散作用能大幅度提高累积产气量,而对累积产水量的影响较小。

### 符号解释:

$\Delta t$ ——气井的生产时间,d; $\Delta V_p$ ——在 $\Delta t$ 生产时间内煤层孔隙体积变化量, $\text{m}^3$ ; $\Delta V_g$ —— $\Delta t$ 生产时间内煤层游离气体积变化量, $\text{m}^3$ ; $\Delta V_w$ —— $\Delta t$ 生产时间内煤层地层水体积

变化量, $\text{m}^3$ ; $A$ ——单井控制煤层面积, $\text{m}^2$ ; $h$ ——煤层厚度,m; $\phi(p_i)$ 和 $\phi(p_{i+1})$ ——煤层压力为 $p_i$ 和 $p_{i+1}$ 时的孔隙度; $C_f$ ——煤层压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ; $\Delta p$ —— $\Delta t$ 生产时间内煤层压力变化量,MPa; $V_{ps \max}$ ——发生基质收缩效应后的煤层体积, $\text{m}^3$ ; $t$ 和 $t+1$ ——气井的生产时刻,d; $p_i$ 和 $p_{i+1}$ —— $t$ 和 $t+1$ 生产时刻的煤层压力,MPa; $p_L$ ——Langmuir压力,为煤层基质吸附气量等于Langmuir体积1/2时的压力,MPa; $V_g(p_i)$ 和 $V_g(p_{i+1})$ ——煤层压力为 $p_i$ 和 $p_{i+1}$ 时的游离气体积, $\text{m}^3$ ; $S_w(p_i)$ 和 $S_w(p_{i+1})$ ——煤层压力为 $p_i$ 和 $p_{i+1}$ 时的含水饱和度; $B_g(p_i)$ 和 $B_g(p_{i+1})$ ——煤层压力为 $p_i$ 和 $p_{i+1}$ 时的煤层气体积系数, $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; $\Delta V_{gr}$ —— $\Delta t$ 生产时间内煤层压力降低 $\Delta p$ 导致游离气膨胀的体积, $\text{m}^3$ ; $\Delta V_{gr}$ —— $\Delta t$ 生产时间内煤层压力降低 $\Delta p$ 导致溶解气逸出的体积, $\text{m}^3$ ; $q_{mf}$ ——煤层压力降低 $\Delta p$ 导致煤层气的扩散量, $\text{m}^3$ ; $\Delta G_p$ —— $\Delta t$ 生产时间内从煤层采至地面的游离气体积, $\text{m}^3$ ; $q_g$ ——煤层气井的产气量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $\phi_i(p_i)$ ——煤层压力为 $p_i$ 时的割理孔隙度; $C_g$ ——煤层气压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ; $V_w(p_i)$ 和 $V_w(p_{i+1})$ ——煤层压力为 $p_i$ 和 $p_{i+1}$ 时的地层水体积, $\text{m}^3$ ; $B_w(p_i)$ 和 $B_w(p_{i+1})$ ——煤层压力为 $p_i$ 和 $p_{i+1}$ 时的地层水体积系数, $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; $\Delta V_{wc}$ ——煤层压力下降导致的地层水膨胀量, $\text{m}^3$ ; $\Delta V_{wc}$ ——煤层压力降低 $\Delta p$ 时由于溶解气逸出导致的地层水体积变化量, $\text{m}^3$ ; $\Delta V_e$ ——煤层压力降低 $\Delta p$ 导致地层水侵入量体积, $\text{m}^3$ ; $\Delta V_p$ —— $\Delta t$ 生产时间内从煤层采至地面的地层水体积, $\text{m}^3$ ; $q_w$ ——煤层气井的产水量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $C_w$ ——煤层中地层水的压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ; $S_g(p_{i+1})$ ——煤层压力为 $p_{i+1}$ 时的含气饱和度; $D$ ——煤层气的扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ; $S$ ——煤层气扩散流经的面积, $\text{m}^2$ ; $c$ ——煤层气体积浓度, $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; $L$ ——煤层气扩散作用经过的割理间距,m; $c_i$ 和 $c_{i+1}$ —— $t$ 和 $t+1$ 生产时刻的煤层气体积浓度, $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; $\Delta c$ —— $\Delta t$ 生产时间内煤层气体积浓度变化量, $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; $V_L$ ——Langmuir体积, $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

### 参考文献:

- [1] 任闾燕,姜汉桥,李爱山,等.非常规天然气增产改造技术研究进展及其发展方向[J].油气地质与采收率,2013,20(2):103-107.  
Ren Minyan, Jiang Hanqiao, Li Aishan, et al. Review on study progress of unconventional gas stimulation technology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 103-107.
- [2] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.  
Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [3] 曹成润,牛伟,张遂安,等.煤层气在煤储层中的扩散及其影响因素[J].世界地质,2004,23(3):266-269.  
Cao Chengrun, Niu Wei, Zhang Suian, et al. Diffusion and its influences of coalbed methane in coal reservoirs [J]. Global Geology, 2004, 23(3): 266-269.

- [4] 左银卿,张学英,周骥,等.沁南地区高煤阶煤储层水敏效应及其控制因素[J].油气地质与采收率,2014,21(5):107-110.  
Zuo Yinqing, Zhang Xueying, Zhou Rui, et al. Water sensitivity and its controlling factors on high-rank coal reservoirs in southern Qinshui basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 107-110.
- [5] 张新民,庄军,张遂安.中国煤层气地质与资源评价[M].北京:科学出版社,2002:28-46.  
Zhang Xinmin, Zhuang Jun, Zhang Suian. Coalbed methane resource assessment in China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 28-46.
- [6] 李清.山西延川南煤层气田2号煤层煤相研究:煤层气开发选区意义[J].石油实验地质,2014,36(2):245-248.  
Li Qing. Coal facies of no.2 coal in Yanchuannan coal field of Shanxi: Significance for constituencies of coalbed methane exploitation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 245-248.
- [7] 孟艳军,汤达祯,李治平,等.高煤阶煤层气井不同排采阶段渗透率动态变化特征与控制机理[J].油气地质与采收率,2015,22(2):66-71.  
Meng Yanjun, Tang Dazhen, Li Zhiping, et al. Dynamic variation characteristics and mechanism of permeability in high-rank CBM wells at different drainage and production stages [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 66-71.
- [8] 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.  
Zhang Jian, Wang Zhiming. Application of material balance method to productivity forecast in coalbed methane reservoir [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(3): 23-26.
- [9] 王锦昌,杜建芬,郭平,等.火山岩凝析气藏物质平衡方程及应用[J].油气地质与采收率,2011,18(6):86-89.  
Wang Jinchang, Du Jianfen, Guo Ping, et al. Study and application of material balance equation in volcanic gas condensate reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 86-89.
- [10] 杨川东,桑宇.物质平衡法在煤层气井产能预测中的应用[J].钻采工艺,2000,23(4):33-37.  
Yang Chuandong, Sang Yu. Application of material balance method in coalbed gas well productivity forecast [J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(4): 33-37.
- [11] Guo Xiao, Fu Yu, Du Zhimin, et al. Coupled flow simulation in coalbed methane reservoirs [C]. SPE 91397, 2004.
- [12] 任广磊,周涌沂,陈奎,等.大牛地气田大98井区水平井开发技术政策研究[J].油气地质与采收率,2014,21(5):90-93.  
Ren Guanglei, Zhou Yongyi, Chen Kui, et al. Research on horizontal well development technology policy of Da98 well area in Daniudi gas field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 90-93.
- [13] 于洪观,范维唐,孙茂远,等.煤中甲烷等温吸附模型的研究[J].煤炭学报,2004,29(4):463-467.  
Yu Hongguan, Fan Weitang, Sun Maoyuan, et al. Study on fitting models for methane isotherms adsorption of coals [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 463-467.
- [14] 肖晓春,潘一山.考虑滑脱效应的水气耦合煤层气渗流数值模拟[J].煤炭学报,2006,31(6):711-715.  
Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Coal-bed methane percolation numerical simulation considering gas slippage and water-gas coupling [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 711-715.
- [15] 同登科,张先敏.致密煤层气藏三维全隐式数值模拟[J].地质学报,2008,82(10):1428-1431.  
Tong Dengke, Zhang Xianmin. Fully implicit numerical simulation of tight coalbed methane reservoir [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1428-1431.
- [16] 李清,赵兴龙,谢先平,等.延川南区块煤层气井高产水成因分析及排采对策[J].石油钻探技术,2013,41(6):95-99.  
Li Qing, Zhao Xinglong, Xie Xianping, et al. Causes of high water yield from CBM wells in Yanchuannan Block and draining measures [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 95-99.
- [17] 张强,章双龙,杨玲智.应力敏感煤层气藏水平井压力动态分析[J].特种油气藏,2012,19(6):108-111.  
Zhang Qiang, Zhang Shuanglong, Yang Lingzhi. Pressure performance analyses of a horizontal well of stress sensitive coal seams [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(6): 108-111.
- [18] 朱卫平,郭大立,曾晓慧,等.煤层应力敏感性对煤层气产量预测的影响[J].中国煤炭地质,2010,22(4):28-30,64.  
Zhu Weiping, Guo Dali, Zeng Xiaohui, et al. Impact of coal-bed stress sensibility on CBM output prediction [J]. Coal Geology of China, 2010, 22(4): 28-30, 64.
- [19] 石丽娜,杜庆军,同登科.煤层气窜流-扩散过程及其对开发效果的影响[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(3):137-140.  
Shi Lina, Du Qingjun, Tong Dengke. The channeling-diffusion process of coalbed methane and their influences on development effect [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(3): 137-140.