

致密岩石介质中气体滑脱效应的研究进展

冉艳霞, 叶斌, 程子睿

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 致密岩石介质中的气体渗流有别于液体渗流, 其中滑脱效应是影响致密岩石介质中气体渗流规律的一个重要因素。通过分析国内外学者在气体滑脱效应方面的研究进展, 总结了滑脱效应的产生机理和产生条件, 认为气体分子在孔壁附近的运动状态是产生滑脱效应的根本原因。同时围绕孔隙气体压力、围压、含水饱和度、气体性质等因素对气体滑脱效应的影响及实质进行综合分析。分析结果对研究低渗透多孔介质中气体渗流规律和测定低渗气田开发中气体渗透率参数等方面具有较大的参考意义。

关键词: 致密岩石介质; 气体渗流; 滑脱效应; 低渗介质; 渗透率

中图分类号: TU45

文献标识码: A

RESEARCH PROGRESS OF GAS SLIPPAGE EFFECT IN COMPACT POROUS MEDIUM

RAN Yanxia, YE Bin, CHENG Zirui

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The gas seepage in compact rock media is different from fluid seepage. The gas slippage effect is an important factor affecting gas flow in compact porous media. This paper summarizes the research progress on the gas slippage effect and synthetically analyzes the production mechanism and conditions of slippage effect, considering that the motion state of gas molecules near the pore wall contributes to the slippage effect of the gas. In addition, the effect of pore gas pressure, confining pressure, water saturation, gas properties, and other factors on the effect of gas slippage and its essence are studied and analyzed. It is of great reference for studying gas flow law in low permeability medium and measuring the gas permeability parameters in the development of low-permeability gas fields, etc.

Key words: compact rock media; gas seepage; slippage effect; low permeability medium; permeability

0 引言

致密岩石介质中的渗透流体一般分为液体和气体^[1]。流体在岩石中发生流动, 称为流体渗流。传统理论认为致密岩石的绝对渗透率大小与流体

介质的种类和性质无关, 即利用气体测试的岩石绝对渗透率与利用其它任何介质测试的结果应当相同。然而, 大量的研究发现利用气体测试的渗透率与利用液体测试的渗透率存在明显差异, 而且这种差异性随着岩石渗透性的降低更加显著^[2]。Klinkenberg^[3]于1941年最早提出了气体在多孔介

质中存在滑脱效应来解释这一现象。他将滑脱效应定义为气体分子在孔隙壁面附近速度不等于零的现象,认为这种现象导致了岩石中气测渗透率大于液测渗透率。

研究气体渗流中的滑脱效应对地下储气工程与包气带污染等工程、地质环境评价与保护、岩石工程建设及地下流体资源开发中的气体渗流规律具有重要的意义。此外,随着高渗透气藏资源越来越少,致密气藏的开发越来越受到油气工业的重视。致密储层的天然气储量已构成全球天然气资源的重要比例,并为未来储量增长和生产提供了巨大的潜在资源。渗透率是决定气体产量行为的基本参数之一,也是储层评价和产量预测的必要指标之一。因此,研究滑脱效应对提高低渗透气藏产能具有重要意义^[4-6]。文章旨在对目前已开展的关于岩石中气体滑脱效应方面的研究进行综述,探讨滑脱效应的产生机理和影响因素等,为今后这一方面的研究和应用提供参考和借鉴。

1 气体滑脱效应产生的机理和条件

1.1 滑脱效应产生的机理

气藏的大量投入开发使气体滑脱效应得到了广泛的关注,许多学者对气体滑脱效应的产生机理及其对气体渗透率等方面开展了大量研究工作^[7-10]。当气体在致密孔隙介质中低速渗流时,滑脱现象是气体渗流有别于油、水等液体渗流的主要物理现象^[7]。气体和液体之间的差异,通常是由两者分子结构和分子间作用力的差异造成的^[8]。刘晓旭等^[9]分析认为气体滑脱效应产生的实质性原因是毛细管壁处气体分子的滑流以及毛细管内部气体分子扩散的综合效应,具体表现在:①气—固之间的分子作用力远小于液—固之间的分子作用力,气体分子在孔壁处不全部粘附于孔壁上而仍处于运动状态,相邻层的气体分子由于动量交换,可连同孔壁处的气体分子一起沿孔壁定向流动。②气体渗流同时伴随着气体分子的扩散,扩散的驱动力是浓度梯度,遵循 Fick 扩散定律。这种气体扩散现象也会导致出现更大的渗透率。高树生等^[10]认为气体分子在多孔介质中存在两种运动形式:一种是分子之间的相互碰撞,另一种是分子与孔壁之间的相互碰撞。这两种碰撞

作用的物理机制不同,一种是能量在气体分子内部的传递,另一种则是气体分子受外部力量作用使能量增加。后者使气体渗流规律宏观上产生了气体滑脱效应,即气测渗透率大于绝对渗透率。陈代殉^[11]在研究气体滑脱现象与渗透率之间的关系中同样认为滑脱现象产生是由气体分子碰撞岩壁所致,主要由多孔介质的孔隙结构和渗流气体的压力(即气体分子的平均自由程)共同决定。气体在多孔介质中低速渗流是由黏滞流与滑脱流组成,各自所占比例与气体分子按自由程的分布有关。

以上学者的研究分析成果表明:气体滑脱流动的本质是气体在多孔介质的渗流过程中,当气体分子的平均自由程接近孔隙通道的尺寸时,由于气体分子与孔壁的作用使得各个气体分子在孔壁附近都处于运动状态,即壁面上各个分子的运动速度不再为零,从而贡献一个附加通量,在宏观上即表现为气体的滑脱效应。

1.2 滑脱效应产生的条件

气体渗流过程中产生滑脱效应与岩石本身的渗透率、含水饱和度、渗透气体的压力(即气体分子的平均自由程)等因素有关。多数学者认为滑脱效应普遍存在于低渗透岩石中。当储层渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,气体滑脱效应可以忽略不计。

滑脱效应产生的条件可以用克努森数来表示。Knudsen (1934)^[12]曾定义无量纲数(克努森数): $Kn = \lambda/D$ 。其中 λ 表示气体分子的平均自由程,是孔隙气体压力和温度的函数; D 表示流体连续介质的特征长度,与储层渗透率成正比关系。

根据克努森数的不同,可以将气体在岩石中的流动状态划分为四个不同的区域^[13-14]:连续介质区 ($Kn < 0.001$)、滑移区 ($0.001 < Kn < 0.1$)、过渡区 ($0.1 < Kn < 10$) 和自由分子流区 ($Kn > 10$)。当 $Kn < 0.001$ 时,气体流动服从达西定律,而当 $Kn > 0.001$ 时,气体渗流会产生滑脱效应^[15-16]。

2 考虑气体滑脱效应的理论模型

气体在多孔介质中的滑脱现象最早出现于 Klinkenberg 的研究中^[17],而 Klinkenberg 模型也成为了表征气体滑脱效应的经典模型。Klinkenberg^[3]经试验研究发现气测渗透率与平均孔隙气体压力

的倒数近似成线性关系,并给出了考虑滑脱效应的气体渗透率随压力变化的一次线性关系式:

$$k_g = k_\infty (1 + b/p_m) \quad (1)$$

公式中: k_g 为气测渗透率, m^2 ; k_∞ 为绝对渗透率,即为不考虑滑脱效应的渗透率,与渗流介质无关, m^2 ; p_m 为渗透气体的压力, MPa; b 为滑脱因子,又称为 Klinkenberg 系数, MPa, 可以表示为:

$$b = 4c\lambda p_m/r \approx 4p_m Kn \quad (2)$$

λ 为给定压力和温度下的气体分子平均自由程, nm; r 为孔隙平均半径, nm; c 为近似为 1 的比例常数。

由公式 (2) 还可以得到以克努森数表征的 Klinkenberg 方程形式:

$$k_g = k_\infty (1 + 4Kn) \quad (3)$$

从公式 (1) 至公式 (3) 可以看出,同一岩石的气测渗透率大于液测渗透率 ($k_g > k_\infty$); 气体压力越小,气测渗透率 k_g 越大;岩石越致密,孔隙半径越小,则克努森数 (Kn) 滑脱因子 (b) 越大,滑脱效应越显著。

Beskok 和 Karniadakis^[18] 基于微管模型提出了更为复杂的能够表征不同流态下的气体体积流量计算公式:

$$q = f(Kn) \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu l} \quad (4)$$

公式中 r 为微管的半径, m; μ 为流体黏度, Pa·s; l 为微管的长度, m; Δp 为压力差, MPa; $f(Kn)$ 为渗透率修正因子,只与克努森数 Kn 的大小有关:

$$f(Kn) = (1 + \alpha Kn) \left(1 + \frac{4Kn}{1 + Kn} \right) \quad (5)$$

公式中 α 为无因次稀疏系数:

$$\alpha = \frac{128}{15\pi^2} \tan^{-1} [4.0Kn^{0.4}] \quad (6)$$

对于黏性流和滑移流, $Kn < 0.1$, 渗透率修正因子二级和高级修正可以忽略不计,公式 (5) 可以演变成公式 (3)。因此, Klinkenberg 渗透率可以看作 Knudsen 渗透率的一级修正^[15]。

极低渗透性岩层常作为气体储存的主要场所,如:页岩、致密砂岩等。近年来,许多学者^[19-20] 研究发现气体在低渗透岩芯中的流动不完全符合 Klinkenberg 线性方程。Li 等^[21] 在低渗透岩芯中也观察到了 Klinkenberg 线性偏离现象,并认为继续应用这种线性关系会导致渗透储层的绝对渗透率偏大。Moghadam 等^[22] 提出了一种新的分析方法来

预测和解释低渗透介质中的气体滑脱效应,结果显示气测渗透率和压力的倒数之间具有二次关系。Fathi 等^[23] 采用格子 Boltzmann 方法模拟气体渗流以此研究纳米孔隙中的滑脱效应,其结果同样说明 Klinkenberg 方程在低渗透介质中有显著线性偏离现象,并对 Klinkenberg 方程进行了修改,提出一个双滑移 Klinkenberg 方程,即:

$$k_g = k_\infty \left[1 + \left(\frac{b}{p_m} \right)^2 \left(\frac{L_{ke}}{\lambda} \right) \right] \quad (7)$$

公式 (7) 中引入了一个新的长度物理量 L_{ke} , 与气体分子碰撞后的反冲动能有关。与 Klinkenberg 方程预测所获结果相比,该方程预测获得的纳米孔隙介质中的气测渗透率能更好的符合试验结果。

3 气体滑脱效应的试验研究

国内外学者^[24-28] 为了验证滑脱效应的存在及研究滑脱效应的特征进行了大量气体渗流试验研究。李宁等^[26] 采用稳态法,选用渗透率在 $0.0001 \times 10^{-3} \sim 1.00 \times 10^{-3} \mu m^2$ 范围内与孔隙度分布在 10% 以下的岩芯开展气体渗流试验。试验结果表明,在砂岩或碳酸盐岩岩芯中均存在着气体低速非达西渗流现象。由滑脱效应造成的“拟初始流速”使气体视渗透率变大,导致多孔介质的气测渗透率大于绝对渗透率。姚约东等^[27] 进一步选择氮气、氦气、二氧化碳作为试验气体,对渗透率分布在 $0.0025 \times 10^{-3} \sim 3.1 \times 10^{-3} \mu m^2$, 孔隙度分布在 7.5% ~ 18.5% 范围内的岩芯开展试验。试验结果与李宁等^[26] 一致,气测渗透率大于绝对渗透率,气体渗流曲线表现为非达西渗流特征,该结果证明了滑脱效应的存在。Jones 等^[28] 通过砂岩气体渗流实验同样证实了滑脱效应的存在。而不同致密储层(煤、页岩、致密砂岩等)具有不同的物质组成和不同的孔喉结构等,故气体滑脱效应的特征也有所不同。

3.1 不同致密储层中的滑脱效应

3.1.1 砂岩

熊伟等^[29] 认为特低渗透砂岩储层(小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu m^2$) 的渗流特征通常是符合克氏渗流曲线特征的,但在孔隙压力很低时会出现较强滑脱效应而表现为非线性渗流特征。朱光亚等^[30] 对苏里格气田 32 块低渗砂岩岩样进行了气体渗流试验,试验表明: Klinkenberg 系数随储层渗透率的增大而

减小,当储层渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,气体滑脱效应可以忽略不计;Klinkenberg 系数随着平均孔隙气体压力的增大而减小,当孔隙气体压力大于 1.5 MPa 时,气体滑脱效应也可以忽略不计。王环玲等^[31]则以某致密砂岩为研究对象,就孔隙气体压力和围压对滑脱效应的影响、滑脱效应对气测渗透率的影响以及滑脱因子与绝对渗透率的函数关系开展了研究,获得了平均气体孔隙压力与渗透率的关系(见图1)。在图1中,相同的孔隙气体压力下,围压 2.5 MPa 对应的渗透率最大;平均气体孔隙压力倒数较小时,围压的变化对渗透率的影响较小。分析表明滑脱效应对气测渗透率的影响随着围压和孔隙气体压力的变化有所不同,同等围压下,孔隙气体压力越小,滑脱效应越明显,导致气测渗透率大于砂岩绝对渗透率;同等孔压下,随着围压增加,岩石的孔隙被压密,滑脱因子的值随着围压增加出现先增大后减小的趋势。这是由于围压增加到一定值、介质孔喉缩小,导致渗透率降低,表现出滑脱效应减弱的现象。砂岩的平均气体孔隙压力与气测渗透率关系更符合二次项曲线方程。

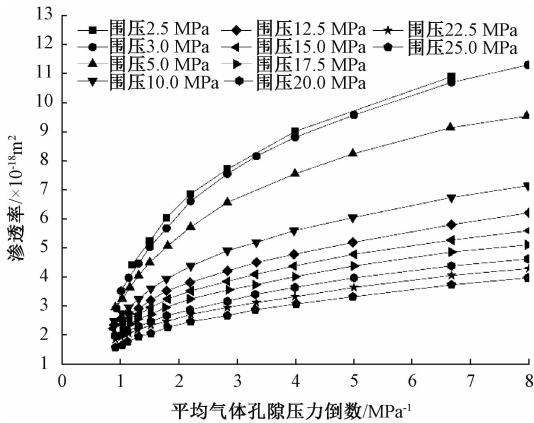


图1 平均气体孔隙压力与渗透率关系^[31]

Fig. 1 Relationship between average pore pressure and gas permeability^[31]

3.1.2 煤层

煤层是一种渗透率较低、含水饱和度较高的非常规储层^[32]。当气体低速渗流时存在临界压力,若压力高于临界压力,气体渗流会受滑脱效应影响,表现为气体有效渗透率随压力的增大而减小。肖晓春等^[33]对不同矿区低渗煤样的渗流规律进行了试验研究,证实气体在低渗煤样中的运移普遍存在滑脱效应;此外,还探讨了孔隙气体压力与低渗煤样气体滑脱效应的关系,认为随着孔隙气

体压力的增加,滑脱效应减弱;同时指出在高围压情况下,气体滑脱效应十分显著,气测渗透率迅速增大,尤其对于低渗储层,在一定储层压力范围内,储层渗透率都将处于滑脱效应的主导阶段,并且随着围压的增加,滑脱效应消失的孔隙压阈值在增大。李俊乾^[34]研究了 4.3 MPa 围压条件下煤岩气相(氦气)渗透率变化特征,试验发现当平均气体压力小于 1.0 MPa 时,氦气产生滑脱现象。致密的多孔介质渗透性较差,在低压条件下气体滑脱效应十分显著。通常孔隙直径越小,滑脱效应越明显;气体压力越低,气体密度越小,滑脱效应也越明显。肖晓春等^[33]推断在低渗煤样中,孔隙压力较低时为滑脱效应主导阶段;随着孔隙压力升高,滑脱效应逐渐减弱,此时渗透率仍随之增加,这是由于煤基质的收缩显著加剧,导致从基质中解吸出的煤层气增多。

3.1.3 其他储层

高树生等^[5]对渗透率分别为 0.0085 mD 和 0.0007 mD 的页岩储层岩样进行试验研究,分析认为在孔隙压力较低(小于 10 MPa)的情况下,气体渗流存在较强的滑脱效应,而在孔隙压力较高的情况下气体滑脱效应不明显。浅层(储层压力小于 5 MPa)页岩气储层滑脱效应对气井产能和生产压差影响较大,中深层(储层压力小于 10 MPa)有一定程度的影响,而深层页岩气储层滑脱效应可以忽略不计。贾朝军等^[35]通过试验发现,在相同围压下改变孔隙气体压力大小,气体流量曲线不再是一条直线,表现出非达西渗流特性。试验结果显示流量在较低孔隙气体压力下变化较快,随着孔隙气体压力的增加,曲线趋于直线变化。当孔隙气体压力达到 2.5 MPa 时,滑脱贡献率低至 3.80%,此时滑脱效应对工程的影响较小可忽略不计。并且认为低渗透岩样在较低孔隙气体压力下,气体分子与孔壁的滑脱作用在渗流中起主导作用,故气测渗透率以滑脱渗透率为主。当孔隙气体压力增大时,气体密度也随之增大,与孔壁碰撞的分子数量百分数减小,滑脱效应也逐渐减弱。在不同围压下,岩样出口端流量与进出口压力平方差之间呈凸状曲线关系(见图2)。同时还可以看出,当孔隙气体压力较大时,增大围压,对出口端的流量影响不大。

3.2 滑脱效应的影响因素分析

针对滑脱效应的影响因素,众多学者探讨了

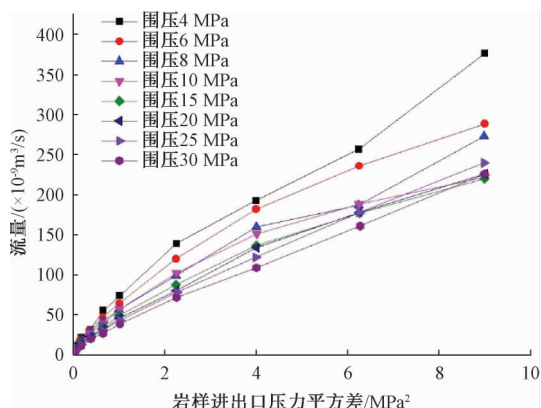


图2 流量与进出口压力平方差曲线^[35]

Fig. 2 Curves of flow and outlet pressure squared difference^[35]

压力、多孔介质孔隙结构、含水饱和度及气体种类等与气体滑脱效应之间的关系。Heid等^[36]分析认为影响气体滑脱效应的主要因素包括岩芯渗透率、气体性质(如气体黏度、气体分子量)、环境温度、孔隙气体压力等。姚约东等^[27]观察到,因滑脱效应的存在,使得气测渗透率在渗流过程中随气体性质、外界温度和压力等因素的变化而产生变化。Wu等^[37]的研究也证实了气体滑脱效应受孔隙气体压力、围压、孔隙半径以及岩石渗透率等因素影响。

滑脱效应大小与地层绝对渗透率有着密不可分的关系。越致密的岩石,渗透性越低,滑脱效应越明显。对于低渗气藏,地层绝对渗透率对滑脱因子 b 的大小影响非常显著,当岩芯渗透率增大到一定值后,随着岩芯渗透率的增大, b 值逐渐减小,而且变化平稳;当岩芯渗透率降低到一定值后,随着岩芯渗透率降低, b 值急剧上升,两者呈幂函数关系^[38]。姚约东^[27]研究表明滑脱效应还与气体性质有关。他对比分析了氮气、二氧化碳和氮气在岩石介质中的渗透性,发现滑脱效应随气体分子量的增大而减小,随气体黏度的增大而增大。此外,氮气作为惰性气体,有别于二氧化碳和氮气,在渗流过程中不受吸附影响,类似于降低了视黏度,使得氮气的 b 值偏小。

气体在多孔介质中向前运移时,碰撞不仅发生在气体分子之间,还要发生在气体分子与孔隙壁之间。随着气体分子与多孔介质壁面碰撞机会的增大,滑脱效应对渗流的影响增大^[27]。而岩石渗透率随围压发生变化的原因主要是微裂隙的闭合与微空洞体积的降低^[35]。岩石是一种内部存在微裂隙和微孔洞的多孔介质,这些相互贯通的裂

隙和孔洞组成了渗流的通道,围压增加会导致孔隙喉变小、孔隙闭合,阻塞了气体在岩石中的渗透。微裂隙作为渗流的主要通道,其对压力的变化很敏感,所以渗透率会由于微裂隙的闭合而急剧降低;随着微裂隙的完全闭合,围压继续增加而渗透率降低主要是由于微空洞的闭合。

高树生等^[10]在试验中发现含水饱和度在50%时,Klinkenberg曲线变化幅度很小,整个渗流过程中渗透率几乎不发生变化;当含水饱和度降到40%左右,气体渗流的Klinkenberg曲线开始表现出不含水的单相气体渗流特征,渗透率随着平均压力降低而增加,滑脱现象出现;随着含水饱和度继续降低至30%左右时,滑脱现象更加明显;当含水饱和度降到20%左右时,气体渗流的Klinkenberg曲线接近于不含水的单相气体渗流特征,出现强滑脱现象。赵继涛等^[39]认为孔隙结构中的水占据了孔隙间连通喉道的一部分,使得气体渗流的阻力增大。另一方面,岩石的含水饱和度越高,其弹性模量越小,在应力作用下越容易发生变形,从而影响渗透率的变化。相同压力梯度下含水率越高,渗流速度越低,则储层岩石的初始气测渗透率越低,气体滑脱现象随含水饱和度的增大而明显减弱。同时,陈霞等^[32]认为含水饱和度越大,气体渗流的启动压力梯度越大,滑脱现象越不易产生。

4 结论

关于气体在岩石渗流过程中所发生的滑脱效应,众多学者已经进行了试验和理论上的研究和探索,得到如下结论:

(1) 气体在致密岩石介质中低速渗流时,产生气体滑脱效应的实质是:气体分子的平均自由程接近孔隙孔径的尺寸时,孔隙壁面上各个气体分子都处于运动状态而速度不再为零,并且贡献一个附加流量,从而在宏观上表现为气体在孔隙壁面上具有非零速度,产生滑脱效应。当储层渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,气体滑脱效应可以忽略不计。

(2) Klinkenberg提出气测渗透率与平均孔隙气体压力的倒数近似成线性关系,从而建立了Klinkenberg模型,该模型是表征气体滑脱效应的经典模型。但在低渗透介质中Klinkenberg方程存

在显著偏离现象,需对其结果进行修正。

(3) 大量气体渗流试验结果均证实了气体在储层多孔介质中都存在滑脱效应。对于高渗透储层,滑脱效应引起的渗透率增加占比很低,可以忽略不计;而对于低渗储层,滑脱效应引起的渗透率增加明显,不能忽略。由于滑脱效应的存在,气体在致密岩石介质中的渗透规律表现出非达西渗流特征。由于不同致密储层(煤、页岩、致密砂岩等)具有不同的物质组成和不同的孔喉结构等,气体滑脱效应的特征也有所不同。在页岩、砂岩等致密储层中,低孔隙气体压力下滑脱效应显著,随着孔隙气体压力的增大,滑脱效应逐渐减弱,导致渗透率降低;而气体在煤层中渗流时,随着孔隙气体压力的升高,滑脱效应同样也出现逐渐减弱现象,但是此时渗透率仍然随之增加。

(4) 气体滑脱效应普遍存在于致密岩石介质中,由多种因素共同影响,包括岩石特征、岩芯渗透率、气体性质(例如气体黏度、气体的分子量)、环境温度、孔隙气体压力、围压条件等。越致密的多孔介质,渗透性越低,滑脱效应越显著。对于不同的气体,滑脱效应随气体分子量的增大而减小,随气体黏度的增大而增大。此外,气体滑脱效应随含水饱和度的增大而明显减弱。

参考文献/References

- [1] Wang H L, Xu W Y, Shao J F. Experimental researches on hydro-mechanical properties of altered rock under confining pressures [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47 (2): 485 ~ 493.
- [2] 车廷信,王学武,田文博,等. 渗流介质对渗透率测试结果的影响 [J]. *科技导报*, 2012, 30 (35): 25 ~ 28.
CHE Tingxin, WANG Xuewu, TIAN Wenbo, et al. Effect of different types of seepage fluid on permeability [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30 (35): 25 ~ 28. (in Chinese with English abstract)
- [3] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases [A] // *Drilling and Production Practice* [C]. New York: American Petroleum Institute, 1941, 200 ~ 213.
- [4] 徐兵祥,李相方,尹邦堂. 滑脱效应对气井产能评价的影响 [J]. *天然气工业*, 2010, 30 (10): 45 ~ 48.
XU Bingxiang, LI Xiangfang, YIN Bangtang. Influence of gas slippage on gas well productivity evaluation [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30 (10): 45 ~ 48. (in Chinese with English abstract)
- [5] 高树生,于兴河,刘华勋. 滑脱效应对页岩气井产能影响的分析 [J]. *天然气工业*, 2011, 31 (4): 55 ~ 58.
GAO Shusheng, YU Xinghe, LIU Huaxun. Impact of slippage effect on shale gas well productivity [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31 (4): 55 ~ 58. (in Chinese with English abstract)
- [6] 熊健,郭平,李凌峰. 滑脱效应和启动压力梯度对低渗透气藏水平井产能的影响 [J]. *大庆石油学院学报*, 2011, 35 (2): 78 ~ 81.
XIONG Jian, GUO Ping, LI Lingfeng. Impact of slippage effect and start-up pressure gradient on deliverability of low-permeability gas reservoirs [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2011, 35 (2): 78 ~ 81. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈代询,王章瑞,高家碧. 气体滑脱现象的综合特征参数研究 [J]. *天然气工业*, 2003, 23 (4): 65 ~ 67.
CHEN Daixun, WANG Zhangrui, GAO Jiabi. Integrated characteristic parameter study of the gas slippage phenomenon [J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23 (4): 65 ~ 67. (in Chinese with English abstract)
- [8] Noman R, Kalam M Z. Transition from laminar to non-Darcy flow of gases in porous media [A]. Worthington P F. *Advances in Core Evaluation: Accuracy and Precision in Reserves Estimation* [M]. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 1990, 447 ~ 482.
- [9] 刘晓旭,胡勇,朱斌,等. 气体低速非达西渗流机理及渗流特征研究 [J]. *特种油气藏*, 2006, 13 (6): 43 ~ 46.
LIU Xiaoxu, HU Yong, ZHU Bin, et al. Study on low-velocity non-Darcy gas percolation mechanism and characteristics [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2006, 13 (6): 43 ~ 46. (in Chinese with English abstract)
- [10] 高树生,熊伟,刘先贵,等. 低渗透砂岩气藏气体渗流机理实验研究现状及新认识 [J]. *天然气工业*, 2010, 30 (1): 52 ~ 55.
GAO Shusheng, XIONG Wei, LIU Xiangui, et al. Experimental research status and several novel understandings on gas percolation mechanism in low-permeability sandstone gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30 (1): 52 ~ 55. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈代询. 渗流气体滑脱现象与渗透率变化的关系 [J]. *力学学报*, 2002, 34 (1): 96 ~ 100.
CHEN Daixun. GAS slippage phenomenon and change of permeability when gas flows in tight porous media [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34 (1): 96 ~ 100. (in Chinese with English abstract)
- [12] Loeb L B. The kinetic theory of gases [J]. *Science*, 1934, 80 (2079): 406 ~ 407.
- [13] Hadjiconstantinou N G. The limits of Navier-Stokes theory and kinetic extensions for describing small-scale gaseous hydrodynamics [J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18 (11): 111301.
- [14] 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.
- [15] 刘圣鑫,钟建华,刘晓光,等. 致密多孔介质气体运移机理 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25 (10): 1520 ~ 1528.
LIU Shengxin, ZHONG Jianhua, LIU Xiaoguang, et al. Gas transport mechanism in tight porous media [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25 (10): 1520 ~ 1528. (in Chinese with English abstract)
- [16] 范鑫. 页岩基质流固耦合数值模拟与人工裂缝参数优化研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
FAN Xin. Research on hydro-mechanical coupled simulation in shale matrix and parameter optimization of hydraulic fracture

- [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016. (in Chinese with English abstract)
- [17] Zheng Q, Yu B M, Duan Y G, et al. A fractal model for gas slippage factor in porous media in the slip flow regime [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 87: 209 ~ 215.
- [18] Beskok A, Karniadakis G E. Report: a model for flows in channels, pipes, and ducts at micro and nano scales [J]. *Microscale Thermophysical Engineering*, 1999, 3 (1): 43 ~ 77.
- [19] Rushing J A, Newsham K E, Lasswell P M, et al. Klinkenberg-corrected permeability measurements in tight gas sands; steady-state versus unsteady-state techniques [A]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition* [C]. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [20] Tanikawa W, Shimamoto T. Comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46 (2): 229 ~ 238.
- [21] Li S, Dong M, Li Z. Measurement and revised interpretation of gas flow behavior in tight reservoir cores [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 65 (1 ~ 2): 81 ~ 88.
- [22] Moghadam A A, Chalaturmyk R. Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 123: 2 ~ 9.
- [23] 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: 51 ~ 59.
- [24] Baehr A L, Hult M F. Evaluation of unsaturated zone air permeability through pneumatic tests [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27 (10): 2605 ~ 2617.
- [25] Dong M Z, Li Z W, Li S L, et al. Permeabilities of tight reservoir cores determined for gaseous and liquid CO₂ and C₂H₆ using minimum backpressure method [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2012, 5: 1 ~ 5.
- [26] 李宁, 唐显贵, 张清秀, 等. 低渗透气藏中气体低速非达西渗流特征实验研究 [J]. *天然气勘探与开发*, 2003, 26 (2): 49 ~ 55, 28.
LI Ning, TANG Xiangui, ZHANG Qingxiu, et al. Experimental study on low-velocity non-Darcy gas percolation characteristics in low-permeability gas reservoirs [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2003, 26 (2): 49 ~ 55, 28. (in Chinese)
- [27] 姚约东, 李相方, 葛家理, 等. 低渗气层中气体渗流克林贝尔效应的实验研究 [J]. *天然气工业*, 2004, 24 (11): 100 ~ 102.
YAO Yuedong, LI Xiangfang, GE Jiali, et al. Experimental research for klinkenberg effect of gas percolation in low permeable gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24 (11): 100 ~ 102. (in Chinese with English abstract)
- [28] Jones F O, Owens W W. A laboratory study of low-permeability gas sands [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1980, 32 (9): 1631 ~ 1640.
- [29] 熊伟, 高树生, 胡志明, 等. 低、特低渗透砂岩气藏单相气体渗流特征实验 [J]. *天然气工业*, 2009, 29 (9): 75 ~ 77.
XIONG Wei, GAO Shusheng, HU Zhiming, et al. An experimental study on the percolation, characteristics of single phase gas in low and ultra-low permeability sandstone gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29 (9): 75 ~ 77. (in Chinese with English abstract)
- [30] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究 [J]. *天然气工业*, 2007, 27 (5): 44 ~ 47.
ZHU Guangya, LIU Xiangui, LI Shutie, et al. A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27 (5): 44 ~ 47. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王环玲, 徐卫亚, 巢志明, 等. 致密岩石气体渗流滑脱效应试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38 (5): 777 ~ 785.
WANG Huanling, XU Weiya, CHAO Zhiming, et al. Experimental study on slippage effects of gas flow in compact rock [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38 (5): 777 ~ 785. (in Chinese with English abstract)
- [32] 陈霞, 刘洪林, 王红岩, 等. 沁水盆地含水煤层气藏的气体渗流特征 [J]. *石油学报*, 2011, 32 (3): 500 ~ 503.
CHEN Xia, LIU Honglin, WANG Hongyan, et al. Gas-seepage characteristics of coalbed reservoirs with different water saturation in the Qinshui Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32 (3): 500 ~ 503. (in Chinese with English abstract)
- [33] 肖晓春, 潘一山. 滑脱效应影响的低渗煤层气运移实验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31 (10): 1554 ~ 1558.
XIAO Xiaochun, PAN Yishan. Experimental study of gas transfusion with slippage effects in hypotonic coal reservoir [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31 (10): 1554 ~ 1558. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李俊乾, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 气体滑脱及有效应力对煤岩气相渗透率的控制作用 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24 (5): 1074 ~ 1078.
LI Junqian, LIU Dameng, YAO Yanbin, et al. Controls of gas slippage and effective stress on the gas permeability of coal [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24 (5): 1074 ~ 1078. (in Chinese with English abstract)
- [35] 贾朝军, 王环玲, 徐卫亚, 等. 地下水封洞库围岩气体渗透特性及滑脱效应研究 [J]. *工程力学*, 2015, 32 (8): 50 ~ 57.
JIA Chaojun, WANG Huanling, XU Weiya, et al. Study on gas permeation and slippage effects in rock mass of underground water-sealed cave [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32 (8): 50 ~ 57. (in Chinese with English abstract)
- [36] Heid J G, McMahon J J, Nielsen R F, et al. Study of the permeability of rocks to homogenous fluids [M]. New York: API Drilling & Production Practice Press, 1950, 230 ~ 246.
- [37] 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.
- [38] 苗顺德, 吴英. 考虑气体滑脱效应的低渗透气藏非达西渗流数学模型 [J]. *天然气勘探与开发*, 2007, 30 (3): 45 ~ 48.
MIAO Shunde, WU Ying. Non-Darcy flow mathematical model for low-permeability gas reservoirs considering gas slippage effect [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2007, 30 (3): 45 ~ 48. (in Chinese with English abstract)
- [39] 赵继涛, 梁冰. 低渗气藏中气体非线性渗流的特征分析 [J]. *辽宁工程技术大学学报 (自然科学版)*, 2010, 29 (6): 1036 ~ 1038.
ZHAO Jitao, LIANG Bing. Analysis of gas non-linear characteristics on low-permeability gas reservoirs [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2010, 29 (6): 1036 ~ 1038. (in Chinese with English abstract)