

# 水—煤层气两相流体在煤层中的渗流规律

张永利 邵英楼 王来贵

(辽宁工程技术大学工程力学研究所, 阜新 123000)

**摘要:** 采用煤体承受有效应力、水—气混合流动及固—流相互作用的基本原理, 建立了煤层气开采过程中水—煤层气两相渗流的基本方程; 通过自行设计的实验装置, 测定了煤层中水—煤层气共同流动时的两相流体的流量、渗透率及随水的饱和度变化关系, 并据此模拟出了反映水—煤层气渗透基本规律, 从而为煤层气开采提供了理论基础。

**关键词:** 煤层气; 渗流; 饱和度; 渗透率

**中图分类号:** TD315.3 **文献标识码:** A

## 1 前言

从20世纪70年代开始, 美国首先在地面打钻孔抽取煤层气, 以后引进常规油气钻孔开采方法和技术, 已经成功地将煤层气作为一种矿藏资源进行开采。到1992年底, 全美共有7000多口煤层气井, 年产量达 $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。前苏联、西欧、澳大利亚都相继采用钻孔方法进行煤层气开采试验。我国煤层气储量为 $(30 \sim 40) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。20世纪90年代以来, 开始引进美国技术分别在我国晋城、铁法等矿区试进行开采, 目前已打井超过30口, 但均未能形成稳定气流。

根据前人的实验研究, 煤层气主要吸附在煤颗粒表面, 空隙中主要是水。随着水的抽出压力降低, 煤层气解吸成为游离状态, 成为水—煤层气两相流; 而煤层气流动规律主要与水、煤层气在煤层中流动渗透率有关。因而对煤层气中水—煤层气两相流体的渗透规律进行研究是非常必要的。

## 2 基本方程的建立

### 2.1 假设条件

在煤层气的开采过程中, 假设: 煤层温度不变,

同时流体与煤体同温; 煤体处处均质连续, 流体和固体相互作用; 煤层气处于吸附或游离状态, 且不溶于水; 煤层气吸附规律符合Langmuir理论; 煤层气从孔隙、裂隙渗流到钻孔, 故不考虑煤层气的扩散效应。

### 2.2 有效应力原理

在煤体中, 水—煤层气两相渗流规律受到固体骨架变形和流体流动相互作用的影响, 固体变形受到有效应力 $\sigma_{ij}'$ 的控制。库克(Cook, 1960)提出了适用于大多数岩石类材料的有效应力原理, 即

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{ij}$  为外载作用下产生的应力;  $p$  为孔隙压力;  $\delta_{ij}$  为克罗内克尔(Kronecker)记号,  $\alpha$  为与岩石材料有关的系数, 无量纲, 且  $0 < \alpha < 1$ , 由实验确定, 且

$$\alpha = \frac{p_{ef}}{p} \quad (2)$$

式中,  $p_{ef}$  为等效孔隙压力。试验结果表明, 当孔隙压力  $p = 7.5 \text{ MPa}$  时, 等效孔隙压力系数  $\alpha$  达到0.2895为最大值。

### 2.3 煤岩固体变形应力场方程

煤岩体骨架的变形场方程包括平衡方程、几何方程、渗流本构方程组成。表征单元体处于平衡状

态。其力平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} | f_i = 0 \quad (3)$$

式中,  $f_i$  为体积力。根据有效应力原理方程(1)可得出用有效应力表示的平衡方程

$$\sigma_{ij}' | (\alpha p)_{ij} \delta_{ij} | f_i = 0 \quad (4)$$

根据煤岩体变形的连续性, 煤岩固体骨架发生小变形, 则几何方程为

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5)$$

式中,  $\epsilon_{ij}$  和  $u_i$  分别为应变和位移张量。在孔隙流体和地应力共同作用下, 煤岩体变形可处于塑性变形状态, 其本构方程的增量形式为

$$\{d\sigma_{ij}'\} = [D] \{d\epsilon_{ij}'\} \quad (6)$$

式中,  $[D]$  为弹塑性矩阵。屈服准则采用修正的 Drucker 准则, 其数学表达式

$$F = \beta I_1' + \sqrt{J_2'} - K \quad (7)$$

式中,  $I_1'$  为有效应力第一不变量,  $J_2'$  为有效偏应力第二不变量,  $\beta, K$  为修正的强度参数。

## 2.4 流体的渗流方程

渗流的本构方程符合推广的达西定律, 对于水

$$q_w = - \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \text{grad} p \quad (8)$$

对于煤层气

$$q_g = - \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \text{grad} p \quad (9)$$

式中, 下标  $w, g$  分别代表水、煤层气;  $q, \mu$  分别为流体的比流量和粘度系数;  $K$  为流体的有效渗透率;  $K_{rw}, K_{rg}$  分别为水、煤层气的相对渗透率。

煤层气为可压缩气体, 其状态方程为

$$\rho_g = \frac{p}{Z(RT)RT} \quad (10)$$

式中,  $\rho_g$  为煤层气的密度;  $Z(RT)$  为气体的压缩因子;  $T$  为绝对温度;  $R$  为气体常数。当按理想气体处理时,  $Z(RT) = 1$ 。渗透系数与应力状态及孔隙压力的关系式为

$$K = a \exp(-bI_1' - cp + p^2 + d) \quad (11)$$

式中,  $a, b, c, d$  为实验拟合系数。煤体骨架在有效应力作用下发生变形, 其孔隙度随有效应力的变化规律为

$$\text{div}(\rho_w q_w) + \frac{\partial(\rho_w n \xi_w)}{\partial t} + I_w - I_g = 0 \quad (12)$$

$$\text{div}(\rho_g q_g) + \frac{\partial(\rho_g n \xi_g)}{\partial t} + I_g = 0 \quad (13)$$

式中,  $I$  为源汇项。

## 3 渗透规律的测定

### 3.1 实验目的

其主要实验目的是: 研究不同饱和度(水)时, 水、煤层气相对渗透率; 研究水、煤层气相对渗透随饱和度变化时的规律和特点。

### 3.2 水—煤层气有效渗透率及相对渗透率

流体在介质中运移流动的能力称为流体在该介质中的渗透率。它的大小取决于多孔介质本身, 如颗粒大小、排列方式、孔隙等。当介质中含有多种不混溶流体时, 整个流体在介质中的流动能力称为绝对渗透率; 而有效渗透率为其中单一流体在介质中的流动能力。介质中所有流体的有效渗透率之和即为绝对渗透率。

水、煤层气混合流动时, 试件中单一流动时的绝对渗透率及液(水)相、气(煤层气)相各自的有效渗透率可采用下式来计算:

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (14)$$

式中,  $K$  为水或煤层气的绝对渗透率(DA);  $Q$  为水或煤层单位时间的流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ );  $\mu$  为水或煤层气的粘度系数( $\text{cPa} \cdot \text{s}$ );  $A$  为试件横截面积( $\text{cm}^2$ );  $\Delta P$  为试件承受的压力差(Pa)。

水—煤层气的相对渗透率可分别用下式来表示。

$$K_{rw} = \frac{K_w}{K}, K_{rg} = \frac{K_g}{K} \quad (15)$$

式中,  $K_{rw}, K_{rg}$  分别表示水和煤层气的相对渗透率;  $K_w, K_g$  分别表示水和煤层气的有效渗透率;  $K$  为流体的绝对渗透率。显然从理论上分析, 水、煤层气相对渗透率之和为 1, 即

$$K_w + K_g = \frac{K_w}{K} + \frac{K_g}{K} = \frac{K_w + K_g}{K} = \frac{K}{K} = 1 \quad (16)$$

但事实上, 实测的结果并不是简单的线性分配关系。

### 3.3 水—煤层气混合流动时的实验结果及规律

#### 3.3.1 实验结果

在一定的压力下, 水、煤层气混合流动时, 水与气的流量相对应。测试结果可用单位时间内的不同水流量对应的煤层气流量来描述, 测试结果显示, 水的流量降低的同时, 煤层气的流量在增加, 关系是非

线性的。

选取常温下水粘度系数  $\mu_w$  为  $1\text{ cPa}\cdot\text{s}$ , 气粘度系数  $\mu_0$  为  $0.01736\text{ cPa}\cdot\text{s}$ 。利用式(14)就可分别得到水和煤层气的有效渗透率。绝对渗透率是煤体或岩体的自身属性, 与流体的种类无关。在选取的 4 个试件中, 各试件的绝对渗透率就为单一流体流动的渗透率。在水、煤层气混合流动时, 如果煤层气的有效渗透率为零, 对应水的有效渗透率就为绝对渗透率, 因此, 可以得到试验中 4 个试件的绝对渗透率分别为  $0.0585, 0.0322, 0.0788, 0.0568\text{ Da}$ 。

在不同水的饱和度条件下, 水、煤层气相对渗透

率不同。各试件水—煤层气相对渗透率与饱和度间的关系如表 1 所示。在水、煤层气混合流动时, 水饱和度在一定范围内(实测为 25% 左右), 水对煤层气的影响较小, 此时水的渗透率很小, 变化率也较小; 煤层气的相对渗透率较大, 变化率却很小。随着水的饱和度增加, 水的相对渗透率迅速增加, 而同时煤层气的有效渗透率迅速下降, 等水的饱和度达到 85% 时, 水的相对渗透率下降, 煤层气受到空隙水的堵载, 相对渗透率迅速下降, 直至接近零。在水饱和度达到 90% 后, 煤层气几乎不流动。

表 1 试件中水、煤层气相对渗透率与饱和度的关系

Table 1 The relation of relative permeability and saturability of water and methane in samples								
试件 1	饱和度	100	87	53	46	41	32	30
	水	1.000 0	0.798 0	0.289 0	0.217 0	0.171 0	0.135 0	0.132 0
	煤层气	0.000 0	0.039 3	0.089 4	0.164 0	0.250 0	0.443 0	0.532 0
试件 2	饱和度	100	92	83	72	61	46	11
	水	1.000 0	0.776 0	0.314 1	0.310 0	0.220 1	0.112 0	0.068 2
	煤层气	0.000 0	0.040 4	0.078 0	0.081 0	0.082 0	0.298 0	0.531 1
试件 3	饱和度	100	92	83	72	61	46	11
	水	1.000 0	0.821 0	0.747 0	0.670 5	0.532 0	0.365 0	0.015 0
	煤层气	0.000 0	0.015 2	0.023 0	0.036 0	0.146 0	0.197 0	0.400 7
试件 4	饱和度	100	88	80	63	52	25	15
	水	1.000 0	0.853 0	0.818 0	0.522 1	0.483 0	0.084 2	0.067 3
	煤层气	0.000 0	0.015 0	0.031 6	0.052 3	0.063 4	0.211 0	0.402 2

3.3.2 水—煤层气混合流动时的渗透规律方程

为了从这些零散的实验结果中确定在此介质煤中气、水两相流动的规律, 采用数值曲线拟合方法对这些实验数据进行拟合。在拟合过程中, 试验多种拟合函数, 如指数函数、对数函数、多项式函数等, 从中选出最佳曲线。

根据实验结果中煤层气、水在不同饱和度时的相对渗透率拟合出它们与饱和度的关系式为

$$K_{rg} = c_1 \ln \xi_g + c_2 \tag{17}$$

$$K_{rw} = c_3 + c_4 \xi_w + c_5 \xi_w^2 + c_6 \xi_w^3 \tag{18}$$

式中,  $\xi$  为饱和度, 并有  $\xi_w + \xi_g = 1$ 。实测系数  $c_1、c_2、c_3、c_4、c_5、c_6$  分别为  $-0.002113、1.1007、-0.002113、-7.24538 \times 10^5、0.000217、1.23113 \times 10^6$ 。

4 结论

方程(1)~(18)组成了煤层气开采过程中的水

—煤层气两相渗流规律的基本方程组。该方程组可以通过数值模拟的方法进行求解, 从而得到煤层中水—煤层气两相渗流的基本流动规律, 为在煤层气开采过程中提高煤层气的采收率提供理论指导。

方程(17)和(18)是采用阜新王营子矿煤层中煤样通过试验得到的, 对于不同煤矿、不同煤层来说, 其变化规律是不同的, 需根据具体情况进行测定和模拟。

参考文献

[1] 章梦涛, 潘一山, 梁冰, 王来贵. 煤炭流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 5  
[2] 洪世铎. 油藏物理基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985. 7  
[3] Richardson. 煤层储气及煤层气运移的物理过程[J]. US Society of Petroleum Engineers, 1992, 12(4).

## THE SEEPAGE REGULARITY OF TWO- PHASE FLUID OF WATER- COAL GAS IN COAL SEAMS

ZHANG Yong-li Tai Ying-lou Wang Lai-gui Zhang Meng-tao

(Institute of Engineering Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract** The effective stress principle, water- methane mixture flow and solid- fluid interaction are used to set up the basic equations for water- methane two- phase seepage in this paper. Using the test device designed by us, the discharge, permeability and water saturability of the two- phase fluid when water- coal gas flowing together in coal seams are measured. Based on the data obtained, a mathematical model reflecting the basic law of water- coal gas seepage is established. The model is useful for coal gas exploitation.

**Key words:** methane; seepage; degree of saturation; permeability

**作者简介:** 张永利(1963— ),男。采矿工程专业博士,副教授。主要研究方向: 矿山冲击地压预测与防治,煤层气开采理论及实验方法,高压磨料射流理论及应用。

(上接第 62 页)

## THE DEFINITE PROBLEM AND WEIGHTED INTEGRAL EQUATION FOR COUPLED THERMO- HY- MECHANICAL IN THE FRACTURED ROCK MASS MEDIA SURROUNDING NUCLEAR WASTE REPOSITORIES

LIU Ya-chen CAI Yong-qing

(Zhangzhou Centre of Constructional Engineering Quality Supervision, Zhangzhou 363000, China)

**Abstract** On the basis of the definite equation of thermo- hydro- mechanical coupling in the fractured rock mass surrounding nuclear waste repositories, the boundary and initial conditions in the thermo- hydro- mechanical field are analyzed by the actual case histories. The weighted integral equations of the definite problem are deduced by using the weighted residual method of computing mechanics, which provides a theoretical basis for realizing the numerical computation of thermo- hydro- mechanical coupled FEM in the fractured rock mass media surrounding nuclear waste repositories.

**Key words:** nuclear waste repositories; coupled thermo- hydro- mechanical model; definite problem; weighted integral equation

**作者简介:** 刘亚晨(1965— ),男。2000 年 6 月在中国科学院武汉岩土力学研究所获工学博士学位,现就职于福建省漳州市建设工程质量监督站,并在中国科学技术大学做博士后。主要从事岩石的热物理特性、岩土渗流特性和基础工程中的力学问题研究。