

非常规天然气

页岩气在基质纳米孔隙中的渗流模型

吴 剑,常毓文,梁 涛,郭晓飞,陈新彬

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:基质孔隙中页岩气包括孔隙中的自由气、孔隙壁面的吸附气、溶解于有机质中的溶解气,大量文献显示页岩孔隙和喉道皆为纳米级,尽管孔隙小、气体扩散慢,但页岩基质比表面较大、溶解气量大,溶解气的扩散作用具有重要影响。根据 Farzam Javadpour 渗流理论,假设页岩基质为岩石颗粒、黏土、干酪根的均质体,认为基质纳米孔隙中气体运移是压力作用下气体滑脱、克努森扩散、气体吸附解吸、溶解于干酪根中的气体向孔隙动力扩散等共同作用的结果,且吸附气符合 Langmuir 等温吸附机理,从而采用微元法推导出页岩气基质孔隙渗流模型。

关键词:页岩气;渗流单元;纳米孔隙;渗流模型;非常规天然气

中图分类号: TE132.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1926(2015)03-0575-05

引用格式: Wu Jian, Chang Yuwen, Liang Tao, *et al.* Shale gas flow model in matrix nanoscale pore [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 575-579. [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.]

0 引言

页岩为细小碎屑、黏土、干酪根和其他有机质等组成的具有薄页状和薄片状层理,并且容易破碎的沉积岩^[1]。页岩气则是指赋存在页岩内的天然气^[2],包括孔隙和裂缝中的自由气、吸附在页岩孔隙与有机质壁面的吸附气、溶解于干酪根与其他有机质的溶解气^[3],通常认为页岩为页岩气的生储层^[4]。据美国能源信息署(EIA)2013年数据,全球页岩气可采资源量约为 $220.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$,分布于全球 40 多个国家和地区,其中主要分布在美国 ($32.88 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、中国 ($31.58 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、阿根廷 ($22.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、阿尔及利亚 ($20.02 \times 10^{12} \text{ m}^3$)、加拿大 ($16.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$) 和墨西哥 ($15.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$),美国已经初步实现商业化开采进而激发全球对页岩气开发基础理论的研究。

常规油藏理论分析页岩气生产结果通常表现为实际产量大于预测产量,于是国内外学者根据实验数据和现场经验改进渗流理论。Roberto Aguilera^[5]利用流动单元解释孔隙喉道的重要性;Farzam

Javadpour 等^[6]用原子力学显微镜对页岩气迁移研究,认为经典达西理论用于纳米级的孔隙分析具有局限性,应考虑孔隙中的流动、孔隙与有机质壁面的吸附解吸、溶解在干酪根和有机质内部的扩散,于是初步建立纳米孔隙渗流理论^[7];Vivek Swami 等^[8-9]认为页岩气在孔隙中多种机理协调作用;Rouzbeh 等^[10]构建了甲烷分子运移模型;陈强等^[11]、李智锋等^[12]阐述了纳米孔隙渗流特征;Vahid 等^[13-14]进行数值模拟与量化探索;Guo Chaohua 等^[15]阐述纳米孔隙下的页岩气渗透率问题。下文将针对纳米孔隙下的页岩气渗流理论展开深入研究。

1 页岩气孔隙渗流单元

页岩气渗流单元是指页岩气生产时,气体在页岩气储层中渗流经过的孔隙、压裂或天然裂缝与裂隙。页岩气流动单元的核心内容是孔隙,孔隙的喉道直接影响气体渗流速度与方式^[16],孔隙喉道用毛管压力测试,含水银 35% 的饱和度表示^[5]:

$$r_{35} = 5.395 \left[\frac{k^{0.588}}{(100\varphi)^{0.864}} \right] \quad (1)$$

收稿日期:2014-02-26;修回日期:2014-07-01.

基金项目:国家科技重大专项“我国油气剩余可采储量分布、增长潜力与开发理论”(编号:2011ZX05043-002)资助.

作者简介:吴剑(1986-),男,贵州黔东南人,博士研究生,主要从事油藏工程与油气开发规划研究. E-mail: wusword668@163.com.

式中: r_{35} 为孔隙喉道直径, μm ; k 为渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据 r_{35} 将喉道分类为: 超大喉道 ($r_{35} > 10$)、大喉道 ($2.5 > r_{35} \geq 10$)、中喉道 ($0.5 > r_{35} \geq 2.5$)、小喉道 ($0.1 > r_{35} \geq 0.5$)、细小喉道 ($0.01 > r_{35} \geq 0.1$)。页岩测试结果为细小喉道, 其纳米孔隙直接影响页岩气在基质孔隙通道渗流能力^[11], 若要提升储层整体渗流能力, 则需通过水力压裂以减少孔隙通道运移距离。

页岩基质纳米孔隙直接影响气体的渗流方式, 由于气体黏度小, 纳米孔隙横截面小, 在孔隙中产生滑脱效应, 导致达西渗流理论应用的局限性。为判断页岩纳米孔隙中的流动方式, 卡尔加里大学的 Heidemann 等^[17] 定义了克努森数 k_n , 为标量数, 其值等于气体自由流动平均位移 λ 与孔隙直径 d 之比, 表达式为:

$$\begin{cases} k_n = \lambda/d \\ \lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \delta^2 p} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数, $1.3805 \times 10^{-23} \text{J/K}$; T 为温度, K ; δ 为碰撞分子直径, m ; p 为压力, Pa 。若 $k_n < 0.001$, 表现为非滑脱流动; 若 $0.001 < k_n < 0.1$, 则表现为滑脱流动。克努森数随着压力的升高而降低, 随着孔隙直径的大小而降低, 因此孔隙大小成为

判断气体渗流方式的重要指标。

2 基质孔隙渗流模型

2.1 纳米孔隙渗流条件假设

假设页岩中纳米孔隙为圆形管道(主要由岩石颗粒和干酪根等组成, 图 1), 管道中间为自由气, 岩石颗粒表面是吸附气, 气体吸附解吸符合 Langmuir 等温吸附规律, 具有多孔介质的干酪根和其他有机质因物性相近等同于天然沥青的作用, 里面含有丰富天然气。

页岩储层中的自然裂缝和人工裂缝以生产井为中心向四周延伸, 生产过程中的渗流顺序是: 孔隙和有机质壁面吸附气解吸到孔隙中, 同时, 溶解于干酪根和其他有机物中的溶解气向孔隙中补充, 基质孔隙自由气流向裂缝, 裂缝流向生产井。本文研究内容是天然气尚未进入裂缝前的问题。根据运移过程, 气体会发生对流、克努森扩散和解吸; 根据 Farzam Javadpour^[7] 理论, 页岩气孔隙通常在 $10 \sim 300 \text{nm}$ 之间, 气体会发生滑脱流动, 并且气体会从干酪根中扩散出来。并认为整个过程为非达西渗流, 从储层初始条件开始, 温度不变, 为定压力生产流场, 气体由左向右流动, 在孔隙边界的气体浓度变化符合亨利定律。

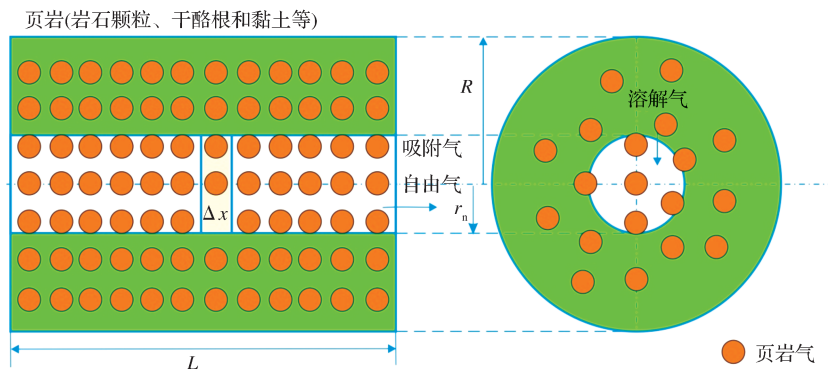


图 1 页岩气纳米孔隙渗流模型示意

Fig. 1 The shale gas flow in nanopore schematic views

2.2 气体滑脱流动和克努森扩散

设模型孔隙半径为 r_n, m ; 孔隙横截面面积 $A = \pi r_n^2, \text{m}^2$; 用 p 表示任何时候在纳米孔隙里的微小单元 ΔX 的压力。根据等效环形毛细管的达西渗透率为: $k_D = r_n^2/8, \text{m}^2$ 。对于低密度气体, 可忽略重力作用, 气体流动速度可表示为:

$$u = \frac{k_D}{\mu} \Delta p = - \frac{k_D}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

式中: u 为气体流动速度, m/s ; μ 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为压力, Pa 。

气体在导管中会滑脱流动, Brown 等^[18] 引入滑脱流动修正系数:

$$F = 1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{\mu}{p_{\text{avg}} r_n} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: R 为通用气体常数, 8.314J/K/mol ; T 为温度, K ; M 为分子质量, kg/mol ; p_{avg} 为平均压力, Pa ;

α 为气体四周扩散时与孔隙壁面碰撞分子数与总分子数的比值(其值与岩石壁面光滑度、气体类型、温度和压力等有关,大小在 0~1 之间)。

根据 Farzam Javadpour^[7] 关于克努森扩散的推导,得到克努森扩散系数为:

$$D_k = \frac{2r_n}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} \quad (5)$$

于是气体向右移动 Δx 后,考虑克努森扩散和气体滑脱流动的质量守恒方程为:

$$\begin{aligned} & \left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \rho u A F \right)_{x+\Delta x} - \left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \rho u A F \right)_x \\ & = \frac{\Delta(\rho A)}{\Delta t} \Delta x \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)~(6)中: D_k 为克努森扩散系数, m^2/s ; ρ 为气体密度, kg/m^3 。

2.3 孔隙壁面气体解吸

页岩气在纳米孔隙中渗流存在气体吸附解吸。根据解吸原理,用 J_{des} 表示每单位面积解吸质量流量, $kg/(m^2 \cdot s)$; K_{des} 为解吸平衡常数, $kg/(m^2 \cdot s)$; θ 为气体被有效解吸分子所占有表面和总吸附表面之比,则有:

$$J_{des} = K_{des} \theta \quad (7)$$

根据吸附原理,单位面积吸附质量流量为:

$$J_{ads} = K_{ads} (1 - \theta) p \quad (8)$$

式中: J_{ads} 为单位面积吸附质量流量, $kg/(m^2 \cdot s)$; K_{ads} 为吸附平衡常数, $kg/(Pa \cdot m^2 \cdot s)$ 。

气体的吸附解吸通常处于动态平衡状态,当纳米孔隙压力下降, θ 将重新达到对应低压力下的值。当单位面积吸附与解吸流量相等,则有:

$$\theta = \frac{K_{ads} p}{K_{des} + K_{ads} p} \quad (9)$$

根据 Vabid Shabro 等^[13] 的研究将单位面积解吸质量流量写为:

$$J_{des} = \left(\frac{S_0 M}{N_A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \quad (10)$$

式中: S_0 为初始油藏条件下的气体分子吸附于孔隙壁面的总面积, m^2 ; M 为气体分子质量, kg/mol ; N_A 为阿伏伽德罗常数,其值为 6.022×10^{23} 。则微元 ($2\pi r_n \Delta x$) 气体解吸量为:

$$J_{des} 2\pi r_n \Delta x = \left(\frac{S_0 M}{N_A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) 2\pi r_n \Delta x \quad (11)$$

由于气体流动压力降低导致 θ 随时间 t 降低,于是将方程(6) 改写为滑脱流动、克努森扩散、解吸作用的物质平衡方程:

$$\begin{aligned} & \left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \rho u A F \right)_{x+\Delta x} - \left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \rho u A F \right)_x - \\ & \left(\frac{S_0 M}{N_A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) 2\pi r_n \Delta x = \frac{\Delta(\rho A)}{\Delta t} \Delta x \end{aligned} \quad (12)$$

2.4 干酪根中气体扩散

假设干酪根以径向环绕纳米孔径,用 C 表示任意时刻的在干酪根中气体浓度, kg/m^3 ,则径向扩散方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D \frac{\partial C}{\partial r} r \right) \quad (13)$$

式中: D 为气体在干酪根中的动力扩散系数, m^2/s ; r 表示干酪根半径, m 。用 J_{diff} 表示从干酪根扩散的单位面积气体流量, kg/m^2 ,则径向气体扩散量为:

$$J_{diff} 2\pi r \Delta x = D \frac{\partial C}{\partial r} \times 2\pi r \Delta x \quad (14)$$

将方程(12) 改写为压差作用下的自由气体滑脱流动与克努森扩散、吸附气解吸和溶解气体从干酪根扩散组合物质平衡方程渗流微分方程为:

$$\begin{aligned} & \left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \rho u A F \right)_{x+\Delta x} - \left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \rho u A F \right)_x - \\ & \left(\frac{S_0 M}{N_A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) 2\pi r_n \Delta x + D \frac{\partial C}{\partial r} \times 2\pi r \Delta x \\ & = \frac{\Delta(\rho A \Delta x)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (15)$$

根据气体压缩系数定义,其气体压缩系数简单表示为:

$$C_g = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (16)$$

上述方程两边同时除以微元体 ($\pi r_n^2 \Delta x$),将式(3)和式(16)代入式(15)并作适当的变换得到部分偏微分方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(D_k \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{k_D}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} F \right) \right] - \\ & \left(\frac{S_0 M}{N_A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \frac{2}{r_n} + D \frac{\partial C}{\partial r} \times \frac{2r}{r_n^2} \\ & = \rho C_g \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned}$$

进而有:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(C_g D_k + F \frac{k_D}{\mu} \right) \frac{\partial p_n}{\partial x} \right] - \left(\frac{S_0 M}{N_A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \frac{2}{r_n} \\ & + D \frac{\partial C}{\partial r} \times \frac{2r}{r_n^2} = \rho C_g \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (17)$$

根据 Farzam Javapour^[7] 有关推导的表观渗透率为:

$$k_{app} = \frac{2r_n \mu M}{\rho^2 RT} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + F \frac{r_n^2}{8\rho} \quad (18)$$

将方程(5)和方程(16)代入方程(18)得表观渗透率表达式为:

$$k_{app} = C_g D_k \mu + F k_D \quad (19)$$

用 w_a 表示有效表面单位面积气体分子重量, kg/m^2 ; ρ_{nmp} 为常温常压下气体密度, kg/m^3 ; ρ_{bi} 为初始油藏压力下页岩密度, kg/m^3 ; G_L 为朗缪尔单位质量气体吸附体积, m^3/kg ; SV 为页岩表面积和体积的比值, 单位 m^{-1} 。根据 Vahid Shabro^[14] 有效表面推导则有:

$$w_a = \frac{S_0 M}{N_A} = \frac{\rho_{nmp} \rho_{bi} G_L}{SV} \quad (20)$$

将方程(9)分子与分母同时除以 K_{des} , 并且朗缪尔常数 $b = K_{ads}/K_{des}$, 于是有:

$$\theta = \frac{bp}{1+bp} \quad (21)$$

上述方程对时间 t 求偏导数, 则有:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{b}{(1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (22)$$

将方程(18)、方程((20)和方程((22)代入方程(17)得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{k_{app}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{2}{r_n} \frac{b w_a}{(1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial x} + D \frac{\partial C}{\partial r} \times \frac{2r}{r_n^2} = \rho C_g \frac{\partial p}{\partial t} \quad (23)$$

根据气体密度公式有: $\rho = M/(2RTz)$, z 为气体压缩因子, 于是上式改写为:

$$\frac{M}{2RT} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{app}}{z\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{2b w_a}{r_n (1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial x} + D \frac{\partial C}{\partial r} \times \frac{2r}{r_n^2} = \frac{MC_g}{2RTz} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (24)$$

最后, 得到压差作用下的自由气体滑脱流动与克努森扩散、吸附气解吸、溶解气体从干酪根扩散共同作用的渗流微分方程为:

$$\frac{M}{RT} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{app}}{z\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{4b w_a}{r_n (1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4rD}{r_n^2} \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{MC_g}{2RT} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (25)$$

2.5 边界和初始条件

设油藏初始压力为 p_i , Pa; 生产井压力为 p_w , Pa; 并且以定压生产, 生产井压力为常数。则:

初始条件有:

$$p = p_i (t = 0, 0 \leq x < L)$$

边界条件有:

$$p = p_w (x = 0, t > 0)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0; x = L, t > 0.$$

气体从干酪根中扩散初始条件:

$$C = C_i = k_H p_i; t = 0, 0 \leq r < R_k$$

其中 C_i 为初始气藏气体浓度; k_H 为亨利常数。

其边界条件为:

$$C = k_H p; r = r_n, t > 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = 0; r = R_k, t > 0.$$

3 孔隙基质渗流模型

假设基质中孔隙度相等为 φ , 用 L 表示页岩样本长度, L_e 表示分子扩散的路径, 则曲率 $\tau = (L_e/L)^2$, 孔隙基质克努森扩散系数 $D_m = \varphi/(\tau D_k)$, 孔隙基质渗透率 $k_m = \varphi/(\tau D_k)$, δ 表示扩散效率, 有机质中气体有效扩散系数 $D_e = (\varphi \delta D)/\tau$, 则方程(15)变为:

$$\left(\varphi D_m \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \varphi \mu \rho A F \right)_{x+\Delta x} - \left(\varphi D_m \frac{\partial \rho}{\partial x} A - \varphi \mu \rho A F \right)_x - \left(\frac{S_0 M}{N_A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) 2\varphi \pi r_n \Delta x + D_n \frac{\partial C}{\partial r} \times \varphi 2\pi r \Delta x = \frac{\Delta(\rho \varphi A)}{\Delta t} \Delta x \quad (26)$$

整理得页岩气孔隙基质渗流模型为:

$$\frac{M}{RT} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{app}}{z\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{4b w_a}{r_n (1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4rD_e}{r_n^2} \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{MC_g}{zRT} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (27)$$

4 结论

经过对页岩纳米孔隙中天然气渗流原理探索和数学模型的推导, 获得以下几点认识:

(1) 页岩气在基质中的渗流通道为纳米级, 喉道与孔隙度皆是纳米级。气体在渗流通道中不是类似于层流的流动, 而是滑脱流动。

(2) 气体在页岩基质孔隙中的渗流机理包括气体滑脱流动、克努森扩散、吸附解吸以及有机质中动力扩散。

(3) 不可忽略气体从干酪根中溶解气的扩散, 天然气从干酪根中演化而来, 干酪根中溶解有大量气体, 孔隙小且相对均匀, 比表面大, 尽管扩散速度慢, 但是气体扩散总量很大。

参考文献(References):

[1] Zou Caineng. Unconventional Oil and Gas Geology[M]. Bei-

- jing: Geological Publishing House, 2011: 128-145. [邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 128-145.]
- [2] Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Song Huanqi, *et al.* Evolution and models of shale porosity during burial process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 339-448. [郭秋麟, 陈晓明, 宋焕琪, 等. 泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 339-448.]
- [3] Chen Xiaoming, Li Jianzhong, Zheng Min, *et al.* Kerogen solution theory and its exploratory application in shale gas assessment[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 14-18. [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.]
- [4] Creties D J, Charles M B. Coalbed-gas and shale-gas reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2008, 60(2): 92-99.
- [5] Roberto Aguilera. Flow Units: From Conventional to Tight Gas to Shale Gas Reservoirs[C]. SPE 132845, 2010: 27-30.
- [6] Farzam Javadpour, Fisher M U. Nanoscale gas flow in shale gas sediments[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2007, 46(10): 55-61.
- [7] Farzam Javadpour. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks(shale and siltstone)[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48(8): 16-21.
- [8] Vivek Swami, Settari. A Pore Scale Gas Flow Model for Shale Gas reservoir[C]. SPE 155756, 2012: 5-7.
- [9] Vivek Swami, Settari A, Farzam J. A Numerical Model For Multi-Mechanism Flow in Shale Gas Reservoir with Application to Laboratory Scale Testing[C]. SPE 164840, 2013: 10-13.
- [10] Rouzbeh G M, Farzam J, Davud D. Contribution of Methane Molecular Diffusion in Kerogen to Gas-in-Place and production[C]. SPE 165376, 2013: 19-25.
- [11] Chen Qiang, Kang Yili, You Lijun, *et al.* Micro-pore structure of shale gas and its effect on gas mass transfer[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1298-1304. [陈强, 康毅力, 游利军, 等. 页岩气微孔结构及其对气体传质的影响[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(6): 1298-1304.]
- [12] Li Zhifeng, Li Zhiping, Miao Lili, *et al.* Gas flow characteristics in nanoscales pores of shale gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 1042-1047. [李智锋, 李治平, 苗丽丽, 等. 页岩气藏纳米孔隙气体渗流特征分析[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 1042-1047.]
- [13] Vahid S, Corlos Torres-Verdin, Farzam J. Numerical Simulation of Shale Gas Production: from Pore-Scale Modeling of Slip-flow, Knudsen Diffusion, and Langmuir Desorption to Reservoir Modeling of Compressible Fluid[C]. SPE 144355, 2011: 14-16.
- [14] Vahid S, Corlos Torres-Verdin, Farzam J. Pore-Scale Quantification of Apparent Permeability and Electrical Resistivity of Hydrocarbon-bearing Shale in the Presence of Gas Desorption[C]. SPWLA 2011-K, 2011: 11-9.
- [15] Guo Chaohua, Bai Baojun, Wei Mingzhen, *et al.* Study on Gas Permeability in Nano Pores of Shale Gas Reservoir[C]. SPE 167179, 2013: 1-11.
- [16] Rahmani D, Akkutlu I Y. Pore-Size Dependence of Fluid Phase Behavior and the Impact on Shale Gas Reserves[C]. SPE 168939, 2013: 1-22.
- [17] Robert A Heidemann, Ayodeji A Jeje, Farhang Mohtadi, *et al.* An Introduction to the Properties of Fluids and Solids[M]. Calgary, Alberta: University of Calgary Press, 1984: 5-15.
- [18] Gordon P Brown, Albert Dinardo, George K Cheng, *et al.* The flow of gases in pipes at low pressures[J]. *Journal of Applied Physics*, 1946, 17: 802-813.

Shale Gas Flow Model in Matrix Nanoscale Pore

WU Jian, CHANG Yu-wen, LIANG Tao, GUO Xiao-fei, CHEN Xin-bin

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Beijing, 100083)

Abstract: Matrix shale gas includes free gas stored in pores, adsorbed gas in pore walls, soluble gas in solid organic materials. Shale pores are nanometer and pore throat apertures are microport by literature investigation. Although shale matrix pores are very small and soluble gas diffusion is slow, surface to volume ratio is comparatively large, soluble gas quantity is substantial, soluble gas diffusion is very important. According to Javadpour flow theory, shale matrix is assumed as homogeneous rock particles, clay, kerogen reservoir. Shale gas migration is slippage under press force, Knudsen diffusion, adsorbed gas desorption and soluble gas diffusion combined effect, gas adsorption-desorption follows Langmuir's isotherm, then shale gas matrix pore flow model is lastly derived by infinitesimal method.

Key words: Shale gas; Flow unit; Nanopores; Flow model; Unconventional natural gas