

# 考虑煤粉堵塞影响的煤储层渗透率模型及其应用

石军太<sup>1,2</sup> 吴嘉仪<sup>1,2</sup> 房烨欣<sup>1,2</sup> 鲁家国<sup>1,2</sup>  
侯晨虹<sup>3</sup> 李相方<sup>1,2</sup> 张遂安<sup>1,2</sup> 熊先钺<sup>4</sup>

1. 中国石油大学（北京）煤层气研究中心 2. 油气资源与探测国家重点实验室·中国石油大学（北京）  
3. 中海石油气电集团有限责任公司 4. 中石油煤层气有限责任公司

**摘要：**为了准确预测煤层气井生产动态、制订合理的排采制度，建立了考虑煤粉堵塞影响的煤储层渗透率模型，然后基于该模型对保德区块、沁水盆地、柳林区块、韩城区块、黄陵煤田共 15 组煤样的室内煤样速敏实验数据进行了拟合，求得各煤样的渗透率模型；在此基础上，将建立的煤储层渗透率模型引入到前期编制的煤层气井动态分析软件中，并进行了 2 口煤层气井的生产历史拟合；以其中一口煤层气井（W1 井）的拟合参数为基准，研究了煤粉堵塞参数对煤储层渗透率及煤层气井生产动态的影响。研究结果表明：①所建立的考虑煤粉堵塞影响的煤储层渗透率模型能够定量化描述煤储层渗透率随流体流速的变化，同时该模型可以被嵌入到煤层气数值模拟软件或煤层气井动态分析软件中，应用范围广；②保德区块煤储层渗透率受煤粉堵塞的影响相对较小，而煤粉堵塞对于沁水盆地、黄陵煤田煤储层渗透率的影响不可忽视；③理论最大渗透率损害率 ( $D_{\max}$ ) 和渗透率损害率指数 ( $n$ ) 越大，煤粉临界堵塞流速 ( $v_{cr2}$ ) 和  $0.5D_{\max}$  对应的相对流速 ( $v_{0.5}$ ) 越小，煤粉堵塞对煤储层渗透率的影响越显著；④为减小煤粉堵塞对煤层气井产能的不利影响，在排采过程中尤其是产气初期，要适当减小生产压差，以避免对煤储层渗透率造成恶性伤害。

**关键词：**煤层气；煤粉；速敏；动态渗透率；产能预测；保德区块；沁水盆地；柳林区块；韩城区块；黄陵煤田

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.06.008

## A new coal reservoir permeability model considering the influence of pulverized coal blockage and its application

SHI Juntao<sup>1,2</sup>, WU Jiayi<sup>1,2</sup>, FANG Yexin<sup>1,2</sup>, LU Jiaguo<sup>1,2</sup>  
HOU Chenhong<sup>3</sup>, LI Xiangfang<sup>1,2</sup>, ZHANG Sui'an<sup>1,2</sup>, XIONG Xianyue<sup>4</sup>

(1. Coalbed Methane Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting//China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. CNOOC Gas & Power Group, Beijing 100028, China;  
4. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 6, pp.78-89, 6/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** In order to accurately predict the production performance of coalbed methane (CBM) wells and to formulate a reasonable production system, this paper established a coal reservoir permeability model considering the influence of pulverized coal blockage. Then, on the basis of this model, the flow velocity sensitivity (FVS) experimental data of 15 groups of coal samples taken from the Baode Block, Qinshui Basin, Liulin Block, Hancheng Block and the Huanglong Coalfield were fitted to determine the permeability models for different coal samples. On this basis, this newly established permeability model was incorporated into a previously developed CBM well performance analysis software, and production history matching was carried out on two CBM wells. Finally, the effects of the parameters of pulverized coal blockage on the permeability of coal reservoirs and the production performance of CBM wells were studied by taking the fitting parameters of CBM Well W1 as the reference. And the following research results are obtained. First, this new model considering the influence of pulverized coal blockage can quantitatively describe the variation of coal reservoir permeability with fluid velocity. In addition, this model can be incorporated into a CBM numerical simulation software or a CBM well performance analysis software to apply it in a wide range. Second, the coal reservoir permeability is less affected by pulverized coal blockage in the Baode Block, but this effect shall not be ignored in the Qinshui Basin and the Huanglong Coalfield. Third, the greater the theoretical maximum permeability damage degree ( $D_{\max}$ ) and the permeability damage degree index ( $n$ ) are, the lower the relative flow velocity ( $v_{0.5}$ ) corresponding to the critical flow velocity of pulverized coal blockage is and the more obvious the effect of pulverized coal blockage on coal reservoir permeability. Fourth, in order to reduce the adverse effect of pulverized coal blockage on coal reservoir permeability, it is suggested to reduce the production pressure difference appropriately in the process of production, especially in the initial stage of gas production, so as to avoid severe damage to coal reservoir permeability.

**Keywords:** Coalbed methane; Pulverized coal; Flow velocity sensitivity; Dynamic permeability; Productivity prediction; Baode Block, Qinshui Basin; Liulin Block; Hancheng Block; Huanglong Coalfield

**基金项目：**国家科技重大专项“煤层气定量化排采工艺技术及设备研制”（编号：2016ZX05042-004）。

**作者简介：**石军太，1984 年生，副教授，本刊青年编委，博士；主要从事复杂气藏和非常规气藏渗流机理、产能预测、开发技术等方面的研究与教学工作。地址：(102249) 北京市昌平区府学路 18 号。ORCID: 0000-0002-7291-3680。E-mail: shijuntai@cup.edu.cn

## 0 引言

煤储层渗透率是影响煤层气井产能的关键因素之一，是开展煤层气藏数值模拟、气井生产动态分析和排采制度设计的基础。随着煤层气井排采的进行，煤储层渗透率将发生变化，其数值主要受应力敏感<sup>[1-4]</sup>、基质收缩<sup>[5-6]</sup>、气体滑脱<sup>[4,7-9]</sup>以及产出的煤粉堵塞渗流通道<sup>[10]</sup>等因素的影响。目前，应用最广泛的煤储层渗透率模型是综合考虑基质收缩与应力敏感效应的 Palmer-Mansoori 模型<sup>[11-12]</sup>；另外，还有学者通过室内实验<sup>[13]</sup>、理论推导<sup>[14-16]</sup>、生产数据反推<sup>[17]</sup>等方法，建立了考虑两个或者三个影响因素的煤储层渗透率数学模型。但是，上述模型均没有考虑产出的煤粉堵塞渗流通道对煤储层渗透率的影响。

我国部分煤层气藏地质构造复杂，原生结构受到的破坏相对严重，且煤岩胶结性较差。因此在煤层气的生产过程中极易发生煤岩破碎，造成严重的煤粉产出问题。大量煤粉随流体在煤层裂隙中运移，并发生沉降与聚集<sup>[18]</sup>，最终堵塞渗流通道，极大降低了储层渗透率，进而影响煤层气井的产能。

近年来，国内外学者通过对煤层气生产实践进行总结，结合理论推导与实验分析等手段，对煤粉的产出机理<sup>[19-22]</sup>、运移特征<sup>[23-24]</sup>、产出规律<sup>[25]</sup>及防治措施<sup>[26-27]</sup>等方面开展了深入的研究。李仰民等<sup>[28]</sup>从生产实际出发，将煤层气井排采过程中储层的伤害类型划分为煤粉堵塞、地层气锁及应力闭合 3 种，并指出煤粉堵塞是最主要的储层伤害类型。魏迎春等<sup>[25]</sup>对韩城区块煤粉产出特征进行了观测与分析，认为煤粉的产生普遍存在于煤层气井排采过程中，尤其在排采初期和产气量快速上升期。白建梅等<sup>[22]</sup>认为，现场产出的煤粉主要有煤岩中的固有煤粉、机械破坏产生的煤粉、气液冲刷产生的煤粉和应力改变引起煤岩破坏产生的煤粉 4 种。王旱祥等<sup>[29]</sup>和兰文剑<sup>[30]</sup>利用岩层破坏和地层出砂理论，对煤层气井排采过程中煤层被破坏的机理进行了探讨，认为煤粉产生的机理包括压实破坏、剪切破坏和滑移破坏 3 种，煤粉的产出与生产压差或抽排速度密切相关，较低的排采速度可以降低煤粉对煤储层渗透率的伤害。还有不少学者针对煤储层速敏伤害机理开展了相关实验研究<sup>[31-34]</sup>，如 Huang 等<sup>[34]</sup>开展了单相水流动条件下煤粉的启动运移实验，对裂缝内煤粉的产出规律进行了研究。

前人虽然对煤粉产出机理进行了研究，建立了煤粉启动运移模型，但由于忽略了真实煤粉颗粒形状不规则、分布不均匀等特征，在现场进行应用时部分

模型的预测结果与实际情况差异较大，还有部分模型由于求解较困难，使其在现场推广应用时面临困难；而且上述模型均未考虑流速的直接影响，但该因素对煤粉的产出影响较大。为此，笔者建立了考虑煤粉堵塞影响的煤储层渗透率模型，然后基于该模型对前人开展的室内煤样速敏实验数据进行了曲线拟合，求得各煤样的渗透率模型；在此基础上，将建立的煤储层渗透率模型引入到前期编制的煤层气井动态分析软件中，并进行了两口煤层气井的生产历史拟合；以其中一口煤层气井 W1 的拟合结果为基准，研究了煤粉堵塞参数对煤储层渗透率及煤层气井生产动态的影响。以期为煤层气井的产能预测和合理排采制度的确定提供理论支撑。

## 1 煤粉对煤储层渗透率的影响

### 1.1 煤粉产出、堵塞渗流通道的机理

煤层中产出的煤粉来源于煤层固有煤粉（煤岩中含有黏土矿物，其抗拉、抗压强度低，在地层流体冲刷作用及构造变形影响下将产生）和次生煤粉（在机械破坏、排采降压等工程因素诱导下形成）<sup>[10,22]</sup>。固有煤粉和次生煤粉在地层水的作用下运移至割理裂隙，最终被携带出井筒，或者在煤储层中发生聚集、沉降，进而导致渗流通道被堵塞。

煤储层储集空间是典型的双重介质孔隙系统，既有基质孔隙又有割理裂隙<sup>[35-37]</sup>，如图 1-a 所示。煤层气未采出时，煤储层割理裂隙充满了地层水<sup>[38-41]</sup>，煤层气主要以吸附态存在于基质孔隙表面，煤层中的固有煤粉以及由于前期射孔、压裂等工程措施而产生的少量次生煤粉附着于煤基质表面，或者游离在裂隙水中，如图 1-b 所示。

在煤层中流体被采出后，随着流速的变化，煤岩基质块和煤粉颗粒的受力情况发生改变，从而导致煤粉的产生与运移。针对煤储层中流体，存在着煤粉临界产出流速和煤粉临界堵塞流速。当流体速度较小时，煤粉颗粒所受拖曳力相对较小，附着的固有煤粉和少量次生煤粉不会脱落。随着生产压差增大，流体速度增大，当其大于煤粉临界产出流速时，煤粉受到的流体拖曳力大于其与煤岩基质块之间的黏附力，此时基质块表面附着的煤粉颗粒将脱落；同时，岩石因拉伸作用可能会产生破碎，进一步生成次生煤粉，如图 1-c 所示；这部分煤粉随着流体在储层渗流通道中运移，并被携带出井筒。若流体速度进一步增大，当其大于煤粉临界堵塞流速时，储层

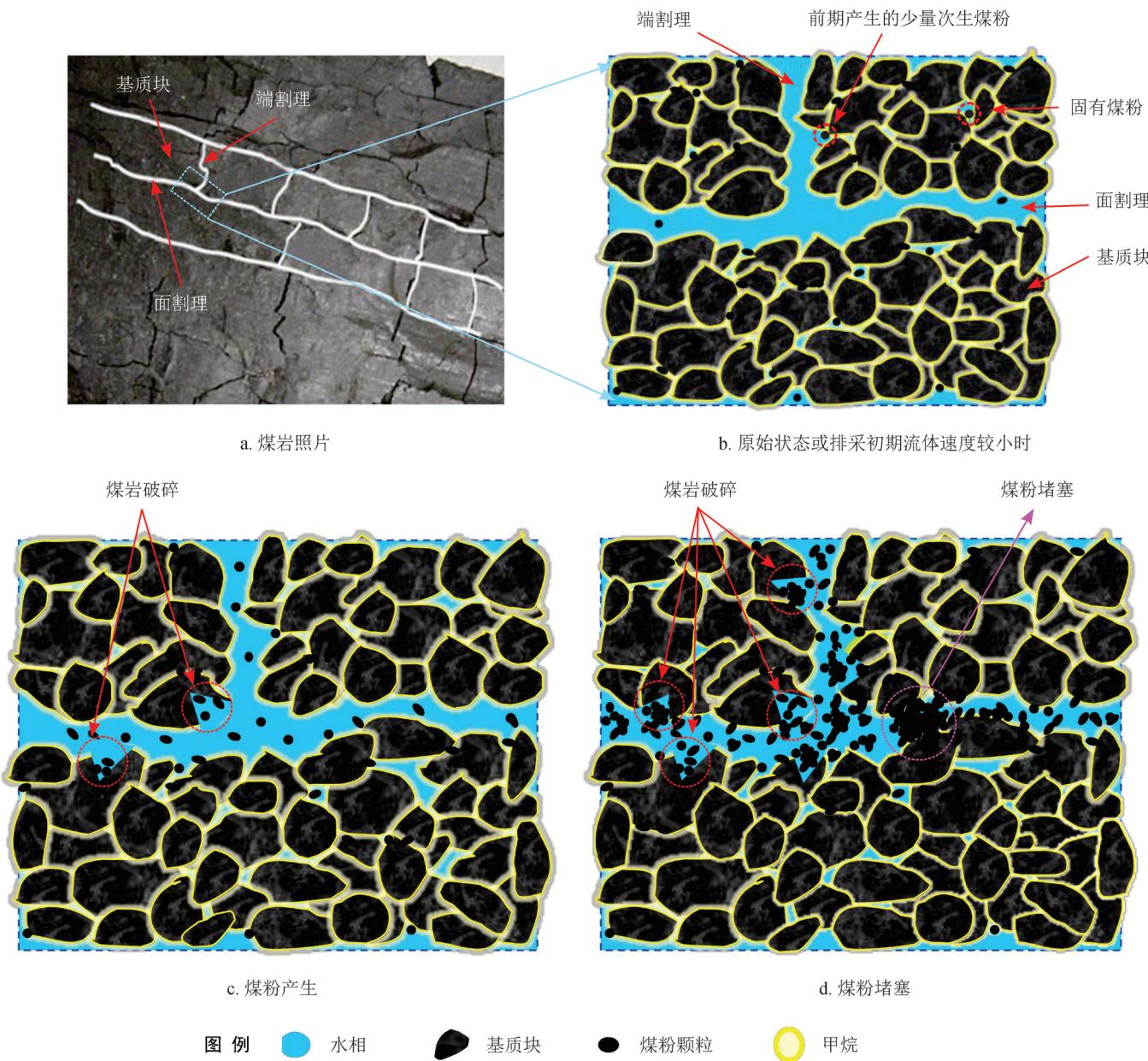
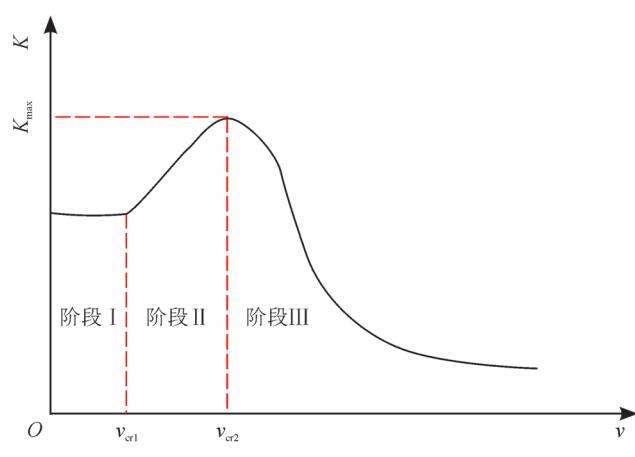


图 1 煤粉产出与堵塞渗流通道示意图

岩石在拖曳力和拉伸应力的双重作用下发生更严重的破碎,从而产生大量次生煤粉,如图 1-d 所示,由于大量煤粉在割理裂隙中聚集、沉降,使裂隙被堵塞,即发生煤粉堵塞现象。

## 1.2 煤储层渗透率随流体流速的变化规律

根据煤粉产出、堵塞渗流通道的机理,将煤储层渗透率随流体流速的变化过程划分为 3 个阶段,分别为渗透率稳定、上升和下降阶段,如图 2 所示,图中  $K$  表示煤储层渗透率,  $K_{\max}$  表示煤储层最大渗透率,  $v$  表示流体流速,  $v_{cr1}$  表示煤粉临界产出流速,  $v_{cr2}$  表示煤粉临界堵塞流速,阶段 I、II、III 分别对应渗透率稳定、上升和下降阶段。

图 2 煤储层  $K-v$  关系示意图

### 1.2.1 渗透率稳定阶段

当流体速度小于  $v_{cr1}$  时，煤层固有煤粉不脱落，且无次生煤粉产生，因此，此阶段煤储层渗透率随流速的增加基本不变。

### 1.2.2 渗透率增加阶段

当流体速度介于  $v_{cr1}$  和  $v_{cr2}$  之间时，煤层固有煤粉将脱落，同时部分煤岩基质块发生破碎，产出少量次生煤粉。这部分煤粉随流体在储层渗流通道中迁移，并被携带出井筒，由于该过程对于流体渗流通道具有疏通作用，从而使煤储层渗透率呈上升趋势。

### 1.2.3 渗透率下降阶段

当流体速度大于  $v_{cr2}$  时，煤储层岩石发生严重破坏，大量次生煤粉将产生。由于大量煤粉在水中聚集、沉降，割理裂隙被堵塞，进而导致煤储层渗透率降低。

不同地区煤样的流速敏感性评价实验<sup>[42-45]</sup>也表明煤储层渗透率随流速的变化规律与图 2 中曲线的变化趋势比较吻合。值得注意的是，渗透率增加阶段流速的变化范围相对较小，并且渗透率的增加不明显，而在渗透率下降阶段，流体流速越大，煤粉堵塞渗流通道的现象越严重，渗透率受损害的程度也越大。为此，笔者此次主要针对渗透率下降阶段，研究煤粉堵塞对煤储层渗透率的影响。

## 2 考虑煤粉堵塞影响的煤储层渗透率模型

### 2.1 模型的建立

针对流体的流动速度 ( $v$ ) 大于  $v_{cr2}$  以后的煤储层渗透率下降阶段(阶段III)，定义渗透率损害率( $D$ )，即

$$D = \frac{K_{\max} - K}{K_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $K_{\max}$  表示煤岩最大渗透率，mD； $K$  表示不同  $v$  对应的渗透率，mD。

分析渗透率损害率 ( $D$ ) 随相对流速 ( $v - v_{cr2}$ ) 的变化规律，如图 3 所示，当  $v$  大于  $v_{cr2}$  以后，将发生煤粉堵塞现象，使得  $K$  逐渐下降， $D$  逐渐增大，且随着相对流速的增加， $D$  的变化趋势呈现先快速上升、后逐渐趋于平缓的特点。

上述变化规律可以借鉴 Langmuir 方程的形式来进行表征，并引入了渗透率损害率指数 ( $n$ )，如式 (2) 所示。笔者将  $v_{cr2}$ 、 $D_{\max}$ 、 $v_{0.5}$  及  $n$  四个参数称为煤粉堵塞参数。

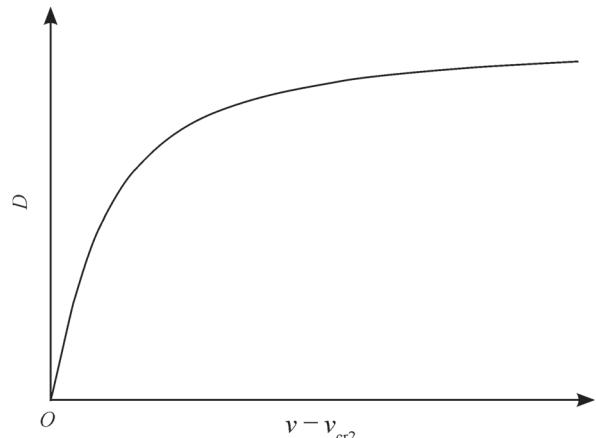


图 3 煤储层  $D$  与相对流速 ( $v - v_{cr2}$ ) 关系示意图

$$D = \frac{D_{\max} (v - v_{cr2})^n}{v_{0.5}^n + (v - v_{cr2})^n} \quad (2)$$

式中  $D_{\max}$  表示理论最大渗透率损害率； $v$  表示流速，cm/s； $v_{cr2}$  表示实验中与  $K_{\max}$  对应的流速，cm/s； $v_{0.5}$  表示  $0.5D_{\max}$  对应的相对流速，cm/s； $n$  表示渗透率损害率指数，无因次。

联立式 (1)、(2)，得到渗透率在下降阶段的计算式，即

$$K = K_{\max} \left[ 1 - \frac{D_{\max} (v - v_{cr2})^n}{v_{0.5}^n + (v - v_{cr2})^n} \right] \quad (3)$$

定义无因次速度，其计算式为：

$$\nu_D = \frac{v - v_{cr2}}{v_{0.5}} \quad (4)$$

则式 (2) 变形为：

$$D = \frac{D_{\max} \left( \frac{v - v_{cr2}}{v_{0.5}} \right)^n}{1 + \left( \frac{v - v_{cr2}}{v_{0.5}} \right)^n} = \frac{D_{\max} \nu_D^n}{1 + \nu_D^n} \quad (5)$$

### 2.2 煤粉堵塞参数的确定

将式 (2) 作如下变形：

$$\frac{1}{D} = \frac{v_{0.5}^n}{D_{\max}} \frac{1}{(v - v_{cr2})^n} + \frac{1}{D_{\max}} \quad (6)$$

然后，设置中间变量  $M$ 、 $N$ ，则式(6)转变为式(7)，即

$$\frac{1}{D} = M \frac{1}{(v - v_{cr2})^n} + N \quad (7)$$

其中

$$M = \frac{v_{0.5}^n}{D_{\max}}$$

$$N = \frac{1}{D_{\max}}$$

首先, 根据煤样速敏实验数据来确定  $v_{cr2}$ ; 然后, 假设一个  $n$  的初值, 并计算相应的  $\frac{1}{(v - v_{cr2})^n}$  和  $\frac{1}{D}$ , 对  $\frac{1}{(v - v_{cr2})^n} - \frac{1}{D}$  的关系曲线进行线性拟合, 同时在一定范围内调整  $n$ , 使拟合误差尽量小。

利用拟合直线的斜率 ( $M$ ) 和截距 ( $N$ ), 计算得到  $D_{\max}$  和  $v_{0.5}$ , 如式(8)、(9)所示, 然后代入式(3), 则可以得到渗透率 ( $K$ ) 下降阶段的计算式。

$$D_{\max} = \frac{1}{N} \quad (8)$$

$$v_{0.5} = \left( \frac{M}{N} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

### 3 模型的验证

#### 3.1 不同区块煤样的速敏实验

基于前人取得的煤样速敏实验结果<sup>[42-46]</sup>, 分析煤样渗透率流体随流速的变化规律, 并确定  $v_{cr2}$ 。

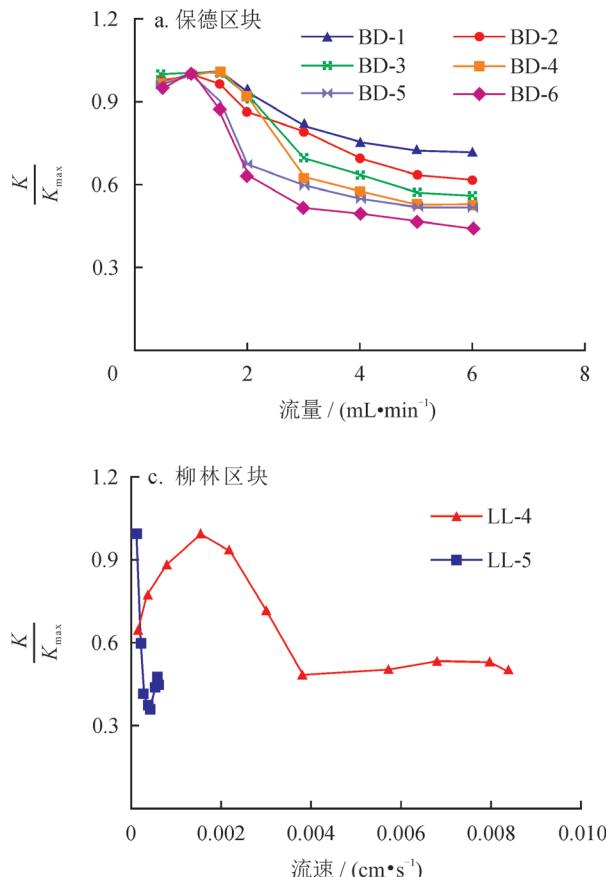
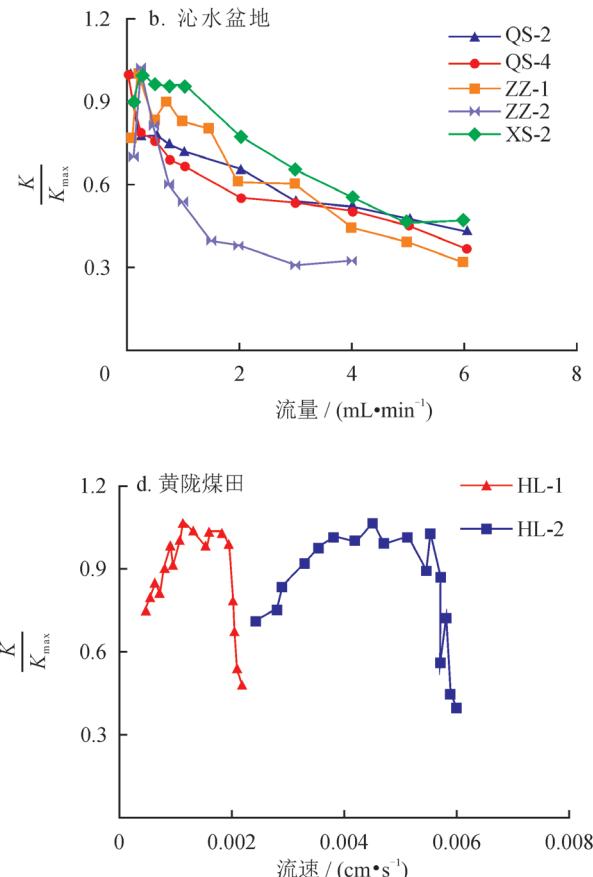


图4 不同区块煤样  $\frac{K}{K_{\max}}$  随流量、流速变化曲线图

如图4-a所示, 6块保德区块煤样发生速敏的临界流量介于1~1.5 mL/min, 其中BD-1、BD-2、BD-3、BD-4煤样渗透率前期较稳定、后期逐渐降低, BD-5、BD-6煤样的渗透率前期小幅度升高而后逐渐降低。如图4-b所示, 沁水盆地QS-2、QS-4煤样渗透率随着流量增加而下降, 且前期变化趋势较陡, 后期相对平缓; 而ZZ-1、ZZ-2煤样渗透率均随流量的增加呈现先上升后降低的变化趋势, 两个煤样发生速敏的临界流量为0.25 mL/min; 当流量小于1.0 mL/min时, XS-2煤样渗透率随流量增加而小幅上升, 当流量大于1.0 mL/min, 煤样渗透率随流量增加而下降。如图4-c所示, 柳林区块LL-4煤样渗透率随流速增加呈现上升—降低—稳定的趋势; 该区块LL-5煤样渗透率随流速增加则呈现先快速下降而后基本稳定的变化趋势。如图4-d所示, 黄陵煤田低阶煤样HL-1和HL-2的渗透率随流速增加呈现上升—稳定—下降的变化趋势, 且流速的变化范围相对较小。

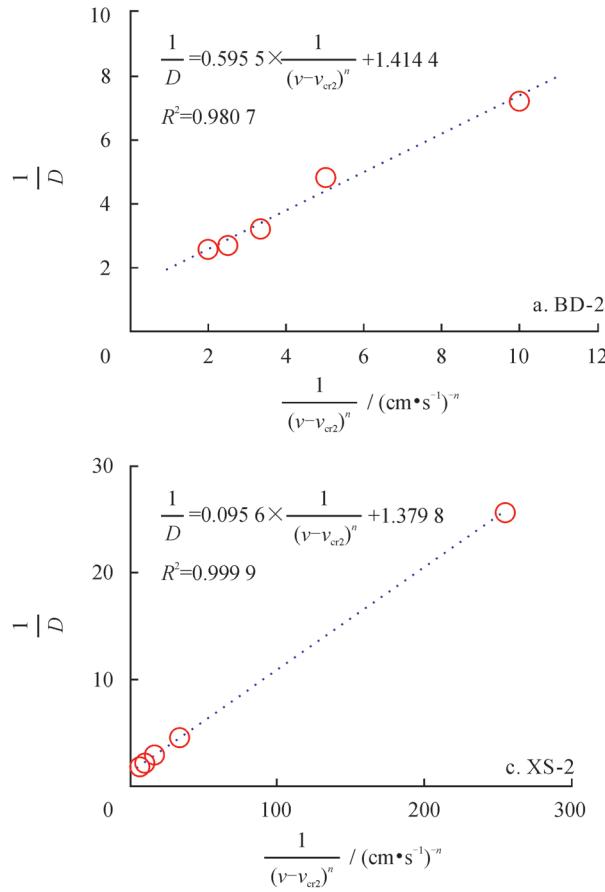
#### 3.2 煤粉堵塞参数的拟合与分析

根据上述煤样渗透率随流速或流量的变化趋



势可以看出, 前期渗透率稳定阶段和渗透率增加阶段出现在部分煤样中, 并且这两个阶段对应的流速或流量的变化范围相对较小, 渗透率增加的幅度也相对较小; 而渗透率下降阶段普遍存在于各组煤样的速敏实验结果中, 且多数煤样渗透率下降的幅度都大于 50%, 说明煤粉堵塞对渗透率的影响更大。

基于本文所建立的模型, 对各组煤样实验数据进行了曲线拟合(图 5),  $R^2$  均超过 95% (表 1), 模型计算结果与实验数据基本都吻合, 证实所建立的渗透率模型可靠, 可以较准确地拟合煤样渗透率随流速增大而下降的变化趋势。如表 1 所示, 保德区块 BD-1、BD-2、BD-3、BD-4 煤样的  $v_{cr2}$  相对较大, 平均为 0.126 cm/s, 而  $D_{max}$  较小, 平均为 65.87%, 说明该区块煤储层渗透率受煤粉堵塞的影响相对较小; 沁水盆地煤样的  $v_{cr2}$  小, 平均为 0.01 cm/s, 而  $D_{max}$  大, 平均为 82.48%, 说明煤粉堵塞对于该盆地煤储层渗透率的影响不可忽视; 黄陇煤田煤样的  $v_{cr2}$  更小, 平均仅为 0.003 6 cm/s, 说明该煤田煤储层渗透率受煤粉堵塞的影响更大。



#### 4 模型在煤层气井生产历史拟合中的应用

为准确拟合并预测煤层气井的生产动态, 前期已经建立了综合考虑应力敏感效应、基质收缩效应、裂缝中发生流体变质量流以及裂缝导流能力递减影响的压裂直井产能方程, 并借助 MATLAB 平台编制了煤层气井动态分析软件<sup>[47]</sup>。笔者此次将建立的渗透率模型引入到该软件中, 然后用于煤层气井生产历史的拟合。

将煤层气井的压力数据输入改进的煤层气井动态分析软件, 进行煤层气井生产历史拟合, 通过调整煤储层物性参数和煤粉堵塞参数, 使煤层气井的生产历史获得较好的拟合效果, 从而保证调整后的煤储层物性参数和煤粉堵塞参数较可靠。

以韩城区块 W1 井和保德区块 W2 井为例来展示考虑煤粉堵塞影响的煤层气井生产历史拟合结果。这两口煤层气井生产时间均在 2 000 d 左右。W1 井在见套压前和憋套压阶段水质清澈, 而在初产气阶段, 水色变黑, 大量煤粉产出, 需要在历史拟合过程中考虑煤粉的影响。W2 井生产前期和中期产水量相对较高, 水色基本为清, 后期间歇出水, 水色微黑一黑,

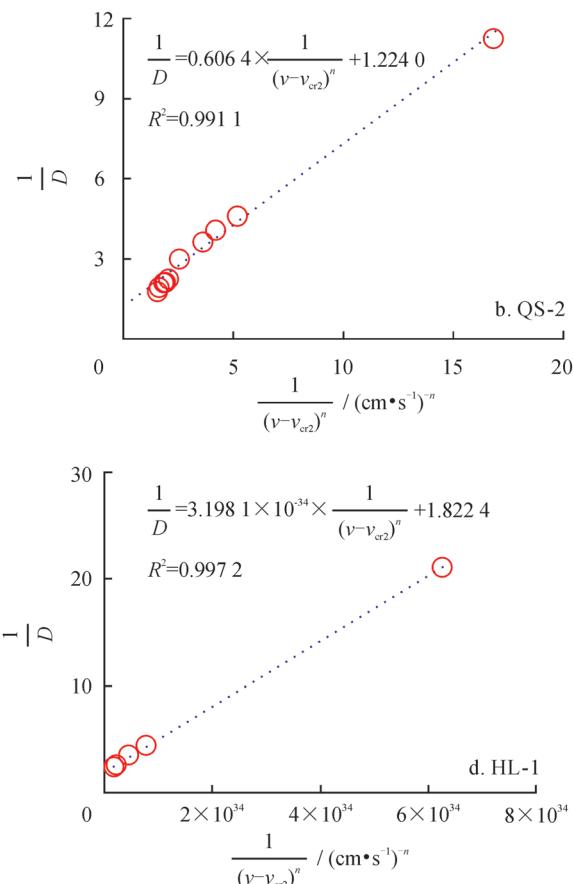


图 5 部分煤样速敏实验数据曲线拟合结果图

表 1 基于煤样速敏实验数据拟合的煤粉堵塞参数表

煤样编号	$K_{\max}$ /mD	$v_{cr2}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$n$	$D_{\max}$	$v_{0.5}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2$
BD-1	2.934 0	0.138 2	1.60	32.50%	0.106 4	0.999 9
BD-2	3.232 0	0.100 3	1.00	70.70%	0.421 0	0.980 7
BD-3	3.765 0	0.113 3	0.80	67.98%	0.142 7	0.984 2
BD-4	4.346 0	0.150 4	1.20	92.28%	0.336 4	0.997 9
BD-5	6.263 0	0.050 1	0.80	61.43%	0.043 1	0.996 1
BD-6	6.683 0	0.050 0	1.60	57.05%	0.035 0	0.994 2
QS-2	0.446 5	0.005 6	0.48	81.73%	0.231 6	0.991 1
QS-4	0.386 9	0.003 6	0.48	99.13%	0.295 2	0.958 6
XS-2	0.496 6	0.016 9	1.60	72.48%	0.188 5	0.999 9
ZZ-1	3.248 0	0.011 6	1.20	85.86%	0.141 5	0.973 2
ZZ-2	0.790 7	0.012 8	1.20	73.21%	0.023 8	0.978 2
LL-4	2.796 0	0.001 6	1.40	55.19%	1.247 0	0.972 0
LL-5	0.094 2	0.000 1	2.00	68.56%	0.064 1	0.994 7
HL-1	1.712 0	0.001 6	10.00	54.87%	0.000 4	0.997 2
HL-2	6.953 0	0.005 6	2.30	94.72%	0.000 3	0.988 4

说明同样存在煤粉的问题。将这两口井的实际井底流压和套压数据输入编制的煤层气井动态分析软件，分别采用考虑和不考虑煤粉堵塞效应的渗透率模型来拟合日产气量，如图 6 所示，若不考虑煤粉堵塞效应的影响，在合理范围内多次调整煤储层物性参数，拟合效果均不佳，而考虑煤粉堵塞效应的影响后，拟合的日产气、累计产气曲线与实际产气曲线基本吻合，进而验证了本文所建立的考虑煤粉堵塞影响的煤储层渗透率模型可靠。由于拟合过程中考虑了应力敏感效应，设置渗透率变化指数（单位孔隙压力下的渗透率变化率）是煤岩有效孔隙体积压缩系数的 3 倍，因此只需要对原始状态下的渗透率进行调整，拟合后确定的煤储层参数和煤粉堵塞参数如表 2 所示。韩城区块 W1 井的  $v_{cr2}$  为 2.0 m/d，远小于保德区块 W2 井的  $v_{cr2}$  (14.5 m/d)，说明韩城区块 W1 井的生产动态受煤粉堵塞的影响更严重。

## 5 煤粉堵塞参数对煤储层渗透率及煤层气井生产动态的影响

为了研究不同煤粉堵塞参数对煤储层渗透率及煤层气井生产动态的影响，以韩城区块 W1 井生产历史拟合后得到的储层参数和 4 个煤粉堵塞参数为基础，将煤粉堵塞参数值进行上下浮动，各自再另取

两个数值（表 3），然后对 W1 井的生产动态进行模拟，模拟时间为 3 000 d，对井底压力( $p_w$ )的设置如图 7 所示。

### 5.1 $v_{cr2}$ 的影响

设置  $v_{cr2}$  分别为 0.5 m/d、2.0 m/d、20.0 m/d，其他 3 个参数  $D_{\max}$ 、 $v_{0.5}$  和  $n$  取 W1 井历史拟合后的数值 ( $D_{\max}$  取值为 0.90,  $v_{0.5}$  取值为 5.0 m/d,  $n$  取值为 1.2)，不同  $v_{cr2}$  下  $K-v$  的关系曲线如图 8-a 所示，当  $v$  大于  $v_{cr2}$  后， $K$  则开始下降，并且  $v_{cr2}$  越小， $K$  越容易受到煤粉堵塞的影响。对不同  $v_{cr2}$  取值条件下 W1 井的生产动态进行模拟，如图 8-b 所示， $v_{cr2}$  越大，日产气量峰值越高，累计产气量越大。当  $v_{cr2}$  等于 20.0 m/d 时，煤层中流体流速超过该数值难，因此煤层中不易发生煤粉堵塞现象，煤储层渗透率仅受到应力敏感的影响而下降。 $v_{cr2}$  等于 0.5 m/d 时，由于煤层中流体流速很容易超过该数值，大量煤粉产生，进而堵塞渗流通道，造成渗透率下降严重，使得煤层气井日产气量峰值与累计产气量大幅降低。W1 井拟合后的  $v_{cr2}$  等于 2.0 m/d，临界堵塞流速已较低，对应的产气曲线和渗透率变化曲线与  $v_{cr2}$  等于 0.5 m/d 时很接近，说明该井的储层渗透率很容易受到煤粉堵塞的影响。因此，对于  $v_{cr2}$  较小的煤储层，需特别注意控制排采速度，尽量减小煤粉堵塞渗流通道对煤储层渗透率的伤害。

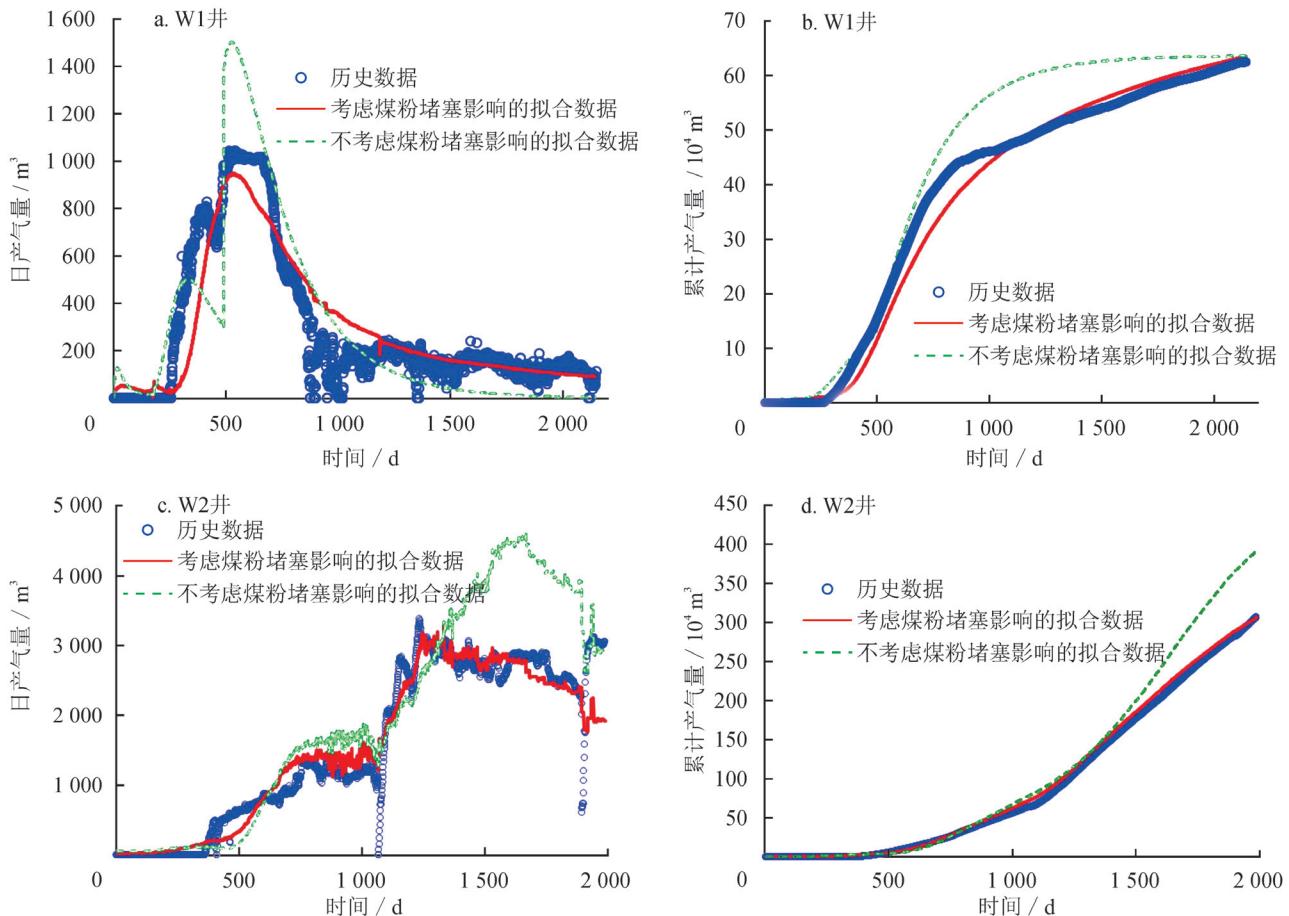


图6 W1、W2井日产气量、累计产气量拟合结果图

## 5.2 $D_{\max}$ 的影响

设置  $D_{\max}$  分别为 0.50、0.90、0.99，其他 3 个参数  $v_{cr2}$ 、 $v_{0.5}$  和  $n$  取 W1 井拟合后的数值 ( $v_{cr2}$  取值为 2.0 m/d,  $v_{0.5}$  取值为 5.0 m/d,  $n$  取值为 1.2)，不同  $D_{\max}$  下  $K-v$  的关系曲线如图 9-a 所示，整体表现为在  $v$  相同的情况下， $D_{\max}$  越大， $K$  越低。对不同  $D_{\max}$  取值条件下 W1 井的生产动态进行模拟，如图 9-b 所示， $D_{\max}$  越大，日产气量早期峰值越低，累计产气量也越小。

## 5.3 $v_{0.5}$ 的影响

设置  $v_{0.5}$  分别为 1.0 m/d、5.0 m/d 和 10.0 m/d，其他 3 个参数  $v_{cr2}$ 、 $D_{\max}$  和  $n$  取 W1 井拟合后的数值 ( $v_{cr2}$  取值为 2.0 m/d,  $D_{\max}$  取值为 0.90,  $n$  取值为 1.2)，不同  $v_{0.5}$  下  $K-v$  的关系曲线如图 10-a 所示，当  $v$  大于  $v_{cr2}$  (2.0 m/d) 以后，在  $v$  相同的情况下， $v_{0.5}$  越小， $K$  越低。因此，煤粉堵塞现象产生后， $v_{0.5}$  越小，煤储层渗透率的下降程度越大，日产气量早期峰值越低，累计产气量也越小 (图 10-b)。W1 井拟合后的  $v_{0.5}$  等于 5.0 m/d，其对应的渗透率变化曲线和产气曲

线介于  $v_{0.5}$  等于 1.0 m/d 和 10 m/d 对应曲线的中间偏上，说明受到煤粉堵塞影响之后，W1 井渗透率下降的程度中等偏小，通过对该井的排采制度进行及时调整，还可以进一步减轻煤粉堵塞产生的不利影响。

## 5.4 $n$ 的影响

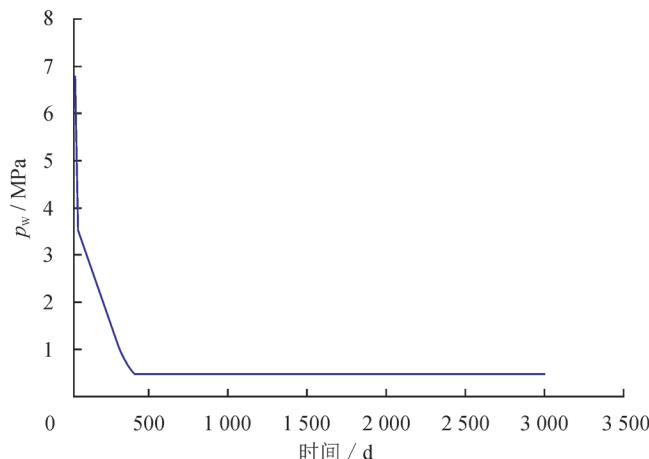
设置  $n$  分别为 0.8、1.2 和 5.0，其他 3 个参数  $v_{cr2}$ 、 $D_{\max}$  和  $v_{0.5}$  取 W1 井拟合后的数值 ( $v_{cr2}$  取值为 2.0 m/d,  $D_{\max}$  取值为 0.90,  $v_{0.5}$  取值为 5.0 m/d)，不同  $n$  下  $K-v$  的关系曲线如图 11-a 所示， $n$  越大，煤层气井在流体相对流速等于  $v_{0.5}$  (对应图 11-a 中  $K-v$  关系曲线  $v$  等于 7.0 m/d 处) 时渗透率下降得越急剧。对不同  $n$  取值条件下 W1 井的生产动态进行模拟，如图 11-b 所示， $n$  越大，日产气量、累计产气量越小，产气峰值出现的时间也越早。这是由于  $v_{cr2}$  相同，则发生煤粉堵塞现象的时间一致，但是由于  $n$  越大，煤层气井在流体相对流速等于  $v_{0.5}$  时渗透率下降幅度越大，从而导致煤层气井日产气量递减越早且越低，累计产气量则越低。

表2 拟合后的煤储层参数及煤粉堵塞参数统计表

参数	数值	
	W1井	W2井
埋深 /m	829.00	878.75
原始地层压力 /MPa	6.80	7.90
地层温度 /°C	35.0	29.8
厚度 /m	6.0	10.5
井控半径 /m	100	200
孔隙度	3.0%	5.5%
煤岩有效孔隙体积压缩系数 /MPa <sup>-1</sup>	0.045	0.022
地层水压缩系数 /10 <sup>-3</sup> MPa <sup>-1</sup>	0.435	0.435
气体比重	0.552	0.552
地层水黏度 /(mPa · s)	1.00	1.00
原始状态渗透率 /mD	1.0	4.4
渗透率变化指数 /MPa <sup>-1</sup>	0.135 0	0.065 6
临界解吸压力 /MPa	3.20	4.50
Langmuir 压力 /MPa	4.1	4.3
Langmuir 体积 /(m <sup>3</sup> · t <sup>-1</sup> )	10.00	11.11
煤岩密度 /(t · m <sup>-3</sup> )	1.50	1.35
压裂裂缝半长 /m	60	70
裂缝导流能力 / (mD · m)	200	300
$v_{cr2}/(m \cdot d^{-1})$	2.0	14.5
$D_{max}$	0.90	0.75
$v_{0.5}/(m \cdot d^{-1})$	5	6
$n$	1.2	1.6

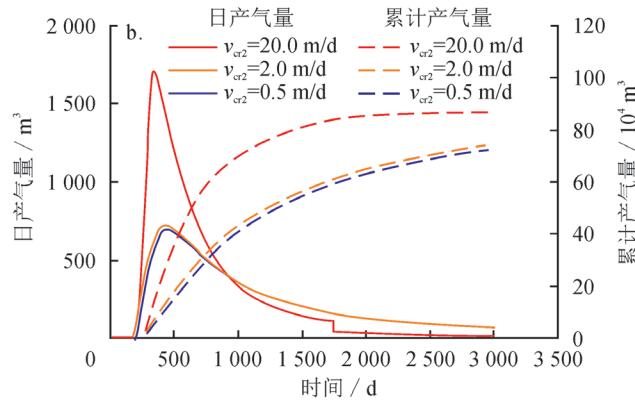
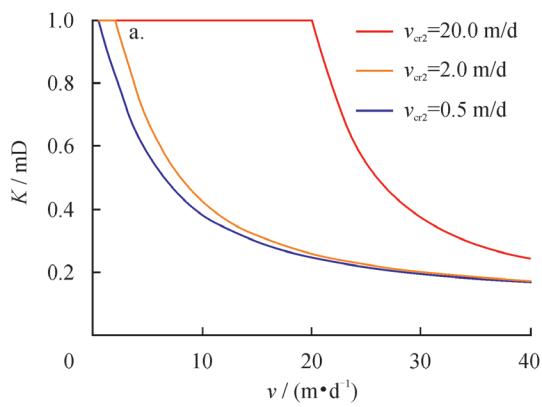
表3 煤粉堵塞参数取值表

参数	取值
$v_{cr2}/(m \cdot d^{-1})$	0.5
$D_{max}$	0.50
$v_{0.5}/(m \cdot d^{-1})$	1.0
$n$	0.8
	2.0
	20.0
	0.90
	0.99
	5.0
	10.0
	1.2
	5.0

图7 W1井  $p_w$  变化曲线图

## 6 结论

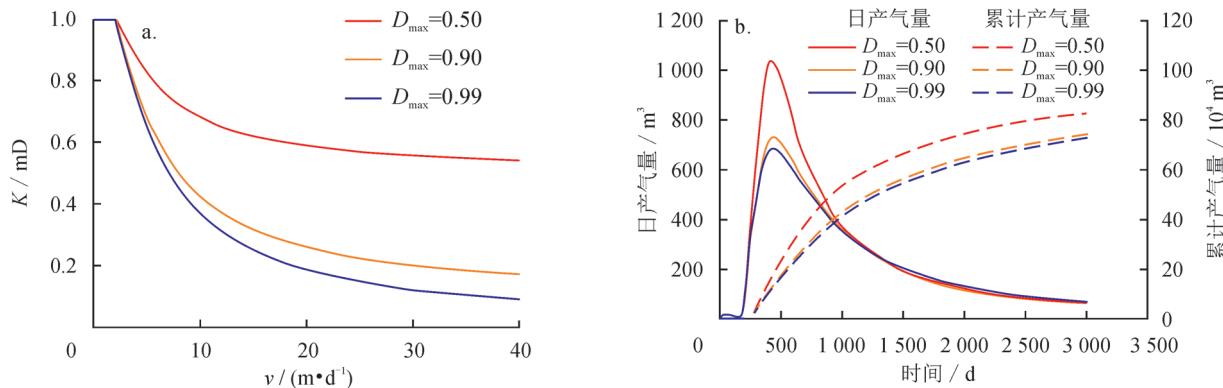
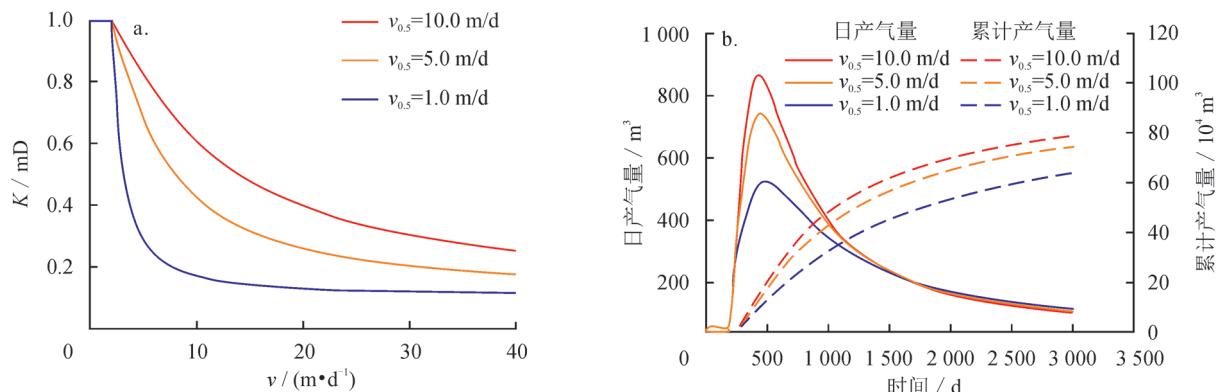
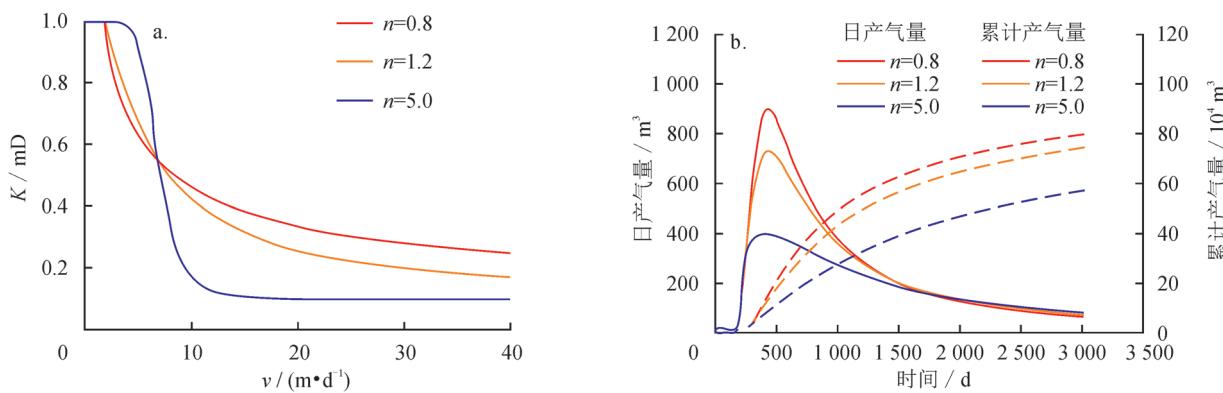
1) 所建立的考虑煤粉堵塞影响的煤储层渗透率模型包含了  $v_{cr2}$ 、 $D_{max}$ 、 $v_{0.5}$  及  $n$  四个煤粉堵塞参数, 可以定量描述煤储层渗透率随流体流速的变化, 该模型可以嵌入到煤层气数值模拟软件或气井动态分析软件中, 应用范围广。

图8 不同  $v_{cr2}$  下煤储层  $K-v$  及气井日产气量、累计产气量变化曲线图

2) 通过对保德区块、沁水盆地、柳林区块、黄陇煤田 15 组煤样的速敏实验数据进行曲线拟合, 结果显示保德区块煤储层渗透率受煤粉堵塞的影响相对较小, 而对于沁水盆地、黄陇煤田煤粉堵塞对煤

储层渗透率的影响不可忽视。

3)  $v_{cr2}$  表征了煤储层渗透率受煤粉堵塞影响的容易程度,  $D_{max}$ 、 $v_{0.5}$ 、 $n$  则分别表征煤粉堵塞影响下渗透率的最终损害程度、渗透率整体下降程度和  $0.5D_{max}$

图9 不同  $D_{\max}$  下煤储层  $K-v$  及气井日产气量、累计产气量变化曲线图图10 不同  $v_{0.5}$  下煤储层  $K-v$  及气井日产气量、累计产气量变化曲线图图11 不同  $n$  下煤储层  $K-v$  及气井日产气量、累计产气量变化曲线图

对应的渗透率下降急剧程度。 $v_{cr2}$  和  $v_{0.5}$  越小、 $D_{\max}$  和  $n$  越大，煤粉堵塞对储层渗透率的影响越显著。

4) 为减小煤粉堵塞对煤层气井产能的不利影响，在采排过程中，尤其是产气初期，要适当减小生产压差，以避免对煤储层渗透率造成恶性伤害。

## 参 考 文 献

[1] SOMERTON W H, SÖYLEMEZOĞLU I M, DUDLEY R C.

Effect of stress on permeability of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(5/6): 129-145.

[2] 孟召平, 侯泉林. 高煤级煤储层渗透性与应力耦合模型及控制机理 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 667-675.

MENG Zhaoping, HOU Quanlin. Coupling model of stress-dependent permeability in high-rank coal reservoir and its control mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2): 667-675.

[3] 李相臣, 康毅力, 罗平亚. 煤层气储层变形机理及对渗流能力的影响研究 [J]. 中国矿业, 2009, 18(3): 99-102.

- LI Xiangchen, KANG Yili, LUO Pingya. Rock deformation mechanisms and its influence on percolation ability for CBM reservoirs[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(3): 99-102.
- [4] 袁哲, 刘鹏程. 有效应力和气体滑脱对煤渗透率影响研究 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(7): 174-175.
- YUAN Zhe, LIU Pengcheng. Research on effect of effective stress and gas slippage on permeability of coal[J]. Coal Technology, 2016, 35(7): 174-175.
- [5] GRAY I. Reservoir engineering in coal seams: Part 1—The physical process of gas storage and movement in coal seams[J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 2(1): 28-34.
- [6] 傅雪海, 李大华, 秦勇, 等. 煤基质收缩对渗透率影响的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 129-131.
- FU Xuehai, LI Dahua, QIN Yong, et al. Experimental research of influence of coal matrix shrinkage on permeability[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(2): 129-131.
- [7] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquid and gases[C]//Drilling and Production Practice, 1 January 1941, New York, New York, USA.
- [8] 肖晓春, 潘一山. 滑脱效应影响的低渗煤层气运移实验研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1554-1558.
- XIAO Xiaochun, PAN Yishan. Experimental study of gas transusion with slippage effects in hypotonic coal reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1554-1558.
- [9] 夏鹏, 曾凡桂, 吴婧, 等. 中煤阶煤层气井排采阶段划分及渗透率变化 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2018, 40(6): 115-123.
- XIA Peng, ZENG Fangui, WU Jing, et al. Division of different drainage and production stages of medium-rank coalbed methane wells and the change in permeability[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018, 40(6): 115-123.
- [10] 陈振宏, 王一兵, 孙平. 煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 229-232.
- CHEN Zhenhong, WANG Yibing, SUN Ping. Destructive influences and effectively treatments of coal powder to high rank coalbed methane production[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 229-232.
- [11] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October 1996, Denver, Colorado, USA.
- [12] 陈振宏, 陈艳鹏, 杨焦生, 等. 高煤阶煤层气储层动态渗透率特征及其对煤层气产量的影响 [J]. 石油学报, 2010, 31(6): 966-969.
- CHEN Zhenhong, CHEN Yanpeng, YANG Jiaosheng, et al. Reservoir dynamic permeability of high rank coalbed methane and its effect on the coalbed methane output[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 966-969.
- [13] LIN Wenjuan, TANG Guoqing. Sorption-induced permeability change of coal during gas-injection processes[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 11-14 November 2007, Anaheim, California, USA.
- [14] SHI Jiquan, DURUCAN S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(4): 291-299.
- [15] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2009, 31(1): 4-8.
- ZHOU Junping, XIAN Xuefu, JIANG Yongdong, et al. A permeability model considering the effective stress and coal matrix shrinking effect[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(1): 4-8.
- [16] 艾池, 栗爽, 李净然, 等. 煤岩储层渗透率动态变化模型 [J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 71-73.
- AI Chi, LI Shuang, LI Jingran, et al. Model of dynamic permeability variation of coal seam[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 71-73.
- [17] 陈亚西. 煤层气开发过程中储层渗透率动态变化及合理排采速度分析 [D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- CHEN Yaxi. Dynamic permeability change during coalbed methane production and reasonable drainage speed analysis[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [18] ZHU Suyang, PENG Xiaolong, DU Zhimin, et al. Modeling of coal fine migration during CBM production in high-rank coal[J]. Transport in Porous Media, 2017, 118: 65-83.
- [19] 曹代勇, 袁远, 魏迎春, 等. 煤粉的成因机制——产出位置综合分类研究 [J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(1): 10-12.
- CAO Daiyong, YUAN Yuan, WEI Yingchun, et al. Comprehensive classification study of coal fines genetic mechanism and origin site[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(1): 10-12.
- [20] 王旱祥, 兰文剑. 煤层气井煤粉产生机理探讨 [J]. 中国煤炭, 2012, 38(2): 95-97.
- WANG Hanxiang, LAN Wenjian. Discussion on formation mechanism of coal powder in coalbed methane well[J]. China Coal, 2012, 38(2): 95-97.
- [21] 皇凡生, 康毅力, 李相臣, 等. 单相水流诱发裂缝内煤粉启动机理与防控对策 [J]. 石油学报, 2017, 38(8): 947-954.
- HUANG Fansheng, KANG Yili, LI Xiangchen, et al. Incipient motion mechanisms and control measures of coal fines during single-phase water flow in coalbed fractures[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(8): 947-954.
- [22] 白建梅, 陈浩, 祖世强, 等. 煤层气多分支水平井煤粉形成机理初步认识 [C]//2010 年全国煤层气学术研讨会论文集. 全国煤层气学术研讨会, 苏州: 2010.
- BAI Jianmei, CHEN Hao, ZU Shiqiang, et al. CBM multi-branch horizontal wells pulverized coal formation mechanism[C]//National Symposium on Coalbed Methane, 1 September 2010, Suzhou, Jiangsu, China.
- [23] 张芬娜, 蓝耀光, 徐春成, 等. 煤粉对煤层气井产气通道的影响分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 428-435.
- ZHANG Fenna, QI Yaoguang, XU Chuncheng, et al. Analysis of the impact of gas production channel for coalbed methane well by pulverized coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 428-435.
- [24] 蓝耀光, 张芬娜, 刘冰, 等. 煤层气井产气通道内煤粉运动特征分析 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1627-1633.
- QI Yaoguang, ZHANG Fenna, LIU Bing, et al. Calculation on discharge flow of pulverized coal in gas production channel for coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1627-1633.
- [25] 魏迎春, 曹代勇, 袁远, 等. 韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1424-1429.
- WEI Yingchun, CAO Daiyong, YUAN Yuan, et al. Character-

- istics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1424-1429.
- [26] 姚征. 煤层气开发中固相微粒的成因机理与防治措施研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- YAO Zheng. Study on genetic mechanisms and control measures of solid fines in coalbed methane development[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2016.
- [27] 张遂安, 曹立虎, 杜彩霞. 煤层气井产气机理及排采控压控粉研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1927-1931.
- ZHANG Sui'an, CAO Lihu, DU Caixia. Study on CBM production mechanism and control theory of bottom-hole pressure and coal fines during CBM well production[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1927-1931.
- [28] 李仰民, 王立龙, 刘国伟, 等. 煤层气井排采过程中的储层伤害机理研究 [J]. 中国煤层气, 2010, 7(6): 39-43.
- LI Yangmin, WANG Lilong, LIU Guowei, et al. Study on coal reservoir damage mechanism in dewatering and extraction process of CBM wells[J]. China Coalbed Methane, 2010, 7(6): 39-43.
- [29] 王旱祥, 兰文剑, 刘延鑫, 等. 煤储层含煤粉流体流固耦合渗流数学模型 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 667-670.
- WANG Hanxiang, LAN Wenjian, LIU Yanxin, et al. Mathematical model of fluid-solid coupling percolation with coal powder in coal reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 667-670.
- [30] 兰文剑. 煤层气排采出煤粉机理研究及预测软件开发 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2013.
- LAN Wenjian. Study on production mechanism of coal powder in the CBM production and prediction software development[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2013.
- [31] 宋金星, 于世耀, 苏现波. 煤储层速敏伤害机理及防速敏试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 173-177.
- SONG Jinxing, YU Shiyao, SU Xianbo. Study on velocity sensitivity damage mechanism and its proof test of coal reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 173-177.
- [32] 杨延辉, 汤达祯, 杨艳磊, 等. 煤储层速敏效应对煤粉产出规律及产能的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 96-99.
- YANG Yanhui, TANG Dazhen, YANG Yanlei, et al. Influence on velocity sensitivity effect of coal reservoir to production law of pulverized coal and gas productivity[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 96-99.
- [33] BAI Tianhang, CHEN Zhongwei, AMINOSADATI S M, et al. Experimental investigation on the impact of coal fines generation and migration on coal permeability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 159: 257-266.
- [34] HUANG Fansheng, KANG Yili, YOU Zhenjiang, et al. Critical conditions for massive fines detachment induced by single-phase flow in coalbed methane reservoirs: Modeling and experiments[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(7): 6782-6793.
- [35] 冯文光. 煤层气藏工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- FENG Wenguang. Coalbed methane reservoir engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [36] 冯其红, 张先敏, 胡爱梅, 等. 煤层气藏工程 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2016.
- FENG Qihong, ZHANG Xianmin, HU Aimei, et al. Coalbed methane reservoir engineering[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2016.
- [37] 石军太, 李相方, 徐兵祥, 等. 煤层气解吸扩散渗流模型研究进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(12): 1548-1557.
- SHI Juntai, LI Xiangfang, XU Bingxiang, et al. Review on desorption-diffusion-flow model of coal-bed methane[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2013, 43(12): 1548-1557.
- [38] 胡爱梅, 陈东. 煤层气开采基础理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- HU Aimei, CHEN Dong. Basic theory of coalbed methane production[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [39] SUN Zheng, SHI Juntai, WANG Ke, et al. The gas-water two phase flow behavior in low-permeability CBM reservoirs with multiple mechanisms coupling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 52: 82-93.
- [40] 李相方, 石军太, 杜希瑶, 等. 煤层气藏开发降压解吸气运移机理 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 203-213.
- LI Xiangfang, SHI Juntai, DU Xiyao, et al. Transport mechanism of desorbed gas in coalbed methane reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 203-213.
- [41] 李相方, 蒲云超, 孙长宇, 等. 煤层气与页岩气吸附/解吸的理论再认识 [J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1113-1129.
- LI Xiangfang, PU Yunchao, SUN Changyu, et al. Recognition of absorption/desorption theory in coalbed methane reservoir and shale reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1113-1129.
- [42] TAO Shu, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Fluid velocity sensitivity of coal reservoir and its effect on coalbed methane well productivity: A case of Baode Block, northeastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 152: 229-237.
- [43] 孟召平, 侯安琪, 张鹏, 等. 沁水盆地典型煤矿区煤的流速敏感性实验及控制机理 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2649-2656.
- MENG Zhaoping, HOU Anqi, ZHANG Peng, et al. Experimental study on flow rate sensitivity of coal in typical coal mining area of Qinshui Basin and its control mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2649-2656.
- [44] 林鑫, 张士诚, 张劲, 等. 柳林煤层气储层敏感性评价实验 [J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(6): 28-31.
- LIN Xin, ZHANG Shicheng, ZHANG Jin, et al. Sensitivity evaluation experiment of Liulin CBM reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(6): 28-31.
- [45] 庞涛, 黄军平, 周越骑, 等. 低煤阶煤层气井排采初期压降幅度研究 [J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(3): 20-23.
- PANG Tao, HUANG Junping, ZHOU Yueqi, et al. Study on pressure drop extent during initial drainage stage in low rank coal CBM wells[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(3): 20-23.
- [46] 王诗琪, 赵冀川, 张春生. 沁南地区煤层气储层特征及敏感性评价 [J]. 能源化工, 2017, 38(5): 75-79.
- WANG Shiqi, ZHAO Jichuan, ZHANG Chunsheng. Characteristics and sensitivity evaluation of coalbed methane reservoir in Qinnan area[J]. Energy Chemical Industry, 2017, 38(5): 75-79.
- [47] SHI Juntai, HOU Chenhong, WANG Shan, et al. The semi-analytical productivity equations for vertically fractured coalbed methane wells considering pressure propagation process, variable mass flow, and fracture conductivity decrease[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 178: 528-543.

(修改回稿日期 2020-04-16 编辑 孔玲)