

“2017年煤层气学术研讨会”优秀论文

# 沁水盆地南部高阶煤储层气水产出过程分析

刘世奇<sup>1</sup>, 桑树勋<sup>2</sup>, MA Jingsheng<sup>3</sup>, 杨延辉<sup>4</sup>, 王鑫<sup>5</sup>, 杨艳磊<sup>4</sup>

- (1. 中国矿业大学 低碳能源研究院 江苏省煤基CO<sub>2</sub>捕集与地质存储重点实验室, 江苏 徐州 221116;  
2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;  
3. 赫瑞瓦特大学 石油工程学院, 英国 爱丁堡 EH14 4AS; 4. 中国石油天然气股份有限公司  
华北油田分公司, 河北 任丘 622552; 5. 山东省科学院 海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

**摘要:**为了探讨煤层气井排采控制指标,以沁水盆地南部高阶煤为研究对象,基于气-水相对渗透率试验和渗流物理仿真模拟,探讨了宏观与微观渗流网络中气-水相对渗透率变化机制,并进一步阐述了煤储层气、水产出过程。结果表明,宏观裂隙气-水相渗曲线分为气-水同流区和纯气流动区;微观孔裂隙气-水相渗曲线分为单相水流区、气-水同流区和纯气流动区。煤储层流体产出过程可归纳为开发初期宏观裂隙中水带气的过程,微观孔裂隙中水的单相流动阶段,气相饱和度上升阶段,气驱水的过程,气的单相流动阶段,以及宏观裂隙中气的单相流动阶段。其中,微观孔裂隙中气驱水的过程是高产气井稳定产液的关键,而游离气产出则是煤层压力整体下降的基础。

**关键词:**煤储层;煤层气;气相饱和度;孔裂隙;沁水盆地

**中图分类号:**P618 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)09-0001-06

## Analysis on gas and water output process of high rank coal reservoir in Southern Qinshui Basin

LIU Shiqi<sup>1</sup>, SANG Shuxun<sup>2</sup>, MA Jingsheng<sup>3</sup>, YANG Yanhui<sup>4</sup>, WANG Xin<sup>5</sup>, YANG Yanlei<sup>4</sup>

- (1. Jiangsu Provincial Key Lab of Coal-based CO<sub>2</sub> Capture and Geological Storage, Research Institute of Low Carbon Energy, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. MOE Key Lab of CBM Resources and Formation Process, School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, United Kingdom; 4. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 622552, China; 5. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China)

**Abstract:** In order to study the control indicators for coalbed methane (CBM) production, take the high rank coal at Southern Qinshui Basin as the study object, based on the gas and water relative permeability test and the seepage physical similar simulation, the paper discussed the variation mechanism of the gas and water relative permeability in the micro-macro seepage network and further stated the gas and water output process of the seam. The results showed that the macro crack gas and water relative permeability curve could be divided into a gas and water co-flow area and a pure gas flow area. The gas and water seepage curve of the micro cracks could be divided into a single phase water flow area, a gas and water co-flow area and a pure gas flow area. The liquid output process of the coal servitor could be concluded as a water with gas process in the initial macro cracking development, single phase flow stage in the micro pore fissure, rising stage of the gas phase saturation, gas drive water process, single phase flow stage of the gas and the single phase flow stage of the gas in the macro cracks. Among them, the gas drive water process in the micro pore fissure would be the key to the stable liquid production in the high gas production well and the output of the free gas would be the base to reduce the pressure of the seam wholly.

**Key words:** coal reservoir; coalbed methane; gas saturation; pore fissure; Qinshui Basin

收稿日期:2017-04-20;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.09.001

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41402135,41330638);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2009CB219608);中石油重大科技专项资助项目(2013E-2205)

作者简介:刘世奇(1984—),男,山东昌乐人,副研究员,博士。Tel:13407531129, E-mail:liushiqi@cumt.edu.cn

引用格式:刘世奇,桑树勋,MA Jingsheng,等.沁水盆地南部高阶煤储层气水产出过程分析[J].煤炭科学技术,2017,45(9):1-6,24.

LIU Shiqi, SANG Shuxun, MA Jingsheng, et al. Analysis on gas and water output process of high rank coal reservoir in Southern Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 1-6, 24.

## 0 引 言

煤储层渗流网络中为气-水两相流动,既存在煤层气与煤层水流动形态的转变,同时存在气-水两相之间的相互作用<sup>[1-5]</sup>。气-水两相之间的相互作用主要体现在气-水相对渗透率变化中,反映了两相流体的产出特征,对煤层气开发具有重要的指示意义<sup>[6-10]</sup>。基于煤储层气-水渗流规律及相对渗透率大小,有学者将煤层气井的排采控制过程划分为放喷阶段、初期排水-降液面阶段、憋压阶段、憋压-控压产气阶段、控压稳产阶段和产气量衰减阶段等6个理论阶段,并结合工程经验,提出“缓慢、长期、持续、稳定”的排采原则<sup>[8,11-14]</sup>。然而,目前煤储层气-水渗流规律及相对渗透率的研究未考虑孔裂隙发育特征及煤渗流网络特点,特别是对煤储层微观孔裂隙中气-水相对渗透率缺乏研究,制约了

对煤储层气、水产出规律的认识和排采控制指标的制定。

笔者基于煤储层流体运移通道的认识,综合气-水相对渗透率试验和渗流物理仿真模拟,探讨了宏观与微观渗流网络中气-水相对渗透率变化机制,并进一步阐述了煤储层气、水的产出过程,为煤层气井排采管控指标的确定提供理论指导。

## 1 研究方法

### 1.1 样品

笔者选取沁水盆地南部寺河矿、成庄矿2块无烟煤样品进行分析(表1),煤的采集、保存、运输符合GB/T 19222—2003《煤岩样品采取方法》和GB/T 16773—2008《煤岩分析样品制备方法》。为了避免煤样氧化,所采集的煤样用吸水纸包裹并用胶带缠绕,放入密封袋内保存。样品的物性参数见表1。

表1 样品的物性参数

Table 1 Physical properties of coal samples

煤样 编号	采样地区	$R_{o,max}/\%$	工业分析/%				煤柱尺寸/cm		接触角/ (°)	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	有效孔隙 度/%	空气渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$
			$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{daf}$	$FC_{ad}$	长度	直径				
1号	寺河矿	3.33	2.71	12.18	6.94	81.72	3.42	2.41	74.3	1.43	0.9	0.30
2号	成庄矿	2.96	1.48	13.12	6.32	81.39	3.18	2.35	72.6	1.40	1.8	1.82

注: $R_{o,max}$ 为平均最大镜质组反射率; $M_{ad}$ 为水分; $A_{ad}$ 为灰分; $V_{daf}$ 为挥发分; $FC_{ad}$ 为固定碳;下标“ad”代表空气干燥基;下标“daf”代表干燥无灰基。

### 1.2 气-水相对渗透率试验

气-水相对渗透率试验用以获得宏观裂隙(外生裂隙为主)中的气-水相对渗透率曲线(简称相渗曲线)。试验所采用的样品为直径约25 mm、长度为30~40 mm的煤柱(表1)。煤柱水相渗透率极低,试验前一般进行人工造缝处理,用以模拟宏观裂隙。

试验温度为室温23℃。试验所采用的气相介质是氮气,黏度为0.018 mPa·s;水相介质是自制的矿化水,矿化度为315 mg/L,黏度为0.903 mPa·s。所采用的试验装置为LM-2长岩心模型驱替系统,其技术指标符合石油天然气标准SY/T 5345—2007《岩石中两相流体相对渗透率测定方法》的规定。由于测试煤样的空气渗透率大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,气-水相对渗透率曲线测试适合采用非稳态法,测试基本原理、测定和计算方法依照石油天然气标准SY/T 5345—2007执行。

### 1.3 渗流物理仿真模拟

渗流物理仿真模拟用以获得微观孔裂隙(微米尺度)中气-水相对渗透率曲线。渗流物理仿真模

拟以X-ray CT扫描(200 nm~1 mm)结果所建立的孔裂隙渗流网络模型(图1)为基础,采用MA Jing-sheng等所提出的综合模型自行编程计算。该模型考虑非理想气体在不规则圆形孔隙中的运移行为,将滑流、Knudsen扩散和气体解吸/吸附叠加在达西流上,获得了非理想气体之间的PVT(压力、体积、温度)关系和不同状态下流体黏度的关系。具体模型参照文献[15-17]。



图1 1号样品孔裂隙渗流网络模型

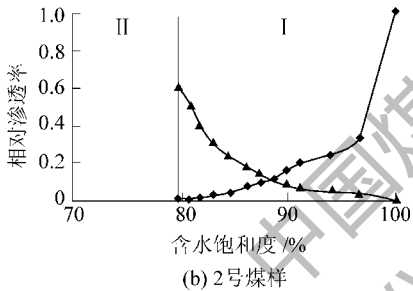
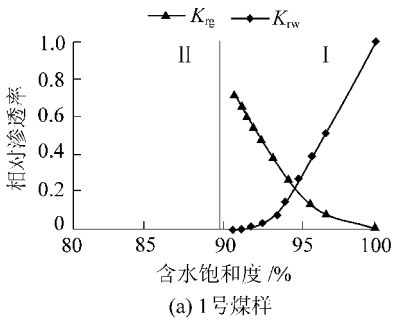
Fig. 1 Seepage network model of pore-fractures of No. 1 sample

## 2 煤储层气-水相对渗透率变化机制

### 2.1 宏观裂隙气-水相对渗透率

沁水盆地南部3号煤层高阶煤具有亲水性(接触角 $<90^\circ$ ,表1),相渗曲线测试中,采用矿化水驱替氮气,即润湿相驱替非润湿相,所获得的相对渗透率为吸入相对渗透率<sup>[18-19]</sup>。

测试煤样相渗曲线等渗点(又称为交叉饱和度和<sup>[18-19]</sup>)的水相饱和度 $S_w$ 均大于80%,束缚水饱和度 $S_{wi}$ 高达80%以上(图2),说明煤柱具有较强的亲水性。



$K_{rg}$ —气相相对渗透率; $K_{rw}$ —水相相对渗透率

图2 宏观裂隙气-水相对渗透率曲线

Fig. 2 Gas-water relative permeability curves in macro-fractures

相渗曲线的形态与孔裂隙大小、孔径分布均匀程度以及连通性等密切相关。 $K_{rg}$ 和 $K_{rw}$ 终点均较小,两相流覆盖的饱和度范围非常窄( $<20%$ ),且束缚水饱和度高达80%以上,说明测试样品孔裂隙连通性较差,孔喉细小。同时, $K_{rg}$ 较低(0.6~0.8),而

$K_{rw} = 1$ ,说明孔径或裂口宽度不均匀,孔裂隙尺度变化较大。

宏观裂隙中气-水相渗曲线仅分为2个区:气-水同流区和纯气流动区,这是由于煤样具有亲水性,游离气可分散在煤层水中以气泡的形式参与流动。

1)气-水同流区(I区)。原始煤储层宏观孔裂隙中水饱和,无游离气存在。此时, $S_w = 100%$ , $K_{rw} = 1$ ,而气相饱和度 $S_g = 0$ , $K_{rg} = 0$ ,如图2所示。随煤层水的产出,宏观裂隙中 $S_w$ 逐渐降低, $K_{rw}$ 随之减小。随着微观孔裂隙中解吸的游离气进入宏观裂隙, $S_g$ 逐渐上升, $K_{rg}$ 增大(图2)。微观上,润湿相(水)占据了几乎所有主要通道;非润湿相(气)分散成气泡,分布于润湿相水中,具有水带气的特征(图3)。

当 $S_g$ 超过某一值后,气相开始呈连续分布状态,并出现连续流动,逐渐由水带气转变为气驱水的方式(图3)。气相出现连续流动的临界饱和度为交叉饱和度,即 $S_w$ 为0.8~0.9时(图2),水相居于裂隙中央,流动阻力小,造成 $K_{rw}$ 仍大于 $K_{rg}$ 。

随着气相占据主要流动通道, $K_{rg}$ 迅速增加,而水流动通道逐渐被气所取代, $K_{rw}$ 迅速减少。此时,宏观裂隙中表现为气驱水(图3)。当水相减少到一定程度时,不仅流动通道被气所占据,且逐渐失去连续性,出现液阻效应。另外,由于气-水同时流动,气-水之间相互作用、相互干扰,由毛管效应引起的流动阻力明显, $K_{rw} + K_{rg} < 1$ ,并且交叉饱和度最小(图2)。

2)纯气流动区(II区)。 $S_w$ 小于 $S_{wi}$ ,气相占据了几乎所有的主要通道,水失去了宏观流动性( $K_{rw} = 0$ ,图2),或分散成水泡分布于气相中,或占据裂隙内表面,以“水膜”的形式滞留于裂隙<sup>[20-21]</sup>。由于贾敏效应,残余水对气体流动造成很大阻力,因而出现 $K_{rg}$ 远离1的现象。此外,由于水相滞流在裂隙内表面,造成其最低饱和度 $S_{wi}$ 大于气相最低饱和度 $S_{gr}$ ,II区覆盖范围非常广。

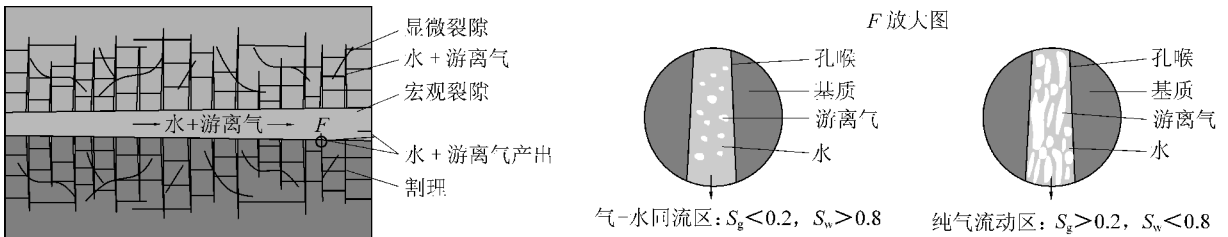


图3 宏观孔裂隙中气-水流动状态示意

Fig. 3 Sketch map of gas-water flow state in macro pore fractures

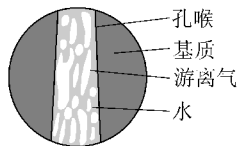
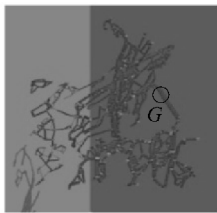
综上所述,由于煤的亲水性,排采初期,宏观裂隙中具有水带气的运移特征,水相饱和度降至0.8~0.9时,逐渐转变为气驱水。气-水两相流之间运移特征的转变对煤层气井疏水降压具有重要意义。煤的亲水性造成水的临界流速低,疏水降压阶段,一方面,裂隙中赋存的煤层水难以产出,阻碍煤储层压力释放,需要解吸气的驱替作用才能排出;另一方面,阻碍解吸气向更大尺度的孔裂隙运移,增加了疏水降压难度。而随着煤层气的大量解吸,煤层水则附着在裂隙内表面,有利于产气阶段煤层气的产出,提高煤层气的最终采收率。

### 2.2 微观孔裂隙气-水相对渗透率

原始煤储层微观孔裂隙(大孔、显微裂隙和内生裂隙)中水饱和,微孔和中孔中解吸出的煤层气进入微观孔裂隙后,煤层水具有驱替作用,可看作气驱水的过程。由于气是非润湿相,煤储层微观渗流网络中气驱水的过程即非润湿相驱替润湿相,所获得的相对渗透率为驱替相对渗透率<sup>[18-19]</sup>。煤储层微观孔裂隙中气-水相对渗透率曲线可分为3区:单相水流区、气-水同流区和纯气流动区,如图4所示。

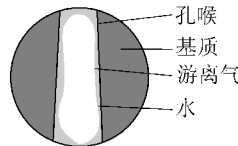
1)单相水流区(A区)。由于煤的亲水性,且微观孔裂隙尺度较小,增加了孔裂隙内壁对水的束缚作用,水运移难度增大, $S_g$ 较小( $S_g < S_{gcr} \approx 80\%$ )时,气难以驱动煤层水流动。由图4可以看出, $S_w$ 经历了较长时间的下降,而 $S_g$ 则缓慢上升。此时,微孔和中孔中解吸出的煤层气难以向微观孔裂隙运移,对水流动的影响很小, $K_{rw}$ 的降低主要在压差作用下由煤层水自身排出所造成。这也是 $K_{rw}$ 降至0.5之后,在无气相驱替作用下趋于稳定的原因。

2)气-水同流区(B区)。随煤层水的排出,微观孔裂隙中 $S_w$ 逐渐降低, $K_{rw}$ 减小;而随着微孔和中孔中解吸出的煤层气进入, $S_g$ 逐渐上升, $K_{rg}$ 增加。

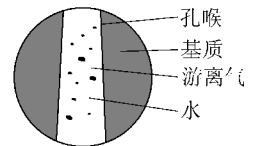


单相水流区:  
 $S_g < 0.8, S_w > 0.2$

G放大图



气-水同流区:  
 $0.8 < S_g < 0.9, 0.1 < S_w < 0.2$



纯气流动区:  
 $S_g < 0.9, S_w > 0.1$

图5 微观孔裂隙中气-水流动状态示意

Fig. 5 Sketch map of gas-water flow state in micro pore fractures

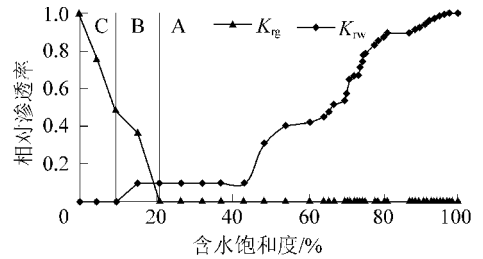


图4 微观孔裂隙气-水相对渗透率曲线

Fig. 4 Gas-water relative permeability curves in micro pore fractures

由于 $S_w$ 已降至较低水平,气体迅速占据几乎所有通道,并在压差作用下形成连续流动,同时,滑流的存在进一步加速了 $K_{rg}$ 上升(图4)。随着 $K_{rg}$ 迅速上升,水带气的过程非常短,迅速转变为气驱水(图5),并造成气-水同流区的覆盖范围非常窄,迅速进入纯气流动区。分析认为,气相呈连续分布状态的临界饱和度为交叉饱和度,即 $S_g$ 为0.2左右。另外,同宏观裂隙中气-水两相流动,液阻效应、毛管力效应等大幅降低了 $K_{rw} + K_{rg}$ 值。

3)纯气流动区(C区)。该区与宏观裂隙相似, $S_w$ 达到 $S_{wi}$ ,失去了宏观流动性, $K_{rg} = 0$ (图4),气相占据了几乎所有的通道(图5)。不同之处在于,由于微观渗流网络的孔径或裂口宽度较小,滑流强烈,促进了气相运移,造成 $K_{rg}$ 接近甚至达到1。

综上所述,由于煤的亲水性和微观渗流网络中孔喉细小,排采初期,微观孔裂隙中经历较长时间的疏水降压过程, $S_w$ 降至0.2左右、 $S_g$ 升至0.8左右时,开始出现气相的连续流动,且两相流(水带气和气驱水)的过程短暂,指示了控压阶段存在的重要意义,对煤层气井疏水降压具有重要的指导作用。进入产气阶段,滑流的存在促进了 $K_{rg}$ 的上升,对煤层气稳定产出具有重要意义。

### 3 煤层气与煤层水产出过程

基于对煤储层孔裂隙渗流网络的认识,沁水盆

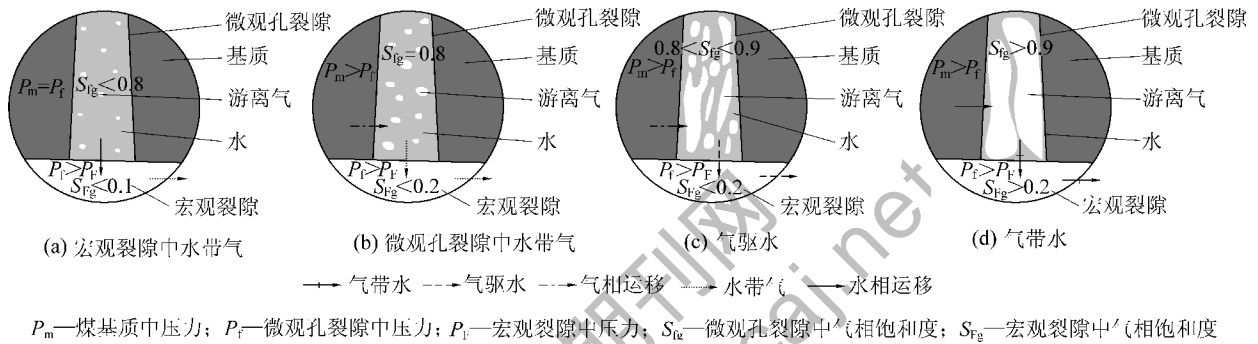
地南部3号煤层微观孔裂隙是煤层水的主要储集空间,宏观裂隙是煤层水的主要运移和产出通道<sup>[22-25]</sup>。微观孔裂隙中煤层水的流动能力弱,其储

集的煤层水首先运移至与之相连通的外生裂隙,再由外生裂隙运移至压裂裂缝,最后由压裂裂缝流向并筒<sup>[24-25]</sup>。因此,煤层水运移可分为微观孔裂隙中的弱流动和宏观裂隙中的渗流。综合煤储层孔裂隙渗流网络和上述煤储层气-水相对渗透率变化机制的认识,可提出排采过程中煤层气与煤层水的产出过程,具体如下。

1) 原始煤层中水饱和,且赋存一定量的游离气(约占气体总量的10%~20%)。排采初期,宏观裂隙中 $S_w > 0.9$ , $S_g < 0.1$ ,为气-水两相流动。压差作用下,游离气和溶解气以及解吸出的少量气体,以气泡

的形式分散于煤层水中并随之产出,具有水带气的运移特征(图6a)。

2) 排采初期,微观孔裂隙中 $S_w > 0.2$ , $S_g < 0.8$ ,随宏观裂隙中的压降传递至微观孔裂隙,微观孔裂隙中的煤层水缓慢运移至宏观裂隙(图6a)。与此同时,微观孔裂隙中赋存的游离气和溶解气以及微观孔裂隙内壁解吸的部分气体(占气体总量的10%~20%)逐渐占据主要流动通道,促进了排采初期含气饱和度的升高。由于微观孔裂隙中气体毛细管滞后现象明显,水难以携带气运移,为水的单相流动。



$P_m$ —煤基质中压力;  $P_f$ —微观孔裂隙中压力;  $P_f$ —宏观裂隙中压力;  $S_g$ —微观孔裂隙中气相饱和度;  $S_g$ —宏观裂隙中气相饱和度

图6 煤层气与煤层水产出过程示意

Fig. 6 Sketch map of gas-water output process in coal reservoir

3) 随着微观孔裂隙中煤层水的产出,与煤基质之间形成压差,煤基质中的游离气开始向微观孔裂隙运移。同时微观孔裂隙内壁与煤基质中的吸附气开始解吸,微观孔裂隙中 $S_g$ 升高。经过较长时间的疏水降压, $S_g$ 升至0.8左右,出现气相流动,煤层水携带游离气向宏观裂隙运移(水带气)(图6b)。随着煤层水的排出,微小型裂隙中赋存的游离气和溶解气以及微小型裂隙内壁吸附的部分气体(随着微小型裂隙中流体压力的降低而解吸为游离气)。

4) 微观孔裂隙中 $S_g$ 为0.8~0.9时,在压差与浓度差作用下,微观孔裂隙中为气相的连续流动,煤层气驱替煤层水向宏观裂隙运移(气驱水),并促进了微观孔裂隙中水相压力和水相饱和度的整体降低,为煤层压力整体降低做出了很大贡献(图6c)。

5) 微观孔裂隙中 $S_w < 0.1$ , $S_g > 0.9$ ,为气的单相流动,在压差与浓度差作用下,微观孔裂隙中的煤层气携带煤层水运移至宏观裂隙(气带水),宏观裂隙中 $S_g$ 升高(图6d)。

6) 宏观裂隙中 $S_w < 0.8$ , $S_g > 0.2$ ,为气的单相流动,压差与浓度差作用下,煤层气携带煤层水向并筒运移(气带水),造成宏观裂隙中水相压力和水相饱

和度的整体降低(图6d)。

综上所述,煤储层裂隙系统中,前期为水带气的过程,说明只有适量产水才能实现煤层气的高产气;随气相饱和度升高,煤储层裂隙系统中逐渐转变为气驱水的过程,气、水饱和度维持在相对稳定的范围内,是高产气井稳定产液的关键;而煤储层裂隙系统中游离气的产出,促进了煤层水的运移,是煤层压力整体下降、气相饱和度整体升高的先决条件。

## 4 结 论

1) 沁水盆地南部煤储层宏观裂隙气-水相对渗透率曲线分为气-水同流区和纯气流动区。排采初期具有水带气的运移特征,进入产气阶段逐渐转变为气驱水。微观孔裂隙气-水相对渗透率曲线分为单相水流区、气-水同流区和纯气流动区。排采初期,微观孔裂隙中经历较长时间的疏水降压过程,且两相流过程短暂;产气阶段,滑流促进了气相相对渗透率的上升。

2) 煤储层流体的产出过程可归纳为6个阶段:开发初期宏观裂隙中水带气的过程,微观孔裂隙中水的单相流动阶段,微观孔裂隙气相饱和度上升阶

段,微观孔裂隙中气驱水的过程,微观孔裂隙中气的单相流动阶段,宏观裂隙中气的单相流动阶段。其中,微观孔裂隙中气驱水的过程是高产气井稳定产液的关键,而游离气产出则是煤层压力整体下降的基础。

致谢:感谢中国矿业大学硕士研究生刘书培、欧阳雄、张琨、孙家广对样品采集、试验测试所做的工作;感谢中国石油天然气股份有限公司华北油田山西煤层气分公司与长治煤层气项目部对论文研究工作所提供的支持!

#### 参考文献(References):

- [1] LIU Shiqi, SANG Shuxun, ZHU Qipeng, *et al.* Triple medium physical model of post fracturing high-rank coal reservoir in southern Qinshui Basin[J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(3): 407-415.
- [2] LIU Shiqi, SANG Shuxun, ZHU Qipeng, *et al.* Seepage physical process and its control actions to gas production of coal bed methane wells in Southern Qinshui Basin, China[J]. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 2014, 32(5): 3863-3872.
- [3] 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 cone under drainage well network in Southern Qinshui Basin[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2012, 41(6): 943-950.
- [4] 李梦溪, 张建国, 胡秋嘉, 等. 沁水盆地郑庄区块勘探现状及试采效果分析[J]. *中国煤层气*, 2010, 7(6): 5-9.  
LI Mengxi, ZHANG Jianguo, HU Qiuqia, *et al.* Current status of exploration and analysis of test results of trialproduction in Zhengzhuang Block in Qinshui Basin[J]. *China Coalbed Methane*, 2010, 7(6): 5-9.
- [5] 吕景昶, 朱礼斌, 张涛. 煤层气井排采工艺技术[J]. *油气井测试*, 2002, 11(4): 47-48.  
LYU Jingchang, ZHU Libin, ZHANG Tao. Techniques and technology of water drainage and gas production in coalbed gas wells[J]. *Well Testing*, 2002, 11(4): 47-48.
- [6] 曹立刚, 郭海林. 煤层气井排采过程中各排采参数间关系的探讨[J]. *中国煤田地质*, 2000, 12(1): 31-35.  
CAO Ligang, GUO Hailin. Research on the relationship between extractive parameters during extraction of coal bed gas well[J]. *Coal Geology of China*, 2000, 12(1): 31-35.
- [7] 何晶, 钟孚勋. 华北地区煤层气可采性的主要地质条件探讨[J]. *天然气勘探与开发*, 2001, 24(2): 61-64.  
HE Jing, ZHONG Fuxun. Discuss on major geological conditions of coabed methane work ability in Huabei area[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2001, 24(2): 61-64.
- [8] 饶孟余, 江舒华. 煤层气井排采技术分析[J]. *中国煤层气*, 2010, 7(1): 22-25.  
RAO Mengyu, JIANG Shuhua. Analysis on drainage techniques of coalbed methane well[J]. *China Coalbed Methane*, 2010, 7(1): 22-25.
- [9] 刘世奇, 赵贤正, 桑树勋, 等. 煤层气井排采液面-套压协同管控: 以沁水盆地樊庄区块为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(S1): 97-108.  
LIU Shiqi, ZHAO Xianzheng, SANG Shuxun, *et al.* Cooperative control of working fluid level and casing pressure for coalbed methane production: a case study of Fanzhuang Block in Qinshui Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S1): 97-108.
- [10] 刘世奇. 沁水盆地南部煤层气直井产能的地质与工程协同控制及预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [11] 饶孟余, 钟建华, 杨陆武, 等. 无烟煤煤层气成藏与产气机理研究: 以沁水盆地无烟煤为例[J]. *石油学报*, 2004, 25(4): 23-28.  
RAO Mengyu, ZHONG Jianhua, YANG Luwu, *et al.* Coalbed methane reservoir and gas production mechanism in anthracite coalbeds[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(4): 23-28.
- [12] 倪小明, 王延斌, 接铭训, 等. 煤层气井排采初期合理排采强度的确定方法[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(6): 101-104.  
NI Xiaoming, WANG Yanbin, JIE Mingxun, *et al.* Reasonable production intensity of coal-bed methane wells in initial production[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(6): 101-104.
- [13] 李仰民, 王立龙, 刘国伟, 等. 煤层气井排采过程中的储层伤害机理研究[J]. *中国煤层气*, 2010, 7(6): 39-43.  
LI Yangmin, WANG Lilong, LIU Guowei, *et al.* Study on coal reservoir damage mechanism in dewatering and extraction process of CBM wells[J]. *China Coalbed Methane*, 2010, 7(6): 39-43.
- [14] 李梦溪, 刘庆昌, 张建国, 等. 构造模式与煤层气井产能的关系: 以晋城煤区为例[J]. *天然气工业*, 2010, 30(11): 10-13.  
LI Mengxi, LIU Qingchang, ZHANG Jianguo, *et al.* Relationship between structural style and CBM well productivity: a case study of the Jincheng coalfield[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(11): 10-13.
- [15] MA Jingsheng, ZHANG Xiaoxian, JIANG Zeyung, *et al.* Flow properties of an intact MPL from nano-tomography and pore network modelling[J]. *Fuel*, 2014, 136: 307-315.
- [16] MA Jingsheng, Sanchez Juan Pablo, Wu Kejian, *et al.* A pore network model for simulating non-ideal gas flow in micro- and nanoporous materials[J]. *Fuel*, 2014, 116: 498-508.
- [17] Faruk Civan, Chandra S Rai, Carl H Sondergeld. Shale-gas permeability and diffusivity inferred by improved formulation of relevant retention and transport mechanisms[J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 86(3): 925-944.
- [18] 张永利, 邵英楼, 王来贵. 水-煤层气两相流体在煤层中的渗流规律[J]. *地质灾害与环境保护*, 2001, 12(4): 63-66.  
ZHANG Yongli, TAI Yinglou, WANG Laigui. The seepage regularity

(下转第24页)

- 钻井液技术[J].中国煤层气,2012,9(2):18-21.
- SUN Fapei, ZHANG Jie, LI Jian, *et al.* Soft capsule drilling fluid technology for 215.9 mm CBM well and horizontal well[J]. China Coalbed Methane, 2012, 9(2): 18-21.
- [9] 王富华, 梁国昌, 郭保雨. 用于低压低渗透油气藏的可循环泡沫防塌钻井液[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(1): 6-8.
- WANG Fuhua, LIANG Guochang, GUO Baoyu. A recyclable foaming drilling fluid suitable for drilling low pressure low permeability reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(1): 6-8.
- [10] 黄维安, 邱正松, 杨力, 等. 煤层气钻井井壁失稳机理及防塌钻井液技术[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(2): 37-41.
- HUANG Weian, QIU Zhengsong, YANG Li, *et al.* Instability mechanism of sidewall and anti-sloughing drilling fluid technique for coalbed methane well drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(2): 37-41.
- [11] 黄洪春, 卢红. 用空气钻井开发晋城煤层气技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(4): 61-64.
- HUANG Hongchun, LU Hong. Study of development coalbed methane using air drilling technology in Jincheng area[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(4): 61-64.
- [12] 莫日和, 郭本广, 孟尚志, 等. 空气钻井技术在柳林煤层气井的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(2): 35-38.
- MO Rihe, GUO Benguang, MENG Shangzhi, *et al.* Application of air drilling technology in CBM well of Liulin area[J]. Exploration Engineering(Rock and Soil Drilling Engineering), 2012, 39(2): 35-38.
- [13] 姬玉平. 空气潜孔锤钻井工艺在煤层气井中的应用[J]. 中国煤层气, 2012, 9(3): 42-44.
- Ji Yuping. Application of Air-DHD method in CBM well[J]. China Coalbed Methane, 2012, 9(3): 42-44.
- [14] 左景栾, 孙晗森, 周卫东, 等. 适用于煤层气开采的低密度钻井液技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 815-819.
- ZUO Jingluan, SUN Hansen, ZHOU Weidong, *et al.* Study and application of light weight drilling fluid applied to coalbed methane development[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 815-819.
- 
- (上接第6页)
- of two-phase fluid of water-coal gas in coal seams[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2001, 12(4): 63-66.
- [19] 张永利, 邵英楼, 徐颖, 等. 王营子矿煤层中水-煤层气两相流体渗流规律的研究[J]. 试验力学, 2000, 15(1): 92-96.
- ZHANG Yongli, TAI Yinglou, XU Ying, *et al.* Study on the seepage law of the two phase fluid water coal gas fluid in coal seams of Wangyingzi mine[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(1): 92-96.
- [20] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2005.
- [21] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2003.
- [22] LIU Shiqi, SANG Shuxun, WANG Geoff, *et al.* FIB-SEM and X-ray CT characterization of interconnected pores in high-rank coal formed from regional metamorphism[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 148: 21-31.
- [23] LIU Shiqi, SANG Shuxun, PAN Zhejun, *et al.* Study of characteristics and formation stages of macroscopic natural fractures in coal seam 3 for CBM development in the east Qinnan Block, Southern Qinshui Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 1321-1332.
- [24] LIU Shiqi, SANG Shuxun, LIU Huihu, *et al.* Growth characteristics and genetic types of pores and fractures in a high-rank coal reservoir of the southern Qinshui Basin[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 140-151.
- [25] LIU Shiqi, SANG Shuxun, ZHU Qipeng, *et al.* Structure and production fluid flow pattern of post-fracturing high-rank coal reservoir in Southern Qinshui Basin[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(10): 3970-3982.