



海陆过渡相煤系页岩的渗流特征

张宏学, 刘卫群

引用本文:

张宏学, 刘卫群. 海陆过渡相煤系页岩的渗流特征 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 055901.

ZHANG Hongxue, LIU Wei-qun. Seepage of Marine-Terrigenous Facies Coal Measures Shale [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 055901.

当期更多内容>>

您可能感兴趣的其他文章:

煤尘层最低着火温度变化规律实验研究

刘天奇, 李雨成, 罗红波

DOI: 10.11858/gywlxb.20170649

入口压力对天然气超声速液化特性的影响

边江, 曹学文, 杨文, 于洪喜, 尹鹏博

DOI: 10.11858/gywlxb.20170639

钢粒间干涉对冲击破岩效果的影响

赵健, 石超, 徐依吉, 邢雪阳, 王瑞英, 李建波

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.02.012

煤体在爆炸荷载和地应力耦合作用下裂纹扩展的数值模拟

穆朝民, 潘飞

DOI: 10.11858/gywlxb.2013.03.014

水射流对煤体冲击的有限元与光滑粒子耦合法数值模拟

齐娟, 穆朝民

DOI: 10.11858/gywlxb.2014.03.016

超高压水射流冲蚀切割岩石断口微观断裂机理实验研究

李根生, 廖华林

DOI: 10.11858/gywlxb.2005.04.009

海陆过渡相煤系页岩的渗流特征^{*}

张宏学¹, 刘卫群^{2,3}

(1. 安徽理工大学力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001;
2. 中国矿业大学(徐州)力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学(徐州)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 利用脉冲衰减渗透率仪, 测试了海陆过渡相煤系页岩在储层条件、不同应力状态下的渗透率, 得到了渗透率随有效应力的演化规律, 对比分析煤系页岩和美国 Wilcox 页岩的渗透率。结果表明: 当围压为常数 (17 MPa), 有效应力从 12.5 MPa 降至 2.0 MPa 时, 煤系页岩的渗透率范围为 $2.9 \times 10^{-19} \sim 5.7 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, 比 Wilcox 页岩的渗透率高 2~3 个数量级。根据外部围压 p_c 和内部孔隙压力 p_p 定义有效应力 $\sigma_e = p_c - \chi p_p$, 有效应力系数 χ 约为 1。渗透率试验数据的拟合结果显示, 煤系页岩和 Wilcox 页岩的渗透率随有效应力、围压 (常孔隙压力) 和孔隙压力 (常围压) 按指数函数变化。

关键词: 海陆过渡相; 煤系页岩; Wilcox 页岩; 渗透率; 有效应力

中图分类号: P618.12; TE312

文献标识码: A

页岩气是一种重要的非常规天然气, 正在改变全球能源和政治格局^[1]。页岩气的规模开发有助于优化调整我国的能源结构, 解决我国天然气供需矛盾^[2-3]。根据 2015 年国土资源部资源评价最新结果, 我国页岩气技术可采资源量为 $2.18 \times 10^{13} \text{ m}^3$, 其中海相 $1.3 \times 10^{13} \text{ m}^3$, 海陆过渡相 $5.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 陆相 $3.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。南方下古生界海相页岩气是近期我国页岩气开发的主体, 已实现规模开发, 同时陆相页岩气勘探和开发也取得了重大进展^[4-7]。海陆过渡相页岩气以煤系页岩气为主要类型, 具备良好的聚集成藏潜力^[8], 近年来越来越受到重视。

渗透率是评价页岩气藏商业开发可行性的重要参数, 主要取决于页岩种类、孔隙度、围压和孔隙压力等因素^[9]。国内外众多学者针对各种页岩的渗透率问题进行了大量的试验研究。Van Noort 等^[10]利用 CO_2 对取自 Svalbard 的页岩试样进行了渗透率试验, 发现页岩试样的渗透率随着围压的增大而降低, 当有效应力增至 17.4 MPa 时, 贯穿试样的裂隙完全闭合。Zhou 等^[11]测试了超临界 CO_2 压裂页岩试样的裂隙渗透率, 结果表明: 当围压增大导致有效应力增大时, 页岩裂隙渗透率急剧降低; 当孔隙压力降低导致有效应力增大时, 裂隙渗透率缓慢降低。Pan 等^[12]和 Ma 等^[13]利用氮气和甲烷测试了四川盆地页岩试样的渗透率, 结果发现页岩渗透率表现出很强的各向异性。Li 等^[14]测试了真三轴应力状态下页岩的渗透率, 发现渗透率总是随着主应力的增大而降低, 与层理面平行方向的渗透率降得最快。Cronin 等^[15]通过脉冲衰减试验测试了 Barnett 页岩的渗透率, 发现有效渗透率的各向异性比值约为 450。Carey 等^[16]采用三轴加载装置、X 射线断层摄影术和离散元法研究了页岩裂隙渗透率, 发现: 当剪切力垂直于层理面时, 在静水压力下渗透率由 30 mD 降至 5 mD; 当剪切力平行于层理面时, 裂隙最大渗透率高达 900 mD。Tan 等^[17]通过一系列试验测试了页岩裂隙 (被支撑剂充填) 的渗透率, 得到了渗透率及其各向异性随气体压力、有效应力、气体类型和支撑剂尺寸的变化规律。陈天宇等^[18]利用 MTS 岩石力学试验系统研究了含气页岩的渗透性能、变形随围压的变化规律和各向异性特征。

^{*} 收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2018-06-04

基金项目: 安徽省教育厅科研基金 (KJ2016A207)

作者简介: 张宏学 (1982—), 男, 讲师, 主要从事裂隙岩体渗流研究。E-mail: hxzhang@aust.edu.cn

目前关于页岩渗透率的研究多集中于海相页岩,限制了海陆过渡相页岩气藏的商业开发。实验室测试岩石渗透率的常用方法主要有稳态法和非稳态法。采用稳态法测试岩石渗透率时,主要有以下缺点^[19]:(1)对于致密储层岩石,当气体低压渗流时,存在滑脱效应,不能减少滑脱效应的影响;(2)要求岩石的渗透率大于 $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$; (3)测试效率低,实验过程易受环境温度影响,测试结果的误差相对较大。而非稳态法(压力脉冲衰减技术)测量的稳定时间短、速度快、测试准确,利用较小的压差便可以减少滑脱和非达西效应的影响,数据采集系统自动采集记录数据并计算克氏渗透率,专门用于测试致密储层岩石的渗透率。为此,本研究基于瞬态脉冲衰减原理,借助脉冲衰减渗透率仪测试海陆过渡相煤系页岩渗透率随孔隙压力和有效应力的演化规律,根据外部围压和内部孔隙压力确定煤系页岩有效应力的表达式;在此基础上,对比分析我国海陆过渡相煤系页岩和美国 Wilcox 页岩的渗透率,并根据渗透率试验数据拟合煤系页岩渗透率与有效应力的函数关系,此成果将为我国海陆过渡相煤系页岩气的商业开发及环境保护提供一定的理论依据。

1 实验设备及原理

1.1 实验设备

采用脉冲衰减渗透率仪(见图1)测试海陆过渡相煤系页岩渗透率,渗透率测量范围为 $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$,实验过程中利用较小的压差降低非达西效应和滑脱效应的影响。

脉冲衰减渗透率仪是一种基于非稳态法研发的测量仪器,主要包括计算机控制及数据采集系统、仪器主机、岩心夹持器、围压泵和气瓶。计算机控制及数据采集系统能够自动控制气体渗透率测量全过程,实时采集和计算数据,显示测量结果,并进行储存;仪器主机由自动控制阀门和压力传感器构成;岩心夹持器由两个不锈钢夹持器组成,测试岩心试样的直径分别为 2.54 和 3.81 cm,岩心长度范围为 1.91~7.62 cm;围压泵用于对岩心施加围压,最大围压可达 68.95 MPa;气瓶用于提供实验气体。

1.2 实验原理

如图2所示,打开进气阀、样品进气阀、旁通阀、阀门1和阀门2,使容器 V_0 、 V_1 、 V_2 和 V_3 的压力达到实验设定压力,通过围压泵对岩心样品施加设定的围压。然后将容器 V_1 的压力增加 Δp_1 ,打开样品进气阀,原始差压流经岩心,容器 V_1 的压力 p_1 逐渐递减,容器 V_2 的压力 p_2 递增。由于压差的作用,岩心渗透率缓慢变化,压差降到零时实验结束。岩心内部压力 $p(x,t)$ 是关于时间 t 和距岩心上端面距离 x 的函数,可表示为

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \frac{c_1 \mu \varphi}{k} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

式中: c_1 为流体压缩系数; μ 为流体动力黏度; φ 为孔隙度; k 为渗透率; $0 < x < L_1$, L_1 为岩心高度。

(1)式的初始条件和边界条件为

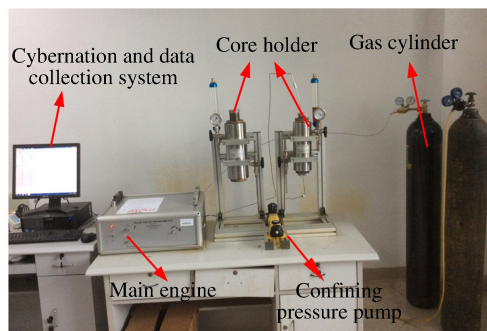


图1 脉冲衰减渗透率仪

Fig. 1 Pulse decay permeameter

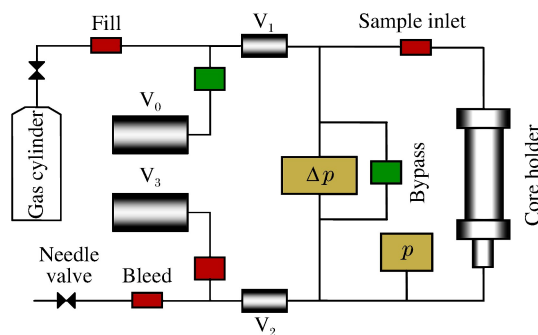


图2 脉冲衰减渗透率仪原理

Fig. 2 Schematic diagram of pulse decay permeameter

$$\begin{cases} p(x, 0) = p_2(0) & 0 < x < L_1 \\ p(0, t) = p_1(t) & t \geq 0 \\ p(L_1, t) = p_2(t) & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = -\frac{k}{c_1 \mu \varphi L_1} \frac{V_p}{V_1} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0} & t > 0 \\ \frac{dp_2}{dt} = -\frac{k}{c_1 \mu \varphi L_1} \frac{V_p}{V_2} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=L_1} & t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_1 和 V_2 分别为容器 V_1 和 V_2 的体积, V_p 为岩心的孔隙体积。

结合初始条件和边界条件求解(1)式, 可得岩心渗透率 k 的计算公式

$$k = c_1 \mu \varphi L_1^2 s_1 / f(a, b_1) \quad (4)$$

式中: s_1 为压力衰减的半对数斜率, $a = V_p/V_1$, $b_1 = V_p/V_2$, $f(a, b_1)$ 可表示为

$$f(a, b_1) = (a + b_1 + ab_1) - \frac{1}{3}(a + b_1 + 0.4132ab_1)^2 + 0.0744(a + b_1 + 0.0578ab_1)^3 \quad (5)$$

2 实验材料及方案

2.1 实验材料

本实验采用的煤系页岩取自西山煤电集团屯兰煤矿 2[#] 煤层顶板, 埋深约 700 m, 利用岩石取样机沿层理面平行方向取样, 加工成 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的标准岩心, 岩心端面平整度小于 0.02 mm, 上下端面平行度小于 0.05 mm。虽然部分岩心高度未达到 50 mm, 但仍然满足脉冲衰减渗透率仪对岩心尺寸的要求。共钻取岩心 2 个, 具体尺寸、孔隙度 φ 和孔隙体积 V_p 如表 1 所示, 其中岩心孔隙度和孔隙体积采用 QKX-II 型气体孔隙度仪测量。实验气体采用氮气。

表 1 煤系页岩岩样参数

Table 1 Parameters of coal series shale samples

Sample No.	Dimension/(mm×mm)	V_p/cm^3	$\varphi/\%$
S-1	$\varnothing 23.88 \times 41.59$	0.94	5.04
S-5	$\varnothing 23.29 \times 49.11$	1.18	5.62

2.2 实验方案

在前期工作中, 已经测试了煤系页岩岩样在常孔隙压力、变围压作用下的渗透率^[20]。本实验仅测试岩样 S-1 和 S-5 在常围压、变孔隙压力作用下的渗透率, 加载方式采用分级增量加载, 试验过程中根据煤系页岩储层深度设置围压和孔隙压力。围压设为 17 MPa; 孔隙压力分 4 级从小到大逐级加载, 分别为 4.5、8.0、11.5 和 15.0 MPa, 每级加载持续时间取决于岩心所处的应力状态和岩心有效孔隙度。

试验具体步骤为: (1) 打开脉冲衰减渗透率仪, 预热 0.5 h; (2) 输入岩样编号、孔隙体积、岩样高度、岩样直径、温度、压差、围压和孔隙压力等实验参数, 实验压差设置为 68.95 kPa; (3) 将岩样装入岩心夹持器, 拧紧上下压阀, 关闭围压加油阀, 开始加围压; (4) 打开氮气瓶开关, 将测试系统中的测试压力和压差清零, 点击数据采集系统中的测试按钮开始进气, 同时关闭仪器主机上的排放阀按钮; (5) 待数据采集系统中设定的预备时间(300 s)结束之后, 开始测试; (6) 测试结束后, 打开仪器主机上的放气阀按钮, 待孔隙压力降为零后, 打开围压加油阀, 待围压降为零时, 关闭围压加油阀; (7) 按上述步骤测试其余应力状态及其余岩样的渗透率。测试过程中孔隙压力必须小于围压。

3 实验结果及分析

3.1 煤系页岩渗透率结果分析

煤系页岩岩样在不同孔隙压力和围压共同作用下的渗透率见表 2。可见, 在常围压($p_c = 17 \text{ MPa}$)作用下, 岩样 S-1 的渗透率下降 1 个数量级, 从 $4.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 降至 $2.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$, 而岩样 S-5 的渗透率变化不大。说明当围压保持不变时, 随着孔隙压力的增大, 煤系页岩的渗透率逐渐增大。这是因为煤系页岩中的天然微裂隙是气体流动的主要通道, 当围压保持不变而孔隙压力增大时, 岩心所受的有效应

力逐渐降低,煤系页岩中天然微裂隙的张开度逐渐增大,进而导致渗透率增大。围压不变条件下煤系页岩的渗透率随孔隙压力的变化如图 3 所示。拟合结果表明,当围压保持不变时,煤系页岩的渗透率随孔隙压力的减小按指数函数 $k=k_0 \exp(-\alpha p_p)+C$ 减小,其中: p_p 为孔隙压力, k_0 、 α 和 C 为拟合系数。

在孔隙压力不变的条件下煤系页岩的渗透率随围压的变化见图 4,其中渗透率实验数据取自文献[20]。从图 4 可以看出,当孔隙压力保持不变时,煤系页岩的渗透率随着围压的增大而逐渐减小。拟合结果表明,当孔隙压力不变时,煤系页岩的渗透率随围压的增大同样按指数函数 $k=k_0 \exp(-\alpha p_c)+C$ 变化。

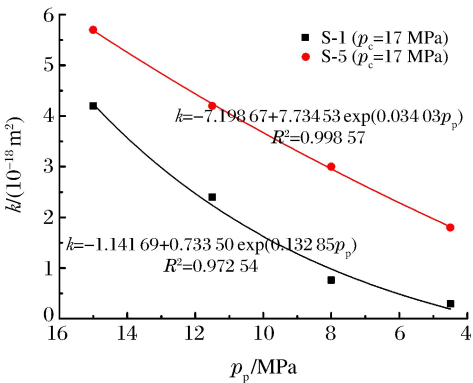


图 3 围压不变时煤系页岩渗透率随孔隙压力的变化
Fig. 3 Permeability of shale sample as a function of pore pressure at constant confining pressure

表 2 页岩岩样在不同围压和孔隙压力作用下的渗透率

Table 2 Permeability of shale samples under different confining pressures and pore pressures									
p_c /MPa	p_p /MPa	σ_c /MPa	k/m^2		p_c /MPa	p_p /MPa	σ_c /MPa	k/m^2	
			S-1	S-5				WS22.5 ^[21]	WS22.7 ^[21]
17	4.5	12.5	2.9×10^{-19}	1.8×10^{-18}	10	13	3	2.7×10^{-19}	2.2×10^{-19}
17	8.0	9.0	7.6×10^{-19}	3.0×10^{-18}	10	15	5	9.0×10^{-20}	1.0×10^{-19}
17	11.5	5.5	2.4×10^{-18}	4.2×10^{-18}	10	18	8	3.0×10^{-20}	5.6×10^{-20}
17	15.0	2.0	4.2×10^{-18}	5.7×10^{-18}					

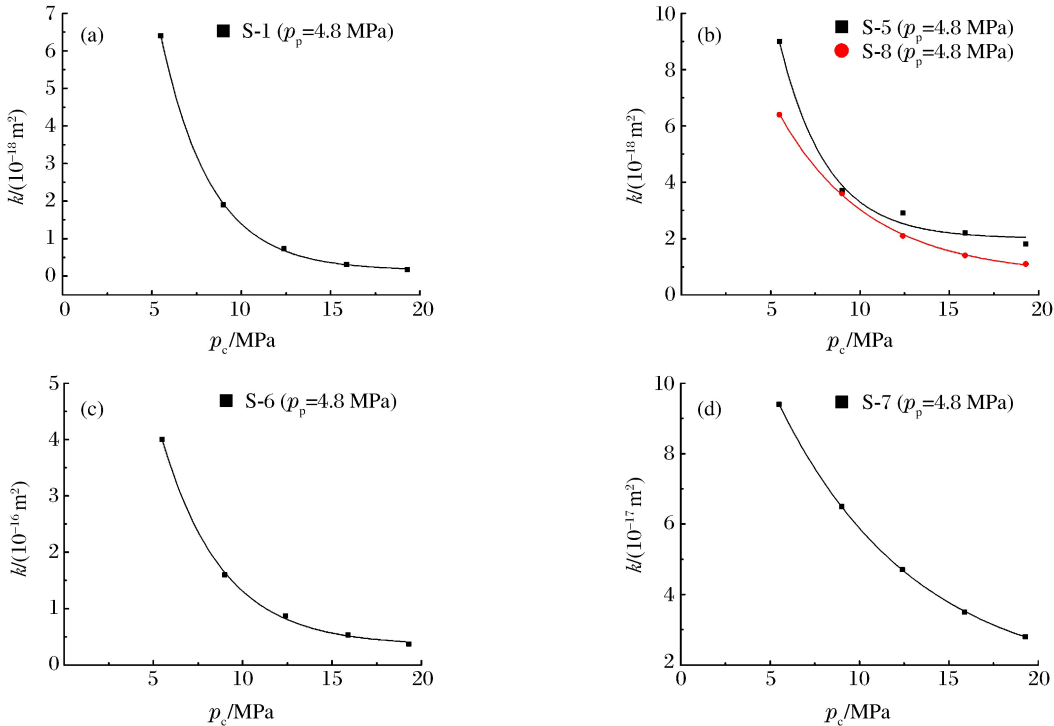


图 4 孔隙压力不变时煤系页岩渗透率随围压的变化
Fig. 4 Permeability of shale sample as a function of confining pressure at constant pore pressure

3.2 煤系页岩的有效应力

由有效应力定律可知,当流体在多孔岩石中流动时,其物理性质通常取决于围压和孔隙压力。孔隙度、贯通的孔隙网络和孔径分布情况对多孔岩石的渗流特性至关重要。众多学者已经推导出多孔岩石有效应力的表达式,通过实验确定的有效应力 σ_e 表达式为

$$\sigma_e = p_c - \chi p_p \quad (6)$$

式中: χ 为有效应力系数, $\chi \leq 1$, χ 取决于多孔岩石的体积压缩量、孔隙度和渗透率等因素。

在不考虑渗透率和有效应力函数关系的前提下,岩样 S-1 的渗透率对数随围压和孔隙压力的演化规律如图 5 所示。结果表明:当孔隙压力为常数时, $\lg k$ 与围压 p_c 呈线性关系,斜率 $(\partial \lg k / \partial p_c)_{p_p} = -0.114 21$;当围压为常数时, $\lg k$ 与孔隙压力 p_p 仍然呈线性关系,斜率 $(\partial \lg k / \partial p_p)_{p_c} = 0.113 77$ 。因此,煤系页岩岩样 S-1 的 χ 值为

$$\chi = -(\partial \lg k / \partial p_p)_{p_c} / (\partial \lg k / \partial p_c)_{p_p} = 0.996 15 \quad (7)$$

按照同样的方法可确定岩样 S-5 的 χ 值为 0.999 36。

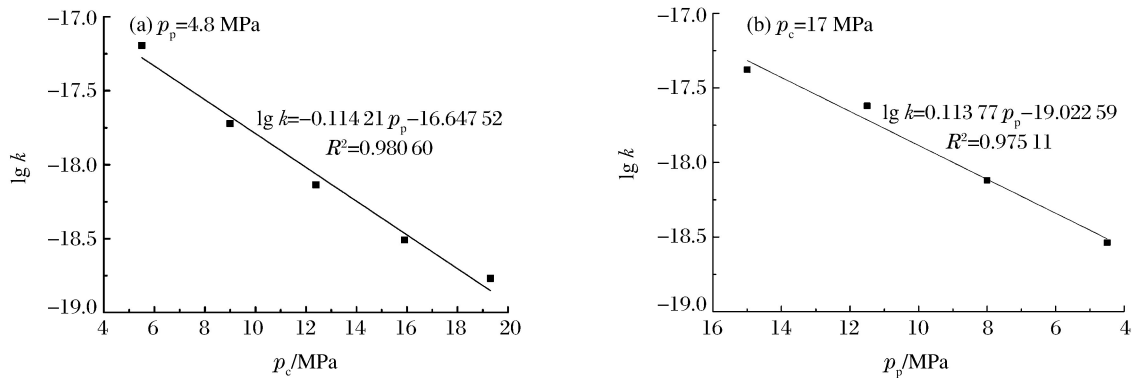


图 5 煤系页岩岩样 S-1 渗透率的对数随围压和孔隙压力的变化

Fig. 5 Permeability of coal series shale sample S-1 as a function of confining pressure and pore pressure

3.3 煤系页岩渗透率与有效应力的关系

当围压为常数时,岩样 S-1 和 S-5 的渗透率随有效应力的演化规律如图 6 所示。拟合结果表明,当围压保持不变时,岩样 S-1 和 S-5 的渗透率随有效应力的增大按指数函数衰减,指数函数表达式为 $k = k_0 \exp(-\alpha \sigma_e) + C$ 。

综上所述,煤系页岩的渗透率随围压(孔隙压力为常数)、孔隙压力(围压为常数)和有效应力的变化按指数函数 $k = k_0 \exp(-\alpha X) + C$ 演化,其中 X 可表示围压、孔隙压力和有效应力。

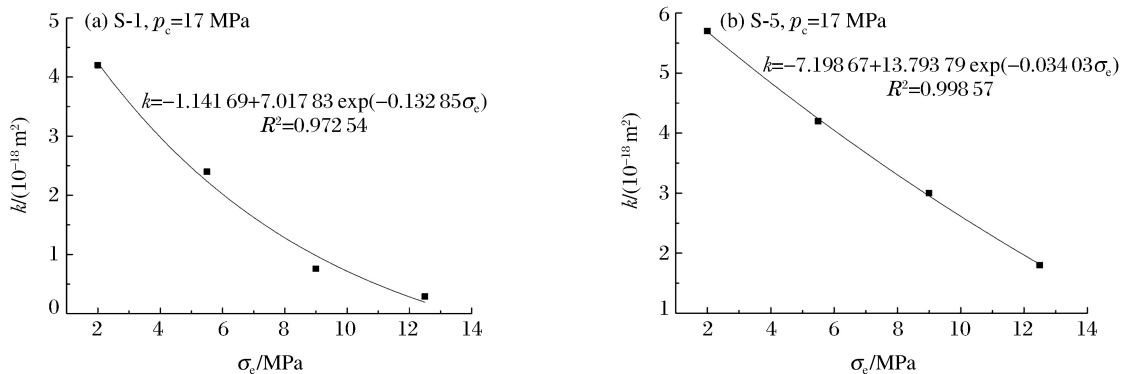


图 6 围压不变时煤系页岩试样渗透率随有效应力的变化

Fig. 6 Permeability of shale samples as a function of effective stress at constant confining pressure

3.4 煤系页岩和 Wilcox 页岩渗透率比较

Kwon 等^[21]基于瞬态脉冲衰减法测试了 Wilcox 页岩的渗透率,其中岩样 WS22.5 和 WS22.7 在不同围压和孔隙压力作用下的渗透率见表 2。可以看出,当有效应力从 3 MPa 增大到 8 MPa 时, Wilcox 页岩的渗透率从 $2 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 降至 $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ ^[21]。与 Wilcox 页岩的渗透率相比,当有效应力的变化范围相同时,我国煤系页岩的渗透率比 Wilcox 页岩高 2~3 个数量级。

煤系页岩和 Wilcox 页岩的渗透率随有效应力的演化规律如图 7 所示。结果表明,当孔隙压力保持不变时,煤系页岩和 Wilcox 页岩的渗透率均随有效应力的增大呈指数降低,渗透率和有效应力的拟合函数关系均为 $k = k_0 \exp(-\alpha \sigma_e) + C$ 。

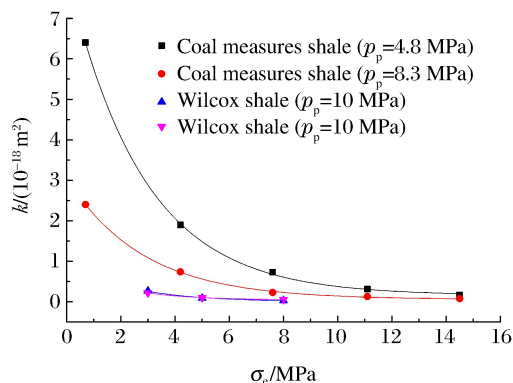


图 7 煤系页岩和 Wilcox 页岩的渗透率比较

Fig. 7 Comparison of permeability of coal series shale and Wilcox shale

4 结 论

(1) 在围压为 17 MPa 的条件下,当有效应力从 12.5 MPa 降至 2.0 MPa 时,煤系页岩的渗透率范围为 $2.9 \times 10^{-19} \sim 5.7 \times 10^{-18} \text{ m}^2$,比美国 Wilcox 页岩的渗透率高 2~3 个数量级。

(2) 海陆过渡相煤系页岩和美国 Wilcox 页岩的渗透率与有效应力的关系均可用指数函数 $k = k_0 \exp(-\alpha \sigma_e) + C$ 描述。

(3) 煤系页岩有效应力定律中的有效应力系数 χ 约等于 1。

参考文献:

- [1] 张宏学,刘卫群.页岩气开采的相关实验、模型和环境效应[J].岩土力学,2014,35(增刊2):85-100.
ZHANG H X, LIU W Q. Relevant experiments, models and environmental effect of shale gas production [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Suppl 2): 85-100.
- [2] 王道富,高世葵,董大忠,等.中国页岩气资源勘探开发挑战初论[J].天然气工业,2013,33(1):8-17.
WANG D F, GAO S K, DONG D Z, et al. A primary discussion on challenges for exploration and development of shale gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 8-17.
- [3] 张金川,边瑞康,荆铁亚,等.页岩气理论研究的基础意义[J].地质通报,2011,30(2):318-323.
ZHANG J C, BIAN R K, JING T Y, et al. Fundamental significance of gas shale theoretical research [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 318-323.
- [4] 张吉振,李贤庆,王元,等.海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征——以四川盆地南部龙潭组为例[J].煤炭学报,2015,40(8):1871-1878.
ZHANG J Z, LI X Q, WANG Y, et al. Accumulation conditions and reservoir characteristics of marine-terrestrial facies coal measures shale gas from Longtan Formation in South Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1871-1878.
- [5] 黄金亮,邹才能,李建忠,等.川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J].煤炭学报,2012,37(5):782-787.
HUANG J L, ZOU C N, LI J Z, et al. Shale gas accumulation conditions and favorable zones of Silurian Longmaxi Formation in south Sichuan Basin, China [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 782-787.
- [6] 王阳,陈洁,胡琳,等.沉积环境对页岩气储层的控制作用——以中下扬子区下寒武统筇竹寺组为例[J].煤炭学

- 报,2013,38(5):845-850.
- WANG Y, CHEN J, HU L, et al. Sedimentary environment control on shale gas reservoir: a case study of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Middle Lower Yangtze area [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5):845-850.
- [7] 罗鹏, 吉利明. 陆相页岩气储层特征与潜力评价 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5):1060-1068.
- LUO P, JI L M. Reservoir characteristics and potential evaluation of continental shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5):1060-1068.
- [8] 闫德宇, 黄文辉, 陆小霞, 等. 下扬子区海陆过渡相不同沉积环境页岩气成藏条件对比 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(7):1778-1787.
- YAN D Y, HUANG W H, LU X X, et al. Contrast of reservoir-forming conditions of marine-continental transitional shale gas in different sedimentary environments in the Lower Yangtze area of China [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7):1778-1787.
- [9] CUI X, BUSTIN A M M, BUSTIN R M. Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: different approaches and their applications [J]. Geofluids, 2009, 9(3):208-223.
- [10] VAN NOORT R, YARUSHINA V. Water and CO₂ permeability of a shale sample core from Svalbard [J]. Energy Procedia, 2016, 97:67-74.
- [11] ZHOU J P, LIU G J, JIANG Y D, et al. Supercritical carbon dioxide fracturing in shale and the coupled effects on the permeability of fractured shale: an experimental study [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36:369-377.
- [12] PAN Z, MA Y, CONNELL L D, et al. Measuring anisotropic permeability using a cubic shale sample in a triaxial cell [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26:336-344.
- [13] MA Y, PAN Z, ZHONG N, et al. Experimental study of anisotropic gas permeability and its relationship with fracture structure of Longmaxi Shales, Sichuan Basin, China [J]. Fuel, 2016, 180:106-115.
- [14] LI M H, YIN G Z, XU J, et al. Permeability evolution of shale under anisotropic true triaxial stress conditions [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 165:142-148.
- [15] CRONIN M B, FLEMINGS P B, BHANDARI A R. Dual-permeability microstratigraphy in the Barnett Shale [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 142:119-128.
- [16] CAREY J W, ZHOU L, ROUGIER E, et al. Fracture-permeability behavior of shale [J]. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, 2015, 11:27-43.
- [17] TAN Y L, PAN Z J, LIU J S, et al. Experimental study of permeability and its anisotropy for shale fracture supported with proppant [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 44:250-264.
- [18] 陈天宇, 冯夏庭, 杨成祥, 等. 含气页岩渗透率的围压敏感性和各向异性研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4):639-643.
- CHEN T Y, FENG X T, YANG C X, et al. Research on confining pressure sensitivity and anisotropy for gas shale permeability [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(4):639-643.
- [19] 孙军昌, 杨正明, 郭和坤, 等. 致密储层渗透率测试的稳态与非稳态法对比研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(4):1009-1016.
- SUN J C, YANG Z M, GUO H K, et al. Comparative study of tight reservoir permeability using steady-state and unsteady-state methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4):1009-1016.
- [20] 张宏学. 页岩储层渗流-应力耦合模型及应用 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
- ZHANG H X. Seepage and stress coupling model for shale reservoir and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [21] KWON O, KRONENBERG A K, GANGI A F, et al. Permeability of Wilcox shale and its effective pressure law [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2001, 106(B9):19339-19353.

Seepage of Marine-Terrigenous Facies Coal Measures Shale

ZHANG Hongxue¹, LIU Weiqun^{2,3}

(1. School of Mechanics and Optoelectronics Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Xuzhou), Xuzhou 221116, China;

3. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Xuzhou), Xuzhou 221116, China)

Abstract: Using a pulse decay permeameter, we conducted a combination of laboratory experiments to study permeability evolution of marine-terrigenous facies coal measures shale under reservoir conditions, and obtained the permeability of coal measures shale under different stress states, and furthermore analyzed the permeability of coal measures shale and Wilcox shale. The results show that the permeability of coal measures shale ranges from 2.9×10^{-19} to $5.7 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ as the effective stress is decreased from 12.5 to 2.0 MPa at constant confining pressure ($p_c = 17 \text{ MPa}$), and is 2-3 orders of magnitude greater than that of Wilcox shale. The effective stress is given in terms of the external confining pressure and the internal pore pressure by $\sigma_e = p_c - \chi p_p$, where χ is approximately equal to 1. The fitting results of the experimental permeability show that the permeability of coal measures shale and Wilcox shale change exponentially with the effective stress, confining pressure (at constant pore pressure) or pore pressure (at constant confining pressure).

Keywords: marine-terrigenous facies; coal measures shale; Wilcox shale; permeability; effective stress

关于《带舱大型战斗部跌落响应数值分析》一文的更正声明

《高压物理学报》2018年第4期发表的文章《带舱大型战斗部跌落响应数值分析》(doi:10.11858/gywlxb.20170584)中,因作者疏忽,导致表1、表3和表4中部分材料参数出现错误,特更正如下:

(1) 表1中, $E = 8.56 \text{ GPa}$, $\sigma_Y = 209 \text{ MPa}$, $E_{\text{TAN}} = 231 \text{ MPa}$;

(2) 表3中, $\sigma_Y = 190 \text{ MPa}$, $E_{\text{TAN}} = 210 \text{ MPa}$;

(3) 表4中, $\sigma_Y = 1.5 \text{ GPa}$, $E_{\text{TAN}} = 170 \text{ MPa}$ 。

电子版已做相应更正。同时向广大读者诚挚地致歉!

《高压物理学报》编辑部