

页岩弹性参数测量方法及影响因素综述

杨晓斌¹,陈君青^{1,2},张 潇^{1,2},王玉莹¹,火勋港¹,姜福杰^{3,4},庞 宏^{3,4},施砍园³,冉 钧¹

[1. 中国石油大学(北京)理学院 能源交叉学科基础研究中心,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)理学院 油气光学探测技术重点实验室,北京 102249;3. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249;4. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249]

摘要:页岩油气作为非常规油气资源的一种重要类型,蕴藏着巨大的勘探潜力。可压性对页岩油气勘探开发具有至关重要的影响,弹性参数是衡量页岩可压性的核心参数。综述了国内外页岩弹性参数研究取得的进展,分析了面临的诸多问题和挑战。研究表明:①弹性参数的测量方法多样,有压缩法、超声波测量法、纳米压痕法和声波测井法等实验测量法,及数字岩心计算法、等效介质理论法和分子动力学模拟法等理论计算法。每种方法都有各自的优缺点和使用条件,需要根据实际情况来优选。②实验测量法精度较高,但受采样率和实验条件的影响。声波测井法求取的弹性参数是连续动态的,可以反映瞬时加载下的力学性质,但与真实地层长时间静载荷有一定的差别。物理模型理论计算法虽然模型具有明确的物理意义,但需要输入参数较多,方程复杂,实用性较差,且对非主要因素有过多的忽略或假定。分子动力学模拟虽然能够简单、方便地模拟多种矿物组成复合材料的弹性参数,但与实际的地质模型仍有差别,由于实际地下环境复杂多变、难以模拟,模拟结果与实际值有一定的区别。③页岩弹性参数主要受到矿物组分、天然裂缝、围压、孔隙结构、成岩作用和温度等因素的影响,但有机质特征、赋存流体性质、试样尺寸、层理和地应力差异等也都会产生不同程度的影响。未来研究需要在定量关系、多尺度和复杂地质环境方面开发先进技术。

关键词:声波测井法;物理模型理论计算法;分子动力学模拟法;测量方法;弹性参数;页岩储层

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Measurement methods and influencing factors of elastic parameters of shales

YANG Xiaobin¹, CHEN Junqing^{1,2}, ZHANG Xiao^{1,2}, WANG Yuying¹, HUO Xungang¹, JIANG Fujie^{3,4}, PANG Hong^{3,4},
SHI Kanyuan³, RAN Jun¹

[1. Research Center for Basic Energy Interdisciplinarity, College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Shale oil and gas hold considerable exploration potential as significant unconventional hydrocarbon resources. The fracability of shales plays a vital role in the exploration and exploitation of shale oil and gas reservoirs and is typically measured using elastic parameters. In this study, we comprehensively investigate domestic and international advances in research on the elastic parameters of shales, along with associated issues and challenges. The results indicate numerous measurement methods for the elastic parameters of shales, including experimental methods (e. g., compression, ultrasonic measurement, nanoindentation, and acoustic logging) and theoretical calculation methods (e. g., digital core calculation, equivalent medium theory, and molecular dynamics simulation). Given the advantages, limitations, and application conditions of these methods, it is necessary to select scientific, accurate ones based on specific situations. Despite their relatively high accuracy, laboratory experimental methods are affected by sampling rates and experimental conditions. For instance, acoustic logging provides continuous, dynamic elastic parameters, capable of reflecting the mechanical properties of shales under instantaneous loading. However, these properties somewhat differ from those

收稿日期:2024-12-24;修回日期:2025-03-06。

第一作者简介:杨晓斌(1998—),男,博士,页岩储层可压裂性。E-mail: yxb1998314@163.com。

通信作者简介:陈君青(1987—),女,博士、副教授,油气藏形成机理与分布规律。E-mail: cjq7745@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42102145)。

under long-term static loading in actual strata. Regarding theoretical calculation methods based on physical models, albeit with well-defined physical implications, these models require many input parameters and complex equations, which lead to reduced practicality. Additionally, these models typically neglect or make assumptions on non-primary factors excessively. For example, molecular dynamics simulation can simulate the elastic parameters of composite materials composed of multiple minerals while remaining simple and convenient to use. However, it still differs from actual geological models with complex and highly variable subsurface conditions, leading to discrepancies between simulation results and actual values. The elastic parameters of shales are primarily affected by factors including mineral composition, natural fractures, confining pressure, pore structure, diagenesis, and temperature. Additionally, they are influenced by organic matter characteristics, the properties and temperature of fluids within shales, sample size, bedding, and in-situ stress difference. Future studies should focus on the R&D of advanced technologies in terms of the quantitative relationships, multi-scale characteristics, and complex geologic environments of shales.

Key words: sonic logging method, physical model theoretical calculation method, molecular dynamics simulation method, measurement method, elastic parameters, shale reservoir

引用格式: 杨晓斌, 陈君青, 张潇, 等. 页岩弹性参数测量方法及影响因素综述[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 630–653. DOI: 10. 11743/ogg20250220.

YANG Xiaobin, CHEN Junqing, ZHANG Xiao, et al. Measurement methods and influencing factors of elastic parameters of shales[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 630–653. DOI: 10. 11743/ogg20250220.

中国油气对外依存度不断攀升持续增大使得当今中国能源安全面临重大挑战,页岩油作为非常规油气资源的一种重要类型,蕴藏着巨大的勘探潜力^[1-5]。国家能源局预测中国页岩油资源量超过 200×10^8 t,加快页岩油气资源勘探有利于保障中国能源安全。可压性是页岩勘探开发4大关键评价内容之一(储集性、含油性、流动性和可压性)^[6]。弹性参数对页岩储层岩石的可压性具有重要的影响^[7]。岩石的弹性参数包括弹性模量(杨氏模量、体积模量和剪切模量)和泊松比等^[8]。弹性模量是描述材料抵抗弹性变形能力的物理量,它定义为在单向应力状态下,应力与该方向应变的比值,在弹性变形阶段,材料的应力和应变成正比例关系,这个比例系数就是弹性模量,数值越大,表示材料越刚硬,越难变形^[9]。弹性模量有多种形式,包括杨氏模量,用于描述材料在拉伸或压缩时的弹性行为;剪切模量,用于描述材料在剪切应力下的弹性行为;体积模量,用于描述材料在体积变化时的弹性行为^[9]。杨氏模量是描述固体材料抵抗拉伸或压缩弹性变形能力的物理量,在很多情况下,当我们提及弹性模量时,如果是在拉伸或压缩的情境下,就是指杨氏模量^[10]。体积模量是用来衡量材料对均匀压强引起的体积变化的抵抗能力^[11]。剪切模量是衡量材料抵抗剪切变形能力的物理量^[12]。总体而言,杨氏模量、体积模量和剪切模量都是弹性模量在不同变形模式(拉伸/压缩、体积变化、剪切)下的具体体现,这些参数从不同角度描述了材料的弹性性质。泊松比是材料在单向受拉或受压

时,横向应变与轴向应变绝对值的比值,它是一个无量纲的物理量,表征了材料的横向变形特性,反映岩石抵抗破裂的能力^[13]。前人研究认为,泥页岩具有高杨氏模量(> 20 GPa)、低泊松比时具有较好的可压裂性^[14]。因此,页岩弹性参数的研究是至关重要的。目前国内外专家通过多种方法来测量岩石的弹性参数。杨秀娟等^[15]利用声波测井信息得到地层纵波和横波速度,结合密度测井资料,得到了岩石弹性力学参数的计算公式,并通过实例进行分析,结果表明利用声波测井资料可以方便、快速确定动态力学参数。赵立新等^[16]建立了双重孔隙各向异性岩石物理模型,应用该模型估算岩石在含水饱和、含油饱和条件下的纵波和横波时差曲线,然后计算相应的纵波和横波速度比以及泊松比等弹性参数。并对比实测的弹性参数与模型估算的弹性参数,结果表明模型估算值与实测值相一致。Gong等^[17]使用石英、高岭石、方解石和干酪根提取物作为主要材料,构建了2组合成页岩样品,每个样品具有不同的黏土矿物含量和不同的压实应力。通过超声实验研究了合成页岩干燥和饱和状态下样品的速度和力学性能的各向异性。结果表明:动态杨氏模量随黏土矿物含量的增加而减小,随压实应力的增加而增大;泊松比随黏土矿物含量的增加而增大,随压实应力的增大而减小。Sone H等^[18]利用伺服控制的三轴装置,在静水压力和三轴压力条件下,通过室内实验研究了4个不同地区页岩储层的静态和动态弹性特征,结果表明,岩石的弹性特性在不同的储层之间(以及同一个储层

内)差异很大,静态弹性参数和动态弹性参数随着黏土矿物和干酪根含量的增加而减小。黎丁源^[19]对页岩岩心进行弹性参数测试,得到含不同矿物组分样品的弹性参数,结果表明:含高岭土组的人工页岩动态弹性参数杨氏模量最低,含伊利石组与蒙脱石组的杨氏模量基本一致。刘子等^[20]利用纳米压痕实验,研究了页岩的力学性质,讨论了力学性质与页岩纹层的关系。结果表明,页岩纹层对压痕深度变化影响较小。页岩弹性模量和硬度平均值的计算结果分别为47.025 GPa和1.373 GPa。

上述内容清晰地揭示出,页岩弹性参数的测量方法呈现出多样化的特点,且其影响因素极为复杂。目前,对于具体情况下应采用何种方法进行测量尚未形成统一的标准。鉴于此,深入了解各种弹性参数测量方法的特点,并在不同的条件下准确选取最为适宜的测量方法显得至关重要。本文将对各种用于测量弹性参数的方法进行详细介绍,包括压缩法、超声波测量法、纳米压痕法、声波测井法、数字岩心计算法、物理模型计算法以及分子动力学模拟法等。同时,详细阐述这些方法各自的优、缺点并明确其适用条件。此外,本文还将系统地总结页岩弹性参数的主要影响因素,旨在为页岩弹性参数的准确测量与深入研究提供有益的参考与指导。

1 实验测量法

1.1 压缩法

压缩法目前在地质学研究中应用较广的主要测量方式为单轴及三轴应力实验,这种测量方式主要应用应力实验装置完成测量。应力实验装置经过不断发展目前存在多种样式,但总体而言都包含力学加载系统和控制与数据采集系统两部分,部分装置组成部分包含有声学测量系统^[21-22]。力学加载系统主要包括轴向加载单元和围压加载组件,轴向加载单元能输出稳定、可控的轴向压力,出力范围广,精准度高。其搭配高刚性加载框架,保障施压过程平稳、无晃动,精准复现岩石在地层中承受的上覆岩层压力,实时调节加载速率和波形,契合不同实验工况需求。围压加载组件主要模拟岩石侧向受力,由液压泵、增压器及围压室协同构成。液压泵提供基础液压源,增压器按需放大压力,精准施加0~100 MPa甚至更高围压;围压室采用高强度合金钢打造,密封性卓越,确保液体介质在高压下无泄漏,全方位包裹岩石试件,真实还原岩石在地层三向受力状态。控制与数据采集系统主要包括工控机与控制软件及数据采

集与存储系统。工控机与控制软件以工控机为核心,搭载专业控制软件,实现人机交互。操作人员远程设定加载参数和流体注入方案;软件界面实时可视化展示应力、位移和压力等关键数据曲线,依预设阈值智能预警,保障实验安全、高效推进。数据采集与存储系统集成高速数据采集卡,同步采集多源测量数据,确保捕捉瞬间力学信号,搭配大容量固态硬盘存储数据,方便后续实验回溯与数据分析。通过力学加载系统在计算机上设置实验所需的围压和温度等相关参数,并将信号发送至控制系统从而设置实验仪器的围压和温度等参数;应用数据采集系统实时监测实验样品的应力-应变情况,获取实验岩心应力-应变曲线及力学参数(图1)。基于应力-应变曲线反映破裂极限前的线性变化关系得到岩石的杨氏模量和泊松比。计算公式如下所示:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_1} \quad (1)$$

式中: E 为杨氏模量,GPa; $\Delta\sigma$ 为轴向应力增量,MPa; $\Delta\varepsilon_1$ 为轴向应变增量,mm/mm。

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1} \quad (2)$$

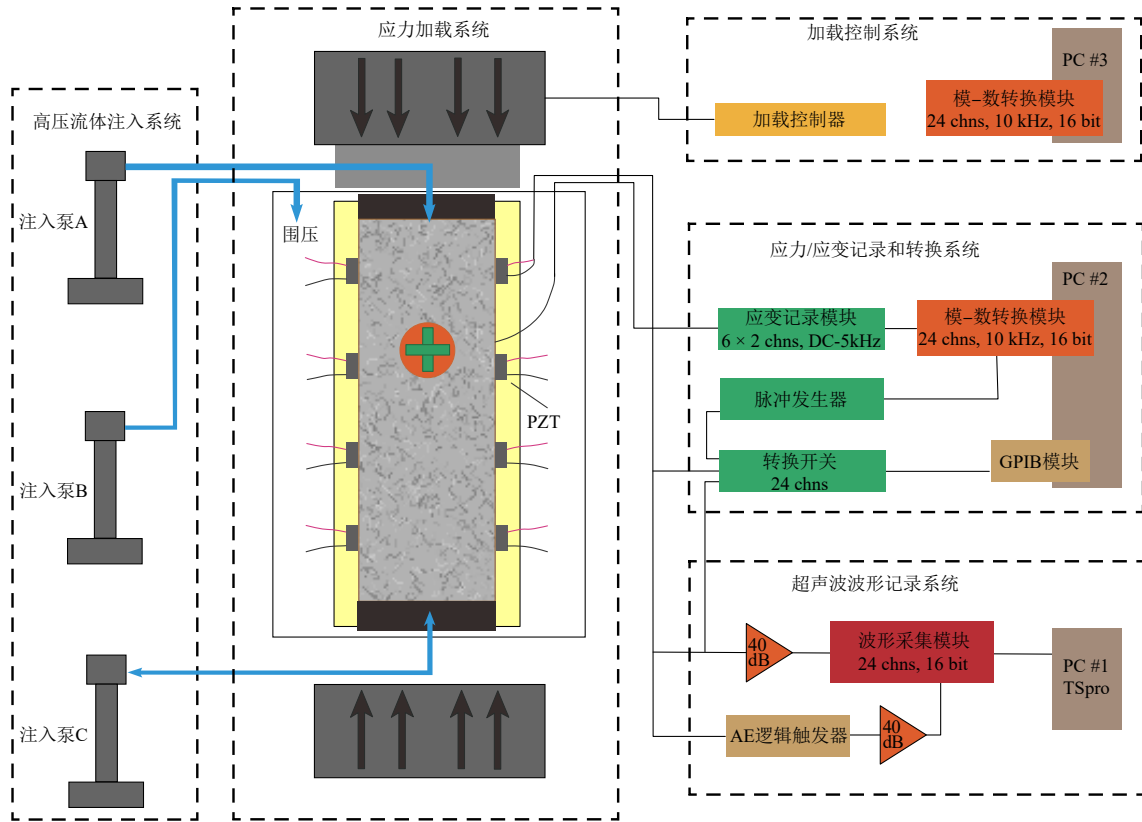
式中: ν 为泊松比,无量纲; $\Delta\varepsilon_1$ 为轴向应变增量,mm/mm; $\Delta\varepsilon_2$ 为径向应变增量,mm/mm。

总体而言,应用单轴或三轴应力实验测得或进一步计算所得的弹性参数准确性较高,但是由于单轴及三轴应力要求样品较大,岩心的获得比较困难,且参数测试费用昂贵,因此,利用单轴及三轴应力实验方法来求取杨氏模量具有明显的局限性^[23]。

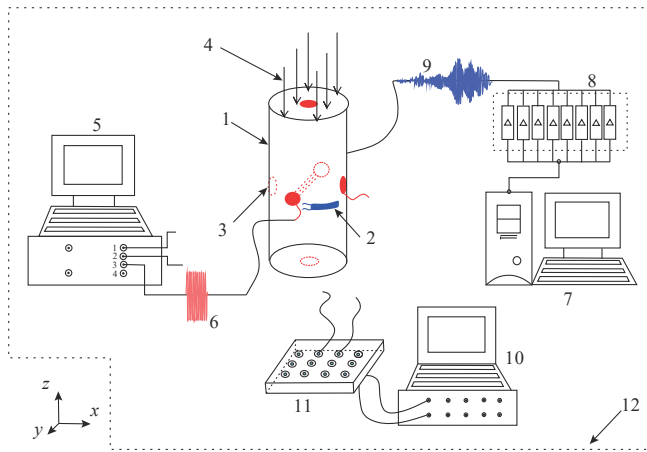
1.2 超声波测量法

超声波测试是在实验室条件下,利用超声波在页岩中的传播特性来测量页岩弹性参数的一种方法。该方法通过对页岩试样发射超声波信号,测量超声波在试样中的传播速度和衰减系数,从而计算出页岩的杨氏模量、泊松比、体积模量和剪切模量。超声波主要有两种传播方式,分别为压缩波和剪切波^[24]。超声波在物质中的传播速度与物质的弹性参数之间存在一定的关系,因此可通过获取超声波传播速度求取物质的杨氏模量及泊松比,但对于不同类型物质计算公式有所区别^[24-25]。该方法目前已经应用于地质研究中,并研发了超声波测定装置。

超声波测定装置主要由信号发生器、发射接收探头和动态分析测试系统3部分组成(图2)^[26]。信号发生器能够精准输出特定频率和波形的电信号。频率范围灵活可变,低至几千赫兹,高至数兆赫兹甚至几十兆

图1 三轴应力加载水力压裂实验装置结构示意图^[21]Fig. 1 Diagram illustrating the structure of experimental setup for triaxial stress loading used to simulate hydraulic fracturing^[21]

PZT. 基于压电陶瓷材料设计的传感器

图2 超声波传播速度测量实验系统原理^[26]Fig. 2 Diagram illustrating the principle of the experimental system for ultrasonic measurement^[26]

1. 样品; 2. 应变仪; 3. 超声波传感器; 4. 压强; 5. 超声波信号发射端;
6. 发射正弦信号; 7. 超声波信号接受终端; 8. 前置放大器; 9. 接收信号;
10. 动态信号测试分析系统; 11. 应变前置放大器; 12. 屏蔽室

赫兹,满足高精度、浅层细微缺陷检测需求。常见波形涵盖正弦波、方波和脉冲波等。同时可以进行信号强度与相位调节,可按需调节输出电信号强度,适配不同材质和厚度的材料探测。发射接收探头内置压电陶瓷

和压电晶体等先进换能元件,利用压电效应实现电信号与超声波信号高效转换。发射时,电信号驱动换能元件高频振动,精准生成超声波,定向发射至待测材料;接收时,材料内反射和折射回波冲击换能元件,使其逆向产生电信号,回传至后续系统分析。动态分析测试系统可进行信号放大与滤波处理,从探头接收的微弱电信号,先经前置放大器低噪声、高增益放大,凸显有效信号,为后续精细分析奠基;再借助滤波电路,依设定频率范围精准剔除噪声和干扰杂波(工频干扰、环境电磁噪声等),净化信号,确保数据纯净度。同时,配备高速数据采集卡,瞬间捕捉放大和滤波后的信号,完整保留信号细节。信号发生器依材料特性适配电信号,发射接收探头精准收发超声波,动态分析测试系统深度处理和剖析回波数据。在进行测量时需要与三轴实验系统联合使用来模拟地下地层环境,测量结果为岩样的纵波和横波时差^[27]。在实验结果基础上可进一步计算声波在传播过程中的纵波和横波速度进而计算出岩石的动态弹性参数。其中杨氏模量(E , GPa)和泊松比(μ , 无量纲)的计算公式如下所示^[28-29]:

$$V_p = \frac{L}{\Delta t_p} \quad (3)$$

$$V_s = \frac{L}{\Delta t_s} \quad (4)$$

$$E = \frac{\rho V_s^2 [3 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 4]}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{2 \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]} \quad (6)$$

式中: V_p 为纵波波速, m/s; V_s 为横波波速, m/s; Δt_p 为纵波在岩样中传播时间, s; Δt_s 为横波在岩样中传播时间, s; L 为波传播方向样品的长度, m; ρ 为岩心密度, g/cm³。

这种测量弹性参数的方法操作简单, 具有适用范围广和无损等优点, 已逐渐成为公认的主要测量技术, 但此方法仍存在部分不足, 页岩通常具有孔隙及裂缝, 超声波在页岩中的传播会受到孔隙及裂缝的影响, 使得测量的数据较为复杂。增加了数据解释的难度和不确定性。而且在制作样品过程中极易产生人工裂缝。

1.3 纳米压痕法

纳米压痕技术作为测量和表征材料的微观力学性能的技术手段, 可以在纳米尺度上测量各种材料的力学性质, 如载荷位移曲线、弹性模量、硬度和断裂韧性^[30]。首先进行矿物相分析, 再进行压痕实验^[20,31-32]。纳米压痕技术通过使用非常小的压头(通常为三棱锥或球形)在材料表面施加一个极小的载荷(通常在 μN 至 mN 量级), 使压头压入材料表面形成压痕。在加载过程中, 压头逐渐深入材料, 材料会发生弹性变形和塑性变形^[20]。压头卸载时, 弹性变形会恢复, 而塑性变形会形成压痕裂缝(图3)。这个过程中测量并记录载荷与压痕深度之间的关系, 得到载荷-位移曲线, 随后利用公式通过载荷-位移曲线计算岩石的弹性模量和硬度(图4)。

硬度计算公式为^[35-36]:

$$H = \frac{F_{\max}}{A_c} \quad (7)$$

式中: H 为压痕点的硬度, GPa; $F_{\max}$ 为最大荷载, mN; A_c 为投影接触面积, μm^2 。对于特定几何形状的压头而言, 投影接触面积是接触深度的函数。若在纳米压痕试验中采用的是 Berkovich 压头, 则投影接触面积为

$$A_c = 24.5 h_c^2 \quad (8)$$

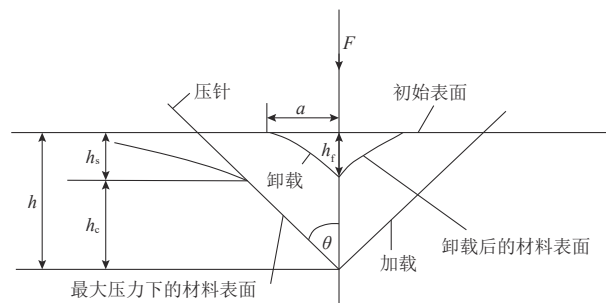


图3 纳米压痕实验原理^[33]

Fig. 3 Diagram illustrating the principle of the nanoindentation experiment^[33]

F : 载荷; h : 压头压入深度; h_c : 压头卸载之后弹性变形恢复深度; h_s, h_r : 塑性变形深度; a : 塑性变形半径长度; θ : 压头半角角度

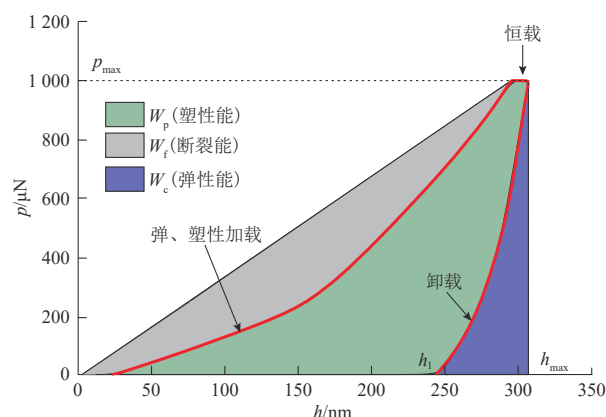


图4 纳米压痕试验载荷(p)-位移(h)曲线^[34]

Fig. 4 Load (p) vs. displacement (h) curves of the nanoindentation experiment^[34]

接触深度与最大压入深度有如下关系:

$$h_{\max} - h_c = \varepsilon \frac{F_{\max}}{s} \quad (9)$$

式中: $h_{\max}$ 为最大压入深度, nm; h_c 为接触深度, nm; ε 为与钻头材质相关的系数, 无量纲; s 为卸载刚度, mN/nm, 可由实际测量曲线利用幂函数进行拟合得到。

折算弹性模量能够反映压头和试样的复合弹性变形情况, 并且可以用来计算泥岩的真实弹性模量, 其计算公式为:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta \sqrt{A_c}} s \quad (10)$$

式中: E_r 为折算弹性模量, GPa; β 为与压头形状相关的几何因子, 无量纲。

所以, 压痕点的弹性模量可以表示为^[36-37]:

$$E = \frac{(1 - \nu^2)}{\left[\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right]} \quad (11)$$

式中: E 为压痕点的弹性模量, GPa; E_i 为压头弹性模

量, GPa; ν_i 为压头泊松比, 无量纲; ν 为被测材料泊松比, 无量纲。

纳米压痕是一种非破坏性测试方法, 测试效率高, 能够探测到页岩微观结构中不同区域的力学性能差异。对于页岩这种具有复杂微观结构, 包含不同矿物相、孔隙和有机质等的材料, 纳米压痕可以获取微观尺度下的弹性参数信息。缺点是页岩样品需要进行精细的制备, 如切割和抛光等操作。这些操作过程可能会改变页岩表面的原始状态, 引入微裂纹或改变孔隙结构等, 从而影响弹性参数的测量结果。且纳米压痕测试通常只能作用于页岩表面很小的区域, 这使得测量结果可能无法完全代表整个页岩样本的弹性参数。

1.4 声波测井法

声波测井是利用声波在页岩中的传播特性来测量页岩弹性参数的一种方法。该方法通过在钻井过程中向井内发射声波信号, 测量声波在页岩中的传播速度和衰减系数, 从而计算出页岩的杨氏模量、泊松比、体积模量和剪切模量。岩石的弹性参数可通过测量所得的弹性波速度与体积密度来进行计算^[38]。由此计算出的弹性模量和泊松比被称作动态弹性模量与动态泊松比。依据阵列声波测井的波形分析所提供的纵波和横波时差, 并结合密度测井资料, 能够计算出地层中任一深度处的岩石力学参数。其计算公式具体如下^[39-40]:

$$E = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_c^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \quad (12)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_c^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \quad (13)$$

式中: E 为岩石的弹性模量, GPa; ρ 为岩心密度, g/cm^3 ; Δt_c 和 Δt_s 分别为纵波和横波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; ν 为岩石的泊松比, 无量纲。

测井资料中蕴含着大量的地层信息, 由于测井资料具有获取方便、纵向分辨率高和连续性强等优点, 在计算岩石弹性参数中得到了有效的应用。声波测井是在井下进行的原位测量, 直接反映岩石在地下原始应力状态和环境条件下的弹性参数。这与实验室中对岩石样品进行测试相比, 更接近岩石在实际地质环境中的真实力学行为, 对于准确评估地下岩石的力学性质和储层特性具有重要意义。但这种方法同样存在有一定的缺陷, 阵列声波测井目前在各地区虽有所应用但其总体数量较少, 在实际测量过程中, 声波信号可能会受到各种噪声和干扰的影响, 如电磁干扰和机械振动等。这些干扰会使声波信号的质量下降, 增加数据解

释的难度。且井眼的形状、尺寸和井壁的粗糙度以及井内流体的性质等因素都会对声波测井的测量结果产生影响。地下岩石所处的温度和压力环境与地面不同, 温、压条件的变化会影响岩石的物理性质和声波的传播特性, 但在声波测井计算弹性参数时, 往往难以准确地考虑温度和压力的影响。

2 理论计算法

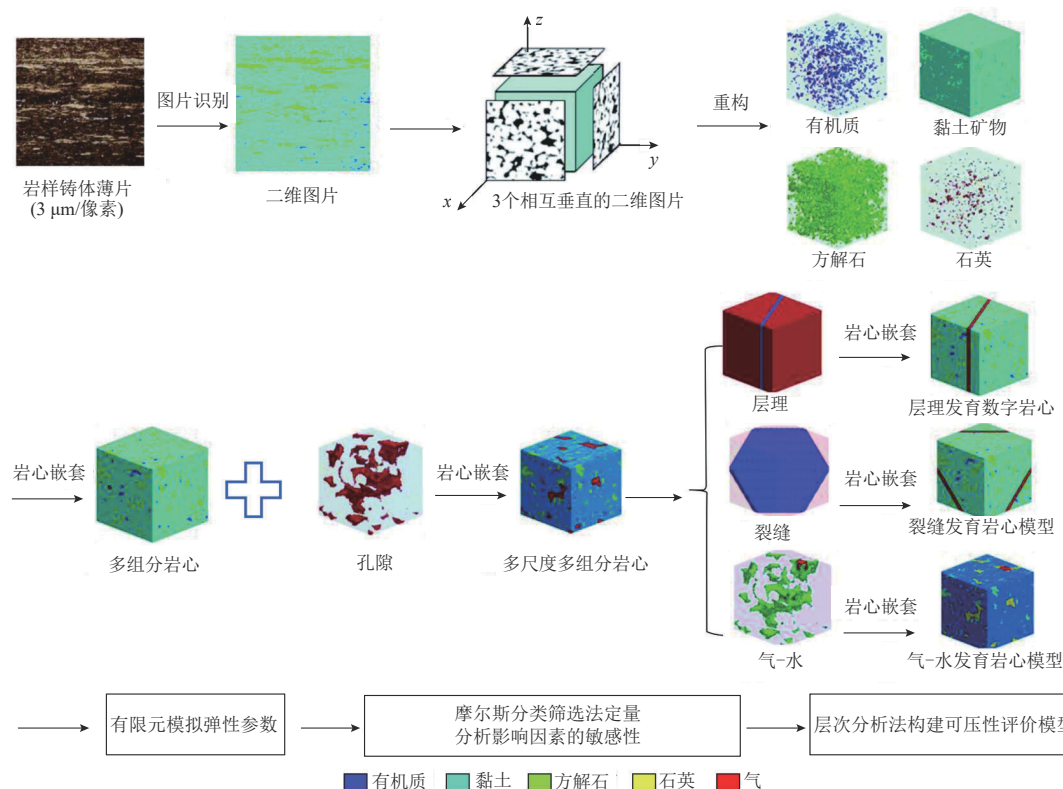
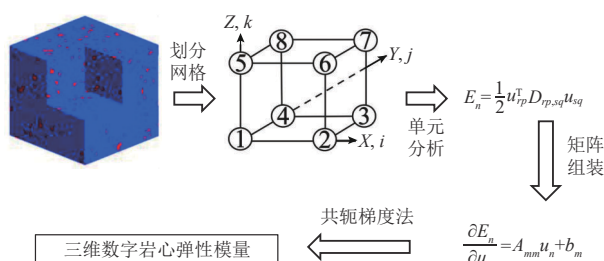
2.1 数字岩心法

岩石宏观的物理性质是微观结构骨架、孔隙以及各矿物组成成分的综合效应^[41-42]。岩石物理是连接储层弹性参数与物性参数的桥梁, 也是地球物理反演的基础^[43-44]。数字岩石物理技术随着计算机技术与成像技术的提高得到了迅速发展, 基于实验及测井数据得到岩石详细的微观结构, 构建出可以反映岩石真实孔隙空间的三维数字模型, 以实际地质资料为约束, 在计算机上运用数值计算方法研究孔隙结构、裂缝特征及其与岩石物理特性(如电阻率、弹性模量、速度与波场、渗透率和核磁共振)之间的关系^[45-47]。数字岩心的构建方法主要分为物理实验和数值重建。物理实验方法是运用实验仪器来获取储层岩石图像, 例如通过高精度仪器直接得到岩心不同截面的二维图像, 然后采用特定的数学方法对这些二维图像进行三维重建, 从而获得三维数字岩心。而数值重建法则能够根据需求, 借助岩心二维图像等少量资料, 利用图像处理技术获取建模信息(如孔隙度和粒度分布等), 之后运用重建算法构建出三维数字岩心^[48-50]。图5是利用数值重建法构建的三维数字岩心。

有限元方法是计算离散三维数据体物理参数的有效方法之一^[52-54]。页岩作为典型的非规则多孔介质, 其微观结构极为复杂。而利用有限元数值模拟方法来计算复杂物体的弹性参数, 是行之有效的方式之一^[52-56]。

有限元计算弹性参数的原理与步骤如下: 首先进行岩心离散化操作, 将岩心划分成众多小网格, 并对每个网格赋予相应的弹性参数值。随后, 分别在岩心的 X 、 Y 和 Z 方向上施加宏观应力, 依据应力-应变关系确定每个单元格的机械能。基于变分原理(即能量取极小值), 采用共轭梯度法进行求解, 以获取每个单元格上的位移分布, 进而确定岩心的总位移, 最终得到岩心的应变场。在获得应力场和应变场后, 即可计算岩心的弹性体积模量和剪切模量(图6)^[57-61]。

通过对数字岩心的分析, 可以精确量化岩石的孔

图5 重构的多尺度、多组分三维数字岩心^[51]Fig. 5 Reconstructed multi-scale, multi-component 3D digital cores^[51]图6 有限元法计算岩石弹性模量^[51]Fig. 6 Flow chart showing the calculation of rocks' elastic modulus using the finite element method^[51]

E_n : 单元的应变能, J; u_{rp}^T : 节点位移向量, m; $D_{rp,sq}$: 弹性本构矩阵, Pa; u_{sq} : 节点位移向量, m; μ_m : 材料参数, Pa; A_{mm} : 有限元方程组装后的刚度矩阵系数, N/m; μ_n : 节点位移, m; b_m : 载荷向量, N

孔隙度、孔隙形状和孔隙连通性等微观结构特征,并且将这些特征与弹性参数建立起直接的联系,从而更准确地理解和预测岩石的弹性行为。与传统的实验室物理实验方法相比,数字岩心法获取数据的速度更快。不需要进行复杂的样品制备、实验操作和长时间的等待,只需要对已有的图像数据进行处理和计算,就可以得到岩石的弹性参数。但数字岩心的构建是基于一定的算法和模型,这些算法和模型可能无法完全准确地反映岩石的真实结构。且在计算弹性参数时,需要使用

一些理论模型和假设,这些理论模型和假设可能与实际情况存在偏差。

2.2 等效介质理论法

等效介质理论是一种基于微观力学的理论计算方法,用于预测复合材料的弹性参数。复合材料的弹性参数可以通过其组成部分的弹性参数和体积分数等参数来计算。对于页岩这种复合材料,可以将其视为由矿物颗粒、孔隙和流体等组成的三相介质,分别计算各相的弹性参数和体积分数。该方法将页岩视为由矿物颗粒、孔隙和流体等组成的复合材料,通过建立等效介质模型,计算出页岩的弹性参数。

地震岩石物理模型是搭建岩石微观物性参数与弹性参数的桥梁^[62-64]。岩石物理建模是通过岩石的物理性质的研究,利用测井、岩心和地震等数据,分析目标区域的岩石成因,观察其地震弹性性质及物性之间的关系,建立最适合目标区域的模型的过程^[65]。岩石物理模型主要有等效介质模型理论与波传播理论2种理论类别^[66-70]。等效介质理论是利用岩石物理模型,把已知体积分数和弹性模量的岩石矿物组分、孔隙流体以及孔隙结构整合起来,再依据几何平均物理模型定量求出岩石的等效弹性模量。波传播理论则是对波在岩石等介质

中的传播规律进行分析研究,基于不同地质条件下岩石会产生不同地震响应这一观念,利用地震波的传播理论来计算多孔岩石的等效弹性模量^[71]。

岩石物理建模主要包括以下过程,首先计算岩石基质的体积模量和剪切模量,随后通过恰当的理论方法在岩石基质中引入孔隙,并计算出孔隙流体的弹性模量,最后将上述参数加以结合,从而得到饱和流体岩石的弹性参数^[72-73]。在考虑其他影响因素时可以对模型进行改进,例如压力等影响因素(图7)。

2.2.1 岩石基质弹性模量计算

岩石基质弹性参数的计算需基于边界模型理论。在计算前,需已知组成矿物的体积含量及其弹性参数^[69,73]。其中,Voigt和Reuss边界模型是最简单且广泛适用的模型^[74-75]。

Voigt边界模型中包含 N 种矿物岩石基质的等效弹性参数公式如下:

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (14)$$

式中: M_V 为岩石基质的等效弹性模量, GPa; f_i 为第 i 种矿物的体积分数,无量纲; M_i 为第 i 种矿物的弹性模量, GPa。

Reuss边界模型中包含 N 种矿物岩石基质的等效弹性模量的下限(M_R , GPa)为:

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (15)$$

Hill将Voigt和Reuss边界模型计算的平均值作为岩石基质等效弹性模量(M_{VRH} , GPa),表达式为:

$$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (16)$$

Hashin-Shtrikman模型是另一种广泛应用的边界

模型^[76],在假设只有2种组分的情况下,其弹性模量上下界表达式如下:

$$K^{HS\pm} = K_1 + \frac{f_2}{\frac{1}{K_2 - K_1} + \frac{f_1}{K_1 + \frac{4}{3}\mu_1}} \quad (17)$$

$$\mu^{HS\pm} = \mu_1 + \frac{f_2}{\frac{1}{\mu_2 - \mu_1} + \frac{2f_1(K_1 + 2\mu_1)}{5\mu_1(K_1 + \frac{4}{3}\mu_1)}} \quad (18)$$

式中: K_1 和 K_2 分别为2种组分的体积模量, GPa; μ_1 和 μ_2 分别为各自的剪切模量, GPa; f_1 和 f_2 为对应的体积分数,无量纲; $K^{HS\pm}$ 为等效体积模量, GPa; $\mu^{HS\pm}$ 为等效剪切模量, GPa。图8为上述边界模型计算的岩石等效模量。

2.2.2 岩石骨架弹性模量计算

岩石骨架是指向岩石基质中加入孔隙结构之后的模型^[77-78]。岩石骨架参数值是岩石物理模型中非常重要的参数,其参数的精度直接影响到模型的计算精度^[79]。常用来计算岩石骨架弹性模量的模型有Kuster-Toksoz(KT)模型、微分等效介质理论模型(DEM)和自相容近似理论(SC)模型。

岩石基质和孔隙流体代入模型求取岩石弹性模量的KT模型的数学表达式如下^[80-81]:

$$(K_{KT} - K_m) \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_{KT} + \frac{4}{3}\mu_m} = \sum_{i=HS} x_i (K_i - K_{KT}) P_m^i \quad (19)$$

$$(\mu_{KT} - \mu_m) \frac{\mu_m + \varphi_m}{\mu_{KT} + \varphi_m} = \sum_{i=HS} x_i (\mu_i - \mu_{KT}) Q_m^i \quad (20)$$

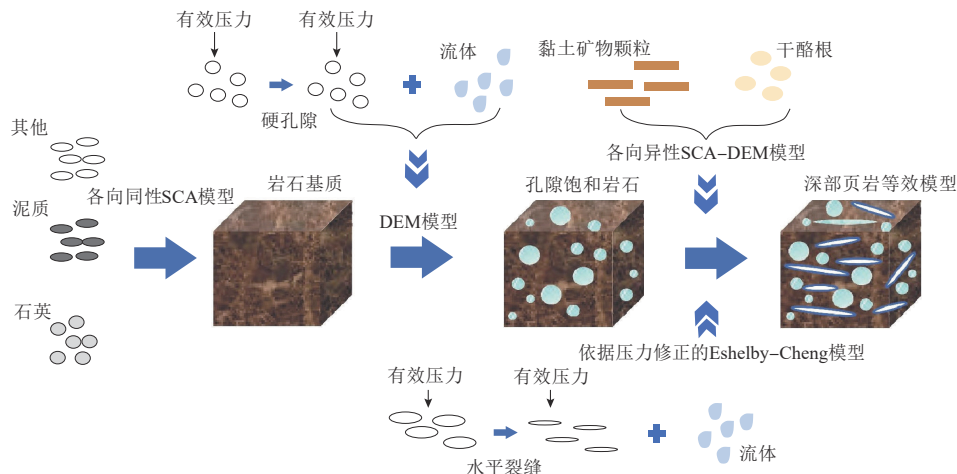


图7 考虑压力的深部页岩储层建模流程(根据文献[64]修改)

Fig. 7 Modeling process of deep shale reservoirs considering pressure (modified after reference [64])

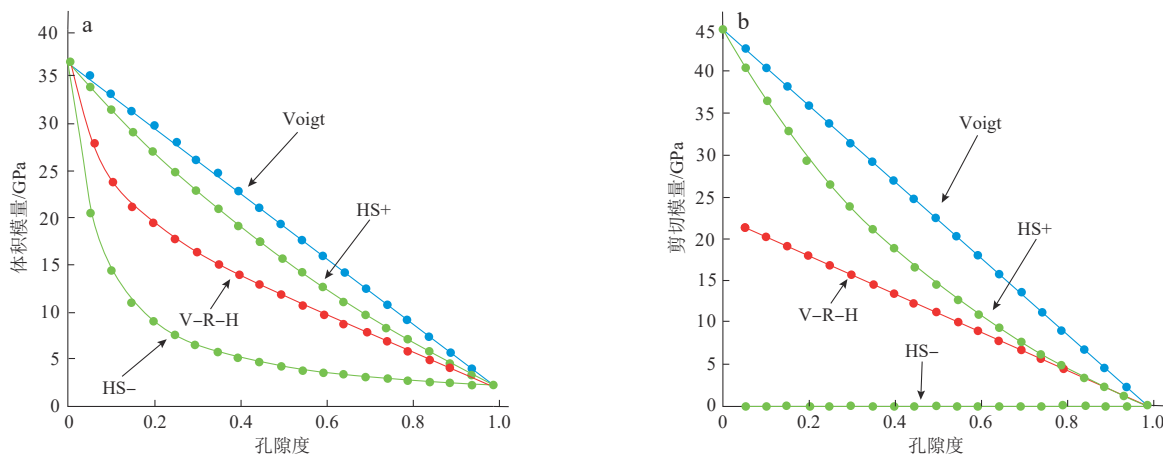


图8 用Voigt边界模型、Hill边界模型和Hashin-Shtrikman边界模型计算的岩石等效模量^[69]

Fig. 8 Equivalent moduli of rocks calculated using the Voigt, Hill, and Hashin-Shtrikman bounds^[69]

a. 体积模量; b. 剪切模量

(Voigt代表Voigt理论边界模型; HS+代表Hashin-Shtrikman模型上限; HS-代表Hashin-Shtrikman模型下限; V-R-H代表Hill边界模型。)

$$\varphi_m = \frac{\mu_m}{6} \frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m} \quad (21)$$

式中: K_{KT} 和 μ_{KT} 分别为加入孔隙之后的体积模量和剪切模量, GPa; K_m 和 μ_m 分别为岩石基质的体积模量和弹性模量, GPa; 无量纲; P^i 和 Q^i 分别为岩石基质中加入第 i 种孔隙充填物后对自身的影响因子, 无量纲; x_i 为岩石第 i 种孔隙充填物的体积分数, 无量纲; φ_m 为岩石弹性模量, GPa。S 和 H 分别表示软孔隙充填物和硬孔隙充填物。

KT模型一般用来计算干岩石弹性参数。利用KT模型计算弹性模量要求岩石基质中的孔隙不能密集且孔隙要随机加入基质中^[72]。

DEM是通常用于计算干岩石弹性模量的另一个模型, 其向岩石基质中逐渐添加孔隙相以及模拟双相的填充物, 直到其与真实岩石的孔隙情况相一致^[82-84]。其体积模量与剪切模量计算模型如下:

$$(1 - y) \frac{d}{dy} [K_{dry}(y)] = (K_i - K_{dry})P(y) \quad (22)$$

$$(1 - y) \frac{d}{dy} [\mu_{dry}(y)] = (\mu_i - \mu_{dry})Q(y) \quad (23)$$

式中: y 为孔隙度相的体积分数, 无量纲; dy 为每次加入基质相中的孔隙度的体积分数, 无量纲; K_{dry} 为DEM模型计算得到的干岩石体积模量, GPa; μ_{dry} 为计算得到的剪切模量, GPa; K_i 和 μ_i 分别为孔隙相的体积模量与剪切模量, GPa; P 和 Q 为孔隙形状的几何因子, 无量纲。

SC模型也叫自洽模型, 考虑了包含物的形状以及包含物之间的相互作用, SC模型平等对待各组成矿物, 直接将孔隙包含物和基质矿物成分带入SC模型求

取岩石的弹性模量^[85-86]。其表达式如下:

$$\sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_{sc}) P^i = 0 \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_{sc}) Q^i = 0 \quad (25)$$

式中: N 为组成岩石的组分的个数, 无量纲; x_i 为岩石中各组分的体积分数, 无量纲; K_i 为第 i 个组分的体积模量, GPa; μ_i 为第 i 个组分的剪切模量, GPa; K_{sc} 和 μ_{sc} 分别为岩石等效体积模量和剪切模量, GPa; P^i 和 Q^i 分别为与 K_i 和 μ_i 有关的包含物压缩、剪切几何因子, 无量纲。

图9为在计算出基质弹性模量的基础上分别使用KT模型、DEM和SC模型在相同变量条件下计算岩石等效体积模量和剪切模量的上限和下限。

2.2.3 饱和岩石弹性模量计算

首先要求出流体的弹性模量, Wood公式目前普遍用于孔隙流体体积模量计算, 孔隙流体纵波速度和模量、密度的关系由下式给出^[87]:

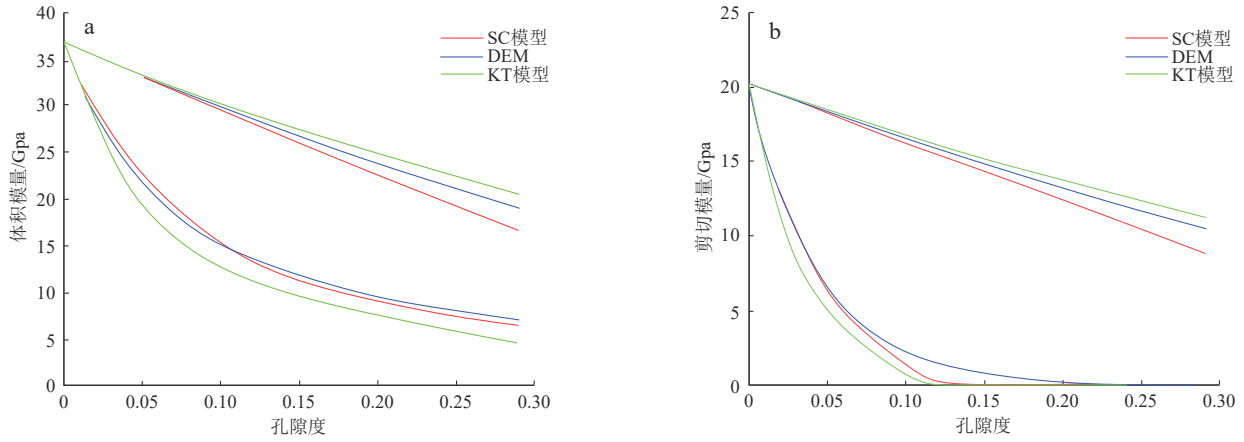
$$V = \sqrt{\frac{K_R}{\rho}} \quad (26)$$

$$\frac{1}{K_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i} \quad (27)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^N f_i \rho_i \quad (28)$$

式中: V 为流体纵波速度, m/s; K_R 为流体混合物的Reuss平均值, GPa; ρ 为平均密度, kg/m³; f_i 为第 i 种组成成分的体积分数, 无量纲; K_i 为第 i 种组成成分的体积模量, GPa; ρ_i 为第 i 种组成成分的密度, kg/m³。

在得到干岩石骨架弹性模量之后, 随后可以使用Gassmann方程对干岩石骨架进行流体替代得到饱和

图9 用3种理论模型计算岩石等效体积模量和剪切模量的上限和下限^[65]Fig. 9 Upper and lower limits of equivalent bulk modulus and shear modulus of rocks calculated using the KT, DEM, and SC models^[65]

a. 体积模量; b. 剪切模量

岩石弹性模量。Gassmann方程是广泛使用的流体替代模型,其将饱和和流体岩石的弹性模量与岩石基质、干岩石骨架以及孔隙流体弹性模量与孔隙度相联系。Gassmann方程表达式如下^[88]:

$$K_{\text{sat}} = K_{\text{dr}} + \frac{(1 - \frac{K_{\text{dr}}}{K_0})^2}{\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1 - \varphi}{K_0} + \frac{K_{\text{dr}}}{K_0^2}} \quad (29)$$

$$\mu_{\text{sat}} = \mu_{\text{dr}} \quad (30)$$

式中: K_{sat} 和 μ_{sat} 分别为饱和岩石的体积模量和剪切模量, GPa; K_{dr} 为干岩石骨架的体积模量, GPa; μ_{dr} 为干岩石骨架的剪切模量, GPa; K_0 和 K_f 分别为基质体积模量和流体体积模量, GPa; φ 为孔隙度, 无量纲。

基于等效介质理论计算基础完善,模型参考具有明确的物理意义,但输入参数较多,方程复杂,实用性较差,且对非主要因素有过多的忽略或假定。

2.3 分子动力学模拟法

分子动力学(molecular dynamics,简称MD)模拟是近年来飞速发展的一种分子模拟方法,能够在原子和分子尺度上研究体系的结构和动态行为。这使得它可以提供关于分子间相互作用、分子构象变化和化学反应等微观过程的详细信息^[89-90]。材料科学、生物医学和化学工程等领域有着广泛的应用,为科学研究和工程设计提供了重要的理论支持^[91-94]。

随着计算机技术的发展,人们开发了许多用于分子动力学模拟的计算软件,普遍使用的有LAMMPS, GROMACS, NAMD, CHARMM和Materials studio等^[95]。分子动力学模拟在矿物弹性模量的研究中有着广泛的应用。陈陶等^[96]利用分子动力学模拟研究了花岗岩

矿物的微观力学性质,结果表明,花岗岩的3种主要矿物中,石英的杨氏模量为161.70~168.78 GPa,黑云母的杨氏模量为164.85~579.93 GPa,钠长石的杨氏模量为110.72~112.49 GPa。杨宇等^[97]利用分子动力学模拟研究了不同水化量对蒙脱石拉伸力学性质的影响,结果表明,水化程度越大,抗拉性能越弱。

分子动力学模拟的计算软件众多,以Materials Studio(MS)为例,MS是专一款可运行在个人计算机上的模拟软件,多种先进算法的综合应用使MS成为一个强有力的模拟工具。

在建立好矿物的分子模型之后,利用MS中的Forcite模块中的Mechanical properties任务可以得到矿物模型的弹性刚度系数矩阵 C_{ij} 和柔度系数矩阵 S_{ij} ,两者均为对称矩阵且互为逆矩阵。蒙脱石各向同性宏观力学性质可以通过弹性常数计算而来。在弹性模量的计算中存在着Voigt和Reuss两种不同的计算理论^[74-75]。Voigt理论是假设多晶体的各部分都具有相同的应变,多晶体的体积模量和剪切模量可以通过单晶的弹性刚度系数计算而得到,公式如下:

$$B_v = \frac{(C_{11} + C_{22} + C_{33}) + 2(C_{12} + C_{13} + C_{23})}{9} \quad (31)$$

$$G_v = \frac{(C_{11} + C_{22} + C_{33}) - (C_{12} + C_{13} + C_{23}) + 3(C_{44} + C_{55} + C_{66})}{15} \quad (32)$$

式中: B_v 为Voigt理论计算的体积模量, GPa; G_v 为Voigt理论计算的剪切模量, GPa; C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{12} , C_{13} , C_{23} , C_{44} , C_{55} , C_{66} 为弹性常数, GPa。

Reuss理论是假设多晶体的各部分都具有相同的应力,多晶体的体积模量和剪切模量可以通过单晶的弹性刚度系数计算而得到,公式如下:

$$B_R = \frac{1}{(S_{11} + S_{22} + S_{33}) + 2(S_{12} + S_{13} + S_{23})} \quad (33)$$

$$G_R = \frac{15}{4(S_{11} + S_{22} + S_{33}) - 4(S_{12} + S_{13} + S_{23}) + 3(S_{44} + S_{55} + S_{66})} \quad (34)$$

式中: B_R 为 Reuss 理论计算的体积模量, GPa; G_R 为 Reuss 理论计算的剪切模量, GPa; $S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{12}, S_{13}, S_{23}, S_{44}, S_{55}, S_{66}$ 为弹性常数, GPa。

Hill 采用弹性极限原理证明 Voigt 理论和 Reuss 理论是边界值, 分别为宏观弹性模量的极大值和极小值, 并采用两者的平均值作为宏观体积模量和剪切模量的最终值^[76], 公式如下:

$$B = \frac{(B_V + B_R)}{2} \quad (35)$$

$$G = \frac{(G_V + G_R)}{2} \quad (36)$$

式中: B 为 Hill 理论计算的体积模量, GPa; G 为 Hill 理论计算的剪切模量, GPa。

进而得到多晶体杨氏模量和泊松比的计算公式:

$$E = \frac{9BG}{3B + G} \quad (37)$$

$$\nu = \frac{3B - 2G}{2(3B + G)} \quad (38)$$

式中: E 为杨氏模量, GPa; ν 为泊松比, 无量纲。

分子动力学模拟具有高度的灵活性和可定制性, 高效的计算和分析能力, 且可以避免实验误差和干扰。其动态的研究方法和丰富的分析手段使得分子动力学模拟必然成为未来研究手段中不可或缺的重要组成部分。但是, 目前分子动力学模拟虽然可以模拟实际地质条件下的温、压情况, 但对于岩石中的裂缝和孔隙等复杂条件却不能进行真实模拟, 只能模拟较为简单的系统。

3 页岩弹性参数影响因素

页岩弹性参数, 是洞察页岩内部微观力学机制和宏观变形行为的关键因素, 对页岩油气的高效开发有着重要作用。页岩可压性是指页岩储层形成体积压裂复杂裂缝网络以实现有效增产的可能性或难易程度, 这是页岩气压裂能否提高改造体积以获得增产的重要地质基础^[98]。而页岩弹性参数是表征页岩储层可压性至关重要的参数, 泥页岩具有高杨氏模量 (> 20 GPa)、低泊松比时具有较好的可压裂性, 意味着其在后续开采流程中更易形成复杂裂缝网络, 利于页岩气解吸、运移及产出^[12]。正因如此, 借助前沿且适配页岩复杂特性的测量方法, 精准获取弹性参数是页岩气工程领域的关键

所在。尽管现有测量与计算技术手段已取得长足进展, 这些前沿技术手段各有所长、相互补位, 为精准量化页岩弹性参数提供了坚实技术保障。然而, 不得不直面的现实是, 页岩深埋于地下数千米地层之中, 所处地质环境非常复杂。地层温度梯度随深度不断变化, 热胀冷缩效应持续扰动页岩内部原子间距与分子间作用力, 重塑着弹性参数; 孔隙流体压力的动态波动受邻层水体交换和气体解吸吸附作用的影响, 对页岩骨架结构产生挤压或拉伸作用, 导致弹性参数呈现非线性波动; 再者, 地层水化学性质复杂多变, 各类离子浓度差异催生化学反应, 腐蚀和溶蚀页岩矿物成分, 渐进式地削弱岩石力学强度, 影响着页岩的力学参数。这些错综复杂的影响因素, 不仅在本质上影响着弹性参数的真实数值, 使其偏离理想模型预测值, 更在实操层面严重干扰着测量精准度。厘清页岩弹性参数的影响因素, 是校准现有测量数据、剔除系统误差的刚性需求, 更是为页岩气开采这一复杂系统工程稳固根基, 保障工程设计基于可靠力学参数, 实现安全、高效、可持续发展的关键。初步查明影响泥页岩储层弹性参数的主要地质要素包括矿物组成、天然裂缝、围压、结构和成岩作用等^[99-100], 在实际地层条件下, 泥页岩的弹性参数会同时受到多个要素的作用并且存在演化趋势^[100], 弄清楚各个因素的作用机制是页岩弹性参数及可压性表征准确的基础。

3.1 矿物组分

页岩作为一种复杂的沉积岩, 其矿物组分丰富多样, 主要包含黏土矿物、石英和碳酸盐矿物等。矿物类型及含量是影响泥页岩弹性参数的主要因素。邹才能等^[101]研究认为脆性矿物含量越高, 岩石脆性越强, 岩石可压性越好, 而黏土矿物等韧性组分含量的增加, 会增强岩石的塑性, 使得岩石抗压强度变差 (图 10)。

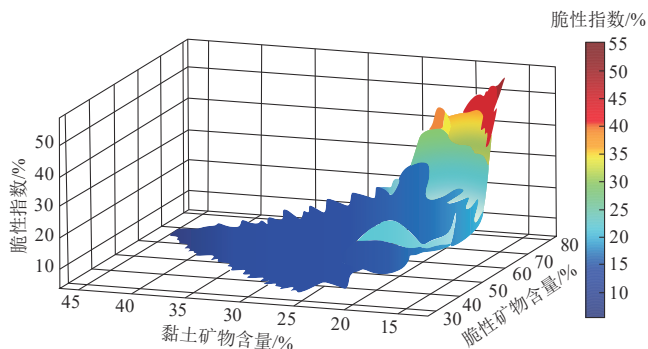


图 10 页岩脆性指数与矿物组分含量三维图^[106]

Fig. 10 Three-dimensional plot of shale brittleness index vs. mineral composition^[106]

Nelson等^[102]研究认为页岩储层脆性成分主要为石英、长石和白云石。Jarvie等^[103]将石英含量确定为确定页岩脆性指数的主要因素。虽然黏土矿物含量的增加会增强岩石塑性,但不同类型黏土矿物对岩石脆性的影响也有差别,Schlumberger公司对济阳坳陷沙河街组三段下亚段和四段上亚段泥页岩力学参数研究发现,伊利石和绿泥石相比蒙脱石、高岭石和伊/蒙层间矿物对岩石脆性影响的更小^[104]。曹峰^[105]等对碱湖相页岩储层多尺度岩石力学参数进行研究,实验结果显示白云石杨氏模量最高,石英硬度最高,黏土矿物的杨氏模量和硬度均最小(图11)。总结前人的研究认为,矿物作为组成岩石的基本单元,其对岩石弹性参数影响主要表现为矿物类型及矿物含量两方面。

3.2 天然裂缝

页岩在沉积以及构造的共同作用下在内部形成天然裂缝,Matter等^[107]认为天然裂缝的存在降低了岩石的抗张强度,对页岩储层可压性产生有利影响;闫建平等^[108]对苏北盆地高邮凹陷阜宁组四段泥页岩地层裂缝与可压裂性关系进行了研究,发现裂缝发育段岩石力学参数杨氏模量为高值,泊松比为低值,地层可压裂性较好;还有部分学者对裂缝密度及裂缝尺度对泥页岩可压性的影响进行了研究,胡德高等^[109]利用曲率属性分析了涪陵页岩气田裂缝发育密度对压裂改造的影响,

研究认为裂缝发育密度高的地方,井筒两侧微地震反映的压裂改造范围大,压裂过程中加砂更为顺畅,压裂效果更好;盛秋红等^[110]同样采用曲率属性分析了焦石坝地区裂缝尺度对泥页岩可压性的影响,其研究认为裂缝尺度较大的部位,不利于钻井施工进而限制了压裂改造的进行,而裂缝尺度较小的部位压裂较为容易,压裂效果较好,岩石可压性更好。张洁等^[111]开展了天然裂缝对页岩力学性质的数值模拟研究,模拟结果显示页岩杨氏模量随天然裂缝数量的增加而减小(图12)。总结前人研究认为较小尺度的裂缝网络在压裂过程中更易于被精准控制与优化,能够形成更为复杂且均匀的裂缝体系,有效提高储层的渗流能力与可压性,最终取得更为理想的压裂效果与油气生产效益。

3.3 围压

围压又称“围限压力”,定义为连续介质中单位体积上受到由上覆介质在自重作用下产生的各向均等的压力,在固体地球中不同深度的围压等于上覆物质的密度 ρ 、重力加速度 g 与深度 z 三者的乘积,且在 X 、 Y 和 Z 轴方向上的数值相等。目前研究认为,随着围压的增大,埋藏深度不断增加,岩石塑性不断增强^[99]。郝运轻等^[104]对济阳坳陷古近系泥页岩可压性进行研究发现,围压与岩石脆性系数呈负相关关系,即随着围压增大,岩石向延性转化;陈建军^[112]和齐晓刚^[113]对不同围压条件下岩石力学参数变化规律进行了研究,研究结果表明随着围压增大,杨氏模量、剪切模量、体积模量、拉梅常数和抗压强度均增加,而泊松比变化复杂,岩石在机械性质上呈现出从脆性向塑性转变的现象,并且围压越大,岩石破坏前表现出的塑性也越明显。张瑶珈等^[114]对围压对页岩力学性质的影响进行研究,发现当页岩处于较低围压(< 50 MPa)时,增加围压使得杨氏模量的增大趋势加快(图13)。

3.4 孔隙结构

孔隙结构对弹性参数的影响包括孔隙度大小、孔隙形状以及孔隙连通性等多个方面^[115-121]。周欣等^[119]研究表明随着有机质体积分数的增加,各弹性参数均逐渐减小,杨氏模量随着裂缝孔隙度的增加而增大,泊松比随裂缝孔隙度的增加而减小,与裂缝孔隙度的影响相反,随着基质孔隙度的增加,页岩弹性模量逐渐减小而泊松比逐渐增大(图14)。其他学者也对孔隙度对岩石弹性参数的影响进行了研究,所得观点基本相同^[118-120],当岩石矿物组分含量不变时,随孔隙度的增加,杨氏模量逐渐减少,但对于泊松比的影响部分学者

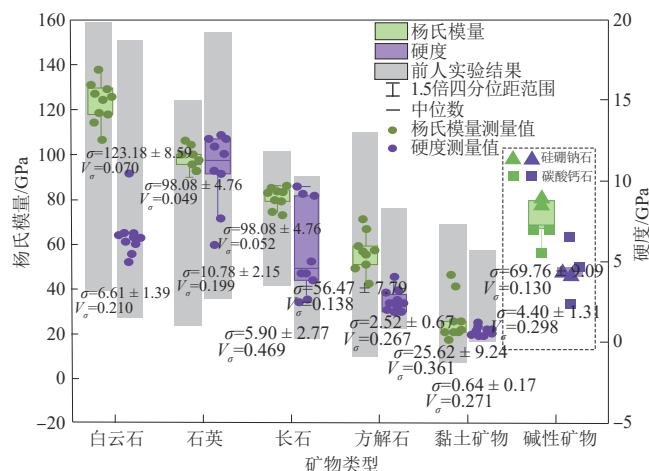
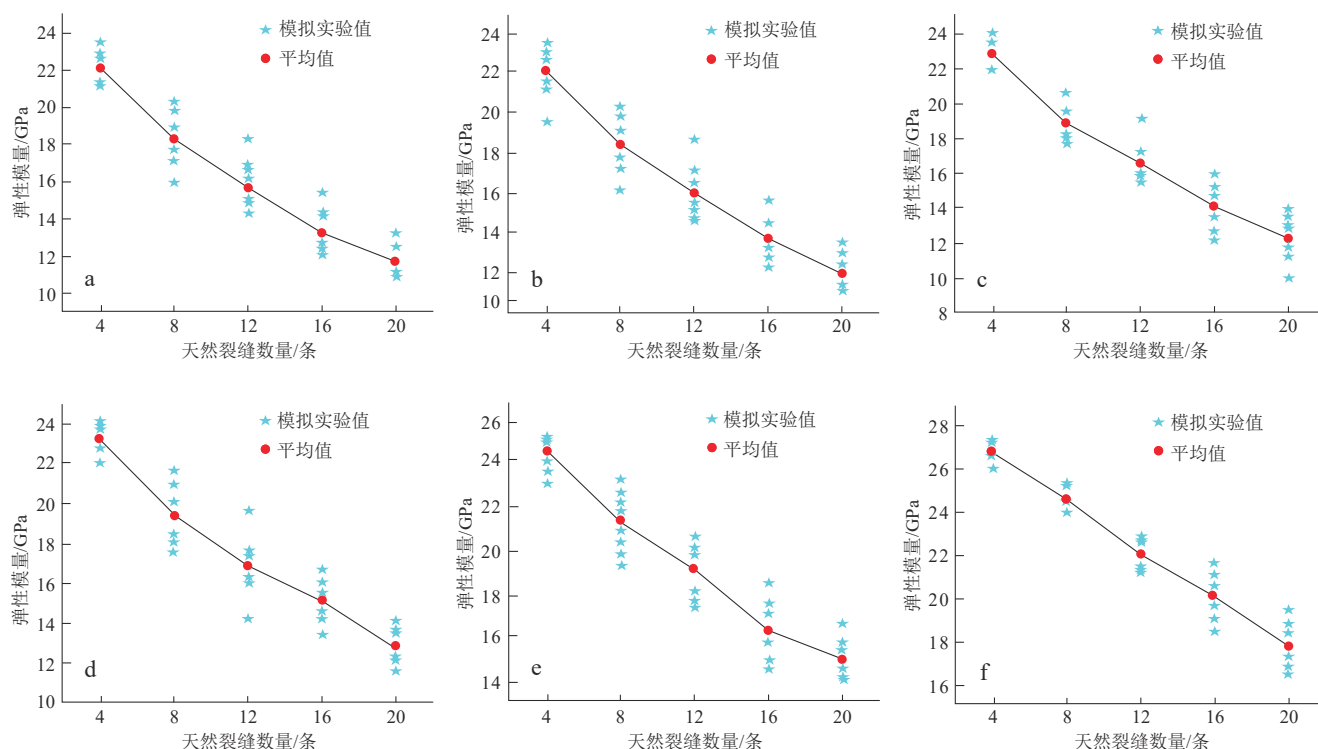


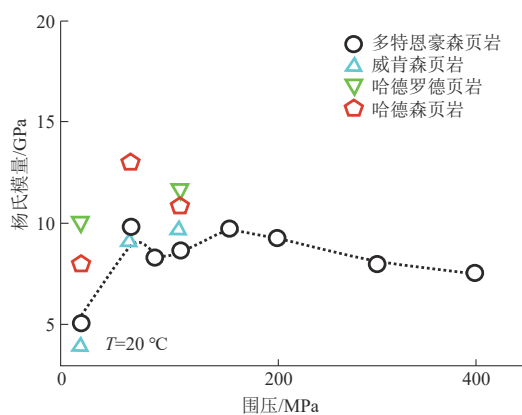
图11 各类矿物力学参数测试值^[105]

Fig. 11 Test values of the mechanical parameters of various minerals^[105]

(σ 为平均值; V_σ 为标准差系数;箱体的上、下边缘分别表示数据的75%分位数和25%分位数;箱体表示数据的四分位数范围(即四分位距);箱体内部的横线表示数据的中位数;四分位距为75%分位数与25%分位数之间的差值;1.5倍四分位距是通过将四分位距乘以1.5得出的数值,超出此范围的数据点被视为异常值,而落在范围内的数据点则被认为是正常值。)

图12 天然裂缝数量对页岩力学性质的影响^[111]Fig. 12 Impact of the number of natural fractures on the mechanical properties of shales^[111]

a. 天然裂缝的倾角为0°; b. 天然裂缝的倾角为15°; c. 天然裂缝的倾角为30°; d. 天然裂缝的倾角为45°;
e. 天然裂缝的倾角为60°; f. 天然裂缝的倾角为75°

图13 页岩杨氏模量随围压的变化^[126]Fig. 13 Young's modulus of shales varying with confining pressure^[126]

认为随孔隙度的增加泊松比也会呈现减小的趋势,只是这种趋势相对于杨氏模量变化不显著^[120]。

孔隙形状多采用孔隙纵/横比来表示^[117]。孔隙纵/横比是描述孔隙形态的重要几何参数,通常定义为孔隙长轴长度与短轴长度的比值^[117]。对弹性参数的影响表现为,当矿物成分相近时,杨氏模量随着孔隙纵/横比的增加呈线性增大的趋势,而泊松比随孔隙纵/横

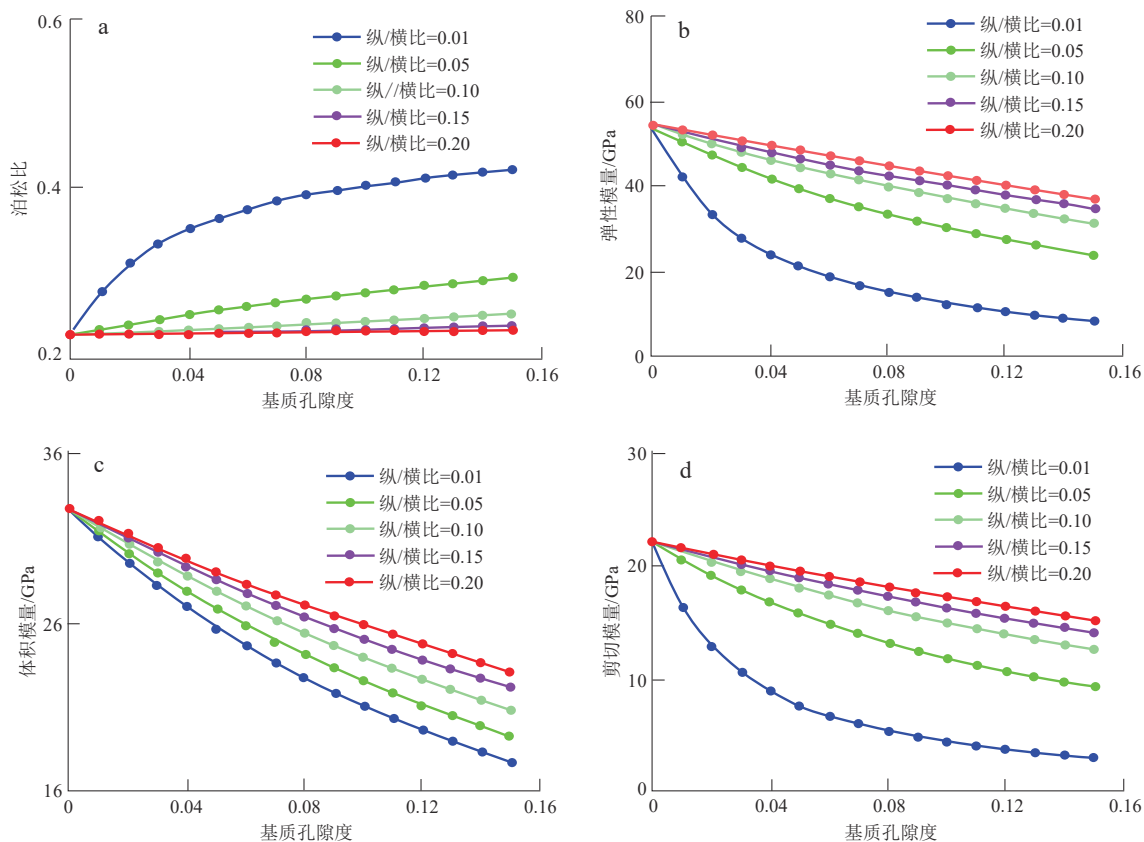
比的增加呈非线性减小的趋势^[122](图14)。孔隙连通系数对泥岩弹性参数也有影响,随着孔隙连通系数的增加,杨氏模量与泊松比均呈现减小的趋势,但这种影响较为微弱^[117]。

3.5 成岩作用

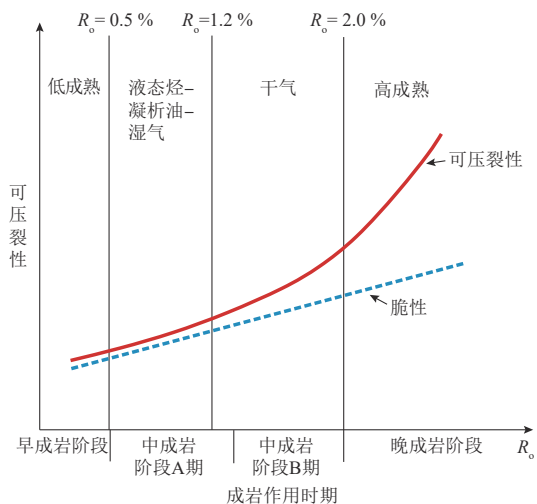
在地质演化进程中,泥页岩经历复杂多样的成岩作用阶段,其间,矿物组成、孔隙结构、围压、温度以及裂缝发育状况等诸多关键因素均呈现动态变化,进而致使页岩可压裂性产生显著差异。从本质上来说,成岩作用的影响实质上是上述多元因素对页岩可压裂性综合作用的集中体现。有机质镜质体反射率(R_o)反映了成岩作用的最大古地温和页岩的生烃条件,是反映页岩地层成岩作用阶段最合适的参数。部分学者研究认为,随着热成熟度的增加,页岩的脆性增加,弹性参数发生改变,裂缝和基质孔隙更加发育,可压裂性进一步提高,且成熟度越高,可压裂性提高的速度越快^[123-125](图15)。

3.6 温度

温度变化对岩石的力学性质有着显著的影响,这

图14 页岩弹性参数随基质孔隙度和孔隙纵/横比的变化^[117]Fig. 14 Elastic parameters of shales varying with matrix porosity and pore aspect ratio^[117]

a. 泊松比; b. 弹性模量; c. 体积模量; d. 剪切模量

图15 页岩脆性及可压裂性随成岩作用的变化^[123]Fig. 15 Brittleness and fracability of shales varying with diagenesis^[123]

些影响可以涉及岩石的强度、刚度、变形特性以及与孔隙流体相互作用等方面,温度升高通常导致页岩的抗拉、抗压强度及弹性模量降低^[126]。高温作用会导致岩石内部产生热损伤,产生更多的微裂缝,从而降低岩石

的力学强度^[127]。关东帅^[128]研究了温度作用下泥页岩的力学性质,研究表明泥页岩抗拉强度和单轴抗压强度均随温度的升高而降低。曹峰^[129]总结了温度对岩石力学性质的影响,结果显示,随温度增加,岩石变形特征从脆性向塑性变化,峰值强度降低,弹性模量降低。程世忠等^[130]研究了温度对页岩储层力学性质的影响,研究发现,随温度的增加,页岩出现弹性模量和硬度显著减小的特征(图16)。

4 讨论与展望

目前,本文所介绍的各种方法在获取岩石弹性参数方面均有实际应用。然而,各方法都有优点和缺点(表1)。必须认识到地下实际环境极为复杂,要从实验测量和理论计算中得到与真实环境完全一致的弹性参数面临着巨大的挑战。这是因为地下环境包含多种复杂因素的相互作用,如温度和压力的不均匀分布、流体的动态变化以及岩石内部结构的多样性等。因此,在利用这些方法时,我们必须充分考虑实际地下情况。在实验室测量中,应设置与实际相同的温、压条件,并且在选

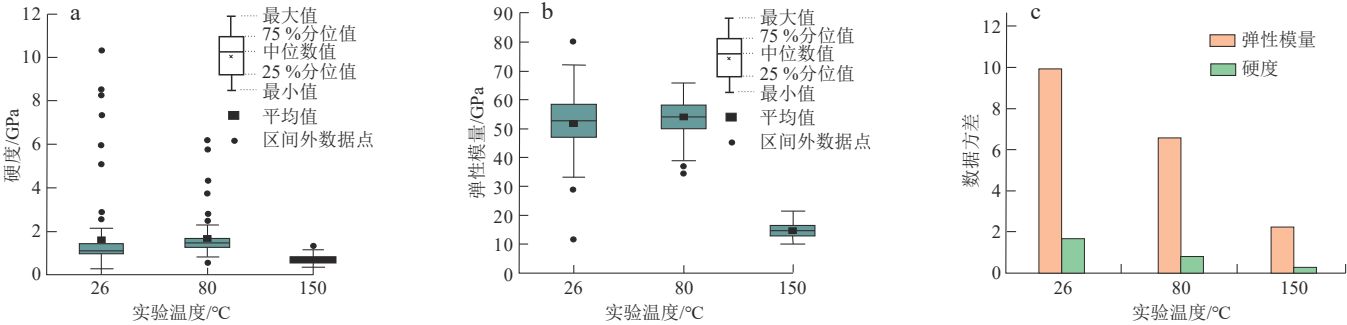


图 16 不同温度下页岩压痕点硬度与弹性模量数据分布^[130]

Fig. 16 Distributions of the hardness and elastic modulus of shales under varying temperatures^[130]

a. 硬度分布箱形图;b. 弹性模量分布箱形图;c. 图 16a,b 中弹性模量和硬度数据分布方差柱状图

表 1 各测量方法优、缺点对比

Table 1 Pros and cons of various measurement methods

表征方法		优点	缺点
实验测量法	压缩法	计算方便,较为准确	样品要求尺寸较大,较难获取,测试成本较高
	超声波测量法	方法操作简单,适用范围广,样品无损	测量数据受孔隙及裂缝的影响,增加了数据解释的难度和不确定性,且制样过程极易产生人工裂缝
	纳米压痕法	测试效率高,可以获取微观尺度下的弹性参数信息	样品需要进行精细的制备,只能作用于很小的区域,结果可能无法代表整个页岩样本的弹性参数
	声波测井法	直接反映岩石在地下原始应力状态和环境条件下的弹性参数	声波信号会受到各种噪声和干扰以及井眼形状、尺寸的影响,声波测井计算弹性参数时,往往难以准确地考虑温度和压力
理论计算法	数字岩心计算法	清晰地呈现岩石内部的孔隙、裂缝等微观结构,具有高效性和灵活性	算法和模型可能无法完全准确地反映岩石的真实结构
	等效介质理论法	理论基础扎实,适用性广泛,便于理解和分析,能够反映宏观特性	等效介质理论是基于一系列的简化假设而建立的,难以考虑微观结构的细节,对各向异性的描述不足
	分子动力学模拟法	能够从原子和分子层面揭示页岩的微观结构和相互作用,高度的灵活性和可定制性,高效的计算和分析能力,避免实验误差和干扰	模型和参数具有不确定性。不同的势函数可能会导致不同的模拟结果。计算资源需求大,难以完全准确地模拟复杂的地质条件

用样品时,要尽可能选取能够保留实际情况特征的样品。由于不同的情况需要选用不同的计算方法,而不同的计算方法所测出的弹性参数数据也会有所不同。鉴于此,根据实际情况,可以采用2种以上不同的方法进行测量,并进行对比验证,以提高测量结果的准确性和可靠性。

页岩弹性参数在页岩油气勘探开发中具有至关重要的地位,目前已有的获取岩石弹性参数的方法在页岩研究中均有所应用。但影响页岩弹性参数的因素众多且极为复杂。除了矿物组分、天然裂缝、围压、孔隙结构和成岩作用等因素之外,有机质特征^[131]、赋存流体性质^[132-133]、试样尺寸^[134-135]、层理^[136]和地应力差异^[110]等因素也会对页岩弹性参数产生不同程度的影响。页岩具有矿物成分复杂、岩性纵向变化快和岩层厚度薄等特点,这使得上述因素对弹性参数的影响更为复杂。目前,针对页岩弹性参数的研究尚未取得系统认识,仍有许多问题有待深入研究。例如,不同因素

之间的相互作用机制尚不明确,如何综合考虑多种因素对弹性参数的影响以建立更准确的预测模型等问题都需要进一步探索。

随着页岩油气勘探开发的推进,相关研究也在不断深入。在实验测量方面,针对中国页岩储层的特点,如页岩矿物组分多样、层理发育等,研究人员在样品选取和实验条件设置上进行了大量探索。例如在选取页岩样品时,注重对不同地区和不同层位样品的采集,以研究区域差异对弹性参数的影响^[137];在实验过程中,尝试模拟不同的地应力状态和流体赋存条件等,以获取更符合实际情况的弹性参数^[138]。在理论研究方面,国内、外学者也积极开展多因素耦合作用下页岩弹性参数模型的构建工作,试图揭示各因素之间的内在联系和相互作用机制^[139]。Bi等^[140]通过微观结构实验(X射线衍射、矿物定量评估、低压氮吸附和压汞测压试验)和宏观力学试验(三轴压缩、巴西劈裂和断裂韧性试验)对从勘探井收集的井下岩心进行分析,以获得富

碳酸盐页岩的多尺度特征,揭示了该储层微观结构和力学特征之间的内在关系。周浪等^[141]利用X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)以及纳米实验来研究矿物细观力学特性,并同时基于Voronoi多边形法构建细观矿物纳米压痕离散数值计算模型,并将模拟结果与试验结果进行对比分析验证。研究发现不同矿物压入时微裂纹类别、数量、占比及倾向分布的差异大(图17)。Liu等^[142]提出了一种通过整合纳米压痕和精确的基于颗粒的建模(AGBM)来提高页岩力学性能的新方法。AGBM是使用纳米压痕数据和从TESCAN集成矿物分析仪(TIMM)获得的真实微观结构细节生成,研究表明AGBM方法通过使用TIMM精确捕获页岩的微观结构复杂性,代表了对传统均匀化技术的重大进步,这种方法能够更精确地表示矿物分布和力学性能,从而得到39.46 GPa的宏观杨氏模量,与实验测量值(38.65 GPa)非常接近。邹才能^[143]等利用纳米压痕技术探究气体介质和含水特征的差异对不同岩石微观力学性质的影响,研究发现流固耦合作用能够显著提高储层岩石的结构稳定性,在

氢气、氢气+水、氢气+甲烷和氢气+甲烷+水这4种工况下反应后陆相页岩弹性模量均增加(图18)。Liang等^[144]基于前人研究成果,首先调查了页岩中主要矿物石英和伊利石的微观力学性质,然后利用分子动力学技术分析了拉伸破坏的变形机制,并计算和验证了矿物弹性参数,还确定了石英和伊利石的表面能密度和断裂韧性,最后比较了无机物和有机物之间力学性质的差异。

综上所述,页岩弹性参数的研究在国内外均取得了一定的进展,但仍面临诸多问题和挑战。不同影响因素之间的相互作用机制尚未完全明确,如何综合考虑多种因素建立更准确的预测模型是未来研究的重点方向。在研究方法上,需要进一步整合实验测量、理论计算和模拟等多种手段,充分发挥各自的优势,实现对页岩弹性参数的全面、准确研究。同时,随着页岩油气勘探开发的不断深入,针对不同地区和不同类型页岩储层的弹性参数研究也需要更加精细化和个性化,以满足实际工程需求,推动页岩油气工业的可持续发展。

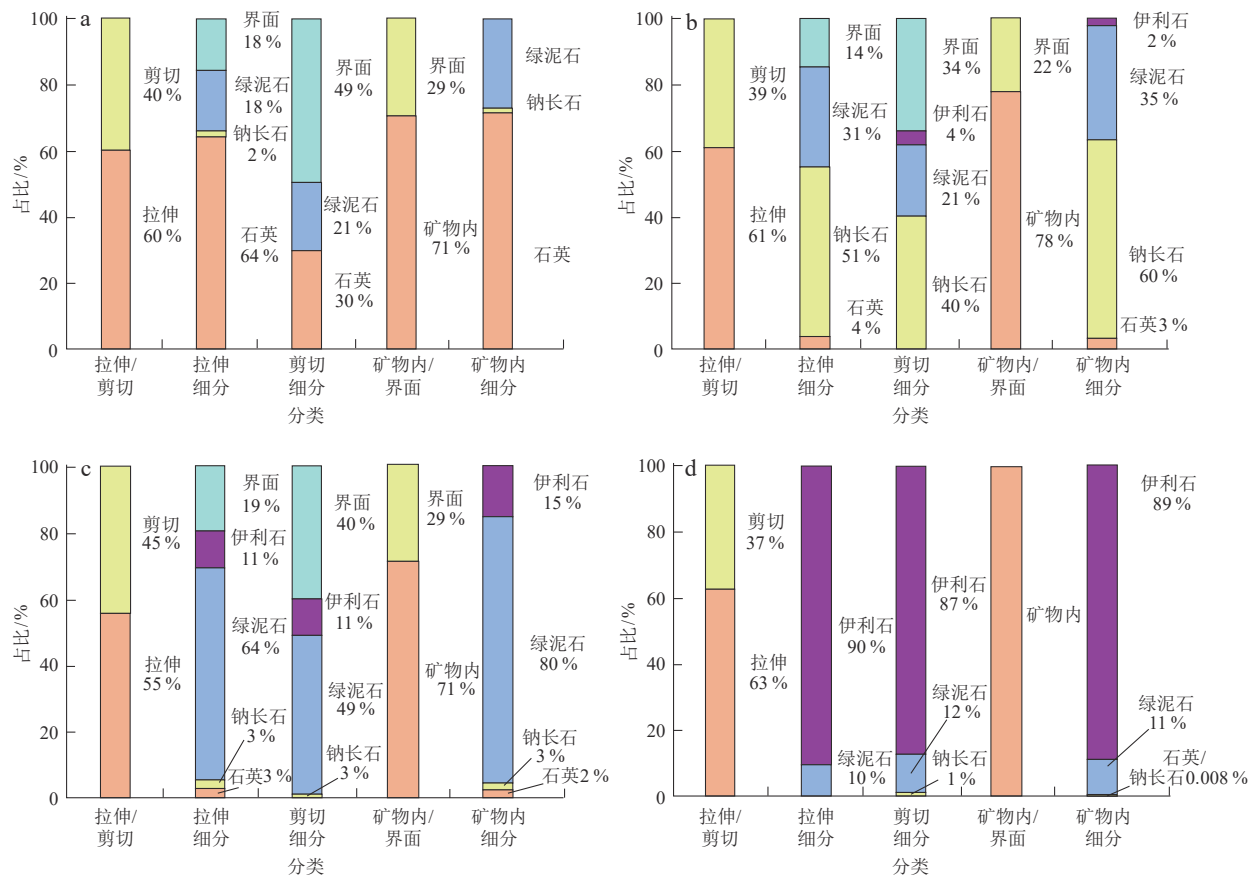


图17 不同类型矿物最大压痕深度时各类裂纹占比条形图^[141]

Fig. 17 Bar chart of crack proportions in different minerals at the maximum indentation depth^[141]

a. 石英矿物; b. 钠长石矿物; c. 绿泥石矿物; d. 伊利石矿物

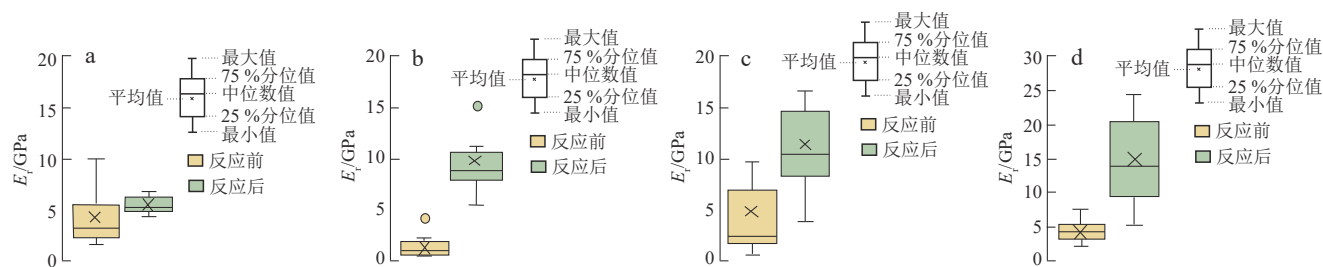


图18 流固耦合作用反应前、后页岩弹性模量(E_r)变化箱形图^[143]

Fig. 18 Box plot of variations in elastic modulus (E_r) of shales before and after fluid-solid coupling reactions^[143]

a. 氢气; b. 氢气+水; c. 氢气+甲烷; d. 氢气+甲烷+水

5 结论

1) 弹性参数的测量方式多样,但还是以实验测量法(压缩法、超声波测量法、纳米压痕法和声波测井法)和理论计算法(数字岩心计算法、等效介质理论法和分子动力学模拟法)为主。每种方法都有各自的优缺点,需要根据实际情况来选取测量方法。

2) 总体而言,实验测量法的精度较高,但采样率低,容易受到实验条件及误差的影响。声波测井法求取的弹性参数是动态的,反映瞬时加载的力学性质,与真实地层长时间静载荷有一定的差别;基于数字岩心计算和等效介质理论的方法其理论基础坚实,模型参考具有明确的物理意义,但输入参数较多,方程复杂,实用性较差,且对非主要因素有过多的忽略或假定;分子动力学模拟法虽然应用多种方法模拟多种矿物组成的复合材料的弹性参数,简单、方便,但地下环境复杂多变,模拟环境与实际地质条件存在差异,导致模拟结果与实测值有一定偏差。

3) 页岩弹性参数主要受到矿物组分、天然裂缝、围压、孔隙结构、成岩作用和温度等因素的影响,但有机质特征、赋存流体性质与温度、试样尺寸、层理和地应力差异等也都会产生不同程度的影响。未来的研究需要在定量关系、多尺度研究、复杂地质环境和先进技术等方面不断探索和创新。

参 考 文 献

[1] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷陆相断陷湖盆中-低成熟度页岩“富烃-成储-富集-高产”的理论认识与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1417-1430.
NI Liangtian, DU Yushan, JIANG Long, et al. Medium-to-low maturity shales in the faulted lacustrine basin in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: Theoretical understanding of their hydrocarbon generation, reservoir formation, and shale oil enrichment and high-yield nature and exploitation practices [J].

Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1417-1430.

- [2] 蒋前前, 吴娟, 王恒, 等. 川南地区下志留统龙马溪组有机质热演化及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1321-1336.
JIANG Qianqian, WU Juan, WANG Heng, et al. Thermal evolution of organic matter in the Lower Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin and its main controlling factors [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1321-1336.
- [3] 杨亚东, 邹龙庆, 王一萱, 等. 川南深层页岩气藏压裂缝导流能力影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2024, 31(5): 162-167.
YANG Yadong, ZOU Longqing, WANG Yixuan, et al. Analysis of factors affecting the fracture conductivity in deep shale gas reservoirs of southern Sichuan [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(5): 162-167.
- [4] 王纪伟, 宋丽阳, 康玉柱, 等. 中美典型常压页岩气开发对比与启示[J]. 特种油气藏, 2024, 31(4): 1-9.
WANG Jiwei, SONG Liyang, KANG Yuzhu, et al. Comparison and implications of typical normal pressure shale gas development between China and the United States [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(4): 1-9.
- [5] 张琴, 邱振, 赵群, 等. 海-陆过渡相与海相页岩气“甜点段”差异特征与形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1400-1416.
ZHANG Qin, QIU Zhen, ZHAO Qun, et al. Different characteristics and formation mechanisms of transitional and marine shale gas sweet spots [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1400-1416.
- [6] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 489-505.
LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 489-505.
- [7] 赵金洲, 王松, 李勇明. 页岩气藏压裂改造难点与技术关键[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 46-49.
ZHAO Jinzhou, WANG Song, LI Yongming. Difficulties and key techniques in the fracturing treatment of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 46-49.
- [8] 高和群, 高玉巧, 何希鹏, 等. 苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油储层岩石力学特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地

- 质, 2024, 45(2): 502-515.
- GAO Hequn, GAO Yuqiao, HE Xipeng, et al. Rock mechanical properties and controlling factors for shale oil reservoirs in the second member of the Paleogene Funing Formation, Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 502-515.
- [9] 齐丰妍, 张坚, 宋文炳, 等. 溶蚀水泥浆弹性模量预测的分步解析法[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(8): 2758-2767.
- QI Fengyan, ZHANG Jian, SONG Wenbing, et al. A step-by-step analytical solution for predicting elastic modulus of leached cement paste[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(8): 2758-2767.
- [10] 殷玉平, 金智荣, 杲春, 等. 苏北盆地阜二段页岩储层力学特征评价[J]. 石油化工应用, 2024, 43(9): 80-84.
- YIN Yuping, JIN Zhirong, GAO Chun, et al. Mechanical characteristics evaluation of the Fu2 member shale reservoir in the Subei Basin [J]. Petrochemical Industry Application, 2024, 43(9): 80-84.
- [11] 史瑞其, 鲍祥生, 汪轩, 等. 不同于干燥岩石体积模量计算方法在S油田的对比分析研究[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4): 405-409, 426.
- SHI Ruiqi, BAO Xiangsheng, WANG Xuan, et al. Comparative analysis of bulk modulus calculation methods of different dry rocks in S Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 405-409, 426.
- [12] 刘秀军, 马占国. 拉拔过程中灌浆锚固系统注浆体剪切模量变化规律研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(11): 58-63.
- LIU Xiujun, MA Zhanguo. Study on the variation law of shear modulus of the grout in the grouted anchorage system during the pulling process[J]. Building Science, 2024, 40(11): 58-63.
- [13] 张冲, 叶青, 周伟, 等. 基于力学层划分的火成岩潜山裂缝分形维变识别方法[J]. 地球科学, 2025, 50(2): 521-534.
- ZHANG Chong, YE Qing, ZHOU Wei, et al. A Method for Identifying the Fractal Dimension Variation of Fractures in Igneous Buried Hills Based on the Division of Mechanical Layers [J]. Earth Science, 2025, 50(2): 521-534.
- [14] 翟文宝, 李军, 周英操, 等. 基于测井资料的页岩储层可压裂性评价新方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 112-123.
- ZHAI Wenbao, LI Jun, ZHOU Yingcao, et al. New evaluation method of shale reservoir fracability based on logging data [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(3): 112-123.
- [15] 杨秀娟, 张敏, 闫相祯. 基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(4): 39-42.
- YANG Xiujuan, ZHANG Min, YAN Xiangzhen. Study on acoustic logging-based rock elasticity parameters [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(4): 39-42.
- [16] 赵立新, 刘学锋, 孙建孟, 等. 应用声学岩石物理模型进行储层流体性质识别[J]. 测井技术, 2009, 33(5): 444-448.
- ZHAO Lixin, LIU Xuefeng, SUN Jianmeng, et al. On reservoir fluid identification based on sonic rock physics model [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(5): 444-448.
- [17] GONG Fei, DI Bangran, WEI Jianxia, et al. Experimental investigation of the effects of clay content and compaction stress on the elastic properties and anisotropy of dry and saturated synthetic shale[J]. Geophysics, 2018, 83(5): C195-C208.
- [18] 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.
- [19] 黎丁源. 人工页岩矿物对动静态弹性参数及各向异性的影响[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- LI Dingyuan. Influence of artificial shale minerals on dynamic and static elastic parameters and anisotropy [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [20] 刘子, 王树太. 页岩纳米压痕实验力学参数的相关性研究[J]. 科技与创新, 2023(7): 89-91.
- LIU Zi, WANG Shutai. Correlation study of mechanical parameters in nanoindentation experiment of shale [J]. Science and Technology & Innovation, 2023(7): 89-91.
- [21] 翟鸿宇, 常旭, 朱维, 等. 基于水力压裂实验的龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(3): 380-397.
- ZHAI Hongyu, CHANG Xu, ZHU Wei, et al. Study on anisotropy of Longmaxi Shale using hydraulic fracturing experiment [J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(3): 380-397.
- [22] 田坤云, 张瑞林. 高压水及负压加载状态下三轴应力渗流试验装置的研制[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3338-3344.
- TIAN Kunyun, ZHANG Ruilin. Research on triaxial stress seepage experiment device loaded by high pressure water and negative pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3338-3344.
- [23] 刘卫国, 韩登宇, 苗文韬, 等. 利用地球物理测井数据计算新疆托克逊县白嘴山地区岩石力学参数的方法探讨[J]. 铀矿地质, 2013, 29(5): 310-314.
- LIU Weiguo, HAN Dengyu, MIAO Wentao, et al. Discussion on the calculation of mechanical parameters of rocks with geophysical logging data in Baizuishan region, Tuokexun, Xinjiang [J]. Uranium Geology, 2013, 29(5): 310-314.
- [24] 赵绍智, 蒋添雨, 刘志翔, 等. 基于超声波压缩波测量软组织杨氏模量[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(2): 35-37, 53.
- ZHAO Shaozhi, JIANG Tianyu, LIU Zhixiang, et al. Measurement of Young's modulus of soft tissues using ultrasonic compression wave[J]. China Medical Devices, 2019, 34(2): 35-37, 53.
- [25] 魏勤, 卫婷, 董师润, 等. 超声波法测量金属材料的杨氏模量和剪切模量[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 27-30.
- WEI Qin, WEI Ting, DONG Shirun, et al. Ultrasonic determination of Young's and shear modulus of metal materials [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(1): 27-30.
- [26] ZHANG Zhibo, WANG Enyuan, LIU Xianan, et al. Anisotropic characteristics of ultrasonic transmission velocities and stress inversion during uniaxial compression process [J]. Journal of

- Applied Geophysics, 2021, 186: 104274.
- [27] 江昊焱. X地区致密砂岩储层岩石力学特性及体积压裂甜点研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- JIANG Haoyan. Study on rock mechanical characteristics and volume fracturing "sweet spot" of tight sandstone reservoir in area X[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [28] 张茜. 致密砂岩储层岩石力学性质与可压性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- ZHANG Qian. Study on mechanical properties and compressibility of tight sandstone reservoirs [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [29] 戴世立, 王力娟, 辛朝坤. 松辽盆地北部古中央隆起带基底岩石弹性参数测试及特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(2): 443-453.
- DAI Shili, WANG Lijuan, XIN Zhaokun. Testing and characteristic analysis of elastic parameters of basement rock in the paleo-central uplift belt in the northern Songliao Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(2): 443-453.
- [30] MOULA M, MEILLE S, LE CORRE V, et al. Mechanical characterization of meso-porous alumina by micro- and nano-indentation [J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101315.
- [31] 孟筠青, 牛家兴, 夏据凯, 等. 纳米尺度下煤的力学性质及破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 84-92.
- MENG Yunqing, NIU Jiaying, XIA Junkai, et al. Study on mechanical properties and failure mechanisms of coal at the nanometer scale [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 84-92.
- [32] 时贤, 蒋恕, 卢双舫, 等. 利用纳米压痕实验研究层理性页岩岩石力学性质——以渝东南酉阳地区下志留统龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 155-164.
- SHI Xian, JIANG Shu, LU Shuangfang, et al. Investigation of mechanical properties of bedded shale by nanoindentation tests: A case study on Lower Silurian Longmaxi Formation of Youyang area in southeast Chongqing, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 155-164.
- [33] 党发宁, 高天晴, 原诗晶, 等. 化学环境对灰岩力学性能影响的纳米压痕试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊2): 3260-3270.
- DANG Faning, GAO Tianqing, YUAN Shijing, et al. Nanoindentation test study on the influence of chemical environment on the mechanical properties of limestone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3260-3270.
- [34] 顾士坦, 逯英棋, 李文帅, 等. 基于纳米压痕的煤系泥岩细观力学及断裂性能试验研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 128-133.
- GU Shitan, LU Yingqi, LI Wenshuai, et al. Experiment on meso-mechanical and fracture characteristics of coal measures mudstone using nanoindentation [J]. Coal Engineering, 2023, 55(2): 128-133.
- [35] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [36] 罗婷倚, 张清淞, 刘志彬, 等. 广西河池红层泥岩力学特性的纳米压痕试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 174-181.
- LUO Tingyi, ZHANG Qingsong, LIU Zhibin, et al. Nanoindentation experimental study on mechanical properties of red mudstone in Hechi, Guangxi Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(6): 174-181.
- [37] 蔡益栋, 贾丁, 邱峰, 等. 基于纳米压痕的煤岩微观力学特性及其影响因素剖析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 879-890.
- CAI Yidong, JIA Ding, QIU Feng, et al. Micromechanical properties of coal and its influencing factors based on nanoindentation [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 879-890.
- [38] 徐赣川, 钟光海, 谢冰, 等. 基于岩石物理实验的页岩脆性测井评价方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 38-45.
- XU Ganchuan, ZHONG Guanghai, XIE Bing, et al. Petrophysical experiment-based logging evaluation method of shale brittleness [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 38-45.
- [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.
- GUO Peifeng, DENG Hucheng, DENG Yong, et al. Rock mechanics characteristics and influence factors analysis of Chang 8 reservoir in the southern margin of ordos basin [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 189-198.
- [40] 罗发强, 王志战, 张元春, 等. 复杂地层岩石力学参数实时求取方法——以塔里木盆地巴楚隆起为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6842-6847.
- LUO Faqiang, WANG Zhizhan, ZHANG Yuanchun, et al. The real-time calculation methods of rock mechanics parameters in complex strata: A case study of the Bachu uplift in Tarim Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 6842-6847.
- [41] 印兴耀, 秦秋萍, 宗兆云. 数字岩石物理中弹性参数的有限差分计算方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3883-3890.
- YIN Xingyao, QIN Qiuping, ZONG Zhaoyun. Simulation of elastic parameters based on the finite difference method in digital rock physics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3883-3890.
- [42] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微CT技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1133-1140.
- LIU Xiangjun, ZHU Honglin, LIANG Lixi. Digital rock physics of sandstone based on micro-CT technology [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1133-1140.
- [43] 宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 基于叠前地震纵横波模量直接反演的流体检测方法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 284-292.
- ZONG Zhaoyun, YIN Xingyao, WU Guochen. Fluid identification

- method based on compressional and shear modulus direct inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 284-292.
- [44] 印兴耀, 李龙. 基于岩石物理模型的纵、横波速度反演方法[J]. 石油物探, 2015, 54(3): 249-253, 281.
- YIN Xingyao, LI Long. P-wave and S-wave velocities inversion based on rock physics model [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(3): 249-253, 281.
- [45] 孙建孟, 姜黎明, 刘学锋, 等. 数字岩心技术测井应用与展望[J]. 测井技术, 2012, 36(1): 1-7.
- SUN Jianmeng, JIANG Liming, LIU Xuefeng, et al. Log application and prospect of digital core technology [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(1): 1-7.
- [46] 孙超, 张怀, 唐跟阳, 等. 基于三维数字岩心的介观尺度流弹性响应数值模拟[J]. 地球物理学报, 2023, 66(8): 3444-3462.
- SUN Chao, ZHANG Huai, TANG Genyang, et al. 3D digital core applied to numerically predict elastic response caused by mesoscopic flow [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(8): 3444-3462.
- [47] WANG Zidong, CAO Gongqi, LIU Jianlin, et al. Prediction of the anisotropic effective moduli of shales based on the Mori-Tanaka model and the digital core technique [J]. Pure and Applied Geophysics, 2023, 180(8): 2981-2998.
- [48] 赵建鹏, 陈惠, 李宁, 等. 三维数字岩心技术岩石物理应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 1099-1108.
- ZHAO Jianpeng, CHEN Hui, LI Ning, et al. Research advance of petrophysical application based on digital core technology [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 1099-1108.
- [49] 张乃毓. 基于数字岩心的页岩孔隙结构分析及导电性建模[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- ZHANG Naiyu. Pore structure analysis and conductivity modeling of shale based on digital core [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [50] 卫凯莉. 松辽盆地青山口组典型井页岩多尺度数字岩心建模研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- WEI Kaili. Multi-scale digital core modeling of typical well shale in Qingshankou Formation in Songliao Basin [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [51] 赖富强, 刘粤蛟, 张海杰, 等. 基于数字岩心模拟的深层页岩气储层可压性评价模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 1-11.
- LAI Fuqiang, LIU Yuejiao, ZHANG Haijie, et al. Fracturing properties model of deep shale gas reservoir based on digital core simulation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 1-11.
- [52] 李宏伟. 几类偏微分方程的自适应最小二乘混合有限元方法[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.
- LI Hongwei. An adaptive least squares mixed finite element method for several partial differential equations [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2009.
- [53] 齐爽. 求解偏微分方程的二元样条有限元方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- QI Shuang. Numerical solution of partial differential equations by bivariate spline finite method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [54] 李小彬. 基于三维数字岩心的岩石孔隙结构表征及弹渗属性模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- LI Xiaobin. Characterization of pore structure and simulation of elasticity and permeability based on 3D digital cores [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [55] HAN Dehua, NUR A, MORGAN D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. Geophysics, 1986, 51(11): 2093-2107.
- [56] ARNS J Y, ARNS C H, SHEPPARD A P, et al. Relative permeability from tomographic images; effect of correlated heterogeneity [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 39(3/4): 247-259.
- [57] 闫伟林, 章华兵, 郑建东, 等. 基于数字岩心的古龙页岩油储层含油饱和度建模方法及其应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 91-102.
- YAN Weilin, ZHANG Huabing, ZHENG Jiandong, et al. Digital core-based modeling method and application of oil saturation in Gulong shale oil reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(3): 91-102.
- [58] 秦秋萍. 数字岩石物理中弹性参数的有限差分计算方法及应用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- QIN Qiuping. Simulation of elastic parameters based on finite difference method and application in digital rock physics [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [59] 郑颖. 基于数字岩心有限元模拟的弹性参数计算方法及应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- ZHENG Ying. Research on the elastic parameter simulation and application based on the finite element method of digital core [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [60] 崔颖姣. 基于数字岩心的含流体岩石弹性参数模拟[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- CUI Yingjiao. Simulation of elastic parameters of fluid containing rock based on digital core [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [61] 赵岩龙, 李星宇, 方正魁, 等. 裂缝性页岩油储层三维数字岩心电阻率模拟[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 51-57.
- ZHAO Yanlong, LI Xingyu, FANG Zhengkui, et al. Numerical simulation of resistivity of 3D digital core of fractured shale oil reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(1): 51-57.
- [62] 周琦, 印兴耀, 李坤. 煤系地层地震岩石物理建模及横波预测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(2): 357-366.
- ZHOU Qi, YIN Xingyao, LI Kun. Seismic rock physics modeling and shear wave velocity prediction method of coal measure strata [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(2): 357-366.
- [63] 陈超, 印兴耀, 陈祖庆, 等. 基于页岩岩石物理等效模型的地

- 层压力系数预测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(2): 367-376, 394.
- CHEN Chao, YIN Xingyao, CHEN Zuqing, et al. Prediction for formation pressure coefficients based on an equivalent petrophysical model of shale[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(2): 367-376, 394.
- [64] 武陈月, 印兴耀, 印林杰, 等. 考虑压力的深部页岩储层地震岩石物理建模方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(4): 893-901.
- WU Chenyue, YIN Xingyao, YIN Linjie, et al. Rock physical modelling for deep shale reservoirs involving the influence of pressure [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(4): 893-901.
- [65] 梁雨薇. 基于岩石物理建模的深洼带碎屑岩储层地震响应特征分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- LIANG Yuwei. Seismic response analysis of deep sag-clastic reservoirs based on petrophysical modeling[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [66] 陈颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [67] 马淑芳, 韩大匡, 甘利灯, 等. 地震岩石物理模型综述[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 460-471.
- MA Shufen, HAN Dakuang, GAN Lideng, et al. A review of seismic rock physics models[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(2): 460-471.
- [68] 石学文, 王畅, 张洞君, 等. 基于岩石物理建模的页岩气地层压力地震预测方法[J]. 海相油气地质, 2025, 30(1): 89-96.
- SHI Xuewen, WANG Chang, ZHANG Dongjun, et al. Seismic Prediction Method of Shale Gas Formation Pressure Based on Rock Physics Modeling[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2025, 30(1): 89-96.
- [69] 纪莉莉. 致密砂岩岩石物理模型探讨及其在反演中的应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- JI Lili. Discussion on physical model of tight sandstone rock and its application in inversion [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [70] YANG Wenqiang, ZONG Zhaoyun. Rock-physics model of hydrate reservoirs considering fluid inhomogeneous mixing, the temperature dependence of hydrate elastic modulus, and simplified pore structure parameters [J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 216: 105157.
- [71] 周琦杰. 基于岩石物理理论的致密砂岩等效模型构建及应用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- ZHOU Qijie. Construction and application of effective model of tight sandstone based on rock physics theory[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [72] 王璞. 页岩气储层地震岩石物理模型研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- WANG Pu. Research on seismic rock physics modeling for shale gas reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [73] 崔云江, 陆云龙, 汪瑞宏, 等. 一种基于等效介质理论的储层流体识别技术[J]. 中国海上油气, 2018, 30(2): 71-77.
- CUI Yunjiang, LU Yunlong, WANG Ruihong, et al. A reservoir fluid identification technology based on equivalent medium theories [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(2): 71-77.
- [74] VOIGT W. Lehrbuch der kristallphysik: Teubner-Leipzig [D]. New York: Macmillan, 1928: 1-20.
- [75] REUSS A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle [J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1929, 9(1): 49-58.
- [76] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11(2): 127-140.
- [77] 乔汉青, 刘财, 方慧, 等. 基于统计学岩石物理模型的火山岩横波速度预测方法[J]. 地球科学, 2023, 48(8): 2993-3006.
- QIAO Hanqing, LIU Cai, FANG Hui, et al. S-wave velocity prediction method of volcanic rock based on statistical rock-physics model[J]. Earth Science, 2023, 48(8): 2993-3006.
- [78] 郭静怡, 李敏, 庄明伟, 等. 速度-压力岩石物理模型及其在页岩孔隙压力预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 360-372.
- GUO Jingyi, LI Min, ZHUANG Mingwei, et al. Rock physics model for velocity-pressure relations and its application to shale pore pressure estimation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 360-372.
- [79] 秦小英. 基于岩石物理模型的致密砂岩气储层参数地震反演与定量解释研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- QIN Xiaoying. The research of seismic inversion and quantitative interpretation of tight gas sandstone reservoir parameters based on rock physics model[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [80] KUSTER G T, TOKSOZ M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media; Part I, Theoretical formulations [J]. Geophysics, 1974, 39(5): 587-606.
- [81] 张金强, 刘振峰, 刘喜武, 等. 致密砂岩储层自适应岩石物理建模方法[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(4): 792-800, 808.
- ZHANG Jinqiang, LIU Zhenfeng, LIU Xiwu, et al. Self-adaptive rock physics modeling method for tight sandstone reservoirs [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(4): 792-800, 808.
- [82] CLEARY M P, LEE S M, CHEN I W. Self-consistent techniques for heterogeneous media [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1980, 106(5): 861-887.
- [83] NORRIS A N. A differential scheme for the effective moduli of composites[J]. Mechanics of Materials, 1985, 4(1): 1-16.
- [84] ZIMMERMAN R W. Compressibility of sandstones [M]. New York: Elsevier, 1991: 173.
- [85] BERRYMAN J. Mixture theories for rock properties in rock physics and phase relations-a handbook of physical constants[M]. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 1995.

- [86] BERRYMAN J G. Bounds and estimates for transport coefficients of random and porous media with high contrasts [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(6): 063504.
- [87] WOOD A B. A text book of sound [M]. New York: The Macmillan Company, 1955: 360.
- [88] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673–685.
- [89] DREW M G B. The art of molecular dynamics simulation: D. C. Rapaport. Cambridge University Press, Cambridge (1995) [J]. *Computers & Chemistry*, 1996, 20(4): 489.
- [90] 陈正隆, 徐为人, 汤立达. 分子模拟的理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- CHEN Zhenglong, XU Weiren, TANG Lida. Theory and practice of molecular simulation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [91] SCOTT R. Computer simulation of liquids. By M. P. Allen, D. J. Tildesley [J]. *Mathematics of Computation*, 1991, 57(195): 442–444.
- [92] 卢百平, 钟仁显. 分子动力学在材料科学中的应用[J]. *铸造技术*, 2007, 28(1): 146–148.
- LU Baiping, ZHONG Renxian. Application of molecular dynamics on material science [J]. *Foundry Technology*, 2007, 28(1): 146–148.
- [93] 施欣园, 陈君青, 庞雄奇, 等. 储层矿物润湿性的测量方法综述[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(2): 1–9.
- SHI Kanyuan, CHEN Junqing, PANG Xiongqi, et al. A review of methods for measuring the wettability of reservoir minerals [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(2): 1–9.
- [94] 丛奇, 陈君青, 卢贵武, 等. 利用分子动力学模拟研究页岩吸附能力的影响因素及微观机理的综述[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(9): 3474–3489.
- CONG Qi, CHEN Junqing, LU Guiwu, et al. Review on influencing factors and microscopic mechanism of shale adsorption capacity by molecular dynamics simulation [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(9): 3474–3489.
- [95] PLIMPTON S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics [J]. *Journal of Computational Physics*, 1995, 117(1): 1–19.
- [96] 陈陶, 徐金明. 温度和压强对花岗岩中矿物微观物理力学特性的影响[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6): 1474–1481.
- CHEN Tao, XU Jinming. Effects of temperature and pressure on microscopic physical and mechanical features of minerals in granite [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(6): 1474–1481.
- [97] 杨宇, 徐国元. 水化蒙脱石拉伸力学特性的分子动力学模拟研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(6): 156–166.
- YANG Yu, XU Guoyuan. Study on tensile mechanical properties of hydrated montmorillonite based on molecular dynamics simulation [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(6): 156–166.
- [98] 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 等. 页岩气储层可压性评价新方法[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(6): 1165–1172.
- ZHAO Jinzhou, XU Wenjun, LI Yongming, et al. A new method for fracability evaluation of shale-gas reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(6): 1165–1172.
- [99] 胡永全, 贾锁刚, 赵金洲, 等. 缝网压裂控制条件研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(4): 126–132.
- HU Yongquan, JIA Suogang, ZHAO Jinzhou, et al. Study on controlling conditions in network hydraulic fracturing [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2013, 35(4): 126–132.
- [100] 沈骋, 谢军, 赵金洲, 等. 泸州—渝西区块海相页岩可压性演化差异[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(4): 742–754.
- SHEN Cheng, XIE Jun, ZHAO Jinzhou, et al. Evolution difference of fracability of marine shale gas reservoir in Luzhou and west Chongqing block, Sichuan Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(4): 742–754.
- [101] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641–653.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641–653.
- [102] NELSON R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: contributions in petroleum geology and engineering [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [103] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475–499.
- [104] 郝运轻, 宋国奇, 周广清, 等. 济阳拗陷古近系泥页岩岩石学特征对可压性的影响[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 489–495.
- HAO Yunqing, SONG Guoqi, ZHOU Guangqing, et al. Influence of petrological characteristics on fracability of the Paleogene shale, Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(4): 489–495.
- [105] 曹峰, 何建华, 曹红秀, 等. 碱湖相页岩储层多尺度岩石力学参数及脆性定量评价[J/OL]. *成都理工大学学报(自然科学版)*: 1–23 [2025–03–06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20240910.1823.002.html>.
- CAO Feng, HE Jianhua, CAO Hongxiu, et al. Multi scale rock mechanics parameters and quantitative evaluation of brittleness in alkaline lacustrine shale reservoirs [J/OL]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*: 1–23 [2025–03–06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20240910.1823.002.html>.
- [106] 陈威, 常小龙, 李哲, 等. 基于多影响因素的页岩脆性评价方法[J]. *测井技术*, 2024, 48(5): 631–638.
- CHEN Wei, CHANG Xiaolong, LI Zhe, et al. Evaluation method of shale brittleness based on multiple influencing factors [J]. *Well Logging Technology*, 2024, 48(5): 631–638.

- [107] MATTAR L, GUALT B, MORAD K, et al. Production analysis and forecasting of shale gas reservoirs: Case history-based approach[C]//SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, 2008. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2008: SPE-119897-MS.
- [108] 闫建平, 言语, 司马立强, 等. 泥页岩储层裂缝特征及其与“五性”之间的关系[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 87-93, 132.
YAN Jianping, YAN Yu, SIMA Liqiang, et al. Relationship between fracture characteristics and “five-property” of shale reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(3): 87-93, 132.
- [109] 胡德高, 刘超. 四川盆地涪陵页岩气田单井可压性地质因素研究[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 20-24.
HU Degao, LIU Chao. Geological factors of well fracability in Fuling shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(1): 20-24.
- [110] 盛秋红, 李文成. 泥页岩可压性评价方法及其在焦石坝地区的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1473-1479.
SHENG Qiuhong, LI Wencheng. Evaluation method of shale fracability and its application in Jiaoshiba area[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1473-1479.
- [111] 张洁, 曹函, 杜宗霖, 等. 基于天然裂缝网络的页岩力学性质数值模拟研究[J]. 科技通报, 2023, 39(11): 57-67.
ZHANG Jie, CAO Han, DU Zonglin, et al. Numerical simulation of shale mechanical properties based on natural fracture network[J]. Bulletin of Science and Technology, 2023, 39(11): 57-67.
- [112] 陈建军. 页岩油储层岩石力学特性及可压裂性评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
CHEN Jianjun. Rock mechanical characteristics and fracability evaluation of shale oil reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [113] 齐晓刚. 蜀南页岩气储层可压裂性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
QI Xiaogang. Research of gas shale reservoir's fracability in south Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [114] 张瑶珈, 陈志鹏, 于春勇, 等. 富有机质页岩的岩石力学性质及其影响因素研究进展[J]. 录井工程, 2023, 34(4): 104-111.
ZHANG Yaojia, CHEN Zhipeng, YU Chunyong, et al. Geomechanical properties and influencing factors of organic-rich shale[J]. Mud Logging Engineering, 2023, 34(4): 104-111.
- [115] 肖佳林, 李保林, 游园, 等. 复兴区块陆相页岩压裂成缝特征与增产改造策略分析[J]. 断块油气田, 2024, 31(6): 1066-1075.
XIAO Jialin, LI Baolin, YOU Yuan, et al. Analysis of fracturing fracture characteristics and production increase and stimulation strategy of continental shale in Fuxing Block[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2024, 31(6): 1066-1075.
- [116] 刘鹏林, 李军, 连威, 等. 浸泡条件下页岩力学及摩擦特征实验[J]. 断块油气田, 2024, 31(4): 734-739.
LIU Penglin, LI Jun, LIAN Wei, et al. Experiments on mechanics and friction characteristics of shale under soaking conditions[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2024, 31(4): 734-739.
- [117] 王团, 赵海波, 李奎周, 等. 一种考虑复杂孔隙结构的泥页岩地震岩石物理模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 45-55.
WANG Tuan, ZHAO Haibo, LI Kuizhou, et al. A mud shale seismic rock physics model considering complex pore structure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(3): 45-55.
- [118] 叶端南, 印兴耀, 王璞, 等. 砂泥岩储层岩石物理交会模板构建[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 758-768.
YE Duannan, YIN Xingyao, WANG Pu, et al. The build of rock physics cross plot template for sand shale reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 758-768.
- [119] 周欣, 巴晶, 符力耘, 等. 页岩脆性评价岩石物理模型及地震预测[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1736-1744.
ZHOU Xin, BA Jing, FU Liyun, et al. Rock physics model for shale brittleness evaluation and seismic prediction[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(5): 1736-1744.
- [120] 张琦斌, 郭智奇, 刘财, 等. 针对有机质微观特性的页岩储层岩石物理建模及应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2083-2091.
ZHANG Qibin, GUO Zhiqi, LIU Cai, et al. Rock physics model and its applications in the Longmaxi shale based on the quantification of microstructural properties of organic matter[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2083-2091.
- [121] BERRYMAN J G. Long-wavelength propagation in composite elastic media I. Spherical inclusions [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(6): 1809-1819.
- [122] 周巍. 孔隙形状对岩石弹性参数的影响研究[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第二十届年会论文集, 西安, 2004. 南京: 中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所, 2004: 642-643.
ZHOU Wei. Study on the influence of pore shape on rock elastic parameters [C]//Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, Xi'an, 2004. Nanjing: Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute Nanjing Petroleum Geophysical Research Institute, 2004: 642-643.
- [123] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363.
TANG Ying, XING Yun, LI Lezhong, et al. Factors affecting the fracturability of shale reservoirs and evaluation methods[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 356-363.
- [124] 赵迪斐, 焦伟伟, 魏源, 等. 页岩储层成岩作用及其对储层脆性的影响——以渝西地区五峰组—龙马溪组深层页岩为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 811-825.
ZHAO Difei, JIAO Weiwei, WEI Yuan, et al. Diagenesis of Shale Reservoirs and Its Influence on Reservoir Brittleness: A Case Study of the Deep Shale in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Western Chongqing Region[J]. Acta Sedimentologica Sinica,

- 2021, 39(4): 811–825.
- [125] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 208–213.
- ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 208–213.
- [126] 陈琳, 徐小丽, 徐银花. 温度与加载速率对岩石力学性质的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(1): 170–177.
- CHEN Lin, XU Xiaoli, XU Yinhua. Effect of temperature and loading rate on mechanical properties of rock [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(1): 170–177.
- [127] ESPINOZA W F, ZHANG Fengshou, DAI Sheng. Impacts of temperature on the mechanical properties of Longmaxi shale outcrops using instrumented nanoindentation [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2022, 30: 100348.
- [128] 关东帅. 温度作用下泥页岩力学性能及微观孔隙结构的演化规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- GUAN Dongshuai. Evolution law of mechanical properties and microstructure characteristics of shale under temperature [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [129] 曹峰. 温度对深部岩石力学性质的影响[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(5): 83–85.
- CAO Feng. Review of temperature impact of mechanical properties of deep rock [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 14(5): 83–85.
- [130] 程世忠, 盛茂, 任乐佳, 等. 储层温度对页岩微观力学性质的影响[J]. 钻采工艺, 2024, 47(1): 73–79.
- CHENG Shizhong, SHENG Mao, REN Lejia, et al. The influence of reservoir temperature on the micromechanical properties of shale [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(1): 73–79.
- [131] ELIYAHU M, EMMANUEL S, DAY-STIRRAT R J, et al. Mechanical properties of organic matter in shales mapped at the nanometer scale [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 294–304.
- [132] VALÈS F, NGUYEN MINH D, GHARBI H, et al. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France) [J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1/4): 197–207.
- [133] AL-BAZALI T, ZHANG Jianguo, CHENEVERT M E, et al. Factors controlling the compressive strength and acoustic properties of shales when interacting with water-based fluids [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 729–738.
- [134] 杨圣齐. 裂隙岩石力学特性研究及时间效应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- YANG Shengqi. Research on the mechanical properties of fractured rocks and analysis of time effects [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [135] CHEN Jianjun, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Experimental investigation of the effect of size on the mechanical behavior of shale [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2015, 89 (S1): 312–313.
- [136] 王冠民, 熊周海, 张婕. 岩性差异对泥页岩可压裂性的影响分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1080–1089.
- WANG Guanmin, XIONG Zhouhai, ZHANG Jie. The impact of lithology differences to shale fracturing [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1080–1089.
- [137] 龚训, 金之钧, 马新华, 等. 川南地区志留系龙马溪组页岩力学性质及微观破裂机理[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45 (5): 1447–1455.
- GONG Xun, JIN Zhijun, MA Xinhua, et al. Mechanical properties of the Silurian Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin and its microfracturing mechanisms [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1447–1455.
- [138] 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.
- BIAN Huiyuan, ZANG Xin, ZHANG Di, 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.
- [139] 闫博鸿, 赵建国, 肖增佳, 等. 潜江组页岩弹性性质分析及各向异性岩石物理建模[J]. 地球物理学报, 2024, 67(7): 2802–2819.
- YAN Bohong, ZHAO Jianguo, XIAO Zengjia, et al. Analysis of elastic properties and anisotropic rock physics modeling of Qianjiang Formation shale [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(7): 2802–2819.
- [140] BI Zhenhui, WANG Lei, YANG Chunhe, et al. Multiscale characterization of carbonate-rich shale: From micro structure to macro mechanical properties, a case study in Hongxing Block, China [J]. Fuel, 2024, 362: 130765.
- [141] 周浪, 马振乾, 黄青荣, 等. 红页岩纳米压痕细观力学特性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(11): 96–107.
- ZHOU Lang, MA Zhenqian, HUANG Qingrong, et al. A nanoindentation-based study on the micromechanical properties of red shales [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(11): 96–107.
- [142] LIU Yiwei, LIU Quansheng, FENG Gan, et al. Upscaling mechanical properties of shale obtained by nanoindentation to macroscale using accurate grain-based modeling (AGBM) [J]. Energy, 2025, 314: 134126.
- [143] 邹才能, 穆英, 潘松圻, 等. 流固耦合作用对地下储氢库盖层岩石微观力学性质的影响[J]. 天然气与石油, 2024, 42 (5): 106–113.
- ZOU Caineng, MU Ying, PAN Songqi, et al. Effect of fluid-solid coupling interaction on micromechanical properties of reservoir and cap rock in underground hydrogen storage [J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(5): 106–113.
- [144] LIANG Shuang, GAO Mingyu, SUN Shuo, et al. Investigation of mechanical properties of quartz and illite in shale using molecular dynamics simulation [J]. Natural Resources Research, 2023, 32 (6): 2945–2963.