煤层气解吸扩散渗流模型研究进展

石军太^①, 李相方^{①*}, 徐兵祥^②, 杜希瑶^①, 李彦尊^①,
温声明^③, 张冬玲^③

① 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;

② 中海油研究总院, 北京 100027;

③ 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028

*联系人, E-mail: lxfang@263.net

收稿日期: 2013-04-02; 接受日期: 2013-06-07

国家自然科学基金(批准号: U1262113)、中国石油大学(北京)科研基金(编号: YJRC-2013-37)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB219606)和国家科技重大专项(编号: 2011ZX 05038)项目资助

摘要 对煤储层基质孔隙分类、煤储层中气水变化特征、基质孔隙中甲烷的动力学行为、煤层气解吸模型、扩散模型、渗流模型和产气模型进行了综述和评论. 认为煤层气生产过程吸附气变为解吸气, 少量的解吸气溶解并在储层孔隙水中扩散. 大量的解吸气聚集成泡和成柱并在煤基质孔隙中的非达西渗流、自由气从煤基质孔隙至割理-裂隙系统的窜流、自由气从煤基质孔隙至井筒的非达西渗流(仅限低煤阶)、及自由气从割理-裂隙系统至井筒的达西渗流过程. 可为煤层气开发提供理论依据, 为煤层气数值模拟提供理论基础, 对煤层气产气规律的认识具有指导意义.

关键词 煤层气, 动力学, 解吸, 渗流, 扩散

PACS: 47.55.-t, 47.45.-n, 67.40.Hf, 82.40.Ck

doi: 10.1360/132013-154

1 引言

近十年来, 随着我国经济持续高速发展, 我国天然气需求增长速度将超过煤炭和石油, 而常规天然气资源却在不断减少, 由于供需差距增大而造成的供求矛盾已成为制约我国国民经济和社会可持续发展的一个十分严峻的问题, 而煤层气将作为补充气源, 在一定程度上可缓解我国天然气供应的紧张形势.

煤层气储层与常规石油天然气储层相比, 具有一些独有的特点, 如: 煤、气、水三相共存, 由微孔

隙和天然裂隙组成的双重孔隙系统, 并且微孔隙系统非常发育, 具有极大内表面, 吸附能力大等.

我国煤层气地质研究较深入, 但是气藏开发的相关技术、装备及队伍还略显薄弱, 对煤层气开采理论与技术还需要进一步深入研究, 特别是对煤层中煤层气的解吸、扩散、渗流机理等方面的认识仍然不足, 由于煤层气藏解吸扩散渗流机理的复杂性, 导致煤层气藏的生产规律掌握困难, 常常出现预测值与实际相差较大的现象, 这些都制约了对煤层气经

引用格式: 石军太, 李相方, 徐兵祥, 等. 煤层气解吸扩散渗流模型研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1548–1557

Shi J T, Li X F, Xu B X, et al. Review on desorption-diffusion-flow model of coal-bed methane (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1548–1557, doi: 10.1360/132013-154

济、有效地开采. 煤层气在割理-裂隙系统中流动满足渗流规律, 而基质微孔气体进入割理-裂隙系统的机理目前存在争议. 对于解吸气从基质孔隙运移到裂缝中的方式, 目前人们均没有考虑基质孔隙水的影响, 大都认为解吸气是在浓度差的作用下, 以单相气的形式扩散到裂缝中^[1-8]. 事实上, 在煤层气成藏的过程中, 生成甲烷的同时也会生成大量的水, 这些水以束缚水和毛细水等状态赋存在基质孔隙中. 基质孔隙中水的存在, 显著影响着解吸气在基质孔隙中的传递. 此外, 现有的数值模拟软件都基于目前普遍认可的扩散理论, 根据它所预测的气产量高峰总是比实际井出现得早, 且高产期比实际井的持续时间短^[9-11].

对于以上现象, 初步研究认为, 这是由于煤岩基质中水的存在影响了甲烷在基质中的相态变化和传递过程, 增加了传递的阻力, 从而出现上述现象.

本文对煤储层基质孔隙分类、煤储层中气水变化特征、煤层气解吸模型、扩散模型、渗流模型和产气模型进行了综述和评论, 并基于多相流流体传质与流动原理, 对基质孔隙中自由气受力分析, 描述了基质孔隙中自由气的动力学行为, 并提出了自由气在基质孔隙中的渗流模型, 揭示了煤层气井的产气规律. 此研究可为煤层气开发提供理论依据, 为煤层气数值模拟提供理论基础, 对煤层气产气规律的认识具有指导意义.

2 煤储层孔隙特征

为了研究煤层气解吸扩散机理及模型, 首先需认清煤储层的孔隙分布特征. 诸多学者对煤储层孔隙进行了分类^[8,12-16], 见表 1. 其中, 国际上较通用的分类为煤物理和煤化学行业普遍采用 Gan 等人^[14]和

IUPAC(国际纯化学与应用化学联合会)的分类方法. Хоцог^[12]提出了十进制分类方法, 傅雪海等人^[8]提出了更为详细的分类方法. 根据煤层基质孔隙中解吸气运移方式的不同, 将煤储层基质孔隙可分为基质微孔隙(<100 nm)和基质宏孔隙(>100 nm).

3 煤储层原位气水分布特征

众所周知, 煤层气割理-裂隙系统中充满水^[17-19], 但是关于煤基质孔隙中是否存在水, 若存在水的分布如何却存在争议. 在澄清煤储层的孔隙分类的基础上, 为了判别煤层解吸气在不同尺寸基质孔隙中的运移方式, 仍需研究煤储层的原始气水分布.

3.1 煤储层水分布

关于煤储层中水的分类, 目前也存在多种分类方法, 如下所述.

(1) 煤化学分析中水的分类.

煤化学分析中把水分为: 1) 填充在煤粒裂隙或大于 200 nm 的大孔隙中的外在水分; 2) 以物理化学方法结合在小于 200 nm 的煤基质孔隙中的内在水分, 和以化学方式与煤的矿物质结合、具有严格的分子比、且只有在高温下才能去除的化合水. 该分类方法认为煤基质孔隙中含水, 不过在基质微孔隙中水是以物理化学方法结合在一起的.

(2) 国外煤层气藏工程书中水的分类.

A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering(GRI, 1994)^[17]—书中讲到煤化过程产生水, 煤基质内含束缚水, 而割理-裂隙系统饱含水.

(3) 《煤层气地质学》(傅雪海等人^[8])中水的分类.

1) 自由水. 包括煤储层宏观裂隙、显微裂隙、大孔(孔直径 $d > 1000$ nm)、中孔($100 \text{ nm} < d < 1000 \text{ nm}$)中的水.

表 1 煤孔隙分类方法^[8,12-16]

Table 1 Classification of coal pores [8,12-16]

Хоцог(1961)	Dubin (1966)	Gan (1972)	IUPAC (1978)	抚顺煤研所 (1985)	吴俊 (1991)	杨思敬 (1991)	傅雪海(2005)
微孔, <10	微孔, <2	微孔, <1.2	微孔, <2	微孔, <8	微孔, <5	微孔, <10	微孔, <8
过渡孔, 10-100	过渡孔, 2-20	过渡孔, 1.2-30	过渡孔, 2-50	过渡孔, 8-100	过渡孔, 5-50	过渡孔, 10-50	过渡孔, 8-20
中孔, 100-1000					中孔, 50-500	中孔, 50-750	小孔, 20-65
							中孔, 65-325
							过渡孔, 325-1000
大孔, >1000	大孔, >20	粗孔, >1000	大孔, >50	大孔, >100	大孔, 500-7500	大孔, >1000	大孔, >1000

2) 束缚水. 包括在静电引力和氢键连结力作用下的强结合水(附着水), 处于强结合水的外层、受范德华力和强结合水最外层水分子的静电引力的合力影响的弱结合水(薄膜水)和过渡孔($10\text{ nm} < d < 100\text{ nm}$)、微孔 ($d < 10\text{ nm}$)中的毛细水。

许丕伟等人^[20]指出:“在整个煤层气生成过程中, 均有大量水的存在, 煤层水对于煤层气的赋存散失起着重要作用”。总之, 诸多学者均认为煤层基质孔隙中存在水。

3.2 煤储层原位气赋存方式

煤层基质孔隙中不仅含水, 还存在甲烷气. 对于煤层气原位赋存状态, 大量研究表明, 煤岩主要由基质和裂缝构成, 并且基质中发育有大量的孔隙. 煤层气主要有三种赋存方式: 吸附气、自由气和溶解气。

(1) 吸附气.

吸附气存在于煤基质孔隙内表面, 孔隙及裂隙赋存不同类型的水, 吸附气满足兰格缪尔方程, 如式(1)所示:

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

其中, V 为吸附量, m^3/m^3 ; V_L 为兰氏体积, m^3/m^3 ; P 为压力, MPa; P_L 为兰氏压力, MPa。

(2) 自由气.

自由气存在于煤孔隙或裂隙中, 符合真实气体状态方程, 如式(2):

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

其中, P 为压力; Z 为压缩因子; T 为温度; R 为气体常数, 等于 $0.008741\text{ MPa m}^3/(\text{Kmol K}) = 8.471\text{ Pa m}^3/(\text{mol K})$ 。

(3) 溶解气.

气体溶解在煤孔隙或裂隙水的部分, 其溶解度可用亨利定律描述:

$$C = k \cdot p, \quad (3)$$

其中, $1/k$ 为亨利常数, MPa; C 为浓度, mol/mol。

原位煤储集层基质孔隙与裂缝中水为连续相, 水中含有溶解气及(或)自由气, 对于中高煤阶煤, 大量煤层气吸附在煤岩颗粒表面, 80%–90%为吸附气, 8%–12%为自由气, 溶解气比例不足 1%^[8,18,19,21,22]; 对于低煤阶煤, 孔隙尺寸较中高煤阶煤大, 比表面积较小, 相对高阶煤来说, 游离气所占比例较高阶煤大, 其比例受到煤化程度、煤质、水分等影响^[22]。

3.3 煤储层甲烷在水中溶解度

亨利定律表明甲烷在纯净水中的溶解度很低, 在标准状态下(0.101 MPa, 20°C)甲烷在纯净水中溶解度约为 $0.03266\text{ m}^3/\text{m}^3$. 当压力为 2.8 MPa, 温度为 25°C(例如韩城煤层气藏), 甲烷在纯净水中溶解度约为 $0.8336\text{ m}^3/\text{m}^3$. 温度为 20°C–50°C、压力为 1–6 MPa 时, 甲烷在纯净水中的溶解度为 $0.2\text{--}2\text{ m}^3/\text{m}^3$. 由于煤层水含有一定矿化度, 在不考虑煤层水中的煤粉和 CO_2 对溶解度影响的情况下, 矿化度越大溶解度越小, 因此甲烷在煤层水中的溶解度通常比在纯净水中的溶解度更低。

不考虑多孔介质的非均质性对溶解及自由气形成的影响, 如果储层存在自由气, 对于同一水动力学系统, 认为甲烷在储层水中溶解饱和. 若无自由气, 认为甲烷在储层水中的浓度小于溶解度。

4 生产过程中煤储层气水变化特征

生产过程中, 煤储层基质孔隙中的气水变化特征与煤储层原始状态甲烷在水中的浓度与溶解度的大小有关^[23–28]. 以下按照煤储层原始状态甲烷在水中浓度小于或等于溶解度情况分别分析气水变化特征。

4.1 煤储层原始状态甲烷在水中浓度小于溶解度情况下

如果原始状态甲烷在水中浓度小于溶解度的煤层气藏, 随着排水降压, 煤储层基质孔隙中的气水变化经历如下过程。

(1) 开井后解吸气溶于水形成溶解气. 随着排水降压, 基质孔隙表面的吸附气将脱附形成解吸气分子, 继而溶解于水中发生扩散. 由于甲烷在水中的溶解度较低, 甲烷在水中很快溶解饱和。

(2) 溶解饱和后解吸气不再溶于水中发生扩散. 由于甲烷在水中的溶解度随着压力降低而降低, 因此一旦甲烷在水中的浓度大于该压力下的溶解度时, 继续排水降压将会始终保持过饱和, 直至废弃, 解吸气将不会再溶解(除非压力增高、改变液体矿化度等). 言外之意, 一旦甲烷在水中的浓度达到溶解度, 继续生产的过程将不会发生液相扩散, 而气相仅是渗流, 因此将不会出现浓度差驱动的扩散。

(3) 溶解饱和后溶解气溢出形成自由气. 溶解饱

和后, 将从饱和甲烷液分子的水溶液中溢出自由气(气泡), 压力越低, 溢出的自由气越多.

(4) 溶解饱和后随着压力降低解吸气直接转变成自由气.

自由气的运移仅是渗流, 一方面因为气相扩散需二元体, 而储层仅有甲烷气, 不能构成扩散需在二元体中进行的条件; 另一方面, 由于储层水的广泛存在, 自由气在水中属于气液两相, 不满足扩散只在单相中进行的条件.

4.2 煤储层原始状态甲烷在水中浓度等于溶解度情况下

煤储层原始状态甲烷在水中浓度等于溶解度情况下, 开井后储层水中已饱和甲烷液分子, 继续排水降压, 煤储层基质孔隙中的气水变化经历如下过程:

(1) 随着排水降压甲烷分子不会再溶于水而发生扩散;

(2) 随着压力降低溶解气溢出形成自由气. 随着压力降低, 溶解气将从饱和水溶液中溢出自由气(气泡), 压力越低, 溢出的自由气越多;

(3) 随着压力降低解吸气直接转变成自由气.

由此得出饱和煤层气藏(存在少量自由气, 煤储层原始状态甲烷在水中浓度等于溶解度), 开发全过程不会发生扩散. 其生产过程就是吸附气和溶解气向自由气转变和自由气渗流产出的过程.

5 煤层气解吸扩散渗流理论及模型

5.1 煤层气扩散理论

对于煤层气的扩散模型, 人们普遍认为解吸气是在浓度差的作用下从基质孔隙扩散到裂缝中, 进而在压差的作用下从裂缝渗流到生产井^[18,19,29-39]. 对于煤粒对气体的吸附放散特性的研究, 一般引用传质学中的菲克扩散定律. 扩散体系中的流体分子由高浓度向低浓度运动, 扩散速度与流体的浓度梯度呈线性正比关系.

GRI 组织^[17]介绍了煤层气扩散理论, 指出煤层中气体扩散包括: 诺森扩散、体扩散和表面扩散. 煤基质甲烷分子自高浓度向低浓度方向扩散进入割理-裂隙系统(如图 1). 扩散满足 Fick 第一定律, 表达式为

$$q_{\text{gm}} = \frac{8\pi DV_{\text{m}}}{s_{\text{f}}^2} (C_{\text{m}} - C(p)). \quad (4)$$

图 1 煤层气基质向割理-裂隙系统扩散^[17]

Figure 1 Diffusion of coal-bed methane from coal matrix to fractures (cleats) [17].

其中, q_{gm} 为扩散量; D 为扩散系数; V_{m} 为基质体积; S_{f} 为裂隙间距; C_{m} 为基质中气体浓度; $C(p)$ 为平衡吸附浓度.

非稳态非平衡解吸模型运用了菲克第二定律.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (5)$$

其中, C 为浓度, g/cm^3 ; t 为时间, s ; D 为扩散系数, cm^2/s ; x 为距离, cm .

1984 年 Smith 等人^[40]指出煤层气扩散为努森扩散、体扩散和表面扩散的共同结果, 其中哪一种起主要作用取决于煤孔隙结构和压力. 1986 年和 1988 年杨其銓^[41]和王佑安^[42]根据扩散传质理论和实验研究, 系统地论述了煤层瓦斯涌出、煤与瓦斯突出规律, 并提出了极限煤粒假说, 即当煤被破碎到一定小的割理时, 其中只含有扩散孔隙, 且扩散服从线性菲克扩散定律. 2000 年和 2001 年, 聂百胜和何学秋等人^[31,43,44]借用物理化学扩散理论分析了煤层甲烷在煤体中的扩散模式和微观机理, 得出在煤体中存在多种扩散模式: (1) 菲克型扩散; (2) 诺森扩散; (3) 过渡型扩散; (4) 表面扩散; (5) 晶体扩散. 其中, 菲克型扩散、诺森扩散、过渡型扩散统称为气相扩散, 煤层气的扩散以气相扩散为主, 表面扩散和晶体扩散量小. 2008 年闫宝珍等人^[38]结合前人的研究成果, 依据煤层气的相态以及在煤体中不同的扩散位置, 将煤层气在煤层中的扩散分为气相扩散、吸附相扩

散、溶解相扩散和固溶体扩散。气相扩散是指气体在煤层孔隙中的扩散; 吸附相扩散即通常所说的表面扩散, 是指处于吸附态的气体在煤颗粒外表面和孔隙内表面上的扩散; 溶解相扩散是指气体在煤体自由水中的扩散; 固溶体扩散则是指煤层气体以固溶体的形式在煤体中的扩散。

对于扩散过程, 普遍根据甲烷分子的平均自由程和孔径的相对大小, 将其分为 Fick 型、过渡型和 Knudsen 型^[37-39], 如图 2 所示。

Knudsen 数为

$$K_n = \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

其中, d 为孔隙平均直径, μm ; λ 为气体分子的平均自由程, μm 。

当 $K_n > 10$ 时, 孔隙直径远大于甲烷气体分子的平均自由程, 这时甲烷气体分子的碰撞主要发生在自由甲烷气体分子之间, 而分子和毛细管壁的碰撞机会相对较少, 称为菲克型扩散。当 $K_n < 0.1$ 时, 分子的平均自由程大于孔隙直径, 此时甲烷气体分子和孔隙壁之间的碰撞占主导地位, 而分子之间的碰撞退居次要地位, 此类扩散不再遵循菲克扩散, 此即 Knudsen 扩散。当 $0.1 < K_n < 10$ 时, 孔隙直径与甲烷气体分子的平均自由程相近, 分子之间的碰撞和分子与壁面的碰撞同样重要, 因此此时的扩散介于菲克型扩散与诺森扩散之间的过渡型扩散。

有些学者^[23-28]通过研究表明解吸气只有溶解于水中后方可发生单相浓度扩散, 自由气不能发生浓度扩散。原因有三: 第一, 煤层基质孔隙中水的存在, 出现了气水两相, 不满足单相的适用条件; 第二, 煤层中自由气的组分主要为甲烷, CO_2 , N_2 和重烃等其他气体含量极少, 煤层气开发中一般忽略 CO_2 , N_2 和重烃等其他气体, 因此可认为只有甲烷, 属于单组分,

不存在浓度的概念, 而 Fick 扩散需建立在二元及二元以上组分的基础上; 第三, 如果考虑 CO_2 , N_2 和重烃等其他气体, 且假设割理系统和基质孔隙中无水 (实际上存在水), 只有这些气体初始状态赋存于割理系统中, 方可发生甲烷由基质孔隙扩散进入割理系统, CO_2 , N_2 和重烃等其他气体由割理系统扩散进入基质孔隙, 但是 CO_2 , N_2 和重烃等其他气体初始状态不可能赋存于割理系统中, 而是和甲烷一起赋存于基质孔隙中, 因此事实上甲烷, CO_2 , N_2 和重烃等气体一起由基质孔隙向割理运移, 属于压力差驱动, 发生了宏观流动, 不满足 Fick 扩散须发生在没有宏观流动的前提。解吸气在溶解饱和之前, 溶解于水中的甲烷液分子将发生溶解相扩散, 此过程属于单相水中的浓度扩散, 可用 Fick 第一定律来表征^[23-28]。

5.2 煤层气渗流理论及模型

关于煤层基质孔隙中的渗流理论, Reeves 和 Pekot^[37]针对低阶煤提出三孔双渗理论, 认为低阶煤基质孔隙较大, 解吸气在孔隙与煤层割理-裂隙系统中均满足达西流动, 文中没有给出具体求解模型及求解方法, 同时未对目前普遍采用的扩散模型给予评价。Hosseini^[45]指出低煤阶煤基质孔隙大, 含有自由水, 基质中流体流动为气水两相流。文中同样没有描述基质孔隙内气体流动机理。

解吸气溶解饱和之后, 将不再溶解, 而且一旦溶解饱和就一直保持过饱和, 因此溶解扩散将不再发生, 因此通过溶解相扩散采出的气量很少。溶解饱和后甲烷分子逸出水面形成自由气 (包括气泡和气柱), 自由气在煤基质孔隙中的运移方式为压差驱动下的渗流。

(1) 气泡的渗流模型。

通过对煤岩基质孔隙中气泡 (一般在基质宏孔隙

图 2 甲烷以单相气在煤岩基质孔隙中的扩散分类示意图

Figure 2 Schematic diagram of diffusion types of gas phase in coal matrix pores.

中, 其孔隙直径大于 100 nm) 进行受力分析, 得出煤基质宏孔隙中气泡受浮力、重力、拖曳力、气泡内压(膨胀力)、外部水压和表面张力引起的附加压力的作用, 其中浮力为动力. 从而得出了气泡在煤基质宏孔隙中的动力学行为, 包括气泡的膨胀和气泡的宏观流动, 最终得出气泡在煤基质宏孔隙中的渗流模型为

$$-\frac{\Delta p_m}{\Delta L} = \frac{\mu_w}{k_m} \left[\frac{v_g}{\alpha} - \left(\sqrt{\left(\frac{\mu_w}{6\rho_w r} \right)^2 + 1.9975r \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) g} - \frac{4\mu_w}{3\rho_w r} \right) \cos \beta \right]. \quad (7)$$

其中, p_m 为基质孔隙压力, Pa; ΔL 为驱动距离, m; μ_w 为水的黏度, Pa s; k_m 为煤基质孔隙渗透率, m^2 ; v_g 为气体渗流速度, m/s; α 为含气率, f; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; r 为气泡半径, m; β 为基质孔隙方向与水平方向的夹角, 弧度.

(2) 气柱的渗流模型.

同样, 通过对煤岩基质孔隙中气柱(一般在基质微孔隙中, 其孔隙直径小于 100 nm) 进行受力分析, 得出煤基质微孔隙中气柱受气柱内压(膨胀力)、外部水压和毛管力的作用, 其中气柱内压(膨胀力)为动力. 从而得出了气柱在煤基质微孔隙中的动力学行为, 主要为气柱的膨胀, 最终得出气柱在煤基质微孔隙中的渗流模型为

$$-\frac{\Delta p_m}{\Delta L} = \lambda + a v_g. \quad (8)$$

其中, λ 为气柱渗流的启动压力梯度, Pa/m; a 为达西系数, Pa s/m².

6 煤层气产气数学模型

6.1 双孔单渗模型

国内外大量学者普遍认同双孔单渗模型^[1-8], 其基本观点为(如图 3 所示): (1) 气体自基质表面解吸; (2) 解吸气从基质孔隙扩散到割理-裂隙系统, 满足 Fick 等扩散定律; (3) 气体在割理-裂隙系统中渗流到井眼, 满足达西渗流定律.

Texas A&M 大学 Zulkarnain^[46]也指出解吸气经基质孔隙向割理扩散, 如图 4 所示.

Ma^[47]在国际石油会议(Canadian International

图 3 煤层气解吸-扩散-渗流模式图^[1]

(a) 从煤的内表面解吸, (b) 通过基质和微孔隙扩散, (c) 在天然裂隙网络中流动

Figure 3 Schematic diagram of desorption-diffusion-flow of coalbed methane [1]. (a) Desorbs from the inner surface of coal, (b) diffuses through matrix and micro-pores, (c) flows in natural fractures networks.

图 4 (网络版彩图)煤层气解吸扩散示意图^[46]

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of desorption and diffusion of coalbed methane [46].

Petroleum Conference)报告中重点阐述了煤层气排水降压解吸后气水相态变化特征, 鲜明地指出解吸气在水中形成气泡, 当气泡量足够多时形成连续的气流, 如图 5. 但仍没有对扩散提出质疑.

6.2 三孔双渗模型

(1) Reeves S & Pekot L 模型.

针对低阶煤基质孔隙较大的特点, 提出了三孔双渗模型, 模型原理图见图 6. 其中“三孔”指割理-裂隙系统、基质大孔隙和基质微孔隙; “双渗”指基质大孔隙到井眼渗流、裂缝到井眼渗流和基质裂缝间窜流. 同样, 他们认为基质微孔隙中气体解吸扩散进入大孔隙, 满足扩散定律.

(2) 三级扩散-渗流模式.

傅雪海等人^[8]基于煤储层三元结构系统(宏观裂隙、显微裂隙、孔隙), 总结出煤层气排水降压开发存在着三级渗流场, 即: 宏观裂隙系统(包括压裂裂缝)

图 5 (网络版彩图)煤层气排水-降压-生产相态变化^[47]

(a) 排水降压阶段, (b) 非饱和流阶段, (c) 气水两相流动阶段

Figure 5 (Color online) Phase transition during the water drainage-depressurization-production of coalbed methane [47]. (a) Water drainage and depressurization stage, (b) under-saturated flow stage, (c) gas-water two-phase flow stage.

图 6 “三孔双渗”模型原理^[37]

其中, M: 基质; F: 裂缝; 交换 I: 基质与裂缝间气体窜流; 交换 II: 微孔隙到大孔隙气体扩散.

Figure 6 Schematic diagram of “triple porosity and dual permeability” model [37], where, M: matrix; F: fractures; exchange I: Cross flow of gas between matrix and fractures; exchange II: Gas diffusion from micro-pores to large pores.

——煤层气的层流-紊流场; 显微裂隙系统——煤层气的渗流场; 煤基质块(孔隙)系统——煤层气的扩散场.

基于煤层气运移特征的煤孔隙分类见表 2.

6.3 双孔双渗模型

无论在双孔单渗模型或三孔双渗模型中, 国内外普遍认为煤层气从基质进入割理-裂隙系统的过程为浓度差驱动下的扩散, 满足 Fick 扩散定律. 李相方等人^[23-28]根据多相流体传质与流动原理得出分子扩散只发生在两元及其以上单相系统中, 认为煤层气只有甲烷气(其他微量气体不是讨论主题)一元, 在基质与割理裂隙之间只存在气体的密度差, 而不存在浓度差, 不满足 Fick 基于两元及其以上组分的扩散定律, 同时对于低煤阶煤, 孔隙及裂缝中还存在气和水, 属于两相^[45,47], 且因此不能满足分子扩散的条件. 事实上煤层气从基质孔隙进入割理-裂隙系统的过程为膨胀力作用下的物质运动过程, 属于压差驱动范畴. 由此针对低阶煤孔隙发育的特点, 提出了双孔双

表 2 煤层气三级扩散-渗流模式^[8]

Table 2 Three grade diffusion flow mode of CBM [8]

孔隙分级	孔隙分类	孔半径 (nm)	煤层气流动特征
扩散	微孔	<8	表面扩散
	过渡孔	8–20	混合扩散
	小孔	20–65	Knudsen 扩散
渗透	中孔	65–325	稳定层流
	过渡孔	325–1000	剧烈层流
	大孔	>1000	紊流

渗模型, 其中“双孔”包括基质孔隙和割理-裂隙系统, “双渗”包括基质孔隙中自由气向井筒的非达西渗流和割理-裂隙系统中自由气向井筒的达西或非达西渗流. 针对中高阶煤, 提出了双孔单渗模型, 其中“双孔”包括基质孔隙和割理-裂隙系统, “单渗”指割理-裂隙系统中自由气向井筒的达西或非达西渗流. 无论是双孔双渗模型还是双孔单渗模型, 自由气在基质孔隙中的运移均为非达西渗流, 从基质孔隙到割理-裂隙系统均为窜流, 不同之处在于: 双孔双渗比双孔单渗模型多了自由从基质孔隙到井筒的非达西渗流过程.

6.4 煤层气数值模拟软件

Price 等人^[48]开发的煤层气数值模拟软件 INTER-COMP-1 忽略了从基质孔隙到割理-裂隙系统的运移过程. Pavone 和 Schwerer^[49]开发的模拟软件 ARRAYS、Guo 等人^[50]开发的模拟软件、Jalali 等人^[51]编制的煤层气单井数值模拟器和目前商业化软件

Eclipse, CMG, COMET2 等均采用基于双孔单渗的拟稳态非平衡解吸模型. 国外已开发的 COMET3 煤层气数值模拟软件采用基于三孔双渗的非平衡解吸模型.

以上的煤层气数值模拟软件中的模型^[19,29,20,37,35,40,43,48-51]假设: 煤层气解吸后均以扩散的方式运移, 且满足 Fick 扩散定律. 其中, 三孔双渗模型^[37]除了以上假设, 还假设解吸后形成的自由气从基质大孔到割理-裂隙系统的运移方式是达西渗流. 这也是目前煤层气数值模拟软件不能很好预测实际煤层气井生产动态的原因之一.

未来的发展趋势是实验研究煤层气基质孔隙微观渗流机理, 揭示煤层气解吸渗流机理及开发规律, 编制符合煤层气藏开发动态的数值模拟器, 对煤层气产能评价与开发技术策略的制定至关重要.

7 结论

通过对煤层气解吸扩散渗流的研究, 得出如下结论.

(1) 多相流体流动与传质原理表明: 仅在单相流体中存在浓度差驱动的扩散, 气液易溶两相流体之间通过溶解进行扩散, 及气液不(微)溶两相流体通过压差驱动渗流. 据此认为目前煤层气以单相气体分

子扩散为基础的煤层气产气模型不符合实际.

(2) 煤层中自由气的组分主要为甲烷, 可认为是单组分, 不存在浓度的概念, 而 Fick 扩散需建立在二元及二元以上组分的基础上, 因此煤层气藏排水降压解吸气需首先溶解到水中, 而后发生扩散, 但是扩散量很小, 不是生产气的主要部分.

(3) 煤层气藏排水降压形成的自由气从基质进入到割理-裂隙系统中可以认为是压力扩散, 而不是目前意义上的分子扩散. 但是, 该情况压差是主要驱动力, 扩散次要.

(4) 煤层气藏排水降压过程中, 储层水中甲烷脱溶形成早期气核, 而后气泡聚并形成的连续气柱从基质孔隙进入到割理-裂隙系统运移的动力主要是连续气柱内气体的膨胀力. 基质孔隙孔喉结构及含气性影响排水降压形成连续气柱大小及进入割理-裂隙系统的难易程度.

(5) 压差驱动理论在于如果基质孔隙与割理-裂隙系统压差不足时间再长气体也不能进入割理-裂隙系统, 而扩散理论在于如果基质孔隙与割理-裂隙系统存在浓度差, 依据扩散速度随着时间延长气体能够进入割理-裂隙系统, 据此产能预测及开发技术政策将产生差异.

参考文献

- 1 Joseph C. Behavior of coal-gas reservoirs. In: the Proceeding of the SPE Eastern Regional Meeting. Pittsburgh: SPE, 1967
- 2 Karn F S, Friedel R A, Thames B M, et al. Gas transport through sections of solid coal. Fuel, 1970, 49(3): 249-256
- 3 Kolesar J E, Ertekin T, Obut S T. The unsteady-state nature of sorption and diffusion phenomena in the micropore structure of coal: Part 1-theory and mathematical formulation. SPE Form Eval, 1990, 5(1): 81-88
- 4 Saghafi A, William R J. Numerical simulation of flow of coalbed methane and prediction of methane drawing out (in Chinese). In: The 22nd International Mining Safety Conference. Beijing: Coal Industry Press, 1987 [Saghafi A, William R J. 煤层瓦斯流动的计算机模拟及其预测瓦斯涌出和抽放瓦斯的应用. 见: 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 Sun P D. Correction of the equation for gas flow in coal seams (in Chinese). Coal Geology & Exploration. 1993, 21(5): 61-62 [孙培德. 煤层瓦斯流动方程修正. 煤田地质与勘探, 1993, 21(5): 61-62]
- 6 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. 122-127
- 7 Wu S Y. Preliminary approach on the low of gas diffusion and permeation on coal seams (in Chinese). Shanxi Mining Inst Learned J, 1994, 12(3): 259-263 [吴世跃. 煤层瓦斯扩散渗流规律的初步探讨. 山西矿业学院学报, 1994, 12(3): 259-263]
- 8 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003
- 9 Sun P D. Study of flow in gas flow fields of coal seams (in Chinese). J China Coal, 1987, 12(4): 74-82 [孙培德. 煤层瓦斯流场流动规律的研究. 煤炭学报, 1987, 12(4): 74-82]
- 10 冯文光. 煤层气藏工程. 北京: 科学出版社, 2009
- 11 Yang J, Kang Y L, Li Q G, et al. Characters of micro-structure and percolation in tight sandstone gas reservoirs (in Chinese). Adv Mech, 2008, 38(2): 229-236 [杨建, 康毅力, 李前贵, 等. 致密砂岩气藏微观结构及渗流特征. 力学进展, 2008, 38(2): 229-236]
- 12 Хоцог В В. 煤与瓦斯突出. 宋世钊, 等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1976. 27-28
- 13 Dubinin M M, Walker Jr P L. Chemistry and Physics of Carbon. New York: Marcel Dekker, 1966. 51-120
- 14 Gan H C, Walker P L, Nandi S P. Porosity in American Coals. Research and Development Report. Interim Report Office of Coal Research, 1972

- 15 Wu J, Jin K L, Tong Y D, et al. Theory of coal pores and its application in evaluation of gas outburst proneness and gas drainage (in Chinese). *J China Coal Society*, 1991, 16(3): 86–95 [吴俊, 金奎励, 童有德, 等. 煤孔隙理论及在瓦斯突出和抽放评价中的应用. *煤炭学报*, 1991, 16(3): 86–95]
- 16 Yang S J, Yang F R, Gao Z Y. Pore system of coal and pore characteristics of coal burst (in Chinese). In: *The 2nd International Mining Science and Technology Conference*. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991. 771 [杨思敬, 杨福蓉, 高照祥. 煤的孔隙系统和突出煤的空隙特征. 见: 第二届国际采矿科学技术讨论会论文集. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991. 771]
- 17 Gas Research Institute. *A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering*. GRI Reference No. GRI-94/0397. 1994
- 18 Gray I. Reservoir engineering in coal seams: Part 1-the physical process of gas storage and movement in coal seams. *SPE Res Eng*, 1987, 2(1): 28–34
- 19 Gray I. Reservoir engineering in coal seams: Part2-observations of gas movement in coal seams. *SPE Res Eng*, 1987, 2(1): 35–40
- 20 Xu P W. The control effect of ground water on forming of coalbed methane in Fuxin basin (in Chinese). *Sci Technol Inf Heilongjiang*, 2010, 1: 22–23 [许丕伟. 阜新盆地地下水对煤层气成藏的控制作用. *黑龙江科技信息*, 2010, 1: 22–23]
- 21 Gregory J B, Karen C R. Hysteresis of methane/coal sorption isotherms. In: *the Proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans: SPE, 1986
- 22 苏现波. 煤层气地质学与勘探开发. 北京: 科学出版社, 2001
- 23 Xu B X, Li X F, Zhao M, et al. Study of gas-water two-phase flow in coal matrix. In: *the Proceeding of the 2010th International Conference on Multiphase Flow*. Tampa: Society of Petroleum Engineers, 2010
- 24 Xu B X, Li X F, Zhao M, et al. Research on the flow mechanism of coalbed methane from matrix to cleats (in Chinese). In: *2010 China Unconventional Gas Exploration and Development Technology Conference*. Xi'an: China Petroleum Society, 2010 [徐兵祥, 李相方, 赵明, 等. 煤层气从基质进入割理流动机理研究. 见: 2010 年中国非常规天然气勘探开发技术研讨会. 西安: 中国石油学会, 2010]
- 25 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气藏勘探与开发. 北京: 石油工业出版社, 2011
- 26 Li X F, Shi J T, Du X Y, et al. Transport mechanism of desorbed gas in coalbed methane reservoirs (in Chinese). *Petrol Explore Develop*, 2012, 39(2): 203–213 [李相方, 石军太, 杜希瑶, 等. 煤层气开发降压解吸运移机理. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 203–213]
- 27 Li X F, Shi J T, Du X Y, et al. Transport mechanism of desorbed gas in coalbed methane reservoirs. *Petrol Explore Develop*, 2012, 39(2): 1–12
- 28 石军太. 天然气藏相变渗流机理及其应用研究. 博士学位论文. 北京: 中国石油大学(北京), 2012
- 29 Thimons E D, Kissell F N. Diffusion of methane through coal. *Fuel*, 1973, 52(4): 274–280
- 30 Maricic N. Parametric and Predictive Analysis of Horizontal Well Configurations for Coalbed Methane Reservoirs in Appalachian Basin. Morgantown: West Virginia, 2004
- 31 Nie B S, He X Q, Wang E Y, et al. Mechanism and modes of gas diffusion in coal seams (in Chinese). *China Safety Sci J*, 2000, 10(6): 24–28 [聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 瓦斯气体在煤层中的扩散机理及模式. *中国安全科学学报*, 2000, 10(6): 24–28]
- 32 Deng J, Xu J C, Li L, et al. Experimental research on diffusion coefficient of oxygen in crashed coal (in Chinese). *J China Univ Mining & Technol*, 2003, 32(2): 145–147 [邓军, 徐精彩, 李莉, 等. 松散煤体中氧气扩散系数的实验研究. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(2): 145–147]
- 33 Li Q G, Kang Y L, Luo P Y, et al. Analysis of the factors affecting processes of CBM desorption, diffusion and percolation (in Chinese). *Coal Geology & Exploration*, 2003, 31(4): 26–29 [李前贵, 康毅力, 罗平亚. 煤层甲烷解吸-扩散-渗流过程的影响因素分析. *煤田地质与勘探*, 2003, 31(4): 26–29]
- 34 Guo L W, Xiao C Y, Liu Y X. Effect of coal pore structure on the CO proliferation (in Chinese). *J China Univ Mining & Technol*, 2007, 36(5): 636–640 [郭立稳, 肖藏岩, 刘永新. 煤孔隙结构对煤层中 CO 扩散的影响. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(5): 636–640]
- 35 Cao C R, Niu W, Zhang S A, et al. Diffusion and its influences of coalbed methane in coal reservoirs (in Chinese). *World Geology*, 2004, 23(3): 266–269 [曹成润, 牛伟, 张遂安, 等. 煤层气在煤储层中的扩散及其影响因素. *世界地质*, 2004, 23(3): 266–269]
- 36 Fu, X H, Qin Y, Zhang W H, et al. Pore fractal classification and natural classification of coal based on the transportation of coalbed methane (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2005, 50(Suppl I): 51–55 [傅雪海, 秦勇, 张万红, 等. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究. *科学通报*, 2005, 50(增刊 I): 51–55]
- 37 Reeves S, Pekot L. Advanced reservoir modeling in desorption-controlled reservoirs. In: *the Proceeding of the SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference*. Keystone: SPE, 2001
- 38 Yan B Z, Wang Y B, Ni X M. Coalbed methane diffusion characters based on nano-scaled pores under formation conditions (in Chinese). *J China Coal Soci*, 2008, 33(6): 657–660 [闫宝珍, 王延斌, 倪小明. 地层条件下基于纳米级孔隙的煤层气扩散特征. *煤炭学报*, 2008, 33(6): 657–660]
- 39 Guan J F, Hou R Y. Coal pore properties of matrix & cleat and their porosity measurement methods (in Chinese). *J North China Inst Water Conser Hydroelectric Power*, 1999, 20(1): 23–27 [管俊芳, 侯瑞云. 煤储层基质孔隙和割理孔隙的特征及孔隙度的测定方法. *华北水利水电学院学报*, 1999, 20(1): 23–27]
- 40 Smith D M, Wiliams F L. Diffusional effects in the recovery of methane from coalbeds. *SPE J*, 1984, 24(5): 529–535
- 41 Yang Q L. Theory of methane diffusion from coal cuttings and its application (in Chinese). *J China Coal Soci*, 1986, 11(3): 62–70 [杨其奎. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用. *煤炭学报*, 1986, 11(3): 62–70]
- 42 Yang Q L, Wang Y A. Mathematical simulation of the radial methane flow in spherical coal grains (in Chinese). *J China Univ Mining &*

- Technol, 1988, 3: 55–61 [杨其奎. 王佑安. 瓦斯球向流动的数学模型. 中国矿业大学学报, 1988, 3: 55–61]
- 43 Nie B S, Zhang L. Diffusion micro mechanism of coal bed methane in coal proes (in Chinese). *Coal Geology & Explor*, 2000, 28(6): 20–22 [聂百胜, 张力. 煤层甲烷在煤孔隙中扩散的微观机理. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6): 20–22]
- 44 He X Q, Nie B S. Diffusion mechanism of porous gases in coal seams (in Chinese). *J China Univ Mining & Technol*, 2001, 30(1): 1–4 [何学秋, 聂百胜. 孔隙气体在煤层中扩散的机理. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 1–4]
- 45 Hossein J. Effects of Resident Water and Non-Equilibrium Adsorption on the Primary And Enhanced Coalbed Methane Gas Recovery. Tucson: The University of Arizona, 2006. 14–15
- 46 Zulkarnain I. Simulation Study of the Effect of Well Spacing, Permeability Anisotropy, and Palmer and Mansoori Model on Coalbed Methane Production. Texas: Texas A&M University, 2005
- 47 Ma T. An introduction to coalbed methane. In: the Proceeding of the Canadian International Petroleum Conference. Calgary: Hycal Energy Research Laboratories, 2004
- 48 Price H S, McCulloch R C, Edwards J C, et al. A computer model study of methane migration in coal beds. *The Canadian Mining Metal Bull*, 1973, 66(737): 103–112
- 49 Pavone A M, Schwerr F C. Development of coal gas production simulators and mathematical models for well test strategies. Final Report under GRI Contract Number 5081-321-0457, 1984
- 50 Guo X, Du Z M, Li S L. Computer modeling and simulation of coalbed methane reservoir. In: the Proceeding of the SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting. Pittsburgh: SPE, 2003
- 51 Jalal J, Shahab D M. A coalbed methane reservoir simulator designed and developed for the independent producers. In: the Proceeding of the 2004 SPE Eastern Regional Meeting. Charleston: SPE, 2004

Review on desorption-diffusion-flow model of coal-bed methane

SHI JunTai¹, LI XiangFang^{1*}, XU BingXiang², DU XiYao¹, LI YanZun¹,
WEN ShengMing³, ZHANG DongLing³

¹ MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum at Beijing, Beijing 102249, China;

² CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;

³ Petrochina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China

Literature reviews on matrix pores classification, gas and water phase behavior characteristics, kinetic behavior of methane in coal matrix pores, desorption model, diffusion model, percolation model, and gas production model of Coal-bed Methane (CBM) are conducted. It is concluded that the production process of CBM includes adsorbed gas desorbing, a small amount of desorbed gas dissolving into water and diffusing, a large amount of gas nuclei escaping after saturated, gas bubble and column forming, gas bubbles and columns percolating in matrix pores, free gas cross-flowing from matrix pores to cleat-fracture system, free gas flowing from matrix pores to wellbore (in case of low stage coal seam), and free gas percolating from cleat-fracture system to wellbore. As a reference to development of CBM and a theoretical basis on numeric simulation of CBM, it is valuable to the better understanding of gas production discipline of CBM.

coal-bed Methane, kinetic, desorption, percolation, diffusion

PACS: 47.55.-t, 47.45.-n, 67.40.Hf, 82.40.Ck

doi: 10.1360/132013-154