

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 高煤级煤储层煤层气产能“瓶颈”问题研究

傅雪海 秦勇 姜波 韦重韬

中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州, 221008

**内容提要** 基于山西沁水盆地高煤级煤储层宏观裂隙、显微裂隙的连续观测, 孔隙的系统测量, 结合应力渗透率、气-水相对渗透率、吸附膨胀等实验成果, 分析了高煤级煤储层三级渗流特征, 探讨了有效应力和煤基质收缩对高煤级煤储层渗透率的耦合作用, 系统揭示了在地面排水降压开发煤层气的过程中, 高煤级煤储层初期产气量高, 数月后急剧衰减之“瓶颈”现象, 找出了造成高煤级煤储层产气缺陷的根本原因。鉴于高煤级煤储层物性的特殊性, 指出了高煤级煤储层煤层气开发的技术和措施。

**关键词** 高煤级煤储层 煤层气 有效应力 煤基质收缩 “瓶颈”问题 沁水盆地

国外在低、中煤级煤储层煤层气勘探开发中取得了巨大的成功(Zuber, 1998; Johnson et al., 1998), 美国仅2002年的煤层气产量就达420亿 $m^3$ , 但在高煤级(镜质组最大反射率 $R_{o,max} > 2.0\%$ )煤储层中煤层气开发尚未有成功的先例。然而, 我国高煤级煤储层中煤层气资源十分丰富, 约占全国煤层气资源总量的三分之一(叶建平等, 1998; 孙茂也等, 2003)。前期我国在山西沁水盆地开展了大量试气排采工作, 取得了一些初步认识(秦勇等, 1999; 杨起等, 2000; 叶建平等, 1999, 2002; 张群等, 2001; 傅雪海等, 2001a, 2003a)。但对制约高煤级煤储层煤层气勘探开发的“瓶颈”现象(初期产气量较高, 数月后急剧衰减, 或高资源量, 低产能)缺乏系统研究。鉴于此, 笔者基于高煤级煤储层宏观裂隙的井下观测、显微裂隙的电镜扫描、孔隙的压汞实验, 结合应力渗透率、气-水相对渗透率、多相介质力学实验及煤基质自调节作用等的物理模拟与数值模拟研究成果(傅雪海等, 2001b, 2002a, 2002b), 对高煤级煤储层产气缺陷进行系统剖析。

## 1 孔、裂隙渗透率

煤储层孔、裂隙结构特征制约了煤层气的渗流和煤层气的产能(Clarkson et al., 1999; Liang, 1999; 秦勇等, 1999; Karacan et al., 2000; 傅雪海等, 2001b)。笔者前期研究表明煤储层系由宏观裂隙、显

微裂隙、孔隙组成的三元结构系统(傅雪海等, 2001c)。因此, 煤层气渗流也相应地存在着三级渗流场, 即: 宏观裂隙系统——煤层气的紊流场、显微裂隙系统——煤层气的渗流场、煤基质块(孔隙)系统——煤层气的扩散场, 三个环节缺一不可, 且受制于渗流最慢的流场。

山西沁水盆地煤矿井下煤巷观测表明, 高煤级煤储层中由构造外力形成的外生裂隙较发育, 而由煤体收缩内应力形成的内生裂隙不发育(表1); 扫描电镜观测表明高煤级煤储层中显微裂隙十分稀少, 大孔(孔直径 $d > 1000nm$ )多为不连续的孤立死孔; 压汞实验表明高煤级煤中孔( $100nm < d < 1000nm$ )不甚发育, 过渡孔( $10nm < d < 100nm$ )和微孔( $d < 10nm$ )较发育(表1)。

高煤级煤储层外生裂隙发育, 煤层气试井渗透率高; 过渡孔和微孔发育, 煤层气扩散能力强。但缺乏沟通两者之间的桥梁——内生裂隙和显微裂隙。因此, 在地面排水降压开发煤层气的过程中, 煤层气渗流连续性和稳定性差, 造成煤层气开发初期产能较高, 数月后很快衰减之“瓶颈”现象。

高煤级煤自然煤样抗压强度大(表1), 脆度大, 外力作用下易成块状破裂, 故在后期构造运动的改造作用下, 外生裂隙发育, 显微裂隙中构造应力裂隙发育, 而受控于煤级的内生裂隙、显微裂隙中内应力形成的收缩裂隙不发育, 过渡孔和微孔发育。因此,

注: 本文为国家“973”煤层气项目(编号 2002CB211700)和国家自然科学基金重点项目(编号 50134040)资助成果。

收稿日期: 2003-10-14; 改回日期: 2004-03-19; 责任编辑: 周健。

作者简介: 傅雪海, 男, 1965年生, 博士, 现为中国矿业大学资源与地球科学学院教授, 从事能源地质研究与教学工作。通讯地址: 221008, 江苏省徐州市中国矿业大学资源与地球科学学院; 电话: 0516-3995716; Email: fuxuehai@163.com。

高煤级煤储层一级渗流和三级渗流较强、二级渗流很弱之固有属性是造成高煤级煤储层产气缺陷的根本原因。

表 1 沁水盆地及外围煤储层孔、裂隙发育特征

Table 1 Characteristics of pore-fracture of coal reservoirs in the Qinshui basin and its peripheral district

地点		晋城凤 凰山矿	晋城 成庄矿	高平 望云矿	沁源 沁新矿	霍州李 家村矿
煤样号		1	2	3	4	5
镜质组反射率 $R_{o,max}$ (%)		3.83	2.87	2.17	1.65	0.89
宏观裂隙 (条/ $m^2$ )	外生裂隙	15	51	25	21	18
	内生裂隙	0	0	14	207	113
显微裂隙(条/ $mm^2$ )		2	8	21	74	92
比孔容 ( $\times 10^{-2}$ ) ( $cm^3/g$ )	中孔	0.31	0.28	0.20	0.18	0.19
	过渡孔	1.66	1.70	1.55	1.32	1.60
	微孔	0.74	0.99	1.03	0.58	0.67
抗压强度(MPa)		4280	3868	4200	3650	3529

## 2 应力渗透率

煤储层渗透率对应力十分敏感,两者之间的关系被称之为应力渗透率,前人基于大量的实验(段康廉等,1993;Enever et al.,1997;Connolly et al.,1999)表明煤岩体的渗透率随有效应力的增加而呈指数形式降低(常简称为有效应力负效应)。其拟合形式为:

$$K_s = K_0 e^{-c\sigma_e} \quad (1)$$

式中, $K_s$ 为应力渗透率( $\times 10^{-3} \mu m^2$ ); $K_0$ 为无应力时渗透率( $\times 10^{-3} \mu m^2$ ); $e$ 为自然对数; $c$ 为拟合系数,在此我们称之为衰减系数; $\sigma_e$ 为有效应力(MPa)。对表1中采自山西沁水盆地及外围的5件各煤级煤样的实验(傅雪海等,2001)发现:随煤级  $R_{o,max}$  的增加,煤岩体渗透率衰减系数  $c$  呈指数形式增大(图1),即煤级愈高,其渗透率衰减愈快。

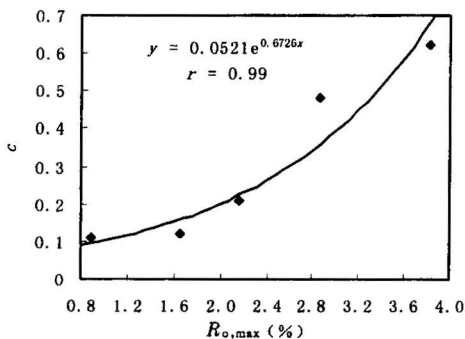


图 1 沁水盆地煤级与渗透率衰减系数的关系  
Fig.1 Relationship of attenuation coefficient of permeability to coal rank in the Qinshui basin

山西沁水盆地高煤级煤储层煤层气试井深度在600m左右,平均试井渗透率( $K_s$ )为 $2.0 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,平均水平应力( $\sigma_h$ )为15.0 MPa,平均储层压力( $p$ )为5.1 MPa,平均水平有效应力( $\sigma_{he}$ )为9.9MPa(傅雪海等,2001b)。临界深度(垂向应力大于水平应力的转换深度,在沁水盆地约为550m)以下平均水平应力梯度( $\Delta\sigma_h$ )为1.59MPa/100m,流体压力梯度( $\Delta p$ )为0.70MPa/100m,平均水平有效应力梯度( $\Delta\sigma_{he}$ )为0.88 MPa/100m(傅雪海等,2001)。

由下式可得出600m以下不同深度的水平有效应力( $\sigma_H$ )。即:

$$\sigma_H = \sigma_{he} + (H - 600) \cdot \Delta\sigma_{he} \quad (H > 600m) \quad (2)$$

式中, $\sigma_H$ 为不同深度的水平有效应力(MPa); $\sigma_{he}$ 为600m处平均水平有效应力(MPa); $H$ 为煤层埋深(m); $\Delta\sigma_{he}$ 为平均水平有效应力梯度(MPa/100m)。

利用式(1)可模拟煤储层渗透率随有效应力(埋深)和随储层压力(排采过程)的变化情况。沁水盆地拟合结果表明:高煤级煤储层渗透率随储层压力的降低而快速减少(图2);随埋深的增大而急剧降低(图3),到1200m,其值已衰减到不足 $0.2 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。

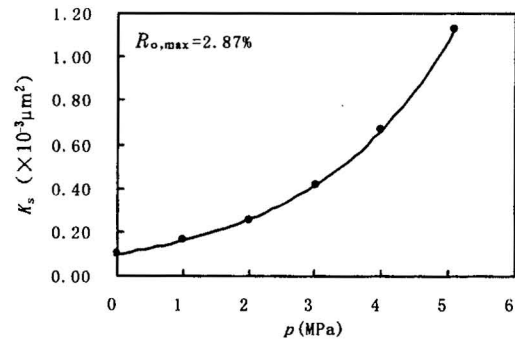


图 2 沁水盆地应力渗透率与储层压力的关系  
Fig.2 Relationship of stress-permeability to reservoir pressure in the Qinshui basin

高煤级煤储层在排水降压开发煤层气的过程中,随着储层压力的降低,有效应力增大,渗透率快速衰减,随埋深(有效应力)增加,渗透率迅速衰减。在目前采取压力衰减法开发煤层气过程中,煤层气开采深度很难突破1200m。

## 3 气-水相对渗透率

煤储层系由煤基质块、气、水组成的多相介质。在排水降压开发煤层气的过程中,存在着单向水流、气-水两相流和单向气流三个阶段,相应地煤储层渗

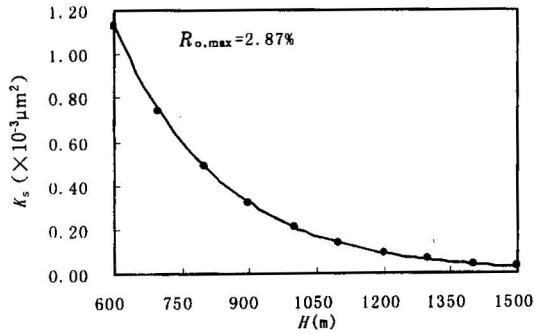


图 3 沁水盆地应力渗透率与埋深的关系  
Fig. 3 Relationship of stress-permeability to buried depth in the Qinshui basin

透率为单相水渗透率、气-水两相有效渗透率和束缚水下气相渗透率。中国山西沁水盆地部分试井渗透率达到美国圣胡安盆地一些单井的水平,但气产量却相差甚远。由此可见,气-水相渗透率和束缚水下气相渗透率是煤层气产能至为关键的控制因素。

煤对 CH<sub>4</sub>存在着较强的吸附性,气相 CH<sub>4</sub>渗透率是消除 Klinkenberg 滑移效应后得到的克氏渗透率(K<sub>g0</sub>,转引自钱凯等,1996),并将其作为绝对渗透率来计算气-水相对渗透率。沁水盆地煤样实验结果表明高煤级煤岩体克氏渗透率和水相渗透率较高,其中2号煤样克氏渗透率和水相渗透率(K<sub>w0</sub>)比其他煤样大一个数量级,3号煤样的克氏渗透率也大于中煤级煤(表2)。

表 2 煤岩体气、水相对渗透率测试结果

Table 2 Experimental results of methane-water relative permeability in coal rocks

样号	K <sub>g0</sub>	K <sub>w0</sub>	S <sub>bw</sub>	S <sub>rg</sub>	K <sub>rg,max</sub>	K <sub>rw,max</sub>	K <sub>g,bw</sub>	$\frac{K_{g,bw}}{K_{g0}}$
1	0.107	0.022	84.8	4.9	23.47	17.31	0.017	15.9
2	3.801	0.205	71.3	7.4	16.14	9.30	0.633	16.7
3	0.348	0.079	74.1	4.0	7.97	25.32	0.077	22.1
4	0.213	0.082	47.6	35.6	32.89	23.14	0.079	37.1
5	0.125	0.011	68.6	4.7	32.64	14.28	0.034	27.2

注:K<sub>g0</sub>—克氏渗透率(×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>);K<sub>w0</sub>—水单相渗透率(×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>);S<sub>bw</sub>—束缚水饱和度(%);S<sub>rg</sub>—残余气饱和度(%);K<sub>rg,max</sub>—最大气相相对渗透率(%);K<sub>rw,max</sub>—最大水相相对渗透率(%);K<sub>g,bw</sub>—束缚水下气相渗透率(×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>)。

非稳态 CH<sub>4</sub>驱 H<sub>2</sub>O 相对渗透率实验(Fu et al., 2003b)研究表明:高煤级煤束缚水饱和度(S<sub>bw</sub>)大,介于71.3%~84.82%之间,单相水流和气、水两相渗流区域狭窄。单向水流区域:0%<气饱和度(S<sub>g</sub>)<7.4%,气-水两相渗流区域:7.4%<S<sub>g</sub><28.7%

之间,单向气流区域:28.7%<S<sub>g</sub><100%(图4)。气-水两相渗流时,高煤级煤最大气相相对渗透率(K<sub>rg,max</sub>)与最大水相相对渗透率(K<sub>rw,max</sub>)之和介于25.44%~40.78%之间,平均为33.2%,即气相与水相有效渗透率之和约为其克氏渗透率的1/3;束缚水下高煤级煤气相渗透率(K<sub>g,bw</sub>)只有其克氏渗透率的15.7%~22.1%,平均为18.2%(表2),即多相介质条件下,高煤级煤有效气相渗透率不及其克氏渗透率的1/5。

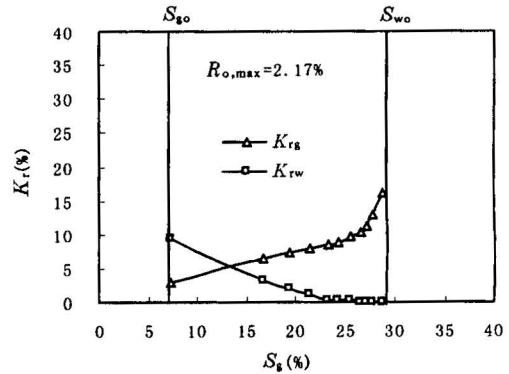


图 4 沁水盆地气-水相对渗透率与气饱和度的关系  
Fig. 4 Relationship of methane-water relative permeability to methane saturation in the Qinshui basin

由表2可以看出,高煤级煤的渗流特性不如中煤级煤,其气-水两相有效渗透率之和远小于其单相CH<sub>4</sub>的克氏渗透率,CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 相对渗透率之和远小于1。由前述分析可知,高煤级煤储层连续性差、非均质和各向异性强,气、水两种流体通过多孔介质时,除在气、水两相界面因压力差产生毛细管力外,还将出现贾敏效应(孔祥言,1999),两者均可导致流体沿渗透性较好的区域指进,使指进流体绕过较大面积的被驱替相,形成被驱替相的一座座“孤岛”。高煤级煤束缚水饱和度大,即这样的“孤岛”较多,大部分煤层气被残留,然而由于其吸附时间只有1~9天(傅雪海等,2000),所以能较快(数月后)达到产气高峰。

沁水盆地高煤级煤储层煤层甲烷含量最高可达39.8m<sup>3</sup>/t,平均为16.8m<sup>3</sup>/t(叶建平,1998)。排水降压困难,大部分煤层气难于解吸,造成高资源量、低产能之“瓶颈”现象。

#### 4 煤基质自调节作用

煤岩体吸附膨胀/解吸收缩特性即为煤基质的

自调节作用,在排水降压开发煤层气的过程中,随着气、水介质的排出,煤基质出现收缩,煤储层渗透率增大(常称之为煤基质收缩的正效应,Levine,1996)。

煤的吸附与解吸互为可逆过程。在地面排水降压开发煤层气的过程中,煤的形变在弹性变形范围内。因此,煤的吸附膨胀参数等价于煤基质的收缩参数,煤基质收缩量可通过吸附膨胀实验来模拟。

前人研究表明:流体压力( $p$ )与该压力下煤基质吸附体积应变( $\epsilon_v$ )的关系与朗格缪尔方程的形式相同,体积应变随流体压力的增加而增大(Reucroft et al.,1986;Levine,1996)。即:

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

式中, $\epsilon_v$ 为压力 $p$ 时吸附的体积应变; $\epsilon_{\max}$ 为最大应变变量,即无限压力下的渐近值; $p_{50}$ 为最大应变变量一半时的压力(MPa)。笔者对前述2、3号水饱和煤样及潞安常村矿( $R_{o,\max} = 2.10\%$ )和五阳矿( $R_{o,\max} = 1.89\%$ )水饱和煤样吸附膨胀实验发现最大应变变量( $\epsilon_{\max}$ )随煤级的增高而减少(图5)。

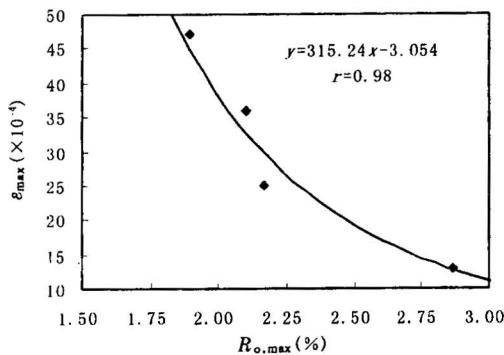


图5 沁水盆地最大应变变量与煤级的关系  
Fig.5 Relationship of maximal strain capacity to coal rank in the Qinshui basin

煤基质收缩导致煤孔、裂隙张开,即煤储层渗透率增大,由裂隙平板模型(Levine,1996)可计算由煤基质收缩导致煤储层渗透率增大的百分率,即:

$$\begin{aligned} \Delta K_e &= \frac{K_j - K_i}{K_i} \times 100\% \\ &= \left[ \left( 1 + \frac{\Delta \epsilon_{ji}}{\varphi_i} \right)^3 - 1 \right] \times 100\% \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\Delta K_e$ 为煤基质收缩使煤储层渗透率增大的百分率(%); $K_i$ 、 $K_j$ 为前一储层压力状态和后一储层压力状态的渗透率( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ); $\Delta \epsilon_{ji}$ 为储层压力由( $p_i$ )降至( $p_j$ )时煤基质收缩量; $\varphi_i$ 为 $p_i$ 状态下

的孔裂隙度。对沁水盆地中、高级煤储层计算结果表明:在地面排水降压开发煤层气的过程中,随着储层压力的降低,煤基质收缩使煤储层渗透率逐渐增大(图6),但随煤级的增加,渗透率增大的百分率则逐渐减少(图6)。

在排水降压开发煤层气的过程中,随着气、水介质的排出,煤基质发生收缩,各煤级煤储层渗透率均将得到改善,但当 $R_{o,\max} > 2.5\%$ 以后,渗透率改善很微弱(图6)。

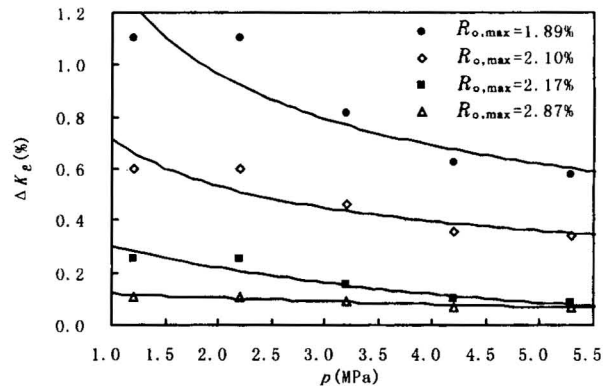


图6 沁水盆地煤基质收缩的正效应与储层压力的关系 (埋深800m)

Fig.6 Relationship of positive effect of coal matrix shrinkage to reservoir pressure in the Qinshui basin (buried depth 800 m)

### 5 正、负效应的耦合分析

在地面排水降压开发煤层气的过程中,随着水、气介质的排出,一方面煤储层内流体压力降低,有效应力增大,孔、裂隙被压缩,渗透率降低;另一方面煤基质收缩,孔、裂隙空间被扩大,渗透率增大(George et al.,2001)。这种正、负效应在煤层气开发活动中,同时存在,同时发生,其综合作用效果是煤层气持续开发和经济评价所要考虑的重要因素之一。

利用裂隙平板模型(Levine,1996)可计算正负效应导致煤储层渗透率改变的百分率,即:

$$\begin{aligned} \Delta K &= \frac{K_j - K_i}{K_i} \times 100\% \\ &= \left[ \left( 1 + \frac{\Delta \epsilon_{ji}}{\varphi_i} - \frac{\Delta \epsilon_{ji}}{\varphi_i} \right)^3 - 1 \right] \times 100\% \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\Delta K$ 为正负效应使煤储层渗透率改变的百分率(%); $\Delta \epsilon_{ji}$ 为储层压力由( $p_i$ )降至( $p_j$ )时有效应力的压缩形变量,其他符号意义同前。

对沁水盆地中、高级煤储层正负效应耦合结果

表明:①在同一储层压力条件下,煤储层渗透率随煤级的增加而降低(图7)。②在同一煤级的条件下,煤储层渗透率随储层压力的降低而增大。但当  $R_{o,max} < 2.1\%$ ,煤储层渗透率正向增大;当  $2.1\% < R_{o,max} < 2.7\%$ ,煤储层渗透率由负增长向正增长转变的储层压力逐渐降低;当  $R_{o,max} > 2.7\%$ ,煤储层渗透率随储层压力的降低呈现出负增长。即:当  $R_{o,max} < 2.1\%$ 时,在地面排水降压开发煤层气过程中,煤基质收缩的正效应始终大于有效应力的负效应,煤储层渗透率随流体压力的降低而逐渐增大;当  $2.1\% < R_{o,max} < 2.7\%$ ,开始降压时,有效应力的负效应大于煤基质收缩的正效应,煤储层渗透率衰减,随着流体压力的降低,煤基质收缩的正效应大于有效应力的负效应,煤储层渗透率增大;当  $R_{o,max} > 2.7\%$ ,有效应力的负效应始终大于煤基质收缩的正效应,煤储层渗透率随流体压力的降低而逐渐减少(图7)。

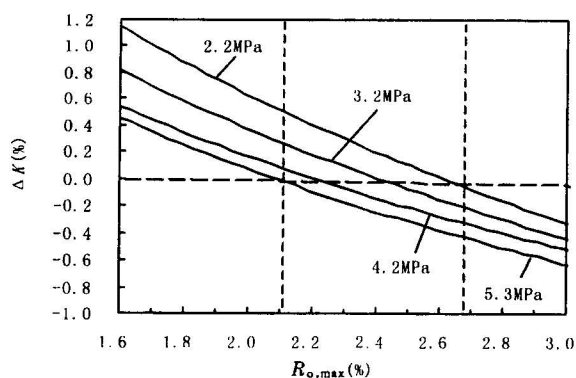


图7 沁水盆地正负效应耦合与煤级的关系

Fig. 7 Relationship of positive and negative effect coupling to coal rank in the Qinshui basin

综上所述,在有效应力和煤基质收缩综合作用下,高煤级煤储层在排水降压开发煤层气的过程中,其渗透率逐渐降低,气、水产能亦相应衰减,后期(一年以后)出现产能高峰可能性不大。

## 6 结论

高煤级煤储层内生裂隙和显微裂隙不发育,是其产气缺陷的根本原因;第二,高煤级煤储层应力渗透率敏感性强,煤基质收缩能力弱,在排水降压开发煤层气的过程中,有效应力的负效应大于煤基质收缩的正效应,煤储层渗透率将逐渐降低,随着排采的进行,产能逐渐衰减,后期不可能再出现产能高峰;第三,高煤级煤储层束缚水饱和度大,排水降压困

难,水相和气-水两相渗流区域狭窄,气-水两相渗流时各相有效渗透率及束缚水下气相渗透率均较低。因此,高煤级煤储层发育地区,煤层气开发的“瓶颈”现象将客观存在。但高煤级煤储层煤层甲烷含量高,资源量大,仍具有一定的可采性。

鉴于高煤级煤储层的物性特征,在高煤级煤储层发育地区,可采取地下煤储层卸压、振动、松动,  $CO_2$  或  $N_2$  气置换或驱替,抑制其有效应力效应等技术方法和措施。

## 参 考 文 献

- 段康廉,张文,胡耀青. 1993. 应力与孔隙水压对煤体渗透性的影响. 煤炭学报, 18(4): 43~50.
- 傅雪海,秦勇,叶建平,等. 2000. 中国部分煤储层解吸特性及甲烷采收率. 煤田地质与勘探, 28(2): 19~22.
- 傅雪海. 2001. 多相介质煤岩体物性的物理模拟与数值模拟. 中国矿业大学(北京校区)博士学位论文.
- 傅雪海,秦勇,李贵中. 2001a. 沁水盆地中-南部煤储层渗透率影响因素分析. 地质力学学报, 7(1): 45~52.
- 傅雪海,秦勇,姜波,等. 2001b. 煤割理压缩实验及渗透率数值模拟. 煤炭学报, 26(6): 573~577.
- 傅雪海,秦勇,薛秀廉. 2001c. 煤储层孔、裂隙系统分形研究. 中国矿业大学学报, 30(3): 225~228.
- 傅雪海,李大华,秦勇,等. 2002a. 煤基质收缩对渗透率影响的实验研究. 中国矿业大学学报, 31(3): 129~131.
- 傅雪海,秦勇,姜波,等. 2002b. 多相介质煤岩体力学实验研究. 高校地质学报, 8(4): 446~452.
- 傅雪海,秦勇,姜波,等. 2003a. 山西沁水盆地中、南部煤储层渗透率物理模拟与数值模拟. 地质科学, 38(2): 221~229.
- 孔祥言. 1999. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 27~31, 296~362.
- 钱凯,赵庆波,汪泽成,等. 1996. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术. 北京: 石油工业出版社, 170~182.
- 秦勇,张德民,傅雪海,等. 1999. 沁水盆地中-南部现代构造应力场与煤储层物性关系之探讨. 地质论评, 45(6): 576~583.
- 孙茂也,张遂安. 2003. 中国煤层气产业政策研究. 北京: 煤炭工业出版社, 41.
- 杨起,汤达祯. 2000. 华北煤变质作用对煤含气量和渗透率的影响. 地球科学—中国地质大学学报, 25(3): 273~277.
- 叶建平,秦勇,林大杨. 1998. 中国煤层气资源. 徐州: 中国矿业大学出版社, 36~41.
- 叶建平,史保生,张春才. 1999. 中国煤储层渗透性及其主要影响因素. 煤炭学报, 24(2): 118~122.
- 叶建平,武强,叶贵钧,等. 2002. 沁水盆地南部煤层气成藏动力学机制研究. 地质论评, 48(3): 319~323.
- 张群,李建武,张新民,等. 2001. 高煤级煤的煤层气开发潜力——以沁水煤田为例. 煤田地质与勘探, 29(6): 26~30.

## References

- Clarkson C R, Bustin R M. 1999. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: a laboratory and modeling study; 2. Adsorption rate modeling. Fuel, 78(11): 1345~1362.
- Connolly P, Cosgrove J. 1999. Prediction of fracture-induced

- permeability and fluid flow in the crust using experimental stress data. *AAPG Bulletin*, 83(5): 757~777.
- Duan Kanglian, Zhang Wen, Hu Yaoqing. 1993. The influence of stress and water pressure of pore on permeability of coal rocks. *Journal of China Coal Society*, 18(4): 43~50 (in Chinese with English abstract).
- Enever R E, Hennig A. 1997. The relationship between permeability and effective stress for Australian. the 1997 International Coalbed Methane Symposium, Alabama, 13~22.
- Fu Xuehai, Qin Yong, Ye Jianping, et al. 2000. Desorption properties of coal reservoir and methane recovery rate in China. *Coal Geology & Exploration*, 28(2): 19~22 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Li Guizhong. 2001a. The effect of geological factors to Coal Reservoirs permeability in central and southern Qinshui Basin. *Journal of Geomechanics*, 7(1): 45~52 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. 2001b. Compress experiment of coal cleat and mathematical simulation of coal reservoir permeability. *Journal of China Coal Society*, 26(6): 573~577 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Xue Xiuqian. 2001c. Systematic fractals on pore and fracture-structure of coal reservoirs. *Journal of China University of Mining & Technol*, 30(3): 225~228 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Li Dahua, Qin Yong. 2002a. Testing study of the influence of coal matrix shrinkage on permeability of coal rocks. *Journal of China University of Mining & Technol*, 31(3): 129~131 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. 2002b. Study on mechanics experiments of multiphase medium coal rocks. *Geological Journal of China Universities*, 8(4): 446~452 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. 2003a. Physical and Numerical Simulations of permeability of coal reservoirs in central and southern Qinshui Basin. *Geological Science*, 38(2): 221~229 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. 2003b. Experiment and study on multiphase medium permeability of middle to high-rank coals in China. *Journal of China University of Mining & Technol*, 32(1): 11~15.
- George J D St, Barakat M A. 2001. The change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal. *International Journal of Coal Geology*, 45(2): 105~113.
- Johnson R C, Flores R M. 1998. Developmental geology of coalbed methane from shallow to deep in Rocky Mountain basins and in Cook Inlet - Matanuska basin, Alaska, American and Canada. *International Journal of Coal Geology*, 35(1~4): 241~282.
- Karacan T, Okandan E. 2000. Fracture/cleat analysis of coals from Zonguldak Basin (northwestern Turkey) relative to the potential of coalbed methane production. *International Journal of Coal Geology*, 44(2): 109~125.
- Kong Xiangyan. 1999. *Advanced seepage mechanics*. Hefei: China Science and Technology University Press, 27~31, 296~362 (in Chinese).
- Levine J R. 1996. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs. In: Gayer R, Harris I, eds. *Coalbed Methane and Coal Geology*. Geological Society Special Publication, No109: 197~212.
- Liang Z R. 1999. Prediction of permeability from the skeleton of three-dimensional pore structure. In: Eval & Eng, eds. *SPE Reservoir*, 2(2): 347~359.
- Qian Kai, Zhao Qingbo, Wang Zecheng, et al. 1996. *Theory and test technology of coal methane exploration and development*. Beijing: Petroleum Industry Press, 170~182 (in Chinese).
- Qin Yong, Zhang Demin, Fu Xuehai, et al. 1999. Discussion on correlation of modern tectonic stress field to physical properties of coal reservoirs in the central and southern Qinshui basin. *Geological Review*, 45(6): 576~583 (in Chinese with English abstract).
- Reucroft P J, Patel H. 1986. Gas-induced swelling in coal. *Fuel*, 65(10): 816~820.
- Sun Maoye, Zhang Sui'an. 2003. *Study on industry policy of coal bed gas in China*. Beijing: China Coal Industry Press, 41 (in Chinese).
- Yang Qi, Tang Dazhen. 2000. Effect of coal metamorphism to gas content and permeability of coal seams in north China. *Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 273~277 (in Chinese with English abstract).
- Ye Jianping, Qin Yong, Lin Dayang. 1998. Coalbed methane resources of China. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 36~41 (in Chinese).
- Ye Jianping, Shi Baosheng, Zhang Chuncai. 1999. Coal reservoir permeability and its controlled factors in China. *Journal of China Coal Society*, 24(2): 118~122 (in Chinese with English abstract).
- Ye Jianping, Wu Qiang, Ye Guijun, et al. 2002. Study on the coalbed methane reservoir-forming dynamic mechanism in the southern Qinshui Basin, Shanxi. *Geological Review*, 48(3): 319~323 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qun, Li Jianwu, Zhang Xinming. 2001. Development potential of coal bed methane of high coal rank reservoirs—A Case study on Qinshui coal field. *Coal Geology & Exploration*, 29(6): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Zuber M D. 1998. Production characteristics and reservoir analysis of coalbed methane reservoirs. *International Journal of Coal Geology*, 38(1~2): 27~45.

## Study on the "Bottle-Neck" Problem of Coalbed Methane Productivity of High-rank Coal Reservoirs

FU Xuehai, QIN Yong, JIANG Bo, WEI Chongtao

*College of Mineral Resource and Geoscience, CUMT, Xuzhou, Jiangsu, 221008*

### Abstract

Based on continuous observations of the macrofractures and microfractures and systemic measurements of pores in coal reservoirs, combined with experimental results of stress permeability, methane-water relative

permeability and adsorption-swelling on high-rank coal reservoirs, this paper has analyzed the tertiary seepage characteristics of high-rank coal reservoirs, discussed the coupling effect of effective stress and coal matrix shrinkage on permeability of high-rank coal reservoirs, revealed the "bottle-neck" phenomenon that the productivity of coalbed methane(CBM) is high in the initial stages and attenuates rapidly after a few months in the course of development using the water drainage and pressure reduction methods, and found out the radical reason that leads to the reduction of methane recovery in high-rank coal reservoirs. Techniques and measures are suggested for developing CBM in high-rank coal reservoirs aiming at the particularity of physical properties of high-rank coal reservoirs.

**Key words:** high-rank coal reservoir; coalbed methane; effective stress; coal matrix shrinkage; "bottle-neck" problem; Qinshui basin