

⑥ 29-34

双重孔隙可压密煤层瓦斯运移的数值模拟

罗新荣

(中国矿业大学采矿系, 徐州, 221008; 41岁, 男, 副教授)

TD 712.51

摘要 建立了双重孔隙、可压密煤层瓦斯运移方程和数值模拟方程, 通过计算机数值模拟解, 并运用相似理论, 得到了煤层瓦斯压力分布曲线和煤(孔)壁瓦斯涌出衰减曲线。

关键词 双重孔隙; 瓦斯运移; 数值模拟; 相似理论; 瓦斯涌出
中国图书资料分类法分类号 TD712.51

煤层 可压密煤层

0 引言

煤层一般由割理和割理切割的煤岩基块组成双重孔隙体系。基岩煤块中以微孔为主, 是瓦斯吸附的储存空间。由于煤块中的孔径很小, 煤块中的瓦斯运移相对于割理中的瓦斯运移要慢得多, 造成煤块中的瓦斯浓度、压力与割理中的瓦斯浓度及压力不平衡, 这种瓦斯浓度和压力的不平衡是煤块瓦斯运移的动力。而割理则是气体流动的主要通道。割理中的瓦斯在渗流作用下, 迅速流向煤壁, 煤块中的吸附瓦斯不断解吸扩散到割理系统。这样煤块中的吸附瓦斯对割理渗透系统来说是一个连续分布的瓦斯源。

G. R. King 等评述了数十种煤层瓦斯运移的数学模型^[1], 其中双重孔隙介质模型又分为吸附平衡态模型和非吸附平衡态模型。非吸附平衡态模型又根据煤块瓦斯运移的假定模式分为准稳定流和不稳定流模型。但双重孔隙介质模型对地应力和孔隙压力影响煤层瓦斯运移考虑不足或没有考虑。笔者给出了双重孔隙介质、可压密煤层瓦斯运移理论模型和数值模拟分析结果。

1 煤块瓦斯运移方程及理论解

非吸附平衡态准稳定流模型中的煤块瓦斯运移, 可采用集总参数分析方法, 将煤块视为一点, 该点集中了煤块质量及吸附瓦斯质量, 忽略煤块的尺寸。准稳定流煤块瓦斯运移方程及定解条件如下:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{\tau}(V - V_e); \quad V = V_0, \quad t = 0; \quad V = V_e, \quad t > 0, \quad x \in \Gamma \quad (1)$$

式中: V 为煤块内瓦斯的体积分数; V_0 为煤块内初始瓦斯的体积分数;

V_e 为煤块边界的瓦斯的体积分数; τ 为解吸时间, d; Γ 为煤块表面边界。

瓦斯的体积分数可用郎格缪尔方程表示:

• 收文日期 1998-02-25

国家自然科学基金(19232040)和江苏省自然科学基金资助项目

$$V = V_L \times p_m / (p_L + p_m), \quad V_e = V_L \times p / (p_L + p) \quad (2)$$

式中: V_L, p_L 为吸附常数; p_m, p 分别为煤块瓦斯和割理瓦斯压力, MPa, 其余同前。

采用分离变量法, 可直接得出式(1)的解析解: $V(t) = V_e + (V_0 - V_e)e^{-\frac{t}{\tau}}$ (3)

当 $t = \tau$, 并将方程(3)变形, 可得: $1 - \frac{V(\tau) - V_e}{V_0 - V_e} = 1 - \frac{1}{e} = 0.63$ (4)

式(4)的物理意义: 当煤块开始解吸瓦斯后, 达到解吸时间 τ 时, 约有 63% 的可解吸瓦斯被解吸到割理系统或解吸罐中(地面解吸试验)。解吸时间可由直接测定钻井煤芯瓦斯含量的解吸法或实验室的解吸试验来确定。美国煤层的解吸时间为数小时至数百天。

2 双重孔隙可压密煤层瓦斯运移方程

煤层瓦斯运移过程十分复杂, 因此须做近似假设: 1) 煤层割理系统渗透率和孔隙率的变化依赖于地应力的孔隙压力, 并将割理系统视作连续介质, 满足渗流力学方程; 2) 煤块瓦斯运移包括多种运移机制, 并视作准稳定流过程。因此, 将煤块视为包含煤块质量和吸附瓦斯质量的质点, 这些质点也是连续的, 构成割理系统的瓦斯源; 3) 煤层瓦斯运移为等温过程, 割理中的自由气体为理想气体; 4) 煤层为等厚度无限大平板或半平板。

由于地应力对煤层渗透率的影响巨大, 采用修正的达西公式^[2]:

$$q = -\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{b}{p}\right) (F - p)^{-C} \nabla p, \quad k = k_c \left(1 + \frac{b}{p}\right) (F - p)^{-C} \quad (5)$$

式中: q ——比流量; k_c ——表现渗透率; k ——煤层渗透率; F ——地应力; C ——应力系数; b ——克林伯格系数; p ——瓦斯压力; ∇ ——梯度算符; μ ——瓦斯动力粘度。

Carman-Korzeny(1960) 利用毛细管模型得到了渗透率 k 与孔隙率 n 的关系式, 根据文献[2], 可以得到孔隙率与有效应力的关系式: $n = n_c (F - p)^{\frac{2}{3}}$ (6)

式中: n 为孔隙率; n_c 为实验常数; 其余同前。

根据质量守恒定律, 可得割理系统的渗流力学方程和煤块瓦斯运移方程:

$$\nabla \left(\frac{k}{2B\mu} \nabla p \right) = n \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} (V - V_e) \quad (8a)$$

$$\text{方程(8a)为一线性常微分方程, 其解为 } V = \frac{1}{\tau} \int_0^t \exp\left(-\frac{t-x}{\tau}\right) V_e(x) dx + V_0 \quad (8b)$$

由上两式, 可得下列关系式:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \left\{ \int_0^t \exp\left(-\frac{t-x}{\tau}\right) \frac{\partial V_e}{\partial x} dx - V_0 \right\} = -\frac{1}{\tau} (V_e - V) \quad (8c)$$

将上式代入(7)式, 整理得:

$$\nabla \left(\frac{k}{2B\mu} \nabla p \right) = n \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\tau} \int_0^t \exp\left(-\frac{t-x}{\tau}\right) \frac{V_L p_L}{(p_L + p)^3} \frac{\partial p}{\partial x} dx - \frac{V_0}{\tau} \quad (9)$$

方程式(9)为含有积分项的二阶偏微分方程, 无论是解析解还是数字解都十分困难。必须另寻途径。

3 双重孔隙可压密煤层瓦斯单向运移方程及数值模拟分析

采掘工作面煤体受采动影响, 煤层应力是基本给定的, 煤层瓦斯近似单向运移过程, 由

式(7)可得:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{2\lambda}{n} \left\{ (p+b)(F-p)^{-c} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + [(F-p)^{-c} + C(p+b)(F-p)^{-c-1}] \right. \\ \left. \times \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 - C(p+b)(F-p)^{-c-1} \frac{dF}{dx} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} - \frac{1}{n} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (10)$$

式中: $\lambda = \frac{k}{2B\mu}$, 其余同前。边界条件和初始条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_1, x = 0; p = p_0, x \geq L; p = p_0, x > 0, t = 0; \\ V = V_1 = \frac{V_L \times p_1}{p_L + p_1}, x = 0; V = V_0 = \frac{V_L \times p_0}{p_L + p_0}, x \geq L \\ V = V_0 = \frac{V_L \times p_1}{p_L + p_1}, x > 0, t = 0 \end{array} \right. \quad (11)$$

应力条件:

$$F(x) = \left\{ \begin{array}{l} 2.5\gamma H \frac{x}{x_0}, x \leq x_0 \\ \gamma H \left[2.5 - 1.5 \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right) \right], x_0 < x < 2x_0 \\ \gamma H, x \geq 2x_0 \end{array} \right. \quad (12)$$

式(10)~(12)构成双重孔隙可压密煤层瓦斯单向运移方程的定解问题, 只能用数值方法解析。对式(10)应用六点隐式差分格式, 有:

$$p(k, j+1) = p(k, j) - \frac{\Delta x_j}{n_c F_{p1}^{333}} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{(k,j+1)} + \frac{R}{F_{p1}^{333}} \times \\ \left\{ F_{p1}(P_M + b)(P_{M1} - 2P_M + P_{M0}) + [F_{p1} + C(P_M + b)F_{p2}] \right. \\ \left. \times (P_{M1} - P_{M0})^2/4 - \frac{hC}{2}(P_M + b)(P_{M1} - P_{M0})F_{p2} \left(\frac{dF}{dx} \right)_{(k)} \right\} \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{(k,j+1)} = \frac{1}{\tau} [V_e(k, j+1) - V(k, j)] \exp \left(-\frac{\Delta x_j}{\tau} \right) \quad (14a)$$

$$V(k, j+1) = V_e(k, j+1) + [V(k, j) - V_e(k, j+1)] \exp \left(-\frac{\Delta x_j}{\tau} \right) \quad (14b)$$

$$V_e(k, j+1) = V_L \times p(k, j+1) / [p_L + p(k, j+1)] \quad (14c)$$

$$V(k, j+1) = V_L \times p_m(k, j+1) / [p_L + p_m(k, j+1)] \quad (14c)$$

$$p_m = p_L \times V(k, j+1) / [V_L - V(k, j+1)] \quad (14d)$$

将式(14a)~(14c)代入式(13), 并整理得:

$$p(k, j+1) = p(k, j) - \frac{RE}{F_{p1}^{333}} [V_e(k, j+1) - V(k, j)] + \frac{R}{F_{p1}^{333}} \times \\ \left\{ F_{p1}(P_M + b)(P_{M1} - 2P_M + P_{M0}) + [F_{p1} + C(P_M + b)F_{p2}] \right. \\ \left. \times (P_{M1} - P_{M0})^2/4 - \frac{hC}{2}(P_M + b)(P_{M1} - P_{M0})F_{p2} \left(\frac{dF}{dx} \right)_{(k)} \right\} \quad (15)$$

式中 $R = \frac{2\lambda\Delta x_j}{n_c t^2}$, $RE = \frac{\Delta x_j}{n_c \exp \left(\frac{\Delta x_j}{\tau} \right)}$, $k = 0, 1, \dots, M; j = 0, 1, \dots, N$;

$$P_{M1} = \frac{1}{2} [p(k+1, j+1) + p(k+1, j)]; \quad P_M = \frac{1}{2} [p(k, j+1) + p(k, j)];$$

$$P_{M0} = \frac{1}{2} [p(k-1, j+1) + p(k-1, j)]; \quad F_{P1} = (F - P_M)^{-C}; \quad F_{P2} = (F - P_M)^{-C-1}.$$

式(15)是一组二阶非线性方程组,采用高斯-赛得尔迭代法求解,解题步骤:1)由初始条件 $j=0$,解出 $p(k, j+1)$;2)将 $p(k, j+1)$ 代入(14c),解出 $V_e(k, j+1)$;3)将 $V_e(k, j+1)$ 代入(14b),解出 $V(k, j+1)$;并由式(14d),解出 $p_m(k, j+1)$;4)将 $V_e(k, j+1)$ 代入(15),进行第二次迭代 $j=1$,求出 $p(k, j+1)$;5)重复2)~4)步骤,直至达到解题要求为止。

为了比较地应力和解吸时间在煤层瓦斯运移中的作用大小,选择了四组数据,其中第一组数据为均质煤层瓦斯参数($b=0, C=0$),其余三组可压密煤层($b=0.15 \text{ MPa}, C=0.5, x_0=10 \text{ m}$)的解吸时间分别为1, 10, 100 d. 运用计算机进行数值模拟解,得到某一特定条件下的数值结果,运用相似理论进行数据处理,得到相似准则方程式,则可以将其应用于同类物理现象。四个相似准则数为:

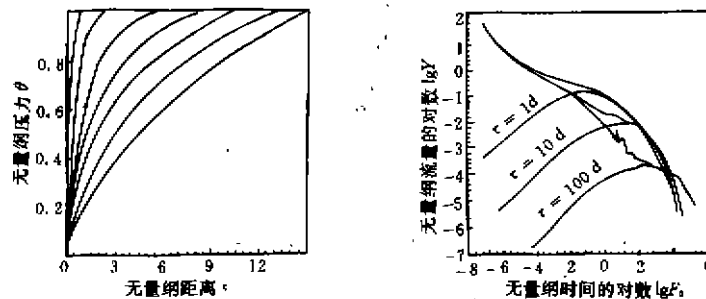
$$Y = \frac{q_B L_0}{\lambda_0 (p_0^* - p)}, \quad F_0 = \frac{4\lambda_0 p_0^* t}{W_0 L_0^2}, \quad \theta = \frac{p - p_0}{p_0 - p_1}, \quad S = \frac{X}{L_0}$$

式中: Y ——流量准则数; F_0 ——时间准则数; θ ——压力准则数; S ——距离准则数;

$\lambda_0 = \frac{k_c}{2\mu B} (F_0 - p_0)^{-C}$ ——原始透气性系数, $\text{m}^2/\text{MPa}^2\text{d}$; $L_0 = 10 \text{ m}$ ——流场特征长度;

W_0 为原始瓦斯含量 $W_0 = \frac{V_L \times p_0}{p_L + p_0}$; $q_B = \frac{p}{B} q$; B 为大气压力。其余同前。

数值模拟结果的压力分布和流量衰减曲线见图1,从图中可以看到解吸时间控制吸附瓦斯的涌出。



(a)煤层瓦斯压力分布曲线

(b)煤壁瓦斯涌出衰减曲线

图1 煤层瓦斯单向运移的无量纲压力分布曲线与涌出衰减曲线

4 双重孔隙可压密煤层瓦斯径向运移方程及数值模拟分析

地面钻井和井下穿层钻孔抽放煤层瓦斯近似于瓦斯径向运移过程。煤层顶底板近似刚性,可视为给定变形状态。由方程式(7)可得:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{n} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{2\lambda}{n} \left\{ (p+b)(\sigma_0 \sqrt{p} + \sigma_c)^{-C} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \left[(\sigma_0 \sqrt{p} + \sigma_c)^{-C} - \frac{C\sigma_0}{2\sqrt{p}} (\sigma_0 \sqrt{p} + \sigma_c)^{-C-1} \right] \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

边界条件和初始条件为

$$\begin{cases} p = p_1, r = r_w; p = p_0, r \geq L; p = p_0, r > r_w, t = 0; \\ V = V_1 = \frac{V_L \times p_1}{p_L + p_1}, r = r_w; V = V_0 = \frac{V_L \times p_0}{p_L + p_0}, r \geq L; \\ V = V_0 = \frac{V_L \times p_0}{p_L + p_0}, r > r_w, t = 0 \end{cases} \quad (17)$$

应力条件:

$$\begin{aligned} F - p &= \sigma_r(p) + \sigma_c = \sigma_0 \sqrt{p} + \sigma_c \\ \sigma_0 &= (\gamma H - p_0 - \sigma_c) / \sqrt{p_0} \end{aligned} \quad (18)$$

式(16)~(18)构成双重孔隙可压密煤层瓦斯径向运移方程的定解问题,只能用数值方法解析。对式(16)应用六点隐式差分格式,有:

$$\begin{aligned} p(k, j+1) &= p(k, j) - \frac{\Delta t_j}{n_c F_{p1}^{333}} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{(k, j+1)} + \frac{R}{F_{p1}^{333}} \times \\ &\left\{ F_{p1} (P_M + b) \left((P_{M1} - 2P_M + P_{M0}) + \frac{P_{M1} - P_{M0}}{2T_k} \right) \right. \\ &\left. + \left[F_{p1} - \frac{C\sigma_0}{2\sqrt{P_M}} F_{p2} \right] \times (P_{M1} - P_{M0})^2 / 4 \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

将式(14a)~(14c)代入式(19),并整理得:

$$\begin{aligned} p(k, j+1) &= p(k, j) - \frac{RE}{F_{p1}^{333}} [V_e(k, j+1) - V_e(k, j)] \\ &+ \frac{R}{F_{p1}^{333}} \times \left\{ F_{p1} (P_M + b) \left(P_{M1} - 2P_M + P_{M0} + \frac{P_{M1} - P_{M0}}{2T_k} \right) \right. \\ &\left. + \left[F_{p1} - \frac{C\sigma_0}{2\sqrt{P_M}} F_{p2} \right] (P_{M1} - P_{M0})^2 / 4 \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $F_{p1} = (F - P_M)^{-c} = (\sigma_0 \sqrt{P_M} + \sigma_c)^{-c}$; $F_{p2} = (\sigma_0 \sqrt{P_M} + \sigma_c)^{-c-1}$; 其余同前。

式(20)是一组二阶非线性方程组,采用高斯-赛得尔迭代法求解。解题步骤同前。为了比较地应力和解吸时间在煤层瓦斯运移中的作用大小,选择了四组数据,其中第一组数据为均质煤层瓦斯参数($b=0, C=0$) 其余三组可压密煤层($b=0.15 \text{ MPa}, c=0.5, x_0=10 \text{ m}$) 的解吸时间分别为1, 10, 100 d。运用计算机进行数值模拟解,得到某一特定条件下的数值结果。运用相似理论进行数据处理,得到相似准则方程,则可以将其应用于同类物理现象。四个相似准则数:

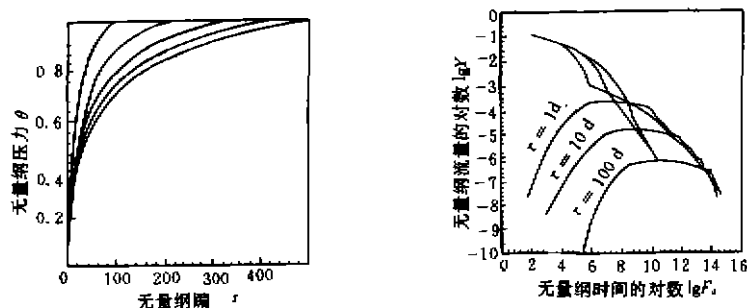
$$Y = \frac{q_B r_w}{\lambda_0 (p_0^2 - p_1^2)}, \quad F_0 = \frac{4\lambda_0 p_0^2}{W_0 T_w^2}, \quad \theta = \frac{p - p_1}{p_0 - p_1}, \quad S = \frac{r}{r_w}$$

式中: r_w 为钻孔(井)半径; 其余同前。

数值模拟结果的压力分布和流理衰减曲线见图2。从图中可以看到: 三组双重孔隙可压密煤层钻孔瓦斯流量的无量纲衰减曲线形态基本相同,与双重孔隙煤层($b=0, c=0$) 钻孔瓦斯的无量纲衰减曲线形态也基本相同。解吸时间控制吸附瓦斯的涌出。

6 结 论

1) 非吸附平衡态准稳定流模型可用于煤块和煤层瓦斯运移过程。解吸法可确定煤层的



(a) 煤层井孔瓦斯压力分布曲线

(b) 煤层井孔瓦斯涌出衰减曲线

图2 双重孔隙煤层瓦斯径向运移的压力分布与瓦斯涌出衰减曲线

解吸时间;

2) 建立了双重孔隙、可压密煤层瓦斯运移方程和数值模拟方程,开发了数值模拟分析软件;

3) 运用相似理论,分析了煤层瓦斯压力分布的无量纲曲线和煤(孔)壁瓦斯涌出衰减的无量纲曲线,解吸时间控制吸附瓦斯的涌出速度。

参 考 文 献

- 1 King G R; Ertekin T M. A Survey of Mathematical Models Related to Methane Production from Coal Seams. In: Proceedings of the 1989 Coalbed Methane Symposium. Tuscaloosa, Alabama USA, the University of Alabama, 1989, 17~29, 125~155
- 2 Luo Xinrong, Yu Qixiang. Physical Simulation and Analysis of Methane Transport in Coal Seam. Journal of China University of Mining & Technology, 1994(7): 24~31

Study on Transport Equation and Numeric Simulation Equation of Gas Migration in Compressible Coal-seam with Dual-pore

Luo Xinrong

(Department of Mining Engineering, China University of Mining & Technology)

ABSTRACT The transport equation and numeric simulation equation of gas migration in compressible coal-seam with dual-pore have been built-up. The distribution curves of gas pressure in coal-seam and the attenuation curves of coal or drilling hole wall have been obtained according to solution of numeric simulation and similar theory.

KEYWORDS dual-pore; gas migration; numeric simulation; similar theory; gas emission

(责任编辑 刘尚坤)