

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.12.14

围压—孔压改变条件下致密砂岩及泥页岩泊松比变化特征及机制

杜书恒^{1,2}, 梁耀欢¹, 师永民¹, 关平¹

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

DU Shuheng^{1,2}, LIANG Yaohuan¹, SHI Yongmin¹, GUAN Ping¹

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

DU Shuheng, LIANG Yaohuan, SHI Yongmin, et al. Variations of Poisson's ratio for tight sandstone and shale under changing confining or pore pressure: Characteristics and mechanism. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 411-419

Abstract: When the confining pressure (external pressure) or pore pressure (internal pressure) changes, the variation characteristics and mechanism of Poisson's ratio for tight sandstone and shale still need to be clarified. On the basis of the effective stress theory of Terzaghi and the new concept of effective stress proposed by domestic scholars, this study analyzes the characteristics and mechanism of Poisson's ratio change based on the dynamic and static Poisson's ratio measurement results. The rock types consist of tight sandstone of the Gaotaizi Formation and shale of the Qingshankou Formation in the Songliao Basin, respectively. The anisotropic distribution of Poisson's ratio curves is obvious, which would have some impacts on the propagation law of compression fractures; as far as the scientific definition of "effective stress" is concerned, "Terzaghi effective stress" is suitable for fractured reservoirs while "new effective stress" is suitable for shale with large porosity and uniform pore distribution. The conclusion will provide some important theoretical basis for the effective development of tight oil and gas.

Keywords: Songliao Basin; Terzaghi equation; effective stress; Poisson's ratio

摘要:在围压(外压)或孔压(内压)发生变化的条件下,致密砂岩及泥页岩泊松比的变化特征及机制仍有待厘清。本研究从 Terzaghi 有效应力理论和国内学者提出的新有效应力概念出发,基于松辽盆地高台子组致密砂岩、青山口组泥页岩三向动、静态泊松比测定结果,剖析了两类岩石泊松比的变化特征及机制。岩石样品三向泊松比变化曲线的分布呈现显著的各向异性,这将对压裂缝的延展规律产生一定的影响;就“有效应力”概念厘定的科学性而言,“Terzaghi 有效应力”适用于裂缝较为发育的储层,而“新有效应力”适用于孔隙度较大且分布较为均匀的泥页岩。结论将为致密油气的有效开发提供较为重要的理论依据。

关键词: 松辽盆地; Terzaghi 方程; 有效应力; 泊松比

中图分类号: TE348; P584 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2021)01-0411-09

0 引言

近年来,非常规油气地质力学在深入刻画储

层特征及提高油气采收率中发挥了重要作用^[1-6]。

储层及烃类流体的地质、力学、物理化学等属性成为了重点的关注对象^[7-10]。在油藏空间中,岩石处

于多重应力加载状态,耦合关系极其复杂,这与地

收稿日期: 2017-04-02; 修回日期: 2020-11-20

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2019D-5007-0214); 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发(2017ZX05013005-009)”

作者简介: 杜书恒(1994—),男,博士,助理研究员,主要从事非常规油气综合研究。E-mail: dushuheng@imech.ac.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2021, 28(1)

质历史时期的构造应力以及油藏开采过程中岩石孔隙压力的变化紧密相关^[11-14]。油藏工程研究中常根据等效原理, 虚拟出有效应力的概念用以简化对油藏岩石应力状态的描述^[15-20]。有效应力通常定义为作用在整个岩石介质上并能使岩石介质产生形变的应力。绝大多数学者^[5-10]将土力学中经典 Terzaghi 方程(式(1))应用于油藏岩石有效应力分析中, 方程中厘定的三个力学概念分别为上覆压力 σ (围压)、孔隙压力 p_p 和有效应力 σ_{eff} (以下称 Terzaghi 有效应力)。

$$\sigma = \sigma_{\text{eff}} + p_p \quad (1)$$

李传亮等^[21-25]基于岩石为多孔介质材料的实际, 提出双重有效应力概念, 通过应力关系分析给出新有效应力方程(式(2)), 本文称其为新有效应力(用 σ'_{eff} 表示)。从方程表达形式上看, 方程(2)在经典 Terzaghi 方程中孔隙压力项上添加了孔隙度。这可以很好地解释: 对处于不同深度的岩石而言, 在 Terzaghi 有效应力数值相同时, 其外观压缩状态亦可能存在较为明显的差异。

$$\sigma = \sigma'_{\text{eff}} + \varphi p_p \quad (2)$$

杜书恒等^[26-27]通过开展改进后的室内岩石力学实验研究认为, 增大孔压(内压)或减小围压(外压)相同值对于低渗透砂岩储集层的影响程度并不对等且存在较为显著的各向异性, 因此油藏领域中有效应力概念的厘定方式仍需斟酌。

油藏中的岩石为复杂多孔介质, 沉积过程中经历了不同程度的后期成岩改造作用。对于致密砂岩油藏而言, 其烃源岩和储集岩由于岩性、物性等差异将导致其力学性质的差异^[28-29]。同时, 地下油藏注水开发过程中, 原始油藏发生了流体置换, 岩层所处的应力状态也将发生非稳态改变^[30-31]。泊松比作为衡量岩石变形能力的基本参数, 对于压裂成缝规律的预测就显得至关重要^[32-38]。基于此, 郭培峰等^[39]对鄂尔多斯盆地长 8 储层岩石力学特征的研究表明, 影响泊松比空间分布的主要因素为岩性、泥质含量和深度。石玉江等^[40]对致密油储层的动态声学实验研究显示, 取心角度和围压明显影响纵横波速度的大小进而影响岩石动态泊松比的数值。桂俊川等^[41]考虑页岩和砂岩互层的地层特点, 研究了砂岩含量对岩石力学参数的影响。因此, 岩石泊松比对于油气开发意义重大。

本文以松辽盆地齐家—古龙凹陷致密砂岩和泥

页岩为例, 对该区青山口组泥页岩及高台子组致密砂岩储集岩样开展变外压及内压条件下三向泊松比测定, 结合岩样镜下观察阐释其变化规律特点并剖析其岩石学机制, 同时对经典 Terzaghi 方程与国内学者提出的新有效应力方程的应用合理性开展评价, 为油藏工程中岩石力学参数的合理应用寻找科学依据。

1 地质概况

齐家凹陷位于松辽盆地中央坳陷区, 构造主体包括齐家北、齐家南两个向斜和喇西、萨西、杏西 3 个鼻状构造, 主力产层为高台子组致密砂岩储层。古龙凹陷位于松辽盆地中央坳陷区西部, 位于齐家凹陷的南段, 东临大庆长垣, 西接龙虎泡—大安阶地。其中, 青山口组一段泥页岩是古龙凹陷中浅层主要烃源岩层^[42]。研究区位置示意图如图 1。

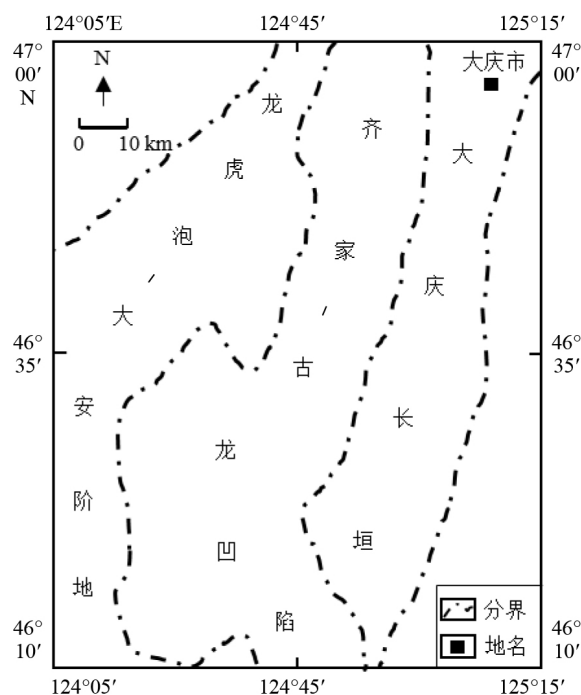


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 A sketch map of the study area

2 室内实验

2.1 实验原理及方法

实验设备主要采用声波发射仪(图 2A)和深

水伺服岩石力学三轴应力测试系统(图 2B),该系统主要包括常规轴压控制系统、外压控制系统(最高可达 70 MPa)和计算机采集和控制系统几部分组成。

对实验仪器进行两处改进:(1)组装仪器达到稳定改变内压测量储层岩石力学参数的目的;(2)将声波发射仪与应力测试系统相联接,实现了测量静态岩石力学参数的同时测量通过岩样的纵、横波速的目的^[26,35]。

选取研究区致密砂岩和泥页岩,通过三向取样(图 2),施加温度、流体饱和度等条件,对松辽盆地岩样开展改变内(孔)压、外(围)压等不同工况条件下三向动、静态泊松比的测定。

具体实验过程为:选取岩心的 X 和 Y 两个水平方向以及垂直方向(Z 方向)分别钻取三块小岩样(图 2C),分别开展变孔隙压力和变外压条件下岩体力学参数变化的测定,其中 X、Y 方向夹角为 90°。保持外压不变以 2 MPa 的间隔不断增加内压,再保持内压不变以 2 MPa 的间隔不断增加外压开展实验。

2.2 实验结果

分别基于 Terzaghi 有效应力方程(式(1))和新有效应力方程(式(2)),计算实验条件下的有效应力,绘制泊松比变化曲线。其中,图 3~6 为高台子组致密砂岩储层测定结果,图 7~10 为青山口组一段泥页岩烃源岩层测定结果^[43],二者孔隙度分别为 8.3%和 12.6%。

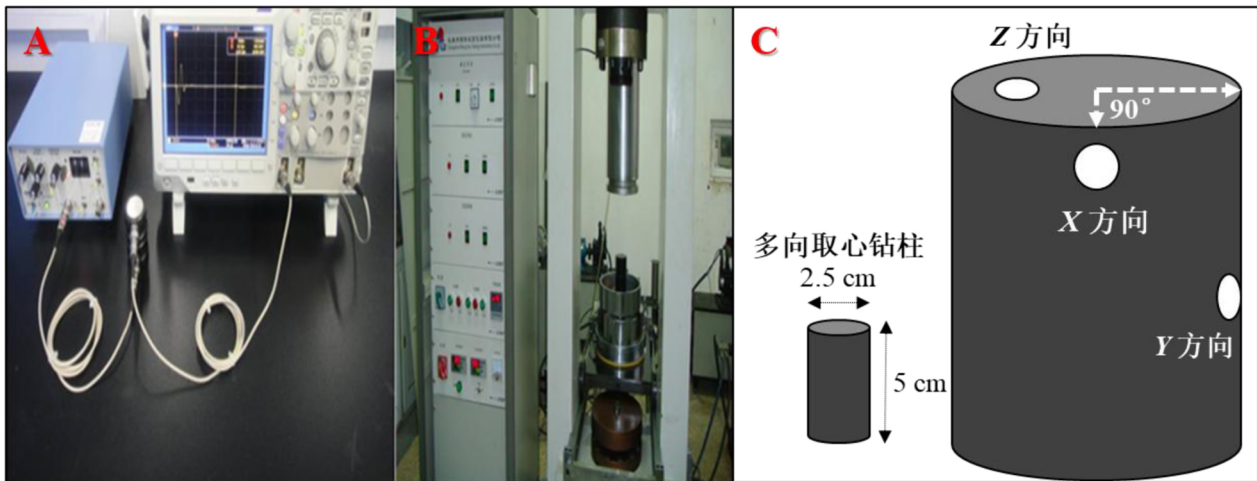


图 2 实验设备(A 和 B)及取样示意图(C)
(根据文献[37]修改)

Fig.2 Experimental equipments (A and B) and sampling scheme (C). Modified from [37].

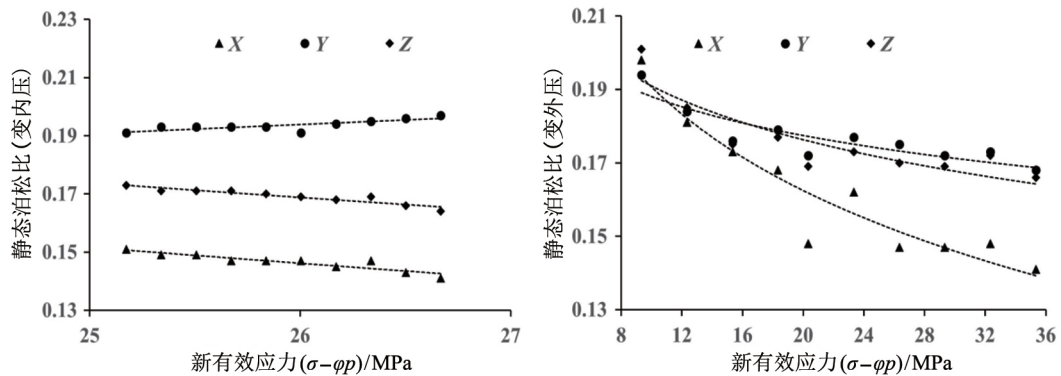


图 3 高台子组致密砂岩储层改变内、外压条件下静态泊松比随新有效应力变化曲线

Fig.3 Cross-plot between the static Poisson's ratio and the "new effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Gaotaizi tight sandstone

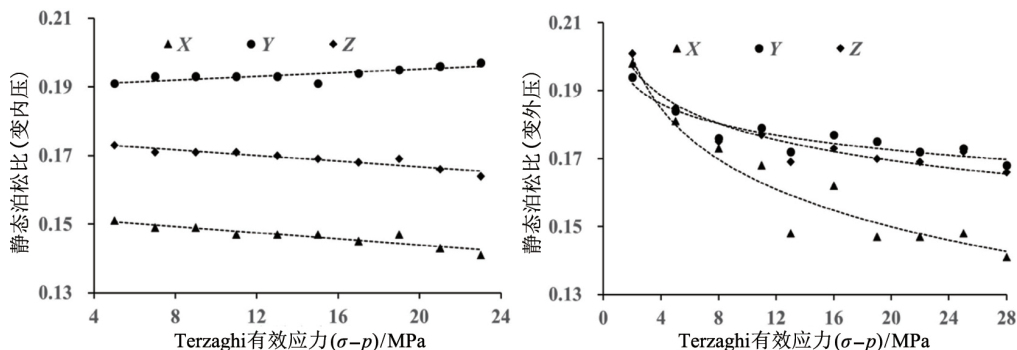


图 4 高台子组致密砂岩储层改变内、外压条件下静态泊松比随 Terzaghi 有效应力变化曲线

Fig.4 Cross-plot between the static Poisson's ratio and the "Terzaghi effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Gaotaizi tight sandstone

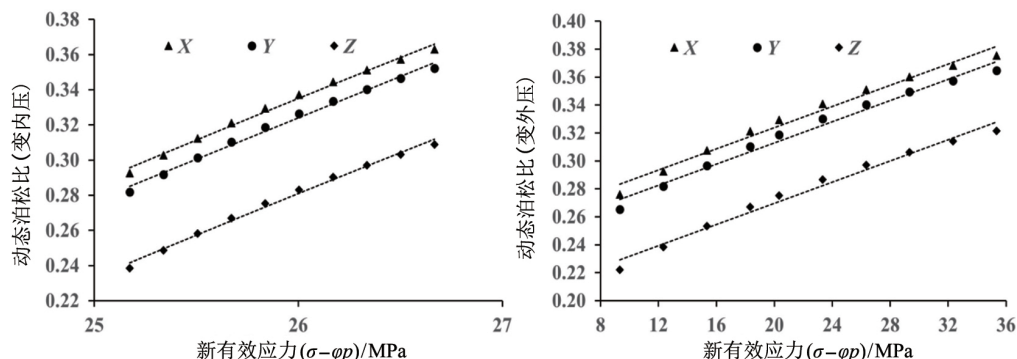


图 5 高台子组致密砂岩储层改变内、外压条件下动态泊松比随新有效应力变化曲线

Fig.5 Cross-plot between the dynamic Poisson's ratio and the "new effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Gaotaizi tight sandstone

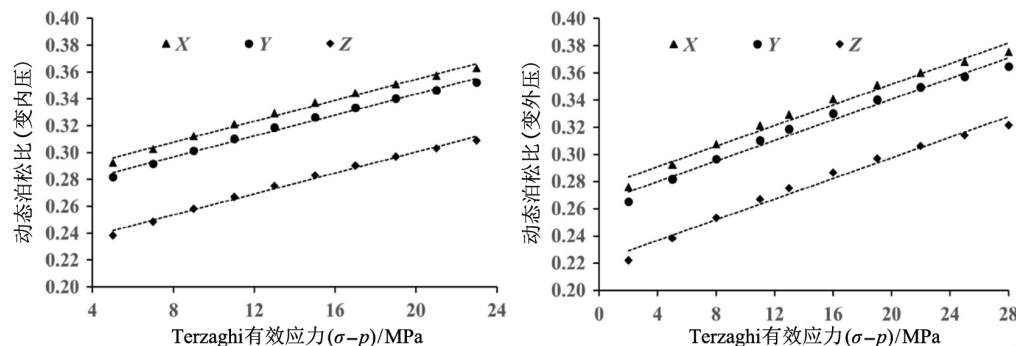


图 6 高台子组致密砂岩储层改变内、外压条件下动态泊松比随 Terzaghi 有效应力变化曲线

Fig.6 Cross-plot between the dynamic Poisson's ratio and the "Terzaghi effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Gaotaizi tight sandstone

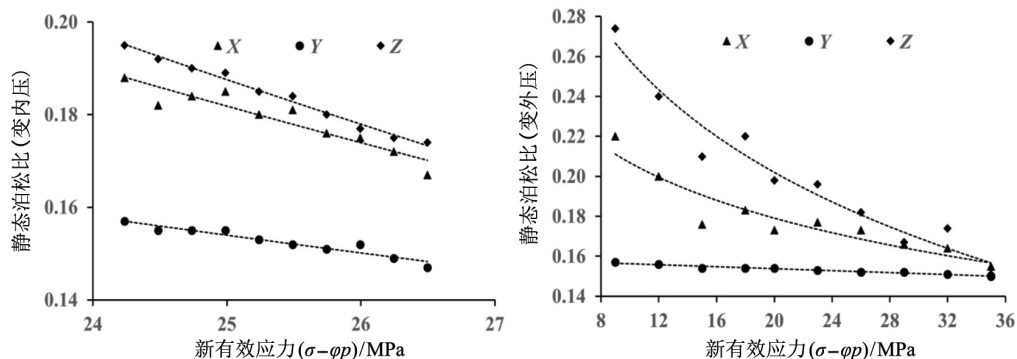


图 7 青山口组泥页岩生油层改变内、外压条件下静态泊松比随新有效应力变化曲线

Fig.7 Cross-plot between the static Poisson's ratio and the "new effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Qingshankou source rock of shale

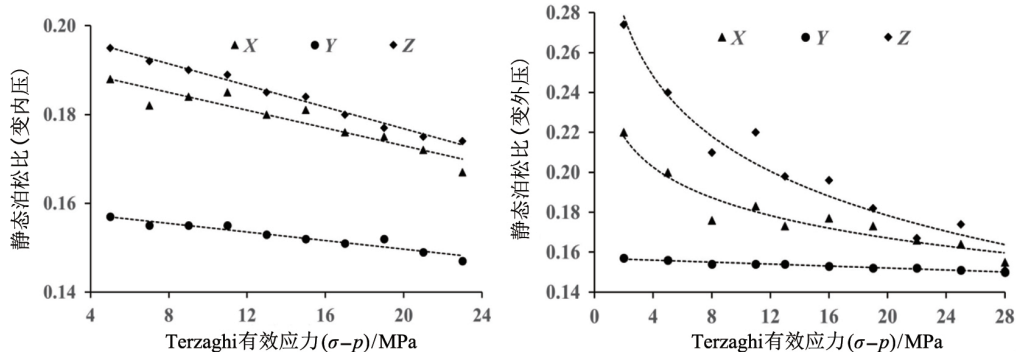


图 8 青山口组泥页岩生油层改变内、外压条件下静态泊松比随 Terzaghi 有效应力变化曲线

Fig.8 Cross-plot between the static Poisson's ratio and the "Terzaghi effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Qingshankou source rock of shale

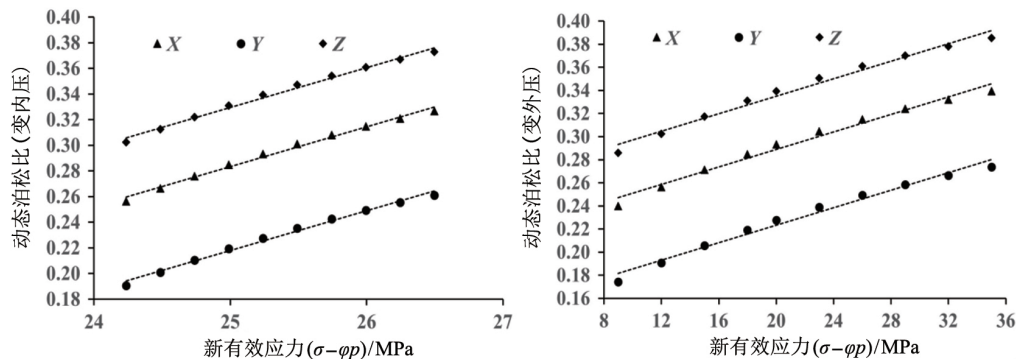


图 9 青山口组泥页岩生油层改变内、外压条件下动态泊松比随新有效应力变化曲线

Fig.9 Cross-plot between the dynamic Poisson's ratio and the "new effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Qingshankou source rock of shale

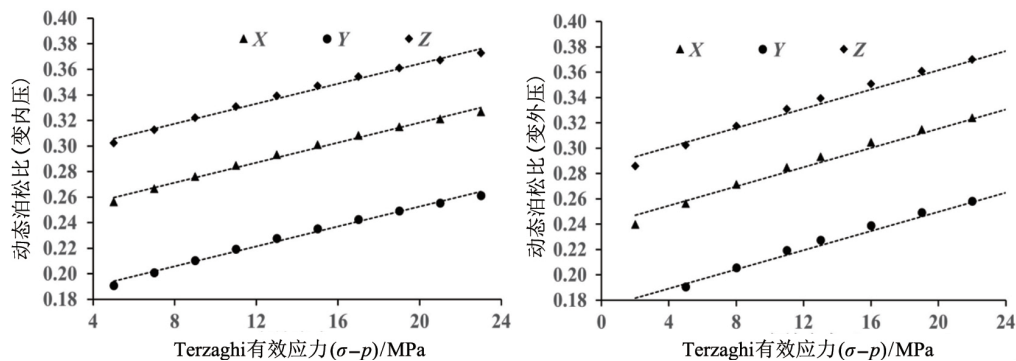


图 10 青山口组泥页岩生油层改变内、外压条件下动态泊松比随 Terzaghi 有效应力变化曲线

Fig.10 Cross-plot between the dynamic Poisson's ratio and the "Terzaghi effective stress" when changing the external (right panel) or internal (left panel) pressure on the Qingshankou source rock of shale

3 讨论

对高台子组致密砂岩储层和青山口组一段泥页岩烃源岩层岩样共 16 组泊松比变化曲线开展曲线拟合, 拟合结果的相关系数均达到 90% 以上, 相关性良好。为深入剖析研究区致密砂岩和泥页岩三向泊松比变化规律的岩石学机制及差异并最终对新有效应力和 Terzaghi 有效应力两种“有效应力”概念

的厘定方法的科学性开展评价, 综合诸多因素对实验结果开展观察、统计和剖析(表 1、表 2)。

表 1、表 2 中的曲线类型即随内、外压变化条件下动、静态泊松比变化趋势, 存在线性和对数两种。曲线组合样式体现在两个方面:(1)在不同应力状态下三向泊松比值呈近似等差分布, 三条曲线显示出截然分开的特点, 本文称之为“1+1+1”模式;(2)在不同应力状态下有两向泊松比值极为接近, 另一向泊松比与其差距较大, 三条曲线显示出两条聚集并

与另一条截然分开的特点, 本文称之为“2+1”模式。两种模式的岩石学机制将在 3.1 和 3.2 节中具体剖析。“新有效应力”下变化幅度及各向异性体现的是随“新有效应力”变化, 三向泊松比的变化率大小及差别; 相似地, “Terzaghi 有效应力”下变化幅度及各向异性体现的是随“Terzaghi 有效应力”变化, 三向泊松比的变化率大小及差别。

表 1 高台子组致密砂岩储层泊松比变化规律观察统计

Table 1 Changing rule of Poisson ratio of the Gaotaizi tight sandstone reservoir

储集层泊松比	变化特征描述	改变内压	改变外压
静态泊松比	曲线类型	线性	对数
	曲线组合样式	“1+1+1”	“2+1”
	“新有效应力”下变化率及各向异性	0.007 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	$0.001 \text{ MPa}^{-1} (Y \approx Z) + 0.002 / \text{MPa} (X)$
	“Terzaghi 有效应力”下变化率及各向异性	0.0005 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	$0.001 \text{ MPa}^{-1} (Y \approx Z) + 0.002 \text{ MPa} (X)$
动态泊松比	曲线类型	线性	线性
	曲线组合样式	“2+1”	“2+1”
	“新有效应力”下变化率及各向异性	0.203 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	$0.004 \text{ MPa}^{-1} (X \approx Y \approx Z)$
	“Terzaghi 有效应力”下变化率及各向异性	0.004 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	$0.004 \text{ MPa}^{-1} (X \approx Y \approx Z)$

表 2 青山口组泥页岩烃源岩层泊松比变化规律观察统计

Table 2 Changing rule of Poisson ratio of the Qingshankou source rock of shale

烃源岩泊松比	变化特征描述	改变内压	改变外压
静态泊松比	曲线类型	线性	对数(X/Z)+线性(Y)
	曲线组合样式	“2+1”	“1+1+1”
	“新有效应力”下变化率及各向异性	0.010 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	$0.002 \text{ MPa}^{-1} (X) + 0.0002 \text{ MPa}^{-1} (Y) + 0.005 \text{ MPa}^{-1} (Z)$
	“Terzaghi 有效应力”下变化率及各向异性	0.001 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	$0.002 \text{ MPa}^{-1} (X) + 0.0002 \text{ MPa}^{-1} (Y) + 0.005 \text{ MPa}^{-1} (Z)$
动态泊松比	曲线类型	线性	对数(X/Z)+线性(Y)
	曲线组合样式	“1+1+1”	“1+1+1”
	“新有效应力”下变化率及各向异性	0.035 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	0.004 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)
	“Terzaghi 有效应力”下变化率及各向异性	0.004 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)	0.004 MPa^{-1} ($X \approx Y \approx Z$)

关于这两种“有效应力”概念厘定方法的科学性将在 3.1 和 3.2 节中开展评价。

取生油岩、储集岩岩样分别制作实物样品, 置于高精度 SEM 显微镜(扫描电镜)下观察(图 11、图 12)。

3.1 高台子组致密砂岩储层

表 1 可以看出, 对储层泊松比而言, 只有在改变外压的情况下, 静态泊松比随有效应力的增大呈对数递减, 其他情况下均呈线性递减。图 11 中可以看出, 高台子组致密砂岩储层孔隙发育程度较低, 镜下可见大量成岩裂缝及少量构造裂缝, 裂缝一般延伸较长, 但开度均较低, 平均约为 85.9 nm, 可能对油气运移起到一定的输导作用且在存在良好盖层的情况下也可作为良好的油气储集空间。究其本质可以发现, 由于裂缝本身开度较小, 增加外压时, 裂缝压密程度大大提升, 岩石的裂隙率和孔隙度也将随之大幅降低, 岩石的力学特点将由原来裂缝存在条件下的黏弹性很快转变为大规模压密后的近似完全弹性, 因此在这段加压时期内, 泊松比将发生显著变化。而一旦岩石压密变为近似完全弹性后, 继续增大外压, 泊松比的变化将渐趋平缓。其“2+1”模式可推测 Y、Z 方向裂缝发育程度及排布情况应当相似, 压密所需时间较短, 而 X 裂缝发育程度相对 Y、Z 较高且排布方式与 Y、Z 相比差距较大, 因此压密所需的时间也就较长。

同时, 表 1 显示, 只有在改变内压的情况下, 静态泊松比变化曲线的组合样式呈“1+1+1”模式, 其他情况下均呈“2+1”模式。图 3 可以看出改变内压的情况下, 随着有效应力的全程改变, 静态泊松比总体变化绝对值较小, 且三向泊松比呈现截然分开趋势(“1+1+1”模式), 可推知改变内压对于该裂隙较为发育的储集空间结构的改变总体较为弱小, 因此储集空间结构的各向异性也就不再成为影响静态泊松比各向变化差异性的主控因素, 各向差异就显得微不足道。而相对应的是, 这期间动态泊松比不仅变化绝对值较大, 而且呈现“2+1”模式, 这充分证明相比通过室内实验仪器的“准静止”加压过程测得的静态泊松比而言, 声波特征可较为灵敏地反映改变内压过程中岩层裂缝压密程度所发生的微小变化。因此岩石材料的各向异性对于动态泊松比影响显得相对显著。

另外, 从表 1 可以看出: 改变内压时, “新有效应力”下动、静态泊松比变化率高于改变外压时“新有效

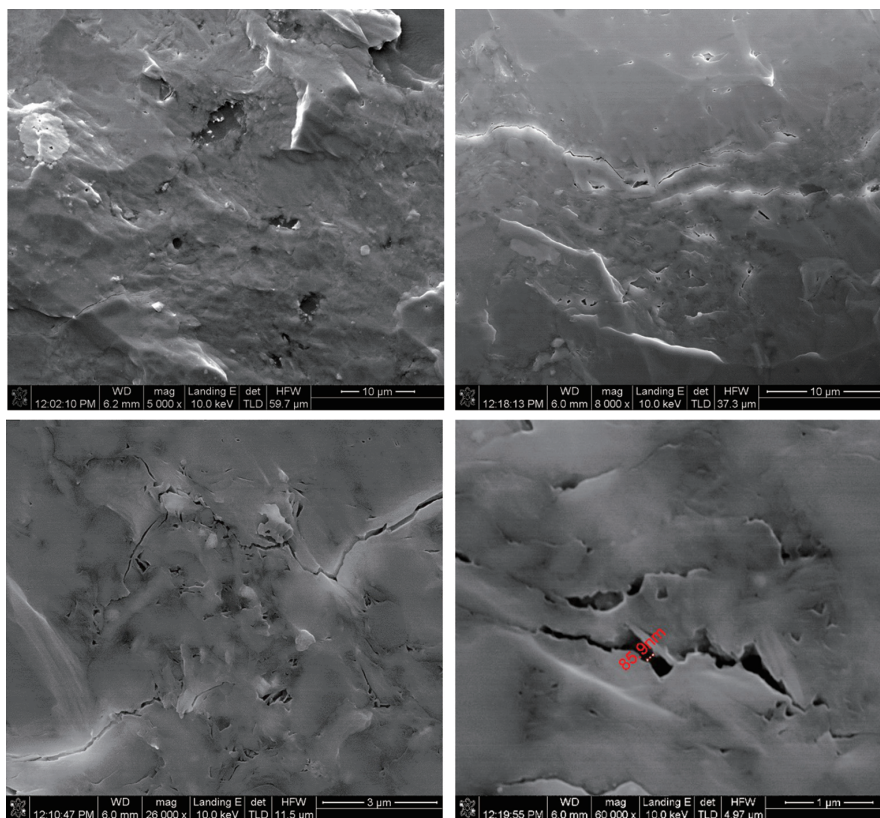


图 11 高台子组致密砂岩储层实物样品扫描电镜下的微观特征

Fig.11 The microscopic characteristics of the Gaotaizi tight sandstone reservoir under the scanning electron microscopy (SEM)

应力”下动、静态泊松比变化率;改变内压时“Terzaghi 有效应力”下动、静态泊松比变化率要略低于改变外压时“Terzaghi 有效应力”下动、静态泊松比变化率。从“有效应力”概念的厘定方法上剖析,“新有效应力”方程理论认为岩石介质实际受到的应力(即有效应力)发生变化主要源于两个因素的改变:岩石所受内压和外压。其中,内压变化对于有效应力的实质影响程度会因为岩石孔隙度的因素而“大打折扣”。但对于齐家—古龙凹陷高台子组致密砂岩储层而言,裂缝广泛发育且大多贯穿岩石表面,改变外压显然要比改变内压对于岩石裂缝的张合的作用效果相对显著,因此有效应力如果发生变化,改变内压时动、静态泊松比变化率理应略低于甚至接近于改变外压时动、静态泊松比变化率。因此,对于该类裂缝性储层力学性质的研究,就“有效应力”概念的厘定方式而言,“Terzaghi 有效应力”相比于“新有效应力”更加符合实际。

3.2 青山口组一段泥页岩烃源岩层

青山口组一段泥页岩烃源岩层岩样镜下显示(图 12),该类岩石孔隙发育程度较高,且相比高台子组致密砂岩储层而言,孔径较大,平均约为 508 nm,孔隙类型包括有机孔、溶蚀无机孔及少量微裂隙,孔

隙之间连通性较差。

青山口组泥页岩泊松比变化基本趋势与致密砂岩储层类似,动态泊松比随有效应力的增大而增大,静态泊松比随有效应力的增大而减小。

从表 2 可以看出:改变内压时,“新有效应力”下动、静态泊松比变化率要高于改变外压时“新有效应力”下动、静态泊松比变化率;改变内压时“Terzaghi 有效应力”下动、静态泊松比变化率要略低于或接近于改变外压时“Terzaghi 有效应力”下动、静态泊松比变化率。相似地,对于青山口组泥页岩生油层而言,无机、有机各类“死孔隙”广泛发育且分布较为均匀,改变内压显然要比改变外压对于孔隙张合的作用效果相对显著,因此有效应力如果发生变化,改变内压时动、静态泊松比变化率理应略高于改变外压时动、静态泊松比变化率。因此,对于该类孔隙度交大且分布较为均匀的泥页岩生油层力学性质的研究,就“有效应力”概念的厘定方式而言,“新有效应力”相比于“Terzaghi 有效应力”更加贴合实际。

4 结论

(1)齐家—古龙凹陷油藏中,随着注水开发的推

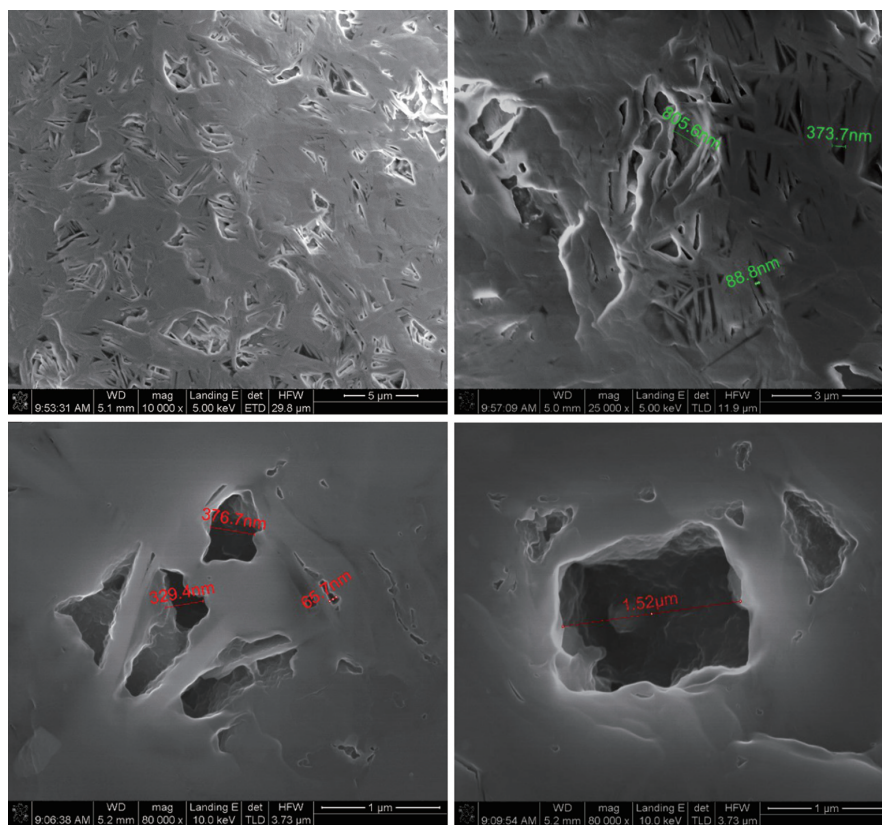


图 12 青山口组泥页岩生油层实物样品扫描电镜下的微观特征

Fig.12 The microscopic characteristics of the Qingshankou source rock of shale under the scanning electron microscopy (SEM)

进,生油岩与储集岩的泊松比都将发生变化,变化规律与岩层的孔隙结构、储集空间类型及发育程度及岩层所处的应力状态密切相关。

(2)注水开发过程中,研究区岩样三向泊松比变化曲线呈现“1+1+1”模式和“2+1”模式,研究区高台子组致密砂岩储层与青山口组泥页岩生油层泊松比的变化存在显著的各向异性,压裂过程中将对裂缝的延展规律造成影响。

(3)相比通过室内实验仪器的“准静止”加压过程测得的静态泊松比而言,声波特征可较为灵敏地反映改变内压过程中岩层裂缝压密程度所发生的微小变化,因此岩石材料的各向异性对于动态泊松比影响显得相对显著。

(4)就“有效应力”概念的厘定方式而言,对该类裂缝性储层力学性质开展研究时,“Terzaghi 有效应力”相比于“新有效应力”更加符合实际;而对该类孔隙度较大且分布较为均匀的泥页岩生油层力学性质开展研究时,“新有效应力”则相比于“Terzaghi 有效应力”更加贴合实际。

审稿专家提出的建设性修改意见及编辑部老师认真负责的工作对提高本文质量发挥了重要的作用,在此致谢!

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2021, 28(1)

参考文献

- [1] HUANG Z Q, ZHANG X Y, YAO J, et al. Non-Darcy displacement by a non-Newtonian fluid in porous media according to the Barree-Conway model[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2017, 1(2): 74-85.
- [2] 李道伦, 齐银, 达引朋, 等. 低速非线性是低渗油藏的流动机制[J]. *非常规油气*, 2020, 7(4): 1-8.
- [3] WAN Y W, ZHANG H, LIU X J, et al. Prediction of mechanical parameters for low-permeability gas reservoirs in the Tazhong Block and its applications[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2020, 4(2): 219-228.
- [4] 贾光亮, 吴天乾, 李晔旻, 郑道明. 临兴低压浅层气压裂改造技术研究与应[J]. *非常规油气*, 2020, 7(3): 101-107.
- [5] LU M J, SU Y L, ZHANG S Y, et al. Modeling for reorientation and potential of enhanced oil recovery in refracturing [J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2020, 4(1): 20-28.
- [6] WOOD D A. Establishing credible reaction-kinetics distributions to fit and explain multi-heating rate S2 pyrolysis peaks of kerogens and shales[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2019, 3(1): 1-28.
- [7] 谢明英, 戴宗, 罗东红, 等. 基于微米 CT 扫描驱替实验的稠油油藏剩余油特征分析新方法[J]. *非常规油气*, 2020,

- 7(5): 102-107.
- [8] 祝金利. 强非均质致密砂岩气藏剩余气分布定量描述与挖潜对策: 以苏里格气田苏11区块北部老区为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 89-95.
- [9] 白远, 康胜松, 云彦舒, 等. 基于高温岩电实验的致密砂岩储层含油饱和度解释方法研究: 以鄂尔多斯盆地南部延长组长8致密储层为例[J]. 非常规油气, 2019, 6(6): 68-73.
- [10] 张海杰, 蒋裕强, 周克明, 等. 页岩气储层孔隙连通性及其对页岩气开发的启示: 以四川盆地南部下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 22-31.
- [11] 赵伦, 陈焯菲, 宁正福, 等. 异常高压碳酸盐岩油藏应力敏感实验评价: 以滨里海盆地肯基亚克裂缝—孔隙型低渗透碳酸盐岩油藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 194-200.
- [12] 骆杨, 赵彦超, 陈红汉, 等. 构造应力—流体压力耦合作用下的裂缝发育特征: 以渤海湾盆地东濮凹陷柳屯洼陷裂缝性泥页岩“油藏”为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 177-185.
- [13] 王敬, 刘慧卿, 刘仁静, 等. 考虑启动压力和应力敏感效应的低渗、特低渗油藏数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3317-3327.
- [14] 冉启全, 顾小芸. 油藏渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 69-73.
- [15] 洪亮, 刘雄志, 杨兆平, 等. 对多孔介质双重有效应力理论的讨论[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(6): 732-737.
- [16] 赵成刚, 刘真真, 李舰, 等. 土力学有效应力及其作用的讨论[J]. 力学学报, 2015, 47(2): 356-361.
- [17] 邵龙潭, 郭晓霞, 郑国锋. 粒间应力、土骨架应力和有效应力[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1478-1483.
- [18] 路德春, 杜修力, 许成顺. 有效应力原理解析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1): 146-151.
- [19] 雷国辉, 陈晶晶. 有效应力决定饱和岩土材料抗剪强度的摩擦学解释[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1517-1525.
- [20] 陈正汉, 秦冰. 非饱和土的应力状态变量研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 1-11.
- [21] 李传亮. 关于双重有效应力: 回应洪亮博士[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(2): 238-243.
- [22] 李传亮. 有效应力概念的误用[J]. 天然气工业, 2008, 28(10): 130-132.
- [23] 李传亮, 朱苏阳. 关于应力敏感测试方法的认识误区[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(6): 1-4.
- [24] 李传亮. 多孔介质的应力关系方程: 答周大晨先生[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(2): 163-164.
- [25] 周大晨. 对李传亮上覆岩层压力公式的质疑[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(2): 150-154.
- [26] DU S H, SHI Y M, GUAN P, et al. New inspiration on effective development of tight reservoir in secondary exploitation by using rock mechanics method[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2016, 34(1): 1-16.
- [27] 杜书恒, 师永民. 低渗油气藏水力压裂理想水驱波及范围预测新方法[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1956-1962.
- [28] 卜向前, 师永民, 杜书恒, 等. 低渗透油藏压力场变化对岩体力学性质的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 850-856.
- [29] 胡伟光, 蒲勇, 赵卓男, 等. 利用弹性参数预测礁、滩相储层[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊1): 176-180.
- [30] 刘钦节. 低渗油藏储层裂缝的参数反分析优化方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
- [31] 贺顺义. 大庆外围低渗透油藏应力场恢复模拟及裂缝预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [32] 樊长江, 王贤. 泊松比岩性预测方法研究: 以准噶尔盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 299-302.
- [33] 许卫卫, 郑天愉. 渤海湾盆地北西盆地山边界地区泊松比分布[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1077-1084.
- [34] 杜书恒, 师永民, 徐启, 等. 井震联合非均质储层改造规模的非线性表征方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 241-248.
- [35] DU S H, SHI Y M, BU X Q, et al. New expression of the changing stress field in low-permeability reservoir and its application in secondary exploitation[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2015, 33(4): 491-514.
- [36] 杜书恒, 关平, 师永民, 等. 低渗透砂岩储层可压裂性新判据[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 257-264.
- [37] 杜书恒, 师永民, 关平等. 松辽盆地扶余低渗储层压裂缝定量预测[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 381-389.
- [38] 杜书恒, 赵晔, 庞姍, 等. 岩石水力压裂微观破裂机制[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(12): 2237-2245.
- [39] 郭培峰, 邓虎成, 邓勇, 等. 鄂尔多斯盆地南缘长8储层岩石力学特征及影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 189-198.
- [40] 石玉江, 么勃卫, 夏宏泉. 致密油储层岩石各向异性的动态声学实验研究[J]. 测井技术, 2019, 43(3): 228-234.
- [41] 桂俊川, 陈平, 马天寿. 正交各向异性岩石弹性参数的空间展布[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 13-28.
- [42] 王国栋, 程日辉, 王璞珺, 等. 松辽盆地嫩江组白云岩形成机理: 以松科1井南孔为例[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 48-54.
- [43] 王磊. 基于非均质岩石力学模型的水力压裂数值模拟[D]. 北京: 北京大学, 2016.