

地质与测量

煤层气排采过程中煤储层孔隙度模型及变化规律

赵俊龙^{1,2}, 汤达祯^{1,2}, 高丽军³, 许浩^{1,2}, 孟艳军^{1,2}, 吕玉民⁴

(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. 中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司, 天津 300457; 4. 中海油研究总院 新能源研究中心, 北京 100027)

摘要: 为准确表征开发过程中欠饱和煤储层孔隙度变化,以临界解吸压力为界,在煤基质收缩及有效应力耦合作用下建立煤储层孔隙度模型,以此分析了排采过程中孔隙度随孔隙压力的变化规律。研究表明,开发过程中孔隙度变化一般经历4个阶段:排水降压段、缓慢降压段、弥补反弹段、快速增长段,分别与生产过程中气、水产出变化阶段相对应;孔隙度变化程度主要受控于反弹压力点与临界解吸压力点之间的配置关系,反弹压力越接近临界解吸压力,基质收缩强度越大,孔隙度反弹能力越强;在生产过程形成的压降漏斗内,各点孔隙度变化可以反映该点储层压力的变化,扩大压降漏斗内孔隙度反弹压力面和等孔隙度压力面,有利于提高煤层气井产能。

关键词: 煤储层; 孔隙度; 煤层气; 临界解吸压力

中图分类号: TE122.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)07-0180-06

Porosity model and variation law of coal reservoir in coalbed methane production process

Zhao Junlong^{1,2}, Tang Dazhen^{1,2}, Gao Lijun³, Xu Hao^{1,2}, Meng Yanjun^{1,2}, Lyu Yumin⁴

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Lab of Coal Reservoir, National Engineering Research Center of Coalbed Methane Development and Utilization, Beijing 100083, China; 3. Engineering and Technology Branch, CNOOC Energy Technology and Services Company Limited, Tianjin 300457, China; 4. New Energy Research Center, CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: In order to accurately characterize the porosity variation of the less saturated coal reservoir during the development process, a porosity model of the coal reservoir was established based on the critical desorption pressure as the boundary and in consideration of the coal matrix shrinkage and effective stress coupling role. Thus with the variation law of the porosity pressure, the porosity during the mining process was analyzed. The study results showed that in the development process, the porosity variation would have four stages and they would be the water drainage and pressure releasing stage, the slow pressure releasing stage, supplement rebound stage and rapid increasing stage. Those stages would be relevant to the gas and water output variation stage in the production process. The porosity variation degree was mainly controlled by the configuration relationship between the rebound pressure point and the critical desorption pressure. When the rebound pressure was closed to the critical desorption pressure, the matrix shrinkage strength would be higher and the rebound capacity of the porosity would be stronger. Within the pressure released hopper formed during the production process, each point porosity variation could reflect the pressure variation of the coal reservoir, could expand the rebound pressure surface of the porosity in the pressure released and hopper and the porosity pressure surface and could be favorable to improve the production capacity of the coalbed methane well.

Key words: coal reservoir; porosity; coalbed methane; critical desorption pressure

收稿日期: 2016-03-28; **责任编辑:** 曾康生 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.07.031

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05042-002); 国家自然科学基金资助项目(41272175); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2652015331)

作者简介: 赵俊龙(1989—),男,河北张家口人,博士研究生。Tel: 13426331715, E-mail: zhao739264823@126.com

引用格式: 赵俊龙,汤达祯,高丽军,等.煤层气排采过程中煤储层孔隙度模型及变化规律[J].煤炭科学技术,2016,44(7):180-185.

Zhao Junlong, Tang Dazhen, Gao Lijun, et al. Porosity model and variation law of coal reservoir in coalbed methane production process [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 180-185.

0 引 言

煤储层孔隙度不仅是煤岩物性的重要评价参数,更是用于预测储层渗透率变化的关键参数^[1-2],因此准确预测孔隙度的变化对于煤层气的开发尤为重要。但在煤层气开发过程中,孔隙度变化规律十分复杂:排水降压导致有效应力负效应增大,割理缝宽减小,孔隙度降低;而煤层气的解吸诱发基质收缩正效应,使得孔隙体积增加,割理缝宽增大,孔隙度随排采时间的推移而呈现出反弹趋势。目前,已经有许多学者对煤储层孔隙度进行了深入研究,如文献[3-4]分别用灰分与孔隙度具有较好相关性的特点,充分利用灰分提供的信息对孔隙度进行了预测;周军平等^[5]从 Zimmerman 等^[6]建立的孔隙度与压缩系数关系出发预测煤储层渗透率变化;傅雪海等^[7]以孔隙度定义为基础分别建立了模型,用于煤储层渗透率的预测;文献[8-10]分别提出了利用地震属性预测煤层气储层孔隙度的方法。现有的这些孔隙度模型均建立在饱和煤层气藏开采过程及其机理上,对于饱和煤层气藏较为适用,然而我国绝大部分煤层气藏属于欠饱和煤层气藏^[11-12],上述模型不能完全套用。因此,研究和预测欠饱和煤储层孔隙度动态变化特征对于煤层气开发具有很强的现实指导意义。笔者基于煤岩应变状态下的关键要素分析,建立了开发过程中孔隙压力、有效应力以及基质收缩效应共同作用下的煤储层孔隙度预测模型,以分析开发过程中孔隙度变化规律。

1 孔隙度模型建立

线性弹性力学认为多孔介质的应变可以表示为

$$d\varepsilon_p = \frac{d\varepsilon_r}{\phi} - \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) d\varepsilon_g \quad (1)$$

式中: ε_p 为孔隙体积应变; ε_r 为总体积应变; ε_g 为岩石颗粒体积应变; ϕ 为孔隙度。

单轴应变条件下,假定孔隙流体压缩系数较大,孔隙体积应变的变化导致孔隙度 ϕ 的变化^[13],则有公式为

$$-d\phi = \left[\frac{1}{M} - (1-\phi)fC_s \right] (d\sigma - dp) + \left[\frac{K}{M} - (1-\phi) \right] C_s dp - \left[\frac{K}{M} - (1-\phi) \right] \alpha dT \quad (2)$$

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4)$$

式中: σ 为上覆岩层应力; p 为储层孔隙压力; T 为储层温度; C_s 为颗粒压缩系数; f 为系数,取值范围为 $0 \sim 1$; α 为颗粒热膨胀系数; M 为轴向模量; K 为体积模量; E 为杨氏模量; ν 为泊松比。

对煤层而言,颗粒难于压缩且孔隙度远小于 1。假定上覆岩层应力恒定,即 $d\sigma = 0$,那么,式(2)进一步可以写成为

$$-d\phi = -\frac{1}{M}dp - \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \alpha dT \quad (5)$$

排采初期,储层压力高于临界解吸压力,煤储层压力降低取决于排水量的大小,此时煤层气尚未进行解吸,属于单相水流阶段。基质收缩效应也尚未发生,煤储层孔隙度的变化为

$$-d\phi = -\frac{1}{M}dp \quad (p_c < p \leq p_0) \quad (6)$$

式中: p_c 为临界解吸压力; p_0 为初始储层压力。

当储层压力降到临界解吸压力时,煤层气开始解吸,基质收缩效应出现。由于温度降低引起的煤岩组构收缩效应和裂隙张开效应可以等效为压力降低引起的基质收缩效应^[14-16],所以

$$\alpha T = \frac{pS_{\max}}{p_L + p} \quad (7)$$

式中: p_L 为兰氏压力; $S_{\max}$ 为最大兰氏体积应变。

将式(7)代入式(5)得到孔隙度变化表达式为

$$-d\phi = -\frac{1}{M}dp - S_{\max} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) d \left(\frac{p}{p_L + p} \right) \quad (0 \leq p \leq p_c) \quad (8)$$

即式(6)与式(8)构成了排采过程中欠饱和煤储层孔隙度变化模型。

如果忽略基质压缩与热膨胀的影响^[17],割理压缩系数 C_f 可以表示为

$$C_f = 1/(\phi M) \quad (9)$$

2 煤层气排采过程中孔隙度变化控制因素

由式(6)可以得到

$$\phi - \phi_0 = -\frac{1}{M}(p_0 - p) \quad (p_c < p \leq p_0) \quad (10)$$

很明显,孔隙度的变化随着储层压力的降低而降低,这正反映出排水降压阶段,有效应力作用使得孔隙度逐渐降低的特征, ϕ_0 初始孔隙度。

由式(8)可以得到

$$\phi - \phi_0 + \frac{p_0}{M} + \left(\frac{K}{M} - 1\right) \frac{S_{\max} p_c}{p_L + p_c} - S_{\max} \left(\frac{K}{M} - 1\right) = \frac{p}{M} - \left(\frac{K}{M} - 1\right) \frac{S_{\max} p_L}{p_L + p} \quad (0 \leq p \leq p_c) \quad (11)$$

令 $A = \frac{1}{M}$, $B = S_{\max} \left(\frac{K}{M} - 1\right) p_L$, $C = p_L$, 将式(11) 写为 $f(p) = Ap - B/(C + p)$, 可以看出, 孔隙度的变化是储层压力的函数。

由于煤的泊松比一般为 $0 \sim 0.5$, 所以 $B < 0$, 同时 $C > 0$, 故对 $f(p)$ 求一阶导数, 令 $f'(p) = 0$, 得到 $f(p)$ 最小时的 p 值, 即 $p_{\min}$ 为

$$p_{\min} = \sqrt{\frac{-B}{A}} - C = \sqrt{S_{\max} p_L (M - K)} - p_L \quad (12)$$

那么, 当 $p_0 > p > p_{\min}$ 时, 函数 $f(p)$ 单调递增; 当 $0 < p < p_{\min}$ 时, 函数 $f(p)$ 单调递减。因此, 称 $p_{\min}$ 为孔隙度反弹压力, 即 $p < p_{\min}$ 时, 孔隙度随孔隙压力增加而减少; $p > p_{\min}$ 时, 孔隙度随孔隙压力增加而增加, 也就是文献 [8] 中在分析三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响试验时提出的孔隙压力临界点, 然而该文仅得到基于试验结果的吸附变形作用下的一般规律, 并没有从煤岩自身正负效应出发建立孔隙度模型。从式(12) 可以看到, $p_{\min}$ 与煤的泊松比、兰氏压力、杨氏模量、兰氏最大体积应变有关。兰氏最大体积应变越大, 反弹压力越高, 表明基质收缩效应越强烈。

令 $f(p) = 0$, 得到方程的 2 个根, 分别为 p_1, p_2 ,

那么, $\Delta p = p_1 - p_2 = 2\sqrt{\frac{C^2}{4} + \frac{B}{A}} \geq 0$, 其中, p_1 表示临界解吸压力, 即上节中所提到的临界解吸压力 p_c , p_2 为孔隙度反弹至临界解吸压力时的孔隙度对应的孔隙压力。对 $p_1, p_2, p_{\min}$ 进行分析, 当方程有 2 个不相等的根时, 存在以下 3 种情形。

1) 当 $p_{\min} > 0$ 时, p_2 可以大于、小于或者等于 0。正如图 1 所示, 当 p 减少时, $f(p)$ 均为先减小, 再增大, 即随着储层压力从临界解吸压力降低的过程中, 孔隙度先减小后增大, 但是由于 p_2 位置不同, 所以反弹的强度不同, 因此分 3 种情形讨论。① 当 $p_2 = 0$ 时, $f(p) = 0$, 如图 1a 所示, 孔隙度正好反弹至临界解吸压力时的孔隙度; ② 当 $p_2 < 0$ 时, $f(p) < 0$, 如图 1b 所示, 孔隙度最终未反弹至临界解吸压力时的孔隙度; ③ 当 $p_2 > 0$ 时, $f(p) > 0$, 如图 1c 所示, 最终孔隙度大于临界解吸压力时的孔隙度。

2) 当 $p_{\min} = 0$ 时, p_2 只能小于或等于 0, 从图 1d 可以看出, 当 p 减少时, $f(p)$ 单调减小。这表明, 从临界解吸压力开始, 随着孔隙压力的降低, 孔隙度一直在降低, 不会出现反弹。

3) 当 $p_{\min} < 0$ 时, p_2 只能小于 0, 结果类似于 $p_{\min} = 0$ 情形。

如果方程有一个根, 即当 $p_{\min} > 0$ 时, $p_1 = p_2 > 0$, 从图 1e 可以看出, 当 p 减少时, $f(p)$ 一直增大, 即 $f(p)$ 从一开始就出现反弹, 这表明在煤层气解吸的瞬间, 基质收缩效应正效应瞬时就可以抵消有效应力负效应。

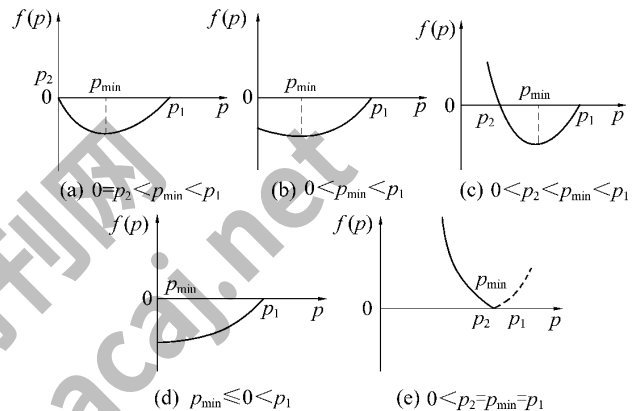


图 1 孔隙度随孔隙压力变化示意

Fig. 1 Diagram of porosity changes with pore pressure

因此, 排采过程中孔隙度变化程度受控于反弹压力点与临界解吸压力点之间的配置关系。反弹压力越接近于临界解吸压力, 表明基质收缩强度越大, 孔隙度反弹能力越强。图 2 为临界解吸压力分别为 p_1, p_1' 时, 煤孔隙度值孔隙压力变化关系。

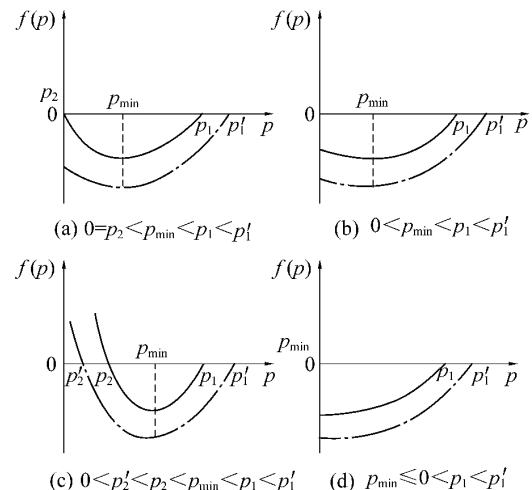


图 2 不同临界解吸压力下孔隙度随孔隙压力变化

Fig. 2 Diagram of porosity changes of with pore pressure under different reservoir critical desorption pressures

当 2 个煤储层具有相同的反弹孔隙压力,但是储层临界解吸压力不同时,那么方程具有 2 个根,同时较大储层临界解吸压力的煤储层的孔隙度将经历一个较大的降低幅度,且恢复的时间较长(图 2),其中 p_1 、 p_1' 表示不同储层临界解吸压力, p_2' 表示储层临界解吸压力为 p_1' 时孔隙度反弹至临界解吸压力时的孔隙度对应的孔隙压力。

3 排采过程中不同阶段孔隙度变化规律

在煤层气排采过程中,随着储层压力的下降,煤储层有效应力负效应会导致割理、裂缝闭合,平均孔隙半径变小,孔隙度降低;基质收缩正效应则会起到相反的效果。结合煤层气整个排采过程,从储层压力到废弃压力,孔隙度的变化一般经历 4 个阶段,不同阶段其变化规律如下(图 3)。

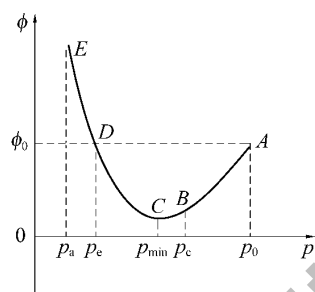


图 3 煤层气整个排采过程中孔隙度随孔隙压力变化

Fig. 3 Diagram of porosity variation with pore pressure during whole CBM production

1) AB 段: 排水降压段,即孔隙度线性下降段。从初始储层压力 p_0 到临界解吸压力 p_c ,此阶段只存在有效应力负效应,孔隙度随孔隙压力线性降低,直到 B 点气体从基质解吸,生产上表现为大量产水、不产气。

2) BC 段: 缓慢降压段,即孔隙度缓慢下降段。从临界解吸压力 p_c 到孔隙反弹压力 p_{min} ,此阶段由于气体开始解吸,基质收缩效应出现,但是此时基质收缩强度小于有效应力强度,孔隙度仍然降低,但是降低幅度减缓,C 点时,基质收缩强度与有效应力强度相等。生产上表现为产水量逐渐降低,气体难以聚集成气流而呈孤立的气泡形式产出,由于游离气很少,所以产气量很低。

3) CD 段: 弥补反弹段,即孔隙图中无度缓慢上升段。从反弹压力 p_{min} 到等孔隙度压力 p_e ,此阶段气体大量解吸,基质收缩强度大于有效应力,孔隙度开始增大,但是不能弥补有效应力在整个过程中对孔隙度造成的损害,直到 D 点时,孔隙度等于储层

原始孔隙度。生产上表现为产水量很小,气体逐渐以连续性气流形式产出,产气量大增。

4) DE 段: 快速增长段,即孔隙度快速增长段。从等孔隙度压力 p_e 到废弃压力 p_a ,此阶段随着排采时间的增长,基质收缩强度也在进一步增强,孔隙度持续增大,最终达到废弃压力时,孔隙度反弹到最高。生产上表现为几乎不产水,产气高峰过后,气体产量有所回落,趋于稳定,最终产气量逐渐降低直至衰竭。

实际煤层气排采过程中 4 个阶段能否全部出现取决于煤岩自身性质以及生产井所处的力学边界条件。沁水盆地煤层气的开发实践表明^[19-22],位于构造高部位、埋深浅的储层孔隙度相对较大,有利于形成高产。这是因为,构造抬升过程中,煤储层压力降低,AB 段减小,割理裂缝开启,煤基质膨胀,孔隙度增加。因此,构造抬升越高,孔隙度增大幅度越大。进而储层埋深越浅,AB 段越小,排水降压越容易,孔隙度反弹压力点出现越早,越有利于形成高产。

生产过程中,煤层气的排采会在井筒周围形成一个降压漏斗(图 4),随着泄流半径的增大,降压漏斗横向波及面积不断扩大;随着生产压差的增大,降压漏斗纵向不断加深。煤层气井降压漏斗的叠加、变形、扩大是提高解吸速度的根本途径,降压漏斗的形状则是控制解吸体积的关键因素^[23]。

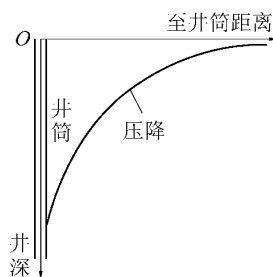


图 4 煤层气排采过程降压漏斗示意

Fig. 4 Diagram of pressure drop funnel during the CBM production

在解吸体积内部,各个点孔隙度的变化可以反映此处储层压力的变化。横向上,以降压漏斗面为界,降压漏斗以外,储层为原始储层,尚未开发;降压漏斗内,至井筒的距离越小,压力降低越大;从降压漏斗面逐渐靠近井筒的过程中,压力逐渐降低,有效应力作用逐渐减弱,基质收缩作用逐渐凸显,储层孔隙度先降低后升高。纵向上,井深越大,储层压力越大,排水降压越困难,在降压漏斗面内,从井底向上

变化过程中,储层压力逐渐降低,孔隙度同样先降低后升高。

将井筒周围储层内4个压力节点所处的孔隙度变化阶段相连,就会产生4个类似于压降漏斗的曲面(图5)。其中压降漏斗边界面就是原始储层压力面。目前煤层气生产普遍采用的压裂增产措施,其根本目的就是扩大压降漏斗的波及范围,特别是扩大孔隙度反弹压力面和等孔隙度压力面,从而扩大煤层气的解吸体积,提高煤层气井产能。

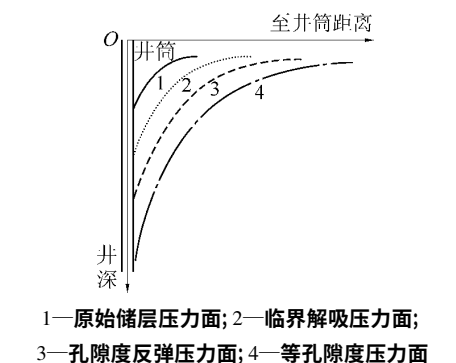


图5 煤层气排采过程压降漏斗变化示意图

Fig. 5 Diagram of pressure drop funnel changes during the CBM production

4 结 论

1) 建立了以临界解吸压力为界、考虑煤基质收缩以及有效应力耦合作用下的欠饱和煤储层孔隙度动态预测模型。反弹压力点与临界解吸压力点之间的配置关系控制孔隙度变化程度,反弹压力越接近临界解吸压力,基质收缩强度越大,孔隙度反弹能力越强;当不同煤储层反弹压力相同,临界解吸压力不同时,较大临界解吸压力的储层孔隙度经历较大降低幅度及较长恢复时间。

2) 开发过程中孔隙度变化所经历的排水降压段、缓慢降压段、弥补反弹段及快速增长段,各有特点,并与气、水生产动态相对应。由于煤岩自身性质以及生产井所处的力学边界条件不同,4个阶段并不一定全部出现;构造高部位、储层埋深浅的生产井因孔隙度较大、反弹压力易达到而容易形成高产。

3) 在生产过程形成的压降漏斗内部,各点孔隙度变化可以反映该点储层压力的变化,扩大孔隙度反弹压力面和等孔隙度压力面,有利于扩大解吸体积,提高煤层气井产能。

参考文献(References):

- [1] Palmer I, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model [J]. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering, 1998, 1(6): 539-544.
- [2] Cui X J, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2005, 89(9): 1181-1202.
- [3] 李少华, 张昌民, 胡爱梅, 等. 煤储层孔隙度的协同模拟 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 980-983.
Li Shaohua, Zhang Changmin, Hu Aimei, et al. Building porosity model of coalbed using collocated cokriging [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 980-983.
- [4] 金振奎, 王春生. 煤层灰分对其储集性能的影响 [J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 55-56.
Jin Zhenkui, Wang Chunsheng. Influence of coal ash content on coal reservoir behavior [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 55-56.
- [5] 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 matrix shrinkage effects [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science, 2009, 31(1): 4-8.
- [6] Zimmerman R W, Somerton W H, Sking M. Compressibility of Rocks [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(12): 12765-12777.
- [7] 傅雪海, 秦勇, 张万红. 高煤级煤基质力学效应与煤储层渗透率耦合关系分析 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 373-377.
Fu Xuehai, Qin Yong, Zhang Wanhong. Coupling correlation between high-rank coal matrix mechanic effect and coal reservoir permeability [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3): 373-377.
- [8] 何志勇, 刘海涛, 汪铨, 等. 利用地震属性预测煤层气储层孔隙度方法 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(4): 132-134.
He Zhiyong, Liu Haitao, Wang Cheng, et al. Seismic attributions analysis and its application in predicting porosity [J]. Coal Technology, 2011, 30(4): 132-134.
- [9] 张延庆, 程增庆. 用地震资料预测煤层气储层参数的方法初探 [J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(4): 24-26.
Zhang Yanqing, Cheng Zengqing. Discussion on prediction methods of coal reservoir parameters by seismic technology [J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(4): 24-26.
- [10] 胡朝元, 彭苏萍, 赵士华, 等. 煤层气储层参数多信息综合定量预测方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1): 28-32.
Hu Chaoyuan, Peng Suping, Zhao Shihua, et al. The qualitative prediction methods of coalbed gas reservoir parameters [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(1): 28-32.

- [1] 卢军灵,李淑畅.寺河矿区煤层气藏富集主控地质因素研究[J].中州煤炭,2015(11):118-121.
Lu Junling, Li Shuchang. Study on enrichment controlling geological factors of CBM reservoir in Sihe Mine [J]. Zhongzhou Coal, 2015 (11): 118-121.
- [2] 许准,赵永刚,李洪,等.平顶山矿区十三矿二₁煤层气地质条件分析[J].中州煤炭,2014(1):93-95.
Xu Zhun, Zhao Yonggang, Li Hong, et al. Analysis on coalbed methane geological condition of Coal seam 2₁ in the No13. Coal Mine, Pingdingshan Mine Area [J]. Zhongzhou Coal, 2014(1): 93-95.
- [3] Bradley J S, Powley D E. Pressure compartments in sedimentary basins: a review [J]. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1994, 61(1): 3-26.
- [4] Levine J R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coalbed reservoirs [J]. Geological Society, 1996, 109(1): 197-212.
- [5] Harppalani S, Shraufnager R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal [J]. Fuel, 1990, 69(12): 551-556.
- [6] Shi J Q, Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery [J]. Transport in Porous Media, 2004, 56(1): 1-16.
- [7] Pan Z J, Luke D C. Modeling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 92(3): 1-44.
- [8] 赵阳升,胡耀青,杨栋,等.三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(6):651-653.
Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing, Yang Dong, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651-653.
- [9] 陈振宏,王一兵,杨焦生,等.影响煤层气井产量的关键因素分析:以沁水盆地南部樊庄区块为例[J].石油学报,2009,30(3):409-416.
Chen Zhenhong, Wang Yibin, Yang Jiaosheng, et al. Influencing factors on coalbed methane production of single well: a case of Fanzhuang Block in the south part of Qinshui Basin [J]. Acta Petroleologica Sinica, 2009, 30(3): 409-416.
- [10] Lyu Y M, Tang D Z, Xu H, et al. Production characteristics and the key factors in high-rank coalbed methane Fields: A case study on the Fanzhuang Block, southern Qinshui Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 96(7): 93-108.
- [11] 任广磊,李治平,张跃磊,等.渗透率应力敏感性对煤层气井产能的影响[J].煤炭科学技术,2012,40(4):104-107.
Ren Guanglei, Li Zhiping, Zhang Yuele, et al. Stress sensitivity of permeability affected to production capacity of coalbed methane well [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(4): 104-107.
- [12] 倪小明,陈鹏,朱明阳.煤层气垂直井产能主控地质因素分析[J].煤炭科学技术,2010,38(7):109-113.
Ni Xiaoming, Chen Peng, Zhu Mingyang. Analysis on main control geological factors of production capacity of vertical coalbed methane well [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(7): 109-113.
- [13] 刘世奇,桑树勋,李梦溪,等.沁水盆地南部煤层气井网排采压降漏斗的控制因素[J].中国矿业大学学报,2012,41(6):943-950.
Liu Shiqi, Sang Shuxun, Li Mengxi, et al. Control factors of coalbed methane well depressurization funnel under drainage well network in southern Qinshui Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 943-950.