

文章编号: 0253-2697(2010)06-0966-04

# 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

陈振宏 陈艳鹏 杨焦生 邓 泽 赵玉红 王一兵

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007)

**摘要:** 通过开展干样煤储层地质效应实验,结合数值模拟方法,研究了煤储层渗透率动态变化特征及其对煤层气井产能的影响。实验结果证明,煤储层渗透率在开发过程中呈不对称“U”型变化,初期以应力敏感性为主,随着开发进程深入,基质收缩效应逐步增强。当压力从 2 MPa 增加到 10 MPa 时,气相渗透率降低 90%;应力降低后,渗透率不能恢复到原始水平。P&M 渗透率模型模拟结果说明,渗透率初期减小,后期增大;压力降至临界解吸压力 4.4 MPa 时,渗透率降低了 34%;继续降压至 2.5 MPa 时,渗透率提高至初始水平,压力递减至 0.7 MPa 时,渗透率增至初始渗透率的 2.8 倍。同时,煤储层地质效应严重影响煤层气井产能。因此,煤层气生产应以渗透率动态变化为依据,不断进行调整和优化。

**关键词:** 煤储层;地质效应;基质收缩;渗透率模型;数值模拟

**中图分类号:** TE313.8

**文献标识码:** A

## Reservoir dynamic permeability of high rank coalbed methane and its effect on the coalbed methane output

CHEN Zhenhong CHEN Yanpeng YANG Jiaosheng DENG Ze ZHAO Yuhong WANG Yibing

(Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China)

**Abstract:** Through reservoir geologic effect experiments of dry-coal samples and numerical simulation, the present paper studied dynamic variations in CBM reservoir physical properties and their negative influence on the CBM development. The results showed that variations in the CBM reservoir permeability were characteristic of a “U” form during the CBM development, the stress sensitivity was dominant at the beginning and the matrix shrinkage effect increased gradually as the development proceeded. The gas permeability decreased by 90% when the pressure increased from 2 MPa to 10 MPa, and the permeability could not recover completely even if the stress decreased. The numerical simulation by a P&M permeability model indicated that the permeability declined first and then ascended. When the pressure dropped to the critical point of desorption pressure (4.4 MPa), the permeability decreased by 34%; then the permeability began to rebound to the initial value as the pressure decreased to 2.5 MPa; finally the permeability increased by 2.8 times of the initial value as the pressure decreased to 0.7 MPa. Moreover, a lower primary permeability and its reservoir geologic effect strongly influenced the deliverability of a CBM well, so the CBM production should be incessantly adjusted and optimized according to dynamic variations in the reservoir permeability.

**Key words:** coalbed reservoir; geologic effect; matrix shrinkage; permeability model; numerical simulation

煤层气藏开发过程中,流体不断产出,地层压力下降,引起煤层应力的持续变化必然导致煤储层物性改变,严重影响煤层渗透性和气/水流动,煤层气难以解吸,产量达不到理想状态。这是由于前人仅对煤储层应力敏感性开展有较多研究<sup>[1-3]</sup>,对高煤阶煤层气开发储层综合地质效应缺乏充分的认识。加强开发过程中渗透率动态变化特征研究将对优化煤层气井排采工作制度、提高单井产量有着重要意义。

### 1 煤储层渗透率动态变化的影响因素

煤层气产出包括煤基质孔隙的表面解吸、通过基质和微孔隙扩散到裂隙中、以达西渗流方式通过裂隙流向井筒运移 3 个阶段<sup>[4]</sup>。煤层气在开发过程中产量变化也分 3 个阶段:①排采初期,煤层主要产水,同时伴随有少量游离气、溶解气产出;②当煤层降至临界解吸压力以下时,煤层甲烷分子迅速解吸,然后扩散到裂隙

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB219607)和中国石油天然气股份公司重大专项(2008E-050601)联合资助。

**作者简介:** 陈振宏,男,1979年5月生,2007年获中国科学院广州地球化学研究所博士学位,现为中国石油勘探开发研究院廊坊分院高级工程师,主要从事石油天然气地质及煤层气地质方面的研究。E-mail: cbmimcoco@126.com

中,表现为产气量逐渐增大,产水量逐渐减小;③随着采出水量的增加、生产压差的进一步增大,煤层中含水饱和度相对降低,变为以产气为主,并逐渐达到产气高峰,产水量则相对稳定在一个较低的水平上(图 1)。

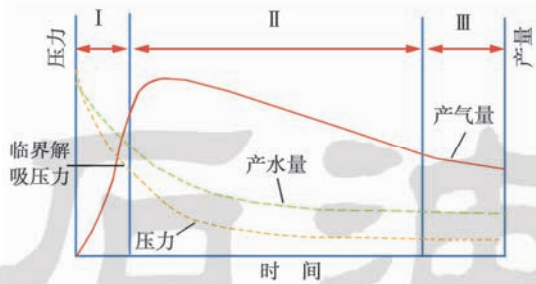


图 1 煤层气井的气、水产量变化示意图

Fig. 1 The change of gas & water production in CBM wells

在此过程中,煤储层物性受应力敏感性、基质收缩和克林肯伯格效应 3 种效应制约<sup>[5]</sup>。一方面,煤层气的解吸产出造成煤基质收缩,孔、裂隙空间扩大,渗透率增大<sup>[5-7]</sup>;另一方面,排水降压过程中煤储层表现出较强的应力敏感性<sup>[8-9]</sup>。这种正、负效应影响着煤层气解吸—扩散—渗流—产出的全过程,导致煤储层渗透率与气产量随之改变。

## 2 煤储层渗透率动态变化的物理模拟

### 2.1 原地受力分析

为了尽可能接近煤层气储层的真实环境,首先对煤储层进行原地受力分析<sup>[10]</sup>(图 2)。煤层在水平方向上受水平压力的作用,该压力是由于煤层在水平方向上受压而产生的,一般小于垂向压力。由于构造应力的影响,水平压力在各方向上的大小会有所差异。在煤层中任意选择一个水平面,在平面垂向上煤层受 4 个力:向下的上覆地层压力  $p_z$ ;向上的气体压力  $p_g$ ;向上的煤基质承受的力  $p_s$ ;向上的裂隙系统内水的压力  $p_w$ 。

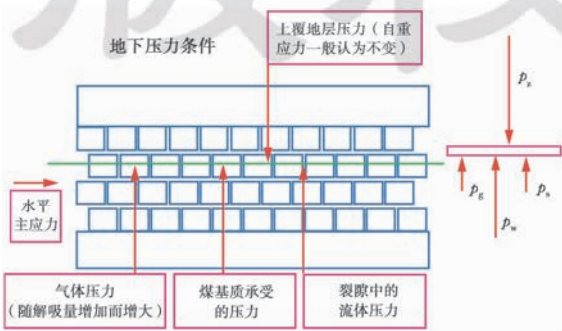


图 2 煤储层原地受力分析示意图

Fig. 2 Mechanical analysis about coalbed reservoir in situ

上覆地层压力主要由地层自身重力引起,可以通过计算上覆地层重力的加权平均而得,具体计算公式为

$$p_z = \sum \gamma_i h_i$$

式中:  $\gamma_i$  为单位厚度地层的自重压力, MPa/m, 数值上等于单位体积地层重量除以受力面积;  $h_i$  为单位地层垂向高度, m。

由于受力分析所选择的平面是静止的,因此在垂向上的 3 个力受力平衡,即:

$$p_z = p_s + p_w + p_g \quad (1)$$

此时煤基质承受的力为

$$p_s = p_z - p_g - p_w \quad (2)$$

在排水降压初期,  $p_w$  急剧降低,  $p_z$  维持恒定,  $p_g$  可以忽略,导致  $p_s$  增加,即作用在煤层基质上的有效压力增大;随着排采进一步深入,井筒内液面较稳定,  $p_w$  基本维持恒定,解吸半径扩大,  $p_g$  明显增大,导致  $p_s$  降低。因此,采用先增加、后降低有效压力的方式模拟煤层气开发的过程。

### 2.2 渗透率变化物理模拟

#### 2.2.1 实验样品及实验方法

样品取自沁水盆地南部 3 号煤层, 3 块干煤样孔隙度为 2.90%~5.05%, 煤岩原始渗透率为  $(0.015 \sim 2.880) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ <sup>[11]</sup>。

煤心的受力分析表明,围压可以直接表征煤基质的有效压力,因此,改变煤样的净围压能够模拟地层有效压力的变化。实验中,测量渗透率随围压变化的情况并分析储层应力敏感的程度。实际操作中,保持进口压力不变,首先逐步加大围压值,每个围压增加过程控制在 30 min 以上,并测定每个围压下岩样的渗透率;然后逐步减小岩样所受围压值,围压减小过程控制在 1 h 以上,以保证岩样变形达到一定的平衡状态,同样测量每个围压下岩样的渗透率。煤样的最大围压值为 10 MPa,实验气体采用氮气。

#### 2.2.2 实验结果

为了直观地描述煤储层渗透率的变化,定义无因次渗透率为气体渗透率  $K$  与煤岩初始渗透率  $K_i$  的比值。

实验结果表明,储层渗透性呈不对称“U”型变化规律。随着围压的增加,煤样渗透率逐渐降低,围压恢复过程中,渗透率有所恢复(图 3)。当围压增加到 10 MPa 时,所测试的 3 块煤岩样品的无因次渗透率均低于 10%。例如 2 号岩心,当有效压力增加到 10 MPa 时,岩样渗透率仅为初始渗透率的 1.6%。初始渗透率越低的样品,渗透率的降低幅度相对越大。这说明原始渗透率越差的储层,受到的伤害也越严重。当有效压力降低以后,煤岩样品的渗透率有所恢复,但是不

能恢复到原始水平,渗透率降低幅度均高于50%,相对于应力敏感性最强的阶段,渗透率增大到4~6倍,煤储层物性得到明显改善。

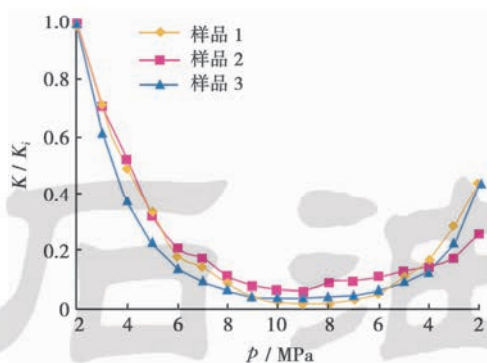


图3 围压变化过程中干样渗透率变化特征

Fig. 3 Permeability change of dry coal-core with confinement pressure change

实验结果证明,煤层气藏孔隙变形具有塑性变形的特征,裂隙闭合后在卸压过程中不易恢复张开,其储层应力敏感性具有明显的不可逆性,不可逆程度高于50%<sup>[12-14]</sup>。在开发过程中,初期应力敏感性占主导地位,储层渗透性显著降低,随着开发进程深入,基质收缩效应逐步增强,储层渗透性逐渐恢复。由此说明,在煤层气藏开发的初期,单纯增大生产压差,可能会导致渗透率的急剧降低,影响煤层气产量的提高;随着排采的深入进行,储层物性开始反弹,到气田开发中后期物性易得到明显改善,有较好的产气条件。这要求排采初期优化排采工作制度,使压降漏斗最大程度进行扩展。

减少储层渗透性的最大降低幅度,减少渗透性降低时间,加快储层渗透性恢复速度,以及有效提高储层渗透性恢复程度,对于提高煤层气单井产量至关重要。煤层气排采过程中,尽可能使得渗透率变化曲线“缓下凹、稳抬升、抬升快、扬起高”(图4)。

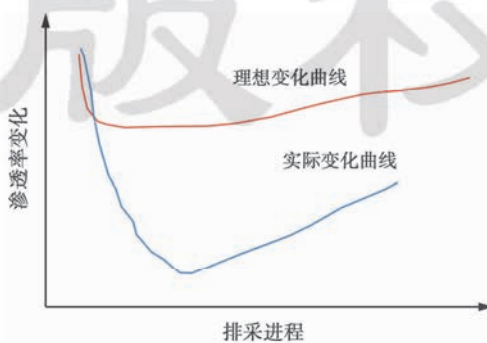


图4 排采过程中煤储层渗透率动态变化理想曲线

Fig. 4 The curves of coal reservoir permeability change with CBM development

### 3 煤储层渗透率动态变化的数学模型

国外学者曾提出过多个描述煤储层渗透率动态变化的数学模型<sup>[15-17]</sup>。其中P&M模型依据可靠,参数较易获取。P&M模型采用了与Langmuir吸附方程式相同形式的模型来描述煤体的膨胀:

$$\epsilon_s = \epsilon_{\max} \frac{p}{p + p_{50}} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{\max}$ 为煤极限吸附应变,无量纲; $p_{50}$ 为达到 $1/2\epsilon_{\max}$ 时对应的压力,MPa; $\epsilon_s$ 为体积应变,无量纲; $p$ 为储层压力,MPa。

应用Levine煤体膨胀的模型描述降压引起的基质收缩现象,得到

$$\frac{\phi}{\phi_0} = 1 + \frac{c_m}{\phi_0}(p - p_0) + \frac{\epsilon_{\max}}{\phi_0} \left( \frac{J}{M} - 1 \right) \cdot \left( \frac{p}{p_{50} + p} - \frac{p_0}{p_{50} + p_0} \right) \quad (4)$$

其中

$$c_m = \frac{1}{M} - \left( \frac{J}{M} + f - 1 \right) \beta \quad (5)$$

$$\frac{M}{E} = \frac{1 - \gamma}{(1 + \gamma)(1 - 2\gamma)} \quad (6)$$

$$\frac{J}{M} = \frac{1 + \gamma}{3(1 + \gamma)} \quad (7)$$

式中: $\phi$ 为有效孔隙度,%; $\phi_0$ 为初始有效孔隙度,%; $p_0$ 为初始压力,MPa; $c_m$ 为基质压缩系数,MPa<sup>-1</sup>; $J$ 为体积模量,MPa; $M$ 为轴向模量,MPa; $E$ 为杨氏模量,MPa; $\gamma$ 为泊松比,无量纲; $\beta$ 为基质压缩系数,MPa<sup>-1</sup>; $f$ 为小数,0~1。

孔隙度和渗透率的关系式为

$$\frac{K}{K_0} = \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \quad (8)$$

式中: $K$ 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $K_0$ 为初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

### 4 煤储层渗透率动态变化的数值模拟

以沁水煤层气田樊庄区块下二叠统山西组3号煤储层的数据为基础,煤储层原始地层压力为5.5 MPa,孔隙度为4%,含气量为20 m<sup>3</sup>/t,吸附饱和度取85%,临界解吸压力为4.4 MPa,煤岩轴向模量为8400 MPa,体积模量为5333 MPa,煤极限吸附应变为0.01,废弃压力取2 MPa,沁水 $\epsilon_{\max}$ 为0.0013~0.0047, $p_{50}$ 为1.14~6.64 MPa,取0.0012做保守估算<sup>[18]</sup>,依据P&M模型分别计算分析(表1)。

模拟结果显示:以0.7 MPa作为废弃压力,最终该区煤储层渗透率增大到初始渗透率的2.8倍。当储

表 1 沁水盆地樊庄区块煤储层参数

Table 1 Parameters of coalbed reservoir in Fanzhuang block, Qinshui Basin

气水相渗曲线			解吸附曲线测试数据	
气体饱和度/ %	气相相对渗 透率 $K_{rg}/\%$	水相相对渗 透率 $K_{rw}/\%$	压力/ MPa	含气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )
0.12	0.00	0.250	0.078	1.367
0.20	0.05	0.100	0.610	10.305
0.30	0.10	0.040	1.120	17.787
0.37	0.18	0.028	1.810	25.284
0.40	0.23	0.025	2.240	28.959
0.45	0.35	0.020	3.050	34.839
0.50	0.45	0.018	4.080	40.719

层压力由 7 MPa 降低至临界解吸压力 4.4 MPa 时,孔隙度与渗透率逐渐减小,物性不断变差;由临界解吸压力 4.4 MPa 降至 2.5 MPa,物性开始反弹,直至初始状态;继续降压至衰竭压力,物性得到改善,渗透率增大了 1.8 倍(图 5)。

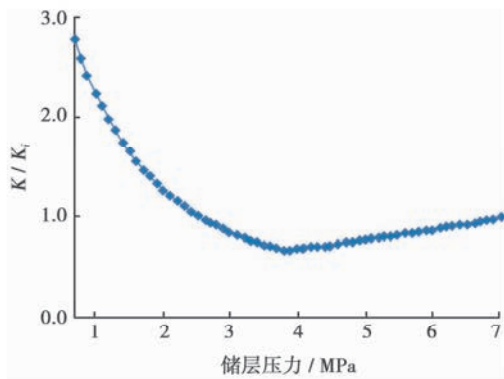


图 5 沁水煤层气田 3 号煤 P&M 模型渗透率变化  
Fig. 5 The permeability variation of P&M model of No. 3 coal in Qinshui Basin

## 5 煤储层渗透率动态变化对单井产量的影响

煤储层渗透率动态变化必然会导致煤层气渗流规律及渗流量的变化,进而影响气井的生产能力。利用煤储层渗透率动态变化实验数据及数值模拟结果,分析煤储层渗透率动态变化对单井产量的影响。

选用 ECLIPSE 数值模拟软件中的煤层气双重介质模块,选用网格大小为  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,描述渗透率随地层压力降低的变化规律,再与主模型 ECLIPSE100 耦合进行模拟计算。模拟数据按樊庄区块实测数据给出初值(表 1)。

从模拟结果可以看出,在相同的生产压差下,如果考虑煤储层渗透率动态变化,产气量明显减少(图 6)。

在生产压差达到 5 MPa 时,气井累计产量减少 20% 以上。

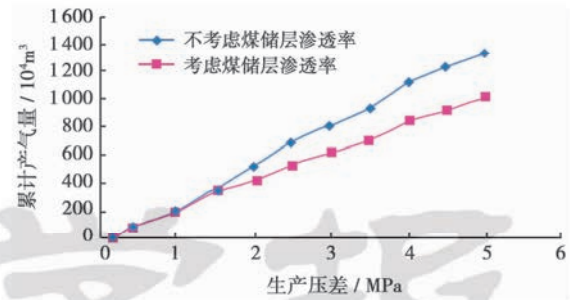


图 6 煤储层渗透率动态变化对煤层气产能的影响  
Fig. 6 Numerical simulation of CBM production affected by dynamic variations of CBM reservoir permeability

## 6 结 论

(1) 储层渗透性在开发过程中呈不对称“U”型变化规律,开发初期应力敏感性占主导地位,储层渗透性显著降低,随着开发进程深入,基质收缩效应逐步增强,储层渗透性逐渐恢复。当有效压力从 2 MPa 增加到 10 MPa,其气相渗透率降低到不足原始渗透率 10%。有效应力降低以后,煤岩渗透率有所恢复,但均不能恢复到原始水平。

(2) P&M 渗透率模型模拟结果证实,开发过程中该区煤储层物性先降低后增大,至降压结束,渗透率增至初始渗透率的 2.8 倍。

(3) 煤储层渗透性动态变化对煤层气井产能产生明显的不利影响。在排采过程中,尽可能使得渗透率变化曲线“缓下凹、稳抬升、抬升快、扬起高”,使压降漏斗最大程度扩展开,而不能快速降低井底压力。

致谢 感谢中国石油勘探开发研究院廊坊分院煤层气研究所所长赵庆波教授的亲切指导!

### 参 考 文 献

[1] Sun P. A new method for calculating the gas permeability of a coal seam[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., 1990, 27(4):325-327.  
[2] 谢然红,肖立志. 储层流体及其在岩石孔隙中的核磁共振弛豫温度特性[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 280-284.  
Xie Ranhong, Xiao Lizhi. Temperature effect on NMR relaxation time for bulk fluids and fluids in rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 280-284.  
[3] 陈振宏,王一兵,郭凯,等. 高煤阶煤层气藏储层应力敏感性研究[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1390-1395.  
Chen Zhenhong, Wang Yibing, Guo Kai, et al. Stress sensitivity of high-rank coalbed methane reservoir[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1390-1395.