

地球科学与测绘



移动扫码阅读

宗 鹏, 侯 伟, 许 浩, 等. 煤储层压力变化规律模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 169-177.  
ZONG Peng, HOU Wei, XU Hao, *et al.* Simulation research of coal reservoir pressure variation law[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 169-177.

## 煤储层压力变化规律模拟研究

宗 鹏<sup>1,2</sup>, 侯 伟<sup>3</sup>, 许 浩<sup>1,2</sup>, 吴仕贵<sup>3</sup>, 赵天天<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 煤层气开发利用国家工程中心煤储层实验室, 北京 100083;  
3. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028)

**摘 要:** 准确量化储层压力的实时变化是预测储层孔渗变化特征、控制采气效果的关键因素。为了进一步探究保德地区煤储层压力动态变化特征及其对煤层气井产能的影响, 在考虑正负效应的影响下, 基于生产动态资料, 建立了煤储层压力实时模拟检测技术, 定量刻画了保德地区饱和煤层气藏和欠饱和煤层气藏煤储层压力动态变化规律。通过对比不同压降条件下的产能, 为生产提供预测依据和理论指导。在煤层气井开发过程中, 饱和煤层气藏平均储层压力呈线性下降, 以单井平均日产气量为选定标准, 压降速率分为快速降落型(大于 0.096 MPa/m)、适稳降落型(0.063 ~ 0.096 MPa/m)和缓慢降落型(小于 0.063 MPa/m), 适稳降落型(4 648 m<sup>3</sup>/d)压降制度煤层气井产能明显好于快速降落型(2 531 m<sup>3</sup>/d)和缓慢降落型(2 968 m<sup>3</sup>/d), 快速降落型煤层气井产能最低。欠饱和煤层气藏在开发初期单相水流阶段, 平均储层压力急速下降, 初期压降速率分为快速降落型(大于 0.38 MPa/m)、适稳降落型(0.228 ~ 0.38 MPa/m)和缓慢降落型(小于 0.228 MPa/m), 快速降落型(526 m<sup>3</sup>/d)压降制度煤层气井产能明显低于适稳降落型(1 021 m<sup>3</sup>/d)和缓慢降落型(1 054 m<sup>3</sup>/d); 随着储层压力降到临界解吸压力后, 为气、水两相流阶段, 储层压力呈线性缓慢下降。建议保德地区饱和煤层气藏初期压降速率维持在 0.063 ~ 0.096 MPa/m, 欠饱和煤层气藏初期压降速率不超过 0.38 MPa/m。

**关键词:** 保德地区; 煤层气; 储层孔渗; 煤储层压力; 压降速率

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)08-0169-09

### Simulation research of coal reservoir pressure variation law

ZONG Peng<sup>1,2</sup>, HOU Wei<sup>3</sup>, XU Hao<sup>1,2</sup>, WU Shigui<sup>3</sup>, ZHAO Tiantian<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Coal Reservoir Laboratory of National Engineering Research Center of Coalbed Methane Development & Utilization, Beijing 100083, China; 3. Petrochina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Accurately quantifying the real-time variation of reservoir pressure is the key factor to predict the variation characteristics of reservoir porosity and permeability and control the gas recovery effect. In order to further explore the characteristics of coal reservoir pressure dynamic variation in Baode area and its impact on the productivity of coalbed methane (CBM) wells, based on production dynamic data, a real-time simulation and detection technology of coal reservoir pressure was established while quantitatively described the pressure dynamics of saturated and unsaturated CBM reservoirs in Baode area, by considering the influence of positive and negative effects. By comparing the productivity under different pressure drop conditions, the prediction basis and theoretical guidance were provided for production. During the exploitation of CBM wells, the average reservoir pressure of saturated CBM reservoirs decreases linearly. Taking the average daily gas production of a single well as the selected standard, the pressure drop rate is divided into three types: fast falling type (more than 0.096 MPa/m), steady falling type (0.063 ~ 0.096 MPa/m) and slow falling type (less than 0.063 MPa/m). The productivity of

收稿日期: 2022-08-05 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0698

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42172188)

作者简介: 宗 鹏(1997—), 男, 天津人, 博士研究生。E-mail: 1191886901@qq.com

通讯作者: 许 浩(1979—), 男, 河北黄骅人, 教授, 博士。E-mail: xuhao600@163.com

CBM wells with steady-descent type (4 648 m<sup>3</sup>/d) pressure drop system is significantly better than that of fast-descent type (2 531 m<sup>3</sup>/d) and slow-descent type (2 968 m<sup>3</sup>/d). Fast-descent type CBM wells have the lowest productivity. In the single-phase water flow stage of the undersaturated coalbed methane reservoir in the early stage of development, the average reservoir pressure drops rapidly, and the pressure drop rate is divided into three types: fast falling type (more than 0.38 MPa/m), steady falling type (0.228—0.38 MPa/m) and slow falling type (less than 0.228 MPa/m). The productivity of CBM wells with fast-descent type (526 m<sup>3</sup>/d) pressure drop system is significantly lower than that of steady-descent type (1 021 m<sup>3</sup>/d) and slow-descent type (1 054 m<sup>3</sup>/d). As the reservoir pressure drops to the critical desorption pressure, the reservoir pressure decreases linearly and slowly in the gas-water two-phase flow stage. It is suggested that the initial pressure drop rate of saturated CBM reservoirs should be maintained at 0.063 ~ 0.096 MPa/m, and the initial pressure drop rate of unsaturated CBM reservoirs should not exceed 0.38 MPa/m in Baode area.

**Key words:** Baode Area; Coalbed Methane; reservoir porosity and permeability; coal reservoir pressure; pressure drop rate

## 0 引言

煤层气开发是一个集排水、降压、解吸、扩散、渗流、产出的综合过程<sup>[1]</sup>。煤层气藏储层压力对煤层的含气量、气体赋存状态有着重要影响,同时也是气体和水从裂隙向井筒流动的能量<sup>[2]</sup>。根据相对含气量的不同,煤层气藏可以分为饱和煤层气藏和欠饱和煤层气藏。饱和煤层气藏,原始储层压力小于临界解吸压力,排采初期即为气、水两相流阶段,随着储层压力降低,吸附气体不断发生解吸,地层中的水通过储层的孔隙-裂缝网络系统扩散、渗流至井筒;欠饱和煤层气藏,原始储层压力大于临界解吸压力,临界解吸压力前,煤层气尚未发生解吸,为单相水流阶段,当储层压力降到临界解吸压力以下,变为气、水两相流阶段。在排采过程中,随着储层压力的降低,由于正负效应的影响,储层的物性参数会发生动态变化。一方面,储层压力降落,有效应力增大,对储层造成伤害,孔隙率降低,绝对渗透率降低;同时,煤基质收缩,孔隙率增大,绝对渗透率改善<sup>[3-5]</sup>。因此,准确量化储层压力的实时变化是预测储层孔渗变化特征、控制采气效果的关键因素。

当前煤储层压力预测方法主要有试井分析、数值模拟和压降漏斗解析模型等。景兴鹏<sup>[2]</sup>通过注入压降试井方法确定煤储层压力;蔡振华等<sup>[6]</sup>将不稳定试井原理与生产动态相结合,利用典型曲线拟合的方法实现不关井条件下反演出煤储层压力;试井分析法只能对生产了很长时间或大量产气后的煤层气井进行测试。在开发机理的基础上,ZOU等<sup>[7]</sup>通过ARI数值模拟技术实现煤层气开采过程中,储层压力的变化预测;郭春华等<sup>[8]</sup>利用三维双重孔隙介质多组分模拟器分析了考虑应力敏感性的煤层气井压降特征;刘升贵等<sup>[9]</sup>利用CBM-Sim软件探究煤层气水平井压降漏斗扩展规律;数值模拟方法没有基于生产动态资料,只能根据煤储层数据参数进行模拟,需要繁琐的历史拟合。葛静涛等<sup>[10]</sup>通过气相、液相渗流扩散方程和煤层气渗流方程耦合,得到了

同一生产制度,不同生产时间的煤储层压力的变化规律;赵俊龙等<sup>[11]</sup>利用平面径向非稳态渗流的储层压力解析式,分析了排采过程中煤储层的压力分布和压降速度特征;压降漏斗数学模型可以预测储层压力动态变化特征,但是模型假设条件太过苛刻,没有考虑正负效应的影响。物质能量动态平衡机制基于实际生产数据,可以对平均储层压力进行实时监测。KING<sup>[12]</sup>率先建立了煤层气物质平衡方程,将储层压力与累积产气量线性化模拟;张先敏等<sup>[13]</sup>建立了欠饱和低阶煤层气物质平衡方程;伊永祥等<sup>[14]</sup>基于储层参数及实际排采资料,建立了考虑煤层自调节效应和等效排采半径的数学解析模型。

在考虑正负效应的影响下,基于生产动态资料,建立煤储层压力实时模拟检测技术,实现对储层压力实时监测,定量刻画保德地区饱和煤层气藏和欠饱和煤层气藏压降动态变化规律,通过不同压降条件下的产能对比分析,以期生产提供预测依据和理论指导。

## 1 储层压力预测方法

### 1.1 构建储层压力动态预测模型

基于物质能量动态平衡机制<sup>[1,12-14]</sup>建立储层压力动态预测模型。模型首先假设:①煤层气藏穿过裂隙并且遵循达西定律的径向气、水渗流;②排采过程中储层和流体温度恒定;③原始气藏气体均以吸附态储集在煤基质内表面。

饱和煤层气藏,排水降压初期即为气、水两相流,有水相和气相物质平衡方程:

$$V\varphi\bar{S}_w = V\varphi_i S_{wi} + V\varphi_i S_{wi} C_w(p_i - p) - W_p B_w + W_i B_w, p_a < p < p_i \quad (1)$$

$$G_p = \frac{V\varphi_i(1 - S_{wi})}{B_{gi}} + \rho_B V V_L \frac{p_i}{p_i + p_L} - \frac{V\varphi(1 - \bar{S}_w)}{B_g} - \rho_B V V_L \frac{p}{p + p_L}, p_a < p < p_i \quad (2)$$

获取正负效应双重作用下的孔隙率变化:

$$\varphi = \varphi_i - \frac{g}{M}(p_i - p) + \frac{S_{\max}}{3} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p}{p+p_L} - \frac{p_i}{p_i+p_L} \right), p_a < p < p_i \quad (3)$$

可将平均储层压力表示为累计产水量、累计产气量的函数：

$$P = \left\{ - \left[ \rho_B V V_L \frac{p_i}{p_i+p_L} + \frac{Vg p_i}{M B_g} + \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p_i}{p_i+p_L} \right) + \frac{V \varphi_i S_{wi} C_W p_i}{B_g} + \frac{W_i - W_p}{B_g} - G_p - p_L \left( \frac{Vg}{M B_g} + \frac{V \varphi_i S_{wi} C_W}{B_g} \right) - \rho_B V V_L - \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \right] - \left\{ \left[ \rho_B V V_L \frac{p_i}{p_i+p_L} + \frac{Vg p_i}{M B_g} + \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p_i}{p_i+p_L} \right) + \frac{V \varphi_i S_{wi} C_W p_i}{B_g} + \frac{W_i - W_p}{B_g} - G_p - \left( \frac{Vg}{M B_g} + \frac{V \varphi_i S_{wi} C_W}{B_g} \right) p_L - \rho_B V V_L - \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \right]^2 - 4 p_L \left( - \frac{Vg}{M B_g} - \frac{V \varphi_i S_{wi} C_W}{B_g} \right) \left[ \rho_B V V_L \frac{p_i}{p_i+p_L} + \frac{Vg p_i}{M B_g} + \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p_i}{p_i+p_L} \right) + \frac{V \varphi_i S_{wi} C_W p_i}{B_g} + \frac{W_i - W_p}{B_g} - G_p \right] \right\}^{1/2} / \left( - \frac{Vg}{M B_g} - \frac{V \varphi_i S_{wi} C_W}{B_g} \right), p_a < p < p_i \quad (4)$$

式中： $\varphi_i$ 为煤储层原始孔隙率，%； $\varphi$ 为实时孔隙率，%； $\bar{S}_w$ 为平均含水饱和度，%； $\rho_B$ 为煤岩密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $V$ 为煤层气井控制的供气体积， $\text{m}^3$ ； $V_L$ 为兰氏体积， $\text{m}^3/\text{t}$ ； $P$ 为平均储层压力，MPa； $p_a$ 为废弃压力，MPa； $p_i$ 为原始储层压力，MPa； $p_L$ 为兰氏压力，MPa； $g$ 为水平方向割理百分比，%； $M$ 为轴向模量，MPa； $B_w$ 为地层水体积系数， $\text{m}^3/\text{m}^3$ ； $B_g$ 为天然气体积系数， $\text{m}^3/\text{m}^3$ ； $S_{\max}$ 为兰氏最大体积应变； $\nu$ 为泊松比； $S_{wi}$ 为煤储层原始含水饱和度，%； $C_W$ 为地层水压缩系数， $\text{MPa}^{-1}$ ； $W_i$ 为水侵体积，即边水的累积侵入体积， $\text{m}^3$ ； $W_p$ 为煤

储层累计产水量， $\text{m}^3$ ； $G_p$ 为煤储层累积产气量， $\text{m}^3$ 。

欠饱和煤层气藏，可以分为 2 个阶段：

排水降压初期（临界解吸压力前）为单相水流阶段，这时只存在水相物质平衡：

$$V \varphi \bar{S}_w = V \varphi_i S_{wi} + V \varphi_i S_{wi} C_W (p_i - p) - W_p B_w, \quad p_c < p < p_i \quad (5)$$

获取有效应力负作用下的孔隙率变化：

$$\varphi = \varphi_i - \frac{g}{M}(p_i - p), p_c < p < p_i \quad (6)$$

可将平均储层压力表示为累计产水量和水侵量的函数：

$$P = p_i - \frac{(W_{pc} - W_{ic}) \varphi_i - \sqrt{[(W_{pc} - W_{ic}) \varphi_i]^2 - 4(W_p - W_i) \varphi_i (p_i - p_c)(W_{pc} - W_{ic}) g / M}}{4(W_{pc} - W_{ic}) g / M}, p_c < p < p_i \quad (7)$$

式中： $W_{pc}$ 为储层压力降到临界解吸压力时的累计产水量， $\text{m}^3$ ； $W_{ic}$ 为储层压力降到临界解吸压力时的累计水侵量， $\text{m}^3$ ； $p_c$ 为临界解吸压力，MPa。

当煤储层压力降到临界解吸压力以下，并筒附近的吸附气发生解吸，此时由单相水流阶段变为气、水两相流阶段，有气、水两相物质平衡方程：

$$\varphi = \varphi_c - \frac{g}{M}(p_c - p) + \frac{S_{\max}}{3} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p}{p+p_L} - \frac{p_c}{p_c+p_L} \right), p_a < p < p_c \quad (10)$$

可将平均储层压力表示为累计产水量、累计产气量的函数：

$$P = \left\{ - \left[ \rho_B V V_L \frac{p_c}{p_c+p_L} + \frac{Vg p_c}{M B_g} + \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p_c}{p_c+p_L} \right) + \frac{V \varphi_c S_{wc} C_W p_c}{B_g} + \frac{W_i - W_p}{B_g} - G_p - p_L \left( \frac{Vg}{M B_g} + \frac{V \varphi_c S_{wc} C_W}{B_g} \right) - \rho_B V V_L - \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \right] - \left\{ \left[ \rho_B V V_L \frac{p_c}{p_c+p_L} + \frac{Vg p_c}{M B_g} + \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p_c}{p_c+p_L} \right) + \frac{V \varphi_c S_{wc} C_W p_c}{B_g} + \frac{W_i - W_p}{B_g} - G_p - \left( \frac{Vg}{M B_g} + \frac{V \varphi_c S_{wc} C_W}{B_g} \right) p_L - \rho_B V V_L - \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \right]^2 - 4 p_L \left( - \frac{Vg}{M B_g} - \frac{V \varphi_c S_{wc} C_W}{B_g} \right) \left[ \rho_B V V_L \frac{p_c}{p_c+p_L} + \frac{Vg p_c}{M B_g} + \frac{V S_{\max}}{3 B_g} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p_c}{p_c+p_L} \right) + \frac{V \varphi_c S_{wc} C_W p_c}{B_g} + \frac{W_i - W_p}{B_g} - G_p \right] \right\}^{1/2} / \left( - \frac{Vg}{M B_g} - \frac{V \varphi_c S_{wc} C_W}{B_g} \right), p_a < p < p_c \quad (11)$$

式中： $\varphi_c$ 为储层压力降到临界解吸压力时的孔隙率，%； $S_{wc}$ 为储层压力降到临界解吸压力时的含水饱和

度, %。

基于物质平衡机制建立的煤储层压力动态预测模型, 考虑了正负效应的影响, 模拟结果受控于实际生产数据。饱和煤层气藏, 储层压力下降幅度受控于累积产气量和累计产水量的高低。欠饱和煤层气藏, 排采初期储层压力下降幅度只受控于累计产水量, 有效应力负效应对储层造成伤害; 储层压力降到临界解吸压力后, 储层压力下降幅度受控于累积产气量和累计产水量的高低, 有效应力负作用和基质收缩正效应共同影响储层物性参数。

### 1.2 平均储层压力实时模拟检测技术

图 1 为平均储层压力实时模拟检测技术路线图, 以保德区块欠饱和煤层气 D1 井为例 (欠饱和煤层气藏储层压力模拟所需参数更加全面), 具体实现流程如下:

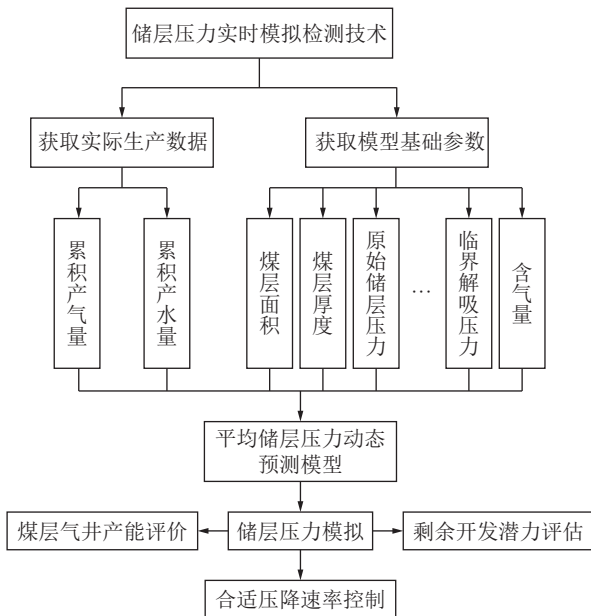


图 1 平均储层压力实时模拟检测技术路线

Fig.1 Technical roadmap for real-time simulation and detection of average reservoir pressure

基于储层压力动态预测模型, 利用 Matlab 将模型具象化, 输入表 1 所示基础参数, 导入表 2 实际生产数据, 每有一组累积产气量、累计产水量, 即可通过储层压力动态预测模型模拟出实时压力数据, 对开发过程中的平均储层压力进行实时监测, 进而评价煤层气井产能、控制合适的压降速率以及评估剩余开采潜力。

煤储层压力演化模拟结果是否对工程实际有指导作用, 取决于其基础参数及其生产动态资料的真实程度, 构建储层压力动态预测模型所需参数具体取值如下:

表 1 用于模型模拟的 D1 井基础参数

Table 1 Basic parameters of D1 well used for model simulation

| 参数                               | 获取方法    | 取值                    |
|----------------------------------|---------|-----------------------|
| 煤层体积 $V/m^3$                     | 现场数据    | 162 000               |
| 原始孔隙率 $\phi_i/\%$                | 样品测试报告  | 0.009                 |
| 原始含水饱和度 $S_{wi}/\%$              | 相对渗透率测试 | 1                     |
| 割理压缩系数 $C_f/MPa^{-1}$            | 试验测试    | 0.000 359             |
| 地层水压缩系数 $C_w/MPa^{-1}$           | 试验测试    | 0.000 464             |
| 颗粒压缩系数 $C_g/MPa^{-1}$            | 试验测试    | 0                     |
| 天然气体积系数 $B_g/(m^3 \cdot m^{-3})$ | 现场数据    | 0.01                  |
| 煤岩密度 $\rho_b/(kg \cdot m^{-3})$  | 密度测试    | 1 430                 |
| 兰氏体积 $V_L/(m^3 \cdot t^{-1})$    | 等温吸附测试  | 13                    |
| 原始储层压力 $p_i/MPa$                 | 现场数据    | 5.784 3               |
| 临界解吸压力 $p_c/MPa$                 | 经验数值    | 3.45                  |
| 废弃压力 $p_a/MPa$                   | 经验数值    | 0.7                   |
| 含气量 $V_c/(m^3 \cdot t^{-1})$     | 试验测试    | 6.299                 |
| 兰氏压力 $p_L/MPa$                   | 试验测试    | 3.67                  |
| 地层水体积系数 $B_w/(m^3 \cdot m^{-3})$ | 经验数值    | 1.0                   |
| 泊松比 $\nu$                        | 三轴测试    | 0.25                  |
| 最大兰氏体积应变 $S_{max}$               | 吸附膨胀测试  | 0.012                 |
| 轴向模量 $M/MPa$                     | 三轴应力测试  | $2.08 \times 10^{-5}$ |
| 水平方向割理孔隙百分比 $g/\%$               | 三轴应力测试  | 0.1                   |

表 2 欠饱和煤层气井 D1 实际气、水生产数据

Table 2 Actual gas and water production data of D1 under-saturated coalbed methane well

| 排采时间/d | 累计产气量/ $m^3$ | 累计产水量/ $m^3$ | 水侵量/ $m^3$ |
|--------|--------------|--------------|------------|
| 1      | 0            | 0.99         | 0          |
| 2      | 0            | 5.73         | 0          |
| ⋮      | ⋮            | ⋮            | ⋮          |
| 1 800  | 1 326 873.8  | 17 325.7     | 0          |
| 1 801  | 1 327 712.8  | 17 336.5     | 0          |

煤层体积、原始储层压力和天然气体积系数依据现场数据可得; 原始孔隙率、原始含水饱和度、割理压缩系数、地层水压缩系数、颗粒压缩系数、煤岩密度、兰氏体积、兰氏压力、泊松比、最大兰氏体积应变、轴向模量、水平方向割理孔隙百分比依据井组样品采集与分析报告所得; 临界解吸压力依据经验法所得, 即见套压时的井底压力; 废弃压力以及地层水体积系数由经验数值所得。

## 2 保德区块压降控制应用

研究区选取保德区块, 位于鄂尔多斯盆地东缘,

构造形态总体简单,断层和褶皱不发育<sup>[15]</sup>。作为首个实现商业开发的中-低煤阶煤层气田,保德区块已获得较高工业气流,稳产期平均日产气量超过  $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,产气潜力巨大<sup>[16]</sup>。然而,研究区煤层气邻井间产气量差异大,在高产水井表现得尤为突出<sup>[17]</sup>。基于保德区块生产数据,应用储层压力动态预测模型,对平均储层压力进行实时模拟,研究储层压力动态变化规律,以期为生产开发提供理论指导。

## 2.1 煤储层压力模拟结果

饱和煤层气藏,原始储层压力小于临界解吸压力,排水降压初期即为气、水两相流阶段;欠饱和煤层气藏,原始储层压力大于临界解吸压力,开发过程可以分为单相水流和气、水两相流 2 个阶段。

图 2 为利用平均储层压力实时模拟检测技术绘制的保德地区煤气井平均储层压力降落曲线,分析可知,在煤层气井排水降压开发过程中,饱和煤层气藏平均储层压力呈线性下降,下降速率不一(平均  $0.08446 \text{ MPa/月}$ );欠饱和煤层气藏在临界解吸压力前为单相水流阶段,平均储层压力急速下降(平均  $0.40842 \text{ MPa/月}$ ),临界解吸压力后,为气、水两相阶段,储层压力呈线性缓慢下降(平均  $0.02913 \text{ MPa/月}$ )。

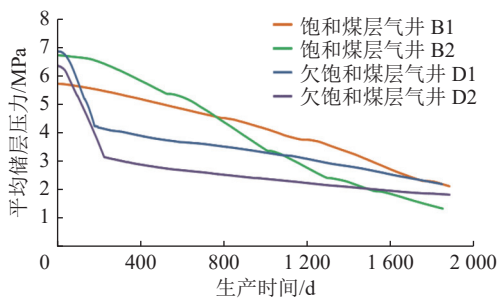


图 2 平均储层压力降落曲线

Fig.2 The average reservoir pressure drop curve

在煤层气藏开发过程中,欠饱和煤层气藏前期压降速率明显大于饱和煤层气藏,对比气、水两相流阶段,饱和煤层气藏压降速率反而大于欠饱和煤层气藏,欠饱和煤层气藏前期压降速率大,对井筒周围储层造成伤害,压降漏斗扩展不充分,有效泄压面积小,后期压降速率低<sup>[9]</sup>。

## 2.2 压降速率对煤层气井产能的影响

开发初期,压降速率对煤层气井产能影响极大。为探究压降速率对煤层气井产能的影响,选取保德地区饱和、欠饱和各两口典型煤层气井进行对比分析。各组生产井均在同一区块,构造条件相同,工程条件、生产批次相似,具有代表意义。

图 3 为保德地区两口饱和煤层气井 BB1 和 BB2 生产动态变化曲线,分析可知煤储层压力降落

速率依赖于井底压力的变化速率(BB1:  $0.047 \text{ MPa/月}$ ,井底压力:  $0.048 \text{ MPa/月}$ ;BB2:  $0.071 \text{ MPa/月}$ ,井底压力:  $0.09 \text{ MPa/月}$ ),相似的变化趋势证实了预测模型的合理性。BB2 井平均储层压力下降数值远大于 BB1 井( $4.36 \text{ MPa} > 3.15 \text{ MPa}$ ),可煤层气井产气能力只是稍强于后者( $3900 \text{ m}^3/\text{d} > 3600 \text{ m}^3/\text{d}$ ),其中,压降速率起到了不可忽略的作用。

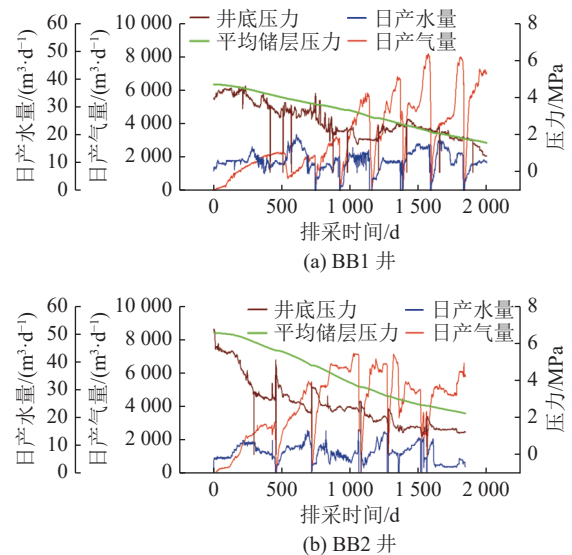


图 3 饱和煤层气井生产曲线

Fig.3 Production curve of saturated coalbed methane well

排采初期,储层应力敏感性最强,有效应力对煤储层造成不可逆的伤害<sup>[18]</sup>,BB2 井初期压降速率大于 BB1 井( $0.071 \text{ MPa/月} > 0.047 \text{ MPa/月}$ ),压降漏斗扩展不充分,有效泄压面积小,后期解吸气量少,气源供给不足,导致 BB2 井高产早,后期产气效果差。相比之下,BB1 井在前期较低的压降速率下压降漏斗扩展范围大,后期气源供给充足,达到高产稳产。

图 4 为保德地区两口欠饱和煤层气井 BB3 和 BB4 生产动态变化曲线图。分析可知在排水降压开发初期单相流阶段,BB4 井相较 BB3 井,平均日产水量更大( $28 \text{ m}^3/\text{d} > 19.45 \text{ m}^3/\text{d}$ ),井底压力下降速率快,平均储层压力降落更快( $0.4287 \text{ MPa/月} > 0.3069 \text{ MPa/月}$ )有效应力负效应对煤储层造成的不可逆伤害更大,压降漏斗扩展不充分,有效泄压面积小,后期解吸气量少,气源供给不足;在临界解吸压力后,BB3 井( $889 \text{ m}^3/\text{d}$ )产气能力要强于 BB4 井( $581 \text{ m}^3/\text{d}$ )。

## 2.3 正负效应对煤层气排采的影响

煤层气藏开发过程中,有效应力和基质收缩双重作用会诱导渗透率动态变化,进而影响压力的传播<sup>[4-5]</sup>。在储层压力变化预测中考虑渗透率正负效应影响更加符合实际储层条件。在开发初期,煤储层

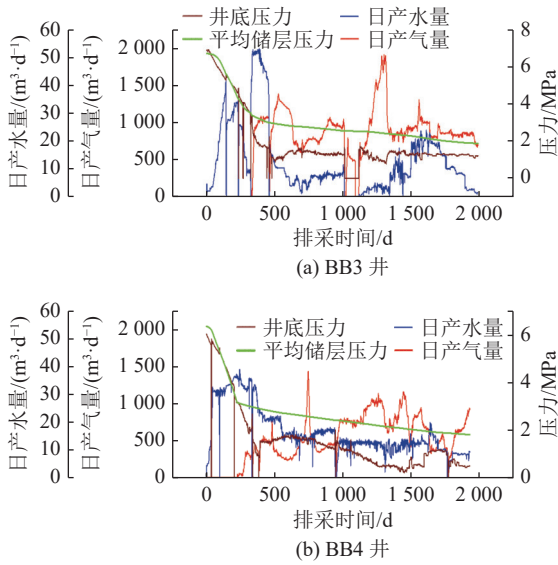


图 4 欠饱和煤层气井生产曲线

Fig.4 Production curve of unsaturated coalbed methane well

应力敏感性强, 煤的孔隙裂缝系统具有较高的压缩性, 大中孔隙和裂隙随着有效应力的增加快速闭合, 导致煤储层渗透率快速降低。在这个阶段, 储层压力降落越快, 有效应力负作用越强<sup>[19]</sup>。如图 3 中, BB2 井初期压降速率大于 BB1 井, 后期产气能力弱。随着排采不断进行, 储层压力不断降低, 孔隙裂缝系统的可压缩性逐渐降低, 基质收缩作用占主导作用, 渗透率开始改善, 在图中表现为后期产气量上升。

### 3 压降控制分析

基于对煤储层压力动态变化规律的分析, 前期

较高的压降速率会导致煤层气井后期较低的产能。开发初期, 合理的压降速率有利于煤层气井实现高产稳产, 但过快的储层压降速率, 会由于储层压敏、速敏及储层压力扩展等方面<sup>[20-25]</sup>, 对井筒附近储层造成严重伤害, 限制压降漏斗的扩展, 后期解吸气量少, 气源供给不足, 产气能力下降。为了探寻保德地区合适的压降制度, 选取保德地区饱和、欠饱和各 60 口煤层气井, 两组生产井分别属于同一井组, 构造形态简单, 排采层位一致; 工程条件、生产批次相似, 日均产气量选取开始产气后的数据以消除单相水流阶段时间的误差。基于两组生产井储层压力实时模拟检测, 对煤层气藏区域压力降落变化规律进行研究分析。

#### 3.1 饱和煤层气藏压降速率

图 5 为保德地区饱和煤层气藏区域平均储层压力降落曲线图, 原始储层压力西部区域高于东部区域, 开采数年内平均储层压力随时间呈线性下降, 西部区域平均储层压力降落幅度更大, 东西部压差逐渐变小。

统计分析饱和煤层气藏排采初期压降速度与产能的关系, 以单井平均日产气量为选定标准, 将压降速率分为快速降落型(大于 0.096 MPa/月)、适稳降落型(0.063 ~ 0.096 MPa/月)和缓慢降落型(小于 0.063 MPa/月)。适稳降落型(4 648 m<sup>3</sup>/d)压降制度煤层气井产能明显好于快速降落型(2 531 m<sup>3</sup>/d)和缓慢降落型(2 968 m<sup>3</sup>/d), 快速降落型煤层气井产能最低, 如图 6 所示。

对于保德地区饱和煤层气藏, 建议初期压降速

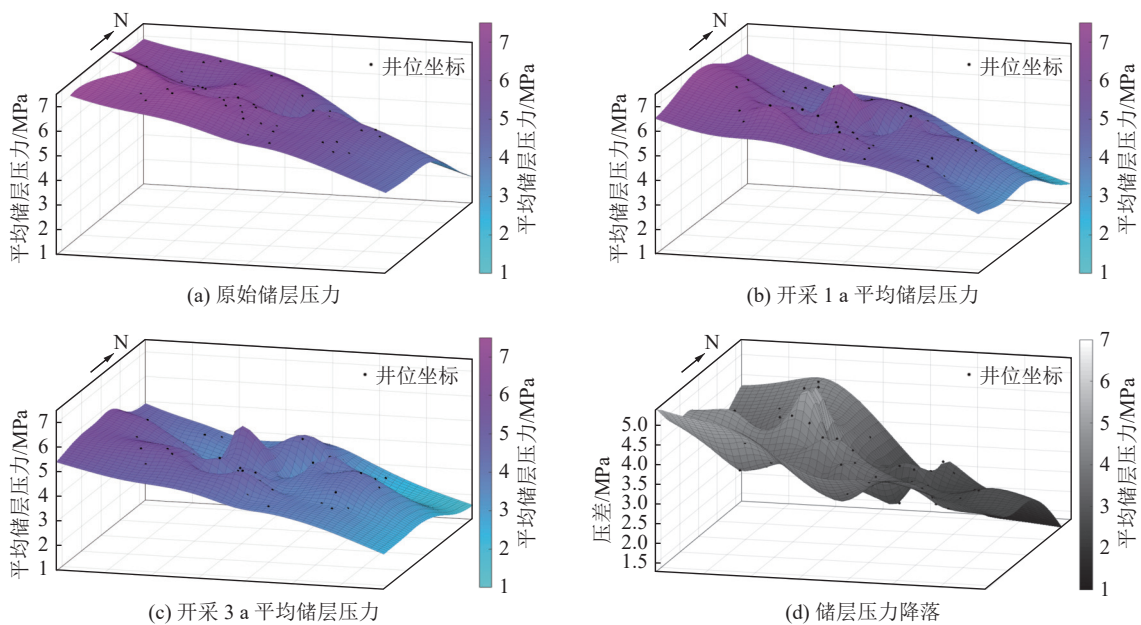


图 5 饱和煤层气井平均储层压力降落曲线

Fig.5 Average reservoir pressure drop curve of saturated coalbed methane wells

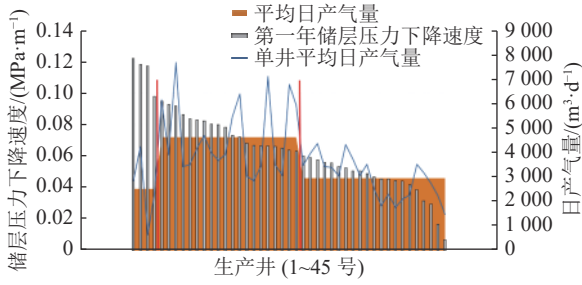


图 6 饱和煤层气藏压降速率与产能对比关系

Fig.6 Comparison of pressure drop rate and productivity of saturated coalbed methane reservoir

率维持在 0.063 ~ 0.096 MPa/月, 产气稳定后可控制压降速率缓慢增加, 以实现煤层气井高产稳产。

### 3.2 欠饱和煤层气藏压降速率

欠饱和煤层气藏区域压力降落变化规律进行分析, 大致可以分为 2 个阶段:

1) 平均储层压力快速下降阶段。原始储层压力西部区域要高于东部区域, 在生产第 1 年内(开发初期单相流阶段), 井底压力迅速下降, 为平均储层压力快速下降期, 储层压力范围从 4 ~ 8 MPa 降低为 2 ~ 5 MPa, 西部高压区降压明显, 东西部储层压差逐渐缩小, 如图 7 所示。

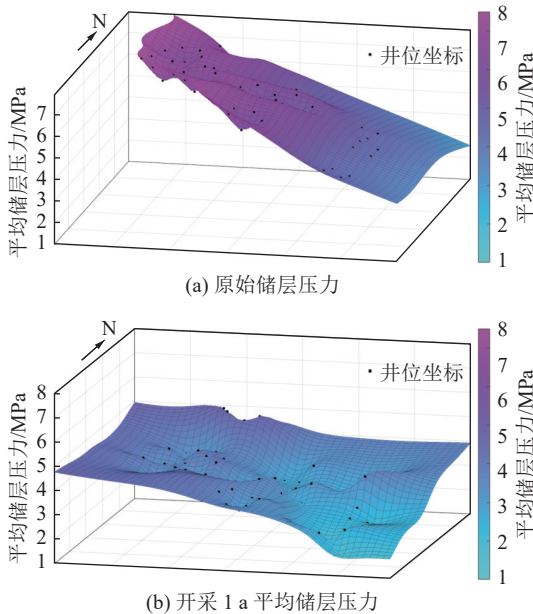
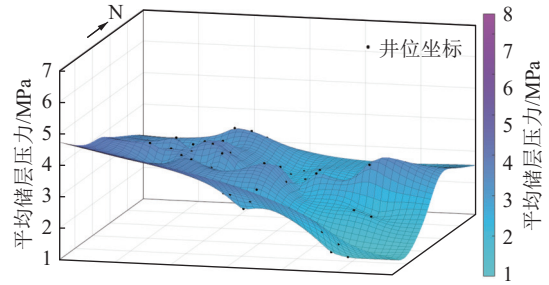


图 7 区域平均储层压力快速下降阶段

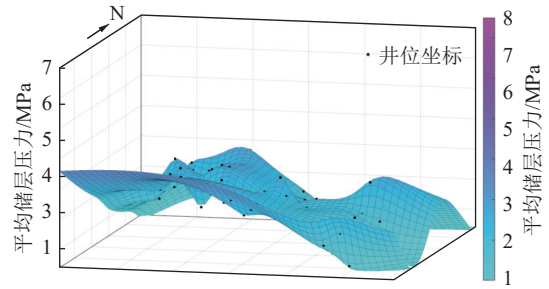
Fig.7 Diagram of the rapid decline of regional average reservoir pressure

2) 平均储层压力缓慢下降阶段。在生产的 2 ~ 5 a 里(开发中后期阶段), 日产水量下降, 产气量逐渐增加, 压力范围从 1.2 ~ 3.8 MPa 下降到 0.5 ~ 2.9 MPa, 为平均储层压力缓慢下降阶段, 如图 8 所示。

5 a 内西部区域压力降落幅度更大, 东西部压差



(a) 开采 2 a 平均储层压力



(b) 开采 5 a 平均储层压力

图 8 区域平均储层压力缓慢下降阶段

Fig.8 Slow decline of regional average reservoir pressure

逐渐变小。对于欠饱和煤层气藏, 排水降压初期为单相水流阶段, 相比于饱和煤层气藏, 初期平均储层压力降落更快, 有效应力负效应对储层造成的不可逆伤害更加明显。统计分析欠饱和煤层气藏排采初期压降速率与产能的关系, 以单井平均日产气量为选定标准, 将压降速率分为快速降落型(大于 0.38 MPa/月)、适稳降落型(0.228 ~ 0.38 MPa/月)和缓慢降落型(小于 0.228 MPa/月)。快速降落型(526 m³/d)压降制度煤层气井产能明显低于适稳降落型(1 021 m³/d)和缓慢降落型(1 054 m³/d), 如图 9 所示。

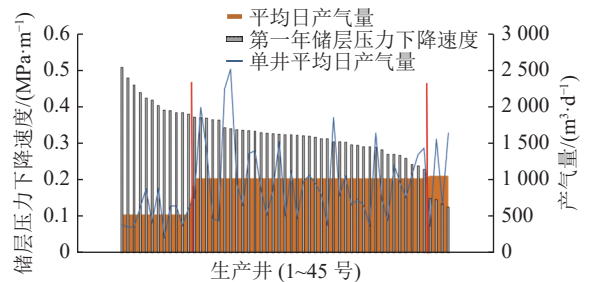


图 9 欠饱和煤层气藏压降速率与产能对比关系

Fig.9 Comparison diagram of pressure drop rate and productivity of undersaturated coalbed methane reservoir

对于保德地区欠饱和煤层气藏, 建议初期压降速率不超过 0.38 MPa/月。

## 4 结 论

1) 采用考虑正负效应的煤储层压力动态预测模

型,建立了煤层气井平均储层压力实时模拟检测技术。该技术考虑了饱和煤层气藏和欠饱和煤层气藏不同的开发特征,模拟结果受控于煤层气井实际生产数据,满足现场需求。

2)通过对保德地区煤层气井平均储层压力的实时监测,发现随着煤层气井不断开发,饱和煤层气藏平均储层压力呈线性下降;欠饱和煤层气藏在开发初期,平均储层压力迅速下降,临界解吸压力后,储层压力呈线性缓慢下降。前期过高的压降速率会导致煤层气井后期较低的产能。

3)保德地区饱和煤层气藏压降速率分为快速降落型(大于0.096 MPa/月)、适稳降落型(0.063~0.096 MPa/月)和缓慢降落型(小于0.063 MPa/月),适稳降落型(4 648 m<sup>3</sup>/d)压降制度煤层气井产气量明显好于快速降落型(2 531 m<sup>3</sup>/d)和缓慢降落型(2 968 m<sup>3</sup>/d),快速降落型煤层气井产能最低;欠饱和煤层气藏压降速率分为快速降落型(大于0.38 MPa/月)、适稳降落型(0.228~0.38 MPa/月)和缓慢降落型(小于0.228 MPa/月),快速降落型(526 m<sup>3</sup>/d)压降制度煤层气井产能明显低于适稳降落型(1 021 m<sup>3</sup>/d)和缓慢降落型(1 054 m<sup>3</sup>/d)。建议饱和煤层气藏初期压降速率维持在0.063~0.096 MPa/月,欠饱和煤层气藏初期压降速率不超过0.38 MPa/月。

#### 参考文献(References):

- [1] 汤达祯,赵俊龙,许浩,等.中-高煤阶煤层气系统物质能量动态平衡机制[J].*煤炭学报*,2015,40(1):40-48.  
TANG Dazhen, ZHAO Junlong, XU Hao, *et al.* Material and energy dynamic balance mechanism in middle-high rank coalbed methane (CBM) systems[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 40-48.
- [2] 景兴鹏.煤层气储层压力测试实验研究[J].*西安科技大学学报*,2011,31(5):554-558.  
JING Xingpeng. An experimental research on reservoir pressure of coal-bed methane[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2011, 31(5): 554-558.
- [3] CUI Xiaojun, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and Its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(9): 1181-1202.
- [4] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations[J]. Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, 1988, 3(1): 81-91.
- [5] BUSTIN R M. Importance of fabric and composition on the stress sensitivity of permeability in some coals, northern Sydney basin, Australia: Relevance to coalbed methane exploration[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(11): 1894-1908.
- [6] 蔡振华,廖新维,杜志强,等.煤层气排采时渗透率动态特征研究[J].*河南理工大学学报(自然科学版)*,2014,33(2):149-153.  
CAI Zhenhua, LIAO Xinwei, DU Zhiqiang, *et al.* Research method for dynamic permeability of coal bed methane reservoir[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2014, 33(2): 149-153.
- [7] ZOU Mingjun, WEI Chongtao, LI Laicheng, *et al.* Numerical simulation on the dynamic variation of reservoir pressure of typical coalbed methane single well and well net group—a case study on QN01 Well in the Southern Qinshui Basin, China[J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 2013, 31(2): 249-265.
- [8] 郭春华,周文,孙哈森,等.考虑应力敏感性的煤层气井排采特征[J].*煤田地质与勘探*,2011,39(5):27-30.  
GUO Chunhua, ZHOU Wen, SUN Hansen, *et al.* The relationship between stress sensitivity and production of coal bed methane wells[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2011, 39(5): 27-30.
- [9] 刘升贵,郝耐,王建强.煤层气水平井降压漏斗扩展规律研究[J].*辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*,2012,31(1):8-11.  
LIU Shenggui, HAO Nai, WANG Jianqiang. Pressure drop funnel extension of coalbed methane horizontal well[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2012, 31(1): 8-11.
- [10] 葛静涛,白雪静,陈龙.煤层气开采过程中储层压力变化预测[J].*油气藏评价与开发*,2014,4(1):62-65.  
GE Jingtao, BAI Xuejing, CHEN Long. Prediction of reservoir pressure changes during CBM exploitation[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2014, 4(1): 62-65.
- [11] 赵俊龙,汤达祯,许浩,等.考虑孔渗变化的非稳态渗流煤储层压降传播规律[J].*科学技术与工程*,2015,15(5):46-53.  
ZHAO Junlong, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Unsteady seepage model of water and pressure drop transmission in coalbed reservoirs considering the changes of porosity and permeability[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(5): 46-53.
- [12] KING G R. Material-balance techniques for coal-seam and devonian shale gas reservoirs with limited water influx[J]. *SPE*, 1993, 8(1): 67-72.
- [13] 张先敏,冯其红,汪旭升,等.低煤阶煤层气藏物质平衡方程建立及应[J].*天然气地球科学*,2013,24(6):1311-1315.  
ZHANG Xianmin, FENG Qihong, WANG Xusheng, *et al.* Establishment and application of material balance equations for low-rank coalbed methane reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1311-1315.
- [14] 伊永祥,唐书恒,张松航,等.沁水盆地柿庄南区块煤层气井储层压降类型及排采控制分析[J].*煤田地质与勘探*,2019,47(5):118-126.  
YI Yongxiang, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, *et al.* Analysis on the type of reservoir pressure drop and drainage control of coalbed methane well in the southern block of Shizhuang[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 118-126.
- [15] 杨秀春,毛建设,林文姬,等.保德区块煤层气勘探历程与启示[J].*新疆石油地质*,2021,42(3):381-388.  
YANG Xiuchun, MAO Jianshe, LIN Wenji, *et al.* Exploration history and enlightenment of coalbed methane in Baode Block[J].



- Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 381-388.
- [ 16 ] 闫 霞, 温声明, 聂志宏, 等. 影响煤层气开发效果的地质因素再认识[J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 375-380.
- YAN Xia, WEN Shengming, NIE Zhihong, *et al.* Re-recognition of geological factors affecting coalbed methane development effect[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(3): 375-380.
- [ 17 ] 闫 霞, 肖芝华, 吴仕贵, 等. 鄂尔多斯盆地保德区块煤层气富集区高产水井排采效果剖析[J]. 天然气工业, 2018, 38(S1): 86-93.
- YAN Xia, XIAO Zhihua, WU Shigui, *et al.* High-yield water in coalbed methane enrichment area of Baode block, Ordos Basin Analysis of drainage effect[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(S1): 86-93.
- [ 18 ] 陈世达, 汤达祯, 高丽军, 等. 有效应力对高煤级煤储层渗透率的控制作用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 76-80.
- CHEN Shida, TANG Dazhen, GAO Lijun, *et al.* Control of effective stress on permeability in high-rank coal reservoirs[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 76-80.
- [ 19 ] 陈 刚, 秦 勇, 杨 青, 等. 不同煤阶煤储层应力敏感性差异及其对煤层气产出的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 504-509.
- CHEN Gang, QIN Yong, YANG Qing, *et al.* Different stress sensitivity of different coal rank reservoir permeability and its effect on the coalbed methane output[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 504-509.
- [ 20 ] 赵 群, 王红岩, 李景明, 等. 快速排采对低渗透煤层气井产能伤害的机理研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008(3): 27-31.
- ZHAO Qun, WANG Hongyan, LI Jingming, *et al.* Study on mechanism of harm to cbm well capability in low permeability seam with quick drainage method[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2008(3): 27-31.
- [ 21 ] 康永尚, 赵 群, 王红岩, 等. 煤层气井开发效率及排采制度的研究[J]. 天然气工业, 2007(7): 79-82, 139-140.
- KANG Shangyong, ZHAO Qun, WANG Hongyan, *et al.* Research on development efficiency and drainage system of coalbed methane wells[J]. Natural Gas Industry, 2007(7): 79-82, 139-140.
- [ 22 ] 李金海, 苏现波, 林晓英, 等. 煤层气井排采速率与产能的关系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 376-380.
- LI Jinhai, SU Xianbo, LIN Xiaoying, *et al.* Relationship between discharge rate and productivity of coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 376-380.
- [ 23 ] 段品佳, 王芝银, 翟雨阳, 等. 煤层气排采初期阶段合理降压速率的研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1689-1692.
- DUAN Pinjia, WANG Zhiyin, ZHAI Yuyang, *et al.* Research on reasonable depressurization rate in initial stage of exploitation to coal bed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1689-1692.
- [ 24 ] 陶 树, 汤达祯, 许 浩, 等. 沁南煤层气井产能影响因素分析及开发建议[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 194-198.
- TAO Shu, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Analysis on influence factors of coalbed methane wells productivity and development proposals in southern Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 194-198.
- [ 25 ] LI Rui, WANG Shengwei, LYU Shuafeng, *et al.* Dynamic behaviours of reservoir pressure during coalbed methane production in the southern Qinshui Basin, North China[J]. Engineering Geology, 2018, 238: 76-85.