

文章编号: 1001-1986(2005)02-0030-02

# 地应力对煤储层渗透性影响的机理研究

连承波, 李汉林 (石油大学地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 利用裂缝储层孔隙结构模型理论和弹性力学原理, 从微观角度对地应力影响煤储层渗透性的机理进行了研究, 得出了煤储层中地应力与渗透率的相关关系, 其结果与从宏观角度统计分析的结果相吻合, 进而在一定条件下揭示了地应力对煤储层渗透性影响的机理。

**关键词:** 地应力; 煤储层; 割理; 渗透率

**中图分类号:** P618.11    **文献标识码:** A

## Mechanism research about effect of in-situ stress on coalbed permeability

LIAN Cheng-bo, LI Han-lin

(School of Earth Resources and Information, Petroleum University, Dongying 257061, China)

**Abstract:** In the light of model about pore structure in crack reservoir and elastic dynamic principle, the study of mechanism about effect of in-situ stress on coalbed permeability, and the relationship between in-situ stress and coalbed permeability is derived. The conclusion of theoretical derivation is accordance with macro-statistic analysis results, and mechanism about effect of in-situ stress on coalbed permeability is discovered.

**Key words:** in-situ stress; coal reservoir; cleat; permeability

## 1 引言

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化, 由煤储层的原地应力减去储层流体压力所得到的有效地应力<sup>[1]</sup>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。国内外的大量统计资料表明, 煤储层的渗透性对地应力的变化非常敏感。煤储层属于低孔隙度、低渗透率的非常规储层, 在开采过程中渗透率降低速度快、程度大。因此, 有必要结合实验进行机理分析, 探讨煤储层渗透率随地应力变化的规律。

## 2 国内外学者的分析结果

国内外许多学者曾就地应力对煤样渗透性影响, 进行过实验测试和分析。他们发现, 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。张广洋等(1994)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<sup>[2]</sup>。Enever等(1997)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<sup>[3]</sup>。McKee等(1998)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<sup>[4]</sup>。何伟钢等(1999)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<sup>[5]</sup>。

## 3 地应力对煤储层渗透性影响机理分析

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。因此, 笔者从煤储层的孔隙结构分析入手, 构造出合理的煤储层假设模型, 进而对应力与应变的关系探讨, 结合渗透率与孔隙结构的关系, 分析地应力对煤储层影响的机理。

### 3.1 煤储层的孔隙结构分析

众所皆知, 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<sup>[6]</sup>, 其半径只有几 $\mu\text{m}$ , 再加上其表面的吸附作用使之几乎无渗透能力。煤储层中有许多裂

收稿日期: 2004-05-26

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(973项目)中国煤层气成藏机制及经济开发基础研究(2002CB11702)

作者简介: 连承波(1979—), 男, 山东荣成人, 石油大学(华东)地球资源与信息学院硕士生, 从事数学地质与油气地质研究

缝即割理, 将煤体切割成许多基质块体。煤中的割理密度一般很大, 这对煤储层是非常重要的, 因为它不仅提供了储集空间, 同时它相互交错可形成网络系统使基质孔隙相互连通, 大大提高煤储层的渗透性能。

### 3.2 模型的建立

通过分析煤储层的孔隙结构, 可以看出煤层中的割理系统决定了煤储层的渗透性能。由此可建立煤储层单元体积模型, 其具体特征如下:

a. 煤储层单元体积内具有  $N$  组割理面, 且割理间相互独立, 这些割理面的产状可用其平均倾角和平均倾向方位角表示。

b. 假设割理面的弹性常数为  $E$ (杨氏模量)、 $G$ (剪切模量)和  $\lambda$ (拉梅常数)。

c. 由于剪应力导致的法向变形比法向应力导致的变形小得多, 在分析割理面变形时, 可只考虑法向应力作用下割理面的法向变形, 变形标记采用压缩为正。

d. 可以认为单元体积范围内煤储层为均匀介质。

为了便于研究, 建立图 1 所示的坐标系统, 其中全局坐标系  $x, y, z$ , 局部坐标系  $x', y'$  和  $z'$  分别为割理面的最大倾斜方向、走向和外法线方向, 并固定于割理面上。

这样在单元体积内, 地应力在整体坐标系中的应力分量为:

$$\{\sigma\} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix};$$

地应力在第  $i$  组割理面内的应力分量为  $\{\sigma\}_i = \{\sigma'_x\}_i$ , 应力标记采用压应力为正, 拉应力为负。

### 3.3 地应力与煤储层孔隙结构变形关系的推导

由于割理的张开度与其延伸长度很小, 所以第  $i$  组割理面内的应力分量  $\{\sigma\}_i$  与全局坐标系下的应力分量  $\{\sigma\}$  的关系可表示为:

$$\{\sigma\}_i = [S]_i \{\sigma\}, \quad (1)$$

式中  $[S]_i$  为第  $i$  组割理面的应力转换矩阵, 它表示为:

$$S_i = \begin{bmatrix} \sin \alpha_i \sin^2 \beta_i & \sin^2 \alpha_i \cos^2 \beta_i & \cos^2 \alpha_i \\ \frac{1}{2} \sin \alpha_i \sin 2\beta_i & -\frac{1}{2} \sin \alpha_i \sin 2\beta_i & 0 \\ -\frac{1}{2} \sin 2\alpha_i \sin^2 \beta_i & -\frac{1}{2} \sin 2\alpha_i \cos^2 \beta_i & \frac{1}{2} \sin 2\alpha_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\alpha_i$  为第  $i$  组割理面的平均倾角;  $\beta_i$  为第  $i$  割理面的平均倾向方位角。

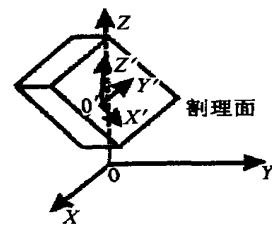


图 1 坐标系统

Fig. 1 Coordinate system

割理面的应力可以用一应力矢量来描述, 该应力矢量的法向分量为  $\sigma_n^{[8]}$ , 并有:

$$\sigma_n = \sigma_x'. \quad (3)$$

割理面在法向应力  $\sigma_n$  作用下, 其增量形式的弹性本构关系<sup>[9]</sup>可写为:

$$d\sigma_n = (\lambda + 2G)d\epsilon_n, \quad (4)$$

式中  $\epsilon_n$  为割理面法向应变。

设由  $\sigma_n$  产生的法向相对位移为  $x$ , 应变增量可由相对位移增量表示为:

$$d\epsilon_n = \frac{dx}{b-x}, \quad (5)$$

式中  $b$  为割理初始张开度。将式(5)代入式(4)并积分可得:

$$x = b \left[ 1 - e^{-\frac{\sigma_n}{\lambda+2G}} \right]. \quad (6)$$

此时, 割理的实际开度为  $b'$ :

$$b' = b - x = b e^{-\frac{\sigma_n}{\lambda+2G}}. \quad (7)$$

### 3.4 媒体的渗透与孔隙结构几何形状的关系分析

煤储层的渗透率包括基质渗透率和裂缝渗透率。但是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。这样煤层气在媒体中的渗流, 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。前人利用达西定律结合裂缝储层结构特征推导出裂缝式储层单组裂缝渗透率  $K_f$  表达式为<sup>[10]</sup>:

$$K_f = \frac{b^3}{12D} \cos^2 \alpha, \quad (8)$$

式中  $b$  为裂缝的平均宽度,  $D$  为裂缝的平均间距,  $\alpha$  为裂缝面与压力梯度轴的夹角。

从式(8)中不难看出: 裂缝储层的渗透率的大小与裂缝张开度的 3 次方成正比例关系。

将式(7)中的  $b'$  带入式(8)得:

$$K'_f = \frac{[b e^{-\frac{\sigma_n}{\lambda+2G}}]^3}{12D} \cos^2 \alpha = K_f e^{-\frac{3\sigma_n}{\lambda+2G}}, \quad (9)$$

式中  $K_f$  为煤储层原始渗透率;  $K'_f$  为煤储层在受地应力作用后的渗透率。

文章编号:1001-1986(2005)02-0032-03

# 废弃矿井煤层气储层描述

韩保山 (煤炭科学研究院西安分院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 综合研究和展示了废弃矿井煤层气储层特征及其空间分布规律和运移机理。参考煤层气储层描述技术, 研究了废弃矿井煤层气储层描述技术, 提出了废弃矿井煤层气储层描述的内容。

**关键词:** 废弃矿井; 煤层气; 储层描述

**中图分类号:** P618.11    **文献标识码:** A

## Reservoir characterization of abandoned mine methane (AMM)

HAN Bao-shan (Xi'an Branch of CCRI, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** By the study of storage and migration character about AMM, and based on the theory of coal geology, oil geology and the effect of mining, referred the methodology of oil and coalbed methane reservoir characterization, this paper researches and shows the reservoir character and its distribution regularities, and migration mechanism about AMM. Extended from the technology of coalbed methane reservoir characterization, this paper researches the technology of AMM reservoir characterization, and presents the content of AMM reservoir characterization.

**Key words:** abandoned coal mine; CBM; reservoir characterization

## 1 引言

由于在进行废弃矿井煤层气资源预测和产量预测过程中, 需要建立废弃矿井煤层气在储层中的解

吸、扩散和渗流的地质和数学模型, 这样就需要系统地对目标储层进行描述。在此基础上, 建立废弃矿井煤层气储层的地质模型, 称为储层描述技术。

由于废弃矿井煤层气储层(储集空间)受到采动

收稿日期: 2004-05-30

基金项目: “国家973计划‘中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究’项目”资助

作者简介: 韩保山(1973—), 男, 河南安阳人, 煤炭科学研究院西安分院工程师、硕士, 从事煤层气评价及开发研究。

由(9)式可以看出, 煤储层的渗透率的变化与有效应力的变化之间呈指数关系, 这一关系与国内外学者所分析的结果一致。

## 4 结论

通过建立合理的煤储层结构模型, 利用岩石力学原理与裂隙结构理论研究了地应力与煤储层渗透率之间的本构关系, 其结果与国内外学者分析所得的结论一致, 在一定条件下从理论上解释了地应力对煤储层渗透率影响的机理。

在煤层气的开采中应充分考虑地应力对煤储层渗透率的影响机理, 研究煤储层渗透率在开采过程中地应力变化及煤储层渗透率变化的规律, 提出合理的开采方案, 确保煤层气的安全、高效的开采, 以求最大的社会效益和经济效益。

## 参考文献

[1] 李志明, 张金珠等. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 1—27.

- [2] 张广洋, 胡耀华, 姜德义等. 煤的渗透性实验研究[J]. 贵州工学院学报, 1995, 24(4): 65—68.
- [3] Enever J R E, Henning A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modelling [A]. Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium[C]. 1997, 13—22.
- [4] McKee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress Dependent permeability and porosity of Coal [M]. Rocky Mountain Association of Geologists, 1998, 143—153.
- [5] 何伟钢, 唐书恒, 谢晓东. 地应力对煤层渗透性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2000, 19(4): 353—355.
- [6] 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[J], 1995, 14(1): 53—59.
- [7] 张胜利. 煤层割理及其在煤层气勘探开发中的意义[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(4): 27—31.
- [8] 周创兵, 熊文林. 地应力对裂隙岩体渗透特性的影响[J]. 地震学报, 1997, 19(2): 154—163.
- [9] 陶振宇, 潘别桐. 岩石力学原理与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 183—184.
- [10] 吴元燕, 陈碧玉. 油矿地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996, 170—179.