

# 煤层气产能预测新模型

王琰琛<sup>1</sup> 陈 胜<sup>2</sup> 孙兰兰<sup>3</sup>

1. 中国石化胜利石油工程公司井下作业公司, 山东 东营 257091;
2. 中国石油西部钻探工程有限公司钻井工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 中国石化胜利油田分公司胜利采油厂, 山东 东营 257091

**摘 要:**煤层气藏通常采用压裂直井开发, 由于其吸附、解吸和扩散特征, 运用常规二项式产能方程分析煤层气藏稳态产能会产生较大误差。根据煤层气藏天然裂缝发育的地质特征, 运用平行板理论、等值渗流阻力原理, 首次建立了针对煤层气藏, 考虑其吸附、解吸、扩散特征的连续等效介质模型。该模型将裂缝性双重孔隙介质的煤层气藏转化为运用等效渗透率表征的常规均质气藏, 但对各相关参数赋予特殊值时, 可简化得到各类常规气藏模型。通过计算分析煤层气藏压裂直井的 IPR 曲线, 可以看出当考虑解吸扩散时, 其 IPR 曲线异于常规气藏。兰格缪尔压力越小, 曲线下凹越严重, 绝对无阻流量越大; 兰格缪尔体积越小, 扩散系数越小, 曲线下凹越严重, 绝对无阻流量越小。通过实际对比分析, 该模型误差小于 10%, 具有较好的适应性。

**关键词:**煤层气; 吸附; 扩散; 等效连续介质理论; 等效渗透率; 稳态; IPR 曲线

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.04.017

## A New Model for Productivity Prediction of Coal-Bed Methane

Wang Yanchen<sup>1</sup>, Chen Sheng<sup>2</sup>, Sun Lanlan<sup>3</sup>

1. Downhole Service Company of Shengli Service Corporation, Dongying, Shandong, 257091, China;
2. Xibu Drilling Engineering Company, CNPC, Karamay, Xinjiang, 834000, China;
3. Sinopec Shengli Oilfield Branch, Dongying, Shandong, 257091, China

**Abstract:** Vertical well with hydraulic fractures is applied to develop coal-bed methane reservoir. Besides, due to the existence of adsorption, desorption and diffusion, it can induce large errors to analyze well performance of coal-bed methane with conventional binomial production equation. Therefore, in terms of natural fractured coal-bed methane reservoir, this paper initially establishes the equivalent continuous medium model with consideration of adsorption, desorption and diffusion using parallel-plate theory, equivalent seepage resistance principle. This new model can convert fractured dual-porosity coal-bed methane reservoir into homogeneous gas reservoirs characterized with certain equivalent permeability. It also can be simplified to various conventional gas reservoirs with special values of the relevant parameters. Taking the desorption and diffusion of coal-bed methane into consideration, IPR curves are different from that of conventional gas reservoirs, the smaller the Langmuir pressure, the deeper the curve concaves and

收稿日期: 2018-04-28

基金项目: 国家自然科学基金重大专项“页岩地层动态随机裂缝控制机理与无水压裂理论”(No.51490653)

作者简介: 王琰琛(1990-), 男, 山东东营人, 工程师, 硕士, 现从事非常规油气田开发工作。

the larger the absolute open-flow potential, while the smaller the Langmuir volume or the smaller the diffusion coefficient, the deeper the curve concaves and the smaller the absolute open-flow potential. Through the actual comparative analysis, the error of this model is less than 10 % and this model has certain practical value.

**Keywords:** Coal-bed methane; Adsorption; Diffusion; Equivalent continuum theory; Equivalent permeability; Steady state; IPR curve

## 0 前言

煤层气藏是典型的非常规油气藏,天然裂缝发育<sup>[1-5]</sup>,一般通过压裂等方式进行储层改造后开发。由于煤层气的吸附、解吸和扩散特征,其渗流机理异于常规气藏渗流机理。煤层中的甲烷通过解吸、扩散、渗流三个重要过程而产生,其稳产阶段主要发生在中后期,该阶段大量产气少量产水<sup>[6]</sup>。目前,国内外针对煤层气产能的研究大多采用数值模拟方法<sup>[7-10]</sup>,鉴于煤层气吸附、解吸和扩散的特征,常规气藏产能预测模型并不适用<sup>[11-13]</sup>,且运用常规二项式产能方程来分析煤层气藏稳态产能会产生较大的误差<sup>[14-17]</sup>,故煤层气藏近似单相产气阶段的流动机理和产能分析具有较高的研究价值<sup>[18-20]</sup>。本文根据天然裂缝发育型煤层气藏的地质特点,运用平行板理论和等效渗流阻力原理,建立符合其渗流特征和开发模式的稳态产能分析模型,以此模型为基础进行各种特征参数以及模型简化分析,为煤层气藏产能预测和分析提供参考。

## 1 模型建立

针对天然裂缝发育型煤储层,运用平行板理论建立模型。图1为其中任意一个立方体特征单元,其长、宽、高分别为 $a, b, h$ 。其中发育垂直裂缝,裂缝宽度为 $b_f$ ,裂缝贯穿整个单元体,高度为 $h$ ,裂缝线密度为 $D_f$ ,基质宽为 $b_m$ 。煤层气稳态条件下,产量恒定。单元体产量和压力运用等效渗流阻力法原理进行分析。假设裂缝渗透率,基质渗透率和基质中气体扩散系数存在各向同性,分别为 $k_f, k_m$ 和 $D$ 。不同方向基质-裂缝系统串并联方式不同,此时应对三个正交方向分别进行分析,其中 $x$ 和 $z$ 方向相同,因此下面进对 $x$ 和 $y$ 方向进行分析。

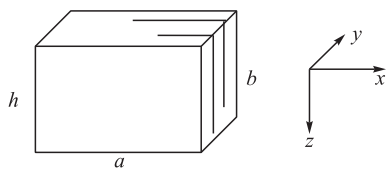


图1 裂缝型煤层气藏特征单元

### 1.1 $x(z)$ 方向等效渗透率

根据上文建立的储层模型,在沿 $x$ 方向基质-裂缝

系统处于并联状态,且基质和裂缝压降相同,即:

$$Q_t = Q_f + Q_m \quad (1)$$

式中: $Q_t$ 为特征单元体总产气量, $m^3/s$ ; $Q_f$ 为裂缝产气量, $m^3/s$ ; $Q_m$ 为基质产气量, $m^3/s$ 。

其中,裂缝中气体流动符合达西定律,则由达西定律得到裂缝中流量 $Q_f$ 为:

$$Q_f = \frac{T_{sc} k_f D_f b b_f h \Delta\phi}{2 T p_{sc} a} \quad (2)$$

式中: $D_f$ 为天然裂缝线密度,无因次; $b_f$ 为裂缝缝宽, $m$ ; $k_f$ 为裂缝渗透率, $\mu m^2$ ; $T_{sc}$ 为标准状态下的温度,273.15 K; $p_{sc}$ 为标准状态下的压力, $10^{-1}$  MPa; $h$ 为储层厚度, $m$ ; $T$ 为油藏温度,K; $\phi$ 为地层拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$ 。

基质中主要为解吸扩散流动,且稳态条件下,假设解吸量与基质扩散量相等,认为基质与裂缝之间同时存在气体窜流,则基质产气量 $Q_m$ 等于解吸量 $Q_d$ 和窜流量 $Q_c$ 两部分产量之和,其中:

$$Q_d = b_m h D \frac{\Delta C}{a} \quad (3)$$

$$Q_c = 6 b_m h \frac{T_{sc} k_m \Delta\phi}{T p_{sc} a} \quad (4)$$

式中: $C$ 为气体浓度, $m^3/s$ ; $D$ 为扩散系数, $m^2/s$ ; $k_m$ 为基质渗透率, $\mu m^2$ ; $b_m$ 为基质宽度, $m$ 。

则基质产气量 $Q_m$ 为:

$$Q_m = b_m h D \frac{\Delta C}{a} + 6 \frac{T_{sc} k_m b_m h \Delta\phi}{T p_{sc} a} \quad (5)$$

由于解吸量等于向外的扩散量,由兰格缪尔等温吸附方程可得:

$$\frac{\Delta C}{\Delta a} = (1 - \phi_f - \phi_m) V_L \frac{\phi_L}{(\phi_L + \phi)^2} \frac{\Delta\phi}{\Delta a} \quad (6)$$

式中: $V_L$ 为兰格缪尔体积, $m^3/m^3$ ; $\phi_f$ 为裂缝孔隙度,无因次; $\phi_m$ 为基质孔隙度,无因次; $\phi_L$ 为兰格缪尔拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$

带入式(5)得到:

$$Q_m = b_m h D_x (1 - \phi_f - \phi_m) V_L \frac{\phi_L}{(\phi_L + \phi)^2} \frac{\Delta\phi}{\Delta a} + 6 \frac{T_{sc} k_m b_m h \Delta\phi}{T p_{sc} a} \quad (7)$$

式中: $D_x$ 为 $x$ 方向的扩散系数, $m^2/s$ 。

引入  $x$  方向特征单元等效渗透率  $k_x$ , 结合等值渗流阻力法得到:

$$\frac{T_{sc} k_x b h \Delta \varphi}{2 T p_{sc} a} = b_m h D (1 - \phi_f - \phi_m) V_L \frac{\varphi_L}{(\varphi_L + \varphi)^2} \frac{\Delta \varphi}{a} + \frac{T_{sc} k_f D_f b b_f h \Delta \varphi}{2 T p_{sc} a} + 6 \frac{T_{sc} k_m b_m h \Delta \varphi}{T_{sc} p_{sc} a} \quad (8)$$

化简得到  $x$  方向等效渗透率为:

$$k_x = \frac{2 T p_{sc} b_m D (1 - \phi_f - \phi_m) V_L}{T_{sc}} \frac{\varphi_L}{(\varphi_L + \varphi)^2} + k_f D_f b_f + 12 k_m \frac{b_m}{b} \quad (9)$$

定义解吸扩散相关渗透率  $k_d$  为:

$$k_d = \frac{2 T p_{sc} D (1 - \phi_f - \phi_m) V_L}{T_{sc}} \frac{\varphi_L}{(\varphi_L + \varphi)^2} \quad (10)$$

结合孔隙度定义可以得到:

$$\phi_f = \frac{b D_f b_f h a}{h a b} = D_f b_f \quad (11)$$

进一步得到:

$$k_x = k_d + 12 k_m + (k_f - k_d - 12 k_m) \phi_f \quad (12)$$

同理可得,  $z$  方向等效渗透率  $k_z$  为:

$$k_z = k_d + 12 k_m + (k_f - k_d - 12 k_m) \phi_f \quad (13)$$

式中:  $k_z$  为  $z$  方向等效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

## 1.2 $y$ 方向等效渗透率

同理, 在沿  $y$  方向, 基质-裂缝系统处于串联状态, 总压降  $\Delta p$  由基质压降  $\Delta p_m$  和裂缝压降  $\Delta p_f$  两部分组成, 且基质和裂缝产气量相同, 即:

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_m \quad (14)$$

式中:  $\Delta p$  为总压降, MPa;  $\Delta p_f$  为裂缝压降, MPa;  $\Delta p_m$  为基质压降, MPa。

基质内部可以看成是解吸扩散和窜流两种方式并联, 基质内部产气量结合等值渗流原理得到:

$$Q = a h D (1 - \phi_f - \phi_m) V_L \frac{\varphi_L}{(\varphi_L + \varphi)^2} \frac{\Delta \varphi}{b_m} + 6 \frac{T_{sc} k_m a h \Delta \varphi}{T p_{sc} b_m} \quad (15)$$

进一步对基质-裂缝系统运用等效渗流阻力原理, 得到基质-裂缝系统串联方程为:

$$\frac{2 Q T p_{sc} b}{T_{sc} k_y a h} = \frac{2 Q T p_{sc} D_f b b_f}{T_{sc} k_f a h} + \frac{Q b_m}{a h D (1 - \phi_f - \phi_m) V_L \frac{\varphi_L}{(\varphi_L + \varphi)^2} + 6 \frac{T_{sc} k_m a h}{T p_{sc}}} \quad (16)$$

最终化简得到:

$$k_y = \frac{k_f (k_d + 12 k_m)}{k_f + (k_d + 12 k_m - k_f) \phi_f} \quad (17)$$

式中:  $k_y$  为  $y$  方向等效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

## 2 IPR 曲线影响因素分析

煤层气藏大多为压裂直井开发, 假设压裂形成的垂直裂缝无限导流, 裂缝完全贯穿储层, 且储层厚度为  $h$ , 裂缝半长为  $x_f$ , 气藏泄气半径  $r_e$ 。基于以上分析可知, 等效连续介质理论将煤层气双重介质储层等效为均质储层, 结合上文的等效渗透率张量, 运用均质储层相关产能模型便能对煤层气产能进行分析。

均质储层中一口无限导流的垂直裂缝压裂井的流场较为复杂, 可运用保角变换将其简化为平面带宽为  $\pi$ , 排液坑道长为  $\ln(2r_e/x_f)$  的半无限大地层中平面单向流。再结合等效渗透率张量和达西定律, 煤层气稳态条件下, 等效均质气藏单向渗流的数学模型为:

$$Q_{sc} = \frac{\pi h T_{sc} 2k(p)p}{T p_{sc} \mu z} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (18)$$

式中:  $k(p)$  为煤层气藏等效渗透率, 其为压力的函数;  $Q_{sc}$  为标注状态下产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

构造新拟压力函数:

$$\zeta = \int_{p_o}^p \frac{2K(p)p}{k \mu z} dp \quad (19)$$

将式(19)带入式(18), 并积分得到煤层稳态产能公式为:

$$Q_{sc} = \frac{\pi k_f h T_{sc} (\zeta_e - \zeta_{wf})}{2 T p_{sc} \ln \frac{2r_e}{x_f}} \quad (20)$$

### 2.1 吸附效应影响

兰格缪尔压力和兰格缪尔体积是表征煤层气吸附特性的参数, 选取基本参数:  $k_f = 1.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,  $D = 1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $r_e = 500 \text{ m}$ ,  $x_f = 90 \text{ m}$ ,  $h = 10.7 \text{ m}$ ,  $\phi_f = 0.012$ ,  $\phi_m = 0.059$ ,  $T = 290.15 \text{ K}$ ,  $p_i = 6 \text{ MPa}$ 。图 2 为不同兰格缪尔体积  $V_L$  ( $20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) 和兰格缪尔压力  $p_L$  ( $1.5 \text{ MPa}$ ,  $2 \text{ MPa}$ ,  $2.5 \text{ MPa}$ ) 下的煤层气藏稳态 IPR 曲线。

考虑煤层气解吸扩散影响时, 煤层气藏 IPR 曲线形状与常规气藏差别很大, 曲线呈现下凹, 随着兰格缪尔压力的增大, 下凹程度变小, IPR 曲线逐渐趋于常规 IPR 曲线, 且煤层气无阻流量减小。分析认为当地层压力大于兰格缪尔压力时, 煤层气并没有发生解吸, 其渗流特征与常规气藏类似, 而当地层压力低于兰格缪尔压力时, 气体发生解吸, 兰格缪尔体积越大, 解吸量越大, 在相同的生产压差下, 气井产量越高。同样, 若兰格缪尔体积越大, 吸附的煤层气总量越大, 在气井敞喷生产时, 绝对无阻流量也会越高, 随着兰格缪尔体积的减小, 下凹程度变大, 煤层气无阻流量减小。

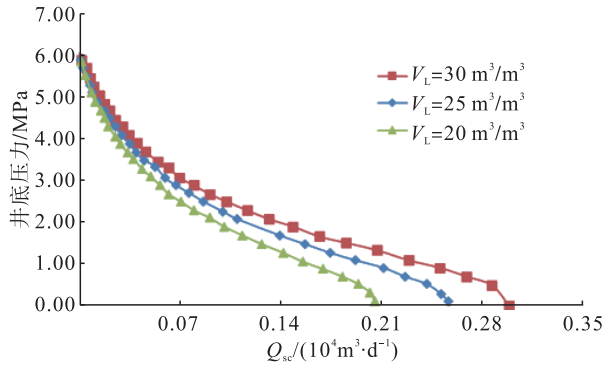
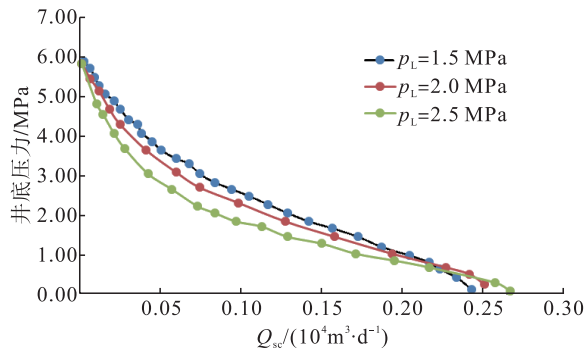
a) 不同  $V_L$  条件下煤层气 IPR 曲线b) 不同  $p_i$  条件下煤层气 IPR 曲线

图 2 兰格缪尔参数对煤层气 IPR 曲线影响

## 2.2 扩散效应影响

假设基质中为拟稳态扩散,扩散系数  $D$  是表征其特征的参数,基本参数如 2.1 节中所示, $p_L = 2$  MPa,  $V_L = 25$   $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。图 3 为不同扩散系数  $D$  下的煤层气藏稳态 IPR 曲线,分别选取扩散系数  $D = 0.5$   $\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $0.8$   $\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $1.0$   $\text{cm}^2/\text{s}$ 。

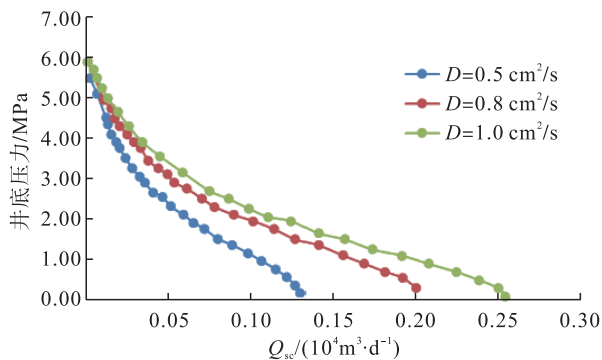


图 3 不同扩散系数煤层气 IPR 曲线

扩散系数越小,煤层气下凹程度越大,绝对无阻流量越小。分析其机理,扩散系数反映气体扩散的能力,扩散项越突出,相对的吸附项对产能的控制变弱,流动供气项(包括渗流和扩散)占主导地位,此时 IPR 曲线形状接近常规气藏 IPR 曲线。一般而言,气井敞喷时,扩散系数越大,整体供气能力越强,气井绝对无阻流量越高。

## 2.3 模型简化分析

实际的煤层气藏是由无数个此模型特征单元组成的,通过该特征模型的流动特性来表征整个煤层气藏的

渗流特征。但当模型中的某些参数取特殊值时,该模型可表征不同介质类型的气藏,主要有以下三种情况:

1) 当  $V_L = 0$  且  $D = 0$  时,表征不考虑吸附扩散的裂缝性双重孔隙介质的常规储层;

2) 当  $k_m = 0$  时,表征为考虑吸附扩散的裂缝性双重孔隙介质的煤层气储层,且仅考虑基质中气体扩散流,而忽略基质中的窜流流动;

3) 当  $k_m = 0, V_L = 0$  且  $\phi_m = 0$  时,可将等效渗透率张量中的基质窜流项和基质中气体解吸扩散项消去,模型简化为最基本常规均质储层。

图 4 为针对上述三种情况做出的 IPR 曲线。当不考虑煤层气解吸扩散时,其特征与常规气藏形状类似;当考虑基质中气体窜流时,气产量较高,但对产能贡献不大;当考虑煤层气解吸扩散,但忽略基质中气体窜流时,IPR 曲线下凹,与常规气藏区别较大,绝对无阻流量也较高;当同时考虑解吸、扩散、窜流流动时煤层气藏整体产能升高,绝对无阻流量最大。

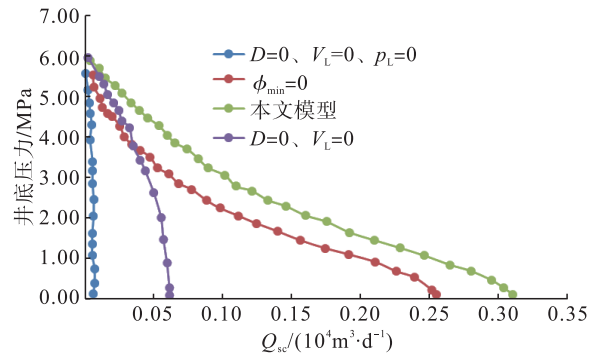


图 4 不同简化模型 IPR 曲线

## 3 实例分析

选取山西沁水盆地某煤层气区三口气井 W 1、W 2 和 W 3,均为压裂直井,其相关资料数据见表 1。运用文中煤层气新模型,结合三口气井实际生产数据,对比分析该模型的精度和适用性。

表 1 三口煤层气井基本参数表

参数	W 1	W 2	W 3
裂缝渗透率 $k_f / 10^{-3} \mu\text{m}^2$	1.48	1.50	1.92
气藏原始地层压力 $p_i / \text{MPa}$	5.19	4.85	4.08
裂缝孔隙度 $\phi_f$	0.012	0.01	0.008
基质孔隙度 $\phi_m$	0.048	0.056	0.053
气藏温度 $T / \text{K}$	290.15	291.15	288.15
兰格缪尔体积 $V_L / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	28.49	22.55	23.49
兰格缪尔压力 $p_L / \text{MPa}$	2.50	2.32	2.11
气藏有效厚度 $h / \text{m}$	6.56	10.7	4.14
解吸时间 $s / \text{d}$	4.42	4.45	4.20
裂缝半长 $x_f / \text{m}$	97	89	100
泄气半径 $r_e / \text{m}$	350	320	330

本文模型依据表1参数预测W1~W3井的生产数据,计算结果见图5,当W1井稳态流压为0.5 MPa时,稳态产量为1 900 m<sup>3</sup>/d,运用新模型预测0.5 MPa时产量为2 100 m<sup>3</sup>/d;W2井稳态流压为0.5 MPa时,稳态产量为2 000 m<sup>3</sup>/d,运用新模型预测0.5 MPa时产量为2 100 m<sup>3</sup>/d;W3井稳态流压为1.2 MPa时,稳态产量为800 m<sup>3</sup>/d,运用新模型预测1.2 MPa时产量为900 m<sup>3</sup>/d。结合误差分析表可得,三口气井相对误差都小于10%,因此,该模型精度较高,具有一定的适用性。

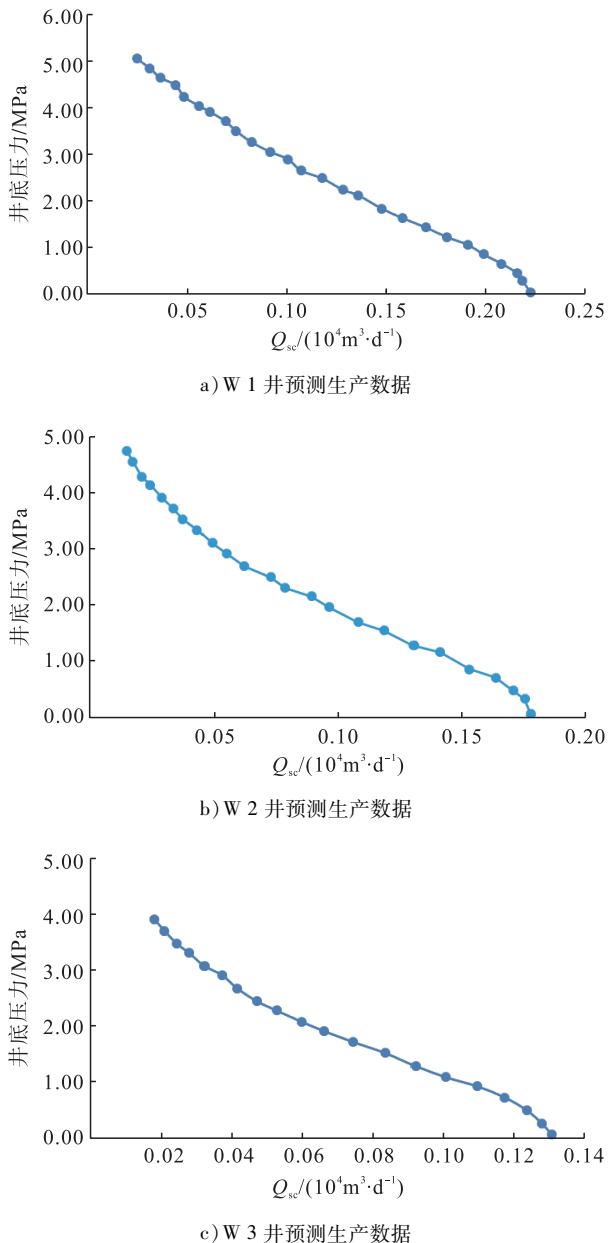


图5 W1~W3井预测生产数据

#### 4 结论

1) 针对天然裂缝发育型煤层气藏,运用平行板理论以及等值渗流阻力原理,首次建立了符合其渗流特征和开发模式的稳态产能分析模型。

2) 考虑煤层气吸附、解吸和扩散影响时,稳态IPR曲线出现下凹的形态,异于常规气藏IPR曲线。兰格缪尔体积越小,扩散系数越小下凹越严重,绝对无阻流量越小;而兰格缪尔压力越小,下凹越严重,绝对无阻流量越大。

3) 该模型通过参数赋值,可以转化为各类气藏的产能模型。

4) 该模型将双孔煤层气藏等效为均质储层,极大提高煤层气藏产能预测效率,并且通过与实际生产数据对比,该模型具有较高的精度和较强的适用性。

#### 参考文献:

- [1] 吴世跃,郭勇义. 煤层气运移特征的研究[J]. 煤炭学报, 1999,24(1):65-69.  
Wu Shiyue, Guo Yongyi. Study on the Movement Property of Coal Seam Methane [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24 (1): 65-69.
- [2] 孔庆利. 煤层气在双孔介质中解吸及渗流机理研究[D]. 大庆:东北石油大学,2012.  
Kong Qingli. Study on Desorption and Seepage Mechanism of Coalbed Methane in Double Porosity [J]. Daqing: Northeast University of Petroleum, 2012.
- [3] 乌效鸣,屠厚泽. 煤层水力压裂典型裂缝形态分析与基本尺寸确定[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1995,20(1):112-116.  
Wu Xiaoming, Tu Houze. Morphological Analysis and Geometrical Size Determination of Representative Hydraulic Fractures in Coal Seam [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1995, 20 (1): 112-116.
- [4] 杨朝蓬,高树生,刘广道,等. 致密砂岩气藏渗流机理研究现状及展望[J]. 科学技术与工程,2012,20(32):8606-8613.  
Yang Chaopeng, Gao Shusheng, Liu Guangdao, et al. The Research Status and Progress on Percolation Mechanism of Tight Gas Reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12 (32): 8606-8613.
- [5] 康毅力,罗平亚. 煤岩气藏开发分类探讨[J]. 西南石油学院学报:自然科学版,2003,25(6):19-22.  
Kang Yili, Luo Pingya. Discussion on Classification of Coalbed Methane Reservoirs for Developments [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2003, 25 (6): 19-22.
- [6] 欧成华,梁成钢,蒋建立,等. 考虑吸附、变形的煤层气分阶段流动模型[J]. 天然气工业,2011,31(3):48-51.  
Ou Chenghua, Liang Chenggang, Jiang Jianli, et al. A Stage-by-Stage Flow Model of Coalbed Methane Gas Considering

- Adsorption and Deformation [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31 (3): 48-51.
- [7] 张志刚. 井下煤层气抽采产能预测模型研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
- Zhang Zhigang. Study on Prediction Model for the Capacity to the Undermine Coalbed-gas Drainage Production [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2008.
- [8] 李士才. 煤层气井产能预测模型建立及数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- Li Shicai. The Prediction Model Establishment and Numerical Simulation of CBM Well Productivity [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [9] 邹明俊, 刘帅, 张苗. 基于三孔两渗产出模型的煤层气井产能数值模拟研究[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(2): 301-303.
- Zou Mingjun, Liu Shuai, Zhang Miao. Production Prediction of Coalbed Methane Well Based on Triple Porosity/Dual Permeability Model [J]. *Coal Technology*, 2015, 34(2): 301-303.
- [10] 王艳. 煤层气产能数值模拟及预测方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- Wang Yan. Study of Methods of CBM Productivity Numerical Simulation and Its Prediction [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [11] 宁正福, 韩树刚, 程林松, 等. 低渗透油气藏压裂水平井产能计算方法[J]. *石油学报*, 2002, 23(2): 68-71.
- Ning Zhengfu, Han Shugang, Cheng Linsong, et al. Productivity Calculation Method of Fractured Horizontal Wells in Low Permeability Oil or Gas Field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(2): 68-71.
- [12] 朗兆新, 张丽华, 程林松. 压裂水平井产能研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1994, 18(2): 43-46.
- Lang Zhaoxin, Zhang Lihua, Cheng Linsong. Investigation on Productivity of Fractured Horizontal Well [J]. *Journal of University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 1994, 18(2): 43-46.
- [13] Ezulike D O, Dehghanpour H. A Model for Simultaneous Matrix Depletion into Natural and Hydraulic Fracture Networks [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 16(2): 57-69.
- [14] 张宏宇, 陈华强. 建立气井二项式产能方程的一种新方法[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2012, 32(3): 255.
- Zhang Hongyu, Chen Huaqiang. A New Method for Establishing a Binomial Productivity Equation for Gas Wells [J]. *China Petroleum and Chemical Standards and Quality*, 2012, 32(3): 255.
- [15] 陆家亮, 涂梅桂, 刘晓华, 等. 产水气井稳定点二项式产能方程及其应用[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(6): 66-69.
- Lu Jialiang, Tu Meigui, Liu Xiaohua, et al. Stable Point Binomial Productivity Equation of Water-Being Gas Well and Application [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(6): 66-69.
- [16] 幸明刚, 尹俊禄, 赵丁楠, 等. 考虑非稳态扩散的煤层气井产能预测模型[J]. *天然气与石油*, 2012, 30(6): 49-51.
- Xing Minggang, Yin Junlu, Zhao Dingnan, et al. Productivity Prediction Model of Coalbed Methane Well Considering Nonsteady-State Diffusion [J]. *Natural Gas and Oil*, 2012, 30(6): 49-51.
- [17] 张昊, 李宝荣, 李治平, 等. 考虑应力敏感的煤层气井流入动态曲线研究[J]. *石油化工应用*, 2012, 31(6): 33-34.
- Zhang Hao, Li Baorong, Li Zhiping, et al. Study on Stress-Sensitive CBM Well Inflow Dynamic Curves [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2012, 31(6): 33-34.
- [18] 万军凤, 李凯, 冉超, 等. 考虑应力敏感的煤层气产能模型研究[J]. *煤炭技术*, 2016, 35(8): 311-313.
- Wan Junfeng, Li Kai, Ran Chao, et al. Coalbed Methane Deliverability Correlation Research Considering Stress Sensitivity [J]. *Coal Technology*, 2016, 35(8): 311-313.
- [19] 徐严波, 齐桃, 杨凤波, 等. 压裂后水平井产能预测新模型[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 89-96.
- Xu Yanbo, Qi Tao, Yang Fengbo, et al. New Model for Productivity Test of Horizontal Well After Hydraulic Fracturing [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 89-91.
- [20] 付玉, 郭肖, 龙华. 煤层气储层压裂水平井产能计算[J]. *西南石油学院学报*, 2003, 25(3): 44-46.
- Fu Yu, Guo Xiao, Long Hua. Productivity Method of Fractured Horizontal Wells in Coalbed Gas [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2003, 25(3): 44-46.