

文章编号:1006-6616(2001)01-0045-08

山西沁水盆地中、南部煤储层渗透率影响因素

傅雪海, 秦 勇, 李贵中, 李田忠, 胡 超

(中国矿业大学资源与环境科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要:通过对山西沁水盆地中、南部井下煤层宏观裂隙的观测和统计,将其按大小和形态特征划分为4级,并在扫描电镜下对显微裂隙进行了系统描述和测量。在分析渗透率与地应力、埋深、裂隙、储层压力和水文地质条件等相互关系的基础上,指出影响本区煤储层渗透率的主控因素是地应力和埋深,在埋深相似条件下,其他因素对渗透率起着更重要的作用。

关键词:煤储层;地应力;渗透率;裂隙

中图分类号:P618.11

文献标识码:A

0 引言

山西沁水盆地中、南部是我国目前煤层气勘探开发最有前景的地区之一,北以沁县,东、南、西以盆地边缘为界,地理座标范围为东经 $111^{\circ}45' \sim 113^{\circ}10'$,北纬 $35^{\circ}30' \sim 36^{\circ}45'$,面积约为 15000km^2 (图1)。

研究区煤层平均总厚 10.43m ,山西组 $3^{\#}$ 为上主煤层,太原组 $15^{\#}$ 为下主煤层,埋深在 $200 \sim 1500\text{m}$ 之间,煤层气资源量约 $1.9 \times 10^{12}\text{m}^3$ ^[1],镜质组浸油最大反射率($R_o, \max\%$)界于 $1.3\% \sim 4.0\%$,渗透率高低成为制约煤层气勘探开发的关键因素。从本区施工的二十余口煤层气试井资料来看,煤储层渗透率相差达 $2 \sim 3$ 个数量级,处于同一复式向斜内,渗透率何以存在如此大的差异?下面从裂隙、地应力、埋深、储层压力及水文地质条件等诸方面分别探讨其对渗透率的影响,并从中确定主控因素。

1 试井渗透率分布特征

就目前资料来看,区内主煤储层的试井渗透率变化范围为 $0.01 \sim 5.71 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,除个别异常数据外,在其余单井中均小于 $2 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (表1)。其中:渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的占 50% 左右, $0.1 \sim 1.0 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的在 25% 左右, $1.0 \sim 2.0 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的有 20% 左右;除去异常数

收稿日期:2000-01-24

基金项目:国家自然科学基金(编号:49772131)

作者简介:傅雪海(1965—),男,博士,高级工程师,专业:地球探测与信息技术。

据,上、下主煤层的平均渗透率基本相当,均在 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,前者仅略高于后者,但都明显高于全国现有试井数据的平均水平。

表1 试井渗透率统计数据表

Table 1 Statistics of well-testing permeability in coal reservoirs

渗透率区段 $/ \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	上主煤层		下主煤层		渗透率区段 $/ \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	上主煤层		下主煤层	
	试井数	%	试井数	%		试井数	%	试井数	%
0.01~0.05	4	22.2	4	33.3	2.01~2.50	0	0	0	0
0.051~0.1	4	22.2	2	16.7	2.51~3.50	0	0	0	0
0.11~0.5	2	11.1	2	16.7	3.51~4.00	1	5.6	0	0
0.51~1.0	3	16.7	1	8.3	4.01~5.50	0	0	0	0
1.01~1.50	2	11.1	1	8.3	4.01~5.50	0	0	1	8.3
1.51~2.00	2	11.1	1	8.3					
平均值1	0.70		0.84		平均值1	0.70		0.84	
平均值2	0.53		0.40		平均值2	0.53		0.40	

注:平均值1为所有数据的均值;平均值2为剔除最大值后的均值

尽管主煤储层试井渗透率变化极大,但在区域上分布规律较为明显,呈现出“南高北低”或“翼部高、轴部低”的总体展布态势,格局相对简单(图1)。渗透率最高的地段出现在研究区南缘的樊庄南部地区,普遍高达 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,据潘庄资料和西北部沁源数据推测,在研究区西侧的沁源—安泽—沁水一带,煤储层渗透率可能达到 $0.1 \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在东北部潞安地区,渗透率多数低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但在襄垣、南寨煤储层中大、中裂隙特别发育,推测其渗透率可能达 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 构造应力场与煤储层裂隙发育特征

2.1 构造应力场

本区地质构造虽较简单,但断层、褶皱展布形态仍然反映了本区经历了多期构造运动。综合刘焕杰等^[2],王喻^①等对本区褶皱和断层特征、构造样式和组合规律的分析以及对节理的分期配套研究,恢复各期的构造应力场方向如下:①印支期:近SN向挤压;②燕山—喜马拉雅早期:NW—SE向挤压;③喜马拉雅晚期:NW—SE向伸展;④新构造期:NEE—SWW向挤压。以上表明本区自中生代以来以挤压应力场为主,但构造形态却以宽缓褶皱和正断层最为醒目,且各期次均有展布,说明本区在挤压作用的后期,由于应力松弛,发生过伸展作用。

印支期近SN方向的挤压作用主要表现为地层的整体抬升和近EW向褶皱,而伸展作用表现为双头—襄垣近EW向正断层;燕山—喜马拉雅早期NW—SE向挤压使本区整体成为NE向复式向斜,在西缘出现NE向逆断层,并使本区产生大量NE向裂隙,而伸展作用表现为东、西边缘及中部寺河、后则腰等NE向正断层;喜马拉雅晚期NW—SE向伸展作用则局限于本区西南隅,现代NEE向构造应力场则控制着先期裂隙的张开和闭合。

① 王喻,李涛,等.古今地应力特点与煤层构造裂隙分布规律研究.中国地震局地质研究所,1999.

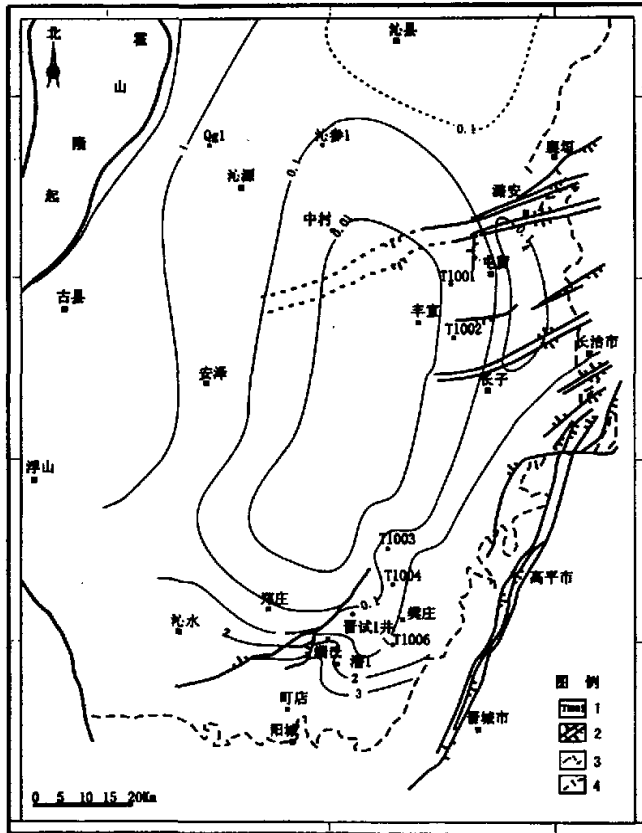


图 1 研究区上主煤储层渗透率等值线平面图

Fig.1 The permeability isogram of the upper main coal reservoir

1. 钻孔及编号; 2. 逆断层/正断层; 3. 露头线; 4. 渗透率等值线($10^{-3} \mu\text{m}^2$)

2.2 煤储层裂隙发育特征

煤储层的固态部分, 可看做由宏观裂隙、显微裂隙和孔隙组成的三元结构系统^[3]。孔隙是煤层气的主要储集场所, 宏观裂隙是煤层气运移的通道, 而显微裂隙则是沟通孔隙与宏观裂隙的桥梁或中间通道, 其中以宏观裂隙和显微裂隙对煤储层渗透率贡献最大。

2.2.1 宏观裂隙特征 煤中宏观裂隙的发育特征直接影响到煤储层渗透率的大小和方向, 因其成因复杂, 对其定义和理解因人而异, 国外煤层气工业中常称之为割理^[4], 即称先期形成的且延伸较远的裂隙、节理为面割理 (face cleat), 晚期形成的且居于面割理之间的裂隙、节理为端割理 (bull cleat), 本文中面裂隙、端裂隙与面割理和端割理含义相当。

本次根据井下的实际观测结果, 将裂隙按大小和形态特征分为大裂隙、中裂隙、小裂隙、微裂隙 (内生裂隙) 4 级 (表 2)。

表2 研究区裂隙级别划分及分布特征

Table 2 Distribution and classification of fractures in coal reservoirs

裂隙级别	高度	长度	线密度	切割性	裂隙形态特征	分布
大裂隙	0.5 ~ 数米	数十 ~ 数百米	数条/m	切穿整个煤层甚至顶底板	发育一组,断面平直,有煤粉,裂隙宽度数毫米到数厘米,与煤层层面斜交	襄垣长治
中裂隙	0.05 ~ 0.5m	数米	数十条/m	切穿几个煤自然分层或几个宏观煤岩类型分层(包括支矸)	常发育一组,局部两组,断面平直或呈锯齿状,有煤粉	潞安晋城阳城
小裂隙	数毫米 ~ 数厘米	数厘米 ~ 1m	数十 ~ 200条/m	切穿一个煤自然分层或几个宏观煤岩类型分层,一般垂直或近垂直于层理分布	普遍发育两组,面裂隙较端裂隙发育,断面平直。	全区均有分布
微裂隙 (内生裂隙)	数毫米	数厘米 ~ 数十厘米	200 ~ 500条/m	局限于一个宏观煤岩类型或几个煤岩成分分层(镜煤、亮煤)中,垂直于层理面	发育两组以上,方向较为零乱	全区均有分布

煤中大、中裂隙分布局限,内生裂隙方向杂乱。井下对小裂隙的观测统计结果表明,本区小裂隙普遍发育两组。上主煤层面裂隙走向 N40°E 和 N45°W,端裂隙走向 N50°W 和 N80°W,以 N40°E 和 N50°W 最为发育;下主煤层面裂隙走向为 N25°E,端裂隙走向为 N20°W。裂隙倾角普遍大于 70°,密度为 20 ~ 160 条/m,大多处于紧闭状态。在区域上,主煤层裂隙方位在不同地区略有变化,裂隙密度由北往南有逐渐增大的总体趋势;在垂向上,拉张作用形成的裂隙相对较浅,而挤压作用形成的裂隙则多发育在校深层次上,褶皱中和面上下煤层裂隙差异大,本区以 8°、9° 为中间过渡层位,次级向斜下主煤层裂隙的平均密度大于上主煤层,次级背斜上主煤层裂隙的平均密度大于下主煤层。总体上裂隙发育密度与煤储层渗透率南部大于北部,上、下主煤层差异不大的规律相符。

2.2.2 显微裂隙特征 据扫描电镜观察,本区显微裂隙除个别样品外,总体不太发育,观察到的主要有张裂隙、剪裂隙和收缩裂纹。张裂隙缝壁呈锯齿状,收缩裂纹呈月牙形,二者均呈张开状;剪裂隙平直,缝壁闭合;还有叠加作用形成的“S”形裂隙。显微裂隙发育差与晋1井测试的煤基质扩散系数低具有很好的一致性,因此,显微裂隙发育差可能成为制约本区煤层气渗流的主要因素之一。

3 地应力对煤储层渗透率的影响

3.1 地应力的构成

地应力场由大地静应力场和构造应力场叠加而成,直接影响了裂隙的开合程度。大地静应力(垂向应力 σ_v)仅由上覆岩体的重量造成,即由埋深所决定,可由海姆(Heim A. 1912)公式得出,即:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \bar{\rho}_i H_i \approx \bar{\rho} H \quad (1)$$

式中, σ_v 为垂向应力; i 为分层号; $\bar{\rho}$ 为平均岩石密度; H 为上覆地层厚度。

垂向应力在水平方向产生的分应力可由金尼克(Gennik A G. 1926)公式得出,即:

$$\sigma_{hw} = \lambda(\sigma_v - \beta P) \approx \frac{\nu}{1 - \nu}(\sigma_v - P) \quad (2)$$

式中, σ_{lv} 为垂向应力在水平方向产生的分应力; λ 为侧压系数; β 为毕奥夫常数; P 为储层压力; ν 为泊松比。

最大水平构造应力 (σ_{H}) 在最小水平构造应力 (σ_{h}) 方向产生的分应力 (σ_{Hh}) 和最小水平构造应力 (σ_{h}) 在最大水平构造应力 (σ_{H}) 方向产生的分应力 (σ_{Hh}) 分别为:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Hh}} &= \sigma_{\text{H}} \times \nu \\ \sigma_{\text{Hh}} &= \sigma_{\text{h}} \times \nu\end{aligned}\quad (3)$$

则最大、最小水平地应力为:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Hmax}} &= \sigma_{\text{lv}} + \sigma_{\text{H}} + \sigma_{\text{Hh}} \\ \sigma_{\text{hmin}} &= \sigma_{\text{lv}} + \sigma_{\text{h}} + \sigma_{\text{Hh}}\end{aligned}\quad (4)$$

通过对本区煤储层压裂井的闭合压力和地球物理测井资料解释, 得到本区垂向应力梯度为 2.7MPa/100m, 最大水平应力梯度为 2.4MPa/100m, 最小水平应力梯度为 1.8MPa/100m, 临界深度约为 510m, 即 -510m 以上, 最大主应力 σ_1 为最大水平应力, 中间主应力 σ_2 为垂直应力 (上覆岩层压力), 最小主应力 σ_3 为最小水平应力; -510m 以下, 最大主应力 σ_1 为垂直应力, 中间主应力 σ_2 为最大水平应力, 最小主应力 σ_3 为最小水平应力。

主应力差越大, 渗透率也越大^[3], 剪应力最大方向, 即裂隙张开度最大方向, 也就是渗透率最大方向。裂隙张开度与所受剪应力 (τ)、弹性模量 (E)、泊松比 (ν) 及裂隙高度 (H) 有关^[6] 即:

$$W_x = \frac{(1 - \nu^2) \tau H}{E} \sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}} \quad (5)$$

式中, W_x —裂隙宽度/mm; L —裂隙长度/mm; x —裂隙端部距裂隙中心的距离/mm。

煤储层渗透率与裂隙宽度三次方成正比, 与裂隙间距成反比^[7], 即:

$$K = \frac{(1.013 \times 10^9) W_x^3}{12S} \quad (6)$$

式中, K —渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; S —裂隙间距/mm; W_x —裂隙宽度/mm。

下面以晋试验 1 井为例, 对主煤储层进行应力分析与渗透率预测:

晋试 1 井上主煤层埋深 521.6 ~ 527.3m, 储层压力为 3.95MPa, 下主煤层埋深 606.6 ~ 609.6m, 储层压力为 6.07MPa。由地球物理测井和水压致裂井得出, 最大水平应力为 13.7 ~ 15.7MPa, 最小水平应力为 7.9 ~ 9.4MPa。对于上、下主煤层, 最大主应力 σ_1 为垂直应力, 中间主应力 σ_2 为最大水平应力, 最小主应力 σ_3 为最小水平应力。煤层气开发过程中, 水平裂隙最为有利, 因此, 有效剪应力即最大剪应力作用在通过中间主应力 σ_2 并且平分最大主应力 σ_1 与最小主应力 σ_3 的夹角的平面上, 在数值上等于 σ_1 与 σ_3 之差的一半。

煤中裂隙特征参照潘庄井田西南缘永红煤矿资料: 上主煤层面裂隙方向 $\text{N}40^\circ \sim 50^\circ\text{E}$, 面裂隙间距 13mm; 端裂隙方向 $\text{N}40^\circ \sim 50^\circ\text{W}$, 端裂隙间距 17mm, 裂隙高度为 8mm。据姚宇平所作含瓦斯煤力学实验^[8], 可设上主煤层弹性模量为 $2.48 \times 10^4 \text{MPa}$, 泊松比为 0.3; 设下主煤层弹性模量为 $4.88 \times 10^4 \text{MPa}$, 泊松比为 0.38。由式(5)得上、下主煤层裂隙缝宽分别为 4.71 μm 和 3.67 μm , 由式(6)得上、下主煤层渗透率分别为 $0.68 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 3), 与上主煤层试井渗透率 $0.51 \mu\text{m}^{-3}$ 相近。由式(1)、(2)、(3)和(4)得本区最大水平构造应力为 9.1MPa, 最小水平构造应力为 -0.8MPa (为张应力)。

表3 晋试1井主煤层应力分析与渗透率预测

Table 3 Stress analyses and permeability predictions

煤层	σ_1/MPa	σ_2/MPa	σ_3/MPa	剪应力/MPa	裂隙能宽/ μm	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
上主煤层	14.2	13.7	7.9	2.9	4.71	0.68
下主煤层	16.4	15.7	9.4	3.2	3.67	0.47

3.2 渗透率与埋深的关系

总体上看,主煤储层试井渗透率具有随埋深加大呈指数规律减小的趋势(图2),埋深大于800m,渗透率普遍小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,说明盆地周缘渗透率高于盆地中心。然而,在相似埋深条件下渗透率的变化可高达一个数量级。例如,南部潘庄—樊庄地区与东部的屯留地区,已施工煤层气井的主煤层埋深都在300~800m之间,但潘庄—樊庄地区的井孔渗透率多大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而屯留地区的4口井几乎全在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。这一差异揭示,在总体受埋深控制的情况下,还存在着其他影响因素,也就是说,在埋深相当的情况下,其他影响因素往往对渗透率起着更为重要的控制作用。

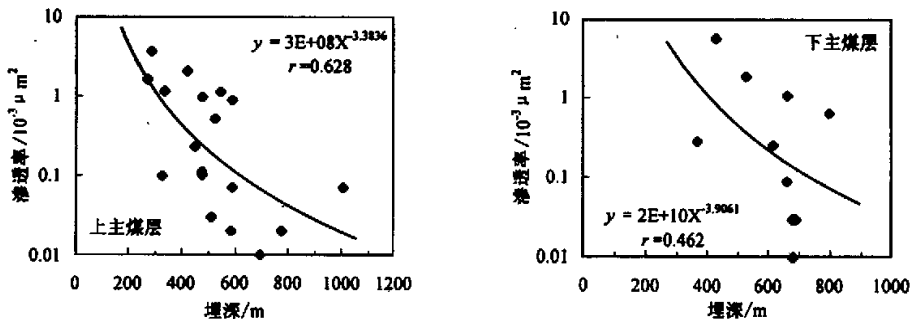


图2 主煤储层渗透率与埋深关系曲线

Fig.2 Correlation between buried depth and the well-testing permeability of the main coal reservoirs

3.3 渗透率与最小水平应力的关系

本文的最小水平应力即为煤储层压裂井测得的闭合压力, $3^{\#}$ 煤层最小水平应力变化于3.3~11.9MPa,平均为8.45MPa, $15^{\#}$ 煤层变化于8~13.3MPa,平均为10.59MPa,与渗透率的关系见图3,总体上看,数据比较分散,但渗透率随最小水平应力增大呈指数关系减小的趋势即十分明显,最小水平应力大于10MPa,煤储层渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4 储层压力与渗透率的关系

储层压力直接决定着煤层对甲烷等气体的吸附与解吸能力。在排水降压进行煤层气开发时,气含量、临界解吸压力均随储层压力的增大而增大,煤储层压力越高,越容易排采,越有利于煤层气的开发。然而,本区煤储层渗透率随储层压力增大而减小的趋势十分明显。当储层压力大于5MPa,渗透率普遍小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图4)。这一关系是随埋深加大而煤储层压力

增高,渗透率则随埋深加大而减小的必然结果,同时也说明储层压力对渗透率的影响远逊于埋深对渗透率的控制。

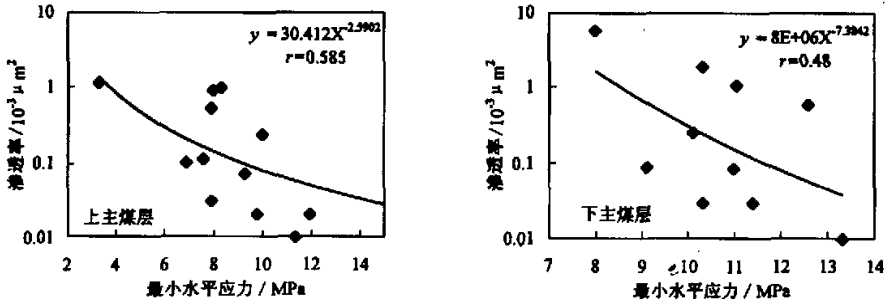


图 3 主煤储层渗透率与最小水平应力相关曲线

Fig.3 Correlation between the minimum plane stress and the well-testing permeability of the main coal reservoirs

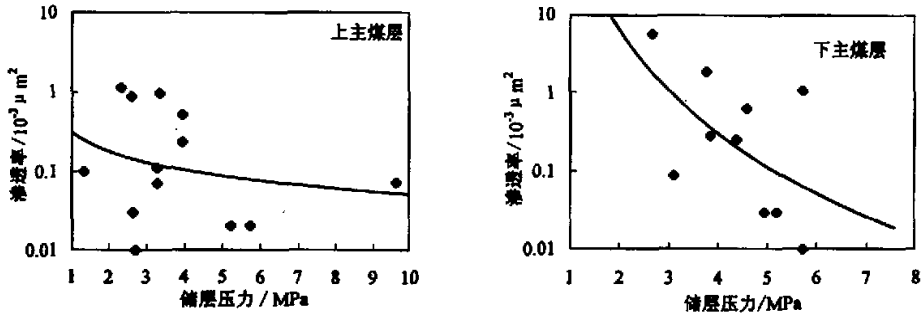


图 4 主煤储层渗透率与储层压力相关曲线

Fig.4 Correlation between the reservoir pressure and the well-testing permeability of the main coal reservoirs

5 水文地质条件

本区二叠系碎屑岩为孔隙含水层,石炭系碎屑岩与碳酸盐岩交互层为孔隙和裂隙含水层,主要含水层段为砂岩和灰岩,煤层为弱含水层。水化学场和水流场分析表明,垂向上石炭系与奥陶系水力联系较弱,平面上,西北和东南部水位最高,东北和南部水位较低。南部大宁—潘庄—樊庄一带,水位等势面呈明显的“洼地”状态,煤层被水饱和,试井渗透率最高(图 1),西北和东北部水位等势面呈箕状,即有一面敞口,煤层大部分被水饱和,试井渗透率虽比南部低,但各井之间差异较大。西侧的沁源—安泽—沁水一带,煤储层渗透率大约在 $0.1 \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内,而东北部的潞安地区,渗透率多数低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。可见水文地质条件对渗透率的影响较明显,但不是主控因素。

6 结论

通过对沁水盆地中、南部井下煤层宏观裂隙的观测和统计,将其按大小和形态特征划分为大、中、小、微4级,并在扫描电镜下对显微裂隙进行了系统描述和测量,指出煤储层渗透率是地应力、埋深、裂隙、储层压力和水文地质条件等综合作用的结果,其中地应力和埋深是主控因素。在埋深对煤储层渗透率总体控制之下,存在着裂隙、储层压力、水文地质条件等多种因素的叠加,在埋深相似的条件,其他因素起着更重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 叶建平,秦勇,林大新,等. 中国煤层气资源[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998:55~58.
- [2] 刘焕杰,秦勇,桑树勋. 山西南部煤层气地质[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1997:24~47.
- [3] 傅雪海,秦勇,李贵中. 现代构造应力场中煤储层孔裂隙应力分析与渗透率研究[J]. 地球学报,1999,20(增刊):623~627.
- [4] Close J C. Natural fracture in coal [J]. In: Law B E, Rice D D, ed. AAPG, Hydrocarbons from coal, Studies in Geology # 38, 1993: 119~132.
- [5] 秦勇,张德民,傅雪海,等. 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[J]. 地质论评,1999,45(6): 576~583.
- [6] 展厚泽,高森. 岩石破碎学[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [7] Levine J R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs[J]. Geological Society Publication, 1996, (199): 197~212.
- [8] 姚宇平. 含瓦斯煤的力学性质[D]. 硕士学位论文. 徐州:中国矿业大学,1987.

AN ANALYSIS ON THE PRINCIPAL CONTROL FACTOR OF COAL RESERVOIR PERMEABILITY IN CENTRAL AND SOUTHERN QINSHUI BASIN, SHANXI

FU Xue-hai, QIN Yong, LI Gui-zhong, LI Tian-zhong, HU Chao
(College of Mineral Resource and Environment Sciences, CUMT, Xuzhou 221008, China)

Abstract: According to measurement and statistics of down coal mine macrofractures were classified into four ranks, and systemically described and measured under scan electron microscope. Based on the analysis of relationship between permeability and ground stress/buried depth, fractures, reservoir pressure, hydrogeological condition, authors point out that ground stress/buried depth is principal-control factor. Under the same buried depth other factors play more important role on permeability.

Key words: coal reservoir; ground stress; permeability; fracture