

文章编号:2095-0411(2017)02-0086-07

页岩气储层基质纳米孔隙渗流模型研究进展

成景烨¹, 邢漪冉², 何岩峰¹, 唐 波¹, 窦祥骥¹, 王 相¹, 徐 慧¹

(1. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016; 2. 东营市胜利第一中学, 山东 东营 257027)

摘要:建立页岩气储层基质纳米孔隙中渗流模型是进行页岩气藏开发, 产能预测、数值模拟的基础。页岩气在基质纳米孔隙中的流动过程包括吸附解吸、扩散和黏性滑脱流。扩散类型有克努森扩散、菲克扩散、过渡扩散和表面扩散。得出了吸附解吸模型中计算页岩基质解吸附气量通常采用 Langmuir 等温解吸附方程的结论。现有扩散模型中多考虑克努森扩散, 但克努森扩散并不是基质中主要的扩散类型; 滑脱流模型中重点研究了滑脱渗透率的修正。表面扩散模型的研究较少, 是页岩气基质渗流下一步研究的重点之一。

关键词:页岩气; 储层基质; 纳米孔隙; 渗流模型; 扩散表面

中图分类号: TE 132. 2

文献标志码: A

doi: 10. 3969/j. issn. 2095-0411. 2017. 02. 015

Research on Shale Formation Matrix Nanopore Seepage Flow Model Progress

CHENG Jingye¹, XING Yiran², HE Yanfeng¹, TANG Bo¹, DOU Xiangji¹, WANG Xiang¹, XU Hui¹

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Shengli No.1 Middle School of Dongying, Dongying 257027, China)

Abstract: The foundation of shale formation matrix seepage flow model is the basis of shale gas reservoir development, production prediction and numerical simulation. Shale gas flow in matrix nanopore contains gas adsorption and desorption, diffusion and viscous slip flow. The gas diffusion divides into Knudsen diffusion, Fick diffusion, Transition diffusion and Surface diffusion. The results show that the shale gas desorption and adsorption model adopts Langmuir isotherm equation when calculates gas desorption and adsorption volume; the current diffusion model usually considers Knudsen diffusion, however Knudsen diffusion may be not the main diffusion type in matrix; seepage flow model research focuses on the slip permeability coefficient correction. The adsorption gas surface diffusion research is not enough, which maybe the main point in the following shale matrix seepage flow model research.

Key words: shale gas; formation matrix; nanoscale pore; seepage flow model; surface diffusion

页岩气是指以自由气、吸附气、溶解气等形式赋存在页岩内的天然气^[1]。页岩气从裂缝到井筒的流动, 以及从井筒到地面的流动规律和流动机理已经研究得十分透彻, 但页岩气在基质纳米孔隙中的传输机理, 以及从页岩基质到裂缝的运移机理还没有完全认识清楚。页岩气藏开发、产能预测和数值模拟研究都是以建立页岩气储层基质的渗流模型为基础。由于页岩气藏开采过程中起决定作用的是渗流机理, 因此, 开展页岩

收稿日期: 2016-04-15。

基金项目: 国家青年基金资助项目(51506012)。

作者简介: 成景烨(1991—), 男, 山东东营人, 硕士生。通讯作者: 何岩峰(1973—), E-mail: heyanfeng@cczu.edu.cn

气储层渗流模型的研究具有十分重要的现实意义。页岩气储层基质的渗流过程不同于常规油藏达西渗流,包括了基质壁面的吸附解吸、基质纳米孔隙中气体扩散、渗流、吸附气表面扩散。

1 吸附解吸模型

常用吸附解吸气量计算方程有 Langmuir 方程、BET 方程、Bi-Langmuir 方程以及试验数据拟合方程。

1.1 Langmuir 方程

Langmuir^[2]提出了单分子层吸附的状态方程,其假设分子是吸附在吸附位上,每个吸附位吸附一个分子;吸附剂表面是均质的;相邻吸附位吸附分子没有相互作用。Langmuir 等温方程数学表达式为

$$v = v_L \frac{p}{p + p_L} \quad (1)$$

式中: v 为吸附量, m^3 ; p 为气体压力, MPa ; p_L 为 Langmuir 压力, MPa ; v_L 为 Langmuir 体积, m^3 。

令 $b = 1/p_L$, 上式可以变形为:

$$v = v_L \frac{bp}{1 + bp} \quad (2)$$

$$b = a \frac{e^{\frac{Q}{RT}}}{\sqrt{T}} \quad (3)$$

式中: b 为 Langmuir 常数, 温度和吸附热的函数; a 为系数; Q 为吸附热, J ; R 为通用气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度, K 。

1.2 B. E. T 方程

由于 Langmuir 等温方程不能很好的描述气体在泥岩富含有机质表面的吸附, Brunauer 等^[3]进一步提出了 B. E. T 等温方程描述多分子层的吸附, 假设吸附剂表面是均质的, 分子间没有横向相互作用, 最高层吸附气处于平衡状态。其数学表达式为:

$$v = v_m \frac{cp}{(p_0 - p) [1 + (c - 1) p/p_0]} \quad (4)$$

$$c = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right) \quad (5)$$

式中: v_m 为整个吸附剂表面被单层分子完全覆盖时最大气体吸附体积; p 为气体压力, MPa ; p_0 为饱和气体压力, MPa ; c 为与气体吸附热有关的常数; E_1 为首层的吸附热; E_L 为第 2 层和更高层液化热。

1.3 Bi-Langmuir 方程

在页岩中存在不同介质可以吸附气体, 假设吸附剂均匀对于页岩不很合理。因此基于非均质吸附剂假设扩展 Langmuir 模型^[4], 考虑页岩中两种主要的对于气体吸附影响大的矿物: 粘土和干酪根。假设在两种矿物组分是均质吸附剂, 得到 Bi-Langmuir 模型, 其数学表达式为:

$$\frac{N_a}{N_m} = f_1 \frac{k_1(T)p}{1 + k_1(T)p} + f_2 \frac{k_2(T)p}{1 + k_2(T)p} \quad (6)$$

$$k(T) = k_0 T^{-\frac{1}{2}} \exp(-E/RT) \quad (7)$$

式中: N_a 为总的吸附气量; N_m 为指单层覆盖下总的吸附量; f_i 为指单层覆盖第 i 类吸附与单层覆盖总吸附量的比值; $k_i(T)$ 为第 i 类吸附的平衡常数; k_0 为与温度无关的常数; E 为特性吸附能; $k(T)$ 为与 Langmuir 等温吸附方程 Langmuir 常数 b 的另一种表达形式。

Lu Xiaochun^[5-6]和张志英^[7]用 Bi-Langmuir 模型拟合页岩样品中气体解吸过程取得好的结果。

1.4 试验数据拟合分析模型

马东民^[8]提出煤等温解吸过程的 Weibull 模型, 其数学表达式为

$$n = n_0 \theta = n_0 [1 - \exp(-bp^q)] \quad (8)$$

式中: θ 为覆盖度; n 为覆盖度为 θ 时的吸附量, m^3 ; n_0 为饱和吸附量, m^3 ; b 为与焓变有关的参数; p 为压力, MPa ; q 为系数。

马东民^[9]在 Langmuir 等温解吸方程的基础上,引入匮乏压力下的残余吸附量 c ,提出煤等温解吸过程解吸式模型,其数学表达式为

$$v = v_d \frac{p}{p_d + p} + c \quad (9)$$

式中: v 为煤层气解吸到 p 压力下的煤层气残余吸附量, m^3 ; v_d 为煤样最大吸附容量, m^3 ; p_d 为吸附速度、解吸速度与吸附热综合函数, MPa ; c 为匮乏压力下的残余吸附量, m^3 。

2 扩散模型

气体扩散描述的是基质中气体从生成到进入裂缝前的过程。气体扩散类型包括克努森扩散、菲克扩散、过渡扩散和吸附气表面扩散。

纳米孔隙中气体扩散质量流量的表达式为

$$J = MD \nabla C \quad (10)$$

式中: J 为气体质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; D 为气体扩散系数, m^2/s ; C 为气体浓度, mol/m^3 ; M 为摩尔质量, kg/mol 。

2.1 克努森扩散

克努森扩散表现为分子与孔壁面之间的碰撞,克努森数 $n_K \geq 10$ 。Knudsen 扩散系数数学表达式为^[10]

$$D_K = \frac{\varphi}{\tau} \frac{d_n}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} \quad (11)$$

式中: D_K 为有效克努森扩散系数, m^2/s ; φ 为孔隙度; τ 为迂曲度; d_n 为孔隙直径, m ; M 为页岩气摩尔质量, kg/mol 。

2.2 菲克扩散模型

菲克扩散表现为自由气体分子之间的碰撞, $n_K \leq 0.1$ 。菲克扩散系数数学表达式为

$$D_F = \frac{\varphi}{\tau} \frac{k_B T}{3\pi\mu_g d_g} \quad (12)$$

式中: D_F 为有效菲克扩散系数, m^2/s ; d_g 为气体分子直径, nm ; k_B 为 Boltzmann 常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$; μ_g 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.3 过渡扩散

过渡扩散表现为自由分子之间的碰撞和分子与孔壁之间的碰撞,Knudsen 数满足 $0.1 < n_K < 10$,过渡扩散系数数学表达式为

$$D_T = (D_F^{-1} + D_K^{-1})^{-1} \quad (13)$$

式中 D_T 为有效过渡扩散系数, m^2/s 。

2.4 吸附气表面扩散

气体吸附在页岩基质孔隙表面上,吸附气的浓度与压力有关,在气体流动方向上存在浓度梯度,吸附气在浓度梯度的作用下可以沿固体表面运动,其扩散速度与浓度梯度成正比^[11]。气体表面扩散系数表达式^[12]为:

$$D_s = D_s^0 \frac{(1-\theta) + \frac{\kappa}{2}\theta(2-\theta) + [H(1-\kappa)](1-\kappa)\frac{\kappa}{2}\theta^2}{\left(1-\theta + \frac{\kappa}{2}\theta\right)^2} \quad (14)$$

$$H(1-\kappa) = \begin{cases} 0, \kappa \geq 1 \\ 1, 0 \leq \kappa \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\kappa = \frac{\kappa_b}{\kappa_m} \quad (16)$$

式中: D_s 为气体表面扩散系数, m^2/s ; D_s^0 为基质表面覆盖率为“0”时气体表面扩散系数, m^2/s ; κ 为表面气体分子阻塞系数, 无因次; $H(1-\kappa)$ 为 Heaviside 函数, 无因次; κ_m 为表面气体分子前进速度常数, m/s ; κ_b 为表面气体分子阻塞速度常数, m/s 。

当 $\kappa \geq 1$ 时, 吸附气表面扩散停止; 当 $0 \leq \kappa \leq 1$ 时, 吸附气将发生表面扩散。

吴克柳等^[13]认为页岩纳米孔气体扩散 n_K 区间为 0.000 2~6, 过渡扩散是纳米孔中气体扩散的主要形式。

3 滑脱模型

3.1 Klinkenberg 模型

Klinkenberg^[14]研究了气体滑脱效应对气体渗透率的影响, 并引入了滑脱因子, 其数学表达式为:

$$k_a = k_\infty \left(1 + \frac{b_k}{p} \right) \quad (17)$$

$$b_k = 4c\lambda p/r \quad (18)$$

$$\lambda = \sqrt{\pi ZRT/(2M)} \mu_g/p \quad (19)$$

式中: k_a 为表观渗透率, mD ; k_∞ 为绝对渗透率, mD ; p 为平均孔隙压力, MPa ; b_k 为 Klinkenberg 滑脱因子, MPa ; r 为平均孔隙喉道半径, m ; Z 为气体压缩因子; T 为温度, K ; λ 为气体分子平均自由程, m ; μ_g 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; c 为常数。

3.2 Ertekin 模型

Ertekin^[15]等基于基质内黏性流动和扩散流同时流动的假设, 修正了 Klinkenberg 模型滑脱因子 b_k , 引入了动滑脱因子 b_a , 其数学表达式为:

$$b_a = \frac{pc_g\mu_g D}{a_{c2}k_\infty} \quad (20)$$

$$k_a = k_\infty \left(1 + \frac{b_a}{p} \right) \quad (21)$$

式中: D 为气体扩散系数, m^2/s ; c_g 为气体压缩系数, MPa^{-1} ; a_{c2} 为单位转换系数。

Javadpour^[16]给出了考虑克努森扩散和滑脱流的表观渗透率, 其数学表达式为:

$$k_a = k_\infty \left\{ \frac{2\mu M}{3RT\bar{\rho}} D_K \frac{8}{r} + F \right\} \quad (22)$$

$$F = 1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right) 0.5 \frac{\mu}{\bar{p}r_n} \left(\frac{2}{a} - 1 \right) \quad (23)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为纳米孔隙内气体平均密度, 单位 kg/m^3 ; R 为通用气体常数, $8.314 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; \bar{p} 为平均压力, Pa ; r_n 为孔隙半径, m ; a 为切向动量供给系数, 其取值在 0~1 之间。

3.3 B-K 表观渗透率模型

Beskok 和 Karniadakis^[17]提出了气体表观渗透率计算公式, 该公式对不同流态模型均适用, 其数学表达式为

$$k_a = k_\infty (1 + ak_n) \left(1 + \frac{4k_n}{1 - bk_n} \right) \quad (24)$$

式中: a 为无因次稀疏系数; b 为微管模型中气体流动的滑脱系数, 通常取 -1 。

Civan^[18] 在 Beskok-Karniadakis 模型基础上, 给出无因次稀疏系数 a 表达式为

$$a = \frac{a_0}{1 + \frac{A}{k_n^B}} \quad (25)$$

式中: $A=0.170$; $B=0.434$; $a_0=1.358$ 。

4 页岩气基质渗流模型

郭为等^[19]进行了页岩基质流动物理模拟实验。假设页岩基质为均质, 页岩气解吸附量计算按照解吸式模型。考虑基质中气体的解吸、扩散和黏性滑脱流动, 基于气体流动连续性方程, 建立页岩气基质渗流数学模型并进行数值求解, 其模型数学表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{kM_g}{RT} \nabla \left(\frac{p}{\mu Z} \nabla p \right) + \frac{D\varphi(1-S_w)M_g}{RT} \nabla \cdot \nabla \left(\frac{p}{Z} \right) + \frac{DV_d p_d \rho_r \rho_a}{(p+p_d)^2} \nabla \cdot \nabla p = \\ \frac{\varphi(1-S_w)M_g}{RT} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{Z} \right) + \frac{V_d p_d \rho_r M_g}{(p+p_d)^2 V_{std}} \frac{\partial p}{\partial t} + Q \end{aligned} \quad (26)$$

式中: k 为基质渗透率, m^2 ; M_g 为气体摩尔分子质量, kg/mol ; T 为温度, K ; p 为压力, Pa ; μ 为气体粘度, $Pa \cdot s$; Z 为气体压缩因子; D 为气体扩散系数, m^2/s ; φ 为页岩孔隙度, 无量纲; S_w 为含水饱和度, 无量纲; V_d 为页岩解吸过程中最大吸附容量, m^3/kg ; p_d 为吸附速度、解吸速度与吸附热综合函数, Pa ; ρ_r 为页岩储层岩石密度, kg/m^3 ; ρ_a 为标况条件下气体密度, kg/m^3 ; V_{std} 为标准状态下气体的摩尔体积, $22.4 \times 10^{-3} m^3/mol$; Q 为源汇项, $kg/(m^3 \cdot s)$ 。

吴剑等^[20]同样假设页岩基质为均质, 纳米孔隙为圆形管道, 储层为定温定压生产, 孔隙边界气体浓度变化符合亨利定律, 气体解吸符合 Langmuir 等温吸附规律。在考虑基质气体解吸、克努森扩散、黏性滑脱基础上又考虑溶解了溶解于干酪根中气体的扩散, 采用微元法推导出页岩气孔隙基质渗流模型, 其数学表达式为

$$\frac{k_a M}{RT} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{2b\omega_a}{r_n (1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{2rD_e M}{r_n^2} \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{pMC_g}{ZRT} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (27)$$

式中: k_a 为基质表观渗透率, m^2 ; b 为 Langmuir 常数, Pa^{-1} ; ω_a 表示单位有效表面积气体分子质量, kg/m^2 ; r 为干酪根半径, m ; r_n 为模型孔隙半径, m ; C 为任意时刻在干酪根中的气体浓度, mol/m^3 ; D_e 为气体有效扩散系数, m^2/s ; C_g 为气体压缩系数, MPa^{-1} 。

夏阳等^[21]假设基质为连续介质, 页岩气解吸附为非线性非平衡 Langmuir 解吸附过程。除考虑页岩气在孔隙中的黏性流动、克努森扩散外, 还考虑了吸附气表面扩散以及滑移的影响, 分别建立了自由气和吸附气的扩散方程以及页岩气在基质与裂缝中的裂缝渗流模型, 其数学表达式为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{k_m RT}{\mu \varphi} \nabla \cdot (C \nabla C) = -\frac{1-\varphi}{\varphi} R_{net} + D_m \nabla^2 C \quad (28)$$

$$\frac{\partial C_\mu}{\partial t} + \nabla \cdot (C_\mu v_s) = R_{net} + D_{ad} \nabla^2 C_\mu \quad (29)$$

$$R_{net} = \tilde{k}_a \left(1 - \frac{C_\mu}{C_{\mu s}} \right) C - k_d C_\mu \quad (30)$$

式中: C 为孔隙中的自由气浓度, mol/m^3 ; C_μ 为孔隙中吸附气浓度, mol/m^3 ; k_m 为压裂改造后的基质渗透率, m^2 ; φ 为基岩孔隙度; R_{net} 为单位时间内吸附浓度, $mol/(m^3 \cdot s)$; D_m 为克努森扩散系数, m^2/s ; v_s 为岩石变形速率, m/s ; D_{ad} 为吸附气在岩石表面的扩散系数, m^2/s ; \tilde{k}_a 为吸附速率, s^{-1} ; $C_{\mu s}$ 为页岩基质孔隙的气体最大吸附浓度, mol/m^3 ; k_d 为解吸附速率, s^{-1} 。

苏玉亮等^[22]假设页岩气储层等温开发, 页岩气解吸按照 Langmuir 等温吸附方程计算。干酪根介质页岩气运移考虑吸附解吸、克努森扩散和表面扩散, 无机介质中考虑克努森扩散及黏性滑脱流, 基于气体流动

的连续性方程,分别建立页岩基质中干酪根介质和无机基质中渗流方程。

干酪根介质渗流方程:

$$\frac{\mu_g \varphi_k C_{tk}}{RT} \frac{\partial \varphi_k}{\partial t} = \frac{K_k}{RT} \nabla \cdot (\nabla \varphi_k) \quad (31)$$

$$C_{tk} = C_{tg} + \epsilon_{ks} \frac{C_{\mu s} ZRT}{\varphi_k (p_L + p_k)^2} \quad (32)$$

$$K_k = D_{kk} C_{tg} \mu_g + \varphi_k D_s \mu_g (C_{tk} - C_{tg}) \quad (33)$$

式中: C_{tk} 为干酪根介质压缩系数, MPa^{-1} ; K_k 为干酪根表观渗透率, m^2 ; C_{tg} 为气体压缩系数, MPa^{-1} ; $C_{\mu s}$ 为固体表面最大吸附浓度, mol/m^3 ; p_L 为兰格缪尔压力, MPa ; p_k 为干酪根介质中的气体压力, MPa ; φ_k 为干酪根介质中的气体拟压力, MPa/s ; D_{kk} 为干酪根中克努森扩散迂曲度修正系数, m^2/s 。

无机基质中渗流方程:

$$\frac{\varphi_m C_{tg} \mu_g}{RT} \frac{\partial \varphi_m}{\partial t} = \frac{k_m}{RT} \nabla \cdot (\nabla \varphi_m) \quad (34)$$

$$k_m = \mu_g \varphi_m D_{km} C_{tg} + F k_{m0} \quad (35)$$

式中: k_m 为无机基质中气体表观渗透率, mD ; φ_m 为无机基质中气体拟压力, MPa/s ; F 为滑脱因子; k_{m0} 为无机基质渗透率, mD ; D_{km} 为无机基质中努森扩散迂曲修正系数, m^2/s 。

盛茂等^[23]假设页岩孔隙可概化为毛管束,采用 Langmuir 等温吸附方程计算页岩吸附质解吸量,将气体吸附作用引起的自由气浓度变化作为源项处理。考虑吸附气表面扩散、黏性滑脱流动、气体解吸附和孔内扩散,由质量守恒方程建立了页岩气页岩基质孔隙渗流控制方程,其数学表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\varphi M}{ZRT} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{(1-\varphi) \rho_s M}{V_{\text{std}}} \left[\frac{q_L}{p_L + p} - \frac{q_L p}{(p_L + p)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left[\rho_g \frac{r^2 \varphi}{8 \mu M} + \rho_g \frac{r^2 \varphi}{4 \mu M} \frac{p_L}{p} + \rho_g \frac{D_s (1-\varphi) \varphi C_{\mu}}{\rho_{\text{ads}} p} \right] \right. \\ \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2 r \varphi}{3 Z} \sqrt{\frac{8 M}{\pi R T}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_s \frac{(1-\varphi) C_{\mu}}{p} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (36)$$

式中: ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; μ 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为孔隙气体压力, MPa ; φ 为基质孔隙度。

吴克柳等^[24]重点考虑纳米孔中气体滑脱流动和克努森扩散,按照流量贡献权重系数进行叠加得到纳米孔气体总传输量,其数学表达式为

$$J_b = -\frac{1}{1+n_K} \zeta_{mb} \frac{r^2 p}{8 \eta R T} (1+an_K) \left(1 + \frac{4n_K}{1-bn_K} \right) \cdot \frac{dp}{dl} - \frac{1}{1+\frac{1}{n_K}} \frac{2}{3} \zeta_{mb} r \delta^{D_f-2} \left(\frac{8}{\pi R T M} \right)^{0.5} \frac{dp}{dl} \quad (37)$$

式中 ζ_{mb} 为气体在多孔介质中流动时的修正系数,无因次; r 为孔隙半径, m ; a 为稀有效应系数,无因次; b 为气体滑脱常数,无因次。

假设纳米孔中气体为理想气体,吸附与解吸存在动态平衡,根据 Maxwell-Stefan 方法,纳米孔吸附气表面扩散量可以表示为

$$J_s = -D_s^0 \frac{\zeta_{ms} C_s}{MP} \frac{\partial p}{\partial l} \quad (38)$$

式中 D_s^0 为气体覆盖度为“0”时的表面扩散系数, m^2/s 。

纳米孔隙总传输量可通过吸附气表面扩散量和纳米孔气体传输量简单相加得到。

5 结 论

本文针对页岩基质纳米孔隙中页岩气的渗流行为,从吸附解吸模型、扩散模型、滑脱模型、吸附气表面扩散模型、页岩气基质渗流模型等几个方面分析了页岩气在储层基质纳米孔隙中的渗流规律。当前,吸附解吸模型中计算页岩基质解吸附气量通常采用 Langmuir 等温解吸附方程;现有扩散模型中多考虑克努森扩散,但克努森扩散并不是基质中主要的扩散类型;渗流模型中重点研究了滑脱渗透率的修正。页岩气在基质中的传输机理复杂,其流动过程仍有许多问题需要解决,主要包括以下 3 个方面:吸附气在纳米孔隙壁面的表

面扩散;储层基质的内部结构如天然裂缝网络对页岩气渗流的影响;储层基质中不同介质如基质纳米孔隙和天然裂缝之间的页岩气渗流规律。

参考文献:

- [1]陈晓明,李建忠,郑民,等.干酪根溶解理论及其在页岩气评价中的应用探索[J].天然气地球科学,2012,23(1):14-18.
- [2]LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Journal of American Chemical Society, 1918, 40(9):1403-1461.
- [3]BRUNAUER S, EMMETT P H, TELLER E. Adsorption of gases in multimolecular Layers[J]. J Am Chem Soc, 1938, 60: 309-319.
- [4]JARONIEC M, MADEY R. Physical Adsorption[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [5]LU X C, LI F C, WATSON A T. Adsorption studies of natural gas storage in Devonian Shales[J]. Spe Formation Evaluation, 1995, 10(2):109-113.
- [6]LU X C, LI F C, WATSON A T. Adsorption measurements in Devonian shales[J]. Fuel, 1995, 74(4):599-603.
- [7]张志英,杨盛波.页岩气吸附解吸规律研究[J].实验力学,2012,27(4):492-497.
- [8]马东民.煤层气吸附解吸机理研究[D].西安:西安科技大学,2008.
- [9]马东民,张遂安,蒯亚兵.煤的等温吸附-解吸实验及其精确拟合[J].煤炭学报,2011,36(3):477-480.
- [10]IGWE G J I. Gas Transport Mechanism and Slippage Phenomenon in Porous Media[R]. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1987.
- [11]BAE J S, DO D D. Permeability of subcritical hydrocarbons in activated carbon[J]. AIChE Journal, 2005, 51(2):487-501.
- [12]CHEN Y D, YANG R T. Concentration dependence of surface diffusion and zeolitic diffusion[J]. AIChE Journal, 1991, 37(10):1579-1582.
- [13]WU K L, LI X F, WANG C C, et al. Apparent Permeability for Gas Flow in Shale Reservoirs Coupling Effects of Gas Diffusion and Desorption[C]. Denver: Society of Petroleum Engineering, 1986.
- [14]KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. Socar Proceedings, 1941, 2(2): 200-213.
- [15]ERTEKIN T, KING G A, SCHWERER F C. Dynamic gas slippage: A unique dual mechanism approach to the flow of gas in tight formation[J]. Spe Formation Evaluation, 1986, 1(1): 43-52.
- [16]JAVADPOUR F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks(shales and siltstone) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8):16-21.
- [17]BESKOK A, KARNIADAKIS G E. A model for flows in channel, pipes, and ducts at micro and nanoscales[J]. Microscale Thermophysical Engineering, 1999, 3(1):43-77.
- [18]CIVAN F. Effective correlation of apparent gas permeability in tight porous media[J]. Transport in Porous Media, 2010, 82(2):375-384.
- [19]郭为,胡志明,左罗,等.页岩基质解吸-扩散-渗流耦合实验及数学模型[J].力学学报,2015,47(6):916-922.
- [20]吴剑,常毓文,梁涛,等.页岩气在基质纳米孔隙中的渗流模型[J].天然气地球科学,2015,26(3):575-579.
- [21]夏阳,金衍,陈勉,等.页岩气渗流数学模型[J].科学通报,2015,60:2259-2271.
- [22]苏玉亮,盛广龙,王文东,等.页岩气藏多重介质耦合流动模型[J].天然气工业,2016,36(2):52-59.
- [23]盛茂,李根生,黄中伟,等.考虑表面扩散作用的页岩气瞬态流动模型[J].石油学报,2014,35(2):347-352.
- [24]吴克柳,李相方,陈掌星.页岩气纳米孔气体传输模型[J].石油学报,2015,36(7):837-848,889.

(责任编辑:殷丽莉)