

不同温压下页岩动态与静态弹性模量转换研究

王飞¹, 边会媛^{2,3}, 张永浩⁴, 段朝伟⁴, 赵伦⁵, 李建新⁵

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054;
3. 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021; 4. 中国石油集团测井有限公司,
陕西 西安 710077; 5. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:岩石动态与静态弹性参数存在差异,在应用时需要进行转换。目前国内外学者对岩石动态与静态弹性模量转换实验多在常温与常压下进行测试,没有考虑温度和压力对测试结果的影响,导致转换结果不能充分反映储层力学性质。本次研究以四川盆地上奥陶统和下志留统的五峰组-龙马溪组黑色页岩为研究目标,开展不同温度与压力条件下岩石动态与静态弹性力学实验,并对测试结果进行分析。结果表明:①当温度与压力一定时,动态杨氏模量测试值比静态杨氏模量测试值大,并且二者有一定的线性相关性;②页岩动态与静态杨氏模量均与温度、压力有关,温度一定时,页岩动、静态杨氏模量均随着围压的增大而增大;压力一定时,页岩动态与静态杨氏模量均随着温度升高而降低,并对不同温度、压力条件下动、静态弹性力学参数变化规律进行了机理分析;③建立了不同温度、压力条件下页岩动态与静态弹性参数转换模型,该模型可以将任意温度、压力条件下测试的动态弹性参数转换为储层条件下岩石的静态弹性参数,并能取得较好效果。利用本模型可以为研究区页岩气开采及注水压裂施工方案提供可靠的静态弹性模量,研究具有一定的实际意义。

关键词:杨氏模量;泊松比;动态与静态弹性模量;储层;页岩;五峰组;龙马溪组;四川盆地

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Experimental study on dynamic and static elastic modulus conversion for shale under different temperatures and pressures

Wang Fei¹, Bian Huiyuan^{2,3}, Zhang Yonghao⁴, Duan Chaowei⁴, Zhao Lun⁵, Li Jianxin⁵

(1. School of Geological and Surveying & Mapping Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, MLR, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 4. CNPC Logging Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China; 5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: There are differences between dynamic and static elastic parameters of shale. Thus when applied, they need to be converted. Most experiments carried out today by both domestic and foreign scholars in testing rock dynamic and static elastic modulus conversion are under normal temperature and pressure, without considering the influence of temperature and pressure on the results; consequently, the conversion results cannot fully display the mechanical properties of reservoirs. We studied the Wufeng-Longmaxi black shales of the Upper Ordovician and Lower Silurian in the Sichuan Basin, conducted mechanical experiments of rock dynamic and static elasticity under different temperatures and pressures, and analyzed the test results. The results show that: ① when the temperature and pressure are constant, the dynamic Young's modulus test value is larger than that of the static Young's modulus test, and the two have a certain linear correlation. ② The dynamic and static Young's moduli for shales are correlated with temperature and pressure. When the temperature keeps constant, the static and dynamic Young's moduli of shales increase with the increase of confining pressure. When the pressure is constant, the static and dynamic Young's moduli of shales decrease with the increasing temperature. Besides, the mechanism for the change of dynamic and static elastic mechanical parameters under different temperatures and pressures was analyzed. ③ The conversion model for dynamic and static elastic parameters of shales under dif-

收稿日期:2018-02-22;修订日期:2018-06-11。

第一作者简介:王飞(1983—),男,博士、讲师,测井解释与岩石物理实验。E-mail: wangfeijlu-147@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05030-002);国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室开放课题基金项目(KF2018-4);中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2016A-3603);中央高校基本科研业务费项目(310826172204)。

ferent temperatures and pressures was established. In applying the model, whatever the temperature and pressure, the dynamic elastic parameter obtained can be converted into the in-situ static one, and the results are reliable. This model can provide credible static moduli of elasticity for shale gas exploitation and hydraulic fracturing in the study area. All in all, the research is of certain practical significance.

Key words: Young's modulus, Poisson's ratio, dynamic and static elastic moduli, reservoir, shale, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, Sichuan Basin

全球经济发展对能源需求日趋旺盛,常规油气资源逐渐减少。页岩气作为一种潜力巨大的非常规能源,成为全球勘探开发的热点。在页岩气勘探开发中,弹性力学参数是页岩气开采及注水压裂工程所需要的关键性地质力学参数。在岩石力学分析及压裂施工方案中多采用岩石静态弹性模量。岩石静态弹性力学参数需要在实验室获得,岩心数据不具有连续性且实验成本较高,一般都采用动态法(测井和地震勘探)来获得储层的力学特性,由于动态与静态弹性参数存在差异,在实际应用时应进行转换。

国内外许多学者对岩石的动态与静态弹性参数进行了研究,Zisman等^[1]指出岩石动态与静态弹性模量之间存在差异。Weast^[2]指出动态与静态弹性模量比与所测岩石的硬度有关,岩石硬度越大,动态与静态弹性模量比越小,岩石硬度越小,动态与静态弹性模量比越大。由于动态与静态弹性模量存在差异,国外学者针对不同岩性建立了多种动态与静态弹性模量转换模型:如King^[3]建立了针对火山岩动态与静态弹性转换模型;Eissa^[4]与Lacy^[5]建立了针对沉积岩的动态与静态转换模型;Ameen^[6]与Asef^[7]建立了建立了针对石灰岩的动态与静态转换模型;葛洪魁^[8]从微观机理方面解释了动态与静态弹性模量的差异;孟昭平^[9]以塔里木盆地石炭系和三叠系砂岩为对象,进行了不同温度与压力条件下岩石力学三轴试验,获得了不同温度和不同围压条件下砂岩的变形与强度规律。边会媛^[10]研究了温度与压力对砂岩动态与静态弹性模量的影响,并提出了动态与静态弹性模量转换模型;于师建^[11]通过实验测试,发现煤岩动态与静态弹性参数之间存在较好的线性关系;盛英帅^[12]利用分类的方法建立了致密储层岩体的动态与静态弹性力学参数转换模型,邓辉等学者^[13-20]也对储层条件下动静弹性模量差异进了大量研究。

尽管国内外学者对岩石动态与静态弹性参数转换模型研究较多,但研究目标多集中在砂岩、煤岩、石灰岩和火山岩,目前针对页岩动态与静态弹性参数差异的研究还比较少;其次由于影响页岩弹性参数的因素很多,除页岩成分、结构和构造等内在因素外,温度与压力等

外在因素也起着重要作用,现有动态与静态转换模型对温度与围压的影响因素考虑较少。因此本次研究以四川盆地上奥陶统和下志留统的五峰-龙马溪组黑色页岩为研究目标,开展不同温度与围压条件下岩石动态与静态弹性参数实验,研究温度与围压对页岩动态与静态弹性参数差异的影响,建立了不同温度压力条件下动态与静态弹性模量转换模型,并利用该模型对实际资料进行处理,取得了较好效果。

1 实验方法

本次研究以四川盆地上奥陶统和下志留统的五峰组-龙马溪组黑色页岩为研究目标,开展不同温度、压力条件下页岩岩石弹性力学参数试验研究,确定页岩储层条件下动态与静态弹性力学参数转换模型,探讨动态与静态弹性力学参数控制因素,为页岩气可压裂性评价提供一些新的思路和方法。本次实验所用的仪器为AutoLab 1500。

1.1 实验样品

本次研究选用样品为四川盆地昭通地区五峰组-龙马溪组黑色页岩,呈灰黑至深黑色,主要矿物及含量见表1。样品为沿全直径钻井取心岩样,首先沿水平方向钻取直径1英寸的小柱塞样,然后将端面切磨平整,加工成长度为4~5 cm的标准圆柱状试样。由于该地区泥页岩脆性较强,天然裂缝发育,含泥质较多,遇水易开裂,加工时不能使用水冷却,采取长钻头低速干钻的方式钻取,以及热缩膜包裹紧再切磨的方式加工端面,最终加工出9块符合实验要求的岩样,基本参数见表2。

岩心烘干后选取3块岩样进行不同温度与压力条件下动态与静态弹性模量试验,研究页岩样动态与静

表1 四川盆地五组峰-龙马溪组页岩主要矿物及含量
Table 1 Major minerals and their contents of shales in the Wufeng-Longmaxi Formations, Sichuan Basin

矿物名称	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	铁白云石	粘土矿物
含量/%	30.9	1.7	4.3	16.2	7.7	1.6	6.8	32.4

表 2 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩物性参数

Table 2 Physical properties of shales in the Wufeng-Longmaxi Formations, Sichuan Basin

样品编号	井号	层位	岩性	井深/m	颗粒密度/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	备注
1	X1	龙马溪组	灰黑色灰质页岩	2 388.295	2.75	2.81	0.149	
2	X1	龙马溪组	灰黑色灰质页岩	2 393.330	2.75	2.94	0.022	
3	X2	五峰组	灰黑色页岩	2 203.170	2.64	3.13	—	裂纹
4	X3	龙马溪组	灰黑色页岩	1 401.060	2.73	3.38	—	裂开
5	X4	五峰组	灰黑色页岩	2 282.755	2.63	2.50	—	裂开
6	X4	五峰组	灰黑色页岩	2 285.545	2.67	1.65	0.043	
7	X1	龙马溪组	灰黑色页岩	2 469.155	2.72	2.46	0.176	
8	X1	龙马溪组	灰黑色页岩	2 507.345	2.66	6.03	—	裂纹
9	X2	龙马溪组	灰黑色泥岩	2 164.240	2.72	2.92	—	裂开

态弹性模量随温度与压力的变化规律,并建立动态与静态弹性模量转换模型。选取 6 块样品进行常温与常压条件下动态弹性模量测试及储层条件下动态与静态弹性模量测试,进而对动态与静态弹性模量转换模型进行验证。

1.2 实验装置

岩样三轴压缩实验及纵横波时差测量仪器为 NER 公司的 AutoLab 1 500 高温高压岩石声学及力学参数测量系统,该设备可以在不同温度与压力条件下进行动、静态弹性模量同步测试。动态测试采用一纵波换能器和两组偏振方向垂直的横波换能器;静态测试时该设备可输出最大轴向压力约为1 000 kN,采用应变片或 LVDT 差动变压器两种方式测量应变。

1.3 测量原理

在岩石力学研究过程中,经常用杨氏模量与泊松比表征岩石弹性参数,但岩石动态与静态泊松比之间的关系不明显,在实际中经常用动态与静态杨氏模量表征岩石的弹性参数。本次研究中,分别测试不同温度与压力条件下页岩的纵波速度、横波速度及岩石的体积密度,利用公式(1)可以计算不同测量条件下的动态杨氏模量。

$$E_d = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (1)$$

式中: E_d 为页岩动弹性模量, GPa; ρ 为页岩体积密度, g/cm³; v_p , v_s 分别为页岩纵、横波速度, km/s。

对岩样进行三轴压缩实验并同时测试岩样的纵横波时差。三轴压缩测量如图 1 所示,图中 3 条曲线分别代表轴向应变、径向应变和轴压。一次静态弹性常数测量进行 3 个加压循环,采集轴压和轴向与径向应变,计算岩样静态弹性常数。

静态杨氏模量为轴向应力与轴向应变的比值,在

实际资料处理时页岩静态弹性模量通过应力应变曲线的斜率获得,如图 2 所示,页岩的静态弹性模量 E_s 为 31.12 GPa。

2 储层条件下动态与静态弹性模量影响因素

岩石在不同的温度与压力条件下有不同的力学性质,因此在测量岩石动态与静态杨氏模量时要充分考虑温度与压力的影响。在储层条件下测量的岩石动态与静态弹性力学参数才与真实地层更加接近。开展不

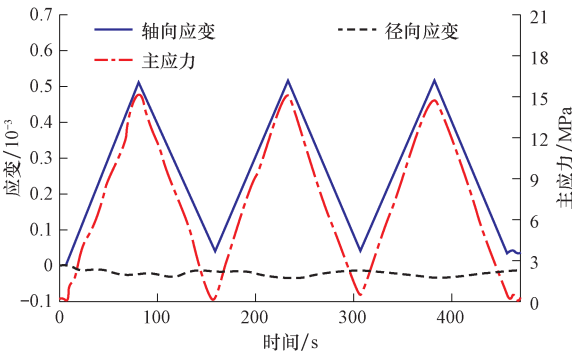


图 1 静态弹性模量测量过程

Fig. 1 Measurement of static elastic moduli

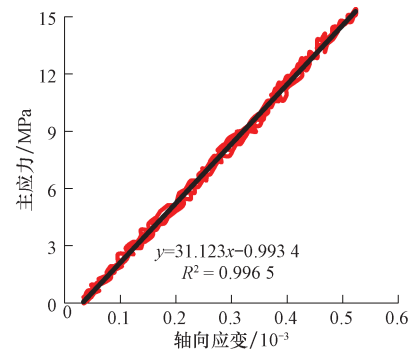


图 2 静态杨氏模量计算图

Fig. 2 Static Young's moduli

同温度与压力条件下岩石弹性力学实验,分析动态与静态弹性模量差异机理,建立合理的动态与静态弹性模量转换模型,可以为页岩储层的压裂施工提供了理论及实验依据。

本次研究选取了 3 块典型页岩样品,分别在 5 个温度 (20,40,60,80,100 ℃) 条件下测量岩石的动态与静态杨氏模量。在每个温度控制下,分别测试不同压力 (5,15,25,35,45 MPa) 条件下的动态与静态弹性模量,将 3 块岩心测试结果在不同温度与压力条件取平均值,建立储层不同温度与压力条件下动态与静态杨氏模量转换模型。

2.1 铝块动态与静态弹性模量测试

在常温常压条件下测试标准铝块的动态与静态弹性模量,实验结果见表 3。常温常压下铝块的绝对误差为 0.32 GPa,平均相对误差为 0.44%,动态与静态杨氏模量的误差均在测量误差范围内。因此,可以认为常温常压条件下测试的动态与静态杨氏模量相等。与铝块相比,页岩具有多孔隙性,且微裂隙较发育,这些因素会导致页岩岩石动态与静态弹性模量存在差异。

表 3 标准铝块弹性模量测试数据

Table 3 Experimental data of elastic moduli of the standard Aluminum block

状态	杨氏模量/GPa	泊松比
动态	72.24	0.345
静态	72.56	0.340
误差	0.44 %	1.45 %

2.2 不同温压条件下页岩动态与静态杨氏模量影响机理

利用 AutoLab 1500 仪器测试不同温度与围压条件下页岩的纵波速度和横波速度,利用 AP608 仪器测试页岩体积密度,利用公式(1)可以计算不同测量条件下的动态杨氏模量,实验结果见图 3。

可知,相同温度条件下,动态杨氏模量随着围压的增大而增大;相同压力条件下,温度越高,动态杨氏模量越小(图 3a,b)。究其原因,动态测试时,由于纵波与横波速度传播较快,且波长较长;动态测试杨氏模量时,波形可以绕过部分微裂隙,因此动态杨氏模量受微裂隙的影响较小。由于纵波与横波在岩石中传播速度

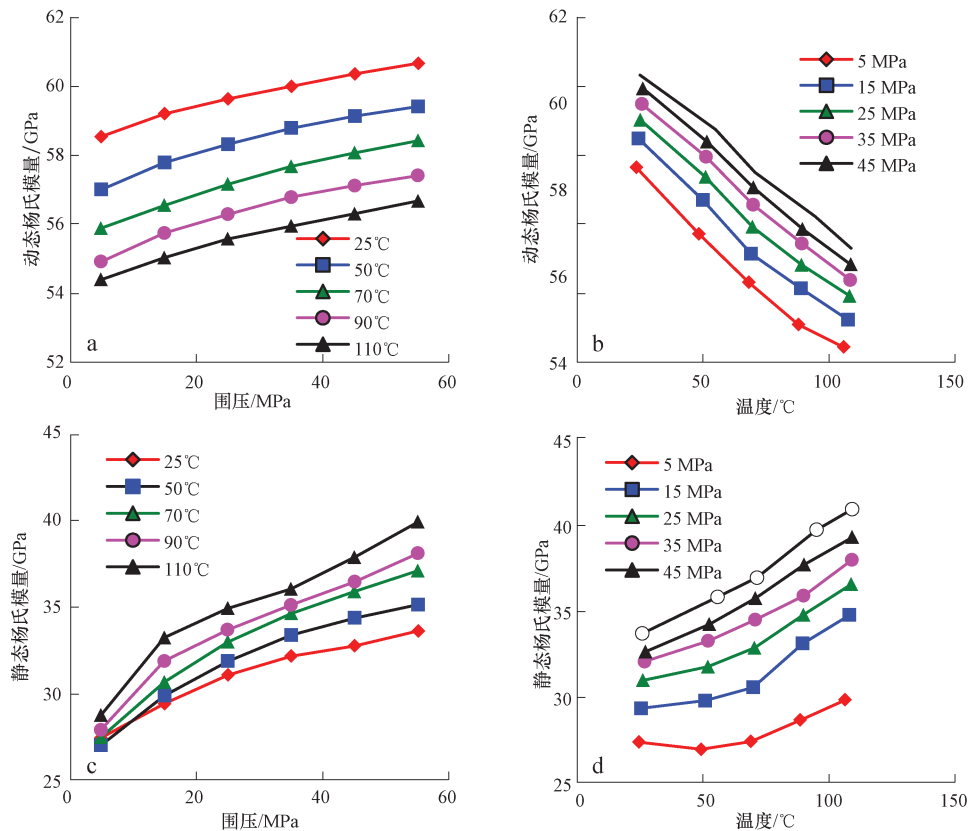


图 3 杨氏模量与温度、压力的关系曲线

Fig. 3 Young's modulus vs. temperature and pressure

- a. 不同温度下动态杨氏模量与围压之间的关系;b. 不同压力下动态杨氏模量与温度之间的关系;
- c. 不同温度下静态杨氏模量与围压之间的关系;d. 不同压力下静态杨氏模量与温度之间的关系

较快,因此动态弹性模量测试时岩石形变时间作用短,孔隙中的流体与外部环境不会发生流体交换,岩石相当于一个“封闭”系统。当围压增大时,岩石中的孔隙压缩会导致孔隙压力增大,孔隙流体不能排除,相当于为岩石提供了附加刚度,导致测试动态杨氏模量值增大。当温度升高时,由于不同矿物组分膨胀系数存在差异,因此岩石会产生新的微裂隙,进而导致动态杨氏模量变小。

利用 AutoLab 1500 仪器可以同时测量不同温度与围压情况下页岩的轴向应力和轴向应变,进而可以计算页岩的静态杨氏模量(图 3)。在相同温度下,随着围压增大,静态杨氏模量逐渐增大;相同围压条件下,随着温度升高,页岩静态杨氏模量逐渐减小(图 3c,d)。分析其机理,认为静态杨氏模量与岩石应变幅度的大小有直接关系,微裂隙能够直接影响岩石的应变幅度。当围压增大时,岩石微裂隙闭合,矿物颗粒与粘土颗粒结合更加紧密,岩石应变难度增大,静态杨氏模量增加;当温度升高时,岩石不同矿物热膨胀系数存在差异,抵消了部分压缩形变,减小了岩石轴向应变,进而导致页岩静态杨氏模量增大。

对不同温度与压力条件下测试的杨氏模量进行分析,结果见图 4。可知,相同温度、不同围压测量条件下,动态与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。分析认为动态测试时,测试纵波速度和横波速度选用的中心频率分别为 800 kHz 与 400 kHz,常温与常压下测试纵横波速度约为 4 000 m/s 与 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,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。

3 不同温压条件下页岩动态与静态弹性模量预测及转换模型

3.1 不同温压条件下页岩动态与静态弹性模量预测模型

常规岩石动态与静态杨氏模量通常在常温与常压条件下进行测试,但是储层条件下岩石力学性质与常温、常压条件下岩石力学性质存在差异,因此,需要进行转换才能得到储层条件下的页岩动、静态杨氏模量,校正公式为:

$$E(p,T) = E_0 + m_1 \ln(p/p_0) + n_1(T - T_0) \quad (2)$$

式中: p 为围压, GPa; p_0 为初始围压, GPa, 本次测试定为 5 GPa; T 为温度, °C; T_0 为初始温度, °C, 本次测试定为 25 °C; E_0 为常温常压条件下杨氏模量的测量值, GPa; $E(p,T)$ 为储层条件下杨氏模量的测试值, GPa; m_1 与 n_1 为拟合系数。对于动态弹性模量和静态弹性模量, 公式(2)中的系数不同, 如表 4 所示, 表中 E_d 为储层条件下动态杨氏模量, GPa; E_s 为储层条件下静态杨氏模量, GPa。

由图 5 可见, 经过转换后的杨氏模量与实测杨氏模量具有较高的相关性。

3.2 不同温压条件下页岩动态与静态弹性模量转换模型

岩石静态弹性模量是制定储层压裂改造方案的重要参数, 它反应了岩石在外力作用下发生形变的难易程度。在实际工程中, 一般获得的是常温与常压下测试的动态弹性模量。因此要充分考虑储层温度与压力的影响, 建立储层条件下动态与静态杨氏模量转换模型, 将获得的动态弹性模量转换成静态弹性模量, 见公式(3):

$$E_s(p,T) = aE_d(p,T) + b \ln \frac{p}{p_0} + c(T - T_0) + d \quad (3)$$

表 4 储层条件下页岩动态与静态弹性模量预测模型参数
Table 4 Parameters of prediction model for elastic and static moduli of shales at different reservoir conditions

参数	m_1	n_1	E_0	R^2
E_d	0.900	-0.053	58.50	0.976
E_s	2.930	0.029	27.40	0.918

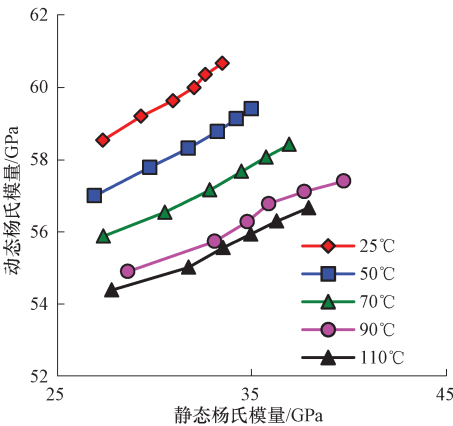


图 4 不同温压下动态与静态杨氏模量的关系曲线
Fig. 4 Dynamic Young's moduli vs. static Young's moduli under different temperatures and pressures

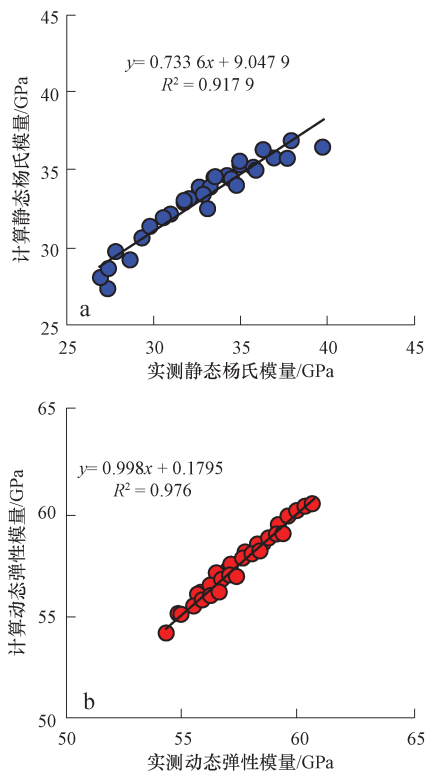


图 5 杨氏模量预测值与实验值的关系曲线
Fig. 5 The predicted values vs. the experimental values of Young's moduli

a. 计算静态杨氏模量与测试静态杨氏模量之间的关系;
b. 计算动态弹性模量与测试动态模量之间的关系

式中: p 为围压, GPa; p_0 为初始围压, GPa; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为初始温度, $^{\circ}\text{C}$; $E_s(p, T)$ 和 $E_d(p, T)$ 分别为温度 T 、围压 p 时的静态和动态杨氏模量测量值, GPa; a, b, c, d 为拟合系数, 拟合结果见表 5。

图 6 为储层条件下页岩动态与静态杨氏模量转换曲线, 转换静态杨氏模量与实测杨氏模量具有很高的相关性。

4 实际资料处理

分别测试 6 块岩心样品常温与常压下动态弹性模

量以及储层条件下动态与静态弹性模量, 利用动、静态转换模型对其进行预测, 结果见表 6。分别利用公式(4)和公式(5)计算各岩石样品的平均绝对误差以及平均相对误差。

模型的平均绝对误差计算方法为:

$$Y_{\text{绝对误差}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - X_{\text{计算}}| \tag{4}$$

式中: N 为样本个数; X_i 为测试含油率, %; $X_{\text{计算}}$ 为计算含油率, %。

模型的平均相对误差计算方法为:

$$Y_{\text{相对误差}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_i - X_{\text{计算}}|}{X_i} \tag{5}$$

经过计算, 预测储层条件下动态弹性模量的绝对误差为 1.34 GPa, 平均相对误差为 0.024; 预测储层条件下静态弹性模量的绝对误差为 2.45 GPa, 平均相对

表 5 储层条件下页岩动态与静态弹性模量转换模型参数

Table 5 Transformative model parameters of dynamic and static moduli of shales at different reservoir conditions

参数	a	b	c	d	R^2
E_s	1.0	2.672	0.096	-32.988	0.922

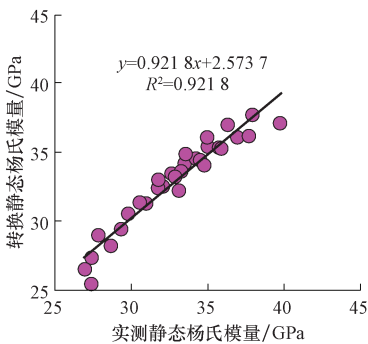


图 6 转换静态弹性模量与实测静态弹性模量关系
Fig. 6 Relationship of experimental and converted values of static elastic moduli

表 6 页岩样品弹性模量测试数据及储层条件下转换结果

Table 6 Experimental data of elastic moduli of shale samples and the conversion results at different reservoir conditions

岩心 编号	初始围压/ MPa	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	初始温压 测试 E_d	储层围压/ MPa	储层温度/ $^{\circ}\text{C}$	储层条件测试 E_d /GPa	储层条件测试 E_s /GPa	储层条件转换 E_d /GPa	转换 E_s 值/ GPa
1	4.98	28.20	52.69	21.00	28.80	54.46	23.30	53.78	24.99
2	4.95	29.30	52.13	34.00	31.90	53.81	22.52	53.49	26.29
3	4.97	24.98	53.30	36.00	28.60	57.31	28.43	54.88	27.52
4	4.95	24.41	51.99	36.10	27.90	56.60	24.49	53.62	26.19
5	5.02	25.01	47.43	36.20	28.30	50.55	24.75	49.04	21.66
6	4.99	24.80	59.08	36.10	27.00	60.93	29.71	60.75	33.24

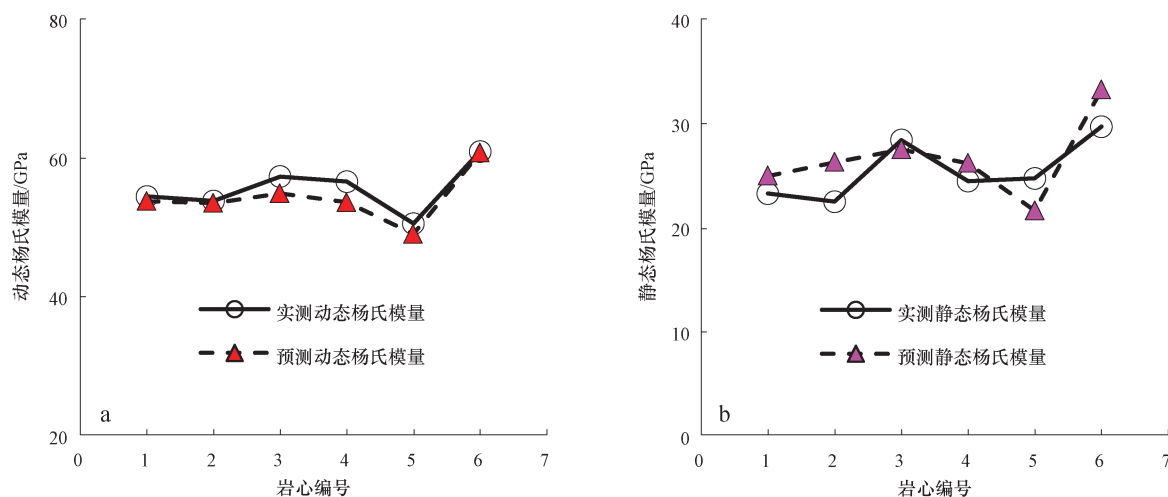


图7 页岩动态与静态弹性模量预测结果

Fig. 7 Prediction results of dynamic and static elastic moduli of shales

a. 预测动态弹性模量与测试动态弹性模量关系; b. 预测静态弹性模量与测试静态弹性模量关系

误差为 0.095, 模型具有较好的预测效果, 对比结果见图 7。

5 结论

1) 不同温压条件下测试同一批样品的动态与静态杨氏模量, 测试结果表明: 当温度与压力一定时, 动态杨氏模量测试值比静态杨氏模量测试值大, 并且二者有一定的线性相关性。

2) 相同温度条件下, 动态杨氏模量随着围压的增大而增大; 相同压力条件下, 温度越高, 动态杨氏模量越小; 在相同温度下, 随着围压增大, 静态杨氏模量逐渐增大; 相同围压条件下, 随着温度升高, 页岩静态杨氏模量逐渐减小; 动、静态杨氏模量测试结果受温度与压力的综合影响。

3) 利用本模型可以对常温与常压条件下动态弹性模量转换为储层条件下静态弹性模量, 结果显示本模型具有较好的预测效果。

参 考 文 献

- [1] Zisman W A. Comparison of the statically and seismologically determined elastic constants of rocks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1933, 19(7): 680-686.
- [2] Weast R C. Handbook of chemistry and physics, sixtysixth edition [M]. Boca Raton, Florida: Chemical Rubber Publishing Company, 1986: 23-26.
- [3] King M S. Static and dynamic elastic properties of igneous and metamorphic rocks from the Canadian shield [C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts;

Pergamon, 1983, 20(5): 237-241.

- [4] Eissa E A, Kazi A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks [C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts: Pergamon, 1988, 25(6): 479-482.
- [5] Lacy L L. Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs [C]//SPE-38716-MS. SPE annual technical conference and exhibition. San Antonio, Texas, 1997.
- [6] Ameen M S, Smart B G D, Somerville J M, et al. Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(4): 430-444.
- [7] Asef M R, Farokhrouz M. Governing parameters for approximation of carbonates UCS [J]. Electron J Geotech Eng, 2010, 15: 1581-1592.
- [8] 葛洪魁, 陈颢, 林英松. 岩石动态与静态弹性模量差别的微观机理 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25(4): 34-36.
- Ge Hongkui, Chen Yong, Lin Yingsong. Microscopic mechanism of difference between static and dynamic elastic parameters of rock [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(4): 34-36.
- [9] 孟召平, 李明生, 陆鹏庆, 等. 深部温度、压力条件及其对砂岩力学性质的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(06): 1177-1177.
- Meng Zhaoping, Li Mingshegn, Lu Pengqing, et al. Temperature and pressure under deep conditions and their influences on mechanical properties of sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(06): 1177-1177.
- [10] 边会媛, 王飞, 张永浩, 等. 储层条件下致密砂岩动静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 Huiyuan, Wang Fei, Zhang Yonghao, et al. Experimental study of dynamic and static elastic parameters of tight sandstones under reservoir conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and En-

- gineering, 2015, 34(s1): 3045–3054.
- [11] 于师建, 杨永杰, 刘伟韬. 煤岩动静力学参数关系试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(1): 17–21.
Yu Shijian, Yang Yongjie, Liu Weifan. Experimental study on the relationship between dynamic and static mechanical parameters of coal [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(1): 17–21.
- [12] 盛英帅, 张玉广, 顾明勇, 等. 原位条件下致密储层岩体力学动静参数校正[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 109–116.
Sheng Yingshuai, Zhang Yuming, Gumingyong, et al. Static and dynamic mechanical parameter calibration of tight reservoir rock mass under in-situ condition [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 109–116.
- [13] 邓辉, 张咪, 邓通海, 等. 高温高压作用下致密砂岩三轴压缩试验[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1172–1179.
Deng Hui, Zhang Mi, Deng Tonghai, et al. A triaxial compression test of tight quartz sandstone under high temperature and high confining pressure [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1172–1179.
- [14] 李双建, 金之钧, 袁玉松, 等. 模拟地层条件下泥岩三轴应力实验及其油气意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 598–605.
Li Shuangjian, Jin Zhiyun, Yuan Yusong, et al. Triaxial stress experiment of mudstone under simulated geological conditions and its petroleum significance [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 598–605.
- [15] 李生杰. 岩性、孔隙及其流体变化对岩石弹性性质的影响[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 760–764.
Li Shengjie. Influence of lithology, porosity and variation of pore fluid saturation on rock elastic property [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 760–764.
- [16] 熊力坤, 王升, 徐烽淋, 等. 涪陵焦石坝区块页岩动静弹性模量转换关系研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 40–44.
Xiong Likun, Wang Sheng, Xu Fenglin, et al. Dynamic and static elastic modulus conversion for Shale in the Jiaoshiba Block, Fuling area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 40–44.
- [17] 李琼, 何建军, 陈杰. 地层压力条件下沁水盆地煤岩动静弹性参数同步超声实验研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2897–2903.
Li Qiong, He Jianjun, Chen Jie. Simultaneous ultrasonic experiment of dynamic and static parameters of coal under formation pressure conditions in Qinshui Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(7): 2897–2903.
- [18] Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations [J]. SPE Drilling & Completion, 2001, 16(02): 68–73.
- [19] Ohen H A. Calibrated wireline mechanical rock properties model for predicting and preventing wellbore collapse and sanding [C] // SPE European formation damage conference. Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [20] Canady W J. A method for full-range young's modulus correction [C] // SPE-143604–MS. North American unconventional gas conference and exhibition. The Woodlands, Texas, USA, June, 2011.

(编辑 董立)

(上接第963页)

- [23] Barbier M, Hamon Y, Callot J P, et al. Sedimentary and diagenetic controls on the multiscale fracturing pattern of a carbonate reservoir: The Madison Formation (Sheep Mountain, Wyoming, USA) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 29(1): 50–67.
- [24] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933–940.
Ni Xinfeng, Yang Haijun, Shen Anjiang, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim Basin and their controlling effects on karst reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 933–940.
- [25] 侯贵廷, 潘文庆. 裂缝地质建模及力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 112–190.
- [26] 戴俊生, 汪必峰, 马占荣. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4): 393–395.
Dai Junsheng, Wang Bifeng, Ma Zhanrong. Research on cracking principles of brittle low-permeability sands [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 393–395.
- [27] 季宗镇, 戴俊生, 汪必峰, 等. 构造裂缝多参数定量计算模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 24–29.
Ji Zongzhen, Dai Junsheng, Wang Bifeng, et al. Multi-parameter quantitative calculation model for tectonic fracture [J]. Journal of China university of Petroleum, 2010, 34(1): 24–29.
- [28] 季宗镇, 戴俊生, 汪必峰. 地应力与构造裂缝参数间的定量关系[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 68–73.
Ji Zongzhen, Dai Junsheng, Wang Bifeng. Quantitative relationship between crustal stress and parameters of tectonic fracture [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 68–73.
- [29] 王珂, 戴俊生, 冯阵东, 等. 砂泥岩间互地层等效岩石力学参数计算模型及其应用[J]. 地质力学学报, 2013, 19(2): 143–151.
Wang Ke, Dai Junsheng, Feng Zhendong, et al. Calculating model of equivalent rock mechanical parameters of sand-mud interbed and its application [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19(2): 143–151.
- [30] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53–60.
You Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's Modulus of rock specimen [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53–60.

(编辑 张亚雄)