

DOI: 10.11779/CJGE201712018

不同含水饱和度低渗透岩石气体滑脱效应研究

巢志明¹, 王环玲¹, 徐卫亚², 贾朝军², 方应东¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 低渗透岩石气体滑脱效应的研究是油气开采与存储领域十分重要的内容, 但目前关于低渗透岩石气体滑脱效应的研究大多是在气体单相流下进行的, 对于气-液两相流时, 液体对气体滑脱效应的影响, 所做的研究不足。因此, 利用研发的低渗透岩石惰性气体渗透性测试系统, 对含水饱和度为 0~70% 的低渗透砂岩, 进行了不同含水饱和度的低渗透岩石气体滑脱效应及有效渗透率变化规律的研究, 试验结果表明: ①二次公式 $k_g = k_{\infty}(1 + b/q - a/p^2)$ 可以较为准确的解释低渗透岩石的气体滑脱效应, 准确性明显高于 Klinkenberg 公式。②含水饱和度对低渗透岩石的气体滑脱效应有明显影响, 气体滑脱效应随着含水饱和度增大而减少, 在含水饱和度超过 50 % 时, 气体滑脱效应几乎完全被限制。③由于水的作用, 含水的低渗透岩石随着围压增大, 气体滑脱效应减少, 这与克氏理论的结论相反。④含水饱和度对低渗透岩石的有效渗透率影响显著, 随含水饱和度的增大有效渗透率减少, 且围压越大, 低渗透岩石的有效渗透率对含水饱和度变化越敏感。⑤低渗透岩石的有效渗透率与含水饱和度符合幂函数关系, 即 $k_{\infty} = k_0(1 - S_w)^c$ 。

关键词: 低渗透岩石; 克林伯格公式; 含水饱和度; 有效渗透率; 滑脱效应

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)12-2287-09

作者简介: 巢志明(1991 -), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与岩石渗流力学方面的科研。E-mail: chaozhiming@qq.com。

Gas Klinkenberg effect of low-permeability rocks with different degrees of water saturation

CHAO Zhi-ming¹, WANG Huan-ling¹, XU Wei-ya², JIA Chao-jun², FANG Ying-dong¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The research on gas Klinkenberg effect of low-permeability rock is an important issue in the field of underground oil and gas storage, but the current one on gas Klinkenberg effect is most conducted under single-phase flow of gas, lacking in the research on the action of fluid on gas Klinkenberg effect under two-phase flow (gas-liquid) condition. Therefore, using the low-permeability rock permeability test system, the change laws of gas Klinkenberg effect and the effective permeability of low-permeability rocks with water saturations ranging from 0% to 70% are studied. The experimental results show that: (1) The quadratic formula $k_g = k_{\infty}(1 + b/q - a/p^2)$ can accurately interpret the gas Klinkenberg effect of low-permeability rocks, and its accuracy is significantly higher than that of the Klinkenberg equation. (2) The water saturation of low-permeability rocks has significant effects on the Klinkenberg effect. The gas Klinkenberg effect decreases as the water saturation increases, and the gas Klinkenberg effect is completely limited when the water saturation is more than 50%. (3) Owing to the effect of water, the gas Klinkenberg effect of water-filled low-permeability rocks declines with the increase of confining pressure, and it is opposite to the Klinkenberg's theory. (4) The water saturation has significant effects on the effective permeability of low-permeability rocks. The effective permeability decreases along with the increase of water saturation, and the sensitive degree of the effective permeability of low-permeability rocks to water saturation decreases with the increase of confining pressure. (5) The relationship between the effective permeability and the water saturation agrees with the power function relationship, namely, $k_{\infty} = k_0(1 - S_w)^c$.

Key words: low-permeability rock; Klinkenberg formula; water saturation; effective permeability; Klinkenberg effect

0 引 言

目前关于低渗透岩石气体渗透性的研究多是在干燥状态下进行^[1], 而实际的工程现场, 水赋存于天然

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172090, 11272113, 51479049, 11572110, 51209075), 中央高校基本业务费基金项目(2016B05314)
收稿日期: 2016-09-01

岩石当中, 气体在岩石中的渗流是气-液两相渗流, 在此过程中水作为影响低渗透岩石气体渗透性的重要因素不能被忽略。

与液体不同, 当气体作为渗流介质在低渗透岩石中渗透时, 会产生滑脱效应。国内外学者对于气体单相流动时的滑脱效应做了大量研究, 吕志凯等^[2]研究指出随着围压增大, 岩石的气体滑脱效应增强; 吴家文等^[3]指出气体的滑脱效应随着气体平均压力的增大而减少; Tani 等^[4]研究得到低渗透岩石气体滑脱效应随着渗压增大而减小的结论; Zhu 等^[5]研究了低渗透煤岩的气体滑脱效应。但关于气-液两相流动时, 不同液相饱和度下气体滑脱效应所做的研究很少, 肖春晓等^[6]以低渗透储集层煤岩为研究对象, 指出煤岩的气体滑脱效应在低围压下随着含水饱和度的增大而增大, 在高围压下随着含水饱和度的增大而减少; Rose^[7]研究得出了岩石含水饱和度范围在 0~30% 时, 气体滑脱效应随着含水饱和度的增大而减少的结论; Este 等^[8]研究认为气体滑脱效应随着含水饱和度的增大而减少。综上, 目前关于不同含水饱和度岩石气体滑脱效应的变化规律并没有达成一致结论, 同时由于不同含水饱和度的低渗透岩石试样制取困难, 学者们研究的低渗透岩石含水饱和度的变化范围普遍较窄, 不能得到普遍成立的结论。因此对于不同含水饱和度低渗透岩石气体滑脱效应的变化规律需要更加深入的研究。

由于滑脱效应的存在, 导致气测渗透率较实际值偏大, 然而目前关于含水饱和度对于岩石渗透率大小的影响, 大多研究的是气测渗透率随岩石含水饱和度的变化, 如游利军等^[9]研究了含水饱和度对致密砂岩气测渗透率的影响, 曾平等^[10]研究了温度和含水饱和度共同作用下低渗透砂岩气测渗透率的变化, Shojaei 等研究了低渗透砂岩含水饱和度与气测渗透率的函数关系^[11], Ansaloni 等探究了含水饱和度对岩石气测渗透率影响的作用机理^[12], 但以上研究没有考虑滑脱效应对气测渗透率的影响, 试验结果准确性不足。

本文以低渗透砂岩为研究对象, 将其制备成相同规格不同含水饱和度的试样, 通过低渗透岩石惰性气体渗透性测试系统, 研究在含水饱和度 0~70% 范围内, 不同含水饱和度低渗透岩石的气体滑脱效应。试验结果用以分析实际地下工程中低渗透岩石的气体渗流规律。

1 气体滑脱效应

气体滑脱效应又叫克林伯格效应 (Klinkenberg effect), 是指气体在低孔隙度多孔介质中流动时, 当气体分子的平均自由程 (气体分子与其它分子相继两

次碰撞之间, 经过的直线路程的平均值) 接近孔隙半径时, 气体分子与介质孔隙管壁的碰撞增大, 管壁上各个分子处于运动状态, 因此在管壁上产生一个滑脱流量, 导致用气体测量渗透率时出现非达西流 (非线性流), 使得测得的气体渗透率大于实际渗透率的现象, 是 Klinkenberg 1941 年在试验中发现的^[13]。

Klinkenberg 提出的气测渗透率与绝对渗透率之间的关系表达式^[14]:

$$k = k_{\infty} \left(1 + \frac{4cI}{R} \right), \quad (1)$$

式中, k 为气测渗透率, k_{∞} 为绝对渗透率, c 为比例因子, I 为气体分子的平均自由程, R 为孔隙的平均半径。

此后众多学者通过试验发现, 气体分子平均自由程与平均孔隙压力成反比^[15-17], 因此式 (1) 可以改为

$$k = k_{\infty} \left(1 + \frac{b_k}{p_m} \right), \quad (2)$$

式中, b_k 为滑脱因子, p_m 为平均孔隙压力。

$$b_k = \frac{4cI}{R} p_m, \quad (3)$$

式中,

$$p_m = (p_i + p_o)/2, \quad (4)$$

其中, p_i 为进气口气体压力, p_o 为出气口气体压力。其中滑脱因子反映的是气体滑脱效应的强弱, 滑脱因子越大气体滑脱效应越大, 滑脱因子为零时, 气体流动是达西流。

2 试验过程

2.1 试样的筛选

试验的试样是低渗透砂岩, 砂岩的饱和含水率相对于别的低渗透岩石较高, 可以制备成含水率梯度相差较大的不同含水饱和度的岩石。将砂岩切割打磨成直径 50 mm × 高度 50 mm 的圆柱形试样。将切割后的圆柱形试样放入烘箱中以 70℃ 温度进行干燥^[18]。

将烘干后的岩样称重, 得到其密度, 将密度过大或过小的岩样剔除, 保证密度偏差在 3% 之内。筛选后的岩样用称量法^[19]计算孔隙度: 首先将干燥的岩样称重, 记为 m_g , 再将岩样放入蒸馏水中进行抽真空饱和, 测得饱水的岩样质量 m_b , 通过式 (5) 计算孔隙度, 将孔隙度偏差大的岩样剔除, 确保孔隙度偏差在 6% 之内, 避免因岩样孔隙度的离散性造成试验误差。

$$j = \frac{m_b - m_g}{r_s V_v}, \quad (5)$$

式中, j 为岩样孔隙度, r_s 为水的密度, V_v 为岩样体

积。

采用烘干法计算出每个岩样的饱和含水率, 将饱和含水率偏差大的岩样去除, 确保饱和含水率偏差在 3% 之内。

计算饱和含水率的公式:

$$w = \frac{m_c - m_d}{m_d}, \quad (6)$$

式中, w 为岩样的饱和含水率, m_c 为岩样饱水质量, m_d 为岩样烘干质量。

2.2 不同含水饱和度岩样的制备

由本中心的不同含水饱和度岩样制备装置, 如图 1, 根据饱和溶液气-液平衡原理: 饱和盐溶液在密封的容器内会形成恒定湿度的环境^[20], 特定的饱和盐溶液可以形成特定湿度的恒湿环境。岩样放入恒湿环境中, 岩样中的水和外界环境组成的体系会逐渐达到一种气液平衡, 岩样达到稳定的含水饱和度, 不同湿度下, 岩样达到不同的含水饱和度。通过抽真空, 将岩样孔隙中的气体抽出, 水蒸汽进入岩样的速度加快, 显著的缩短了岩样中的水和外界水蒸气达到平衡所需时间, 快速制得所需含水饱和度岩样。该方法制得的岩样含水分布均匀, 含水饱和度精确高且快速。具体操作步骤如下: 首先将岩样进行干燥 (或者抽真空饱水), 把烘干 (或饱水) 后的岩样放在密封容器内的垫片上, 垫片下放置饱和盐溶液, 制造恒湿环境, 用真空抽气泵将恒湿器内抽至一定真空度, 抽气结束后, 关闭抽气活塞, 将恒湿器密封, 保证恒湿器内湿度和负压恒定, 每隔 12 h, 将容器内压力释放, 岩样取出, 称重, 重复以上步骤, 直至岩样质量稳定, 即连续 3 次称重, 质量变化范围在 0.03 g 之内, 并计算岩样含水饱和度。

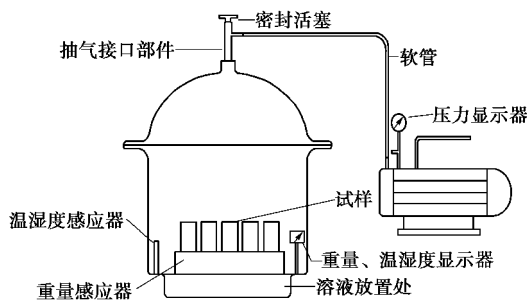


图 1 不同含水饱和度岩样制备装置示意图

Fig. 1 Devices for preparation of rock samples with different water saturations

含水饱和度计算公式:

$$s = 100 \frac{m_1 - m_0}{f u r_w}, \quad (7)$$

式中, f 为岩样孔隙度, u 为岩样体积, r_w 为水的密度。

本试验设置 7 个含水饱和度梯度, 配置所需的过

饱和盐溶液^[21], 将筛选后的砂岩岩样制备成不同含水饱和度的岩样, 如图 2, 岩样参数如表 1。具体制备过程如下:

(1) 将岩样 S-1, S-2, S-3, S-4, 放入烘箱中以 70℃ 烘烤, 每隔 12 h 取出称重, 直至岩样质量稳定。

(2) 取饱和度为 0% 的干燥状态下的岩样 S-1 作为参照。

(3) 将岩样 S-2 放于室内空气中 3 个月, 最终测得 S-2 含水饱和度 12.36%。

(4) 将岩样 S-3, S-4 分别放入装有饱和氯化钠溶液和饱和磷酸氢二钠 (十二水) 溶液的恒湿器内, 恒湿器内湿度分别是 75% 和 98%, 负压值 0.6 mpa, 待质量稳定, 分别测得 S-3 和 S-4 的含水饱和度是 19.29% 和 32.19%。

(5) 将抽真空饱水后的岩样 S-5, S-6 分别放入装有饱和醋酸钠溶液和饱和碳酸钾溶液的恒湿器内, 恒湿器内湿度分别是 70% 和 96%, 负压值 0.6 MPa, 待质量稳定, 分别测得 S-5 和 S-6 的饱和度是 42.42% 和 50.43%。

(6) 岩样 S-7 通过抽真空饱水的方法制取, 作为参照样。将岩样 S-7 饱水后在空气中静置一段时间, 让表面水挥发, 最终测得含水饱和度是 70%。

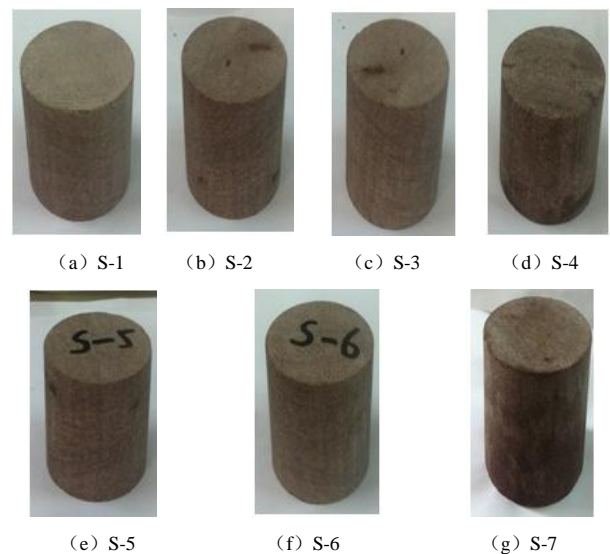


图 2 不同含水饱和度岩样

Fig. 2 Rock samples with different water saturations

2.3 试验设备与试验原理

岩样的渗透率由本试验室的低渗透岩石惰性气体渗透性测试系统测量。该试验仪器主要由岩心压力室、围压调节设备、渗压调节设备、上下游气压控制面板、压力显示器及高精度气体压力表组成, 通过电脑记录高敏压力表读数的变化, 并计算岩样的渗透率^[22]。为了防止试验过程中岩石与气体发生化学反应给试验带来误差, 本试验以氩气作为渗流介质。试验装置示意

图如图 3。

表 1 岩样参数

Table 1 Parameters of rock samples							
岩样 编号	直径 /mm	高度 /mm	含水饱 和度 /%	质量 /g	初始 密度 /(g·cm ⁻³)	密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙 度/%
S-1	50.02	50.51	0	245.15	2.47	2.47	7.09
S-2	49.97	50.86	12.36	245.21	2.46	2.47	6.91
S-3	50.16	50.48	19.36	247.06	2.48	2.49	6.96
S-4	50.13	50.58	31.87	244.42	2.46	2.50	7.17
S-5	50.21	50.85	42.43	248.18	2.44	2.49	7.15
S-6	50.04	50.72	50.43	246.27	2.46	2.51	6.91
S-7	49.85	51.40	70.00	249.85	2.44	2.54	7.02

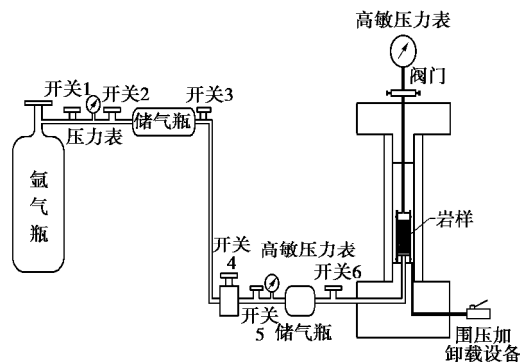


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Test devices for inert gas permeability of low-permeability rock

目前国内外低渗透岩石渗透率的测量方法主要有准静态法，压力脉冲法和气体流量法 3 种。气体流量法是在准静态法的基础上，在岩样出气端加上高敏压力表，记录出气端的压力变化并计算岩样的渗透率^[23]。考虑到测量岩样渗透率时所施加的气体渗透压力可能会影响岩样中水分的分布，引起试验误差，因此采用气体流量法，脉冲法，准静态法 3 种常见的测量岩石渗透率的方法对含水岩石渗透率进行测量。经过试验发现，通过压力脉冲法测量的同一含水饱和度岩样的渗透率差异较大，分析是脉冲法测量时间过短，气体由于水分的阻碍不能及时通过岩样，因此引起试验误差，而采用准静态法的测试发现同一含水饱和度岩样的测量结果差异也较大，分析是准静态法的时间过长，岩样中的水分有部分渗出影响试验结果。通过气体流量法的测试发现，同一含水饱和度岩样测试结果较为一致，因此选用气体流量法。

考虑到气体流量法所施加的渗压较大，在高渗压下不确定岩石孔隙中的水是否会渗出。因此选取一个筛选后的岩样，制成一定的含水饱和度，称重后放入低渗透岩石惰性气体渗透性测试系统中按照试验方案，分别在不同围压和渗压下测量岩样的渗透率，然后取出并称重，岩样质量仅下降了 0.08 g，含水饱和度仅下降了 0.005%，变化非常微小，因此可以忽略测量过程中气体压力引起的岩样含水饱和度的变化。气

体流量法试验原理见图 4。

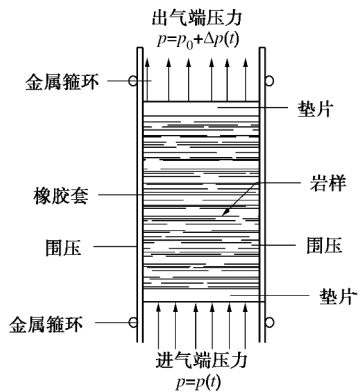


图 4 气体流量法原理示意图

Fig. 4 Principle of gas flow method

计算试样气测渗透率的公式为^[24]

$$k = \frac{2Q_s m L p_0}{A(p^2 + p_0^2)}, \tag{8}$$

式中， Q_s 为出气端气体流量， m 为氦气黏度系数， p 为进气端压力， A 是岩样横截面面积， L 为岩样长度。

其中，

$$Q_s = \frac{V_s \Delta p}{t \left(p_0 + \frac{\Delta p}{2} \right)}, \tag{9}$$

式中， V_s 为高精度气体压力表内部体积 $V_s=8\text{ mL}$ ， Δp 为 t 时间段内出气端气体压力增量。

2.4 试验方案

将制得的不同含水饱和度的岩样依次放入低渗透岩石惰性气体渗透性测试系统，测量岩样在不同围压和渗压下的渗透率。为了保证试验结果的可靠性，每个含水饱和度的对应 4 组岩样，测量其渗透率，剔除试验结果差异较大的岩样，取试验结果最具有代表性岩样的试验结果最为最终试验结果。具体试验方案如表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes			
岩石 编号	试验 方法	气体渗压 /MPa	围压取值 /MPa
S-1	气体流量 法	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4	3, 5, 10, 15 25, 35
S-2			
S-3			
S-4			
S-5			
S-6			
S-7			

3 试验结果及分析

3.1 气测渗透率与平均孔隙压力倒数的关系

Klinkenberg 在 1941 年提出 Klinkenberg 公式后，学者们通常采用 Klinkenberg 公式（式（1））解释气体滑脱效应^[25-26]，近些年一些学者研究发现虽然 Klinkenberg 公式解释渗透率较大的多孔介质的气体

滑脱效应较为精确, 但解释低渗透多孔介质的气体滑脱效应有较大偏差^[27-28], 这是由于 Klinkenberg 公式是基于毛细管中速度梯度是常量的假设而提出的, 但实际毛细管中的速度梯度并不是常量, 因此用 Klinkenberg 公式拟合得到的低渗透岩石的绝对渗透率₀的值偏大, 滑脱因子的值也有一定偏差, Alireza 等基于 Kundt 和 Warburg 提出的气体在毛细管中的速度梯度随着与管壁的距离增大而减少的假设, 提出一个二次公式解释低渗透多孔介质的滑脱效应^[29]:

$$k=k_{\infty}\left(1+\frac{b}{p}-\frac{a}{p^2}\right), \quad (10)$$

式中, k_{∞} 为绝对渗透率, b 为滑脱因子, a 为次级滑脱因子。

为了比较和验证式 (1) 和式 (10) 对低渗透岩石气体滑脱效应解释的精确程度, 做出每个围压下, 不同含水饱和度岩样的气测渗透率随平均孔隙压力倒数变化的曲线, 如图 5, 图中虚线为 Klinkenberg 公式拟合曲线, 实线为二次公式 (式 (10)) 拟合曲线。

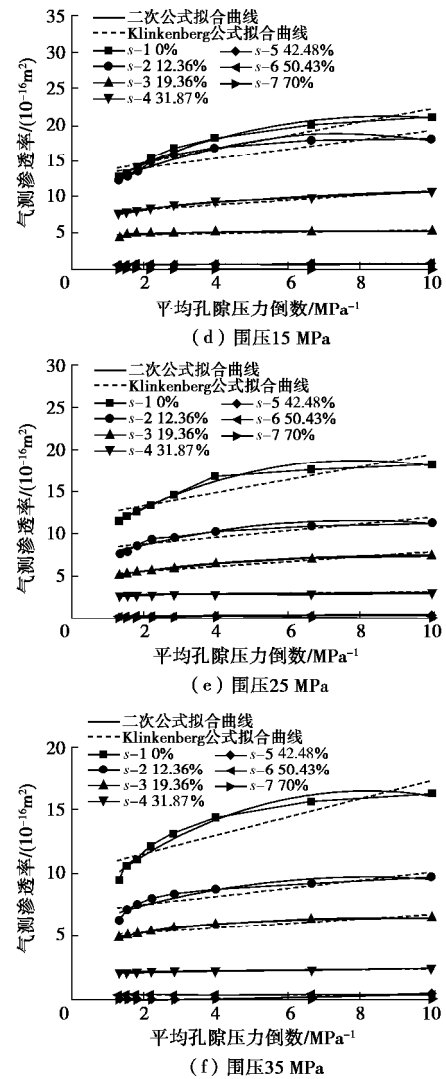
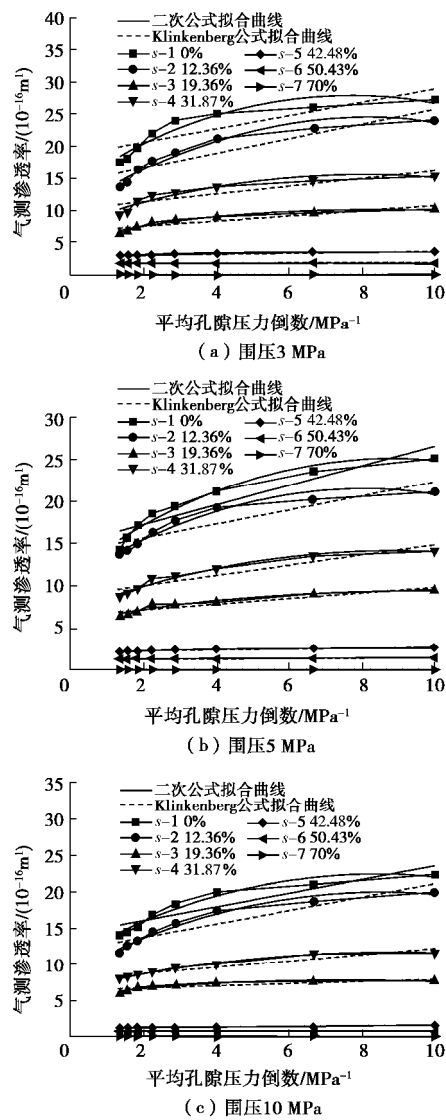


图 5 每个围压下不同含水饱和度岩样气测渗透与平均孔隙压力倒数关系及 Klinkenberg 公式和公式 10 拟合曲线

Fig. 5 Relationship between reciprocal of average pore pressure and gas permeability of rock samples with different water saturations and fitting of Klinkenberg equation and Equation (10) under various confining pressures

分别用 Klinkenberg 公式和式 (10) 对气测渗透率与平均孔隙压力倒数的关系曲线进行拟合, 拟合结果如表 3、4。式 (10) 的拟合曲线如图 5。

表 3 Klinkenberg 公式拟合度 R^2

含水饱和度/%	围压/MPa					
	3	5	10	15	25	35
0	0.66	0.84	0.80	0.85	0.78	0.79
12.36	0.77	0.76	0.82	0.69	0.75	0.72
19.36	0.71	0.84	0.86	0.92	0.90	0.83
31.87	0.77	0.85	0.60	0.59	0.69	0.91
42.48	0.74	0.79	0.93	0.84	0.96	0.82
50.43	0.74	0.37	0.48	0.55	0.22	0.60
70.00	0.42	0.36	0.31	0.20	0.26	0.08

表 4 式 (10) 拟合度 R^2
Table 4 Fitting degrees of Equation (10)

含水饱和 度/%	围压/MPa					
	3	5	10	15	25	35
0	0.95	0.95	0.94	0.98	0.97	0.96
12.36	0.87	0.95	0.96	0.93	0.93	0.86
19.36	0.87	0.96	0.99	0.97	1.00	0.98
31.87	0.92	0.92	0.83	0.71	0.74	0.96
42.43	0.96	0.89	0.92	0.98	0.99	0.93
50.43	0.73	0.69	0.89	0.89	0.86	0.99
70.00	0.76	0.74	0.65	0.45	0.55	0.90

由表 3, 4 可见, 式 (10) 的拟合结果, 除含水饱和度和 70% 的岩样和个别曲线之外, 拟合度均在 0.85 以上, 拟合效果明显好于 Klinkenberg 公式的拟合结果, 表明对于低渗透岩石用式 (10) 解释其气体滑脱效应更为准确。

3.2 低渗透岩石气体滑脱效应随含水饱和度的变化特征

根据式 (10), 对试验数据进行拟合, 得到每个围压下不同含水饱和度岩样的滑脱因子 (表 5)。和次级滑脱因子, 由于在 Ziareni^[30]的研究中定义二次滑脱系数 $a = \frac{8l^2}{r^2} p^2 c_2$, c_2 为常数, 因此二次滑脱系数仅与温度, 气体类型和多孔介质的孔隙结构有关, 与多孔介质的含水饱和度没有直接的关系, 滑脱二次项仅可以解释为 $k - p^{-1}$ 关系曲线偏离直线的原因。因此本文只对不同含水饱和度岩样的滑脱因子 b 与饱和度之间的关系进行讨论。

表 5 滑脱因子 b
Table 5 Klinkenberg factor b

含水饱和 度/%	围压/MPa					
	3	5	10	15	25	35
0	0.26	0.26	0.26	0.27	0.28	0.30
12.36	0.31	0.25	0.25	0.24	0.19	0.17
19.36	0.25	0.23	0.17	0.16	0.16	0.12
31.87	0.20	0.14	0.11	0.06	0.03	0.03
42.43	0.09	0.07	0.04	0.03	0.03	0.03
50.43	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
70.00	-0.21	-0.27	-0.34	-0.32	-0.30	-0.39

为了直观的表达滑脱因子随含水饱和度和围压的变化, 做出不同围压下岩样的滑脱因子随含水饱和度变化的曲线, 如图 6。

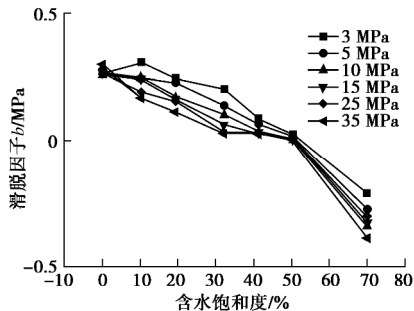


图 6 不同围压下滑脱因子 b 与含水饱和度关系曲线

Fig. 6 Relationship between Klinkenberg factor b and water saturation under different confining pressures

由图 6 可见, 随着岩样含水饱和度的增大, 滑脱因子逐渐减小, 说明随着岩样含水饱和度增大, 气体滑脱效应逐渐被限制, 在含水饱和度 50% 时, 滑脱因子的量级在 10^{-3} 左右, 气体滑脱效应几乎完全被限制, 由图 5 同时可以看出含水饱和度 50% 时, 气测渗透率与平均孔隙压力倒数关系的曲线接近于水平的直线, 随着平均孔隙压力倒数的增大, 气测渗透率的变化非常微小。岩样的气体滑脱效应随含水饱和度变化的这些特征, 在各个围压下均得到体现。

造成低渗透岩石的气体滑脱效应随含水饱和度增大而减小的原因是: 由于气体滑脱效应是气体分子的平均自由程接近毛细管管径时, 气体分子与多孔介质孔壁的碰撞频率增大, 在边壁上产生一个滑脱流, 增大了气体的流速, 导致以气体为介质测量渗透率时出现非达西流, 使得气测渗透率大于实际渗透率的现象^[31]。在含有水的岩样中有气体流通时, 由于气体的驱动和毛细管压力, 水会倾向于以水膜形式附在孔隙壁上或进入更小的孔隙^[32], 气体在岩样孔隙系统中形成连续流时, 由于水膜覆盖在孔隙壁上, 气体分子不能与固体孔隙壁碰撞, 而是与水分子相碰撞, 限制了滑脱流的产生, 随着含水饱和度的增大, 更多的水分子被驱动而覆盖在孔隙壁上, 气体分子与固体孔隙壁的碰撞频率进一步减少, 对滑脱流的限制作用增大, 所以随着含水饱和度增大, 气体滑脱效应减少。

需要指出的是在饱和度 70% 时, 滑脱因子是负值, 由图 5 可以看出, 在饱和度 70% 时出现了与气体滑脱效应规律相反的现象, 岩样的气测渗透率随着平均孔隙压力倒数的增大而减少, 即气测渗透率随着渗压的增大而增大。这是由于在高含水饱和度时, 岩样的滑脱效应几乎被完全限制, 对气体渗流的影响以水产生的毛细管阻力为主导, 在不同渗压下, 气体克服水产生的毛细管阻力的能力不同^[32-33], 渗压大时, 气体克服毛细管阻力的能力强, 相对多的气体可以克服阻力形成连续流, 渗压小时, 气体克服毛细管阻力的能力弱, 相对少的气体可以克服阻力形成连续流, 所以在高含水饱和度时, 高渗压下测量的岩样气测渗透率比低渗压大。

3.3 不同围压下含水的低渗透岩石气体滑脱效应的变化特征

比较不同围压下滑脱因子的变化, 含水岩样的滑脱因子均随着围压增大而减少, 即气体滑脱效应随围压增大逐渐减少, 这与克氏理论相悖, 按照克氏理论随着围压增大岩样孔隙度减少, 气体滑脱效应应该增大。只有含水饱和度为 0% 的干燥岩样的滑脱因子随着围压的增大而增大, 符合克氏理论。这是由于随着围压增大, 岩样逐渐被压密, 岩样中孔隙的体积减少,

但岩样含水量基本没有变化, 所以岩样的含水饱和度相应增大^[34], 由 3.2 节的分析知, 岩样含水饱和度的增大会抑制岩样的气体滑脱效应, 其抑制作用大于岩样孔隙体积减少对于滑脱效应的促进作用, 所以含水的岩样随着围压增大, 滑脱效应减小, 因此含水的岩样不符合克氏理论。只有干燥岩样 S-1 的气体滑脱效应随围压的增大而增大, 因此克氏理论适用于干燥的岩样。

3.4 低渗透岩石有效渗透率随含水饱和度的变化特征

由于气体滑脱效应的存在, 导致低渗透岩石气测渗透率较实际值偏大, 为了消除气体滑脱效应的影响, 选用绝对渗透率研究低渗透岩石渗透率随含水饱和度变化。根据式 (10) 对不同围压下岩样气测渗透率的拟合结果, 得到每个围压下岩样的绝对渗透率, 对含水岩样用其绝对渗透率的值来表示其有效渗透率, 有效渗透率表示两种或两种以上流体通过岩石时, 所测出的某一种流体的渗透率。研究含水饱和度对低渗透岩石有效渗透率的影响, 做出每个围压下岩样有效渗透率随含水饱和度变化的曲线, 并对低渗透岩石的含水饱和度和有效渗透率进行函数拟合, 通过分析发现用幂函数拟合效果较好, 如图 7, 幂函数对不同围压下低渗透岩石的有效渗透率与含水饱和度关系曲线的拟合度如表 7 所示。

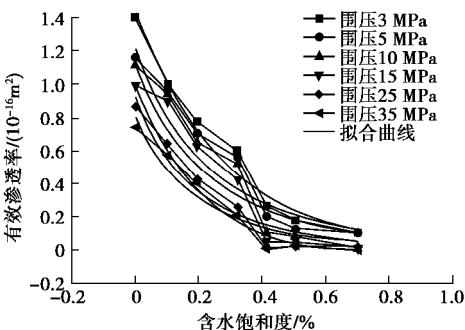


图 7 不同围压下有效渗透率与含水饱和度关系曲线及幂函数拟合曲线图

Fig. 7 Relationship between effective permeability and water saturation under different confining pressures and fitting curves of power function

由图 7 可见, 在不同的围压下, 岩样的有效渗透率均随着含水饱和度的增大而减小, 在饱和度 70% 时, 岩样有效渗透率的量级只有 $10^{-19} \sim 10^{-20}$, 与饱和度为 0% 时岩样的有效渗透率相比, 下降了两个量级; 随着含水饱和度的增大, 岩样有效渗透率的减少趋势逐渐趋缓, 在低饱和度 (0~40%) 时, 有效渗透率随含水饱和度增大迅速下降, 高饱和度时有效渗透率下降缓慢。这是由于随着含水饱和度增大, 岩样可流通气体的孔隙喉道的体积逐渐减小^[35], 气体形成连续流所要

克服的水产生的毛细管阻力增大, 所以在高饱和度时, 有效渗透率变化缓慢。

以含水饱和度为 0 时岩样的有效渗透率做基准, 做出每个围压下, 含水饱和度 40% 时岩样的有效渗透率下降幅度, 如表 6 所示。

表 6 岩样有效渗透率下降幅度

Table 6 Decrease degrees of effective permeability of rock samples						
围压/MPa	3	5	10	15	25	35
下降幅度/%	80.83	82.42	89.98	94.63	98.00	98.80

由表 6 可见, 岩样有效渗透率的下降主要发生在低饱和度 (0~40%) 时, 在饱和度 40% 时, 岩样的有效渗透率均已下降 80% 以上, 且随着围压增大, 岩样的有效渗透率下降幅度增大, 即岩样含水饱和度变化幅度相同的情况下 (从 0 到 40%), 所施加的围压越大, 岩样有效渗透率变化幅度越大, 因此围压越大, 有效渗透率对含水饱和度的敏感性越大。

这是由于在低围压时, 岩样被压缩的程度小, 可流通气体的孔隙喉道的半径较大, 相同体积水所产生的阻碍气体形成连续气流的毛细管阻力较小^[36], 所以有效渗透率对含水饱和度变化的敏感性较小, 高围压时, 岩样被压密, 孔隙喉道半径减小, 相同体积水所产生的阻碍气体形成连续气流的毛细管阻力较大, 所以有效渗透率对含水饱和度变化的敏感性较大。

表 7 不同围压下有效渗透率和含水饱和度拟合度

Table 7 Fitting degrees between effective permeability and water saturation under different confining pressures						
围压 /MPa	3	5	10	15	25	35
拟合度 /%	0.98	0.96	0.94	0.92	0.97	0.84

由表 7 可见低渗透岩石的含水饱和度和有效渗透率 k_e 有较为明确的幂函数关系, 即

$$k_e = a(1 - S_w)^c,$$

(11)

式中, S_w 为岩样的含水饱和度。

通过与干燥状态岩样的气测渗透率对比, 发现 a 与干燥状态时岩样的气测渗透率的值较为接近, a 的含义可以认为是干燥状态的岩样在对应围压下气测渗透率的值, c 为岩样的材料参数, 则式 (11) 可改为

$$k_e = k_0(1 - S_w)^c,$$

(12)

式中, k_0 为干燥状态的岩样在对应围压下的气测渗透率。

4 结 论

本文通过制备含水饱和度在 0~70% 之间的低渗透砂岩岩样, 利用本中心的低渗透岩石气体渗透测试

装置,对不同含水饱和度的砂岩岩样进行气渗试验,测量其在不同围压和渗压下的渗透率,分析和讨论了低渗透岩石的气体滑脱效应、有效渗透率和含水饱和度之间的关系,得到以下4点结论。

(1) 二次公式 $k_g = k_\infty \left(1 + \frac{b}{p} - \frac{a}{p^2} \right)$ 可以较为准确

的解释低渗透岩石的气体滑脱效应,准确性明显高于 Klinkenberg 公式。

(2) 低渗透岩石的气体滑脱效应随着含水饱和度的增大而减少,在含水饱和度 50% 时,气体滑脱效应几乎完全被限制。含水的低渗透岩石随着围压增大,气体滑脱效应减少,干燥的岩石随着围压增大,其气体滑脱效应增大。

(3) 随着含水饱和度增大,低渗透岩石的有效渗透率减少,含水饱和度越大,有效渗透率下降速率越小。

(4) 低渗透岩石的有效渗透率与含水饱和度符合幂函数关系,即 $k_e = k_0(1 - S_w)^c$ 。

参考文献:

- [1] WANG H L, XU W Y, ZUO J, et al. Compact rock material gas permeability properties[J]. *Physica*, 2014, **4**(49): 10 - 18.
- [2] 吕志凯, 何东博, 甯波. 低渗砂岩克氏渗透率影响因素试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2015(5): 91 - 95. (LÜ Zhi-kai, HE Dong-bo, NING Bo. Experimental study on factors of klinkenberg permeability in low permeable sandstone[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015(5): 91 - 95. (in Chinese))
- [3] 吴家文, 贺凤云, 李树良, 等. 考虑压敏和滑脱效应的低渗透气藏渗流规律研究[J]. *钻采工艺*, 2007, **30**(6): 49 - 51. (WU Jia-wen, HE Feng-yun, LI Shu-liang, et al. Considering pressure sensitive and slippage effect of low permeability gas reservoir seepage law research[J]. *Drilling Production Technology*, 2007, **30**(6): 49 - 51. (in Chinese))
- [4] TANIKAWA W, SHIMAMOTO T. Correction to "comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks"[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, **46**(8): 1394 - 1395.
- [5] ZHU W C, LIU J, SHENG J C, et al. Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, **44**(7): 971 - 980.
- [6] 肖晓春, 潘一山, 于丽艳. 水饱和度作用下低渗透气藏滑脱效应试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, **21**(5): 15 - 19. (XIAO Xiao-chun, PAN Yi-shan, YU Li-yan. Experiment of slippage effect under water saturation in hypotonic coalbed[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, **21**(5): 15 - 19. (in Chinese))
- [7] ROSE W D. Permeability and gas-slippage phenomena[C]// 28th Annual Mtg. Topical Committee on Production Technology. New York, 1948: 209.
- [8] ESTES R K, FULTON P F. Gas slippage and permeability measurements[J]. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 1956, **207**(12): 338 - 342.
- [9] 游利军, 康毅力, 陈一健, 等. 含水饱和度和有效应力对致密砂岩有效渗透率的影响[J]. *天然气工业*, 2004, **24**(12): 105 - 107. (YOU Li-jun, KANG Yi-li, CHEN Yi-jian, et al. Influence of water saturation and effective stress on effective permeability of tight sandstone[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, **24**(12): 105 - 107.
- [10] 曾平, 赵金洲, 李治平, 等. 温度、有效应力和含水饱和度对低渗透砂岩渗透率影响的试验研究[J]. *天然气地球科学*, 2005, **16**(1): 31 - 34. (ZENG Ping, ZHAO Jin-zhou, LI Zhi-ping, et al. Experimental study concerning the effect of temperature, effective stress and water saturation on the permeability of tight sandstone[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, **16**(1): 31 - 34. (in Chinese))
- [11] SHOJAEI M J, GHAZANFARI M H, MASIHI M. Relative permeability and capillary pressure curves for low salinity water flooding in sandstone rocks[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, **25**(0): 30 - 38.
- [12] ANSALONI L, NYKAZA J R, YE Y, et al. Influence of water vapor on the gas permeability of polymerized ionic liquids membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, **487**(0): 199 - 208.
- [13] 王环玲, 徐卫亚. 致密岩石渗透测试与渗流力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (WANG Huan-ling, XU Wei-ya. The seepage characteristics and permeability test of low permeability rock[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [14] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[C]// *Drilling and Production Practice*. New York, 1941.
- [15] 张烈辉, 梁斌, 刘启国, 等. 考虑滑脱效应的低渗低压气藏的气井产能方程[J]. *天然气工业*, 2009, **29**(1): 76 - 78. (ZHANG Lie-hui, LIANG Bin, LIU Qi-guo, et al. Coal-bed methane percolation numerical simulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, **29**(1): 76 - 78. (in Chinese))
- [16] LI K, HORNE R N. An Experimental and analytical study of steam/water capillary pressure[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2001, **4**(6): 477 - 482.

- [17] ERTEKIN T, KING G A, SCHWERER F C. Dynamic gas slippage: A unique dual-mechanism approach to the flow of gas in tight formations[J]. SPE Formation Evaluation, 1986, **1**(1): 43 - 52.
- [18] CHEN W, LIU J, BRUE F, et al. Water retention and gas relative permeability of two industrial concretes[J]. Cement and Concrete Research, 2012, **42**(7): 1001 - 1013.
- [19] 赵红鹤, 杨小林, 高富强, 等. 不同含水率岩石试样制备方法探讨[J]. 洛阳理工学院学报 (自然科学版), 2014, **24**(1): 4 - 7. (ZHAO Hong-he, YANG xiao-lin, GAO Fu-qiang, et al. Discussion on preparing methods of rock sample with different water contents[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, **24**(1): 4 - 7. (in Chinese))
- [20] 周 辉, 李 震, 宋雨泽, 等. 精确制备不同含水率岩石试样的化学热力学方法[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 311 - 315. (ZHOU Hui, LI Zhen, SONG Yu-zhe, et al. Chemo-thermodynamical method for precisely preparing rock sample with different water contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 311 - 315. (in Chinese))
- [21] 刘代俊, 马克承, 石炎福. 盐饱和溶液气相的相对湿度[J]. 成都科技大学学报, 1991(4): 99 - 102. (LIU Dai-jun, MA Ke-cheng, SHI Yan-fu. Solvability and the number of same order classes of maximal subgroups[J]. Journal of Chendu University of Science and Technology, 1991(4): 90 - 102. (in Chinese))
- [22] 王环玲, 徐卫亚, 左 婧, 等. 低渗透岩石渗透率与孔隙率演化规律的气渗试验研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(2): 1 - 10. (WANG Huan-lin, XU Wei-ya, ZUO Jing, et al. Evolution law research on the permeability and porosity of low-permeability rock based on gas permeability test[J]. Shuili Xuebao, 2015, **46**(2): 1 - 10. (in Chinese))
- [23] 王 欣. 致密岩石渗透特性的气渗试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2013. (WANG Xin. Dense rock permeability characteristics of air infiltration experiment research[D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [24] 左 婧. 低渗透岩石气体渗流特性及气渗滑脱效应的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2014. (ZUO Jing. Experimental research on gas permeability properties and klinkenberg effect of compact rock[D]. Nanjing: Hohai University, 2014. (in Chinese))
- [25] DONG M, LI Z, LI S, 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 & Engineering, 2012, **5**(3): 1 - 5.
- [26] LI Y, TANG D, XU H, et al. Experimental research on coal permeability: The roles of effective stress and gas slippage[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, **21**: 481 - 488.
- [27] JONES F O, OWENS W W. A Laboratory study of low-permeability gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, **32**(9): 31 - 40.
- [28] 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.
- [29] ASHRAFI MOGHADAM A, CHALATURNYK R. Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, **123**(0): 2 - 9.
- [30] ZIARANI A S. Aguilera Roberto Knudsen's permeability correction for tight porous media[J]. Transp Porous Med, 2012, **91**: 239 - 260.
- [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 Huan-lin, XU Wei-ya, CHAO Zhi-ming, 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))
- [32] 朱华银, 周 娟, 万玉金, 等. 多孔介质中气水渗流的微观机理研究[J]. 石油试验地质, 2004, **26**(6): 571 - 573. (ZHU Hua-yin, ZHOU Juan, WAN Yu-jin, et al. Microscopic mechanism study of gas-water flow in porous media[J]. Petroleum Geology Experiment, 2004, **26**(6): 571 - 573. (in Chinese))
- [33] 付大其, 朱华银, 刘义成, 等. 低渗气层岩石孔隙中可动水试验 [J]. 大庆石油学院学报, 2008, **32**(5): 23 - 26. (FU Da-qi, ZHU Hua-yin, LIU Yi-cheng, et al. Experimental study of the movable water in the rock pore of low permeability gas layer[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, **32**(5): 23 - 26. (in Chinese))
- [34] 任晓娟. 低渗砂岩储层孔隙结构与流体微观渗流特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2006. (REN Xiao-juan. Pore structure of low permeability sand rock and fluid flowing characteristics[D]. Xian: Northwest University, 2006. (in Chinese))
- [35] ZHANG Chun-hui, XU Xiao-pan, et al. Testing study on the effects of water content on permeability for coal[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014: 580 - 583.
- [36] 马永平. 苏里格气田致密砂岩储层微观孔隙结构研究[D]. 西安: 西北大学, 2013. (MA Yong-ping. Study on micro-pore structure of tight sandstone gas reservoir in Sulige gas field[D]. Xi'an: Northwest University, 2013. (in Chinese))