

doi: 10.11720/wtyht.2024.0014

边会媛, 臧鑫, 张迪, 等. 应力效应下页岩动静态弹性各向异性特征[J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1664–1673. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0014>Bian H Y, Zang X, Zhang D, et al. Impacts of anisotropy on the dynamic and static elastic characteristics of shales under stress effects[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1664–1673. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0014>

应力效应下页岩动静态弹性各向异性特征

边会媛¹, 臧鑫¹, 张迪^{2,3}, 张程恩⁴, 聂晓敏⁴, 武银婷⁵

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 青海油田勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 3. 青海省高原咸化湖盆地油气地质重点实验室, 甘肃 敦煌 736202; 4. 中国石油集团测井有限公司 青海分公司, 甘肃 敦煌 736202; 5. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 静态弹性力学参数是页岩油开采及注水压裂工程的关键参数, 应力效应下各向异性对页岩动静态弹性特征具有重要的影响, 开展储层动静态弹性特征的主控因素与控制机理研究是页岩油气开采及注水压裂工程中一项亟须解决的关键科学问题。通过不同加压方式下页岩的三轴压缩力学与声学联测实验, 研究各向异性对页岩纵、横波速度及宏观力学性质的影响, 探究页岩动静态弹性特征的响应规律。结果表明: ①随压力的增加, 页岩动、静态杨氏模量增大, 且增大速率由快到慢趋于稳定值; ②层理角度一定时, 动态杨氏模量大于静态杨氏模量, 二者呈正相关, 动、静态泊松比关系较差; ③岩石动、静态刚度系数均随围压增大而增大, 与纵波相关的动态刚度系数 C_{11} 、 C_{33} 比与横波相关的动态刚度系数 C_{44} 、 C_{66} 变化更明显; ④页岩动、静态各向异性均随围压的增大而增大。研究结果可以揭示页岩动、静态弹性特征响应机理, 并能够为页岩油气储层开采与水力压裂改造提供关键力学参数。

关键词: 页岩油; 各向异性; 弹性性质; 静态模量; 地层压力**中图分类号:** P631.4**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)06-1664-10

0 引言

页岩油气以吸附、游离及水溶解等形式赋存在有机质页岩或泥岩中, 储层无明显的圈闭界限, 具有生、储、盖一体化等特征^[1-2]。页岩油气储层由于其强非均质性、低孔隙度、低渗透率等特征, 需要利用水平井分段体积压裂技术进行储层改造, 以提高储层产量^[3-7]。静态弹性力学参数是页岩油气开采及注水压裂工程的关键参数, 常由实验室测量获得。通过大量连续的测井数据, 可评价岩石力学性质, 同时还能够克服实验室测量静态弹性参数耗时、耗力、耗财且岩样不连续的缺点^[8-10]。但利用测井资料直接计算得到的是动态岩石力学参数, 与真实地层所受的长时间静荷载有差别, 因此需要开展页岩

岩动、静态弹性性质差异机理研究, 以提高动、静态弹性参数转换精度, 进而为页岩油气储层的压裂设计提供科学依据。

岩石的静态弹性参数与动态弹性参数具有一定的联系, 同时也存在一定的差异。造成页岩动、静态弹性参数差异的原因比较复杂, 外在原因主要为作用在页岩样品上的加压方式、加压条件、温度及测试频率等^[11-12], 内在原因主要为页岩的各向异性、矿物组分、泥质含量、孔隙及微裂隙发育情况、孔隙流体等^[13]。页岩纵波速度在平行和垂直层理方向上具有各向异性, 是横向各向同性(VTI)介质^[14-15], 矿物的定向排列是导致页岩各向异性的主要原因, 岩石在受力后, 天然微裂隙逐渐闭合, 各向异性随应力增加而降低^[16]。微观矿物和孔裂隙分布特征也会导致弹性各向异性, 各向异性特征是微观矿物分布

收稿日期: 2024-01-15; **修回日期:** 2024-03-05**基金项目:** 国家自然科学基金项目“基于声力效应的页岩动静态弹性特征响应机理研究”(42304143); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“表面及层间多次波反演成像研究”(2022JM-139)**第一作者:** 边会媛(1986-), 博士, 副教授, 主要从事岩石物理与复杂储层测井解释方面的研究工作。

的一种宏观表现。Wang 等^[1]研究了泥页岩在不同方向上的纵、横波速度及各向异性参数随压力的变化规律,并讨论围压和孔隙流体对泥页岩各向异性的影响,指出裂缝大小是影响页岩各向异性的主要因素;Gong 等^[2]通过人工页岩样品实验,研究了各向异性对声波速度及动态弹性参数的影响。目前,对于全张量弹性及其各向异性的力学性质的研究较少,特别是基于三轴应力—应变测试从静态方面计算 TI 介质的弹性常数^[17]。Liu 等^[18]研究了页岩的各向异性特征以及深层页岩与露头页岩力学性能的差异;Li 等^[19-20]对比分析了龙马溪组页岩各向异性的极限强度、破坏形态和声发射演化特征。学者们通过力学实验研究了各向异性对岩石静态弹性性质的影响。对于横观各向同性(TI)岩石,弹性特性通常由 5 个独立的刚度系数表征,各向异性程度一般用 Thomsen 参数 ε 、 γ 和 δ 通过声波速度来量化。岩石的强度、变形以及动、静态力学特性在油气勘探中至关重要。

岩石动、静态弹性参数存在差异,造成这种差异的主要原因在于静态压缩($10^{-3} \sim 10^{-5}$)和弹性波传播($<10^{-6}$)引起的应变幅度差异。由于储层在地质尺度上的变形服从静态力学特性,因此在实际工程应用上,需要研究岩石动态与静态弹性模量的差异。边会媛等^[21]研究了温度、压力对砂岩动、静态弹性模量的影响,并提出了动、静态弹性模量转换模型;王飞等^[22]研究了温度、压力对页岩动、静态弹性模量的影响,并提出了动、静态弹性模量转换模型。但考虑页岩动、静态各向异性响应的研究仍然较少。

本次研究以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油样品为例,从端面夹角为 0° 、 45° 、 90° 三个角度进行制样,分别利用声波速度及应力—应变曲线测量了岩石的动态与静态弹性参数,研究了在不同围压条件下,岩石动、静态页岩弹性张量与各向异性的关系,并对页岩动、静态各向异性差异机理进行了分析。本次研究可为不同方向岩石动、静态弹性模量转换提供科学依据。

1 研究区地质背景

沧东凹陷是渤海湾盆地黄骅凹陷南侧的一个次级构造单元,夹持于沧县隆起、徐黑凸起及孔店凸起之间,是在区域性拉张背景下发育的新生代陆相断陷湖盆(图 1),勘探面积约为 $1\,760\text{ km}^2$,区内古近系自下而上发育孔店组、沙河街组、东营组等,孔店组湖泛期沉积的孔二段是页岩油的主力勘探层系,

厚度为 $400 \sim 600\text{ m}$ 。

孔二段岩性主要为灰黑色—黑色泥页岩,含有少量浅灰色粉细砂岩。孔二段页岩整体具有厚度大、生烃母质类型好、有机质丰度高、转化率大的特点。有机质丰度一般都在 2.00% 以上,平均为 3.61% ,最高可达 11.92% ;生烃潜力平均为 22.18 mg/g ,最高为 73.00 mg/g 。

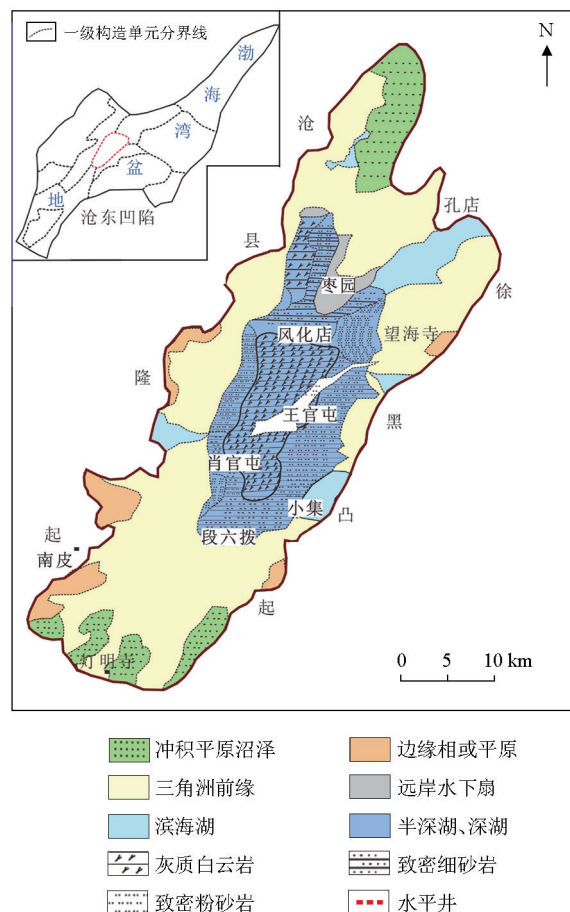


图 1 沧东凹陷孔二段沉积体系^[23]

Fig.1 Sedimentary system of the second member of Kongdian Formation, Cangdong Depression^[23]

2 实验样品与方案

2.1 实验样品

利用 AutoLab 1500 岩样声学力学联测系统,分析三轴加压条件下及应力加载过程中,不同角度下页岩动、静态弹性性质差异的影响。为探讨层理页岩的各向异性,利用金刚石线切割的方式,将岩石按层理面与岩样端面夹角为 0° 、 45° 、 90° 三个角度取直径 2.5 cm 、长 5.0 cm 的柱塞样(图 2),制备好的试样如图 3 所示。加工后的试样满足端面平整度误差 $\leq 0.02\text{ mm}$ 、沿高度方向试样直径误差 $\leq 0.1\text{ mm}$ 的

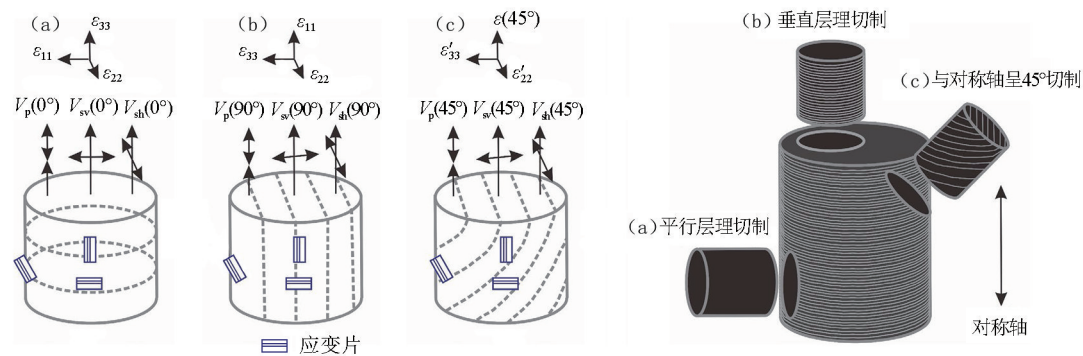


图 2 不同角度页岩取心方位

Fig.2 Orientation of shale coring at different angles

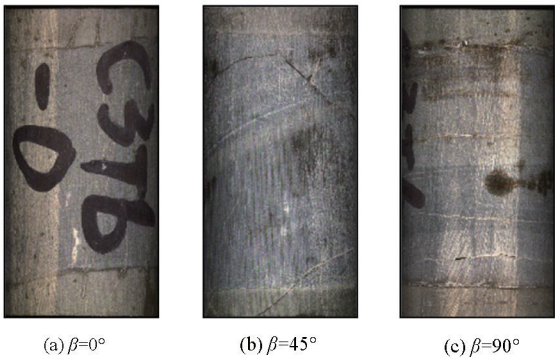


图 3 不同层理角度页岩光学扫描结果

Fig.3 Optical scanning of shale at different bedding angles

要求。岩样侧面光滑、笔直,轴向角度偏差不得超过 0.05°。加工好的试样在室内自然晾干,对试样进行波速测试,挑选无波速异常、完整、表面无裂隙和缺陷的黑色页岩试样开展岩石力学试验研究。

2.2 页岩地化参数及微观结构

油页岩地化参数和微观结构是其力学行为和各

向异性特征的内在因素。样品孔隙度在 1.3% ~ 1.5%之间,渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,体积密度在 2.32~2.37 g/cm³之间,不同层理角度略有差异,如表 1 所示。样品的总有机碳含量为 6.19%,成熟度为 0.11%,有很好的生烃潜力。

表 1 沧东凹陷孔二段页岩油样品基本参数

Table 1 Basic parameters of shale oil samples in the second member of kongdian Formation, Cangdong Depression

样品号	孔隙度/%	渗透率/mD	总有机碳/%	成熟度/%
A1-0°	1.3	0.01	6.19	0.11
A1-45°	1.5	0.01	6.19	0.11
A1-90°	1.2	0.01	6.19	0.11

利用 X 射线衍射,对不同层理页岩油样品进行全岩分析及粘土含量测试。沧东凹陷孔二段不同层理页岩油样品脆性成分较高,其中石英、长石类脆性矿物含量约 60%,白云石类矿物约 35%,粘土矿物约 5%(表 2)。粘土矿物由伊利石与伊/蒙混层组成,各成分含量占比见表 3。

表 2 页岩样品矿物组分含量

Table 2 Mineral groups of shale samples %

样品编号	石英石	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	菱铁矿	铁白云石	石膏	斜沸石	黏土矿物
A1-0°	15.0	11.0	24.0	11.0	1.0	0.0	0.0	34.0	0.0	0.0	4.0
A1-45°	12.0	11.0	22.0	14.0	1.0	0.0	2.0	31.0	0.0	3.0	4.0
A1-90°	12.0	4.0	25.0	13.0	0.0	1.0	0.0	38.0	1.0	0.0	6.0

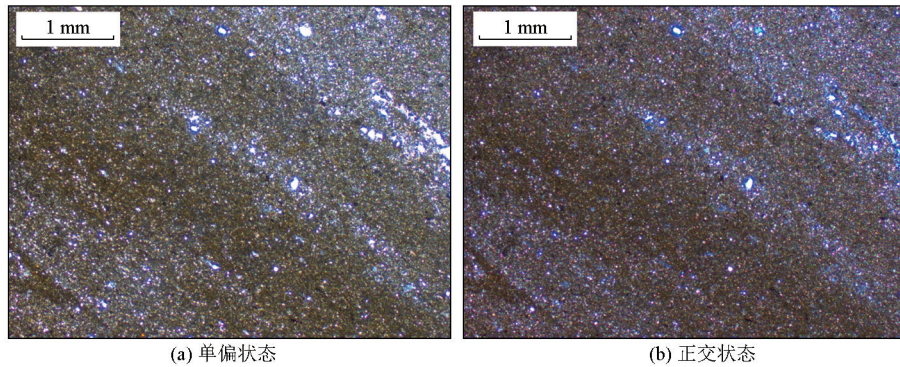
表 3 页岩样品粘土含量

Table 3 Clay content table of shale samples

样品编号	粘土矿物含量/%				伊/蒙混层比/%		
	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	绿/蒙混层	蒙皂石层	伊利石层
C3T6	79.0	0	0	21.0	0	35.0	65.0

由薄片鉴定结果可知样品含云泥质结构,岩石成分主要由泥质、泥晶白云石,粉砂级石英和长石组成。泥质重结晶呈纤维状与泥晶白云石混杂分布,粉砂级石英和长石局部富集分布,见少量有机质条带,局部较定向分布(图 4)。

采用 AutoLab1500 岩样声学力学联测装置,其声学力学联测原理流程见图 5。岩石应变测试采用应变片模式,声波探头集成 1 对纵波换能器和 2 对极性正交的横波换能器,中心频率分别为 0.5 MHz 和 0.45 MHz。



(a) 单偏状态

(b) 正交状态

图 4 页岩样品薄片照片

Fig.4 Photos of thin sections of shale samples

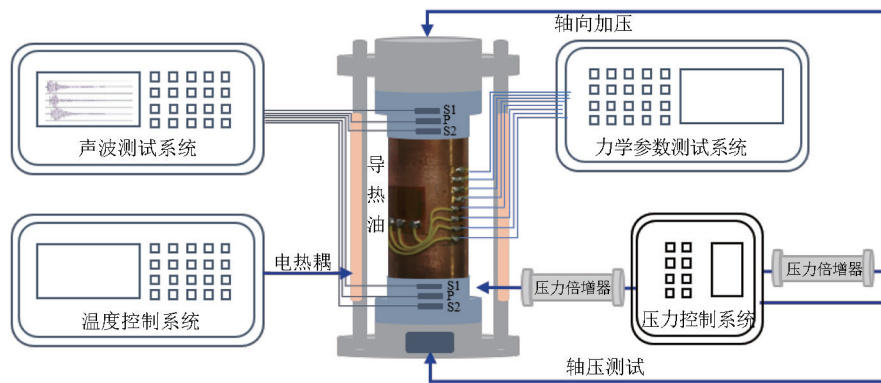


图 5 岩样声学力学联测原理流程

Fig.5 Flow chart of rock sample acoustical and mechanical joint measurement principle

对制备好的岩样进行三轴压缩实验,设计围压为 10、20、30、40、50 MPa 共 5 种情况。在进行动态测试时,控制围压不变,调整轴压分别为 10、20、30、40、50 MPa 时测试不同层理样品的纵波速度、快横波速度与慢横波速度。在进行静态测试时,在围压分别为 10、20、30、40、50 MPa 时调整轴压,使差应力在 0~10 MPa 之间进行加压循环,然后将围压控制在 40 MPa,使差应力分别在 0~10 MPa、10~20 MPa、20~30 MPa、30~40 MPa、40~50 MPa 和 50~60 MPa 间进行加压循环,测试不同层理角度的应力应变的大小,计算岩石的静态弹性模量。岩石样品应力加载路径及岩石动静态弹性测试示意图 6。

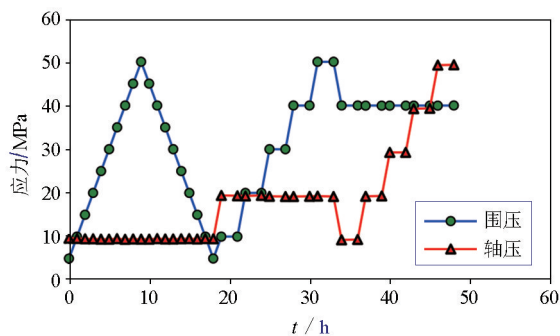


图 6 应力加载路径及动静态弹性参数测试

Fig.6 Stress loading path and dynamic and static elastic parameter test diagram

3 岩石动态各向异性计算模型

3.1 岩石动态刚度系数

页岩所在地层一般可以被描述为具有旋转对称的垂直轴的横观各向同性介质 (VTI), 对于 VTI 介质, 其应力与应变之间的关系满足广义胡克定律

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl}, \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为应力分量; ϵ_{kl} 为应变分量; C_{ijkl} 为刚性系数矩阵, 具体形式为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

横观各向同性地层的刚性系数矩阵, 包含 5 个独立的刚性系数, 分别为 C_{11} 、 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{66} 和 C_{13} 。刚性系数 C_{12} 不是独立参数, 它与 C_{11} 和 C_{66} 密切相关: $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$ 。这 5 个刚度系数与地层密度及其

纵、横波速度密切相关。

利用不同层理岩样速度与密度测量结果,可进一步计算页岩的动态刚性系数 C_{11d} 、 C_{33d} 、 C_{44d} 、 C_{66d} 、 C_{12d} 与 C_{13d} [24]:

$$C_{11d} = \rho_b V_p^2(90^\circ), \quad (3)$$

$$C_{33d} = \rho_b V_p^2(0^\circ), \quad (4)$$

$$C_{66d} = \rho_b V_{sh}^2(90^\circ), \quad (5)$$

$$C_{44d} = \rho_b V_{sv}^2(0^\circ), \quad (6)$$

$$C_{12d} = C_{11d} - 2\rho_b V_{sh}^2(90^\circ), \quad (7)$$

$$C_{13d} = -C_{44d} + \sqrt{4\rho_b^2 V_p^4(45^\circ) - 2a\rho_b V_p^2(45^\circ) + b}, \quad (8)$$

式中: $V_p(0^\circ)$ 为平行于对称轴传播的纵波速度, 振动方向与传播方向一致; $V_p(45^\circ)$ 为与对称轴成 45° 方向传播的纵波速度, 振动方向与传播方向一致; $V_p(90^\circ)$ 为垂直对称轴方向传播的纵波速度, 传播方向与振动方向一致; $V_{sh}(90^\circ)$ 的振动方向在层面内且垂直于传播方向; $V_{sv}(0^\circ)$ 为平行于对称轴传播的横波速度, 振动方向与层理面平行; $a = C_{11d} + C_{33d} + 2C_{44d}$, $b = (C_{11d} + C_{44d})(C_{33d} + C_{44d})$; ρ_b 为干岩石体积密度, g/cm^3 。据此, 可得到页岩不同方向的动态杨氏模量 E_{11d} 、 E_{33d} 与动态泊松比 μ_{12d} 、 μ_{31d} 与 μ_{13d} :

$$E_{11d} = C_{11d} + \frac{C_{13d}^2(-C_{11d} + C_{12d}) + C_{12d}(-C_{33d}C_{12d} + C_{13d}^2)}{C_{33d}C_{11d} - C_{13d}^2}, \quad (9)$$

$$E_{33d} = \frac{C_{11d}C_{33d} + 2C_{13d}^2C_{12d} - 2C_{11d}C_{13d}^2 - C_{33d}C_{12d}^2}{C_{11d}^2 - C_{12d}^2}, \quad (10)$$

$$\mu_{12d} = \frac{C_{33d}C_{12d} - C_{13d}^2}{C_{33d}C_{11d} - C_{13d}^2}, \quad (11)$$

$$\mu_{31d} = \frac{C_{13d}}{C_{11d} + C_{12d}}, \quad (12)$$

$$\mu_{13d} = \frac{C_{13d}(C_{11d} - C_{12d})}{C_{33d}C_{11d} - C_{13d}^2}, \quad (13)$$

式中: E_{11d} 为利用平行层理面岩心测得的动态杨氏模量; E_{33d} 为利用垂直层理面岩心测得的动态杨氏模量; μ_{12d} 、 μ_{13d} 为利用平行层理面岩心测得的动态泊松比; μ_{31d} 为利用垂直层理面岩心测得的动态泊松比。

3.2 纵、横波各向异性系数

Thomsen 于 1986 年首次提出了纵、横波各向异

性系数的概念, 公认为是表征纵、横波各向异性强弱的最有效参数, 具体表达式为

$$\varepsilon_d = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}, \quad (14)$$

$$\gamma_d = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}, \quad (15)$$

$$\delta_d = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}, \quad (16)$$

式中: ε_d 为纵波各向异性系数; γ_d 为横波各向异性系数; δ_d 为纵波变异系数, 表示纵波在垂直方向上各向异性变化的快慢程度。

4 岩石静态各向异性计算模型

4.1 岩石静态弹性参数

利用应力—应变测量结果, 可以计算页岩的静态杨氏模量 E_{11s} 、 E_{33s} 与静态泊松比 μ_{12s} 、 μ_{31s} 与 μ_{13s} :

$$E_{11s} = \partial\sigma_{11}/\partial\varepsilon_{11}, \quad (17)$$

$$E_{33s} = \partial\sigma_{33}/\partial\varepsilon_{33}, \quad (18)$$

$$E_{11s}(45^\circ) = \partial\sigma(45^\circ)/\partial\varepsilon(45^\circ), \quad (19)$$

$$\mu_{12s} = -\partial\varepsilon_{22}/\partial\varepsilon_{11}, \quad (20)$$

$$\mu_{31s} = -\partial\varepsilon_{11}/\partial\varepsilon_{33}, \quad (21)$$

$$\mu_{13s} = -\partial\varepsilon_{33}/\partial\varepsilon_{11}, \quad (22)$$

式中: E_{11s} 为利用平行层理面岩心测得的静态杨氏模量; E_{33s} 为利用垂直层理面岩心测得的静态杨氏模量; μ_{12s} 、 μ_{13s} 为利用平行层理面岩心测得的静态泊松比; μ_{31s} 为利用垂直层理面岩心测得的静态泊松比。

4.2 岩石静态刚度系数

利用应力—应变方法可以获得岩石的静态弹性模量, 对于 VTI 介质, 可进一步计算页岩的静态刚性系数 C_{11s} 、 C_{33s} 、 C_{44s} 、 C_{66s} 、 C_{12s} 与 C_{13s} :

$$C_{11s} = \frac{E_{11s}(1 + \mu_{13s}\mu_{31s})}{(1 - \mu_{12s} - 2\mu_{13s}\mu_{31s})(1 + \mu_{12s})}, \quad (23)$$

$$C_{33s} = \frac{E_{33s}(1 - \mu_{12s}^2)}{(1 - \mu_{12s} - 2\mu_{13s}\mu_{31s})(1 + \mu_{12s})}, \quad (24)$$

$$C_{44s} = \left[\frac{4}{E_s(45^\circ)} - \frac{1}{E_{11s}} - \frac{1 - 2\mu_{31s}}{E_{33s}} \right]^{-1}, \quad (25)$$

$$C_{66s} = \frac{E_{11s}}{2(1 + \mu_{12s})}, \quad (26)$$

$$C_{12s} = \frac{E_{11s}(\mu_{12s} + \mu_{13s}\mu_{31s})}{(1 - \mu_{12s} - 2\mu_{13s}\mu_{31s})(1 + \mu_{12s})}, \quad (27)$$

$$C_{13s} = \frac{E_{11s}\mu_{31s}}{1 - \mu_{12s} - 2\mu_{13s}\mu_{31s}}. \quad (28)$$

由式(23)~(28)可得到页岩油样品静态各向异性参数 ε_s 、 γ_s 及 δ_s 。

5 应力效应下页岩弹性各向异性

5.1 压力对页岩动、静态刚度系数的影响

设定偏应力为 20 MPa, 围压分别为 10、20、30、40、50 MPa 时测试岩石的声学力学性质, 并计算岩石的动、静态刚度系数(图 7)。由图 7 可见, 动、静态刚度系数 C_{11} 、 C_{33} 、 C_{13} 、 C_{44} 、 C_{66} 均随着围压的增大而增大。不同刚度系数与围压敏感度存在差异, 与纵波相关的弹性参数(C_{11} 、 C_{33})比与横波相关的弹性参数(C_{44} 、 C_{66})随压力的变化更加明显。

5.2 压力与页岩动静态弹性参数的关系

在进行地质力学分析时, 忽视弹性各向异性的存在将导致原场应力估算值偏低, 从而使得射孔和

压裂的方案设计不合理, 导致产量偏低。在储层各向异性评价过程中, 不同层理方向弹性模量受地层压力影响较大, 因此, 在评价不同层理方向弹性参数时, 需要对储层围压影响进行校正。

不同层理方向静态杨氏模量、静态泊松比与围压之间有一定相关性(图 8), 不同方向杨氏模量随围压的增大而增大, 原因为页岩层理方向发育微裂隙, 围压增大导致微裂隙闭合, 岩石刚度增强。不同层理方向静态弹性参数与围压之间的校正关系为:

$$E_{11s} = 0.0589P_{\text{eff}} + 14.7150, R^2 = 0.9737; \quad (29)$$

$$E_{33s} = 0.0460P_{\text{eff}} + 13.8100, R^2 = 0.9654; \quad (30)$$

$$E_{45s} = 0.0760P_{\text{eff}} + 12.9100, R^2 = 0.9891; \quad (31)$$

$$\mu_{13s} = -0.0003P_{\text{eff}} + 0.1196, R^2 = 0.8663; \quad (32)$$

$$\mu_{31s} = -0.0019P_{\text{eff}} + 0.3048, R^2 = 0.7759; \quad (33)$$

式中: E_{11s} 和 E_{33s} 分别为平行层理方向和垂直层理方向测试得到的静态杨氏模量; E_{45s} 为沿 45° 方向测试得到的静态杨氏模量; μ_{13s} 和 μ_{31s} 分别为平行层理方向和垂直层理方向测试得到的静态泊松比; P_{eff} 为实验围压大小, MPa; R 为皮尔逊相关系数。

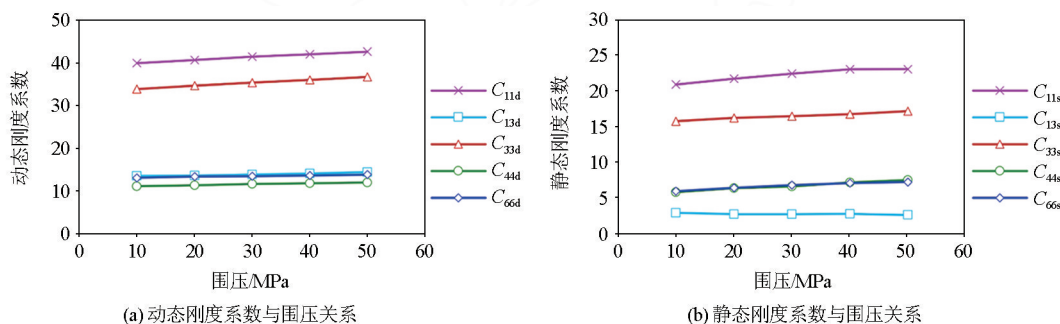


图 7 刚度系数与围压关系

Fig.7 Relation between stiffness coefficient and confining pressure

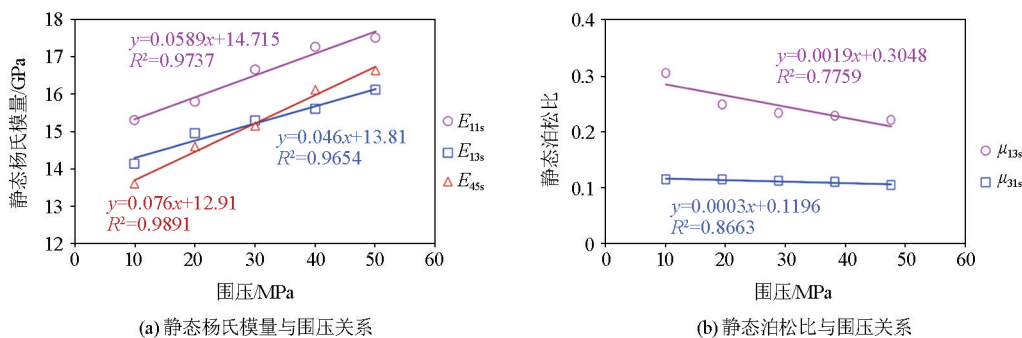


图 8 静态弹性参数与围压关系

Fig.8 Relationship between static elastic parameters and confining pressure

不同层理方向动态杨氏模量、动态泊松比同样与围压之间有一定相关性。如图 9 所示, 动态杨氏模量随围压的增大而增大, 且动态杨氏模量与围压

之间具有较高的线性关系; 动态泊松比在整个实验压力范围内变化都不大, 动态泊松比与围压之间的关系并不明显。

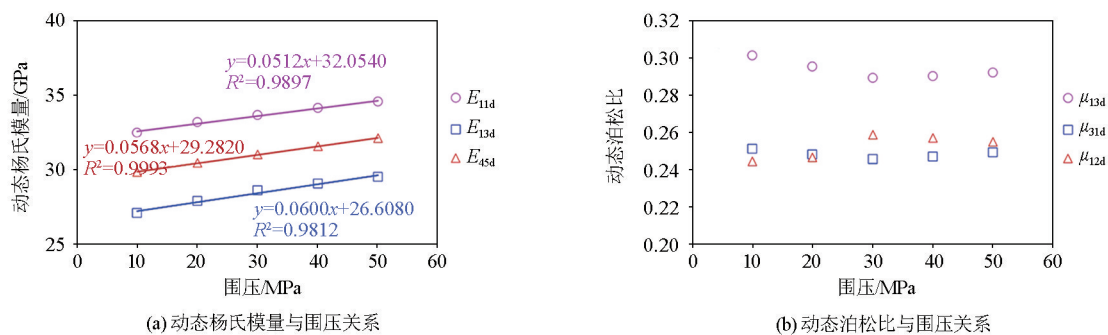


图9 动态弹性参数与围压关系

Fig.9 Relationship between dynamic elastic parameters and confining pressure

岩石动、静态杨氏模量均随着围压的增大而增大,在相同围压条件下,岩石动态弹性模量大于静态弹性模量;在低压阶段,杨氏模量的增幅较大。当围压增大时,动态泊松比 μ_{12d} 增加显著,静态泊松比 μ_{12s} 表现出相反的特征;除 μ_{12s} 、 μ_{12d} 外,泊松比与围压的相关性并不明显。

动、静态杨氏模量随着压力的变化具有很好的相关性,且动态杨氏模量大于静态杨氏模量。机理分析:动态测试时,测试纵波速度和横波速度选用的中心频率分别为 0.5 MHz 和 0.45 MHz,常温常压下测试纵、横波速度约为 4 000 m/s、2 900 m/s,因此产生的纵波和横波的波长分别约为 5 mm 和 7.25 mm。岩石典型颗粒尺寸为 100~200 μm ,为波长的 1/14~1/40,因此当纵波或横波在岩石中传播时会绕过部分微裂隙,而静态测试时,微裂隙的存在会减小颗粒之间摩擦系数,导致应变变大。因此,在相同条件下测试的动、静态弹性模

量会存在差异,动态弹性模量大于静态弹性模量。当围压增大时,微裂隙闭合,静态弹性模量测试时颗粒之间摩擦难度增大,岩石形变变小,动静态弹性差异变小。

5.3 压力与页岩动静态弹性各向异性的关系

页岩层理较为发育,垂直地层层理方向(以下简称垂直方向)与平行地层层理方向(以下简称水平方向)的弹性模量存在明显的各向异性(图 10)。无论是静态弹性参数还是动态弹性参数,垂直方向与水平方向的杨氏模量和泊松比存在一定差异,水平地层方向弹性模量较大。

岩石动、静态弹性参数均随围压的增大而增大。分别比较不同方向上岩石样品泊松比/杨氏模量之间的关系,研究发现:不同层理方向上泊松比/杨氏模量比值均具有较高的相关性,不同层理方向动态泊松比/杨氏模量比值较不同层理方向静态泊松比/杨氏模量相关性更高(图 11)。

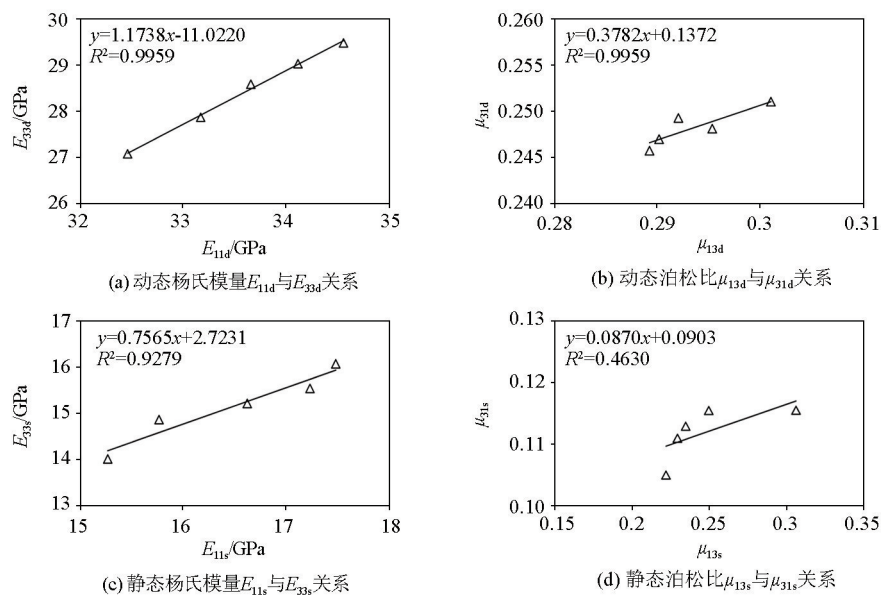


图10 不同方向动静态弹性参数关系

Fig.10 Dynamic and static elastic parameter relationships in different directions

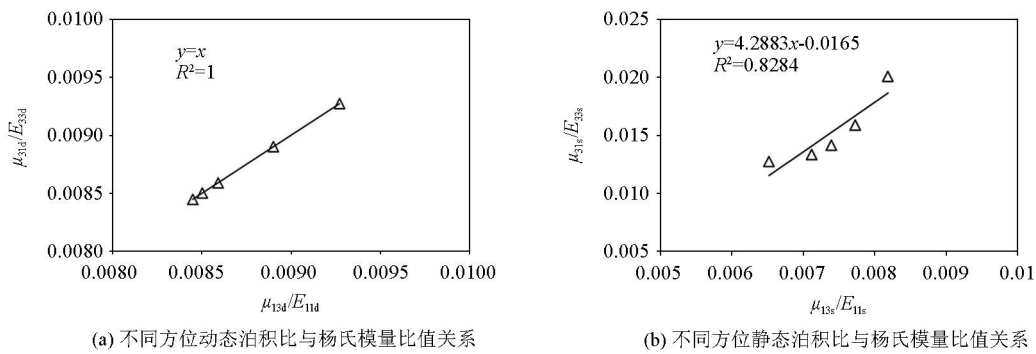


图 11 动、静态弹性参数关系

Fig.11 Relationship of dynamic and static elastic parameters

本文利用岩石力学测试数据 (E_{11s} 、 E_{33s} 、 μ_{31s} 、 μ_{13s} 、 μ_{12s}) 反演了岩石静态刚度系数。对于横向各向同性介质,页岩的各向异性程度较高,利用 Thomsen 公式计算各向异性参数 ε 、 γ 。由图 12 可见,各向异性系数 ε 、 γ 均随着围压的增大而减小,静态各向异性

系数 ε 减小幅度为 28.1%,动态各向异性系数 ε 减小幅度为 10.5%,静态各向异性系数 γ 减小幅度为 28.8%,动态各向异性系数 γ 减小幅度为 13.8%,静态弹性各向异性降低幅度大于动态弹性各向异性。

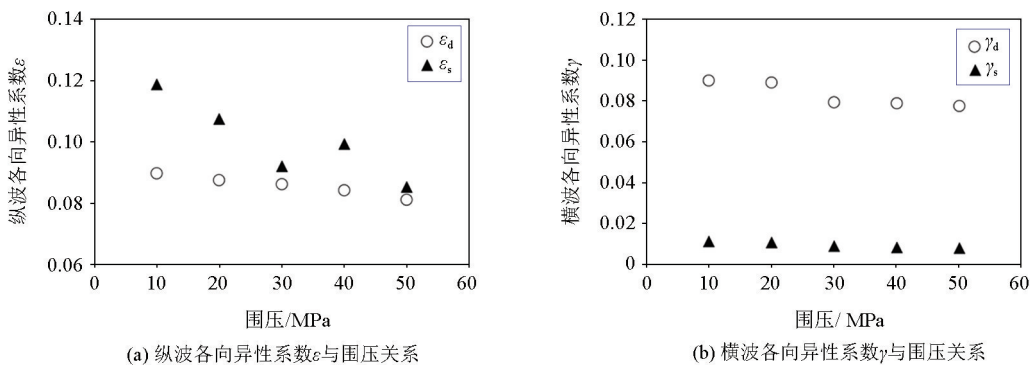


图 12 动、静态各向异性系数与围压关系

Fig.12 Relationship between dynamic and static anisotropy coefficient and confining pressure

页岩中的超声各向异性依赖于孔隙度、压实历史和颗粒成分,在各向同性应力状态下各向异性的改变归因于颗粒排列的改变和孔隙度的减少。页岩有粘土颗粒强烈的压实组织以及平行于压实组织的微裂纹,页岩中平行于层理的微裂纹多于垂直于层理的,压实过程的结果导致各种矿物质层状分布,其结果是由于物理和力学特征的差异导致平行于层理存在较为脆弱的平面,当岩石样品从地下取出时,现场应力的释放诱发沿着弱层理面的微裂纹,随着围压从 10 MPa 增加到 40 MPa,测量速度增加,显示这种不连续随着围压的增大而闭合,微裂纹对页岩的各向异性也有明显的贡献。

6 结论

对沧东凹陷孔二段页岩油样品进行了超声波测试及静力学参数同步测试,获得了不同压力条件下

岩石的动态各向异性参数及静态各向异性参数结果,得到了如下结论:

1) 不同层理角度页岩油动态杨氏模量与静态杨氏模量均随压力的增大而增大,且在压力较低时随压力增大快;随着压力的持续增加,杨氏模量增加减缓,趋于稳定值。

2) 不同层理角度页岩油的动、静态杨氏模量之间呈线性关系,且动态杨氏模量大于静态杨氏模量,动、静态泊松比之间相关性较差,一般页岩油动态泊松比大于静态泊松比。

3) 页岩油刚度系数与围压之间有较强的依赖性,弹性刚度系数在动态和静态测试条件下均表现出随围压增大而不断增大的趋势,与纵波相关的弹性参数 (C_{11} 、 C_{33}) 比与横波相关的弹性参数 (C_{44} 、 C_{66}) 随压力的变化更加明显。

4) 无论是静态弹性模量还是动态弹性模量,垂直方向与水平方向的杨氏模量和泊松比都存在一定

差异;一般水平地层方向弹性模量较大。不同层理上泊松比/杨氏模量比值均具有较高的相关性,声波测试得到的泊松比/杨氏模量比值相关性更高。

参考文献 (References):

- [1] Wang Y, Zhao L X, Han D H, et al. Anisotropic dynamic and static mechanical properties of organic-rich shale; The influence of stress [J]. *Geophysics*, 2021, 86(2): C51-C63.
- [2] Gong F, Di B R, Zeng L B, et al. Static and dynamic linear compressibility of dry artificial and natural shales under confining pressure [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 192: 107242.
- [3] Bustin A M M, Bustin R M. Importance of rock properties on the producibility of gas shales [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 132-147.
- [4] Sone H, Zoback M D. Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks; Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy [J]. *Geophysics*, 2013, 78(5): D381-D392.
- [5] Barree R D, Cox S A, Miskimins J L, et al. Economic optimization of horizontal-well completions in unconventional reservoirs [J]. *SPE Production & Operations*, 2015, 30(4): 293-311.
- [6] Jin Y, Chen K P, Chen M. Analytical solution and mechanisms of fluid production from hydraulically fractured wells with finite fracture conductivity [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2015, 92(1): 103-122.
- [7] Zhang F S, Damjanac B, Maxwell S. Investigating hydraulic fracturing complexity in naturally fractured rock masses using fully coupled multiscale numerical modeling [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(12): 5137-5160.
- [8] Holt R M, Fjær E, Stenebråten J F, et al. Brittleness of shales: Relevance to borehole collapse and hydraulic fracturing [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 131: 200-209.
- [9] Vahid S, Ahmad G. Hydraulic fracture initiation from a wellbore in transversely isotropic rock [C]//45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, OnePetro, 2011.
- [10] Bian H Y, Wang F, Zhang C G, et al. A new model between dynamic and static elastic parameters of shale based on experimental studies [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(19): 609.
- [11] Canady W. A method for full-range Young's modulus correction [C]// SPE. The Woodlands, Texas, USA, 2011.
- [12] Dong Y, Lu N, McCartney J S. Scaling shear modulus from small to finite strain for unsaturated soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(2): 04017110.
- [13] Hornby B E, Schwartz L M, Hudson J A. Anisotropic effective-medium modeling of the elastic properties of shales [J]. *Geophysics*, 1994, 59(10): 1570-1583.
- [14] Kaarsberg E A. Introductory studies of natural and artificial argillaceous aggregates by sound-propagation and X-ray diffraction methods [J]. *The Journal of Geology*, 1959, 67(4): 447-472.
- [15] Zhao L X, Qin X, Zhang J Q, et al. An effective reservoir parameter for seismic characterization of organic shale reservoir [J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, 39(3): 509-541.
- [16] Johnston D H. Physical properties of shale at temperature and pressure [J]. *Geophysics*, 1987, 52(10): 1391-1401.
- [17] Miller D, Plumb R, Boitnott G. Compressive strength and elastic properties of a transversely isotropic calcareous mudstone [J]. *Geophysical Prospecting*, 2013, 61(2): 315-328.
- [18] Liu Q, Liang B, Sun W J, et al. Experimental study on the difference of shale mechanical properties [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, (1): 1-14.
- [19] Li C B, Zou B B, Zhou H W, et al. Experimental investigation on failure behaviors and mechanism of an anisotropic shale in direct tension [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(4): 98.
- [20] Davarpanah S M, Ván P, Vászúrhelyi B. Investigation of the relationship between dynamic and static deformation moduli of rocks [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6(1): 29.
- [21] 边会媛, 王飞, 张永浩, 等. 储层条件下致密砂岩动静态弹性力学参数实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 3045-3054.
- Bian H Y, Wang F, Zhang Y H, et al. Experimental study of dynamic and static elastic parameters of tight sandstones under reservoir conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3045-3054.
- [22] 王飞, 边会媛, 张永浩, 等. 不同温压下页岩动态与静态弹性模量转换研究 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 1048-1055.
- Wang F, Bian H Y, Zhang Y H, et al. Experimental study on dynamic and static elastic modulus conversion for shale under different temperatures and pressures [J]. *Oil & Geology*, 2018, 39(5): 1048-1055.
- [23] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩滞留烃形成条件与富集模式——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 856-869.
- Zhao X Z, Zhou L H, Pu X G, et al. Formation conditions and enrichment model of retained petroleum in lacustrine shale: A case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2020, 47(5): 856-869.
- [24] 马霄一, 李呈呈, 白俊, 等. 基于超声测试的页岩岩石物理特征分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(4): 801-808, 673.
- Ma X Y, Li C C, Bai J, et al. Analysis of physical characteristics of shale rock based on ultrasonic testing [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(4): 801-808, 673.

Impacts of anisotropy on the dynamic and static elastic characteristics of shales under stress effects

BIAN Hui-Yuan¹, ZANG Xin¹, ZHANG Di^{2,3}, ZHANG Cheng-En⁴, NIE Xiao-Min⁴, WU Yin-Ting⁵

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang 736202, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Saline-Lacustrine Basinal Oil & Gas Geology, Dunhuang 736202, China; 4. Qinghai Branch of China Petroleum Logging Co., Ltd., Dunhuang 736202, China; 5. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Shaanxi, Xi'an 710064, China)

Abstract: The static elastic parameters are crucial for shale oil and gas production and fracturing through water injection. Under stress effects, anisotropy exerts significant impacts on the dynamic and static elastic characteristics of shales. Investigating the dominant factors and mechanisms controlling reservoirs' dynamic and static elastic characteristics is a burning key scientific problem in shale oil and gas production and fracturing through water injection. Based on triaxial compression tests combining mechanics and acoustics for shales under different pressurization methods, this study delved into the impacts of anisotropy on the compressional/shear wave (P-and S-wave) velocities and macromechanical properties of shales, and the response patterns of dynamic and static elastic characteristics of shales. The results are as follows: (1) With an increase in the pressure, the dynamic and static Young's moduli of shales increase at a gradually decelerating rate, finally tending to be stable; (2) At certain bedding angles, the dynamic and static Young's moduli are positively correlated, with the former higher than the latter, whereas the dynamic and static Poisson's ratios manifest a subtle correlation; (3) The dynamic and static stiffness coefficients of shales increase with the confining pressure. The P-wave-related dynamic stiffness coefficients C_{11} and C_{33} display more significant changes than the S-wave-related dynamic stiffness coefficients C_{44} and C_{66} ; (4) The dynamic and static anisotropies of shales also increase with the confining pressure. The results of this study reveal the response mechanisms of the dynamic and static elastic characteristics of shales while providing crucial mechanical parameters for the exploitation and hydraulic fracturing of shale oil and gas reservoirs, thus demonstrating significant scientific research value.

Key words: shale; anisotropy; elastic property; static modulus; formation pressure

(本文编辑:沈效群)

