覆压作用下页岩的孔渗性实验及其应力敏感性研究

张骞¹,岳晓晶^{2*} ZHANG Qian¹, YUE Xiaojing^{2*}

1.中国地质科学院矿产综合利用研究所,四川成都 610041

2.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083

Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, China Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;
 School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:为了研究页岩在应力作用下的孔渗变化及孔隙结构特征,采用四川盆地昭通区块页岩样,不同压力条件下对页岩的孔隙度 和渗透率进行实验分析,建立了页岩样孔隙度、渗透性与净覆压之间的相关关系和模型;采用渗透率损害率和应力敏感系数分析 了页岩储层的应力敏感性。研究结果表明,页岩基质孔隙度和渗透率随有效应力的增加呈负指数函数规律降低,渗透率与孔隙 结构有关,页岩地层中包括基质孔隙和裂隙共同发育的双重介质体系。当净覆压小于 5 MPa 时,页岩储层应力敏感系数变化较 大,应力敏感性强;当净覆压大于 5 MPa 时,页岩储层应力敏感系数随有效应力的增加下降速度整体减缓,且存在波动变化,应力 敏感性减弱,渗透率损害率随有效应力的增大而缓慢增加。研究发现,不同孔径的孔隙度随应力的增大而减小,反映了页岩中不 同孔径对孔隙度的协同效应,对揭示页岩储层的孔径变化,指导深部页岩储层的物性特征具有一定的实际意义。 关键词:覆压:页岩;孔隙度;渗透率;应力敏感性

中图分类号:P619.22⁺⁷ 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2021)09-1514-08

Zhang Q, Yue X J. Experimental study on porosity and permeability and stress sensitivity of shale under pressurization. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9):1514–1521

Abstract: In order to study the pore and permeability changes and pore structure characteristics of shale under stress, the porosity and permeability of shale in net confining stress were analyzed through experiment using the shale samples in Zhaotong area, Sichuan Basin. The stress sensitivity of shale reservoir was analyzed by permeability damage rate and stress sensitivity coefficient. The results indicate that the porosity and permeability of shale matrix decrease by a negative exponential function with the increasing effective stress, and permeability is related to pore structure. Shale formation consists of a dual media system including matrix pores and fractures. If the net confing stress is less than 5 MPa, the stress sensitivity coefficient of shale reservoir varies significantly and the shale reservoir is highly sensitive to stress. If the net confing stress is greater than 5 MPa, the stress sensitivity weakens and permeability damage rate increases slowly, and there is a fluctuation. Stress sensitivity weakens and permeability damage rate increases slowly with the increase of effective stress. It is found that the porosity of different pore sizes decreases with the increase of stress, which reflects the synergistic effect of different pore sizes on porosity in shale, and has certain practical significance to reveal the pore size change of shale reservoir and guide the physical properties of deep shale reservoir.

Key words: pressurization; shale; porosity; permeability; stress sensitivity

收稿日期:2021-06-04;修订日期:2021-08-06

资助项目:国家科技重大专项项目《页岩气等非常规油气开发环境监测与保护关键技术》(编号:2016ZX05040)

作者简介:张骞(1988-),男,硕士,助理研究员,从事地质战略研究。E-mail:373983765@qq.com

^{*}通信作者:岳晓晶(1989-),女,博士,从事非常规油气开发地下水环境影响研究。E-mail:yuexiaojing412@163.com

一般来说,岩石的孔隙度分为基质孔隙度和裂隙孔隙度,二者之和称为总孔隙度。页岩的孔渗性是页岩储层特征的重要内容,是影响页岩储层储 气、采气能力的重要参数。水力压裂技术广泛运用 于页岩储层的改造,导致大量压裂液进入页岩储 层,在毛细管力的作用下与页岩基质发生天然的物 理作用,即自发渗吸作用^[1-3],促使目标储层产生大 量的微裂隙释放页岩层中大量的吸附态甲烷^[4],使 页岩储层的孔渗性发生改变^[5]。由于压裂液成分复 杂,污染组分较多^[6],压裂液对页岩储层的改造、在 页岩基质中的赋存受到广泛关注^[7]。

实际上,水力压裂开采页岩储层的过程,是压 裂压力大于储层压力,造成储层破坏,储层的净覆 压处于增大的过程(图1),改变了页岩压缩变形的 程度,引发页岩基质孔隙及裂隙空间的变化。储层 孔渗性随覆压的变化而改变的现象,称为岩石的应 力敏感性^{18]}。学者们对于常规油气储层孔渗性与应 力之间的关系进行了大量研究:明确定义了岩石的 体积压缩系数和孔隙压缩系数,并确定了其关 系[9-17];将孔隙压缩系数和储层应力敏感系数概念 引入油藏工程问题中,分析变形效应引起的孔隙体 积和渗透率变化[9-11]。实际生产过程中,岩石基质 和裂缝系统的渗透率的降低是不同步的^[18], Julia 等^[19]通过实验分析了不同应力下页岩的渗透性变 化规律及页岩中裂隙、页岩显微组分含量、含水情 况等对煤储层渗透性的影响。David 等^[20] 定义了孔 隙几何形态对页岩渗透率在应力变化下的数学描 述和影响,但对页岩孔隙压缩系数和应力敏感系数 缺乏量化,也未讨论2个参数随应力的变化规律。 人们更关注人工水力压裂对页岩储层渗流能力的 改善,对页岩基质的影响及其与应力的变化关系鲜 有研究,而这正是压裂液赋存的主要场所。水力压 裂技术的使用人为地改造了储层相对稳定的地质 环境,成分复杂的压裂液的去向问题受到广泛关 注。许多学者认为,压裂液在页岩储层的自发渗吸 作用是压裂返排率低的原因[21-23],且页岩的孔隙种 类和大小对自发渗吸的影响较大[24]。但前人研究 都集中在常压条件下进行,而水力压裂本身是一种 增压过程,增压下岩石的孔渗性质会发生变化。因 此,开展覆压下页岩的孔渗性及其应力敏感性实验 研究,对揭示水力压裂作用对页岩基质的应力敏感 性及页岩储层的孔径变化,有效指导水力压裂对页



图 1 水力压裂开采增加页岩储层压力过程示意图 Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic fracturing increasing the pressure of shale reservoir P1——定深度的页岩储层压力;P2—水力压裂作用下的压力; ΔP—地层实际增加的净覆压

岩储层的改造效果具有理论和实际意义。

1 覆压下页岩的孔渗性实验条件

1.1 岩样制备及实验装置

四川盆地昭通页岩气开采区作为中国页岩气 开采的主要示范性场所之一. 多个开采平台已实现 页岩气量产,特别是作为主要的页岩气开采区。昭 通区块具有压裂返排后返排率低的特点,为了研究 该区块内页岩的物性特征,选择该研究区页岩进行 覆压下页岩的孔渗性研究,以掌握其特点及变化, 同时其研究方式与结果可作为探讨中国页岩气目 标储层的典型,以对比其他研究区。实验样品均采 自该区块内龙马溪组的露头页岩,考虑页岩非均质 性的影响,选取同一剖面的岩石,共制备6个实验样 品。岩样均为圆柱状(直径 2.46~2.48 cm,长4.52~ 6.45 cm),并在 60℃烘箱中连续烘样 48 h。样品物 性如表1。实验采用AP-608 自动孔渗仪,利用净覆 压力模仿水力压裂的增压,测试净覆压下页岩的孔 隙度和渗透性。实验过程中围压气源采用高压空 气,测试采用高纯氦气。

1.2 实验条件

为了研究覆压对页岩孔隙度、渗透性的影响, 采用增加页岩的净覆压模拟地层有效应力的变化, 并测量随净覆压变化,页岩孔隙度、渗透率的变化 情况,从而分析应力变化与页岩孔隙度、渗透性之间 的关系。

龙马溪组页岩的埋深深度变化大,一般为500~4000 m,压力系数为1.4~2.0。本次实验的最高净

 表1 实验样品基础数据

 Table 1 Basic data of the shale samples

 直径 长度 孔隙度 渗透率 密度 样品

пнн	브니스	N/X	10 Mix			ТГРН
编号	/cm	/cm	/%	$/10^{-3} \mu m^2$	$/(g \cdot cm^{-3})$	描述
1	2.457	6.452	5.33	0.08371	2.58	平行层理
6	2.462	4.597	7.49	0.0333	2.56	平行层理
8	2.472	4.966	7.47	0.04242	2.53	平行层理
12	2.477	3.813	5.85	0.025	2.58	垂直层理
14	2.474	5.210	4.59	0.00016	2.58	垂直层理
17	2.474	5.242	4.99	0.00061	2.59	垂直层理

覆应力设计为13 MPa。同时,为了避免滑脱效应对 样品渗透率的影响,在实验过程中保持驱替压力不 变。围压值分别为3.5、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、13.0 MPa,并保持每个应力点持续时间保持平衡在30 min 以上,测定在该应力点下气体的渗透率值。

2 实验结果

2.1 页岩孔隙度、渗透性与应力之间的关系

覆压下页岩的孔隙度、渗透率与有效应力之间 的关系如图 2 所示。

2.1.1 页岩气体渗透率与净覆压之间的关系

从图 2 可以看出,样品 14 和样品 17 的气体渗 透率与净覆压之间的相关性差,这 2 个样品在常压 下的气体渗透率远小于初始覆压状态(3.5 MPa)的 渗透率,而在测试结束取出岩样时发现,1 个样品有 明显的裂隙产生,即加压过程增加了气体渗透页岩 的通道,导致渗透率增加了几个数量级。之后的加 压实验中,气体通过样品 14 和样品 17 更易从发育 的裂隙通过,表现出增压过程中气体渗透率变化小 的情况。其余页岩样品的气体渗透率与净覆压之 间服从负指数函数关系,随着净覆压的增加,页岩 储层的渗透率按负指数规律降低,其关系式满足

 $K_{i} = K_{0} e^{-aP} \tag{1}$

其中, K_i 为某给定压力条件下的渗透率(mD); P为从初始到某给定压力状态下的有效应力值 (MPa); K_0 为初始压力为0时刻的渗透率(mD);a为渗透率应力敏感系数(MPa⁻¹)。

页岩样品覆压下渗透率实验结果统计见表 2。 可以看出,沐爱地区龙马溪组页岩初始渗透率 K_0 为 0.025~0.0837 mD,平均为 0.046 mD,应力敏感系数 为 0.09~0.28 MPa⁻¹,平均为 0.14 MPa⁻¹。 2.1.2 页岩孔隙度与净覆压之间的关系

从图 2 可以看出,页岩岩样孔隙度与净覆压力 之间满足负指数函数关系,即页岩储层孔隙度随着 净覆压力的增加按负指数函数规律降低。对实验 结果进行回归分析,其关系式满足:

$$\varphi_i = \varphi_0 e^{-C_p P} \tag{2}$$

其中, φ_i 为某给定压力条件下的孔隙度(%);P为从初始到某给定压力状态下的有效应力值 (MPa); φ_0 为初始压力为0时的孔隙度(%); C_p 为 页岩储层压缩系数(MPa⁻¹)。

6个样品覆压条件下的孔隙度实验结果见表 2。 可以看出,昭通区块某出露处龙马溪组页岩初始孔 隙度 φ_0 为 4.59% ~7.54%,平均为 5.96%,压缩系数 为0.012~0.05 MPa⁻¹,平均为 0.029 MPa⁻¹。

2.2 页岩渗透率压缩率与应力敏感系数、孔隙度 压缩率和净覆压之间的关系

2.2.1 页岩渗透压缩率和渗透率应力敏感系数

页岩地层的岩石是多种物质组成的多孔介质, 矿物颗粒、泥质、胶结物,在受压条件下发生不同的 变形,且不同种类的物质受压的程度也不同。为了 评价页岩地层的应力敏感性,采用渗透压缩率和应 力敏感系数2个参数进行分析。

渗透率压缩率,按公式(3)计算应力敏感性对 渗透率压缩率的影响:

$$D_{K2} = \frac{(K_1 - K_n)}{K_1} \times 100\%$$
(3)

其中, D_{K2}表示在应力不断增加至最大值的过程中, 产生的最大渗透率压缩率; K₁表示覆压下, 第

表 2 页岩样品孔隙度、渗透率和净覆压力之间的统计分析结果

Table 2Statistic analysis results of relationshipbetween porosity and permeability of shale and the
effective confining pressure

样品 编号	压缩系数 (Cp)/ (MPa ⁻¹)	孔隙度 (<i>q</i> ₀)/%	相关系 数(R ₁₂)	渗透率应力 敏感系数 (a)/ (MPa ⁻¹)	渗透率 (K ₀) /mD	相关系数 (R ₂₂)
1	0.026	5.333	0.959	0.280	0.0837	0.987
6	0.049	7.494	0.983	0.090	0.033	0.991
8	0.012	7.479	0.536	0.012	0.042	0.857
12	0.017	5.811	0.823	0.263	0.025	0.945
14	0.032	4.591	0.835	—	0.00016	_
17	0.039	4.989	0.778	—	0.00061	—

样品





一个应力点的岩样渗透率(mD); *K*_n 为覆压下,达 到最大应力值后渗透率的最小值(mD)。

渗透率应力敏感系数被定义为:

$$\alpha_{K} = -\frac{1}{K_{0}} * \frac{\partial K}{\partial P} \tag{4}$$

其中, K_0 表示初始有效应力下的渗透率(mD); ∂K 表示渗透率的变化(mD); ∂P 表示压力的变化 (MPa)。

根据中国石油天然气行业标准,渗透率压缩 率与渗透率应力敏感系数具有相同含义。从公式 (4)可以看出,渗透率应力敏感系数的值越大,表 明页岩地层的渗透率随着压力增加的变化越敏 感;反之,α_κ值越小,表明页岩渗透率随净覆压变 化的敏感性越差,岩样的渗透率随净覆压的变化 梯度越小。 2.2.2 页岩孔隙度压缩率和孔隙压缩系数

(1) 孔隙度压缩率,按公式(5) 计算应力敏感性 对孔隙度压缩率的影响:

$$D_{\varphi_2} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_n)}{\varphi_1} \times 100\%$$
 (5)

其中,D_{q2}表示在应力不断增加至最大值的过程中,产生的最大孔隙度压缩率;*q*₁表示覆压下,第 一个应力点的岩样孔隙度(%);*q*_n为覆压下,达到 最大应力值后孔隙度的最小值(%)。

(2) 孔隙压缩系数被定义为:

$$C_{p} = -\frac{1}{\phi_{0}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial P} \right)_{T}$$
(6)

其中, C_p 表示页岩储层的孔隙压缩系数 (MPa⁻¹); Φ_0 表示初始有效应力下的孔隙度(%); ($\partial \Phi / \partial P$)₁表示等温条件下,页岩孔隙度随有效应 力的变化速率(MPa⁻¹)。

2.2.3 渗透率压缩率、渗透率应力敏感系数和净覆 压的关系

实验所用页岩样品的渗透率压缩率、应力敏感 系数和净覆压的关系曲线如图 3 所示。随着净覆压 的增加,渗透率压缩率和应力敏感系数发生变化: 前者表现为随页岩净覆压的增加,压缩率增大,后 者则随之减小。

所测页岩样品的渗透率应力敏感系数小于 5 MPa⁻¹时,变化明显,并伴随净覆压的增加而快速下降,同时渗透率压缩率随着净覆压力的增大而迅速 增大。但当净覆压大于 5 MPa 时,页岩的应力敏感 系数随着净覆压的增加,下降速度整体变缓,且呈 波状变化,而渗透率压缩率随净覆压的增大继续增 大,但增大斜率变缓。表明昭通区块露头页岩在净 覆压小于 5 MPa 时,其渗透率随净覆压的增加快速 下降,应力敏感性强,而当净覆压大于 5 MPa 后,渗 透率随净覆压的增加下降速度变缓,应力敏感性减 弱,并存在波动变化。

在所测净覆压范围内,实验岩样的渗透率压缩 率为45.0%~93.3%,平均为72.1%;最大渗透率应 力敏感系数为0.152~0.455 MPa⁻¹,最小为0.015~ 0.083 MPa⁻¹,平均为0.075~0.326 MPa⁻¹。

2.2.4 页岩孔隙度压缩系数和净覆压的关系

实验所用页岩样品的孔隙度压缩系数和净覆 压的关系曲线如图 4 所示。随着净覆压的增加,样 品的孔隙度压缩率发生变化:当净覆压力小于 5 MPa时,岩样的孔隙度压缩系数降低;当净覆压大 于 5 MPa时,随着净覆压力的增大,孔隙度压缩系 数呈波形变化。

在所测净覆压范围内,实验岩样的最大孔隙度 压缩系数为 0.028~0.143 MPa⁻¹,最小为 0.0001~ 0.010 MPa⁻¹,平均为 0.075~0.326 MPa⁻¹。

3 水力压裂开采页岩过程中的孔渗关系和 动态变化

水力压裂过程对储层的改造,一方面产生了大量的人造裂缝,促进了压裂液进入页岩储层,从而释放出大量的页岩气,但同时导致页岩储层骨架被压缩,页岩基质的渗透率降低,空隙减小,页岩基质的孔隙和裂隙都随净覆压的增加而减小。

页岩储层渗透性动态变化的研究,实质是由于

水力作用的开采压力和地层储层压力之差增加了 有效净覆压力,即研究页岩储层水力压裂过程中, 页岩储层渗透率与生产压差之间的关系($K - \Delta p$)。 为了更直观地表示页岩在净覆压状态下的气体渗 透率大小,将一定压力条件下的渗透率 K_i 与初始渗 透率 K_0 的比值作无量纲化—— K_i/K_0 ,不同净覆压 下, K_i/K_0 与孔隙度的关系如图 5 所示。由图 5 发 现,随着孔隙度的增加, K_i/K_0 值也增加,其关系满 足指数函数形式。对该部分实验结果进行回归 分析:

$$K_i / K_0 = A e^{B\phi_i} \tag{7}$$

其中, φ_i 为某给定压力条件下的孔隙度(%); K_i 为某给定压力条件下的渗透率(mD); $A \ \pi B \ D$ 别表示回归系数。四组实验数据显示回归系数 $A \ D$ 2×10⁻⁷ ~ 0.0854,平均值为0.0236; B 为 0.3425 ~ 2.633,平均值为1.5214。

页岩地层是包括基质孔隙和裂隙共同发育的 双重介质体系,所以渗透率除与孔隙度有关外,还 与裂隙的发育情况有关,包括裂缝的宽度与数量 等^[25]。同时,渗透率还与孔隙结构有关。为了解释 孔隙形态对渗透率及应力敏感的影响,将一定压力 条件下的渗透率 K_i 与初始渗透率 K_0 的比值取对数 作无量纲化—— $\ln(K_i/K_0)$,孔隙度 φ_i 与初始孔隙 度 φ_0 的比值取对数作无量纲化—— $\ln(\varphi_i/\varphi_0)$ 的 关系如图 6 所示。由图 6 发现,随着无量纲 $\ln(\varphi_i/\varphi_0)$ 的 学 φ_0)的增加,无量纲 $\ln(K_i/K_0)$ 也增大,其关系满足 线性相关,即:

$$\ln(K_i/K_0) = \gamma \ln(\varphi_i/\varphi_0) + m \tag{8}$$

其中,引入 γ 为孔渗幂指数,表示基质与裂隙 孔隙度的比率。φ_i为某给定压力条件下的孔隙度 (%);K_i为某给定压力条件下的渗透率(mD)。由 图 6 所示,γ 介于 1.7415~13.081之间,变化较大。 γ=2 表示页岩主要为基质型孔隙,γ=3 为裂隙型孔 隙,2<γ<3 为双重介质,而 γ>3 表示该岩样裂隙较 发育,且裂缝宽度大于基质系统的孔隙半径(图 7)。 造成该实验分析结果的原因包括,所取岩样为龙马 溪组露头页岩,其风化程度大于实际储层页岩,特 别是未采用该方法分析的样品 14 和样品 17,在覆 压状态下,有明显的裂缝产生(图 8),说明该露头页 岩风化程度较高,但通过此方法可知,页岩的渗透 率不仅与孔隙度有关,还与裂隙的发育有关,即裂



图 3 页岩渗透压缩率(PPR)、应力敏感系数(SSC) 与净覆压的关系





缝的宽度和数目^[29]。理论上,裂隙平行层理方向的 渗透率、裂隙孔隙度和裂隙宽度的关系如下:

$$K_f = \phi_f b^2 / 12 \tag{9}$$

其中,b代表页岩地层平均裂隙孔径(m);Φ_f代 表页岩地层裂隙平均孔隙度(%),K_f代表页岩地层 裂隙渗透率(m²)。从公式(9)可知,裂隙孔径越 大,裂隙孔隙度越大,页岩地层的渗透率也越大,且 裂隙孔径的影响大于裂隙孔隙度对渗透率的影响。 该结论与实验样品 14 和样品 17 的结果一致:覆压 下渗透率远大于常压下,是由于加压过程中,页岩



裂隙孔径明显增加。

4 结 论

(1)页岩基质的孔隙度和渗透率随着净覆压力的增加呈负指数规律变化。在净覆压力的作用下,随着应力的增加页岩基质发生机械压缩作用,页岩基质的孔隙度会急剧减小,渗透率降低。

(2)根据实验结果,页岩样品的渗透率应力敏 感性回归系数为 0.09~0.28 MPa⁻¹,平均为 0.14 MPa⁻¹;压缩系数为 0.012~0.05 MPa⁻¹,平均为 0.029 MPa⁻¹。利用此二者系数,可以推算出储层条件下 的页岩孔隙度和渗透率,对页岩储层的物性研究提 供了研究方法和参考依据。

(3)根据实验结果,页岩样品的无量纲渗透率 随着孔隙度的增加而增加,渗透率与孔隙结构也有



图 7 由孔渗幂指数判断孔隙结构图(据参考文献[5]修改) Fig. 7 General sketch of pore geometry



图 8 样品 14 在电镜扫描下裂缝的存在 Fig. 8 The existence of cracks in sample 14 under electron microscope scanning

关,根据样品的孔渗幂指数介于 1.7415~13.081 之间,变化较大,页岩地层中包括基质孔隙和裂隙共同发育的双重介质体系。

(4)利用渗透率压缩率、应力敏感系数和净覆 压的关系来描述页岩储层的应力敏感性,页岩在净 覆压小于 5 MPa 时,其渗透率随净覆压的增加快速 下降,应力敏感性强,而当净覆压大于 5 MPa 后,渗 透率随净覆压的增加下降速度变缓,应力敏感性减 弱,并存在波动变化。

致谢:感谢中国石油集团安全环保技术研究院 在研究过程中提供的经费、场地、实验原料等帮助; 中国地质大学(北京)水资源与环境学院辜海林、梁 峰、李颖等同学在野外调查和取样过程中完成部分 工作,特此表示衷心感谢。

参考文献

- Cai J, Yu B, Zou M, et al. Fractal characterization of spontaneous cocurrent imbibition in porous media[J]. Energy Fuel., 2010, 24: 1860–1867.
- [2] Dutta R, Lee C, Odumabo S, et al. Experimental investigation of fracturing – fluid migration caused by spontaneous imbibition in fractured low – permeability sands [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2014, 7(1): 74–81.
- [3] 李继山.表面活性剂体系对渗吸过程的影响[D].河北:中国科学 院研究生院(渗流流体力学研究所)博学位论文,2006.
- [4] King G E. Thirty Years of Gas Shale Fracturing: What Have We Learned? [C] // Society of Petroleum Engineers, 2010, 62(11): 88–90.
- [5] Zhang R, Ning Z F, Yang F, et al.A laboratory study of the porosity– permeability relationships of shaleand sandstone under effective stress[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, (81): 19–27.

- [6] Arthur J D, Bohm B, Coughlin B J, et al. Hydraulic fracturing considerations for natural gas wells of the Fayetteville Shale [M]. All Consulting, 2008.
- [7] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工 业,2008,28(6):136-140.
- [8] 秦积舜,李爱芬.油层物理学[M].东营:石油大学出版社,2001: 178-182.
- [9] Biot M A. Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid[J].Journal of Applied Physics, 1956, (27): 457-467.
- [10] Lubinski A. Theory of elasticity for porous bodies displaying a strongpore structure [C]//Proc. 2nd U. S. National Congress of Applied Mechanics, 1954: 247–256.
- [11] 贾文瑞,李福恺,肖敬修.低渗透油田开发部署中几个问题的研究[J]. 石油勘探与开发,1995,22(4):47~51.
- [12] Reyes L, Osisanya S O. Empirical correlation of effective stress dependent shalerock properties[J].J.Can.Pet.Tech., 2002, (27): 47–53.
- [13] 伍向阳,陈祖安,孙德明,等.静水压力下砂岩孔隙度变化实验研究[]].地球物理学报,1995,38(S1):275-280.
- [14] Cho Y, Ozkan E, Apaydin O G.Pressure-dependent natural-fracture permeabilityin shale and its effect on shale-gas well production[M]. Paper SPE, 2013: 159801.
- [15] Chalmers G, Ross D, Bustin R. Geological controls on matrix permeability ofDevonian gas shales in the Horn River and Liard basins, northeastern British Columbia, Canada[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, (103): 120–131.
- [16] Petunin V V, Yin X, Tutuncu A N.Porosity and permeability changes in sandstones and carbonates under stress and their correlation to rock texture[M].Paper SPE,2011: 147401.
- [17] Meng Z P,Li G Q.Experimental research on the permeability of high -rank coal under varying stress and its influencing factors [J]. Engineering Geology, 2013, (162): 108–117.
- [18] Abass H H, Ortiz I, Khan M R., et al. Understanding stress dependant permeability of matrix, natural fractures, and hydraulic fractures in

carbonate formations[M].Paper SPE, 2007: 110973.

- [19] Julia F W, Robert M Reed, Jon Holder. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(4), 603–622.
- [20] David C, Wong T, Zhu W, et al. Laboratory measurement of compactioninduced permeability change in porous rocks: implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust[J]. Pure and Applied Geophysics, 1994, (143): 425–456.
- [21] Dehghanpour H, Zubair H A, Chhabra A, et al. Liquid intake of organic shales[J].Energy & Fuels, 2012, 26(9): 5750-5758.
- [22] Dehghanpour H, Lan Q, Saeed Y, et al. Spontaneous Imbibition of Brine and Oil in Gas Shales: Effect of Water Adsorption and Resulting Microfractures[J].Energy & Fuels, 2013, 27(6): 3039–3049.
- [23] Xu M, Dehghanpour H.Advances in Understanding wettability of gas shales[J].Energy & Fuels, 2014: 4362–4375.
- [24] Hu Y, Devegowda D, Striolo A, et al. Microscopic dynamics of water and hydrocarbon in shale – kerogen pores of potentially mixed – wettability[C]//SPE unconventional resources conference, Society of Petroleum Engineers Alberta, Canada, 2014.
- [25] Zhu W, Montesi L, Wong T. Characterizing the permeability porosity relationship during compactive cataclastic flow [M]. Paper ARMA,2008.
- [26] Kwon O.Permeability of Wilcox shale and its effective pressure law[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, (106): 19339–19353.
- [27] Meng Y, Li Z P, Lai F P, et al. Characteristics of black shale in the Upper Ordovician Wufeng and lower Silurian Longmaxi formations in the Sichuan Basin and its periphery, China[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2017, (5): 667–687.
- [28] 腾格尔, 卢龙飞, 俞凌杰, 等. 页岩有机质孔隙形成、保持及其连通 性的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 687-699.
- [29]周彤,王海波,李凤霞,等.层理发育的页岩气储集层压裂缝扩展 模拟[J].石油勘探与开发,2020,47(5):1039-1051.