

基于格子 Boltzmann 方法的页岩气藏 气体滑脱效应分析

赵金洲,符东宇,李勇明,彭 瑀,廖 毅

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

摘要:页岩气藏纳米尺度孔隙发育,气体渗流规律受滑脱效应影响显著。当气体在纳米孔隙中渗流时,基于连续介质建立的常规渗流模型已不能准确模拟页岩气微观渗流特征。为了达到提高页岩气藏产能预测精度、指导压裂施工设计的目的,必须准确分析页岩气藏气体滑脱效应。利用格子 Boltzmann 方法,建立页岩气渗流模型,确定反弹—镜面组合边界条件,对页岩气藏气体滑脱效应进行模拟分析。结果表明:孔隙直径和努森数是表征页岩气藏气体滑脱效应强度的决定性参数;孔隙壁面附近气体滑移速度沿孔隙通道呈近似线性缓慢增长,在出口端增幅加剧,该现象验证了气体压缩效应及稀薄效应理论;气体滑移速度会随努森数的增加而增大,气体渗流进入滑移区后滑移速度增幅加剧,基于连续介质方程建立的模型局限性更加凸显;页岩储层表观渗透率会随努森数的增加而显著增大,当努森数大于0.1后,Klinkenberg模型不能精确表征气体滑脱效应。

关键词:页岩气 纳米尺度 格子 Boltzmann 方法 滑脱效应 滑移速度

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)05-0065-06

Analysis on slippage effect in shale gas reservoir based on lattice Boltzmann method

Zhao Jinzhou, Fu Dongyu, Li Yongming, Peng Yu, Liao Yi

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City,
Sichuan Province, 610500, China)

Abstract: Shale gas reservoir is abundant in nanoscale pores. Therefore, the gas seepage is influenced significantly by slippage effect. Conventional flow model cannot simulate the seepage law accurately in shale gas when gas flows in nanometer pores. In order to improve the accuracy of production simulation and make guidance for fracturing operation in the shale gas reservoir, slippage effect during gas flow must be analyzed precisely and directly. Lattice Boltzmann method was applied to built seepage model of the shale gas and to know boundary condition of bounceback-specular combination. The slippage effect in the shale gas reservoir was simulated and analyzed. The results show that the pore size and Knudsen number are the decisive factors which can be used to characterize the strength of slippage effect. The slip velocity of the gas molecule along the pore channels has approximate linear growth and increases more dramatically in the outlet end, which can testify the compression effect and rarefaction effect of the gas in the shale gas reservoir. The slip velocity will increase dramatically with the rising Knudsen number, especially after gas seepage in slip zone. The limitation of models based on continuous medium formula will be highlighted. With the rise of Knudsen number, the apparent permeability has been increased sharply. Klinkenberg model is no longer suitable for simulation of slippage effect during gas seepage in slip zone after the Knudsen number is more than 0.1.

收稿日期:2016-06-05。

作者简介:赵金洲(1962—),男,湖北仙桃人,教授,博导,从事油气藏酸化压裂理论与应用的教学和科研工作。联系电话:(028)83032979, E-mail:zhaojz@swpu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“页岩地层动态随机裂缝控制机理与无水压裂理论”(51490653),国家“973”计划“中国南海相页岩气高效开发的基础研究”(2013CB228004)。

Key words: shale gas; nanoscale; lattice Boltzmann method; slippage effect; slip velocity

中国页岩气资源富集,分布广泛,是未来油气勘探开发的重点对象^[1-2]。而页岩气藏具有超低孔、超低渗透和极致密等特征,使得气体在渗流过程中伴有复杂的微尺度效应^[3-5]。特别当孔隙尺度达到微纳米级时,气体分子与孔隙壁面会产生不可忽略的滑脱效应^[6]。基于常规储层建立的模型已经不能完全表征页岩气在纳米尺度下的渗流过程,所以必须引入新模型来模拟页岩气藏渗流^[7]。中外学者改进已有的渗流模型,通过修正表观渗透率来表征页岩气藏的微观渗流特征^[8-11],但建立在宏观渗流体系中的模型在超出其适用范围后便无法表征气体的微观效应。为了准确分析页岩气藏气体滑脱效应,中外学者开始引入介观尺度的格子 Boltzmann 方法对气体微观流动过程进行模拟。Fathi 等从分子动能的角度,通过格子 Boltzmann 方法,分析了单一纳米级毛细管壁面的滑脱现象,提出了双滑脱理论^[12]。王华龙等将气体单通道格子 Boltzmann 模型扩展为孔隙群渗流模型,证明了格子 Boltzmann 方法在多孔介质渗流过程中的适用性^[13],但该模型忽略了滑脱效应的影响。Pazdniakou 等将格子 Boltzmann 方法用于多孔介质动态渗透率计算^[14],但无法直观地表征滑脱效应的强度。要运用格子 Boltzmann 方法准确分析气体滑脱效应,边界条件的确定至关重要。Nie 等首次将格子 Boltzmann 方法用于气体微通道流动模拟^[15],但模型边界条件运用的是不考虑滑移的完全反弹格式。Lim 等通过镜面反射条件表征滑移边界^[16],然而其数值解与解析解相差较大。岳向吉等在格子 Boltzmann 方程中耦合反弹—镜面组合边界形式,大大提高了滑脱效应的表征精度^[17]。为此,笔者将格子 Boltzmann 方法用于页岩气藏气体滑脱效应的研究,建立反弹—镜面组合边界条件,并对其敏感性进行分析。

1 模型建立

页岩储层物性复杂,导致气体在渗流过程中存在多尺度流动,目前主要利用努森数(Kn)对气体流动区域进行划分,Roy 等提出: $Kn \leq 0.001$ 为连续介质区,气体在此区域渗流符合达西定律; $0.001 < Kn \leq 0.1$ 为滑移区,此时气体稀薄效应加剧,滑脱现象明显; $0.1 < Kn \leq 10$ 为过渡区,此区域内气体不再视为连续相; $Kn > 10$ 为自由分子区^[18]。邹才能等利用电子显微镜观测大量四川盆地页岩样品,确定页岩储

层主体孔隙直径为 $80 \sim 200 \text{ nm}$ ^[19]。假定地层温度为 350 K ,孔隙中仅有甲烷分子参与渗流。按照努森数定义,计算得到页岩气藏气体渗流过程努森数主要为 $0.005 \sim 0.2$ 。气体渗流区域主要集中于滑移区,此时孔隙壁面附近的气体分子与壁面碰撞剧烈产生明显的滑脱效应。

气体在孔隙通道中的渗流如图 1 所示,使用格子 Boltzmann 单弛豫时间方程中的 2 维 9 速模型 (d2q9) 对气体渗流过程进行模拟^[20]。

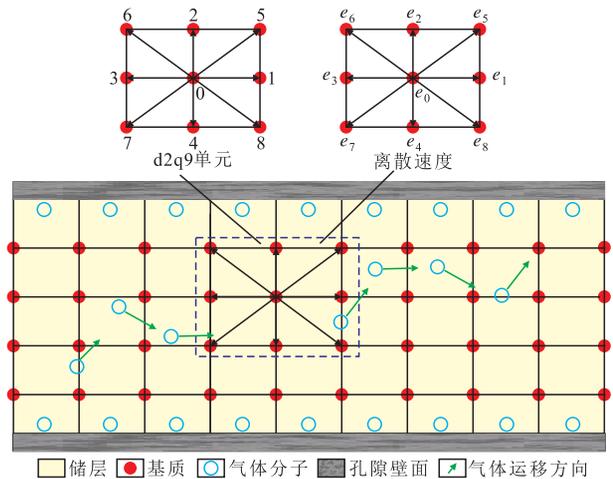


图 1 孔隙通道气体流动格子 Boltzmann 模型

Fig.1 Boltzmann model of gas flow lattice through pore channel

为了提高模型求解效率并获得数学上的精确解,假设如下:①参与渗流的气体仅为甲烷;②整个过程为等温渗流状态^[21]。

将空间、时间和气体分子迁移速度进行离散,获得离散格子 Boltzmann 演化方程为

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (1)$$

其中

$$e_i = \begin{cases} (0, 0) & i = 0 \\ (\cos \frac{(i-1)\pi}{2}, \sin \frac{(i-1)\pi}{2}) & i = 1 \sim 4 \\ (\cos \frac{(2i-9)\pi}{4}, \sin \frac{(2i-9)\pi}{4}) & i = 5 \sim 8 \end{cases} \quad (2)$$

$$f_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho \left[1 + \frac{ue_i}{c_s^2} + \frac{(ue_i)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right] \quad (3)$$

$$\tau = (3\nu + \frac{1}{2}) \frac{2}{\pi} \arctan(\sqrt{2} Kn^{-\frac{3}{4}}) \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i(x, t) \quad (5)$$

$$u = \frac{1}{\rho} \sum_{i=0}^8 f_i(x, t) e_i \quad (6)$$

$$p = \rho c_s^2 \quad (7)$$

2 模型求解边界条件

气体在多孔介质中渗流,实质上是气体分子之间、气体分子与孔隙壁面之间的不断碰撞与迁移。在格子 Boltzmann 方法中,气体分子在整个渗流过程中复杂的运动规律均可通过离散分布函数表征,因此要对模型进行求解就必须确定对应的边界条件。

气体在水平方向上的渗流主要通过左、右两端的压差驱动;为了提高模型的计算精度,忽略进、出口端的垂向速度,运用非平衡态反弹格式对边界条件进行处理^[22],得到左边界(孔隙通道进口端)、右边界(孔隙通道出口端)的表达式分别为

$$\begin{cases} f_1 = f_3 + \frac{2}{3}\rho_{in}u_x \\ f_5 = f_7 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6}\rho_{in}u_x \\ f_8 = f_6 + \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6}\rho_{in}u_x \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_3 = f_1 - \frac{2}{3}\rho_{out}u_x \\ f_6 = f_8 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) - \frac{1}{6}\rho_{out}u_x \\ f_7 = f_5 + \frac{1}{2}(f_2 - f_4) - \frac{1}{6}\rho_{out}u_x \end{cases} \quad (9)$$

为了准确直观地表征气体分子与孔隙壁面碰撞而产生的滑脱效应,孔隙上、下壁面不能采用忽略滑移的反弹格式,采用忽略边界流固分子相互作用的镜面格式也会造成较大误差。为此笔者选取 Succi 等提出的反弹—镜面组合边界条件^[23]。上、下边界的表达式分别为

$$\begin{cases} f_4(x, y, t + \Delta t) = f_2(x, y - \Delta y, t) \\ f_7(x, y, t + \Delta t) = rf_5(x - \Delta x, y - \Delta y, t) + \\ (1-r)f_6(x + \Delta x, y - \Delta y, t) \\ f_8 = rf_6(x + \Delta x, y - \Delta y, t) + (1-r)f_5(x - \Delta x, y - \Delta y, t) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_2(x, y, t + \Delta t) = f_4(x, y + \Delta y, t) \\ f_5(x, y, t + \Delta t) = rf_7(x + \Delta x, y + \Delta y, t) + \\ (1-r)f_8(x - \Delta x, y + \Delta y, t) \\ f_6 = rf_8(x - \Delta x, y + \Delta y, t) + (1-r)f_7(x + \Delta x, y + \Delta y, t) \end{cases} \quad (11)$$

分析不同努森数下的反弹组合系数与无因次滑移速度(孔隙壁面滑移速度与孔隙通道中部速度最大值的比值)的关系曲线(图2)可知,反弹组合系数的取值会对孔隙壁面滑移速度的获取产生较大影响。当反弹组合系数趋近于0时,出现滑移速度大于体相流中心速度几倍到几十倍的情况,这显然是由于离散误差所致^[24]。为消除该误差对模型精度的影响,必须对反弹组合系数的取值进行优选。根据 Tang 等研究结论^[25],反弹组合系数取为0.7。

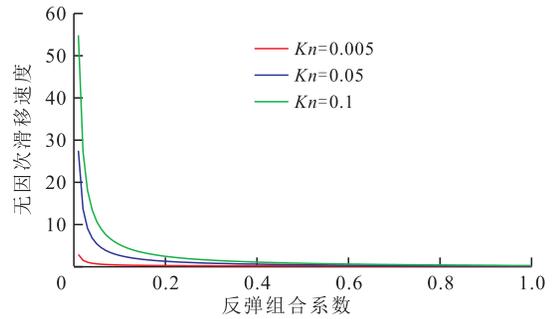


图2 反弹组合系数与气体无因次滑移速度的关系

Fig.2 Relationship between bounce-back coefficient and dimensionless slip velocity

3 模型准确性验证

模拟基础参数包括:努森数为0.005,入口端格子密度为1。运用所建格子 Boltzmann 模型、解析法及 Karniadakis 等推导的经验公式法^[26]分别计算气体无因次速度(孔隙通道内气体速度与中部速度最大值的比值)。

结果(图3)表明:格子 Boltzmann 模型解与解析解、Karniadakis 解吻合度均较高,说明所建模型计算结果准确。由格子 Boltzmann 模型计算得到气体无因次速度剖面可以看出,在孔隙壁面处出现了速度不为0的现象,说明存在滑脱效应。

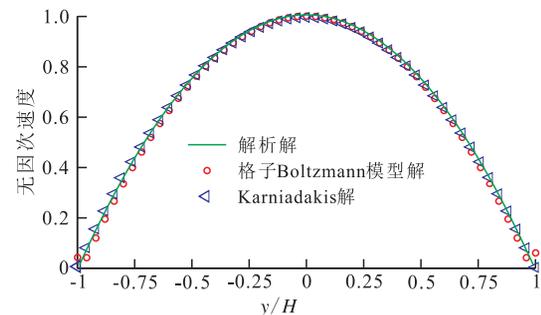


图3 不同求解方法下气体无因次速度分布

Fig.3 Dimensionless velocity profile of gas through different methods

4 滑脱效应强度影响参数

努森数 不同努森数下的气体无因次速度剖面分布(图4)表明,气体在孔隙通道中部渗流符合泊肃叶流的特征,但在靠近壁面处横向速度不为0,该速度为滑移速度,随着努森数的增大,滑移速度随之增大,气体滑脱效应加剧,并逐步向孔隙通道中部扩散。

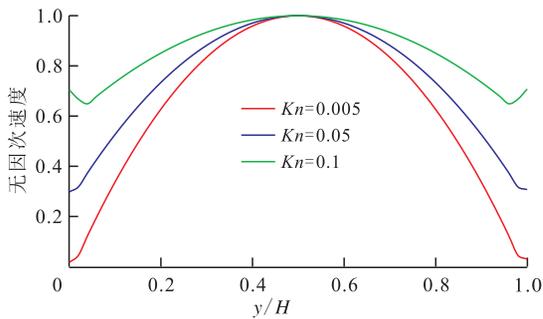


图4 不同努森数下的气体无因次速度分布

Fig.4 Dimensionless velocity profile of gas under different Knudsen number

张琴等通过实验测试表观渗透率的方法对低渗透储层气体滑脱效应进行研究^[27-30],但无法直观地表现气体分子产生滑脱效应的实质。应用格子 Boltzmann 模型从介观尺度对页岩气藏气体渗流进行模拟,通过气体分子碰撞孔隙壁面产生的滑移速度表征滑脱效应的强度。不同努森数下的孔隙壁面处气体无因次滑移速度沿孔隙通道水平方向的分布曲线(图5)表明,气体无因次滑移速度随努森数的增加而增大。这是因为随着努森数的增大,气体分子自由程也将增大,导致气体分子与储层孔隙壁面的碰撞逐渐加剧,从而使其获得更大的动能。气体无因次滑移速度沿孔隙通道基本呈线性增长,在出口端附近区域气体无因次滑移速度增幅变大。这是因为储层孔隙通道内流压呈近似线性分布,无因次滑移速度也呈近似线性增加趋势;而孔隙通道内压降集中在出口端,导致孔隙壁面气体无因次滑移速度也出现大幅增加^[21]。

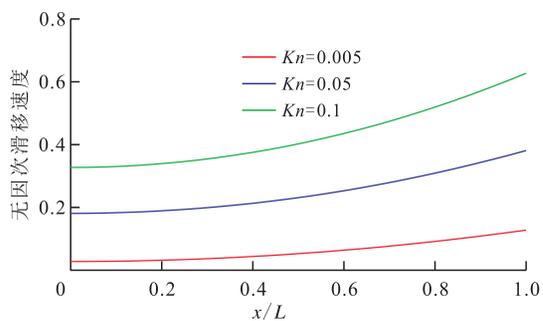


图5 孔隙壁面气体无因次滑移速度分布

Fig.5 Distribution of dimensionless slip velocity of gas along with the pore channel

通过分析气体滑移速度随努森数的变化趋势,并将格子 Boltzmann 模型解与 Arkilic 解析解^[9]及完全滑移解^[31]进行对比,结果(图6)表明:当气体渗流处于滑移区初期时,气体滑移速度增幅较缓,且三者计算结果吻合度较高;当努森数持续增加且大于0.01后,气体滑移速度增幅逐渐增大,基于连续介质

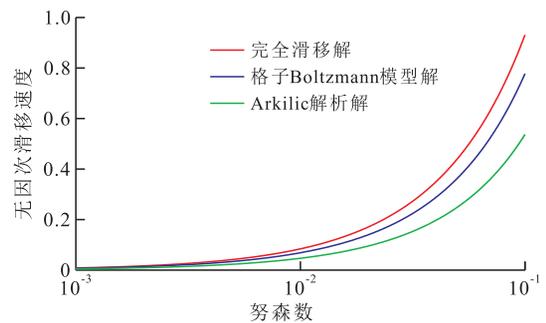


图6 不同努森数下的气体无因次滑移速度分布

Fig.6 Dimensionless slip velocity under different Knudsen number

方程的 Arkilic 解析解与其余两解结果差异随之增大。这是因为:完全滑移解和格子 Boltzmann 模型解均是基于格子 Boltzmann 方法计算得到的,完全滑移解在边界条件处理上夸大了滑移速度,所以反映的滑脱效应是不真实的;而解析解仅适用于连续介质区,这也印证了格子 Boltzmann 模型能够较为真实地反映页岩气藏气体滑脱效应。

孔隙直径 分析孔隙直径为 10, 50 和 100 nm 下的气体无因次速度分布(图7)可以看出:随着孔隙直径的减小,在相同无因次距离处的气体无因次速度增幅较大,间接表明气体无因次滑移速度随孔隙直径的减小而增大;该现象说明孔隙直径越小,滑脱效应越显著,产生滑脱的区域也从孔隙壁面逐步向中部扩展。

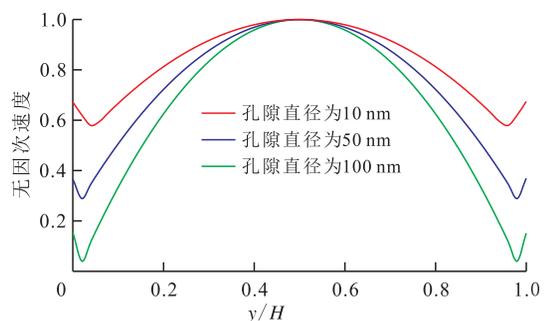


图7 不同孔隙直径下的气体无因次速度分布

Fig.7 Dimensionless velocity profile under different pore diameter

储层渗透率 页岩气藏显著的滑脱效应会导致储层表观渗透率增加。对比基于格子 Boltzmann 模型、Klinkenberg 模型以及 Fathi 等提出的双滑脱模型^[12]计算得到的 K_a/K_∞ 值(图8)可以看出,从气体渗流进入滑脱区开始,滑脱效应明显,导致储层表观渗透率开始大幅度增加,格子 Boltzmann 模型与 Klinkenberg 模型计算结果吻合度较高,而双滑脱模型计算值则明显高于这2个模型的计算值。这是由于双滑脱模型考虑了边界气体分子与体相流边界

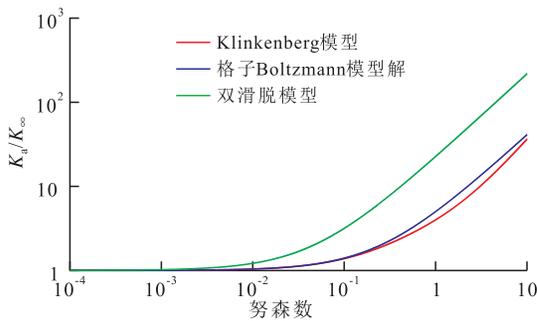


图8 K_r/K_∞ 与努森数的关系

Fig.8 Relationship between Knudsen number and relative permeability

分子的碰撞,夸大了页岩气藏气体滑脱效应的影响;自气体渗流进入过渡区,3类模型计算的页岩储层表观渗透率增幅均加快,格子 Boltzmann 模型与 Klinkenberg 模型计算偏差也逐步增大。结果表明, Klinkenberg 模型已经不再适合用来表征纳米级尺度下页岩气藏气体滑脱效应的强度。

5 结论

页岩储层气体渗流多处于滑脱区,孔隙壁面气体滑脱效应显著。

格子 Boltzmann 方法适用于描述页岩气藏气体滑脱效应,计算结果表明,孔隙直径越小,努森数越大,页岩气藏气体滑脱效应越显著。

孔隙壁面处气体滑移速度呈近似线性增长,在孔隙通道出口端附近区域增幅变大,这符合有关学者对于页岩气藏压缩效应及稀薄效应的结论。

气体渗流进入滑移区后期,气体滑移速度会大幅度增大,基于连续介质方程的 Arkilic 解析解较格子 Boltzmann 模型解计算偏差增大。

页岩储层表观渗透率随着努森数的增大而大幅度增加;气体渗流进入过渡区后, Klinkenberg 模型不再适用于表征滑脱效应的强度。

符号解释:

$f_i(x,t)$ —— x 处 t 时刻粒子密度分布函数; i —— 粒子编号; x —— 孔隙通道水平方向长度, m; t —— 格子时间; e_i —— 离散速度集; Δt —— 格子时间步长; τ —— 无因次弛豫时间; $f_i^{eq}(x,t)$ —— 局部平衡态分布函数; ω_i —— 与离散速度相关的权重系数, i 为 0, 1~4 和 5~8 时, ω_i 值分别为 4/9, 1/9 和 1/36; ρ —— 宏观格子密度; u —— 宏观格子速度; c_s —— 无因次格子声速; ν —— 无因次格子粘度; Kn —— 努森数; p —— 宏观格子压力; ρ_{in} —— 孔隙通道进口处宏观格子密

度; u_x —— x 方向宏观格子速度; ρ_{out} —— 孔隙通道出口处宏观格子密度; y —— 孔隙通道垂直方向长度, m; r —— 反弹组合系数, 表示无滑移反弹粒子的比率; $1-r$ —— 完全滑移镜面反射粒子的比率; H —— 孔隙通道宽度, nm; L —— 孔隙通道长度, nm; K_a —— 页岩储层表观渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_∞ —— 页岩储层固有渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

参考文献:

- [1] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.
Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [2] 杜佰伟,彭清华,谢尚克,等.西藏岗巴一定日盆地下白垩统页岩气资源潜力[J].油气地质与采收率,2015,22(2):51-54.
Du Baiwei, Peng Qinghua, Xie Shangke, et al. Exploration potential analysis of shale gas in the Lower Cretaceous, Gamba-Tingri basin of Tibet [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 51-54.
- [3] 姜瑞忠,汪洋,刘海成,等.页岩气生产机理及影响因素分析[J].特种油气藏,2014,21(1):84-87.
Jiang Ruizhong, Wang Yang, Liu Haicheng, et al. Shale gas production mechanism and analysis of affecting factors [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 84-87.
- [4] 林緬,江文滨,李勇,等.页岩油(气)微尺度流动中的若干问题[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):18-28.
Lin Mian, Jiang Wenbin, Li Yong, et al. Several questions in the micro-scale flow of shale oil/gas [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 18-28.
- [5] 李治平,李智锋.页岩气纳米级孔隙渗流动态特征[J].天然气工业,2012,32(4):50-53.
Li Zhiping, Li Zhifeng. Dynamic characteristics of shale gas flow in nanoscale pores [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 50-53.
- [6] Wu Y S, Pruess K, Persoff P. Gas flow in porous media with Klinkenberg effects [J]. Transport in Porous Media, 1998, 32(1): 117-137.
- [7] 窦宏恩,杨旸.低渗透油藏流体渗流再认识[J].石油勘探与开发,2012,39(5):633-640.
Dou Hongen, Yang Yang. Further understanding on fluid flow through multi-porous media in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 633-640.
- [8] 葛洪魁,申颖浩,宋岩,等.页岩纳米孔隙气体流动的滑脱效应[J].天然气工业,2014,34(7):46-54.
Ge Hongkui, Shen Yinghao, Song Yan, et al. Slippage effect of shale gas flow in nanoscale pores [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(7): 46-54.
- [9] Arkilic E B, Schmidt M A, Breuer K S. Gaseous slip flow in long microchannels [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(2): 167-178.
- [10] Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone) [J]. Journal of Canadian Petro-

- leum Technology, 2009, 48(8): 16-21.
- [11] 刘莉莉, 徐文, 石石, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏有效储层建模方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 47-51.
Liu Lili, Xu Wen, Shi Shi, et al. A new effective reservoir modeling method for tight sandstone gas reservoir in Sulige gasfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 47-51.
- [12] Fathi E, Tinni A, Akkutlu I Y. Correction to Klinkenberg slip theory for gas flow in nano-capillaries [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103(23): 51-59.
- [13] 王华龙, 柴振华, 郭照立. 致密多孔介质中气体渗流的格子 Boltzmann 模拟[J]. 计算物理, 2009, 26(3): 389-395.
Wang Hualong, Chai Zhenhua, Guo Zhaoli. Lattice Boltzmann simulation of gas transfusion in compact porous media [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(3): 389-395.
- [14] Pazdniakou A, Adler P M. Dynamic permeability of porous media by the lattice Boltzmann method [J]. Advances in Water Resources, 2013, 62(12): 292-302.
- [15] Nie X, Doolen G D, Chen S. Lattice-Boltzmann simulations of fluid flows in MEMS [J]. Journal of Statistical Physics, 2002, 107(1/2): 279-289.
- [16] Lim C Y, Shu C, Niu X D, et al. Application of Lattice Boltzmann method to simulate microchannel flows [J]. Physics of Fluids, 2002, 14(7): 2299-2308.
- [17] 岳向吉, 陆艳君, 朱庆贺, 等. 气体微尺度流动的格子 Boltzmann 模拟[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2014, 35(6): 854-857.
Yue Xiangji, Lu Yanjun, Zhu Qinghe, et al. Lattice-Boltzmann simulation of gas flow in microchannels [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2014, 35(6): 854-857.
- [18] Roy S, Raju R, Chuang H F, et al. Modeling gas flow through microchannels and nanopores [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(8): 4870-4879.
- [19] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [20] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 48-52.
He Yaling, Wang Yong, Li Qing. Lattice Boltzmann method: theory and applications [M]. Beijing: Science Press, 2009: 48-52.
- [21] Ning Z F, Bo W, Feng Y, et al. Microscale effect of microvoids in shale reservoirs [J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(4): 492-499.
- [22] Zou Q, He X. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model [J]. Physics of Fluids, 1997, 9(6): 1591-1598.
- [23] Succi S. Mesoscopic modeling of slip motion at fluid-solid interfaces with heterogeneous catalysis [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(6): 645021-645024.
- [24] 刘加利, 张继业, 张卫华. 基于格子 Boltzmann 方法的微气体流动速度滑移边界条件的检验[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(7): 647-653.
Liu Jiali, Zhang Jiye, Zhang Weihua. Assessment of velocity-slip boundary conditions of micro gas flow based on lattice Boltzmann method [J]. Chinese Journal of Vacuum Science & Technology, 2013, 33(7): 647-653.
- [25] Tang G H, Tao W Q, He Y L. Lattice Boltzmann method for simulating gas flow in microchannels [J]. International Journal of Modern Physics C, 2012, 15(2): 335-347.
- [26] Karniadakis G, Beskok A, Aluru N. Microflows and nanoflows: fundamentals and simulation [M]. New York: Springer, 2005.
- [27] 张琴, 刘物, 梅啸寒, 等. 页岩气储层微观储集空间研究现状及展望[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 666-674.
Zhang Qin, Liu Chang, Mei Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 666-674.
- [28] 计秉玉, 赵宇, 宋考平, 等. 低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 129-133.
Ji Bingyu, Zhao Yu, Song Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [29] 任晓霞, 李爱芬, 王永政, 等. 考虑滑脱效应的非稳态气体渗透性实验研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4): 733-736.
Ren Xiaoxia, Li Aifen, Wang Yongzheng, et al. Gas permeability experimental study of low permeability core considering effect of gas slippage [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4): 733-736.
- [30] 高涛, 郭肖, 郑玲丽, 等. 页岩滑脱效应实验[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(1): 150-154.
Gao Tao, Guo Xiao, Zheng Lingli, et al. Experiment on the slippage effect in the shale [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(1): 150-154.
- [31] 胡心馨, 郭照立, 郑楚光. 格子 Boltzmann 模型的边界条件分析[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(2): 127-134.
Hu Xinlv, Guo Zhaoli, Zheng Chuguang. Analysis of boundary conditions for lattice Boltzmann model [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(2): 127-134.

编辑 常迎梅