

煤层注水非线性渗流方程的解析解及应用

张 延 松

(煤炭科学研究总院重庆分院, 重庆 630037)

(钱伟长推荐, 1994年1月26日收到)

摘 要

本文运用流体力学, 多孔介质流体动力学, 渗流理论等理论知识, 结合实验室和现场试验, 从理论上对煤层注水预湿煤体机理进行了研究。分析了煤层注水过程, 建立起了煤层注水的数学模型; 对煤层注水的边界条件进行了描述。由于描述煤层注水的方程组为非线性的, 为简化它们, 利用了因次分析理论, 引入了注水压力, 渗透速度, 煤水份增加量等无量纲量。之后讨论了其解析和近似解。另外, 结合实际煤层注水的科研项目, 说明了该理论指导煤层注水及设计的作用和重要性。

关键词 煤层注水 渗透 渗流方程 注水理论 注水防尘

随着煤炭开采技术的不断发展, 煤产量日益增大, 煤矿安全问题则越来越突出, 而煤层注水能预防、减少甚至杜绝许多重大灾害事故, 确保安全生产。象煤层注水防突, 预防冲击地压, 坚硬顶板软化, 放顶煤采煤软化顶煤等。而现在应用最多的是煤层注水预湿煤体减少粉尘产生量, 《煤矿安全规程》规定, 机械化采煤工作面应采取煤层注水, 而综采工作面必须采用煤层注水。它是改善煤矿生产环境, 减少尘肺危害及瓦斯、煤尘爆炸事故最根本的措施。现有的国内外煤层注水理论, 把防突、水力压裂、注水防尘等搞成统一的包络万象的模式; 但实际上, 煤层注水应用的目的不同, 其边界条件, 甚至在煤层中的流动规律都不一样, 千篇一律必然导致理论与实际的脱离, 使理论失去其应有的价值。本文描述的煤层注水理论, 主要是针对在煤体原始应力区, 巷道动压注水用于防尘之目的来分析的。实践证明, 理论上的分析与计算, 不仅能帮助搞清楚注水湿润煤体的机理, 解释煤层注水中碰到的一些疑难现象, 并能指导实际煤层注水及设计, 使煤层注水达到更好的效果。

一、煤层注水过程分析及数学模型的建立

煤层注水防尘, 是通过钻孔并利用水的压力将水注入即将回采的煤层中, 注入煤层中的水, 沿着煤的裂隙并通过孔隙向被裂隙切割的煤块内部渗透并储存于裂隙与孔隙之中。增加煤的水分, 使煤体得到预先湿润, 降低煤体产生浮游粉尘的能力。水在煤层中运动的动力是水的压力、煤的孔隙对水的毛细管力及水的重力; 阻碍水运动的阻力是裂隙面阻力、孔隙的管道阻力及瓦斯压力。因此影响水在煤层中渗透的因素主要是煤的裂隙和孔隙的状态, 以及与其有关的其他因素。煤层注水分为动压注水和静压注水, 但其整个渗透湿润过程是一样

的。在矿山压力影响前，从回风巷用高压水泵向煤层进行动压注水，是现在应用最广的一种形式。煤层注水防尘的目的是增加煤体水份，减少采煤时的粉尘产生量。因此，它要求煤层不仅有较好的渗透特性，而且要有较好的储水性能。如果渗透性较好，而储水性能差，注入煤层中的水会跑掉（从巷道或顶底板渗出），起不到增加水份的目的，同样只有好的储水性，渗透性差，水无法充分湿润整个煤体，效果也不好。若注水后，水能在煤层中很好地渗透并储于煤体中，根据质量守恒定律，煤层中水份的增长量与水在煤层中渗透的速度之间的关系为

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = -\partial \Delta W / \partial t \quad (1.1)$$

由于煤层中的初始水份 W_0 是一常数，不随时间变化；而 $\Delta W = W - W_0$ ，故有

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = -\partial W / \partial t = -\partial \Delta W / \partial t \quad (1.2)$$

式中 \mathbf{V} 为水在煤体中的渗流速度； t 为渗透时间； W_0 为煤体中的原始水份；

W 为煤体注水时的水份； ΔW 为煤体中水份增量。

煤层注水湿润煤体过程，实际上是高压水在煤体中沟通的大裂隙中渗透，包围一小块煤并向更小孔隙扩展的过程，为了简化，可近似认为某时刻被分割煤块状态，由煤块边界液体的压力（即裂隙中水压），和煤块吸取水量（某点平均水份增量）的函数来决定。通过分析，可将煤块的渗透速度表示为：

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = \alpha(P - P_1) \quad (1.3)$$

式中 P 为裂隙中液体压力； P_1 为被包围煤块的平均压力； α 为确定煤块边界渗透性的系数。

因此，煤块的平均压力，应为裂隙中液体压力和水份增量的函数

$$P_1 = \Omega(P, \Delta W) \quad (1.4)$$

为使描述水在煤体中渗透质量守恒方程封闭，还必须建立水在裂隙中的渗透方程，即广义达西定律

$$\mathbf{V} = -(k_0 + k_1 P) \operatorname{grad} P \quad (1.5)$$

式中 $(k_0 + k_1 P)$ 为具有渗透系数的意义和单位； k_0 为渗透率。

实际上，水在较大裂隙的运动可以看作为一维渗透，故有以下几式

$$\partial V / \partial x = -\partial \Delta W / \partial t, \quad V = -(k_0 + k_1 P) \partial P / \partial t, \quad (1.6 \sim 1.7)$$

$$\partial \Delta W / \partial t = \alpha(P - P_1) P_1 = \Omega(P, \Delta W) \quad (1.8 \sim 1.9)$$

x 是距注水钻孔的距离，当 $x=0$ 时， $P=P_E$ 即等于注水有效压力。由于注水防尘大多是超前于矿山压力，在原始应力区注水，因此用 k 取代 $(k_0 + k_1 P)$ ，即系数是 P_E 的函数

$$k = k(P_E) \quad (1.10)$$

二、无因次量的引入与分析

为解上述方程组，我们引入以下无因次量。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \sqrt{\alpha/k} \cdot x; \quad \sigma = (\alpha P_E / \Delta W_{\max}) \cdot t \\ p &= P / P_E; \quad W = \Delta W / \Delta W_{\max} \\ p_1 &= P_1 / P_E = \Phi(P, W); \quad v = V / \sqrt{\alpha \cdot k} \cdot P_E \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

其中 ΔW_{\max} 是煤体中水份的最大增量，当煤体注水后，就能达到该值；其值与煤体的性质和其中气体的饱和程度有关，对于煤 α 为常数，其中 α ， k ， ΔW_{\max} ，及 $\beta = \alpha P_E / \Delta W_{\max}$

称之为煤体的水力参数，引入上述无因次量，上述方程组变为

$$\partial v / \partial \eta = -\partial w / \partial \sigma; v = -\partial p / \partial \eta; \partial w / \partial \sigma = p - p_1; p_1 = \Phi(p, w) \quad (2.2) \sim (2.5)$$

将 V 代入后整理得

$$\partial w / \partial \sigma = p - p_1, p_1 = \Phi(p, w), \partial w / \partial \sigma = \partial^2 p / \partial \eta^2 \quad (2.6) \sim (2.8)$$

三、边界条件分析

对于从回采工作面顺槽沿煤层层理方向注水的情况，水在煤层中的渗流，可近似认为对钻孔是对称的。并且，首先是钻孔附近的煤体水份增加，然后沿煤层层理向更远煤体处渗透，并使水份增加，增量的最大值接近于 Δw_{max} ， w 值接近于1。这时由于高压注水（可忽略水重力的影响），有效裂隙中的渗流水的压力 p_1 应接近钻孔中的水压力 p_B 值表示如下

$$w = 0 (\text{当 } \sigma = 0); p = 1 (\text{当 } \eta = 0); \Phi(p, 0) = 0; \Phi(p, 1) = p \quad (3.1) \sim (3.4)$$

为了在上述边界条件下解上述方程组，首先需确定函数 $\Phi(p, w)$ 。现在来分析该函数的特点。当自变量 w 由0变到1时， p_1 就由0变至 p ，且接近1。这是因为煤体裂隙中水的压力经过一定时间注水应接近钻孔中的水压。另外，煤体裂隙中有一部分游离瓦斯，由于注水的作用，将其封闭在煤体的裂隙中，被封闭在裂隙中瓦斯的压力与煤体中水份增量是成反比例的。随着水压力的增加，封闭在煤体内部分游离瓦斯变为吸附瓦斯，达成新的压力平衡，这就影响煤体吸收水份，因此，随着 w 的增加， p 的增加就更加缓慢。近似地将 $\Phi(p, w)$ 看成各个自变量的线性函数。

$$\Phi(p, w) = ap + bpw + cw \quad (3.5)$$

由边界条件(3.3)、(3.4)得

$$\Phi = pw \quad (3.6)$$

把(2.7)式代入(2.6)和(2.8)并将 $\Phi = pw$ 代入后得

$$\partial w / \partial \sigma = p(1 - w), \partial w / \partial \sigma = \partial^2 p / \partial \eta^2 \quad (3.7) \sim (3.8)$$

注水时的原始条件为

$$w(\eta, 0) = 0 \quad (3.9)$$

再由式(3.7)和(3.2)得下式并在该条件下求解。

$$w(0, \sigma) = 1 - \exp[-\sigma] \quad (3.10)$$

另外根据 W ， η 的物理意义，有下式成立

$$\lim_{\eta \rightarrow \infty} w = \lim_{\eta \rightarrow \infty} \partial w / \partial \eta = \lim_{\eta \rightarrow \infty} \partial^2 w / \partial \eta^2 = \dots \quad (3.11)$$

由方程(3.7)将式(3.7)~(3.11)的解作为

$$w = 1 - \exp[-s] \quad (3.12)$$

式中 s 是 η, σ 的新未知函数，并有下例方程成立

$$\partial s / \partial \sigma = p; \exp[-s] \partial s / \partial \sigma = \partial^2 p / \partial \eta^2 \quad (3.13) \sim (3.14)$$

及条件 $s(\eta, 0) = 0; s(0, \sigma) = \sigma \quad (3.15) \sim (3.16)$

$$\lim_{\eta \rightarrow \infty} s(\eta, \sigma) = \lim_{\eta \rightarrow \infty} \partial s / \partial \eta = \lim_{\eta \rightarrow \infty} \partial^2 s / \partial \eta^2 = \dots \quad (3.17)$$

四、方程组的求解

对于薄煤层和中厚煤层, 由于煤层的厚度比钻孔间距来说是很小的, 因此在这种情况下, 分析垂直于工作面而平行于顺槽方向的单维渗透具有很重要的实际意义。

1. 方程组的解析解

为了得到解析解, 需将方程(3.13)和(3.14)进行简化. 为此略去 p 的高阶微量, σ 在 $0 \sim \sigma$ 范围内求等式的积分, 并考虑到 $\partial^2 s / \partial \eta^2 |_{\sigma=0} = 0$ 时的关于 s 的常微分方程。

$$\frac{d^2 s}{d\eta^2} = 1 - \exp[-s] \quad (4.1)$$

把 σ 作为变量代入上式, 可求得其初积分

$$\frac{1}{2} \left(\frac{ds}{d\eta} \right)^2 = s + \exp[-s] - \sigma - \exp[-\sigma] + f(\sigma) \quad (4.2)$$

式中 $f(\sigma)$ 是 σ 的任意函数. 有条件

$$f(\sigma) = \exp[-\sigma] + \sigma - 1 \quad (4.3)$$

$$\frac{ds}{d\eta} = -\sqrt{2(s + \exp[-s] - 1)} \quad (4.4)$$

式中负号是因为 $s(\eta, \sigma)$ 是 η 的递减函数, 对(4.4)式积分得

$$\eta = -\frac{1}{\sqrt{2}} \int_s^\sigma \frac{ds}{\exp[-s] + s - 1} \quad (4.5)$$

由式(3.12)和(4.5)就可以确定

$$w = w(\eta, \sigma) \quad (4.6)$$

由式(2.1)得

$$\Delta w = \Delta w_{\max} \cdot w(\sqrt{\partial x/k}, \beta t) \quad (4.7)$$

这样根据煤层的水力参数 Δw_{\max} , α , k , β 就可解出分析条件下的水份增量. 由式(4.7)还可求出单位面积的耗水量。

$$Q_0 = \int_0^\infty \Delta w(x, t) dx = \Delta w_{\max} \sqrt{k/\alpha} \int_0^\infty w(\eta, \sigma) d\eta = \Delta w_{\max} \sqrt{k/\alpha} \cdot U(\sigma) \quad (4.8)$$

$$\text{式中 } U(\sigma) = \int_0^\infty w(\eta, \sigma) d\eta = \int_\sigma^0 (1 - \exp[-s]) \frac{\partial \eta}{\partial s} ds$$

$$= \sqrt{2} \cdot \sqrt{\sigma + \exp[-\sigma] - 1} \quad (4.9)$$

由式(2.1)和式(4.8)得出

$$Q_0 = \Delta w_{\max} \sqrt{k/\alpha} U(\beta t) \quad (4.10)$$

式中 $U(\beta t)$ 由式(4.9)确定。

2. 方程的近似解

通过对方程(3.7)和(3.8)进行分析简化, 并用付氏变换和拉普拉斯变换, 也能够求出 $w(\eta, \sigma)$ 函数, 我们利用计算机计算的结果, 在 $\sigma < 2$, $\eta < 5$ 的条件下, 与式(3.12)和式(4.5)求出的 $W(\eta, \sigma)$ 函数误差 $< 7\%$ 。

五、算 例

在中国统配煤矿总公司重点项目《缓倾斜中厚煤层综采工作面综合防尘的研究》中有一项为煤层注水。结合该实例，我们详细讨论了该理论计算在实际煤层注水中的应用及正确性。

1. 煤层注水的原始条件

该项目的工业性试验是在松藻矿务局打通一矿进行的。注水是从回风巷平行工作面打孔的情况。

单孔长度： $L=100\text{m}$ ；封孔长度： $L_f=20\text{m}$ ；

钻孔有效工作长度： $\Delta L=80\text{m}$ ；煤层平均厚度： $m=2.28\text{m}$ ；煤层的平均原始水份： $W_0=1.87\%$ ；煤层湿润后水份： $W_f=3.6\%$ ；煤层湿润后最大水份： $W_{\max}=4\%$ ；工作面长度： $L_0=144\text{m}$ ；煤层倾角： 5° ；钻孔倾角： 2.2° ；煤层中瓦斯原始压力为： $8 \times 9.8\text{N/cm}^2$ ；煤层埋藏深度为： 220m ；上覆岩层的平均容重为： $\gamma_R=2.58\text{t/m}^3$ ；煤的容重： $\gamma_c=1.52\text{t/m}^3$ 。注水时间根据需要（实际也如此）为363小时。要求理论计算实际注水时单钻孔耗水量和钻孔间距。

2. 煤层注水参数、水力参数的确定与求解

(1) 煤层注水参数

i) 煤的水份增量及最大水份增量

$$\Delta W_f = W_f - W_0 = 3.6\% - 1.87\% = 1.73\%$$

$$\Delta W_{\max} = W_{\max} - W_0 = 2.13\%$$

ii) 注水压力的确定

实际注水压力应大于煤层中瓦斯压力，而小于煤层被压裂的压力。

$$p_a < p_f < 0.075\gamma H - L \cdot \sin\delta / 20$$

计算得 $p_f = 4.3\text{Mpa}$ ，注水的有效压力 $p_E = p_f - p_a = 3.5\text{Mpa}$ 。

(2) 煤层水力参数

煤层水力参数是通过实际测试和计算得到的。它们分别为

$$\beta = 0.33 \text{ 1/h}, \alpha = 1.0 \times 10^{-6}, k = 1.52 \times 10^{-4};$$

$$\sigma_E = \beta t = 0.33 \times 363 \approx 120, U(\sigma) = \sqrt{2} \sqrt{\sigma + \sigma^{-1} - 1} \approx 15.5$$

(3) 单位注水量和注水孔间距的计算

根据式(4.10)考虑到注水对称性和煤层厚度等因素有下式

$$\begin{aligned} Q_0 &= 2\gamma m \Delta W_{\max} \cdot U(\sigma) / \alpha / k \\ &= 2.9\text{m}^3/\text{m} \end{aligned}$$

单钻孔注水量为： $Q = Q_0 \times \Delta L = 2.9 \times 80 = 232\text{m}^3$ 。

工业性试验实际注水量： $Q_p = 242\text{m}^3$ 。其误差为4.1%。

由于注水的对称性： $x_c = 0.5A$ (A 为注水孔间距)有 $W = 0.5 \times 1.73 / 2.13 = 0.406$

已知： $W = 0.406$ ， $\sigma_E = 120$ 代入式(4.5)便可求得

$$\eta = 9.5\text{m}, x_c = \eta / \alpha / k = 11.8\text{m}$$

故钻孔间距： $A = 2x_c = 2 \times 11.8 = 23.6\text{m}$ ，而实际钻孔间距为24.5m。

六、结 论

通过理论推证和实践证明可以得出下列结论。

1. 煤体是一种由裂隙、孔隙组成的多孔介质，煤层注水时，压力水首先充满水的有效裂隙并包围被分割的煤体，然后向更小的孔隙扩展。
2. 煤层注水时，其注水压力须能克服裂隙中的瓦斯压力，但又不能压力过高压裂煤层，使裂隙与煤壁沟通，使水跑掉。
3. 对不同煤赋存条件、开采深度、水力参数，注水工艺与注水参数都有所不同，本数学模型能较充分地反映这一点。
4. 采用本文数学模型研究注水问题，计算简单，并能有效地指导煤层注水设计和解决一些实际中遇到的疑难问题。
5. 实际煤层注水实例表明，该模型计算与实际结果相吻合。

参 考 文 献

- [1] R. E. 科林斯, 《流体通过多孔材料的流动》, 石油工业出版社, 北京(1984).
- [2] 周世宁, 瓦斯在煤层中流动的机理. 煤炭学报, 115(1), 15—24.
- [3] J. 贝尔, 《多孔介质流体动力学》, 中国建筑工业出版社(1983).
- [4] 煤科总院重庆分院, 缓倾斜中厚煤层综采工作面综合防尘技术的研究鉴定资料(1989).

The Analytic Resolutions and Applications of the Non-Linear Seepage Flow Equations of Coal Infusion

Zhang Yansong

(Chongqing Research Institute, CCMRI, Chongqing 630037)

Abstract

In this paper, the author uses the theory of fluid mechanics, dynamics of fluids in porous media, gas seepage flow in coal seams and combines the tests in the laboratory with the actual coal infusion to have an investigation and study from the theory to the mechanism of coal infusion to wet coal seams. Through the analyses to the process of coal infusion, the author builds up the mathematical model and has a detailed discussion to the boundary conditions of coal infusion. Because the equation sets to describe coal infusion are non-linear, we have made a simplification to them to use the demension analysis theory by leading into the non-demensions of water pressure of coal infusion, seepage flow rate, increment of coal seam moisture and so on. Besides, the analytic and approximate solutions have also been discussed. Finally we use the scientific research item of the actual coal infusion to illustrate the effects and importance of the theory to direct actual coal infusion and its designs.

Key words coal infusion, seepage, flow permeation equation, water infusion dustproof