

文章编号:1671 - 251X(2009)10 - 0032 - 04

羽状钻孔预抽矿井瓦斯过程的数值模拟研究

郝长胜, 王洪胜, 庞润芳

(内蒙古科技大学实践训练中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要:合理抽放瓦斯是解决煤矿瓦斯灾害的重要方法之一。文章在分析煤层瓦斯抽放过程机理的基础上,建立了羽状钻孔预抽瓦斯过程的数学模型,并对该模型进行了数值离散,同时采用牛顿-拉夫逊数值方法,将非线性方程组转化为线性方程组最终得以求解。数值模拟程序采用 VB6.0 编写,模拟了矿井瓦斯羽状钻孔预抽过程。通过矿山瓦斯抽放实际数据验证,羽状钻孔预抽矿井瓦斯过程的数值模拟结果基本反映了真实的瓦斯抽放情况,为进一步研究瓦斯抽放过程的参数优化奠定了基础。

关键词:矿井; 瓦斯预抽; 数值模拟; 羽状钻孔

中图分类号:TD712.6 **文献标识码:**A

Research of Numerical Simulation of Process of Mine Gas Pre-draining by Pinnate Boring

HAO Chang-sheng, WANG Hong-sheng, PANG Run-fang

(Practice Training Center of Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Reasonable gas drainage is an important method to solve gas disaster. On the basis of analyzing mechanism of gas drainage process of coal seam, mathematical models of the process of gas pre-draining by pinnate boring were set up and the models were drawn by numerical discretization. Meanwhile, the nonlinear equations were changed into linear equations by use of Newton-Raphson numeric algorithm. The process of mine gas pre-draining by pinnate boring was simulated with VB6.0 codes. By validation of practical data of mine gas drainage, the numerical simulation result reflected real gas drainage situation basically, which will lay a foundation for a further research on parameters optimization of mine gas drainage.

Key words: mine, gas pre-draining, numerical simulation, pinnate boring

0 引言

随着煤炭开采深度和强度的增加,瓦斯压力和涌出量越来越大,给煤矿安全生产带来严重危害。因此,防止瓦斯事故的发生已成为保证煤矿安全生产的首要任务。如何在采煤之前和采煤期间选用技术可行、经济合理的方法将瓦斯从煤层中抽出并加以利用,对于降低煤层中的瓦斯含量、减少瓦斯向大气中的排放量、从根本上消除矿井瓦斯爆炸事故的隐患^[1]具有十分重要的意义。因此,瓦斯抽放方法

及抽放过程中相应工艺参数的优化是煤矿瓦斯研究的重要课题。数值模拟方法因其符合安全、经济和环保的原则而非常适合该类问题的研究,本文针对羽状水平长钻孔技术^[2]进行瓦斯预抽放过程的数值模拟研究。

1 矿井瓦斯顺层羽状长钻孔预抽机理

煤层是一种双重孔隙介质,属裂隙-孔隙型储层。割理将煤分割成若干基质块,基质块中包含有大量的微小孔隙,一般为 0.5~1 nm,是气体储存的主要空间,其渗透性很低;割理是煤中的次要孔隙系统,割理的孔径范围为几纳米到几十纳米,是煤层中流体(气体和水)渗流的主要通道。

煤对瓦斯的吸附依靠的是 Van de Waals 力,属于物理吸附,是一个可逆过程。瓦斯的吸附能力受

收稿日期:2009-06-03

作者简介:郝长胜(1963-),男,硕士,高级工程师,教授,毕业于辽宁工程技术大学,现任内蒙古科技大学实践训练中心主任,主要研究方向为计算机应用技术、矿业工程。联系电话:0472-5954315; E-mail:caoyuanfeisha@126.com

压力控制,只有将煤割理与裂隙中的水排出、煤层压力降低到解吸压力以下,瓦斯才能解吸出来。对于我国低渗透率和低吸附气饱和度煤层来说,目前最新且在国外证明有效的瓦斯抽放技术主要有提高煤层渗透率的水力压裂改造技术、本煤层羽状长钻孔预抽瓦斯技术^[2]和立体综合抽放技术。

顺煤层预抽瓦斯无论采用上述 3 种技术中的哪一种,瓦斯在煤层中运移的物理规律都是相同的。从建模的角度出发,控制瓦斯流动的偏微分方程组、模拟的初始条件和外边界条件相同,只是内边界条件即钻孔处理方式不同。

2 矿井瓦斯本煤层羽状长钻孔抽放数学模型

煤层为孔隙-裂隙双重介质,原始状态裂隙中由水充满,水中含少量的溶解瓦斯,大量瓦斯吸附在煤层基质块中,考虑重力,忽略毛细管力。将煤层中瓦斯解吸过程视为拟稳态扩散,满足 Fick 第一定律^[4]:

$$\frac{d C_m(t)}{d t} = D_m F_s [V_E(p_g) - C_m(t)] = 1/ [V_E(p_g) - C_m(t)] \quad (1)$$

式中: $C_m(t)$ 为基质块中瓦斯的浓度; D_m 为基质中瓦斯扩散系数; F_s 为形状因子; $V_E(p_g)$ 为与裂隙中瓦斯压力相平衡的浓度; τ 为吸附时间常数。

当 $p_g = p_d$ (p_d 为临界解吸压力)时,满足朗缪尔方程:

$$V_E(p_g) = V_L \cdot p_g / (p_L + p_g) \quad (2)$$

式中: V_L 为朗缪尔体积; p_L 为朗缪尔压力。

当 $p_g = p_d$ 时,有:

$$V_E(p_g) = V_E(p_d) \quad (3)$$

裂隙中瓦斯满足真实气体状态方程:

$$pV = nZR T \quad (4)$$

$$\rho_g = pM / ZR T \quad (5)$$

式中: p 为压力,Pa; V 为体积, m^3 ; n 为瓦斯物质的量,mol; Z 为瓦斯压缩因子; R 为气体常数,Pa· m^3 /(mol·K); T 为绝对温度,K; M 为瓦斯的分子量,kg/mol。

瓦斯在裂隙中的运移速度视为宏观渗流速度和遵从 Fick 第一定律的瓦斯扩散速度之和,即:

$$\dot{V}_g = - \left[\frac{K_g}{\mu_g} \nabla p_g + \frac{D_f}{C_f} \nabla C_f \right] \quad (6)$$

式中: D_f 为裂隙中瓦斯扩散系数; $C_f = \phi s_g$,为裂隙中瓦斯浓度, ϕ 为裂隙孔隙度, s_g 为瓦斯饱和度。

由基质块流出到裂隙中的瓦斯流量作为裂隙中气相流动方程的源:

$$q_m = - F_G \frac{d C(t)}{d t} \quad (7)$$

式中: F_G 为几何因子。

由于整个抽放钻孔均为裸眼^[3],把流入主支和各分支钻孔的瓦斯产量作为气、水相流动方程的汇项,则煤层裂隙中气、水相渗流方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi s_g p_g}{Z} \right) = \nabla \cdot \left[\frac{p_g}{Z} \frac{K_g}{\mu_g} \nabla p_g + \frac{D_f}{s_g} \nabla \left(\frac{s_g p_g}{Z} \right) \right] + \frac{RT}{M} q_m - q_g \frac{p_g}{Z} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi s_w}{B_w} \right) = \nabla \cdot \left(\frac{K_w}{B_w \mu_w} \nabla p_w \right) - \frac{q_w}{B_w} \quad (9)$$

式中: $q_g = q_g / V$, $q_w = q_w / V$,为单位时间内单位体积煤质瓦斯产出量, m^3/s ; q_g 、 q_w 为单位时间内 V 体积煤质瓦斯产出量, m^3/s ; $B_w = \rho_w / \rho_{ws}$,为水的体积系数; ρ_w 为水在煤层中的密度; ρ_{ws} 为水脱气后的密度。

饱和度方程为

$$s_w + s_g = 1 \quad (10)$$

式中: s_w 为水的饱和度。

3 顺层羽状长钻孔预抽瓦斯的数值模型及求解

3.1 数值模型

顺层羽状长钻孔预抽瓦斯的几何模型即布孔方式如图 1 所示。根据式(8)、式(9),以瓦斯抽放压力为内边界条件、封闭煤层为外边界条件,采用有限差分方法,以主钻孔出气端为坐标原点,利用三维直角坐标块网格内物质守恒原理对上述数学模型进行差分离散。

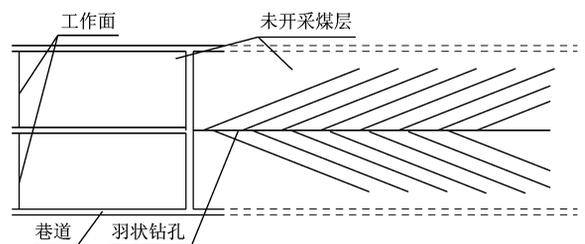


图 1 顺层羽状长钻孔预抽瓦斯的布孔方式示意图

如图 2 所示,三维直角坐标块网格中,以主钻孔出气端为坐标原点,抽放钻孔位于 XY 平面上,取煤层厚度方向为 Z 方向,向下为正, X 、 Y 方向如图 2 所示。 i 、 j 、 k 分别表示 X 、 Y 、 Z 方向上网格编号,顺序为 X 是由左到右、 Y 是由里到外、 Z 是由上到下,并规定重力方向向下。羽状水平钻孔被 XY 平面上

的网格分为若干微段且各段长度较短,故认为气、水流入该段内的流量均匀分布,则对任意网格块,有:

$$q_{gi,j,k} = 86.4 PID_{i,j,k} \frac{k_{rg}(p_{gi,j,k} - p_{wfi,j,k})}{\mu_{gi,j,k}} \quad (11)$$

$$q_{wi,j,k} = 86.4 PID_{i,j,k} \frac{k_{rw}(p_{gi,j,k} - p_{wfi,j,k})}{\mu_{wi,j,k}} \quad (12)$$

式中: $q_{gi,j,k}$ 、 $q_{wi,j,k}$ 分别为单位时间内 1 个网格块煤层产出的气、水量, m^3/d ; $PID_{i,j,k}$ 为钻孔指数; k_{rg} 、 k_{rw} 分别为瓦斯和水的相对渗透率; $p_{wfi,j,k}$ 为该网格内所包含钻孔的流压; $\mu_{wi,j,k}$ 为流体的粘度。

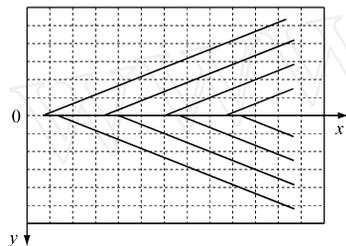


图 2 顺层羽状长钻孔网格剖面示意图

对于没有钻孔穿过的网格:

$$PID_{i,j,k} = 0 \quad (13)$$

对于有钻孔穿过的网格:

$$PID = 2 \frac{K_e L_p}{\ln(r_b/r_w) + S} \quad (14)$$

式中: $K_e = (K_x K_y K_z)^{1/3}$, 为与各向异性煤层等价的各向同性渗透率; $L_p = \sqrt{L_x^2 + L_y^2}$, 为变换的空间网格内钻孔的长度, $L_x = L \sqrt{\frac{K_x}{K_y}} \cos \theta$, $L_y = L \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} \sin \theta$, L 为位于该网格内钻孔的长度, θ 为与 X 轴的夹角; $r_b = \sqrt{r_{bx}^2 + r_{by}^2}$, 为网格块等效半径, $r_{bx} = R_{bx} \cos \theta$, $r_{by} = R_{by} \sin \theta$, R_b 为网格块的尺寸; $r_w = \sqrt{r_{wx}^2 + r_{wy}^2}$, 为等效孔径, $r_{wx} = R_{wx} \cos \theta$, $r_{wy} = R_{wy} \sin \theta$, R_w 为真实钻孔直径; S 为表皮因子。

因方程是根据质量守恒关系建立的,在离散后的井格块上直接利用质量守恒原理:对任意网格块,单位时间内流体质量的改变量 = 流入质量 + 该网格块内解吸或吸附的质量 - 流出质量。对气相流动方程(8)和水相流动方程(9)离散后有:

$$\left[\frac{p_g}{Z} \frac{K k_{rg}}{\mu_g} \right]_{i-\frac{1}{2}} 172.8 h \frac{(p_{gi-1} - p_{gi})}{x} + \left[\frac{D_i}{S_g} \right]_{i-\frac{1}{2}} \times \frac{2-h}{x} \left[\left[\frac{S_g p_g}{Z} \right]_{i-1} - \left[\frac{S_g p_g}{Z} \right]_i \right] + \left[\frac{p_g}{Z} \frac{K k_{rg}}{\mu_g} \right]_{i+\frac{1}{2}} \times 172.8 h \frac{(p_{gi+1} - p_{gi})}{x} + \left[\frac{D_i}{S_g} \right]_{i+\frac{1}{2}} \times \left[\left[\frac{S_g p_g}{Z} \right]_{i+1} - \left[\frac{S_g p_g}{Z} \right]_i \right] - \frac{F_G}{t} (C^{n+1} - C^n) 24 h \times \left(r_{i+\frac{1}{2}}^2 - r_{i-\frac{1}{2}}^2 \right) \frac{RT}{M}$$

$$= 24 h \left(r_{i+\frac{1}{2}}^2 - r_{i-\frac{1}{2}}^2 \right) \left[\left[\frac{\phi_{S_g} p_g}{Z} \right]_i^{n+1} - \left[\frac{\phi_{S_g} p_g}{Z} \right]_i^n \right] / t \quad (15)$$

$$\left[\frac{K k_{rw}}{B_w \mu_w} \right]_{i+\frac{1}{2}} 172.8 h \frac{(p_{wi+1} - p_{wi})}{x} - \left[\frac{K k_{rw}}{B_w \mu_w} \right]_{i-\frac{1}{2}} \times 172.8 h \frac{(p_{wi} - p_{wi-1})}{x} = 24 h \left(r_{i+\frac{1}{2}}^2 - r_{i-\frac{1}{2}}^2 \right) \left\{ \left[\frac{\phi(1-S_g)}{B_w} \right]_i^{n+1} - \left[\frac{\phi(1-S_g)}{B_w} \right]_i^n \right\} / t \quad (16)$$

以上各方程均采用 SI 制实用单位,即各物理量的单位为 $K(\mu m^2)$ 、 $r_w(m)$ 、 $h(m)$ 、 $p_g(MPa)$ 、 $T(K)$ 、 $p_d(MPa)$ 、 $p_L(MPa)$ 、 $V_L(kg/m^3)$ 、 $\mu_g(MPa \cdot s)$ 、 $\mu_w(MPa \cdot s)$ 、 $x(m)$ 、 $y(m)$ 、 $z(m)$ 、 $t(h)$ 、 $M(kg/mol)$ 、 $C(kg/m^3)$ 、 $R(MPa \cdot m^3/(mol \cdot K))$ 、 $p_{wf}(MPa)$ 、 $q(m^3/d)$ 、 $g(N/m^3)$ 。

3.2 数值模型的求解

由式(10)、式(15)、式(16)可知,利用有限差分方法求得的方程组,是以地层压力、钻孔压力和瓦斯饱和度为未知变量的非线性方程组。笔者采用牛顿-拉夫逊方法,将耦合后未知数个数与方程个数相同的非线性方程组化为线性方程组求解。

将式(15)、式(16)中的饱和度变量消去后,地层压力和钻孔压力的函数可简化为

$$f(p_{wf}, p_g) = 0 \quad (17)$$

又由于钻孔压力方程可简化为

$$g(p_{wf}, p_g) = 0 \quad (18)$$

对于式(17)、式(18)组成的非线性方程组,首先令主钻孔出气端压力为已知值,将其化为只关于地层压力的方程组,利用牛顿-拉夫逊方法化为七对角线性方程组,用预处理的共扼梯度法对线性方程组进行求解,得到 $p_{gi,j,k}^{k+1}$, 则 $p_{gi,j,k}^{k+1} = p_{gi,j,k}^k + p_{gi,j,k}^{k+1}$, 如此循环,直到满足收敛条件 $|p_{gi,j,k}^{k+1}| < \rho$ 和 $|f^k| < \epsilon$, 收敛后, $p_{gi,j,k}^{n+1} = p_{gi,j,k}^{k+1}$, 然后将求得的地层压力代入钻孔压力方程中,线性化后用高斯消去法求解,当迭代到满足收敛条件后,将所得钻孔压力值代回地层压力方程,如此反复迭代,直到所求未知数满足收敛条件: $|p_{gi,j,k}^{k+1} - p_{gi,j,k}^k| < \rho_g$ 和 $|p_{wfi,j,k}^{k+1} - p_{wfi,j,k}^k| < \rho_{wf}$, 就得到该时刻地层压力及各段钻孔压力值。

将求得的地层压力和各段钻孔压力值代入式(16)中,得:

$$h(S_{gi+1,j,k}, S_{gi-1,j,k}, S_{gi,j+1,k}, S_{gi,j-1,k}, S_{gi,j,k+1}, S_{gi,j,k-1}, S_{gi,j,k}) = 0 \quad (19)$$

将饱和度视为未知变量,同样利用牛顿-拉夫

逊方法将其化为七对角线性方程组,仍用共轭梯度法解。解得 $S_{gi,j,k}^{k+1}$, 则 $S_{gi,j,k}^{k+1} = S_{gi,j,k}^k + S_{gi,j,k}^{k+1}$, 如此循环,直到满足收敛条件: $|S_{gi,j,k}^{k+1}| < \epsilon$ 和 $|h^k| < h$, 收敛后, $S_{gi,j,k}^{n+1} = S_{gi,j,k}^{k+1}$ 。

将所求各时刻煤层中各点的地层压力、钻孔压力和瓦斯饱和度的值代入式(20)、式(21),可得到水产量和瓦斯产量:

$$q_w = \sum PID_{i,j,k} 86.4 \frac{k_{rw} S_g (p_{gi,j,k} - p_{wfi,j,k})}{\mu_w B_w} \quad (20)$$

$$q_g = \sum PID_{i,j,k} 86.4 \frac{k_{rg} S_g (p_{gi,j,k} - p_{wfi,j,k})}{\mu_w} \frac{p_{wfi,j,k} M}{Z p_{wfi,j,k} R T_{sc}} \quad (21)$$

式中:求和符号表示对分支钻孔通过的所有网格求和。

4 模拟结果与验证

数值模拟是对所模拟的对象和过程的真实再现,模拟结果必须要与现场实际情况吻合,而判断的直接方法是利用数值模拟的结果与实际数据相对比。由于目前我国尚无与模拟完全符合的矿井瓦斯预抽方案,因此,笔者采用类似瓦斯抽放方式的相关数据进行验证。

晋煤集团程庄矿是目前国内本煤层瓦斯抽放效果较好的矿井之一,该矿在多年的本煤层瓦斯抽放过程中积累了丰富的经验和翔实的瓦斯抽放数据。4213 巷为程庄矿 4307 工作面运输巷,在此巷内打钻进行瓦斯抽放。利用从 2005 年 3 月 23 日至 2006 年 11 月 27 日记录流量数据(华北科技学院项目《矿井瓦斯抽放合理参数研究》报告)作图,拟合后如图 3 所示。将 4213 巷煤层各主要参数(裂缝孔隙度、绝对渗透率、水体积系数、裂缝孔隙体积压缩系数、基质骨架收缩系数、地层温度、地层原始压力、钻孔瓦斯扩散系数、瓦斯解吸时间常数、地层临界解吸压力、朗缪尔压力常数、朗缪尔体积常数、钻孔半径、外边界半径、瓦斯摩尔质量、抽放区域长、宽、煤层厚度等)(华北科技学院项目《矿井瓦斯抽放合理参数研究》报告)代入模型,模拟结果如图 4 所示。

对比图 3、图 4 可以看出,模拟结果的单位瓦斯抽放量与实测数据总趋势非常吻合,说明模型、参数和程序正确可靠。2 个图中单位产气高峰时间和高峰期产量的一些差距,主要是因为实际抽放方式和模型中的有一些出入。因此,本文的计算结果基本反映了真实的瓦斯抽放情况,文中建立的模型和选取的参数完全可以用于瓦斯抽放过程的参数优化。

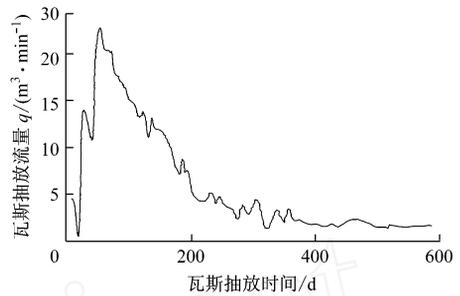


图 3 4213 巷瓦斯抽放拟合曲线

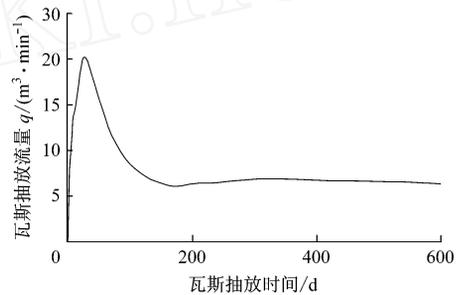


图 4 4213 巷瓦斯抽放模拟曲线

5 结论

- (1) 经过分析得出,瓦斯顺层羽状长钻孔预抽过程的机理与平行钻孔抽放和交叉钻孔抽放完全一致,可以用相同的数学模型来描述;
- (2) 根据煤层为孔隙-裂缝双重介质等假设,建立了合理的羽状长钻孔瓦斯预抽过程的数学模型,并进行了详细的数值求解方法和过程的阐述;
- (3) 采用 VB6.0 语言开发了羽状长钻孔瓦斯预抽过程的数值模拟程序,模拟结果与实测数据非常吻合,说明建立的模型和选取的参数合理,可用于瓦斯抽放过程的参数优化等其它情况的模拟研究。

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [2] 胡千庭. 预防煤矿瓦斯灾害新技术的研究[J]. 矿业安全与环保,2006,33(5):1-7.
- [3] 李斌. 煤层气非平衡吸附的数学模型和数值模型[J]. 石油学报,1996,17(4):42-49.
- [4] SAGHAFI A. 煤层瓦斯流动的计算机模拟及其在预测瓦斯涌出和抽放瓦斯中的应用[C]//第22届国际采矿安全会议论文集,北京:煤炭工业出版社,1987.
- [5] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1999.
- [6] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999.
- [7] 张冬丽,王新海. 煤层气单井开采数值模拟研究[J]. 长江大学学报,2004,26(1):76-77.