

沁水盆地南部煤储层渗透性与地应力之间关系和控制机理^{*}

孟召平^{1,2**} 田永东^{1,3} 李国富³

1. 中国矿业大学(北京)资源与地球科学系, 北京 100083; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002;
3. 沁水蓝焰煤层气有限责任公司, 晋城 048204

摘要 通过对沁水盆地南部43口煤层气井渗透率和地应力统计分析, 建立了煤储层渗透性与现今地应力之间的相关关系和模型. 从煤储层的孔隙结构分析入手, 建立了煤储层割理面压缩变形与裂隙渗流模型, 分析地应力对煤储层渗透性影响的机理. 研究表明, 煤储层试井渗透率随着地应力的增加呈指数函数关系降低; 随着煤层埋藏深度增大, 其渗透率降低, 煤储层渗透率随深度变化趋势的实质是应力的函数. 在650m以浅煤储层地应力处于伸张带, 最小水平主应力小于12MPa, 煤储层渗透率平均大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 在650—1000m煤储层地应力由伸张带转化为压缩带的过渡带, 最小水平主应力为12—20MPa, 煤储层渗透率平均大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 在1000—1500m煤储层地应力转化为压缩带, 最小水平主应力大于20MPa, 煤储层渗透率平均大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. 当割理面法向力 σ_n 为压应力时, 割理产生法向压缩(压密)变形, 开始先为点或线接触, 经过挤压, 局部破碎或劈裂, 接触面增加, 割理面压缩量呈指数曲线特征. 煤储层渗透率随着割理面正应力的增加呈指数函数关系降低, 其理论模型与试井渗透率统计模型完全一致.

关键词 沁水盆地南部 煤储层 渗透性 地应力 控制机理

煤储层孔渗性的分布直接影响煤层气开采效果, 是煤层气开采评价的重要参数. 渗透性的原始定义是给定面积内液体流过孔隙介质一种的度量. 渗透是固体本身所固有的性质, 渗透率 k 可以直接由Darcy定律来定义. Darcy定律本身并没有反映出渗流与孔隙介质应力—应变状态的关系. 20世纪50年代人们才开始对裂隙岩体的水力特征以及其中流体的流动进行试验及理论研究, 建立了裂隙岩体渗流模型, 获得了岩体应力与渗流之间一些基本关系^[1]. Brace等^[2]对花岗岩进行高压状态下的渗透性试验得出花岗岩的渗透性随着有效围压、围压与孔隙压差的增加而减小. Gangi^[3]推导出确定孔隙介

质渗透性随围压变化的唯象学模型, 指出岩石的广义渗透性 $k(p)/k_0$ 随着广义围压 p/p_0 的增加而降低. Walsh^[4]研究了孔隙压力和围压对裂隙渗透性的影响. Li等^[5]对殷庄砂岩在全应力应变过程中的渗透性进行了研究, 并提出岩石的渗透性与岩石的应力、应变有较强的函数关系等认识. 煤储层渗透率的影响因素十分复杂, 主要受控于地应力、地质构造、煤层埋深、煤体结构、煤岩煤质特征、煤级及天然裂隙发育程度, 其中地应力的大小和应力状态对煤储层渗透性具有重要影响.

一般情况下, 煤储层被钻开或投入开采之后, 随着气体的排出, 煤储层的流体压力将不断地变

2009-05-21 收稿, 2009-07-22 收修修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40772100)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB209405)和教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

^{**} E-mail: mzp@cumt.edu.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

化, 由煤储层的原地应力减去储层流体压力所得到的有效应力^[6]也随之改变, 这会造成煤体变形, 改变煤储层的孔隙结构, 进而使煤储层的渗透率发生变化. 国内外许多学者曾就地应力对煤储层渗透性的影响, 进行过实验测试和分析. 研究表明, 煤样的渗透率对地应力极为敏感, 且煤样的渗透率随着地应力的变化而呈指数变化. 例如, 张广洋等通过对四川南桐煤田的煤样实验, 发现煤样的渗透率随平均有效应力的变化规律, 得出煤样的渗透率与平均有效应力呈指数关系^[7]. Enever 等^[8]通过对澳大利亚煤层渗透率与地应力的相关性研究发现, 煤层渗透率值变化与有效地应力的变化呈指数关系^[8]. McKeeC 等^[9]通过对美国皮申斯、圣胡安和黑勇士盆地煤层渗透率与埋藏深度关系的研究发现, 随着煤层埋藏深度和有效应力增加, 煤层割理缝的宽度减小, 渗透率呈指数降低. 唐书恒^[10]对中国阳泉、韩城、峰峰、平顶山、沁源等矿区的煤层实测渗透率与原地最小主应力进行相关分析发现, 煤层渗透率与原地最小主应力为指数关系.

从目前的研究状况看, 对煤储层的研究主要还是集中在煤层本身, 关于地应力对煤储层渗透性的影响研究还很不够, 因此在煤层气勘探开发过程中对煤储层的认识在一定程度上受到限制. 煤储层属于低孔隙度、低渗透率的非常规储层, 在煤层气开采中井壁围岩处于一定的应力状态之中, 钻井活动不可避免的造成岩体局部应力集中和破坏, 最终影响到煤储层的孔渗性^[11-14]. 在开采过程中渗透率降低速度快、程度大, 煤储层的渗透性对地应力的变化非常敏感. 因此, 分析煤储层渗透性与地应力之间的关系和模型, 探讨作用机理, 对煤储层特征的认识, 减少储层伤害, 提高最终采收率具有理论和实际应用意义.

1 沁水盆地南部煤储层渗透性与现今地应力分布

1.1 沁水盆地南部煤储层渗透性

渗透率作为衡量多孔介质允许流体通过能力的一项指标, 它是影响煤层气产气量高低的关键参数, 又是煤层气中最难测定的一项参数.

通过对沁水盆地南部樊庄、潘庄和郑庄区块的

试井渗透率统计表明, 沁水盆地南部石炭—二叠纪主要煤储层渗透率为 $(0.004-5.707) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.7514 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (统计数 $N=43$), 其中山西组 3 煤层渗透率为 $(0.004-3.98) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.764 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 太原组 15 煤层渗透率为 $(0.013-5.707) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.736 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 石炭—二叠纪主要煤储层渗透率一般小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 整体相对较低, 且太原组 15 煤层渗透性要高于山西组 3 煤层渗透性. 煤储层渗透率在平面上分布存在明显的差异性, 呈现出“南高北低”或“翼部高、轴部低”的总体展布态势, 具体表现为研究区南部和东南部的樊庄和潘庄区块煤储层渗透率均明显高于北部的郑庄区块, 这主要是受靠近沁水盆地南部的向斜轴部埋藏深度大、地应力高所决定的.

1.2 沁水盆地南部煤储层现今地应力特征

水压致裂法是确定地应力常用的方法之一. 水力压裂法是通过钻孔向地下某深度处的测点段压液, 用高压水将孔壁压裂, 然后根据破坏压力、闭合压力和破裂面的方位, 计算和确定岩体内各主应力的大小和方向. 对于垂直钻孔, 由不同深度的测试数据, 可得到最大和最小水平主应力随深度变化规律; 而垂直应力的的大小可通过上覆岩层重量来计算.

通过水力压裂测定沁水盆地南部樊庄、潘庄和郑庄区块 1200 m 以浅的 43 个主采煤层原岩应力资料统计表明: 最大水平主应力 6.42—41.86 MPa, 平均为 17.21 MPa, 最大水平主应力梯度为 1.17—4.79 MPa/100 m, 平均为 2.64 MPa/100 m; 最小水平主应力 3.30—26.40 MPa, 平均为 11.391 MPa; 最小水平主应力梯度为 0.99—2.85 MPa/100 m, 平均为 1.77 MPa/100 m.

如果用侧压系数 λ 表示两个水平应力的平均值 $\left(\sigma_H = \frac{\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin}}{2} \right)$ 与垂直应力 σ_v 之比, 沁水盆地南部煤储层地应力状态实测结果表明, 侧压系数 λ 值一般为 0.42—1.42, 平均为 0.82, 并且与测点距地表深度有一定的趋向性(图 1).

(1) 在 650 m 以浅煤储层地应力状态主要表现为 $\sigma_v > \sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin}$, 最小水平主应力小于 12 MPa,

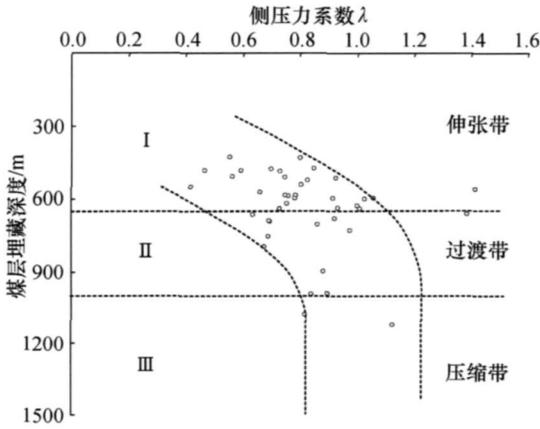


图 1 侧压力系数(λ)与煤层埋藏深度(h)的关系

现今地应力状态为伸张带, 具有大地静力场型特征, 这种应力状态有利于正断层活动;

(2) 在 650—1000 m 煤储层地应力状态转化为 $\sigma_{h\max} \approx \sigma_v \approx \sigma_{h\min}$, 最小水平主应力为 12—20 MPa, 现今地应力状态由伸张带转化为压缩带的过渡带, 具有准静水压力场型特征;

(3) 在 1000 m 以深煤储层地应力状态为 $\sigma_{h\max} \approx \sigma_v \approx \sigma_{h\min}$, 最小水平主应力大于 20 MPa, 现今地应力状态转化为压缩带, 具有准静水压力场型特征, 这种应力状态有利于逆断层和平移断层活动。

2 煤储层渗透性与现今地应力之间的关系

煤层渗透率的影响因素十分复杂。地质构造、应力状态、煤层埋深、煤体结构、煤岩煤质特征、煤级及天然裂隙都不同程度地影响煤层渗透率。有时是多因素综合作用的结果, 有时是某一因素起主要作用。

试井渗透率资料统计表明, 沁水盆地南部当煤层埋藏深度小于 650 m 时, 最小水平主应力 3.30—11.93 MPa, 小于 12.0 MPa, 且平均为 8.53 MPa 时, 煤储层试井渗透率分布范围为 $(0.015—5.71) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $1.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 当煤层埋藏深度 650—1200 m 时, 最小水平主应力 12.10—26.40 MPa, 大于或等于 12.0 MPa, 且平均为 15.673 MPa 时, 煤储层试井渗透率分布范围为 $(0.013—3.13) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均只有 $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

通过对沁水盆地南部煤储层试井渗透率与地应

力进行相关统计分析发现, 煤储层试井渗透率与地应力具有相关性, 随着地应力的增加煤储层试井渗透率降低, 如图 1 示。回归分析结果表明, 煤储层渗透率与地应力之间具有如下指数关系:

$$K = K_0 e^{a\sigma} \quad (1)$$

式中: K 为给定应力条件下的渗透率, 单位 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; σ 为从初始到某一应力状态下有效应力的变化值, 单位 MPa; K_0 和 a 为取决于主应力类型的系数, 其中 K_0 初始应力条件下的渗透率, 单位 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (如表 1 所示)。煤储层渗透性与不同主应力之间的相关性大体相同, 文中因统计数差异导致最大水平主应力的相关系数大于其他主应力。

表 1 在方程(1)中参数 K_0 和 a 的取值

主应力类型	系数 K_0	系数 a	统计数及相关系数
垂直主应力 σ_v	15.4540	-0.2336	$N=43; R=0.55$
最大水平主应力 $\sigma_{h\max}$	5.3524	-0.1723	$N=42; R=0.66$
最小水平主应力 $\sigma_{h\min}$	4.6159	-0.2526	$N=43; R=0.58$
平均应力	8.5032	-0.2282	$N=42; R=0.64$

由表 1 和图 2 可以看出, 根据本区煤层中主应力状况就能大致推测其渗透性。现今地应力对煤储层渗透率的影响十分显著。中国地质构造复杂多样, 各板块之间以及板内各块段之间构造应力分布状态差异显著。在构造挤压区、逆冲推覆作用强烈地区、不同走向的断裂结合部位是构造应力集中的地区, 往往也是低渗透率分布地区。构造应力松弛、转折端挠褶带、与断层有关的次生裂隙、破碎断层面等低应力分布地区, 往往也是煤层高渗透率分布地区。不同应力状态下渗透率与深度的变化趋势不同。应力松弛地区, 渗透率高, 随深度增加, 变化幅度不大; 正常应力地区, 渗透率中等, 随深度增加而减少; 在高应力地区, 渗透率较低, 而且随深度增加渗透率急剧减小^[10]。

沁水盆地现代地应力作用较弱, 煤岩层处于拉张应力场中, 煤储层渗透率相对我国其他地区较高; 但与美国、澳大利亚相比, 沁水盆地煤储层所承受的现代地应力较大。美国黑勇士盆地最小水平主应力值一般 1—6 MPa, 澳大利亚东部悉尼盆地、鲍恩盆地 1—10 MPa, 少数达 14 MPa; 而沁水盆地南部 1200 m 以

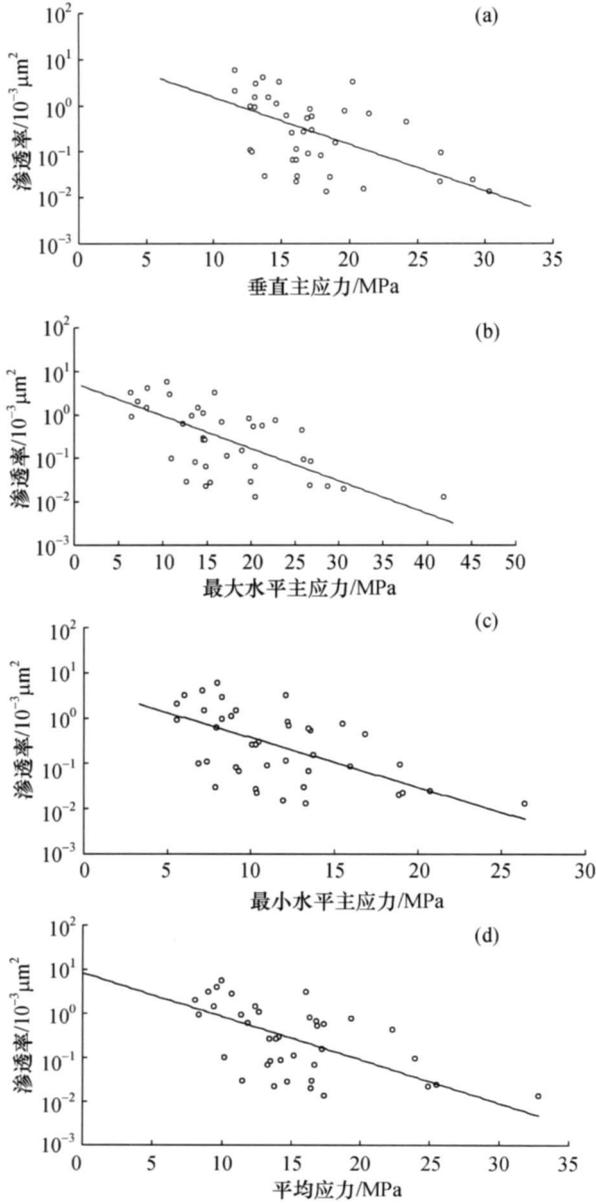


图 2 煤层试井渗透率与地应力之间的关系

- (a) 渗透率与垂直主应力; (b) 渗透率与最大水平主应力;
- (c) 渗透率与最小水平主应力; (d) 渗透率与平均应力

浅主采煤层最大水平主应力 6.42—41.86 MPa, 平均为 17.21 MPa; 最小水平主应力 3.30—26.40 MPa, 平均为 11.391 MPa. 因此, 沁水盆地现代地应力要高于美国黑勇士盆地的地应力值.

由于主应力差异性, 导致煤储层渗透性的各向异性特征明显, 其与地应力的比值有关. 在瑞典威尔斯马克地区地应力研究和水压致裂试验发现如下

关系^[13]:

$$\sigma_{hmax} / \sigma_{hmin} = 4.3 \quad (2)$$

$$K_{hmax} / K_{hmin} = 3.0 \quad (3)$$

式中: σ_{hmax} 为最大水平主应力 (MPa); σ_{hmin} 为最小水平主应力 (MPa); K_{hmax} 为沿最大水平主应力方向的渗透系数; K_{hmin} 为沿最小水平主应力方向的渗透系数.

沁水盆地南部煤储层两个水平主应力 σ_{hmax} 和 σ_{hmin} 之比 ($\sigma_{hmax} / \sigma_{hmin}$) 在 1.07—1.71 之间, 平均为 1.46. 由上式可以看出, 本区煤储层渗透性表现为沿最大水平主应力方向, 也就是沿北东方向煤储层渗透性高于沿最小水平主应力方向. 在煤层气地面开发井间距设计时, 应考虑由地应力各向异性导致的煤储层渗透性的各向异性特征. 简单地讲, 沿最大水平主应力方向的导流能力要大于沿最小水平主应力方向, 因此沿最大水平主应力方向的井间距要大于沿最小水平主应力方向的井间距.

3 煤储层渗透性与埋藏深度之间的关系

地应力随深度增加而明显增大, 其对渗透率的影响也反映了煤层埋藏深度对渗透率的影响, 煤储层渗透性与其埋藏深度之间的关系, 其实质是地应力对煤储层渗透率的控制.

试井渗透率统计资料表明(图 3): (1) 沁水盆地南部当煤层埋藏深度小于 650 m 时, 煤层渗透率分布范围为 $(0.015-5.71) \times 10^{-3} \mu m^2$, 平均 $1.07 \times 10^{-3} \mu m^2$ (图 3 中区域 I); (2) 而当煤层埋藏深度 650—1000 m 时, 煤层渗透率分布范围为 $(0.13-3.13) \times 10^{-3} \mu m^2$, 平均只有 $0.45 \times 10^{-3} \mu m^2$ (图 3 中区域 II); (3) 沁水盆地南部当煤

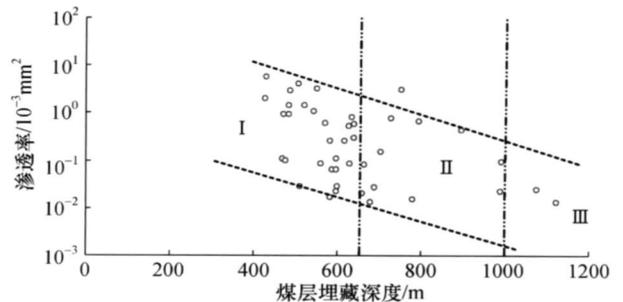


图 3 煤储层渗透性与其埋藏深度之间的关系

层埋藏深度大于 1000 m 时, 煤储层渗透率分布范围为 $(0.013-0.024) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $0.019 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 3 中区域 III). 这些反映随着煤层埋藏深度增大, 其渗透率降低, 说明沁水盆地周缘渗透率要高于盆地中心. 同时, 说明在浅部煤储层渗透率相对较高, 且变化范围也大; 而随着煤层埋藏深度的增大, 煤储层渗透率减低, 且变化范围也减小.

统计表明, 煤储层渗透性与其埋藏深度之间呈指数函数关系:

$$K = 11.642e^{-0.0061D} \quad (4)$$

式中 D 为煤层埋藏深度, 单位 m; 统计数 N 为 45; 相关系数 R 为 0.6.

随着煤层埋藏深度的增加, 煤储层压力也增高 (图 4), 其关系为:

$$P_0 = 0.0122D - 2.8886 \quad (5)$$

式中 D 为煤层埋藏深度, 单位 m; 统计数 N 为 45; 相关系数 R 为 0.88.

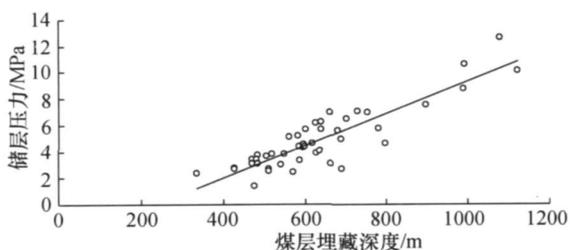


图 4 煤储层压力与深度之间关系图

煤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, 气含量和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. 但是当煤储层压力随煤层埋藏深度线性增大的同时, 煤储层渗透率按指数函数快速降低. 储层压力对渗透率的影响是通过有效应力的变化来影响煤储层渗透性, 其远小于埋深对渗透率的控制.

4 煤储层渗透性的控制机理分析

地应力对煤储层渗透性的影响, 其实质是通过

对煤储层的孔隙结构产生变形, 而使其渗透性发生变化. 煤作为储层, 具有天然裂隙发育、渗透率较低、吸附能力强等特征. 煤储层的孔隙结构是由基质孔隙和裂缝孔隙组成的双重孔隙系统. 煤储层的基质孔隙是植物遗体残片之间及其同矿物质堆积物之间的一种粒间孔隙^[15, 16], 煤层中割理的发育程度、面割理的走向、割理的宽度是控制煤储层渗透率的主要因素. 虽然基质孔隙也有一定的渗透性, 但因其孔径较小, 渗透率可视为零. 因此, 煤层的渗透率取决于割理系统的渗透率. 由于煤层基质渗透率远远小于煤层割理渗透率, 流体只在割理中流动, 测试所反映的渗透率为以割理渗透为主的综合渗透率.

4.1 煤储层割理面的压缩变形

当割理面法向力 σ_n 为压应力时, 割理产生法向压缩(压密)变形. 开始先为点或线接触, 经过挤压, 局部破碎或劈裂, 接触面增加. 割理面压缩量呈指数曲线特征^[17, 18], 其指数函数为:

$$x = b_0(1 - e^{-\frac{\sigma_n}{k_n}}) \quad (6)$$

式中 x 为割理面压缩量(cm); b_0 为割理初始张开度(cm); σ_n 法向压应力(MPa); k_n 为割理面法向刚度(MPa/cm), 实际上为法向变形曲线的斜率

$$\left(k_n = \frac{\partial \sigma_n}{\partial u_n} \right).$$

此时, 割理面的实际开度为 b :

$$b = b_0 - x = b_0 e^{-\frac{\sigma_n}{k_n}} \quad (7)$$

4.2 煤储层裂隙渗流模型

由于地质历史时期构造运动作用, 煤储层被大量的节理裂隙所切割, 这些裂隙虽杂乱无章, 但有一定的规律可循. 地质调查发现, 煤储层往往由几组平行的裂隙所切割. 所以, 可以将煤储层裂隙假设为平行、等间距、等隙宽的裂隙组进行理论研究. 煤储层的渗透率包括基质渗透率和裂缝渗透率. 由于煤层的基质孔隙太小, 其表面的吸附作用很大, 基质渗透率可忽略不计. 这样煤层气在煤体中的渗流, 其本质是煤层气在割理及其相互交错形

成的网络中的渗流. 采用这些假设后可得到一组平行裂隙的渗透率 K 表达式为^[19, 20]

$$K = c\beta \frac{b^3}{12D} \cos^2 \alpha \quad (8)$$

式中 K 为裂隙的渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$); b 为裂隙等效隙宽 (cm); D 为裂隙平均间距 (cm); α 为裂缝面与压力梯度轴的夹角 ($^\circ$); c 为与单位有关的系数; β 为裂隙网络的连通系数.

从式 (8) 中不难看出: 裂缝储层渗透率的大小与裂缝张开度的三次方成正比关系.

当应力发生变化时, 将引起 (8) 式中的隙宽 b 发生变化. 则应力变化后的渗透率 K_f 为:

$$K_f = c\beta \frac{b_0^3 \left(e^{\frac{\sigma_n}{k_n}}\right)^3}{12D} \cos^2 \alpha = K_0 e^{\frac{3\sigma_n}{k_n}} \quad (9)$$

式中 K_f 为煤储层在受地应力作用后的渗透率; K_0 为煤储层原始渗透率.

根据试井渗透率统计模型, 可以计算出沁水盆地南部主采煤层割理面法向刚度 $k_n = 11.88 - 17.41 \text{ MPa/cm}$; 平均为 13.82 MPa/cm .

由上可以看出, 煤储层渗透率随着割理面正应力的增加呈指数函数关系降低, 其理论模型方程 (9) 与试井渗透率统计模型方程 (1) 完全一致. 在地应力的作用下, 煤储层渗透率急剧下降, 裂缝逐渐趋于闭合. 这可解释随储层压力下降产量快速递减的原因; 另一方面, 从试井渗透率统计分析中还可以发现, 在地应力的作用下, 裂缝趋于闭合, 这就是煤储层为什么取心观测裂缝发育, 而产能不理想的原因. 因此, 现今地应力的增大对低渗透煤储层的渗透率有较大的影响. 从图中可以看出, 随着现今地应力的增大或有效应力的增大, 渗流空间减少, 渗透率下降. 在煤层气开发过程中, 随着储层压力下降, 有效压力增加, 煤储层渗透率下降. 对生产过程中地应力和储层压力变化过程的研究, 将有助于煤层气的合理开采, 减少煤储层伤害, 提高最终采收率.

5 结论

通过对沁水盆地南部 43 口煤层气井渗透率和

地应力统计分析, 建立了煤储层渗透性与现今地应力之间的相关关系和模型. 从煤储层的孔隙结构分析入手, 构造出煤储层割理面压缩变形与裂隙渗流模型, 分析地应力对煤储层渗透性影响的机理. 取得如下结论和认识:

(1) 沁水盆地南部煤储层试井渗透率与地应力具有相关性, 随着地应力的增加煤储层试井渗透率呈指数函数关系降低; 同时, 随着煤层埋藏深度增大, 地应力增大, 其渗透率降低, 煤储层渗透性与其埋藏深度之间的关系, 其实质是地应力对渗透率的控制.

(2) 在 650 m 以浅煤储层地应力状态主要表现为 $\sigma_v > \sigma_{h\max} > \sigma_{h\min}$, 最小水平主应力小于 12 MPa, 现今地应力状态处于伸张带, 煤储层渗透性相对较好, 煤储层试井渗透率平均大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 在 650—1000 m 煤储层地应力状态转化为 $\sigma_{h\max} \approx \sigma_v \approx \sigma_{h\min}$, 最小水平主应力为 12—20 MPa, 现今地应力状态由伸张带转化为压缩带的过渡带, 煤储层试井渗透率平均大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 在 1000—1500 m 煤储层地应力状态为 $\sigma_{h\max} \approx \sigma_v \approx \sigma_{h\min}$, 最小水平主应力大于 20 MPa, 现今地应力状态转化为压缩带, 煤储层试井渗透率平均大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$.

(3) 当割理面法向力 σ_n 为压应力时, 割理产生法向压缩 (压密) 变形, 开始先为点或线接触, 经过挤压, 局部破碎或劈裂, 接触面增加, 割理面压缩量呈指数曲线特征. 煤储层试井渗透率理论模型与试井渗透率统计模型) 完全一致. 在地应力的作用下, 煤储层渗透率急剧下降, 裂缝逐渐趋于闭合. 在煤层气开发过程中, 随着储层压力下降, 有效压力增加, 煤储层渗透率下降. 对生产过程中地应力和储层压力变化过程的研究, 将有助于煤层气的合理开采, 减少煤储层伤害, 提高最终采收率.

参 考 文 献

- 1 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水. 北京: 地质出版社, 1997, 56—72
- 2 Brace WF, Walsh JB, Frangos WT. Permeability of granite under high pressure. J Geophysical Research, 1968, 73(6): 2225—2236
- 3 Gangi AF. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1978, 15(3): 249—257

- 4 Walsh JB. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1981, 18(2): 429—435
- 5 Li SP, Li YS, Wu ZY. Permeability - strain equations corresponding to the complete stress-strain path of Yinzhuang sandstone. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1994, 31(4): 383—391
- 6 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发. 北京: 石油工业出版社, 1997, 1—27
- 7 张广洋, 胡耀华, 姜德义, 等. 煤的渗透性实验研究. *贵州工学院学报*, 1995, 24(4): 65—68
- 8 Enever JRE, Henning A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modeling. *Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium*, 1997, 13—22
- 9 McKee CR, Bumb AC, Koenig A. Stress dependent permeability and porosity of Coal. *Rocky Mountain Association of Geologists*, 1998, 143—153
- 10 唐书恒. 煤储层渗透性影响因素探讨. *中国煤田地质*, 2001, 13(1): 28—33
- 11 周创兵, 熊文林. 地应力对裂隙岩体渗透特性的影响. *地震学报*, 1997, 19(2): 154—163
- 12 孟召平. 不同成岩作用程度砂岩物理力学性质三轴试验研究. *岩土工程学报*, 2003, 25(2): 140—143
- 13 韩军, 张宏伟. 淮南矿区地应力场特征. *煤田地质与勘探*, 2009, 37(1): 17—21
- 14 孟召平, 彭苏萍. 焦作矿区二煤储层特征评价. *中国矿业大学学报*, 1998, 27(2): 162—166
- 15 王生维, 陈钟惠. 煤储层孔隙、裂隙系统研究进展. *地质科技情报*, 1995, 14(1): 53—59
- 16 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007, 73—88
- 17 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988, 43—67
- 18 孟召平, 陆鹏庆, 贺小黑. 沉积结构面及其对岩体力学性质的影响. *煤田地质与勘探*, 2009, 37(1): 33—37
- 19 吴元燕, 陈碧玉. 油矿地质学. 北京: 石油工业出版社, 1996, 170—179
- 20 连承波, 李汉林. 地应力对煤储层渗透性影响的机理研究. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(2): 30—32