论文

钻井液条件下煤芯煤层气解吸-扩散模型及逸散量求取

杨兆彪^{①*}, 秦勇^①, 王兆丰^②, Geoff WANG^③, 吴财芳^①^① 中国矿业大学资源与环境学院, 徐州 221008;^② 河南理工大学安全学院, 焦作 454000;^③ School of Engineering, University of Queensland, ST Lucia, QLD 4072, Australia* E-mail: zhaobiaoyang@163.com

收稿日期: 2009-01-04; 接受日期: 2009-09-01

国家自然科学基金重点项目(批准号: 40730422)和国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号: 40802032)资助

摘要 现行各类煤芯煤层气逸散量推算方法, 均未考虑煤芯煤层气在不同钻井液环境下解吸过程的差异, 可能导致煤层含气量测定结果出现偏差. 为此, 本文将钻井液条件下煤芯煤层气解吸视为一个变压解吸过程, 以 Langmuir 方程和 Fick 第一定律为基础, 综合考虑钻井液条件下影响煤层气解吸扩散的主要因素, 通过物理模拟实验和理论探讨, 建立了考虑游离气在内的钻井液条件下煤芯煤层气解吸-扩散模型及逸散量数值模拟求取方法. 结果显示: 数值模拟能够较为准确地拟合 $t-Q_t$ 物理模拟曲线, 提钻过程最终解吸量数值模拟值和物理模拟值总体较为接近. 通过对实测解吸数据求取逸散量发现, 当逸散时间较长时, 数值模拟结果普遍大于直接法计算结果. 作者由此认为, 采用中国目前方法推得的煤芯煤层气逸散量普遍偏低, 有必要在深入研究基础上考虑对中国现行国家标准予以修订.

关键词钻井液
煤层气
逸散量
解吸扩散模型
数值模拟法

煤层含气量是瓦斯安全学和煤层气地质学中的重要参数, 合理推算逸散量(损失气)是准确测定煤层气含量的前提条件. 现今阶段, 煤层含气量测值的不准确性仍是一个亟待解决的基础科学问题^[1]. 目前, 国内外各类煤芯煤层气逸散量推算方法, 均是基于煤样在空气介质中的解吸规律和煤样提至地面测得的气体解吸数据来推算取芯过程煤层气在钻井液介质中的逸散量, 没有考虑煤样在空气介质和钻井液介质环境下煤层气解吸过程的差异^[2~4].

因此, 就本质而言, 它们只能算作对取芯过程煤层气逸散量的近似补偿, 不可避免地会存在一定程

度的误差. 实质上, 煤芯煤层气在空气介质中解吸扩散为等压解吸过程, 而在钻井液条件下是个变压解吸过程^[5]. 两者完全不同, 也是不可替代的. 关于煤芯煤层气开始解吸的时间点, 直接法假定煤芯提至钻孔深度一半时开始解吸. 事实上, 煤芯煤层气在钻井液介质中的解吸, 与煤层原始气体压力和上覆钻井液柱的压力有关, 人为地将煤芯在钻孔中开始解吸煤层气的时间固定为煤芯提至钻孔深度的一半是不合理的. 只有当煤芯煤层气压力大于作用于煤芯上的钻井液柱压力时, 煤芯中气体才能发生解吸^[5,6].

同时, 传统的煤层含气量确定方法, 如美国矿务

引用格式: Yang Z B, Qin Y, Wang Z F, et al. Desorption-diffusion model and lost gas quantity estimation of coalbed methane from coal core under drilling fluid medium. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0027-x

局直接法、中国国家标准(GB/T 19559-2004)等,都是建立在煤芯中气体绝大部分以吸附态存在这一理论假设基础上的,不包括游离气和水溶气的含量^[7]. 中-高级煤中游离气较少,一般不超过 10%^[8]. 对于低煤级煤,游离气通常占总含气量的 50%以上^[7,9]. Pratt 等^[10]分析了美国波德盆地 Triton 井的煤芯含气量测试结果,认为由于没有将游离气和溶解气计算在内,使得含气量被低估了 22%.

鉴于上述原因,有必要对煤芯提取过程中煤层气逸散量求取理论进行新的探讨,建立钻井液条件下的煤芯煤层气解吸-扩散模型及逸散量求取方法,并将游离气纳入模型.

1 建模思路及数学模型推导

1.1 建模思路

在进一步理解煤芯中煤层气解吸、扩散、渗流机理的基础上,运用流体力学、热力学、工程数学、数学建模及钻探工程的知识,借鉴煤层气储层模拟方法,同时考虑影响煤层气解吸扩散的因素,如煤层原始气体压力、煤吸附性、煤孔隙率、煤的破坏类型(粒度)、煤的内在水分含量、提钻速度、介质压力和介质温度等,开展煤芯提取过程中煤层气解吸的物理模拟实验,建立以 Langmuir 方程和 Fick 定律为基础的煤芯煤层气解吸-扩散模型,同时将游离气纳入考虑. 在此基础上,进一步推导煤芯煤层气逸散量的求取模型和计算方法.

1.2 前提条件

为了保证逻辑关系合理的基础上使得模型具有较强的可操作性,需要对数学建模条件进行必要的简化:

(1) 煤层被理想化为由一系列裂隙切割成的规则的含微孔隙的基质块,即裂隙-微孔隙系统. 这些基质块可能是板状,柱状,或球状体.

(2) 在煤层气从煤基质块解吸出来的过程中,忽略应力对渗透率的影响和 Klinkenberg 效应^[11]. 也就是说,忽略煤基质收缩效应,扩散系数为常数.

(3) 煤芯在提取过程中,钻井液是不断循环流动的,故煤芯介质环境温度基本不变,即认为煤芯解吸-扩散过程是一个等温的过程.

(4) 煤基质系统中的气体主要为吸附态和游离态,吸附态气体服从 Langmuir 方程,游离态气体服从理想气体状态方程,扩散行为服从 Fick 第一定律. 其中,扩散包括体积扩散,Knudsen 扩散和吸附层的表面扩散. 整个过程为非平衡拟稳态过程.

(5) 煤芯在提取过程中,速度匀速,单位时间降压固定.

(6) 煤芯被揭露前,煤基质孔隙-裂隙系统中的煤层气压力处于平衡状态,没有解吸扩散行为的发生.

(7) 忽略介质圈闭及介质中的处理剂吸附和黏土矿物对煤芯有效降压的影响,即认为这些因素没有影响煤芯煤层气的正常解吸.

(8) 只有当煤芯上覆钻井液压力小于临界解吸压力时,煤芯中煤层气才开始解吸. 即认为:在煤芯提取过程中的储层压力和临界解吸压力差值时间段内,没有游离气的扩散运移;在钻井液柱压力小于临界解吸压力时,吸附气和游离气才会同时解吸或散失.

(9) 忽略煤芯中水分对煤层气解吸的影响,煤层气在煤芯中的扩散不存在两相流. 煤芯在提取过程中的解吸相当于煤层气向煤颗粒表面的解吸扩散,解吸表面积相对较大,时间较短,可忽略裂隙系统中的渗流.

1.3 数学模型推导

煤基质微孔系统中的煤层气(主要为甲烷,下同)吸附解吸平衡服从 Langmuir 方程:

$$C_p = \frac{V_L P}{P_L + P}, \quad (1)$$

式中, P 为煤基块裂隙流体压力, MPa; C_p 为平衡条件下煤基质微孔系统中的吸附气体浓度, cm^3/g ; V_L 为朗格缪尔体积, cm^3/g ; P_L 为朗格缪尔压力, MPa.

煤基质微孔隙-裂隙系统中的游离气服从理想气体状态方程:

$$PV = ZnRT, \quad (2)$$

式中, Z 为甲烷气体压缩因子; n 为气体物质的量, mol; R 为常数; P 为气体压强, MPa; V 为气体体积, cm^3 ; T 为气体温度, K.

所计算气体的体积均受温度和压力的影响,需要将气体体积校正到标准状态下(温度 0°C , 压力 101.33 kPa),才能做进行同一尺度下的比较和计算:

$$V_{STP} = \frac{T_0 \times P_m \times V_m}{Z \times P_0 \times T}, \quad (3)$$

式中, V_{STP} 为标准状态下的体积, cm^3 ; V_m 为孔隙体积, cm^3 ; T_0 为绝对温度, 273.15 K; P_0 为标准大气压, 101.33 kPa, P_m 为介质压力, MPa.

又, 由孔隙度公式和体积公式得到

$$V_m = \phi V_0, \quad m = V_0 \times \rho',$$

式中, V_0 为煤基质块体积, cm^3 ; ϕ 为孔隙度, %; m 为煤基质块质量, g; ρ' 为煤密度, g/cm^3 .

由此, 可求得游离气浓度与气体压力之间的关系:

$$C_r = \frac{V_{STP}}{m} = \frac{T_0 \times P_m \times \phi}{Z \times P_0 \times T \times \rho'}, \quad (4)$$

式中, C_r 为游离气浓度, cm^3/g . 为简化计算可以忽略甲烷压缩因子 Z 的影响.

气体从煤基质系统向裂隙系统的扩散过程服从于 Fick 第一定律:

$$\frac{dC}{dt} = D\sigma[C(p) - C], \quad (5)$$

$$C(p) = C_p + C_r = \frac{V_L P}{P_L + P} + \frac{T_0 \times P_m \times \phi}{P_0 \times T \times \rho'}. \quad (6)$$

煤基质单元系统与裂隙系统之间煤层气的交换率可用下式表达^[12~15]:

$$q = -F_g \frac{dC}{dt}, \quad (7)$$

式中, C 为基质单元内平均气体浓度, cm^3/g ; t 为扩散时间, min; $C(p)$ 为平衡条件下基质边缘气体浓度, cm^3/g ; D 为扩散系数; σ 为形态因子; F_g 为几何因子 (表 1); 其他符号同前.

煤基质系统在解吸过程中每个时刻都有平均气体浓度 C . 这一浓度与该时刻压力所控制的基块边缘气体浓度之间形成了浓度差, 符合 Fick 第一定律.

在钻井液环境下边界条件是变化的, 所以没有解析解, 只能用数值模拟的方法来获得解. 其初始条件为

$$C_0 = C(p^0) = C_p(P_c) + C_r(P_c) = \frac{V_L P_c}{P_L + P_c} + \frac{T_0 P_c \phi}{P_0 T \rho'}. \quad (8)$$

边界条件为

$$C(p) = \frac{V_L P_m}{P_L + P_m} + \frac{T_0 \times P_m \times \phi}{P_0 \times T \times \rho'} = \frac{V_L (P_c - \rho g v t \times 10^{-3})}{P_L + P_c - \rho g v t \times 10^{-3}} + \frac{T_0 \times (P_c - \rho g v t \times 10^{-3}) \times \phi}{P_0 \times T \times \rho'}, \quad (9)$$

式中, P_c 为临界解吸压力, MP; ρ 为钻井液密度, g/cm^3 ; v 为提钻速度, m/min; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 . 其他符号同前.

取步长 $\Delta t = t/N$, 在 $n \sim n+1$ 时段:

$$C(p^{n+1/2}) = \frac{C(p^{n+1}) + C(p^n)}{2}.$$

对方程(5)变形积分:

$$\int_{C^n}^{C^{n+1}} \frac{1}{C(p^{n+1/2}) - C} dC = D\sigma \int_{t^n}^{t^{n+1}} dt,$$

得到

$$\frac{C(p^{n+1/2}) - C^{n+1}}{C(p^{n+1/2}) - C^n} = e^{-D\sigma\Delta t}.$$

差分结果为

$$C^{n+1} = C^n \exp(-D\sigma\Delta t) + \frac{C(p^{n+1}) + C(p^n)}{2} [1 - \exp(-D\sigma\Delta t)]. \quad (10)$$

那么 $n \sim n+1$ 时段内, 煤基质向裂隙系统中解吸气体的平均解吸速率定义为

$$q^{n+1} = -F_g \times \frac{C^{n+1} - C^n}{\Delta t} = -\frac{F_g}{\Delta t} \left\{ C^n [\exp(-D\sigma\Delta t) - 1] + \frac{C(p^{n+1}) + C(p^n)}{2} [1 - \exp(-D\sigma\Delta t)] \right\}. \quad (11)$$

累积解吸扩散量:

$$Q_t = \sum_{n=0}^{N+1} q^{n+1} \Delta t = F_g (C_0 - C^{N+1}), \quad (12)$$

表 1 煤基质单元的几何因子和形态因子^[12]

微孔基质单元的几何形状	特征参数	几何因子(F_g)	形态因子(σ)
立方体	半厚度 h_i	2	$(\pi/2h_i)^2$
柱体	半径 R_i	4	$(2.4082/R_i)^2$
球体	半径 R_i	6	$(\pi/R_i)^2$

上式即为钻井液(泥浆、水介质)条件下的解吸-扩散数值模型。

2 物理模拟及数值模拟

2.1 物理模拟

本文物理模拟实验采用王兆丰研制的“钻井液中煤芯提取煤层气解吸自动模拟测试装置”(图 1)。模拟试验过程分为 3 个步骤: 第一步, 煤样真空脱气; 第二步, 煤样的甲烷平衡吸附, 根据所要测定模拟的煤层气压力, 向煤样罐充入高纯度甲烷气体; 第三步, 模拟煤样在钻井液中的提钻过程, 同时测定甲烷的解吸量。其中, 最为关键的是模拟取芯过程中介质压力线性降低的过程。煤芯钻井液介质压力间接由 N_2 的压力来代替。

将模拟参数(见煤深度、钻井液密度、提钻速度)输入计算机程序, 模拟提钻通过程序和数字阀共同控制 N_2 压力的线性降低来实现。观测解吸仪的量管中气泡的出现情况。当气泡开始出现时(相当于煤层

气开始解吸), 开始记录每分钟煤层气累积解吸量。程序运行完成时相当于煤样已提至地表, 此时煤样外部压力为大气压力。继续测定此后 15 min 内的煤层气解吸量。

本次模拟煤样基本情况见表 2, 煤级为贫煤, 煤体结构十分破碎, 属于典型的构造煤。

2.2 数值模拟

应用 Matlab 程序进行数值模拟。模型的主要求解方法是一个叠代求解过程, 实现比较简单, 模拟结果较为准确。

具体模拟过程如下:

(1) 输入所需参数, 包括 $V_L, P_c, P_L, T_0, P_0, T, t, \phi, \rho, \rho', g$ (重力加速度)及空气介质中的 (t, Q_t) 解吸实测数据点。模拟所需煤样参数见表 3。

(2) 求算 $D\sigma$, 由空气介质中初始解吸数据点求出。由空气介质中解吸公式求算: $-\ln(1-Q_t/Q_\infty)=D\sigma$ 。其中, Q_∞ 为在地表条件测得的煤芯煤层气解吸量和残气量之和, cm^3/g ; Q_t 为从地表解吸开始时刻 t 时的

图 1 装置示意图

表 2 煤样产出位置及基本性质描述

煤样 编号	产出位置			煤体结构	工业分析(%)				镜质组最大 反射率(%)
	产地	层位	深度(m)		A_d	W_d	C_F	V_{daf}	
SQ1	安阳	二 ₁ 煤	689~692	糜棱状	10.68	2.14	88.34	11.66	2.49
SQ3	安阳	二 ₁ 煤	856~858	糜棱状	15.37	1.34	67.29	16.72	2.27

表 3 数值模拟所需煤样参数

煤样编号	孔隙度(%)	视密度(g/cm ³)	$V_{L,daf}$ (cm ³ /g)	$P_{L,daf}$ (MPa)
SQ1	4.05	1.51	34.14	1.63
SQ3	4.00	1.48	29.63	1.66

初始累积解吸量, cm³/g.

(3) 代入数据求出 C_0 和 $C(p^0)$, 确定时间步长. 实际模拟发现, 当时间步长 $\Delta t=0.01$ min 时, 计算结果较为准确. 然后, 根据公式依次求出各个时间点的浓度和解吸量.

(4) 由计算结果生成 $t-Q_t$ 曲线, 数值模拟过程结束.

结果显示, 数值模拟曲线能够较为准确地拟合实测 $t-Q_t$ 曲线, 且提钻过程最终解吸量数值模拟值和物理模拟值较为接近(图 2, 3). 图 1 模拟条件为

图 2 SQ1 原煤样水介质中数值模拟曲线

图 3 SQ3 原煤样泥浆介质中数值模拟曲线

SQ1 原煤样, 煤层气压力 $P_{CH_4}=1.6$ MPa, 水介质密度 1 g/cm³, 提钻速度 $v=44.4$ m/min, 见煤深度 400 m, 在水介质中共解吸 3 min. 图 2 模拟条件为: SQ3 原煤样, 煤层气压力 $P_{CH_4}=3.0$ MPa, 泥浆密度 1.17 g/cm³, 提钻速度 $v=44.4$ m/min, 见煤深度 400 m, 在泥浆介质中共解吸 5 min.

3 实例测算结果

对河南省安阳矿区 S1, S2, S3 和 S4 煤层气井的煤样, 分别以直接法和数值模拟法测算煤芯煤层气逸散量, 结果见表 4.

分析测试结果发现: 数值模拟法测算结果普遍高于直接法测算结果, 尤其是在逸散时间较长时, 偏大的结果更为明显. Seidle 等^[16]和 Yee 等^[17]曾认为, 当取芯过程逸散量很大或逸散时间很长时, 直接法会造成逸散量推算结果偏低, 本文结果与此一致. 进一步分析发现: 当逸散时间较短($t<25$ min)时, 直接法和数值模拟结果基本一致; 当逸散时间较长($t>75$ min)时, 数值模拟结果普遍大于直接法计算结果, 平均偏大 4.01 cm³/g(图 4).

以美国矿务局直接法为基础的中国国家标准(GB/T 19559-2004)规定, 煤芯从提钻开始至井口的时间不得超过 10 min. 对比之下, 采用中国目前方法推得的煤芯煤层气逸散量普遍偏低, 结果是可能低估了中国煤层含气量, 这与中国煤层气矿井实际开采资源量大于相应范围勘探资源量的现实情况^[18]高度一致.

图 4 两种计算方法气体逸散量估算结果对比

表 4 不同方法气体逸散量估算结果^{a)}

钻孔 编号	煤样 编号	埋深(m)	解吸量(包括残气量) (cm ³ /g)	逸散时间(min)		逸散量(cm ³ /g)	
				泥浆	空气	直接法	数值模拟法
S1	SQ1-2	688.5	5.69	63	13	0.03	13.2
	SQ1-3	689.0	13.18	5.5	3	0.05	1.53
	SQ1-4	689.5	15.64	5.5	3	0.06	1.27
	SQ1-5	691.3	20.06	5.5	3	2.05	1.37
	SQ1-6	692.3	14.50	5.5	2	0.05	1.21
	平均	—	13.81	—	—	0.45	3.72
S2	SQ2-2	1104.2	10.82	8.5	2	0.53	0.54
	SQ2-3	1105.1	11.08	7.5	2	0.94	0.82
	SQ2-4	1106.8	6.97	150	6	5.17	6.58
	SQ2-5	1107.5	7.45	121	6	4.35	5.19
	SQ2-6	1109.0	6.53	105	8	5.22	6.88
	平均	—	8.57	—	—	3.24	4.00
S3	SQ3-2	856.5	8.69	130.5	4	8.3	11.28
	SQ3-3	857.0	11.62	4.5	5	1.07	1.28
	SQ3-4	857.6	10.64	4	8	1.48	1.69
	SQ3-5	858.0	10.17	4	8	1.06	1.26
	SQ3-6	859.0	10.00	9	5	0.91	1.12
	平均	—	10.22	—	—	2.56	3.33
S4	LS-2	636.4	15.52	4.5	4	2.23	1.73
	LS-3	636.9	22.03	4	6	0.87	0.40
	LS-4	638.4	20.37	4.5	2	2.45	1.1
	平均	—	19.31	—	—	1.85	1.08

a) 煤样含气量以空气干燥基为基准, 气体体积为标准状态下(0℃, 101.325 kPa)的体积

4 结论

现行各类煤芯煤层气逸散量推算方法, 均未考虑煤芯煤层气在空气介质和钻井液介质环境下解吸过程的差异, 可能导致煤层含气量测定结果发生偏差。导致偏差的原因, 在于煤芯煤层气在空气介质中的解吸-扩散为等压解吸过程, 在钻井液条件下却是变压解吸过程。为此, 本文综合考虑钻井液条件下影响煤层气解吸扩散的主要因素, 通过物理模拟实验, 基于 Langmuir 方程和 Fick 定律, 对煤芯提取过程中煤层气逸散量求取理论进行新的探讨, 建立了包括游离气在内的钻井液条件下煤芯煤层气解吸-扩散模

型及逸散量数值模拟求取方法。

研究结果显示: 数值模拟曲线能够较为准确地拟合 $t-Q_t$ 物理模拟曲线, 提钻过程最终解吸量数值模拟值和物理模拟值总体较为接近。进一步来看: 当逸散时间短于 25 min 时, 直接法和数值模拟法计算的结果基本一致; 当逸散时间 $t > 75$ min 时, 数值模拟结果普遍大于直接法测算结果。相比之下, 采用中国目前方法推得的煤芯煤层气逸散量普遍偏低, 结果可能是低估了中国煤层含气量。这一情况与中国煤层气矿井实际开采资源量大于相应范围勘探资源量的现实情况高度一致, 有必要在进一步研究的基础上考虑对中国现行国家标准予以修订。

致谢 胡义生同学在程序设计方面给予了帮助, 审稿专家提出了建设性的意见, 特此致谢。

参考文献

- 1 秦勇, 朱旺喜. 中国煤层气产业发展所面临的若干科学问题. 中国科学基金, 2006, 3: 148—151
- 2 Kissell F N, Meculloc C M. The Direct Method of Determining Methane Content of Coalbeds for Ventilation Design. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI7767, 1981

- 3 Smith D M, Williams F L. A new technique for determining the methane content of coal . In: Proceedings of the 16th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Atlanta: GA, 1981. 1267—1272
- 4 中国国家标准局. 煤层气含量测定方法(GB/T 19559-2004). 北京: 中国标准出版社, 2004. 1—16
- 5 王兆丰. 空气、水和泥浆介质中煤层气解吸规律与应用研究. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. 24—82
- 6 宁德义, 杨思敬. 地勘瓦斯含量测定方法的研究. 抚顺: 煤炭科学研究总院抚顺分院, 1995. 12
- 7 张新民, 韩保山, 李建武. 褐煤煤层气储集特征及气含量确定方法. 煤田地质与勘探, 2006, 34: 28—30
- 8 张新民, 张遂安, 钟玲文. 中国的煤层甲烷. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991. 2—100
- 9 Bustin R M, Clarkson C R. Free gas storage in matrix porosity: A potentially significant coalbed resource in low rank coals. In: Proceedings of the 1999 International Coalbed Methane Symposium, 1999. Tuscaloosa: The University of Alabama, 1999. 197—214
- 10 Pratt T J, Mavor M J, DeBruyn R P. Coal gas resource and production potential of subbituminous coal in Powder River Basin. Proceedings of the 1999 International Coalbed Methane Symposium. Tuscaloosa: The University of Alabama, 1999. 23—24
- 11 Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquid and gas. Drill Prod Prac APL, 1941. 200—213
- 12 Price H S, McCulloch R C, Edwards J C, et al. A computer model study of methane migration in coal beds. Canad Min Metallurg Bull, 1973, 66: 103—112
- 13 岳晓燕, 付晓云, 吴东平. 煤层气勘探开发模拟技术. 成都: 四川大学出版社, 2000. 11—135
- 14 苏现波, 程江峰, 孙俊民. 煤层气地质学与勘探开发. 北京: 科学出版社, 2001. 66—81
- 15 张冬丽, 王新海. 煤层气解吸机理数值模拟研究. 天然气工业, 2005, 25: 77—79
- 16 Seidle J P, Metcalfe R S. Development of Coalbeds Methane. SPE23025, 1991
- 17 Yee D, Seidle J P, Hanson W B. Gas Sorption on Coal and Measurement of Gas Content. In: Law B E, Rice D D, eds. Hydrocarbons From Coal. American Assoc Petrol Geol Stud Geol, 1993, 38: 203—218
- 18 秦勇. 中国煤层气产业化面临的形势与挑战(II): 关键科学技术问题. 天然气工业, 2006, 26: 4—8