

安全技术及工程

注气驱替煤层甲烷的有效影响半径研究

王兆丰，陈进朝，杨宏民

(河南理工大学 安全科学与工程学院，河南 焦作 454003)

摘要：为了确定井下煤层注气有效影响半径，以煤层瓦斯渗流理论、瓦斯扩散理论、多元气体竞争吸附、能量守恒以及理想气体状态方程为基础，以钻孔周围煤体瓦斯流动场为研究对象，建立了井下注气驱替煤层甲烷的数学模型，并以石港煤矿的实测参数为计算依据，利用 Comsol 软件对抽采钻孔在不同注气时间、不同注气压力下瓦斯流动进行了数值模拟，发现注气有效影响半径随注气时间和注气压力的增大而增大，为现场注气提供依据。

关键词：注气；煤层甲烷；竞争吸附；有效影响半径；Comsol 数值模拟

中图分类号：TD712 **文献标志码：**A **文章编号：**0253-2336(2012)09-0028-04

Study on Effective Influence Radius of Borehole Air Injection to Remove and Replace Coal Bed Methanes in Seam

WANG Zhao-feng, CHEN Jin-chao, YANG Hong-min

(School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to determine the effective influence radius of the seam air injection, based on the seam gas seepage theory, gas diffusion theory, multi element gas competitive adsorption, energy conservation and ideal gas status equation, taking the seam gas flow field around the borehole as the study object, a mathematics model of the air injection to remove and replace seam methane was established. Taking the measured parameters of Shigang Mine as the calculation basis, the Comsol software was applied to the numerical simulation on the gas flow equation of the gas drainage borehole under different air injection time and different air injection pressure. The simulation showed that the effective influence radius of the air injection would increase with the air injection time and air injection pressure increased and could provide the basis to the site air injection.

Key words: air injection; coal bed methane; competitive adsorption; effective influence radius; Comsol numerical simulation

我国是世界煤与瓦斯灾害最严重的国家之一^[1]，目前我国的区域防突措施主要是开采保护层和预抽煤层瓦斯^[2]，但我国大部分的突出矿井一般不具备开采保护层条件，所以预抽煤层瓦斯是目前区域防突措施的重要手段。我国大部分高瓦斯和突出矿井所开采的煤层属于低透气性煤层，透气性系数仅有 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}^2 / (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ，抽采效果不理想^[3]。文献 [4] 通过理论研究和现场试验，在煤矿井下向低透气性煤层采用边注气边抽采

的方法提高瓦斯抽采效率，取得了良好效果。

1 注气驱替煤层甲烷技术

近年来，通过向煤层注入 CO_2 和 N_2 提高煤层气产量的 CO_2 -ECBM 技术已得到广泛应用，其理论和应用技术已日趋成熟，并且已经成为提高煤层气采收率的主要方法之一^[5-6]。井下煤层注气则是受 CO_2 -ECBM 技术的启发，煤层是孔隙与裂隙的双重介质，瓦斯以游离态和吸附态存在于煤层中，

收稿日期：2012-05-18；责任编辑：王晓珍

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50974056, 51174081）

作者简介：王兆丰（1963—），男，湖南湘潭人，研究员，博士生导师，河南省特聘教授，国家煤矿安全生产专家，现任煤矿灾害预防与抢险救灾教育部工程中心常务副主任，河南理工大学瓦斯防治技术及装备研究所所长。联系人：陈进朝，Tel: 13523099528

网络出版时间：2012-09-17 10:33:18；网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120917.1033.201209.28_008.html

引用格式：王兆丰，陈进朝，杨宏民. 注气驱替煤层甲烷的有效影响半径研究 [J]. 煤炭科学技术，2012, 40 (9): 28-31.

并且吸附态的瓦斯和游离态的瓦斯存在动态平衡^[7-8]。向煤层注入气体后则打破了这种平衡, 其目的是增加注气孔与排放孔之间的压力梯度, 促使注入气体和煤体中的游离瓦斯向低压侧(排放孔)运移, 裂隙-孔隙系统内的瓦斯被携带、运移出煤体, 造成煤粒表面和内部吸附的瓦斯在浓度差的作用下发生解吸, 不断向裂隙-孔隙系统扩散瓦斯; 随着注气时间的增加, 煤体表面的CH₄不断解吸, 煤体吸附瓦斯的吸附位不断被注入的气体所占据, 煤层内的瓦斯被注入的气体所置换。这就是注气驱替煤层甲烷技术。

注气驱替煤层甲烷有效影响半径是井下煤层注气的一个重要参数, 若注气孔与排放孔的间距过大, 会造成注入的气体在煤体中形成“憋气”, 同时若注入的气体不能排出煤体, 也无法对煤体甲烷形成有效的“驱替”和“携载”作用, 故要确定合理的注气有效影响半径, 为现场注气试验参数布置提供理论依据。注气影响半径是指注气影响范围的径向距离, 分为注气理论影响半径与注气有效影响半径。

注气理论影响半径是指注气时煤层中注气压力为0的点距注气孔的最近径向距离; 注气有效影响半径是指在注气理论影响半径范围内, 注气压力降至能有效驱替煤层甲烷的最低有效压力p_L的点距注气孔的距离r_i, 符合该条件的最小距离即注气有效影响半径。则注气有效影响半径R_i=min{r₁, r₂, r₃, ..., r_i|p_{ri}=p_L}。

2 注气驱替煤层甲烷数学模型的建立

2.1 基本假设

依据瓦斯渗流理论、瓦斯扩散理论、多元气体竞争吸附理论、能量守恒理论以及理想气体状态方程理论建立注气驱替煤层甲烷方程模型^[9]。为建立数学模型, 做以下假设: ①煤层结构均匀, 煤层中各处原始瓦斯压力和瓦斯含量均相等; ②煤层中气体流动为等温过程, 吸附解吸符合广义朗格缪尔等温吸附方程; ③气体为理想气体, 符合理想气体状态方程; ④无水注入气体后煤层中为二元气体混合物; ⑤瓦斯在煤体中的解吸是瞬间完成的; ⑥将煤体看作孔隙-裂隙双重介质, 其中游离态瓦斯气体组分在裂隙中的运移为渗流过程, 满足Darcy定律, 吸附态气体组分在孔隙中的运移为扩散过程,

满足Fick定律。⑦微孔隙中的气体吸附到煤体表面和吸附态气体解吸、扩散到裂隙系统, 二者之间存在质量交换; ⑧煤层顶底板不透气, 且不含瓦斯; ⑨在注气过程中, 注气压力不会沿钻孔深度的增加而减小, 孔内各处压力为恒定值。

2.2 数学模型

1) 气体在孔隙中的扩散方程。假设吸附态气体解吸到煤层微孔隙并移动到裂隙系统中的运动符合Fick扩散定律, 可知CH₄、N₂在孔隙系统中扩散的方程为

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla(-D_i \nabla c_i) = -Q_i \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

式中: i为气体组分, i=1代表CH₄, i=2代表N₂; c_i为组分i的质量浓度, kg/m³; D_i为组分i的扩散系数, m²/s; t为注气时间; ∇为哈密顿算子; Q_i为汇源项, 反映基质孔隙系统中的吸附态与裂隙系统中的游离态之间的质量交换。

2) 气体在裂隙中的渗流方程。假设煤层裂隙中游离气体的运移均可看作流体渗流过程, 则气体在煤体中渗流的质量守恒方程为

$$\partial m_i / \partial t + \nabla(\rho_i v) = Q_i \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

式中: ρ_i为气体组分i的密度, kg/m³; v为气体总的渗流速度, m/s; m_i为游离态气体组分i的含量, kg/m³, m_i=φρ_i, 其中φ为孔隙率。

3) 多元气体吸附平衡方程。吸附态组分在假想平衡压力p_i下的含量m_{pi}可由广义朗格缪尔等温吸附方程表示为

$$m_{pi} = \rho_a \rho_c a_i b_i p_i / (1 + b_1 p_1 + b_2 p_2) \quad (3)$$

其中, ρ_c为煤体密度, kg/m³; a_i为组分i在煤层中单独吸附时的极限吸附量, m³/kg; b_i为组分i吸附平衡常数, MPa⁻¹; p₁、p₂分别为气体组分1、2的平衡分压力。

4) 质量交换方程。煤体表面吸附态气体与裂隙系统中的游离态气体之间的质量交换, 定义为

$$Q_i = (c_i - m_{pi}) \tau \quad (4)$$

其中, τ为解吸扩散系数, 取1.42。

5) 气体状态方程。由于煤层注气压力一般不大, 不考虑气体的压缩系数, 将气体组分看作理想气体, 理想气体状态方程可表示为

$$\rho_i = M_i p_a / (RT_a) \quad (5)$$

其中: M_i为气体组分i的摩尔质量, g/mol; R

为普适气体常数； p_a 和 T_a 为标准条件下的瓦斯压力与温度， $p_a = 0.1 \text{ MPa}$ ， $T_a = 273 \text{ K}$ 。

6) 渗流速度方程。由于气体组分在媒体中的渗流符合 Darcy 定律，气体总的渗流速度 v 为

$$v = -\nabla p k / \mu_i \quad (6)$$

其中： k 为媒体的渗透率， m^2 ； μ_i 为气体组分 i 的动力黏性系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； p 为总压力（注气压力）， $p = p_1 + p_2$ 。

7) 交叉耦合方程。将式(3)至式(6)代入式(2)，可以得到

$$\frac{\varphi M_i}{RT_a} \frac{\partial p_i}{\partial t} - \nabla \left(\frac{M_i k p_i}{RT_a \mu_i} \nabla p \right) = Q_i \quad (7)$$

式(1)至式(7)共同构成注气驱替煤层甲烷的连续性方程。

8) 数值模型及边界条件。煤层实际的注气过程在空间上是三维的，但考虑到数值计算的可行性与有效性，将其简化为二维问题，选取钻孔的径向方向研究，数值模拟模型如图1所示。

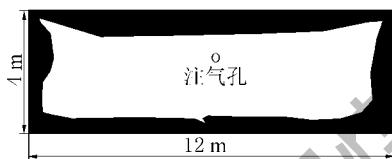


图1 煤层注气数值模拟模型

模拟工程条件为：模拟媒体高4 m、宽12 m。在巷道两帮揭露煤层厚度的中部施工注气钻孔，孔深为60 m，注气压力为0.5、0.8、1.2、1.6 MPa，假设模型四周为零流量边界。注气孔边界为注气压力。数值模拟媒体参数均为石港煤矿的煤样，并在实验室实测数据，数值模拟所用相关参数如下：

$$\rho_e / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad 1.4 \times 10^3$$

$$\varphi \quad 0.05$$

$$k / \text{m}^2 \quad 1.5 \times 10^{-17}$$

$$\text{CH}_4 \text{密度} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad 0.717$$

$$\text{CH}_4 \text{动力黏性系数} / (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad 1.03 \times 10^{-5}$$

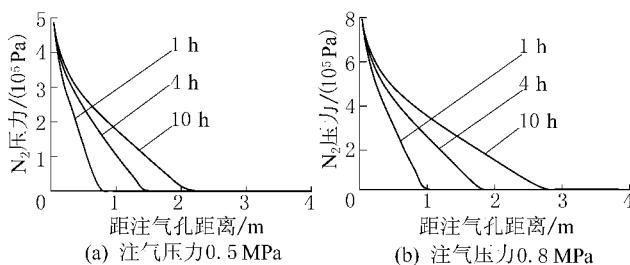


图2 不同注气压力和注气时间下的注气有效影响半径模拟结果

CH_4 的 Langmuir 常数 $a_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.038 32
CH_4 的 Langmuir 常数 b_1 / MPa^{-1}	0.51
N_2 密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.25
N_2 动力黏性系数 / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.69×10^{-5}
N_2 Langmuir 常数 $a_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.016 58
N_2 Langmuir 常数 b_2 / MPa^{-1}	0.46
p_a / MPa	0.1

3 注气有效影响半径数值模拟

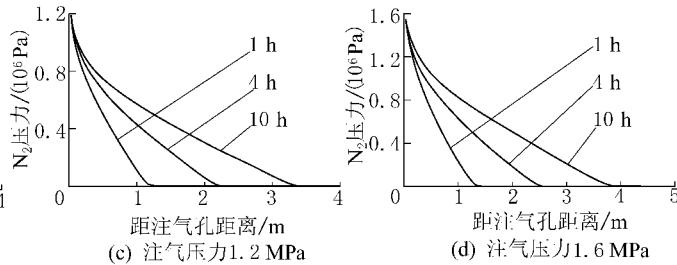
为便于数值模拟结算，假设煤层的瓦斯不含有氮气成分，煤层中的氮气全部是注入的气体成分，这样可认为原始煤层中的氮气压力为0。根据井下注气的试验情况及为了在有效时间内达到媒体消突目的，笔者提出当媒体内的氮气压力降至0.1 MPa时距注气孔的径向距离即该注气时间的注气有效影响半径。

1) 模拟结果。不同注气压力和注气时间的注气驱替煤层甲烷的有效影响半径模拟结果见表1和图2。由表1和图2可知，注气有效影响半径随注气时间和注气压力的增加而增加，但注气有效影响半径的增加量是逐渐减小的。

表1 注气有效影响半径数值模拟结果

注气时间/h	不同注气压力下的有效影响半径/m			
	0.5 MPa	0.8 MPa	1.2 MPa	1.6 MPa
1	0.57	0.78	1.00	1.22
2	0.75	1.08	1.37	1.61
3	0.90	1.28	1.63	1.92
4	1.02	1.45	1.85	2.18
5	1.12	1.58	2.06	2.43
6	1.22	1.73	2.22	2.63
7	1.32	1.85	2.38	2.83
8	1.40	1.97	2.54	3.03
9	1.49	2.06	2.69	3.23
10	1.56	2.18	2.78	3.40

2) 模拟结果分析。现将不同注气压力、不同



注气时间的注气有效影响半径的结果进行分析, 通过Excel对结果进行拟合, 拟合结果如图3所示。

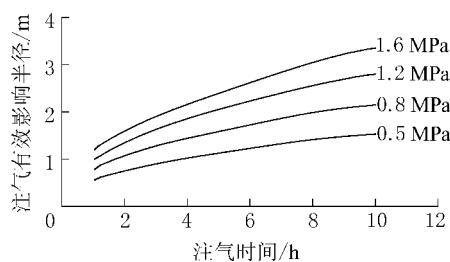


图3 不同注气压力下有效影响半径与注气时间的关系

由图3可得, 在同一注气压力下, 有效影响半径随注气时间的增加而增加, 有效影响半径 R 与注气时间 t 存在幂指函数关系, $R = At^B$, 不同注气压力下注气有效影响半径 R 与注气时间 t 的关系式见表2。由表2可知, 计算公式中系数 A 、 B 随注气压力 p 的变化而变化, 经回归分析, 系数 A 、 B 与注气压力 p 存在如图4所示的关系。

表2 不同注气压力下注气有效影响半径计算公式

注气压力/MPa	公式	系数A	系数B
0.5	$R = 0.55587t^{0.4406}$	0.5587	0.4406
0.8	$R = 0.7859t^{0.4408}$	0.7859	0.4408
1.2	$R = 1.0008t^{0.4464}$	1.0008	0.4464
1.6	$R = 1.1912t^{0.4474}$	1.1912	0.4474

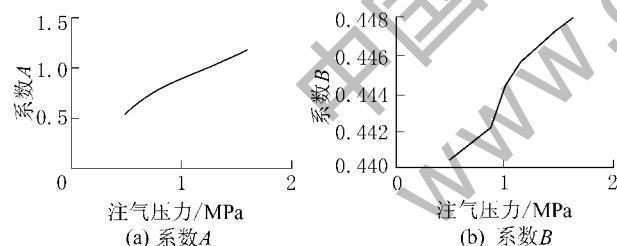


图4 系数 A 、 B 随注气压力 p 的变化

由图4可知, A 、 B 与 p 存在线性关系, 其中 $A = 0.5672p + 0.3028$, $B = 0.0071p + 0.4365$, 结合 $R = At^B$ 得 R 与 t 、 p 存在的关系为 $R = (0.5672p + 0.3028)t^{(0.0071p + 0.4365)}$, 其中, $0.5 \leq p \leq 1.6$ MPa。

4 结论

依据瓦斯渗流理论、瓦斯扩散理论、多元气体竞争吸附理论、能量守恒理论及理想气体状态方程理论, 建立注气驱替煤层甲烷方程模型, 基于Comsol数值模拟软件模拟了石港煤矿采用注气驱替煤层甲烷时注气有效影响半径与注气时间和注气

压力的关系, 对模拟结果回归分析得出以下结论:

①在同一注气压力下, 注气有效影响半径随注气时间的增加而增大, 但在单位时间内的增加量越来越小。②在同一注气时间下, 注气有效影响半径随注气压力的增加而增大。③ R 与 t 、 p 存在的关系: $R = (0.5672p + 0.3028)t^{(0.0071p + 0.4365)}$, 其中, $0.5 \leq p \leq 1.6$ MPa。

参考文献

- [1] 乔美英, 马小平, 乔铁柱, 等. 工作面瓦斯涌出量时间序列分形特性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (12): 51–55.
- [2] 国家煤矿安全监察局. 《防治煤与瓦斯突出规定》读本 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [3] 王兆丰, 刘军. 我国煤矿抽放存在的问题及对策探讨 [J]. 煤矿安全, 2005, 36 (3): 29–44.
- [4] 王兆丰, 杨宏民, 陈立伟, 等. 置换解吸和抑制解吸技术防治瓦斯突出试验研究 [R]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- [5] 程林峰. 煤层气注入增产法的探讨 [J]. 中国煤层气, 2006, 3 (3): 40–43.
- [6] 唐书恒, 杨起, 汤达祯, 等. 注气提高煤层甲烷采收率机理及实验研究 [J]. 石油实验地质, 2002, 24 (6): 545–549.
- [7] 颜志丰, 唐书恒, 方念乔, 等. 沁水盆地高家庄区块煤储层的孔隙特征 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 37 (2): 103–107.
- [8] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存规律与流动机理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [9] 杨宏民. 井下注气驱替煤层甲烷机理及规律研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.

(上接第55页)

- [5] 黄俊生, 李宗远, 韩永强. 矿井通风阻力测定数据的综合分析 [J]. 中州煤炭, 2010 (12): 82–84, 100.
- [6] 王文才, 王俊峰, 刘靖元, 等. 王晁煤矿通风系统阻力测定及优化方案 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (2): 63–66.
- [7] MT/T 440—2008, 矿井通风阻力测定方法 [S].
- [8] 陈宙, 赵恩平, 蒋仲安, 等. 矿井通风阻力测定数据平差处理方法及应用 [J]. 中国矿业, 2006, 15 (10): 105–108.
- [9] 陈开岩, 陈发明. 矿井通风测量数据处理方法的集成与应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31 (6): 600–605.
- [10] 张国枢. 通风安全学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [11] AQ 1028—2006, 煤矿井工开采通风技术条件 [S].
- [12] 陈开岩, 王省身. 用气压计法测量风网阻力的精度检验 [J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24 (12): 65–70.