

煤层气渗流方程及数值模拟*

张 力** 何学秋

(中国矿业大学)

李侯全

(山西吕梁技校)

张力等.煤层气渗流方程及数值模拟.天然气工业,2002;22(1):23~26

摘 要 中国煤层气资源丰富,据估算,埋深 2 000 m 以浅的煤层气资源达 $(30 \sim 35) \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ 。但中国煤层气地面开发刚进入起步阶段,加之中国煤田地质条件比较复杂,因此研究中国特殊地质条件下煤层气的解吸、扩散和渗流机理的具体地质表现是认识煤层气可采性的关键。针对我国煤层气开采的特殊性,我国采取“地面开采和井巷抽放相结合”的方针。然而井巷开采占了相当的比例。本文建立了煤层气扩散渗流数学物理方程,并对煤层气渗流偏微分方程,采用差分法,进行了数值模拟计算。模拟结果表明,所建立的煤层气扩散渗流模型较准确地反映了煤层中煤层气流动规律,模拟后的煤层气压力变化曲线可以确定煤层气的开采压力变化范围和煤层气产气最大面积,对我国大面积低渗透性无烟煤煤层气的开发具有指导意义。

主题词 煤层气 渗流方程 数值模拟

煤层气扩散渗流物理数学模型

(1)煤层气以游离态和吸附态两种状态存在于煤层中,吸附煤层气在吸附平衡时遵循朗格缪尔方程式,即

$$C = \frac{abdpp_0}{(1+bp)RT} \quad (1)$$

式中: C 为单位体积煤层所含吸附状态煤层气质量,即煤层中吸附状态煤层气的质量浓度, kg/m^3 ; a 为每吨可燃物在参考状态下的极限吸附量, m^3/t ; d 为每 1 m^3 煤中含可燃物吨数, t/m^3 ; ad 的乘积表示单位体积煤在参考状态下的极限吸附量, m^3/m^3 ; b 为吸附常数, Pa^{-1} ; p 为吸附平衡压力, Pa ; p_0 为衡量煤层气质量浓度大小的参考压力,通常取 10^5 Pa 。

(2)煤层气在煤层中流动,温度不变,并等于煤温,游离状态煤层气服从理想气体状态方程式,

$$p = \rho RT \quad (2)$$

式中: R 煤层气气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 煤层气(煤层)绝对温度, K ; ρ 游离状态煤层气的密度, kg/m^3 。

(3)实验室对煤粒中的煤层气扩散速度和扩散系数测定表明:当煤粒尺寸小于某一极限粒度时,煤粒则基本由孔隙结构组成,其中煤层气流动服从菲

克扩散定律。因此,假定煤层是含有孔隙的极限煤粒(基质块)和分割煤粒的裂隙组合而成的孔隙裂隙二重介质的集合体,孔隙和裂隙分别是吸附状态和游离状态煤层气存在的场所。单位体积煤层所含游离状态煤层气质量,即煤层中游离状态气体的质量浓度为

$$C_1 = \varphi p / RT \quad (3)$$

式中: φ 为煤层中裂隙孔隙率,即单位体积煤层中在实际状态下游离状态煤层气的体积, m^3/m^3 ;

(4)煤是由孔隙—裂隙二重介质组成的集合体。在孔隙中煤层气流动遵循菲克扩散定律;在裂隙中煤层气流动遵循达西定律,即

$$m = -D \nabla C \quad (4)$$

$$V = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad (5)$$

式中: m 为吸附状态煤层气的质量扩散通量矢量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; D 为吸附状态煤层气(孔隙系统)的扩散系数, m^2/s ; V 游离状态煤层气渗流速度矢量(体积通量矢量), m/s ; K 为煤层裂隙系统的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为煤层气动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ∇ 为哈密顿算子。

(5)采掘过程中,当煤层气原有吸附平衡态破坏后,吸附煤层气和游离煤层气同时流向井内或煤壁。

* 本文为山西省自然科学基金项目(编号:951044)内容。

** 张力,1972年生;现为中国矿业大学能源科学与工程学院安全技术及工程专业博士研究生,主要从事煤层气开发与利用、矿井灾害防治的研究。地址:(221008)江苏徐州中国矿业大学博 99。电话:(0516)3884695。

即煤层内同时存在一个沿孔隙流动的扩散场和一个沿裂隙流动的渗流场。由于裂隙中的渗流速度大于孔隙中的扩散速度,所以煤粒孔隙中的吸附煤层气要扩散到煤粒表面,再解吸穿过边界膜进入裂隙,即孔隙和裂隙系统之间要发生质量交换。其传质速率由煤粒中吸附煤层气扩散微分方程式决定,即

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right), \\ t = 0, 0 < r < r_0, C &= C_0 = \frac{abd p_0 p_n}{(1 + b p_0) RT} \\ t > 0, r = 0, \frac{\partial C}{\partial r} &= 0; \\ r = r_0, m &= -D \frac{\partial C}{\partial r} = a(C_s - C_p), C_p = \frac{abd p p_n}{(1 + b p) RT} \end{aligned} \quad (6)$$

$$q = \frac{3}{r_0^3} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{r_0} C r^2 dr = \frac{4\pi r_0^2 m}{4\pi r_0^3} = \frac{3a}{r_0} (C_s - C_p) \quad (7)$$

式中: r_0 为极限煤粒半径, m; C_0 为吸附状态煤层气初始质量浓度, kg/m^3 ; a 为以固体相表示的膜系数, m/s ; C_s 为煤粒表面吸附状态煤层气质量浓度, kg/m^3 ; C_p 为与 p 平衡的吸附状态煤层气质量浓度, kg/m^3 ; q 为单位时间内单位体积煤粒平均扩散的煤层气量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

(6) 假定煤体不再是刚体, 煤层体积随气体压力变化, 煤粒体积不发生变形, 只有裂隙体积的变化并且服从广义虎克定律, 则煤层的压缩系数可表示为

$$C_f = \partial \varphi / \partial p,$$

$$\begin{aligned} \text{或 } \varphi &= \varphi_0 \exp[C_f(p - p_0)] \\ &\approx \varphi_0[1 + C_f(p - p_0)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: φ_0 煤层初始条件下的孔隙率, m^3/m^3 (%); C_f 煤层压缩系数, 即煤层体积弹性模量的倒数, Pa^{-1} 。

(7) 两介质系统之间的质量交换相当于一个均匀的内质量源, 对裂隙系统是流入, 对孔隙系统是流出。假定双重介质为连续介质。在双重介质中取一微元体, 根据质量守恒原理可分别写出各个介质系统的连续性方程为^[1-4]

$$\partial C_f / \partial t = -\nabla \cdot (\rho V) + q \quad (9)$$

$$\partial C / \partial t = -\nabla \cdot (m) - q \quad (10)$$

根据上述分析, 将式(1)~(10)分别相应的代入式(9)、(10)中, 当 D, K 为常数时, 则煤层气扩散渗流的微分方程组的推导:

孔隙系统:

$$\partial C / \partial t = D \nabla^2 C - q \quad (11)$$

裂隙系统:

$$\partial p^2 / \partial t = \chi \nabla^2 p^2 + \omega q \quad (12)$$

式中:

$$\chi = \frac{pK}{\mu \varphi_0 (1 + C_f p - C_f p_0) (1 + C_f p)}, \text{ 类似导热系数 } (\text{m}^2/\text{s});$$

$$\omega = \frac{2pRT}{\varphi_0 (1 + C_f p - C_f p_0) (1 + C_f p)}$$

煤层气扩散渗流微分方程组的一般形式为

$$\partial p^2 / \partial t = \chi \nabla^2 p^2 + \omega q \quad (13)$$

$$\partial C / \partial t = D \nabla^2 C - q \quad (14)$$

初始条件:

$$t = t_0, p = p_0, C = C_0 = \frac{abd p_0 p_n}{(1 + b p_0) RT} \quad (15)$$

边界条件:

$$t > 0, p = p_a, C = \frac{abd p_a p_n}{(1 + b p_a) RT} \quad (\text{在暴露面 } S_1 \text{ 上}) \quad (16)$$

$$\frac{\partial p}{\partial l} = 0, \frac{\partial C}{\partial l} = 0, \quad (\text{在封闭面 } S_2 \text{ 法线 } l \text{ 方向上}) \quad (17)$$

式中: p_a 为生产井或巷道中气体压力, Pa。

煤层气渗流方程数值模拟

本文要求解的渗流偏微分方程属于输运(抛物性)方程。

$$\partial p^2 / \partial t = \chi \nabla^2 p^2 + \omega q \quad (18)$$

方程化简后, 得到一维渗流偏微分方程

$$\partial p^2 / \partial t = \partial^2 p^2 / \partial x^2 + \omega q \quad (19)$$

是含有两个自变量的二阶偏微分方程式。方程中变量 p 仅在 $x-t$ 平面上某个区域内各点有定义。考虑由 $x-t$ 坐标构成的空间-时间网格系统, 取空间步长 $\Delta x = h$, 时间步长 $\Delta t = \tau$, 函数 p 的下标表示位置, 上标表示时间。为保证足够的计算精度和简化计算。本文采用古典隐式差分法求解煤层气一维渗流方程式。

煤层气一维渗流流动的差分方程采用古典隐式, 其差分格式为

$$\begin{aligned} p_j^n - \frac{\tau \chi}{h^2} (p_{j+1}^n - 2p_j^n + p_{j-1}^n) &= p_j^{n-1} + \frac{3\tau \omega q}{r_0} \times \\ &\quad \left[\frac{abd p p_n}{(1 + b p) RT} - \frac{\varphi p}{RT} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{令 } A = \frac{K \tau \sqrt{p_j^{n-1}}}{\mu \varphi_0 h^2 (1 + C_f \sqrt{p_j^{n-1}} - C_f p_0) (1 + C_f \sqrt{p_j^n})},$$

$$\text{令 } B = (1 + C_f \sqrt{p_j^{n-1}} - C_f p_0) (1 + C_f \sqrt{p_j^n}),$$

方程简化为

$$-Ap_{j-1}^n + (1+2A)p_j^n - Ap_{j+1}^n = p_j^{n-1} + \frac{6\tau ap_j^{n-1}}{r_0 B} \cdot \left[\frac{abdp_n}{\varphi_0(1+b\sqrt{p_j^{n-1}})} - 1 - C_f\sqrt{p_j^{n-1}} + C_1 p_0 \right] \quad (21)$$

$$j=1,2,\dots,N-1; n=1,2,\dots,m;$$

初始条件离散化

$$p(j,0) = \varphi(jh), j=1,2,\dots,N-1; \quad (22)$$

边界条件离散化

$$p(0,n) = \mu_1(n\tau), p(N,j) = \mu_2(n\tau), \quad n=1,2,\dots,m; \quad (23)$$

以上格式的矩阵形式

$$\begin{cases} Bp_n = p_{n-1} + f_n \\ \mu_n = \varphi \end{cases} \quad n=1,2,\dots,m \quad (24)$$

这里的矩阵 B 为

$$B = \begin{bmatrix} 1+2A & -A & & & \\ -A & 1+2A & 0 & & \\ & 0 & 0 & 0 & \\ & & 0 & 0 & -A \\ & & & -A & 1+2A \end{bmatrix} \quad (25)$$

使用上述格式求解时,每计算一层结点上的 p 值 $p_{1,n}, p_{2,n}, \dots, p_{j-1,n}$ 都要解一个线性代数方程组。容易看出,它的系数矩阵 B 是主对角线元素按行严格占优阵,因此,对每一个 n ,方程组的解存在且唯一。

计算实例与比较

本文中所建立的煤层气扩散渗流物理数学模型中涉及到如下一些参数:煤层裂隙系统渗透率、煤层气动力粘度、煤粒的极限煤粒半径、煤粒表面质交换系数、煤层压缩系数、煤层吸附常数(a, b)、煤中的可燃物质量数、煤层孔隙率、煤层气原始压力以及煤层采掘暴露面大气压力。

理论计算实例选为沁水煤田某矿,该矿煤层属于低透气性无烟煤,用 C 语言编程进行计算机数值模拟^[10]。

基本参数选取如下:

$$(1) a = 38.17, b = 1.595 \text{ L}, c = 1.399, p_n = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}, p_0 = 885.135 \text{ Pa}, K = 1.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2, \mu = 1.08 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}, C_f = 1.92 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}, \varphi_0 = 10.39\%, r_0 = 0.00141 \text{ m}, \alpha = 5.8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}.$$

用以上数据为基本参数进行计算机模拟解算,计算结果绘成如下煤层气压力随时间及位置变化曲线图(如图 1)。

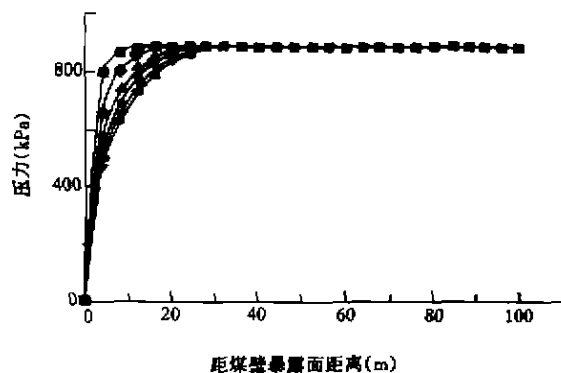


图 1 沁水煤田某矿煤层气平行流动压力分布图

图中的曲线从左到右对应时间为: $t_1=5$ 天, $t_2=20$ 天, $t_3=40$ 天, $t_4=60$ 天, $t_5=80$ 天, $t_6=100$ 天后煤壁煤层气压力分布图。煤层甲烷产出情况可分为三个阶段:随着煤层周围压力的下降,首先只有水产出,因为这时压力下降不多,煤壁附近只有单相流动。当储层压力进一步下降,煤壁附近开始进入第二阶段,这时有一定数量甲烷从煤的表面解吸,开始形成气泡,阻碍水的流动,水的相对渗透率下降,但气也不能流动,无论在基质孔隙中还是在割理中,气泡都是孤立的,没有互相连接。虽然出现气、水两相,但只有水相是可动的,这一阶段叫做非饱和单相流阶段。储层压力进一步下降,有更多的气解吸出来,则煤壁附近进入了第三阶段,水中含气已达到饱和,气泡互相连接形成连续的流线,气的相对渗透率大于零。随着压力下降和水饱和度降低,在水的相对渗透率不断下降的条件下气的相对渗透率逐渐上升,气产量逐渐增加。这三个阶段是连续的过程。随着时间的延长,受影响的面积越大,甲烷解吸和排放的面积也越来越大。通过压力曲线的变化,就可以确定煤层气的开采压力变化范围及煤层煤层气产气最大面积。

结 论

运用古典隐式差分法和借助计算机编程,对建立的煤层气扩散渗流的数学物理模型的渗流方程进行了数值模拟,模拟后的煤层气压力变化曲线可以确定煤层气的开采压力变化范围及煤层煤层气产气后最大波及面积。

参 考 文 献

- 1 周世宁,孙辑正.煤层瓦斯流动的理论及应用.煤炭学报,

莺歌海盆地烃源岩特征及天然气生成演化模式^{*}

黄保家^{**} 肖贤明

(中国科学院广州地球化学研究所)

董伟良

(中海石油研究中心)

黄保家等. 莺歌海盆地烃源岩特征及天然气生成演化模式. 天然气工业, 2002; 22(1): 26~30

摘 要 莺歌海盆地存在中新统和渐新统两套重要烃源岩。其中, 中新统海相烃源岩有机质丰度中等、成烃母质以陆源高等植物为主又有浮游植物的贡献, 被认为是区内底辟浅层气田的主要烃源岩。盆地内高的地温条件和中新统原岩富含偏腐殖混合型—腐殖型有机质决定了其以生气为主的特点, 通过热模拟实验并结合已知气田天然气主要成分的共生关系、分布特征和地质条件, 深入探讨了该区烃气、氨气和二氧化碳等生成的先后顺序及其相互关系, 建立了中新统烃源岩天然气生成演化模式, 以期为本区的天然气勘探提供有价值的地球化学信息。

主题词 莺歌海盆地 中新世 气源岩 气态烃 二氧化碳 共生 气藏形成

近年来, 已在莺歌海盆地底辟带异常压力系统的顶部或上方发现了东方 1-1、乐东 5-1、乐东 22-1 和乐东 8-1 等气田。由于这些天然气主要成分(烃气、CO₂ 和 N₂) 分布比较复杂, 因而引起了勘探家们对它们的成因及其母岩生气特征和演化规律的关注。关于气的来源, 此前已有不少的论述(黄保家, 1993; Matin Scheoll, 1996; 董伟良和黄保家, 1999), 笔者在此旨在通过对烃源岩的发育展布及其地球化学特征的剖析, 结合已发现天然气主要组成的共生关系和烃源岩热模拟实验结果, 探讨莺歌海盆地烃气、CO₂ 和 N₂ 的生成演化模式, 从而为天然气勘探提供有价值的地球化学信息。

烃源岩的地球化学特征

地化研究结果揭示出, 莺歌海盆地存在中新统和渐新统两套重要烃源岩。

渐新统包括崖城组和陵水组, 主要分布于莺歌海盆地东南部及西北部地区, 为半封闭浅海及三角洲前缘沉积。地化分析表明, 莺歌海盆地崖 19-2-1 井(毗邻崖 13-1 气田) 揭露的崖城组泥岩有机碳丰度为 0.42%~3.22%, 接近一般好烃源岩指标。值得注意的是, 琼东南盆地崖 13-1 气田崖城组的煤及碳质泥岩有机碳含量高达 19.95%~95.9%, 生烃潜力为 14.3~142.8 mg/g, 具有很好的生气潜力。干酪根元素及镜下鉴定结果均判定其为腐殖型母

1965; 2(1): 24~37

- 2 Kuznetsov S V, Bobin V A. Desorption kinetics during gas dynamical phenomena in collieries [J]. IPKON, moscow, 1980, (1): 58~65
- 3 郭勇义, 周世宁. 煤层瓦斯一维流动规律的完全解. 中国矿业大学学报, 1984; (2): 19~28
- 4 周世宁. 瓦斯在煤层中的流动机理. 煤炭学报, 1990; 15(1): 15~24

- 7 吴世跃, 郭勇义. 煤层气运移特征的研究. 煤炭学报, 1999; (1): 65~69
- 8 叶振华. 化工吸附分离. 北京: 中国石化出版社, 1992
- 9 俞启香. 矿井瓦斯防治. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990
- 10 张力. 煤层气扩散渗流机理的研究. 太原: 太原理工大学, 1999

(收稿日期 2001-09-22 编辑 黄君权)

^{*} 本文为国家“九五”天然气重点攻关课题“莺歌海盆地海相烃源岩特征及区域天然气充注能力研究”(96-110-07-01-03)中的部分成果。

^{**} 黄保家, 高级工程师, 1960年生; 1982年毕业于西南石油学院石油地质勘探专业, 现于中国科学院广州地球化学研究所攻读博士学位; 从事应用油气地球化学研究工作, 已发表论文多篇。地址: (524057) 广东省湛江市中国海洋石油南海西部公司研究院。电话: (0759) 3900573。