

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.03.016

利用排采数据计算煤层渗透率的方法

赖枫鹏¹, 李治平¹, 张跃磊², 付应坤¹

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042)

摘要: 为了更加准确的计算排采过程中煤储层渗透率的变化, 考虑生产过程中外在产量数据对煤层内在渗透率的反映, 在物质平衡方程、产量方程的基础上建立了利用生产数据反求煤层渗透率的方法。利用物质平衡方程对生产中储层的平均压力进行计算, 纯产水阶段引入无量纲产水指数对产量方程进行转换。气水同产阶段则利用气水产量比进行转换, 从而消除泄流半径、表皮系数等不确定因素对计算的影响。通过理论推导得到渗透率与地面累积产液量的关系可以用一元三次方程描述。对沁水盆地煤层气井进行计算, 得到煤层渗透率呈先降低后上升的趋势。对计算结果进行分析得出, 储层渗透率在排水阶段后逐渐增加, 但渗透率增长率呈现降低的趋势, 渗透率比与地面累积产液量呈较好的一元三次多项式关系, 这与理论数学关系相吻合。

关键词: 煤层气; 渗透率; 动态生产数据; 产能方程; 物质平衡方程

中图分类号: TE 33+2

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)03-101-07

A calculation method for coalbed permeability by using drainage data

LAI Fengpeng¹, LI Zhiping¹, ZHANG Yuelei², FU Yingkun¹

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China)

Abstract: In order to more accurately calculate the changes in the permeability of coalbed during production process, a calculation method for coalbed permeability based on production data is established by combining with material balance equations and production equations, and it gives the fact that the output data can be a good reflection of the inner permeability of coalbed. The average pressure of coalbed in production process can be calculated through material balance equation. Dimensionless water production index is introduced into the production equation in the stage only with water production. In the next stage with both gas and water, gas and water production ratio is introduced to eliminate the influence of flush-flow radius, skin factor as well as other uncertain factors on the calculation of CBM permeability. The relationship between permeability and surface cumulative liquid production can be described as a single-variable cubic equation by derivation. There is a trend that the permeability declines firstly and then increases after wells in Qinshui CBM field are calculated. The results show that reservoir permeability increase after drainage stage, but the growth rate decrease gradually. The regression result of the permeability ratio and surface cumulative fluid production agrees with the theoretical mathematic relationship.

Key words: coalbed methane; permeability; dynamic production data; productivity equation; material balance equation

收稿日期: 2013-10-18

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05009-006); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2009CB219600)

作者简介: 赖枫鹏(1981-), 男, 中国地质大学(北京) 讲师, 工学博士, 从事油气藏及煤层气动态分析、数值模拟方面的研究。(E-mail) laifengpeng@126.com。

煤层渗透率对煤层气井产量有很大的影响,同时煤层渗透率变化受多因素的制约,其中应力敏感和基质收缩是 2 个主要因素。国内外学者对煤层渗透率影响因素进行了大量的研究,主要集中在 3 个方面:1)应力对渗透率的影响;2)基质收缩对渗透率的影响;3)自调节效应下渗透率预测模型。渗透率与应力的关系主要通过室内实验得到,国内外学者在这方面进行了大量的实验研究^[1-4],建立了描述渗透率随应力变化的数学表达式。基质收缩对渗透率的影响研究,既有解吸收缩实验^[5],也有在实验基础上进一步推导描述基质收缩对渗透率影响的数学模型^[6-8]。渗透率预测模型方面,国内外学者均进行了研究,既有将基质收缩的影响转换成有效应力对渗透率的影响,得到渗透率分析模型^[9-13];也有基于岩石力学的基本理论,从应变角度出发建立了渗透率预测模型^[14-15]。

煤层气开采过程中渗透率变化是一个动态过程,前人所做的工作是从实验、理论出发,一定程度上忽略了实际排采数据对渗透率的反映。应用煤层气井气、水产能方程以及煤层气藏物质平衡方程,结合煤层气井相渗及气水产量数据对煤层渗透率进行求取。

1 生产数据处理

生产数据包括生产时间、日产气量(累计产气量)、日产水量(累积产水量)及井底流压。若生产数据中不存在井底流压数据,可根据式(1)进行近似计算。

$$p_{wf} \approx (D_{\text{中部}} - D_{\text{动液面}})/100 + p_{\text{套}}, \quad (1)$$

式中: p_{wf} 为井底流压,MPa; $D_{\text{中部}}$ 为煤层中部深度,m; $D_{\text{动液面}}$ 为动液面深度,m; $p_{\text{套}}$ 为套管压力,MPa。

将累积产量(气和水)代入物质平衡方程^[16]中,求得储层平均压力。裂缝孔隙度变化可由式(2)求出。

$$\varphi_f = \varphi_{fi} - \varphi_{fi} C_f (P_i - P) + \epsilon_{\text{max}} \left(\frac{P_i}{P_i + P_L} - \frac{P}{P + P_L} \right), \quad (2)$$

式中: φ_f 为目前压力下裂缝孔隙度,小数; φ_{fi} 为原始裂缝孔隙度,小数; C_f 为裂缝孔隙压缩率,MPa⁻¹; P_i 为原始储层压力,MPa; P 为目前储层平均压力,MPa; ϵ_{max} 为吸附饱和时的体积应变值,无量纲; P_L 为兰氏压力,MPa。

相渗数据应来自于计算区域煤层岩心的相渗实验,分别拟合得出气、水相对渗透率公式。若缺少相渗实验数据,可应用相渗经验公式,计算煤层气水相

对渗透率。

2 渗透率计算方法

用生产数据反求渗透率的方法是建立在煤层气井气、水产量方程及实际气、水生产数据基础上的,因此有必要在气、水产量方程的基础上通过转换得到渗透率的计算式。

2.1 水相产能方程确定渗透率

原始煤层裂缝(割理)最初饱和地层水,大部分气体遵循 Langmuir 等温吸附方程以吸附状态赋存于基质颗粒表面。一般来说,在产出气体前,需要从煤层中排采出大量的水,以降低储层压力至临界解吸压力以下。该时期的产水量计算公式可采用拟压力解公式表示^[17]。

$$q_w = 4.2869 \cdot \frac{B_g}{B_w} \cdot \frac{kk_{rw}h[m(\bar{p}) - m(p_{wf})]}{T \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w \right)}, \quad (3)$$

式中: q_w 为产水量,m³/d; k 为裂缝渗透率,mD; k_{rw} 为水相相对渗透率,无量纲; B_g 为甲烷气体的体积系数,m³/m³; B_w 为煤层水的体积系数,m³/m³; h 为储层有效厚度,m; S 为表皮系数,无量纲; T 为储层温度,K; D 为非达西因子,无量纲。

为了计算方便,将式(3)改写为:

$$J_{wD} = \frac{q_w}{m(\bar{p}) - m(p_{wf})} = 4.2869 \cdot \frac{B_g}{B_w} \cdot \frac{kk_{rw}h}{T \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w \right)}. \quad (4)$$

对于 $n+1$ 时刻,有:

$$J_{wD}^{n+1} = \frac{q_w^{n+1}}{m(p_{n+1}) - m(p_{wf}^{n+1})} = \left(0.005615 \cdot \frac{B_g}{B_w} \right)^n \frac{763.475k^{n+1}k_{rw}^{n+1}h}{T \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w^{n+1} \right)}. \quad (5)$$

对于 n 时刻,有:

$$J_{wD}^n = \frac{q_w^n}{m(\bar{p}^n) - m(p_{wf}^n)} = \left(0.005615 \cdot \frac{B_g}{B_w} \right)^n \frac{763.475k^n k_{rw}^n h}{T \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w^n \right)}. \quad (6)$$

用式(5)除以式(6),得到:

$$\frac{J_{wD}^{n+1}}{J_{wD}^n} = \frac{q_w^{n+1} [m(\bar{p}^n) - m(\bar{p}_{wf}^n)]}{q_w^n [m(\bar{p}^{n+1}) - m(\bar{p}_{wf}^{n+1})]} = \frac{B_g^{n+1} k^{n+1} k_{rw}^{n+1} (S_w^{n+1}) \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w^n \right)}{B_g^n k^n k_{rw}^n (S_w^n) \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w^{n+1} \right)} \quad (7)$$

由式(7)可得 $n+1$ 时刻的储层绝对渗透率 k^{n+1} , 即:

$$k^{n+1} = k^n$$

$$\frac{B_g^n (\bar{p}^n) k_{rw}^n (\bar{S}_w^n) \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w^{n+1} \right)}{B_g^{n+1} (\bar{p}^{n+1}) k_{rw}^{n+1} (\bar{S}_w^{n+1}) \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_w^n \right)} \rightarrow \frac{q_w^{n+1} [m(\bar{p}^n) - m(\bar{p}_{wf}^n)]}{q_w^n [m(\bar{p}^{n+1}) - m(\bar{p}_{wf}^{n+1})]} \quad (8)$$

若不考虑高速非达西效应, 即 $D=0$, 则式(8)可进一步简化为:

$$k^{n+1} = k^n \frac{B_g^n (\bar{p}^n) k_{rw}^n (S_w^n)}{B_g^{n+1} (\bar{p}^{n+1}) k_{rw}^{n+1} (S_w^{n+1})} \frac{q_w^{n+1} [m(\bar{p}^n) - m(\bar{p}_{wf}^n)]}{q_w^n [m(\bar{p}^{n+1}) - m(\bar{p}_{wf}^{n+1})]} \quad (9)$$

经过上述的公式变换, 可以避免式(3)中井径、边界半径、表皮系数等不确定参数。此外, 该方法同样可以通用于垂直压裂井, 避免裂缝参数的不确定性影响。

2.2 气水产能比方程确定渗透率

在水气同产期, 可用气水产能比方程对煤层气井产气量及产水量进行计算, 气水产能比方程由下式给出^[17]:

$$\frac{q_g}{q_w} = \frac{k_{rg} \mu_w p T_{sc}}{k_{rw} \mu_g p_{sc} T Z} + \frac{\mu_w p T_{sc} (C_g + C_s) D_g}{75.688 k k_{rw} p_{sc} T} \cdot \frac{B_w W_p}{V \varphi_f} \quad (10)$$

式中: C_g 为气体压缩系数, MPa^{-1} ; C_s 为吸附压缩系数, MPa^{-1} ; D_g 为基质微孔隙中气体扩散系数, m^2/d ; p_{sc} 为地面标准压力, MPa ; T_{sc} 为地面标准温度, K ; μ_w 为煤层水黏度, $\text{MPa} \cdot \text{s}$; V 为煤层体积, m^3 ; W_p 为累积产水量, m^3 (地面体积)。

C_s 的含义为甲烷气吸附于煤层基质造成的表观压缩系数, 其表达式为:

$$C_s = \frac{B_g V_L p_L}{145.04 \varphi_f (p + p_L)^2} \quad (11)$$

对式(10)进行变换, 得:

$$\frac{q_g}{q_w} - \frac{k_{rg} \mu_w p T_{sc}}{k_{rw} \mu_g p_{sc} T Z} = \frac{\mu_w p T_{sc} (C_g + C_s) D_g}{75.688 k k_{rw} p_{sc} T} \cdot \frac{B_w W_p}{V \varphi_f} \quad (12)$$

进而得到煤层裂缝渗透率的表达式为:

$$k = \frac{\mu_w p T_{sc} (C_g + C_s) D_g}{75.688 k_{rw} p_{sc} T} \cdot \frac{B_w W_p}{V \varphi_f} \frac{q_w k_{rw} \mu_g p_{sc} T Z}{q_g k_{rw} \mu_g p_{sc} T Z - q_w k_{rg} \mu_w p T_{sc}} \quad (13)$$

对于 $n+1$ 时刻, 有:

$$k^{n+1} = \frac{\mu_w p^{n+1} T_{sc} (C_g^{n+1} + C_s^{n+1}) D_g}{75.688 k_{rw}^{n+1} p_{sc} T} \cdot \frac{B_w W_p^{n+1}}{V \varphi_f^{n+1}} \frac{q_w^{n+1} k_{rw}^{n+1} \mu_g^{n+1} p_{sc} T Z^{n+1}}{q_g^{n+1} k_{rw}^{n+1} \mu_g^{n+1} p_{sc} T Z^{n+1} - q_w^{n+1} k_{rg}^{n+1} \mu_w p^{n+1} T_{sc}} \quad (14)$$

对于 n 时刻, 有:

$$k^n = \frac{\mu_w p^n T_{sc} (C_g^n + C_s^n) D_g}{75.688 k_{rw}^n p_{sc} T} \cdot \frac{B_w W_p^n}{V \varphi_f^n} \frac{q_w^n k_{rw}^n \mu_g^n p_{sc} T Z^n}{q_g^n k_{rw}^n \mu_g^n p_{sc} T Z^n - q_w^n k_{rg}^n \mu_w p^n T_{sc}} \quad (15)$$

式(14)除以式(15), 得到:

$$k^{n+1} = k^n \frac{k_{rw}^{n+1} p^{n+1} (C_g^{n+1} + C_s^{n+1})}{k_{rw}^n p^n (C_g^n + C_s^n)} \cdot \frac{W_p^{n+1} \varphi_f^n}{W_p^n \varphi_f^{n+1}} \cdot \frac{q_w^{n+1} k_{rw}^{n+1} \mu_g^{n+1} Z^{n+1}}{q_g^{n+1} k_{rw}^{n+1} \mu_g^{n+1} p_{sc} T Z^{n+1} - q_w^{n+1} k_{rg}^{n+1} \mu_w p^{n+1} T_{sc}} \cdot \frac{q_g^n k_{rw}^n \mu_g^n p_{sc} T Z^n - q_w^n k_{rg}^n \mu_w p^n T_{sc}}{q_w^n k_{rw}^n \mu_g^n Z^n} \quad (16)$$

2.3 渗透率与累积产液量的关系

煤层气藏物质平衡方程可用下式表达:

$$10^4 G_g B_g = Ah \varphi_{gi} f_{gi} (1 - S_{wi}) \frac{B_g}{B_{gi}} + \rho_B Ah V_L \frac{p_i}{p_i + p_L} B_g - Ah \varphi_f + Ah \varphi_{fi} S_{wi} + Ah \varphi_{fi} S_{wi} C_w (p_i - p) - W_p B_w - \rho_B Ah V_L \frac{p}{p + p_L} B_g \quad (17)$$

式中: G_p 为任意时刻的储层累积产气量的地面体积, m^3 ; A 为煤层气供给面积, km^2 ; S_{wi} 为原始裂隙中原始含水饱和度, 小数; B_{gi} 为原始压力时甲烷气体的体积系数, m^3/m^3 ; C_w 为地层水的压缩系数, MPa^{-1} ; W_p 为累计产水的地面体积, m^3 ; V_L 为兰氏体积, m^3/m^3 。

对上式两端分别除以原始裂隙孔隙度 φ_{fi} , 进行整理得:

$$\frac{G_p B_g}{\varphi_{fi}} = Ah (1 - S_{wi}) \frac{B_g}{B_{gi}} + \frac{\rho_B Ah V_L}{\varphi_{fi}} \frac{p_i}{p_i + p_L} B_g - Ah \frac{\varphi_f}{\varphi_{fi}} + Ah S_{wi} + Ah S_{wi} C_w (p_i - p) - \frac{W_p B_w}{\varphi_{fi}} - \frac{\rho_B Ah V_L}{\varphi_{fi}} \frac{p}{p + p_L} B_g \quad (18)$$

在式(18)中提取出孔隙度比 $\frac{\varphi_i}{\varphi_{fi}}$, 进而得到:

$$\frac{\varphi_i}{\varphi_{fi}} = (1 - S_{wi}) \frac{B_g}{B_{gi}} + \frac{\rho_B B_g V_L}{\varphi_{fi}} \left(\frac{p_i}{p_i + p_L} - \frac{p}{p + p_L} \right) + S_{wi} (1 + C_w (p_i - p)) - \frac{G_p B_g + W_p B_w}{Ah \varphi_{fi}} \quad (19)$$

根据 Palmer 和 Mansoori 提出煤层孔隙度和渗透率关系式:

$$\frac{k}{k_i} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_i} \right)^3, \quad (20)$$

$$\left[\frac{(1 - S_{wi}) \frac{B_g}{B_{gi}} + \frac{\rho_B B_g V_L}{\varphi_{fi}} \left(\frac{p_i}{p_i + p_L} - \frac{p}{p + p_L} \right) + S_{wi} (1 + C_w (p_i - p)) - \frac{G_p B_g + W_p B_w}{Ah \varphi_{fi}}}{k_i} \right]^3 \quad (21)$$

令

$$k_r = \frac{k}{k_i}, \quad (22)$$

$$L_p = G_p B_g + W_p B_w, \quad (23)$$

可得

$$k_r = aL_p^3 + bL_p^2 + cL_p + d, \quad (24)$$

式中 a, b, c, d 为方程系数。

因此, 可以看出, 渗透率比 k_r 与累积产液量 L_p 呈一元三次方程关系。

2.4 计算思路

应用煤层气井气、水产能方程以及煤层气藏物质平衡方程, 结合煤层气井气、水产量数据对煤层渗透率进行求取, 具体计算流程如图 1 所示。

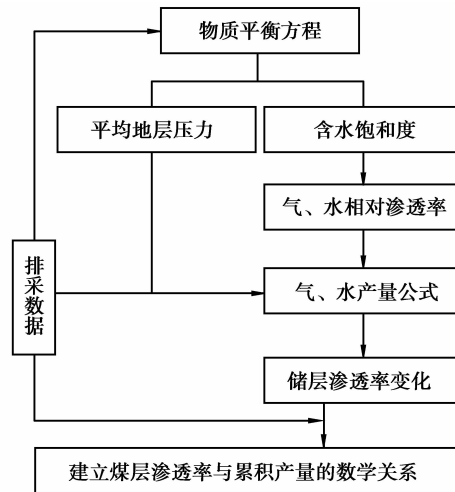


图 1 计算框图

3 实例计算

沁水盆地煤层含气量高, 煤层气资源丰富, 是国内目前煤层气勘探开发的主要地区。沁水盆地 2 000 m 以浅的煤层气地质资源量可达 $3.98 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。2005 年以来, 沁水盆地南部樊庄、潘庄、郑庄等区块已投入规模开发, 成为国内外高煤阶煤层气勘探开发的首个示范区。沁水盆地某煤层气藏兰氏压力为 3 MPa, 原始储层压力为 7 MPa, 储层温度为 300 K, 煤层厚度为 5 m, 原始裂缝孔隙度为 0.003, 原始含水饱和度为 0.95, 地层水压缩系数为 $0.000\ 435\ 8 \text{ MPa}^{-1}$, 裂缝孔隙压缩率为 $0.000\ 12 \text{ MPa}^{-1}$, 最大体积应变为 0.002 7, 原始地层渗透率为 1 mD, 泄气半径为 152 m。文献[18]对沁水南部盆地 4 块煤样进行了气、水两相流动实验, 得到 4 块煤样的相对渗透率实验数据, 如表 1 所示。

表 1 沁南盆地煤岩相对渗透率数据表

k_{ri}		S_w						
		100	80	60	50	40	30	15
煤样 1	水	1	0.698 5	0.292 2	0.218 6	0.168 5	0.134 6	0.131 1
	煤层气	0	0.049 7	0.083 5	0.163 6	0.247 8	0.389 9	0.526 8
煤样 2	水	1	0.755 9	0.314 8	0.307 0	0.218 7	0.112 5	0.068 4
	煤层气	0	0.046 4	0.078 1	0.080 4	0.081 7	0.301 3	0.530 6
煤样 3	水	1	0.719 8	0.726 5	0.638 8	0.433 1	0.264 7	0.014 9
	煤层气	0	0.08 59	0.122 2	0.115 8	0.246 8	0.300 8	0.398 6
煤样 4	水	1	0.733 1	0.517 7	0.418 9	0.281 1	0.183 8	0.067 5
	煤层气	0	0.023 5	0.039 9	0.053 3	0.164 1	0.299 7	0.401 7

分别对气相相对渗透率数据及水相相对渗透率数据进行回归分析, 得到气水相对渗透率与饱和度的关系式, 具体形式为:

$$k_{rg} = 0.035\ 87 \ln S_g + 0.112\ 5,$$

$$k_{rw} = 0.395\ 0 - 2.043\ 7 S_w + 4.409\ 2 S_w^2 - 1.756 S_w^3.$$

根据目前已掌握的沁水盆地 15 口井动态生产数

据,其中生产时间最短的为 322 d(J1 井),生产时间最长的为 997 d(HC01 井),平均生产时间为 548 d。选

取生产时间较长的 3 口井(均在 700 d 以上),对煤层渗透率的变化情况进行计算,结果如表 2 所示。

表 2 沁水盆地煤层气井基本生产数据统计表

井号	生产 天数/ d	累积 产气量/ m ³	累积 产水量/ m ³	最小 产气量/ (m ³ ·d ⁻¹)	最小 产水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	最大 产气量/ (m ³ ·d ⁻¹)	最大 产水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	平均 产气量/ (m ³ ·d ⁻¹)	平均 产水量/ (m ³ ·d ⁻¹)
井 12	767	1 914 000	10 22.00	100	0.3	5 806.00	7.10	2 914.08	1.99
井 16	757	1 238 500	717.60	0.00	0.3	4 122.00	7.00	2 068.27	0.87
井 HC01	997	1 483 300	856.00	0.00	0.2	3 282.00	24.04	1 492.79	0.84

从图 2 中可以看到,井 12、井 16 在达到产气高峰后,产气量呈现明显的下降趋势。井 12 在排采 304 d 时日产气量达到 3 955 m³,排采 767 d 时日产气量仅为 2 000 m³,这一阶段产量递减率为 49.43%,平均日递减率为 0.11%。井 16 在排采 162 d 时日产气量达到 4 005 m³,排采 627 d 时日产气量仅为 1 146.2 m³,这一阶段产量递减率为 71.38%。图 3 表明 3 口气井的产水量在产气后均有明显的下降趋势,井 12 在排采 304 d 时日产水量为 1.5 m³,排采 767 d 时日产水量为 0.3 m³。

三口井中,井 12 排水时间为 126 d,井 16 排水时间为 71 d,井 HC01 排水时间为 10 d。通过计算,得到纯排水阶段之后的排采过程中储层渗透率和裂缝孔隙度的变化情况,如图 4、5 所示。

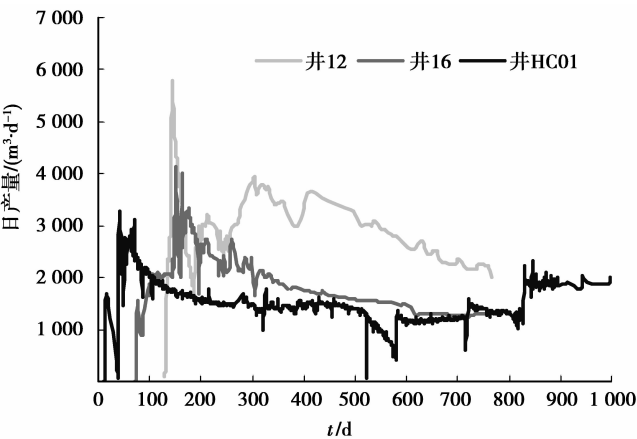


图 2 单井日产气量与时间关系曲线

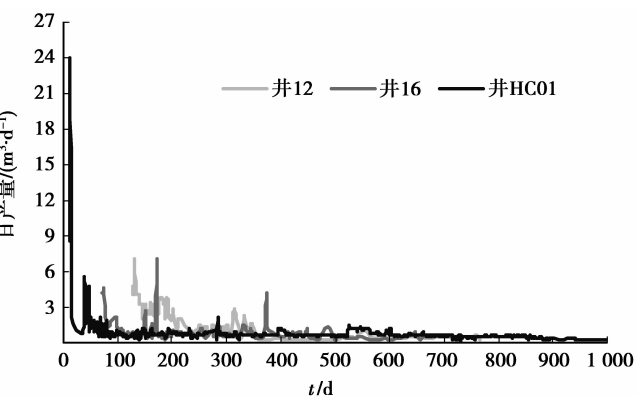


图 3 单井日产水量与时间关系曲线

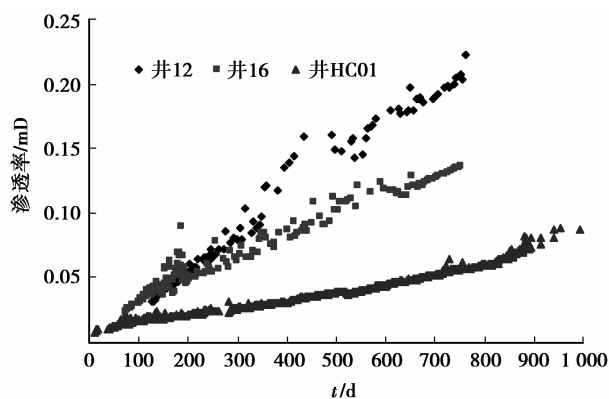


图 4 纯排水阶段后煤储层渗透率与时间关系曲线

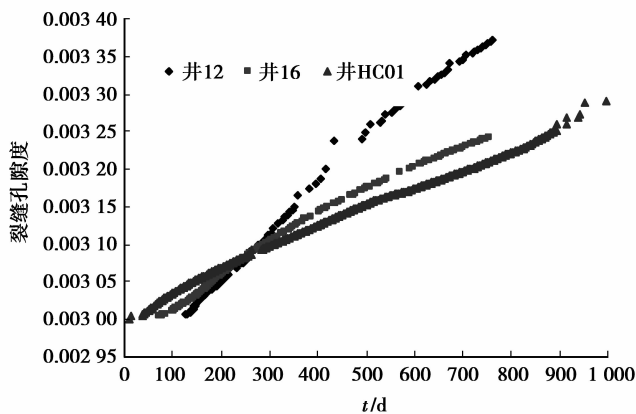


图 5 纯排水阶段后煤储层裂缝孔隙度与时间关系曲线

在纯排水阶段,煤层渗透率的变化主要受应力敏感的影响,可以根据应力敏感性实验进行描述。如果没有应力敏感性实验,则可通过前面推导的渗

透率比与累积产液量的关系表达式进行描述。在煤层气开采过程中,储层渗透率的变化是应力敏感与基质收缩两种效应综合作用的结果,储层压力下降,应力敏感对渗透率的影响逐渐减弱,基质收缩效应增强,基质收缩起到改善煤层气渗透率的效果^[19-20]。从图 4 中可以看到,在纯排水阶段之后,渗透率呈现上升趋势,表明该煤层气藏在纯排水阶段后应力敏感对渗透率的影响逐步减弱,基质收缩对渗透率的影响则更明显。3 口生产井中,井 12 渗透率大于其他 2 口井,这是因为生产过程中井 12 产气量高于其他井。

表 3 列出了井 HC01 在排采过程中的产气量、产水量及计算得到的渗透率值及渗透率增长率。随着排采时间的延长,渗透率呈现增长趋势,但是渗透率增长率呈现波动下降的过程,也就是说渗透率不会随着时间无止境的增大。井 HC01 在排采 500 d 时,渗透率增长率达到 28.26%,大于 400 d 时的 14.26%,这是因为在 400 d 时产水量大于 500 d 时的产水量,400 d 时应力敏感对渗透率所起的负效应要大于 500 d 时的负效应,而产气量的递减率只有 5.58%,综合得到 500 d 时的渗透率增长率相比前一阶段有所增加。600 d 时,排水量增加,渗透率增长率明显降低,而 700 d 时排水量降低,此时的渗透率增长率高于前一阶段。在纯产气阶段,产水量越来越小,并趋于一个稳定值,也就是应力敏感对渗透率的影响较小,且趋于稳定。而产气后期产气量呈现递减趋势,此时基质收缩对储层渗透率的影响也变弱。综合来看,渗透率增长率是一个随着排采时间逐步变小的趋势。

表 3 井 HC01 排采过程渗透率及动态数据表

t/d	产气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	渗透率/ mD	渗透率 增长率/%
100	2 039.10	0.70	0.016 5	
200	1 575.60	0.84	0.021 0	27.50
300	1 489.70	0.85	0.026 8	27.26
400	1 478.00	1.21	0.030 6	14.26
500	1 395.50	0.58	0.039 2	28.26
600	1 138.70	1.21	0.043 7	11.39
700	1 191.00	0.60	0.052 0	19.05
800	1 303.50	0.49	0.060 3	15.99

通过前面的推导得到储层渗透率比与累积产液量的关系可以用一元三次方程来描述,表 4 中的数据很好的验证了这一点。

表 4 煤层气井渗透率比与地面累积产液量关系表

回归类型	回归参数				
	a	b	c	d	R^2
一元三次 多项式					
井 12	1E-15	-1E-10	8E-06	0.029 1	0.992 3
井 16	4E-15	-2E-10	6E-06	0.030 8	0.955 2
井 HC01	4E-17	3E-11	2E-06	0.012 6	0.992 4

4 结 论

1) 在排采过程中煤储层渗透率受到应力敏感与基质收缩的共同作用,以煤层气藏物质平衡方程、煤层孔渗变化数学模型及相渗数据为基础,形成了一种利用动态生产数据反求煤层渗透率的方法。

2) 理论推导得到在气水同产阶段煤层渗透率与累积产液量之间的关系可以用一元三次方程来描述,实际井的计算也很好的验证了这一点。

3) 通过计算,可以得到煤层渗透率与排采数据之间的直接关系,对制定煤层气井合理工作制度起到一定的指导作用,为掌握煤层物性变化提供一定的理论基础,从而提高煤层气的开采效率。

参考文献:

- [1] Somerton W H, Soylemezoglu I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1975, 12(5/6): 129-145.
- [2] Durucan S, Edwards J S. The effect of stress and fracturing on permeability of coal [J]. Mining Science and Technology, 1986, 3(3): 205-216.
- [3] 谭学术, 鲜学福, 张广洋, 等. 煤的渗透性研究[J]. 西安矿业学院学报, 1994(1): 22-25.
TAN Xueshu, XIAN Xuefu, ZHANG Guangyong, et al. Research on the permeability of coal [J]. Journal of Xi'an mining institute, 1994(1): 22-25.
- [4] 吴世跃, 赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1674-1678.
WU Shiyue, ZHAO Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1674-1678.

- [5] Seidle J P, Huitt L G. Experiment measurement of coal matrix shrinkage due to gas desorption and implications for cleat permeability increases[C/OL] // International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, November 14-17, 1995 [2013-09-21]. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=6302677>.
- [6] Pan Z, Connell L W. A theoretical model for gas adsorption-induced coal swelling [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 69(4): 243-252.
- [7] 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.
- [8] 付玉, 郭肖, 贾英, 等. 煤基质收缩对裂隙渗透率影响的新数学模型[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 143-145.
FU Yu, GUO Xiao, JIA Ying, et al. New mathematical model for effect of coal matrix shrinkage on fracture permeability [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(2): 143-145.
- [9] Gray I. Reservoir engineering in coal seams: Part1-the physical process of gas storage and movement in coal seams [J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 2(1): 28-34.
- [10] Shi J Q, Durucan S. Changes in permeability of coalbeds during primary recovery-Part 1: model formulation and analysis [C] // The 2003 International Coalbed Methane Symposium. Tuscaloosa: [s. n.], 2003.
- [11] Shi J Q, Durucan S. Changes in permeability of coalbeds during primary recovery-part 2: model formulation and analysis[C] // The 2003 International Coalbed Methane Symposium. Tuscaloosa: [s. n.], 2003.
- [12] Shi J Q, Durucan S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery [J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2005, 8(4): 291-299.
- [13] 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.
- [14] Palmer I, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model [J]. SPE Reservoir Engineering, 1998, 1(6): 539-544.
- [15] Robertson E P, Christiansen R L. Modeling permeability in coal using sorption induced strain data[C] // Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [16] 何玮, 段永刚, 王喜梅, 等. 煤层气流动物质平衡方程的建立及应用分析[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2009, 11(4): 28-31.
HE Wei, DUAN Yonggang, WANG Ximei, et al. Building and application of the flowing material balance equation for coalbed methane [J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2009, 11(4): 28-31.
- [17] 郎兆新, 张丽华, 罗山强. 零维煤层气模拟软件的研制[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21(5): 30-34.
LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua, LUO Shanqiang. A tank-type simulator for coal-bed methane production [J]. Journal of The University of Petroleum, China, 1997, 21(5): 30-34.
- [18] 张瑜. 沁水南部盆地高阶煤产气机理与产气规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [19] 吴晓东, 师俊峰, 席长峰. 煤层渗透率敏感性及其对煤层气开发效果的影响[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 27-29.
WU Xiaodong, SHI Junfeng, XI Changfeng. Sensitivity of coalbed permeability and its influences on production of coalbed methane [J]. Nature Gas Industry, 2008, 28(7): 27-29.
- [20] 赖枫鹏, 李治平, 汪益宁, 等. 基于等效基质颗粒模型自调节效应孔渗计算方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 84-88.
LAI Fengpeng, LI Zhiping, WANG Yining, et al. Calculating method of porosity and permeability under self-regulating effect based on equivalent matrix particle model [J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(6): 84-88.