

一种煤层气藏相渗的获得方法及曲线形态讨论

朱苏阳¹, 彭小龙¹, 李传亮¹, 邓鹏¹, 马飞英², 彭朝阳^{2,3}, 孙晗森⁴, 贾慧敏⁵

(1. 西南石油大学 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 广东石油化工学院 非常规能源工程技术研究中心, 广东 茂名 525000; 3. 四川特贝克油气技术有限公司, 四川 成都 610500; 4. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100000; 5. 中石油华北油田 山西煤层气勘探开发分公司, 山西 晋城 048000)

摘要: 煤层气的相渗曲线通常采用气-水两相驱替实验获得, 实验认为煤岩割理的两相流动区域较小, 且临界流动含水饱和度较高。然而, 煤层中的流体运移是一种耦合基质解吸和割理两相流动的过程。基质中解吸出的气体汇聚在割理后, 与水相共同参与流动, 并非简单的单向驱替过程, 这导致生产过程中气驱波及效率远好于实验得到的结果。为获得煤层中的相渗规律, 本文建立考虑基质解吸作用的煤层气流动拟稳态产能模型, 通过联立煤层气的物质平衡方程, 获得一种基于生产历史的煤层气-水相渗曲线的反演方法。同时, 研究分析实验得到与反演得到的相渗曲线之间的差异, 认为差异主要源于实验室单向驱替过程中较小的波及系数。最后, 研究通过数值模拟分析两种相渗曲线对产气动态的影响。

关键词: 石油工程; 煤层气; 相渗曲线; 割理; 拟稳态; 压缩系数

中图分类号: TE 21

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)08-1659-08

An approximation of the relative permeability and discussion on curve shapes in coalbed methane reservoirs

ZHU Suyang¹, PENG Xiaolong¹, LI Chuanliang¹, DENG Peng¹, MA Feiyang², PENG Zhaoyang^{2,3},
SUN Hanshen⁴, JIA Huimin⁵

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Engineering and Technology Center of Unconventional Resource, Guangdong Petroleum and Chemical Engineering Institute, Maoming, Guangdong 525000, China; 3. Sichuan Tebake Oil and Gas Ltd., Company, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. Zhonglian CBM Ltd., Company, Beijing 100000, China; 5. PetroChina Huabei Oil field CBM Exploration and Exploitation Company, Jincheng, Shanxi 048000, China)

Abstract: In coalbed methane(CBM) reservoirs, relative permeability curves are commonly obtained using gas-water displacement experiment, and it is commonly concluded that the 2-phase flow area is very narrow and that the critical water saturation is extremely high according to experimental results. However, the fluid flow in coal is a complex process of coupled desorption from matrix and 2-phase flow in cleats. The process that gas desorbs from matrix, enters cleats and displaces water is different from one-direction gas displacement in laboratory, which leads to that the sweeping efficiency in production process is higher than that in experiment. To obtain the appropriate relative permeability in coal, a CBM productivity model was established in pseudo-steady

收稿日期: 2019-02-20; **修回日期:** 2019-04-03

基金项目: “十三五”国家科技重大专项课题(2016ZX05066004-001); 广东省非常规能源工程技术研究中心开放基金项目(GF2018A010)

Supported by the China 13th Five Major Project of Science and Technology(Grant No. 2016ZX05066004-001) and Funding of Guangzhou Engineering Center of Unconventional Resource(Grant No. GF2018A010)

作者简介: 朱苏阳(1989-), 男, 2018年于西南石油大学油气田开发工程专业获得博士学位, 现任讲师、博士后, 主要从事油气藏工程以及煤层气藏工程基础方面的研究工作。E-mail: suyang.zhu@swpu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0122

state considering the desorption effect in matrix. Combining the material balance equation, an inversion method of the relative permeability curve in CBM reservoirs was proposed based on production history. The difference between relative permeability curves obtained from experiment and the developed method was discussed, and it is pointed out that the difference contributes to the low sweeping efficiency in experiment. Finally, the effects of two types of relative permeability curves were illustrated using numerical simulation method.

Key words: petroleum engineering; coalbed methane; relative permeability curve; cleat system; pseudo-steady state; compressibility

1 引言

煤层气主要以吸附态赋存于煤层中，是一种典型的非常规天然气^[1-4]。煤岩的割理系统(裂缝系统)非常发育，通常为3~15条/cm。因此，通常认为煤岩由基质与割理系统构成，符合典型双重介质特征^[5-7]。初始条件下，基质中保存了吸附态的煤层气，而割理系统则饱和地层水^[8-10]。多数煤层气藏的赋存处于欠饱和状态，煤层气的开采首先需要通过排水降低煤层的压力，然后基质中的煤层气才开始解吸，并汇聚在割理中参与流动^[11-12]。因此，煤层的气-水两相流动特征是描述煤层气开发过程中流体运移规律的关键问题。

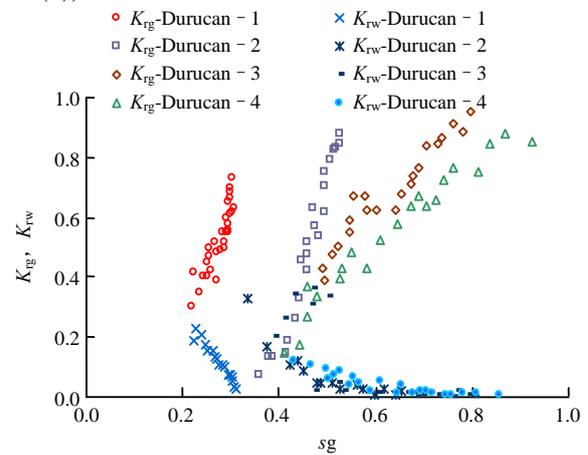
相渗曲线的形态可以综合反映储层的孔隙结构特征以及流体间的相互作用关系，是研究多孔介质内两相流动的核心问题。煤岩的相渗曲线一般采用驱替实验获得。对于高阶煤，驱替实验得到的相渗曲线通常具有较高的临界含水饱和度($s_{cw}>60%$)，这说明煤层中的两相流动区域非常窄，而且气驱水效果非常差^[13]。因此，实验研究^[13-14]认为开采过程中，大量的水滞留在割理中难以流动。然而，这一认识与煤层的产水规律以及多数煤层气藏中后期的生产动态并不相符^[9]。

为了解决这一矛盾，本文分析了煤层中的特殊气-水两相渗流过程，建立了拟稳态条件下考虑解吸作用的煤层气产能方程，通过联立煤层气物质平衡方程，获得了一种通过煤层气生产历史反演煤层相渗曲线的方法，并讨论了煤岩的相渗曲线形态。

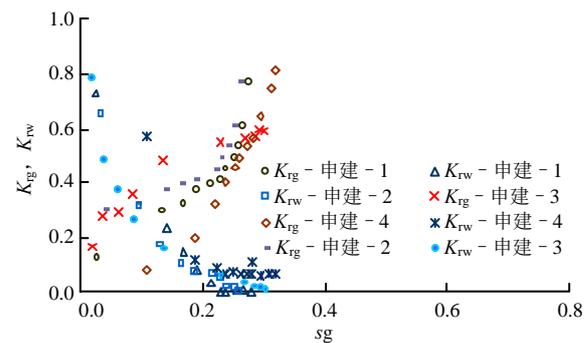
2 实验中的相渗曲线

对于煤层中的气-水两相运移过程，通常采用传统气藏工程中的单向气驱水实验进行研究。S. Durucan 等^[13-16]对煤岩的气-水两相渗透率实验已经进行了较为完善的探索。对于 Black Warriors 盆

地和 San Juan 盆地等的中-低阶煤，实验研究表明临界流动含水饱和度大致在 10%~40%范围，临界流动含气饱和度大致为 2%~16%^[13](见图 1(a))。对于沁水盆地的中-高阶煤层^[14]，实验显示两相流动区域较窄，临界流动含水饱和度大致在 30%~70%，临界流动含气饱和度则通常小于 0%~5%(见图 1(b))。



(a) 中-低阶煤层典型相渗曲线



(b) 中-高阶煤层典型相渗曲线

图1 煤岩相渗实验测试结果

Fig.1 Relative permeability curves obtained from laboratory tests

因此，研究认为由于中-高阶煤的割理系统较为致密，渗透率较小，煤岩的毛管压力对两相运移过程影响较大。因此，实验过程中气驱水的效率较低，煤岩中两相流动区域较窄。对于中-高阶煤层气藏的排采，地层中存在较高的临界流动含水饱和

度，大量的水滞留在煤层中，煤层的排水效率较低。

3 基于生产历史反演的相渗曲线

煤层中的气 - 水两相流动，是一个耦合了基质中解吸与割理中两相渗流的物理过程，并非实验中简单的单向驱替过程。而气井的生产历史则是反映这一耦合过程的具体表现。因此，本文通过建立考虑解吸作用的煤层气井拟稳态产能模型，将解吸作用从运移过程中解耦，尝试基于生产历史和解吸数据，研究煤层割理中的两相流动特征。

3.1 考虑解吸作用的拟稳态产能方程

拟稳态条件下的煤层气产能模型的假设条件为：(1) 圆形煤层中心存在一口排采井，模型的外边界为封闭边界；(2) 煤岩为双重介质，由基质和割理系统组成；(3) 煤层中的气 - 水两相流动主要在割理中进行，基质的作用是储集并向割理中提供煤层气，基质中的气体不直接流入井筒；(4) 煤层气的吸附服从 Langmuir 等温吸附规律，煤层的流动过程中温度保持恒定；(5) 生产进入拟稳态之后，煤层中的含水饱和度变化较小。因此，煤层气的流动可以通过添加“气源项”的方式进行简化，气体的连续性方程为

$$\nabla(\rho_g v_g) + \rho_g F = -\phi_c \frac{\partial \rho_g S_g}{\partial t} \quad (1)$$

式中： ∇ 为 Hamilton 算子，计算变量在空间各方向上的全微分； ρ_g 为气体密度(g/m^3)； v_g 为气体流动速度(m/ks)； F 为储层条件下的解吸气源项(m^3/ks)； ϕ_c 为煤层割理孔隙度，小数； S_g 为含气饱和度，小数； t 为时间(ks)。

通过气体状态方程，可以将式(1)简化为

$$\nabla \cdot v_g + F = -\phi_c c_g S_g \frac{\partial p_g}{\partial t} - \phi_c \frac{\partial S_g}{\partial t} \quad (2)$$

根据拟稳态流动过程以及煤层气生产动态中的饱和度分析^[17-20]，由于割理中的含气饱和度变化较小，可以将含气饱和度对时间的导数项忽略不计。另外，将 F 可以通过气体状态方程转换为标准状态下的解吸源项 F_{sc} 。而 F_{sc} 可以通过对煤层含气量对时间求导获得，具体可以表示为

$$F_{sc} = \frac{\partial V_{coal}}{\partial t} = \frac{\partial p_g}{\partial t} \frac{\partial}{\partial p_g} \left(V_L \frac{p_L}{p_g + p_L} \rho_c \right) \quad (3)$$

式中： F_{sc} 为标准条件下的解吸气源项(m^3/ks)， V_{coal} 为煤层含气量(m^3/m^3)， V_L 为兰氏体积(m^3/t)， p_L 为兰氏压力(MPa)， p_g 为地层压力(MPa)， ρ_c 为煤基质

密度(t/m^3)。

将式(3)代入式(2)，忽略饱和度对时间的导数，并将式(2)中的气体速度由流动达西公式表示，化简可得

$$k_g \nabla \cdot \left[\frac{p_g}{\mu_g Z} \nabla p_g \right] = \phi_c \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p_g}{Z} \right) + \frac{p_{sc} Z T}{p Z_{sc} T_{sc}} V_L \rho_c \frac{p_L}{(p_g + p_L)^2} \frac{\partial p_g}{\partial t} \quad (4)$$

式中： k_g 为气相渗透率(mD)； μ_g 为气体黏度($\text{mPa} \cdot \text{s}$)； Z 为真实气体压缩因子，无因次； Z_{sc} 为标况条件下气体压缩因子，无因次； p_{sc} 为标况条件的压力， 0.1 MPa ； T 为储层温度(K)； T_{sc} 为标况条件下的温度(293 K)。

将气体的压缩系数表达式，拟压力函数表达式及气体的体积系数表达式代入式(4)，化简可得

$$\nabla^2 m(p_g) = \frac{\phi_c \mu_g}{k_g} \left[c_g + \frac{B_g V_L \rho_c p_L}{\phi_c (p_g + p_L)^2} \right] \frac{\partial m(p_g)}{\partial t} \quad (5)$$

式中： $m(p)$ 为气体的拟压力(MPa^{-1})； c_g 为气体的压缩系数(MPa^{-1})； B_g 为气体的体积系数，小数。

解吸作用对气体压力起到补充作用，类似于增大了气体的压缩系数^[17]。因此，定义 c_{de} 为气体解吸压缩系数，等效代替解吸对压力的补充作用：

$$c_{de} = \frac{B_g V_L \rho_c p_L}{\phi_c (p + p_L)^2} \quad (6)$$

式中： c_{de} 为解吸压缩系数(MPa^{-1})。

将式(6)代入式(5)，并整理成为径向流条件下的考虑解吸作用的煤层气渗流微分方程。由于煤层流动边界多为封闭边界。因此，考虑解吸的煤层气流动数学模型为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial m(p_g)}{\partial r} \right) = \frac{\phi_c \mu_g (c_g + c_{de})}{K_0 K_{rg}} \frac{\partial m(p_g)}{\partial t} \quad (7)$$

$$p_g \Big|_{r=r_w} = p_{wf}, \quad \frac{\partial p_g}{\partial n} \Big|_{r=r_c} = 0, \quad p_g \Big|_{r=0} = p_i \quad (8)$$

式中： n 为法线方向。渗流微分方程为式(7)，边界条件与初始条件为式(8)。

由于将解吸气源项处理为解吸压缩系数的形式，模型的求解与 Al-Hussainy 和 Ramey 求解拟稳态方程的方法类似。在计算过程中，相对渗透率并未参与积分计算，该方法适用于煤层含水饱和度变

化不大的情况，这与研究的假设条件保持一致^[18-20]。采用气藏平均压力 p_R 代替边界压力等效计算，可以获得式(7)的工程近似解为

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = \frac{q_g T Z \bar{\mu}_g}{K_0 K_{rg} h} \left(2\pi t_{DA} + \ln \frac{r_e}{r_w} - 0.75 + s \right) \quad (9)$$

$$t_{DA} = \frac{K_0 t}{\pi \phi_c \mu_g (c_g + c_{de}) r_e^2} \quad (10)$$

式中： p_R 为储层平均压力(MPa)； p_{wf} 为井底流压(MPa)； q_g 为产气量(m^3/ks)； K_0 为煤层绝对渗透率(mD)； K_{rg} 为气体相对渗透率，小数； h 为储层厚度(m)； t_{DA} 为等效计算时间，无因次； r_e 为等效泄流半径(m)； r_w 为井筒半径(m)； s 为表皮系数，无因次。

由于煤层气藏的压裂缝半长较小，通常不超过150 m，因此可以采用表皮系数 s 等效计算压裂缝对气井的增产作用，计算方法如 J. Seidle^[17] 中所示，计算结果的可靠性已由 J. Seidle 等^[17-20] 验证。对于煤层中的水相流动，则可以直接引用拟稳态条件下两相流动的产水方程^[11]：

$$p_R - p_{wf} = \frac{q_w B_w \mu_w [\ln(r_e / r_w) - 0.75 + s]}{K_0 K_{rw} h} \quad (11)$$

式中： B_w 为水的体积系数(m^3/m^3)； μ_w 为煤层水的黏度($mPa \cdot s$)； K_{rw} 为地层水相对渗透率，小数； q_w 为气井的产水量(m^3/ks)。

3.2 联立煤层气物质平衡方法的相渗计算流程

由于拟稳态产能方程的计算需要获得气藏的平均压力，因此联立煤层气的物质平衡方程求解煤层的平均压力和平均含水饱和度(计算相渗曲线)。煤层气的物质平衡方程可以直接引用 J. Seidle^[17] 建立的考虑解吸作用的物质平衡方法，模型如下：

$$s_w = s_{wi} - \frac{B_w W_p}{Ah\phi_c} \quad (12)$$

$$\frac{p_R}{Z^*} = \frac{p_{Ri}}{Z_i^*} \left(1 - \frac{G_p}{G_i} \right) \quad (13)$$

$$Z^* = Z \left/ \left[\frac{\rho_c V_{coal} p_{sc} T Z}{\phi_c Z_{sc} T_{sc} (p_g + p_L)} + (1 - s_w) \right] \right. \quad (14)$$

式中： s_w 为平均含水饱和度，小数； s_{wi} 为初始含水饱和度，数值为1； W_p 为累计产水量(m^3)； A 为泄油面积(m^2)； p_{Ri} 为储层初始压力(MPa)； G_p 为累计产气量(m^3)； G_i 为地质储量(m^3)； Z^* 为考虑解吸的气体平均压缩因子，无因次； Z_i^* 为考虑解吸的气体初始压缩因子，无因次。

通过联立考虑解吸作用的煤层气拟稳态产能方

程(式(9)~(11))和煤层气物质平衡方程(式(12)~(14))，可以基于煤层气生产历史数据，反演获得煤层气-水相渗曲线，计算流程如图2所示。首先收集气井的生产资料、岩芯分析资料(割理孔隙度与绝对渗透率)、完井资料以及压裂评价资料。通过邓鹏等^[21]中的计算方法，将煤层气井的井口产水量转换为煤层的排水量。这对于排水量(由井筒排出)较低的高阶煤层气藏的产水量(煤层流入井筒)计算的准确性格外重要。然后，通过物质平衡方法计算煤层开采过程中的平均压力和含水饱和度。

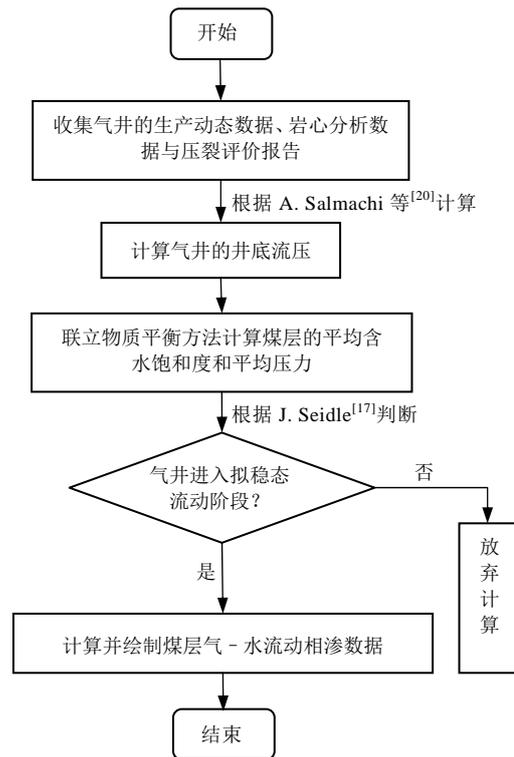


图2 基于生产历史的相渗曲线反演方法
Fig.2 Inversion method for relative permeability curves based on production history

通过井底流压变化或是 C. R. Clarkson 等^[18]中的流动物质平衡方法可以判断煤层中的流动阶段，如果生产已经进入拟稳态流动阶段，则通过式(10)~(12)可以计算煤层气和水的相对渗透率。结合物质平衡方法中每个数据点的平均含水饱和度，可以绘制煤层中的气-水两相流动的相渗曲线。

4 实例计算与结果讨论

4.1 实例计算

韩城矿区煤层气的主要生产层位为3[#]，5[#]以及11[#]煤层。其中，主力产层5[#]煤的埋深大致分布在400~1 200 m，地层压力系数在0.6~0.8之间，镜

质组含量为 50%~60%^[22]。5 号煤的热演化程度较高,属于中-高阶煤层,镜质体反射率 R_0 在 0.90%~2.12%,固定碳含量为 88%~91%^[23]。

研究取 A. Salmachi 等^[20]中韩城矿区两口生产效果较好的井(BJ-a 井和 BJ-b 井)进行实例计算研究。两口井的煤层气排采层位均为韩城矿区的 5 号煤,投产之前进行了压裂增产,压裂缝半长数据根据临井压裂评价报告获得,两口井的储层物性参数以及完井参数如表 1 所示。两口井的排采数据(产气量、产水量与井底流压)如图 3 所示。

根据本文提出的基于生产历史的计算流程(见图 2),可以获得两口井的气-水相渗曲线(见图 4)。由于本文提出的算法只能计算压力传播至边界后的相对渗透率。对于生产前期煤层气-水两相处于瞬态流动的情况下,相对渗透率值无法计算。因此,图 4 中相渗曲线含水饱和度接近 1 时的计算点缺失。

根据 M. J. Mavor 和 J. R. Robinson^[24]建立的煤层气-水相渗曲线的半经验公式,可以拟合图 4 中

计算得到的相渗曲线。M-R 相渗曲线模型可以表示为

$$s_w^* = \frac{s_w - s_{wc}}{1 - s_{wc}} \quad (15)$$

$$K_{rw} = (s_w^*)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \quad (16)$$

$$K_{rg} = K_g^* (1 - s_w^*)^n \left[1 - (s_w^*)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right] \quad (17)$$

式中: K_g^* 为 s_{wc} 条件下的气体相对渗透率, 小数; n 为经验系数, 小数; s_{wc} 为临界流动含水饱和度, 小数; s_w^* 为拟含水饱和度, 小数; λ 为相渗模型中的经验系数, 小数。

通过 M-R 模型的拟合得到 BJ-a 井的临界含水饱和度为 0.32, 临界含气饱和度为 0.04, 解吸气对割理中水的驱替效率为 94.11%; BJ-b 井的临界含水饱和度为 0.37, 临界含气饱和度为 0.02, 解吸气对割理中水的驱替效率为 96.82%。通过韩城矿区 5 号煤(中-高阶煤)的气井生产历史反演得到的结果可知,煤层中的气-水两相渗流区域较大,煤层的临

表 1 数值模型基本参数设置
Table 1 Parameters in the numerical model

名称	初始压力/MPa	埋深/m	煤层厚度/m	r_e/m	r_w/m	割理孔隙度/%	割理渗透率/mD	压裂缝半长/m	含气量/ $(m^3 \cdot t^{-1})$	$c_p/(10^{-4} MPa^{-1})$	兰氏压力/MPa	兰氏体积/ $(m^3 \cdot ton^{-1})$	水体积系数/ $(m^3 \cdot m^{-3})$	煤层密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	储层温度/ $^{\circ}C$
井 1	6.96	722.86	8.95	258.53	0.19	1.1	8.84	80	19.24	0.119 1	2.83	19.65	1.21	1.41	49
井 2	6.01	637.19	9.82	257.01	0.19										

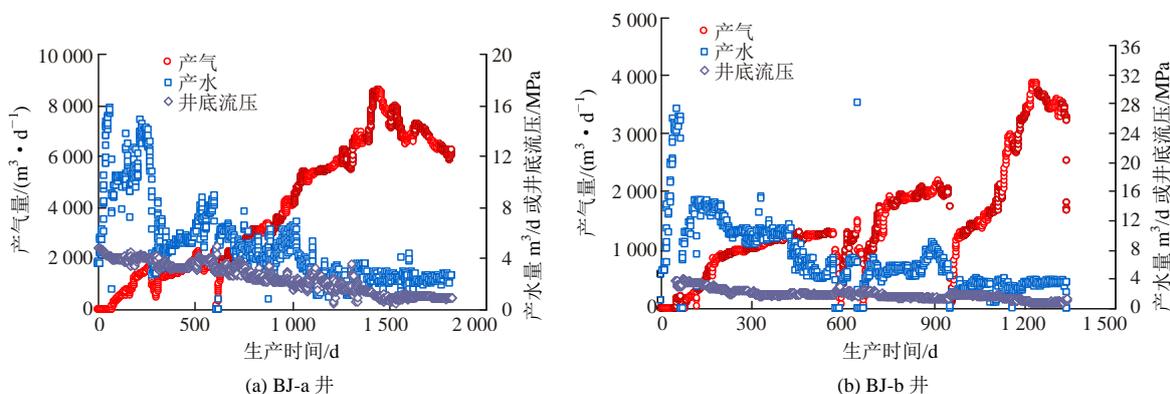


图 3 韩城矿区两口煤层气井生产历史

Fig.3 Production history of two wells in Hancheng Block

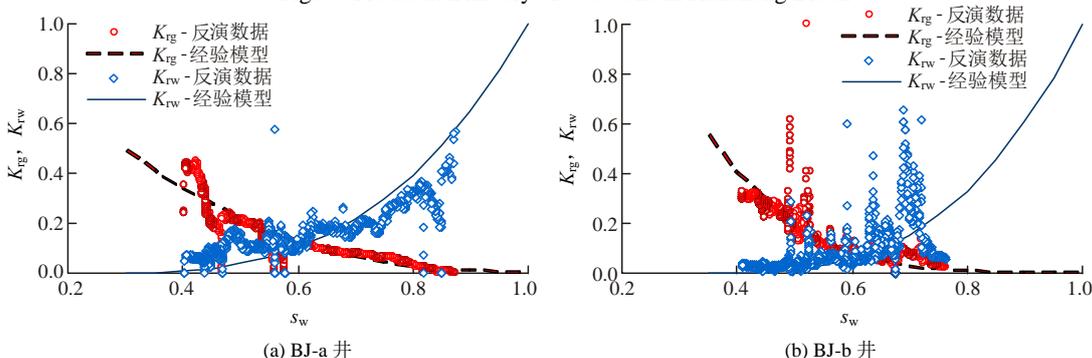


图 4 韩城矿区煤层相渗曲线计算结果

Fig.4 Relative permeability curves in Hancheng Block

界流动含水饱和度较低，煤层中解吸运移至割理系统的煤层气对水的驱替效果较好，而这与实验得到的结果并不一致。

4.2 差异分析

常规气藏的两相流动是一个单向驱替的过程，气藏的边水或底水驱替孔隙中的气体，储层中流体的运移有一个明确的方向性。同时，常规气藏的小岩芯孔隙系统也满足连续介质的要求。因此，气驱水实验得到的相渗曲线可以较好地反映常规气藏中的两相流动特征。

然而，煤层中的流体运移耦合了基质中的解吸以及割理中的两相流动，并不是实验中简单的单向驱替过程，也与常规气藏的两相流动存在一定差异。下面从变质量流动、驱替效率以及介质的连续性三个方面进行讨论。

(1) 变质量流动过程

常规气藏的气-水两相流动中，当流动稳定且气井定产量生产时，气井与流动边界之间的各处截面处的流体质量流量是相等的。由于煤层气藏特殊的赋存条件和储层结构，煤层中的两相流动与常规气藏的两相流动不同。排水降压过程中，基质中解吸出来的煤层气汇聚在割理中，然后参与流动(见图 5(a))常规气藏中，如果气井的质量流量为 m_g ，那么气井与边界之间截面处的气体质量流量处处等于 m_g 。然而，在煤层气藏中，由于煤层气的解吸作用，煤层割理中的气体流动属于一个沿程变质量流动。

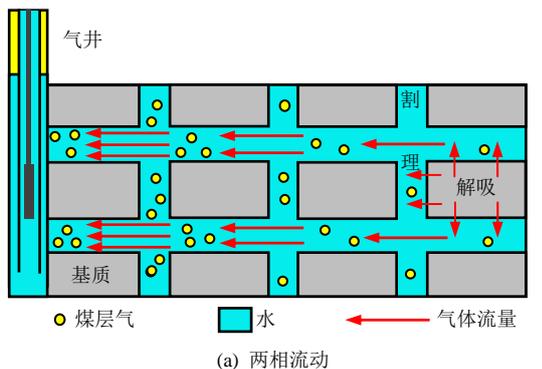


图 5 煤层中的特殊两相流动问题

Fig.5 Unique 2-phase flow scenario in CBM reservoirs

根据压降漏斗的形态，近井带的压降较大，因此近井带解吸参与流动的煤层气量远大于远井带参与流动的煤层气量。压降漏斗与解吸作用是导致煤层中气体变质量流动的根本原因，这增加了近井带煤层气对水的驱替倍数，提高了驱替效率。而相渗实验的驱替过程，难以反映这种变质量流动对驱替效率的改变。本文建立的拟稳态产量模型考虑了解吸作用，通过气井的生产历史反演获得煤层中的两相流动规律，可以一定程度上地反映这个问题。

(2) 驱替效率的差异

相渗实验中的气驱水是一个单向驱替过程，气与水均为同方向流动。实验煤样的割理系统中，气体会沿着一条优势通道快速突破(见图 6(a))。实验中气驱突破后，波及效率难以继续提高，未波及割理中的水不再被驱动。因此，实验得到的岩心两相流动区域较窄，气体驱替效率较差，气驱后的残余水饱和度较高(见图 6(a))。

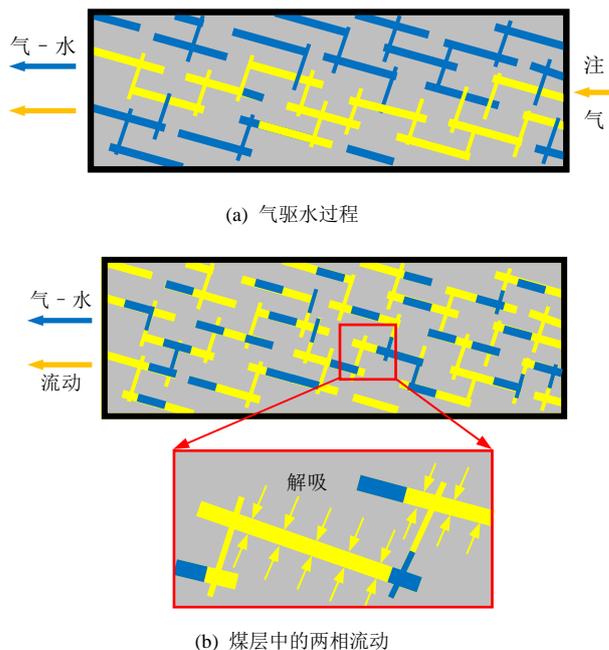


图 6 实验驱替过程与煤层两相流动的差异

Fig.6 Difference between the displacement process in experiment and the flow process in coal

然而，在煤层气的真实流动耦合了基质中的解吸过程。基质解吸出的气体，从基质壁面处进入割理系统(见图 6(b))。因此，煤层气开采过程中，气驱波及效率与压降区域大小一致，波及效率接近 100%。由于较高的波及效率，生产过程中的气驱水效率高于实验结果。目前的相渗实验尚难以耦合解吸作用对波及效率和驱替效率的改变。

(3) 介质的连续性问题

同时，实验中煤样的割理系统也不符合连续介质的要求^[16]。对于中-高阶煤层，割理系统较为发育，每厘米的长度上割理条数大致在几条到十几条。若割理较为发育时，煤岩脆性较大，也难以获得完整的岩心。对于可以获得的煤样，对于实验中岩芯的尺度(10 cm 以内)，煤样的割理系统最多也仅有几十条，属于离散介质，难以满足连续介质的要求^[16]。但是，煤层的割理系统相对于气井尺度而言，却符合连续介质的标准^[16]。因此，目前实验得到的相渗曲线，是在离散割理系统上获得的，在没有尺度升级的情况(upscale)下，并不能代表煤层中的真实气-水流动情况。

综上所述，由于变质量流动、驱替效率以及介质的连续性问题，实验获得的煤岩相渗曲线并不能反映煤层中真实的两相流动过程。基于生产历史反演相渗的方法通过将解吸作用从流动过程中解耦，可以获得煤层割理中真实的两相流动特征。因此，采用实验得到的相渗曲线，会给数值模拟计算带来一定的误差。

4.3 结果讨论

根据表 1 中的基本参数，建立 300 m×300 m×5 m 的煤层数值模型。其中，煤层割理渗透率为 $k_x = k_y = 5 \text{ mD}$ ， $k_z = 0.5 \text{ mD}$ ；煤层初始压力 5 MPa；气井以定井底流压的形式生产($p_{wf} = 0.5 \text{ MPa}$)，通过商用数值模拟软件(tNavigator)分别模拟反演得到的相渗现象以及实验得到的相渗曲线(见图 7(a))对数值模拟

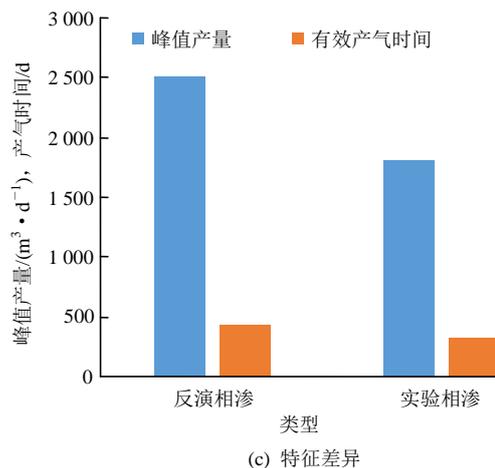


图 7 2 种相渗曲线的计算差异

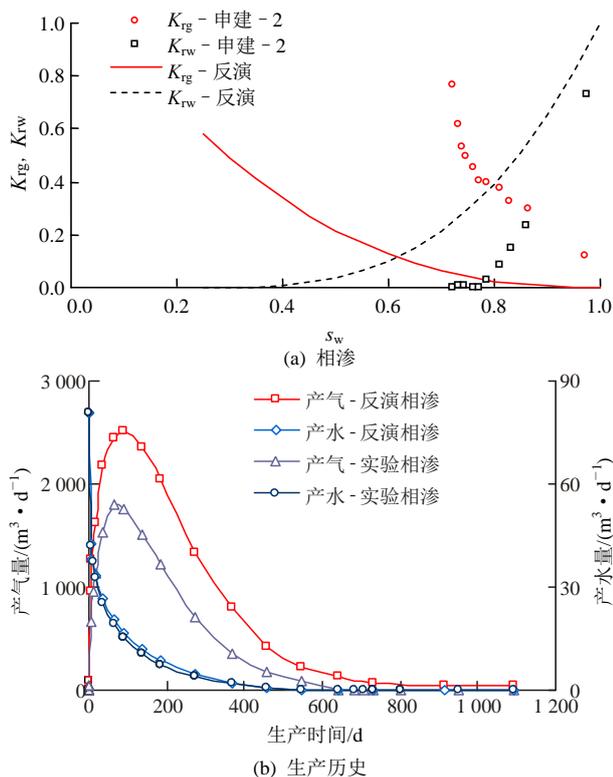
Fig.7 Difference between relative permeability curves obtained from experiment and the inversion method

过程中生产动态的影响(见图 7(b))。

模拟结果显示，在定井底流压的生产条件下，两种相渗曲线的产水动态基本一致。采用实验得到的相渗曲线会降低煤层气的峰值产量，并显著降低煤层气的有效开采时间(见图 7(b))。定义煤层气的有效生产时间为产气量大于 500 m³/d 的天数。统计模拟结果可知，采用实验相渗的峰值产气量为 1 804 m³/d，而基于反演相渗的峰值产量为 2 506 m³/d，相比提高了 38.9%(见图 7(c))。采用实验相渗的有效产气时间为 323 d，而基于反演相渗得到的有效产气时间为 435 d，相比提高了 34.67%(见图 7(c))。由此可知，采用实验得到的相渗曲线会降低模拟的峰值产量，缩短有效生产时间，从而低估排采效果。

5 结论

- (1) 与常规气藏不同，煤层中的气-水流动耦合基质中的解吸与割理中的两相流动过程，与实验中的单向气-水流动模式有明显的差别。
- (2) 相渗实验中，煤样割理内的气驱波及效率较低。而储层条件下，煤层气的流动耦合了解吸过程，割理中的解吸气对水则具有较高的波及效率。
- (3) 小岩芯尺度下，煤层的割理系统不符合连续介质的要求。通过实验获得的相渗曲线直接研究煤层中的两相流动规律，具有一定的局限性。
- (4) 通过生产历史反演相渗的方法将解吸过程从流动中解耦，可以获得煤层割理中真实的两相流动特征。反演结果显示煤层的气-水相渗曲线具有较宽的区域，较低的临界含水饱和度，煤层气对水具有较高的驱替效率。



(5) 数值模拟计算过程中, 采用实验得到的相渗曲线会低估煤层气的排采效果。

参考文献(References):

- [1] 郭晨, 夏玉成, 卫兆祥, 等. 韩城矿区煤层气成藏条件及类型划分[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增1): 192 - 202.(GUO Chen, XIA Yucheng, WEI Zhaoxiang, et al. Coalbed methane accumulation characteristics and type classification in Hancheng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Supp.1): 192 - 202.(in Chinese))
- [2] 王超文, 彭小龙, 朱苏阳, 等. 大倾角厚煤层煤层气开采井型优化及布井方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 313 - 320.(WANG Chaowen, PENG Xiaolong, ZHU Suyang, et al. Coalbed methane well-type optimization and well pattern arrangement for thick coal seam with a large dip angle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 313 - 320.(in Chinese))
- [3] 鲍先凯, 杨东伟, 段东明, 等. 高压电脉冲水力压裂法煤层气增透的试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2 415 - 2 423.(BAO Xiankai, YANG Dongwei, DUAN Dongming, et al. The experiment and numerical simulation of penetration of coalbed methane upon hydraulic fracturing under high-voltage electric pulse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2 415 - 2 423.(in Chinese))
- [4] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 非常规油气地质研究进展与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 638 - 648.(SONG Yan, LI Zhuo, JIANG Zhenxue, et al. Progress and development trend of unconventional oil and gas geological research[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 638 - 648.(in Chinese))
- [5] CLARKSON C R, BUSTIN R. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: a laboratory and modeling study. 1. Isotherms and pore volume distributions[J]. Fuel, 1999, 78(11): 1 333 - 1 344.
- [6] FENG Q, ZHANG J, ZHANG X, et al. Optimizing well placement in a coalbed methane reservoir using the particle swarm optimization algorithm[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 104: 34 - 45.
- [7] 马波, 许江, 刘龙荣, 等. 抽采长度对煤层气开采效果的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 175 - 185.(MA Bo, XU Jiang, LIU Longrong, et al. Analysis of the effect of the borehole length on the efficiency of coal-bed methane exploitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 175 - 185.(in Chinese))
- [8] 冯其红, 舒成龙, 张先敏, 等. 煤层气井两相流阶段排采制度实时优化[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 142 - 148.(FENG Qihong, SHU Chenglong, ZHANG Xianmin, et al. Real-time optimization of drainage schedule for coalbed methane wells at gas-water two-phase flow stage[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 142 - 148.(in Chinese))
- [9] CLARKSON C R, QANBARI F. Transient flow analysis and partial water relative permeability curve derivation for low permeability undersaturated coalbed methane wells[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 152: 110 - 124.
- [10] BUSTIN R, CLARKSON C. Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 38(1): 3 - 26.
- [11] 徐兵祥, 李相方, 杜希瑶, 等. 煤层气井解吸区预测模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 421 - 427.(XU Bingxiang, LI Xiangfang, DU Xiyao, et al. The predictive models of desorption region for coalbed methane wells[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(3): 421 - 427.(in Chinese))
- [12] ZHU S, PENG X, DU Z, et al. Modeling of coal fine migration during CBM production in high-rank coal[J]. Transport in Porous Media, 2017, 118(1): 65 - 83.
- [13] DURUCAN S, AHSAN M, SYED A, et al. Two phase relative permeability of gas and water in coal for enhanced coalbed methane recovery and CO₂ storage[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 6 730 - 6 737.
- [14] 申建, 秦勇, 傅雪海, 等. 沁水盆地不同煤阶煤相渗规律实验和模型研究[C]// 全国煤层气学术研讨会. [S. l.]: [s. n.], 2010: 93 - 98.(SHEN Jian, QIN Yong, FU Xuehai, et al. The research on experiment and models of coal relative permeability of different coal-ranks in Qinshui Basin[C]// China Coalbed Methane Academic Symposium. [S. l.]: [s. n.], 2010: 93 - 98.(in Chinese))
- [15] PING Y J, XU H, BIN G, et al. Nuclear magnetic resonance T2 spectrum: multifractal characteristics and pore structure evaluation[J]. Applied Geophysics: English edition, 2017, 14(2): 205 - 215.
- [16] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 68 - 70.(LI Chuanliang. Fundamentals of reservoir engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 68 - 70.(in Chinese))
- [17] SEIDLE J. Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering[M]. Oklahoma: PennWell Books, 2011: 247 - 267.
- [18] CLARKSON C R, JORDAN C L, GIERHART R R, et al. Production data analysis of coalbed-methane wells[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2008, 11(2): 311 - 325.
- [19] ZHU S, SALMACHI A, DU Z. Two phase rate-transient analysis of a hydraulically fractured coal seam gas well: A case study from the Ordos Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 195: 47 - 60.
- [20] SALMACHI A, CLARKSON C, ZHU S, et al. Relative Permeability Curve Shapes in Coalbed Methane Reservoirs[C]// Asia-Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Brisbane: [s. n.], 2018: SPE - 192029.
- [21] 邓鹏, 彭小龙, 朱苏阳, 等. 煤层气井的排水量不一定等于煤层的产水量[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(6): 715 - 719.(DENG Peng, PENG Xiaolong, ZHU Suyang, et al. Water discharge from coalbed methane(CBM) well may not be equal to water production[J]. Coalbed Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(6): 715 - 719.(in Chinese))
- [22] 马东民, 殷屈娟. 影响韩城地区煤层气产出的主要因素[J]. 西安科技学院学报, 2002, 22(2): 162 - 165.(MA Dongmin, YIN Qujuan. Analysis of major factor influencing the coal bed methane in Hancheng area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2002, 22(2): 162 - 165.(in Chinese))
- [23] ZHAO J, TANG D, LIN W, et al. Permeability dynamic variation under the action of stress in the medium and high rank coal reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 1 030 - 1 041.
- [24] MAVOR M J, ROBINSON J R. Analysis of coal gas reservoir interference and cavity well tests[C]// SPE Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium. Denver: [s. n.], 1993: SPE 25860.