

原位条件下致密储层岩体力学动静态参数校正

盛英帅¹, 张玉广², 顾明勇², 梁耀欢¹, 师永民¹, 方媛媛¹, 杜书恒¹

(1. 北京大学 石油与天然气研究中心, 北京 100871; 2. 中国石油 大庆采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163453)

摘要:为更加准确测量储层岩体力学动、静态参数, 归纳两者关系并探讨差异的影响因素, 对岩体地下所处条件(即综合考虑围压、孔隙压力、温度和饱和流体的影响)进行了恢复, 同步测量了49块不同地区储层岩样的动、静态参数。结果表明:①在原位条件下动、静态杨氏模量相关性好;②对于低渗透储层, 动态杨氏模量普遍大于静态, 而且随着岩样致密程度的增大差异变大;③针对不同样品, 根据物性细分, 各自建立动、静态参数图版, 大大地提高了相关性和准确性。最后根据中国陆相松辽、鄂尔多斯两个大型盆地低渗透储层样品物性的差异, 建立了原位条件下杨氏模量动、静态校正图版, 为进一步建立低渗透油气藏岩体力学参数场和地应力场, 优化压裂参数设计和提高施工成功率提供较可靠的资料。

关键词:原位条件; 动、静态参数; 杨氏模量; 岩体力学; 致密砂岩

中图分类号:TE21

文献标识码:A

Static and dynamic mechanical parameter calibration of tight reservoir rock mass under in-situ condition

Sheng Yingshuai¹, Zhang Yuguang², Gu Mingyong², Liang Yaohuan¹, Shi Yongmin¹, Fang Yuanyuan¹, Du Shuheng¹

(1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Production Engineering & Research Institute of Daqing Oilfield Company Limited, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China)

Abstract: In order to accurately measure static and dynamic mechanical parameters of reservoir rock mass, establish their relation and discuss the factors that result in their differences, dynamic and static mechanical parameters of 49 reservoir rock samples were synchronously measured under simulated in-situ reservoir conditions, with the influences of confining pressure, pore pressure, temperature and saturated fluids being considered. The results show that static and dynamic Young's modulus correlate well under in-situ conditions. For low permeability reservoir, dynamic Young's modulus is generally greater than the static, and their difference will get greater with the increasing of dense degree. For different samples, building dynamic and static Young's modulus plates based on subdivision of physical properties can greatly improve the relevance and accuracy. Finally, the dynamic and static Young's modulus calibration plates under in-situ conditions are built according to the differences of physical properties between samples from the low permeability reservoir rocks in Songliao and Ordos basins. The plates not only can be used to establish mechanical parameter field and stress field of low permeability reservoir rock mass, but also provides more reliable data for optimizing the design of fracturing parameters and improve the success rate of operation.

Key words: in situ condition, dynamic and static parameter, Young's modulus, rock mass mechanics, tight sandstone

岩体力学性质在钻井、水力压裂、水平井的开发等实际应用中,起着重要作用^[1-4]。岩体力学基本参数包括杨氏模量、泊松比、比奥特(Biot)系数等。岩石所处的环境如温度、围压、孔隙压力、饱和流体等会对岩体力学动、静参数有着不同程度的影响^[5-10]。因此,恢复还原至岩石在地下所处条件,测量的岩石力学动、静态参数更接近真实值、更可靠。

根据地下工程的特点,在实际工程和生产中应采用岩石静态弹性参数,因此利用测量成本低、获取数量大的动态杨氏模量必须转换成静态杨氏模量。在研究岩石力学性质的过程中,动、静态校正至关重要。在岩石力学动、静态参数校正方面,前人也做了较多的工作^[11-20],但是,前人不管在测量砂岩、泥岩和石灰岩等样品的岩石力学动、静态参数时,较多地考虑围压、温

收稿日期:2015-09-15;修订日期:2016-01-20。

第一作者简介:盛英帅(1989—),男,硕士研究生、低渗透储层岩石力学。E-mail:shengyingshuai@163.com。

通讯作者简介:师永民(1966—),男,研究员,博士,油气田评价与开发。E-mail:sym@vip.163.com。

度条件的影响,而忽略了孔隙压力和流体饱和度对参数的影响。岩石力学动、静态参数的校正公式,相关系数 R 一般都在 0.9 以下。因此,在测量岩石杨氏模量时,应考虑岩石在地下所处的更多条件。岩石动、静态杨氏模量的校正,应通过分类等方法建立相关性更强的图版和校正公式。

随着石油开采难度加大,更加重视施工的准确度和有效性。工程地质对岩体力学精度要求增大,建立更贴近真实情况的油藏岩体力学参数场和地应力场,是不断发展的趋势。

针对上述国内外研究现状和发展趋势,本文选取松辽盆地泉头组、鄂尔多斯盆地长 6 段共计 49 块致密砂岩储层样品,开展原位条件下(恢复至岩样地下所处围压、孔隙压力、流体和温度条件)动、静态杨氏模量测定工作。根据物性分类,得出较为接近地下真实值的动、静态校正图版,用以指导建立油藏岩体力学参数场和地应力场。

1 原位条件下动、静态力学参数测定

1.1 实验装置和实验方法原理

实验之前先将岩样做洗油处理,再进行油水两相饱和至实验设计的要求。岩石动、静态弹性参数同步测量的装置如图 1 所示,三轴高压釜(图 2)是本实验设备的核心部分,将岩样(规格是 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$)放置在三轴高压釜中,利用耐油橡胶密封,通过人工和计算机调节到实验设计的围压、孔隙压力和温度条件。利用计算机的控制操作对岩样施加轴压。在岩样轴向两端施加超声波,测定超声波在岩样中的时间,算出纵

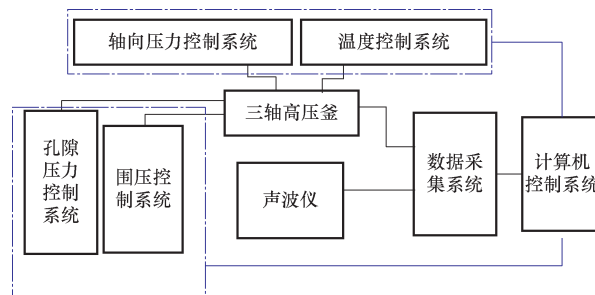


图1 测试系统构成

Fig. 1 Test system of dynamic and static mechanical parameters

横波速度。

该装置可以对岩样施加围压、孔隙压力、温度,最大轴压可以加到 150 kN,最大围压可以加到 140 MPa,可以同步测算岩样力学的静态和动态参数,从而降低因外界条件的改变对实验结果的影响,减小实验误差。

杨氏模量表征岩体弹性变形程度的一个重要的参数,在原位条件下对岩心进行三轴压缩实验,开展岩体力学动、静态参数同步测量。

1) 应用应变控制方法加轴向载荷,得到的应力应变曲线,算出岩心的静态杨氏模量。

杨氏模量的是正应力与正应变的比值,公式可以记为

$$E_s = \sigma / \varepsilon \quad (1)$$

式中: E_s 表示静态杨氏模量, MPa; σ 为正应力, MPa; ε 为正应变, %。

2) 根据测得的纵波速度和横波速度计算动态杨氏模量 E_d 。

$$E_d = \rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2) / (v_p^2 - v_s^2) \quad (2)$$

式中: E_d 为动态杨氏模量, MPa; ρ 为岩石的密度, g/cm^3 ; v_s 和 v_p 分别表示横、纵波波速, m/s 。

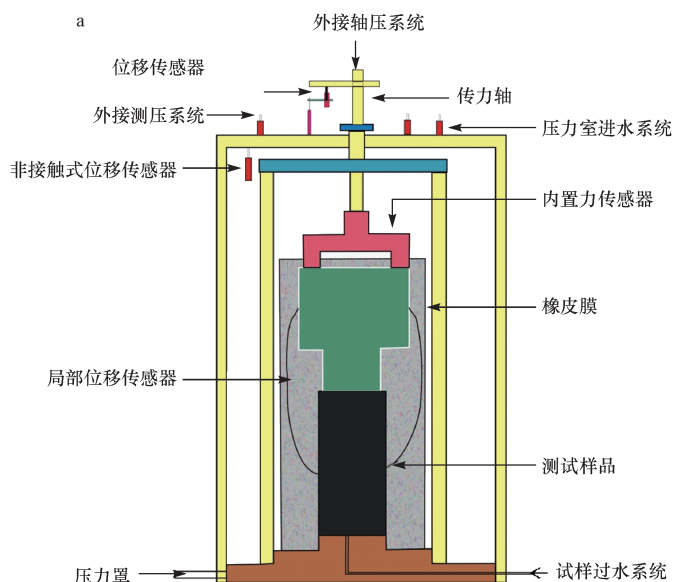


图2 三轴高压釜

Fig. 2 Three axis autoclave

1.2 实验结果

选取的 49 块不同储层岩样来自鄂尔多斯盆地和松辽盆地中国两大陆相沉积盆地。恢复至岩石的原位

条件(还原岩样在地下所处的围压、孔隙压力、温度和流体),同步测量的动、静态杨氏模量,具体的实验数据和实验条件如表 1 所示,两者有较好的相关关系,动态杨氏模量普遍大于静态杨氏模量。

表 1 实验条件和实验结果
Table 1 Results and conditions of test

样号	围压/MPa	孔隙压力/MPa	温度/℃	密度(饱和)/(g·cm ⁻³)	静态杨氏模量/GPa	动态杨氏模量/GPa
9-7 X	25	20	80	2.52	13.97	23.90
9-7 Y	33	20	80	2.53	14.43	23.99
9-7 Z	41	20	80	2.49	12.58	19.20
Q1 X	21	18	55	2.56	22.93	44.56
Q1 Y	27	18	55	2.57	39.30	48.26
Q1 Z	33	18	55	2.51	26.23	36.90
G1 X	20	16	55	2.44	37.27	36.29
G1 Y	27	16	55	2.53	18.03	19.18
G1 Z	34	16	55	2.54	27.73	43.55
1-1-1	32	20	90	2.45	15.18	27.08
1-1-2	32	20	90	2.51	16.79	32.30
1-1-3	32	20	90	2.53	16.48	31.38
1-1-4	32	20	90	2.50	19.02	35.11
1-2-1	32	20	90	2.27	17.98	17.63
1-2-2	32	20	90	2.26	18.48	22.14
1-2-3	32	20	90	2.27	17.40	21.02
1-2-4	32	20	90	2.24	17.25	19.64
18-1	20	10	80	2.64	19.22	29.77
18-2	40	10	80	2.67	26.05	47.20
4807-1	20	10	80	2.39	14.48	18.80
4807-2	40	10	80	2.33	16.12	19.44
39-1	20	10	55	2.49	22.54	38.45
39-2	40	10	55	2.47	25.03	40.40
39-3	20	10	55	2.52	19.66	31.51
54-1	40	10	55	2.51	23.15	32.91
27-1	40	10	70	2.62	30.25	47.47
54-2	20	10	70	2.47	15.18	29.35
3-1	20	10	70	2.25	18.97	28.70
3-3	40	10	70	2.25	19.10	34.68
4-1	20	10	70	2.59	32.41	40.81
4-3	40	10	80	2.57	34.18	47.77
6-1	20	10	80	2.53	27.51	31.56
6-3	40	10	80	2.55	36.07	45.77
84-X	13	5	45	2.61	30.98	40.76
84-XY	13	5	45	2.62	33.48	43.76
84-Y	13	5	45	2.62	27.73	43.00
84-Z	13	5	45	2.63	24.91	33.58
153-X	9	4	45	2.51	30.47	41.08
153-XY	9	4	45	2.51	33.68	40.20
153-Y	9	4	45	2.52	28.10	39.94
153-Z	9	4	45	2.47	23.74	29.39
203-X	10	5	45	2.38	19.71	30.30
203-XY	10	5	45	2.39	22.67	29.94
203-Y	10	5	45	2.39	21.90	29.75
203-Z	10	5	45	2.36	22.30	26.50
204-X	10	5	45	2.47	21.09	32.71
204-XY	10	5	45	2.47	18.36	31.71
204-Y	10	5	45	2.49	16.80	32.96
204-Z	10	5	45	2.49	16.50	23.83

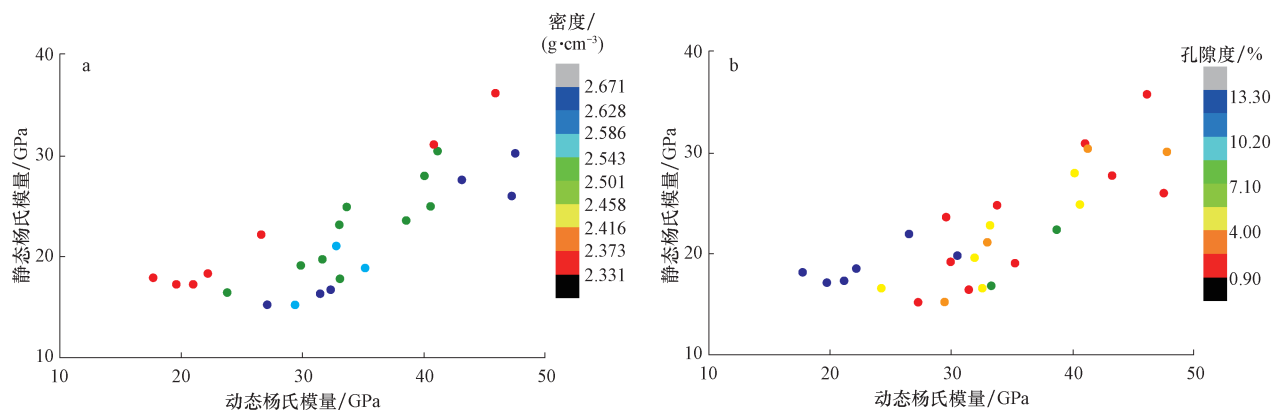


图3 动、静态杨氏模量和物性关系

Fig. 3 Relationship of static and dynamic Young's modulus with physical porosities

a. 动、静态杨氏模量和密度关系; b. 动、静态杨氏模量和孔隙度关系

随机选取部分样品,分别测定孔隙度、渗透率和密度,利用密度与动、静态参数建立图版(图3a),随岩样密度的增大,动态杨氏模量和静态杨氏模量相差越大。当密度增大时,点越偏离对角线,对角线上是动、静态杨氏模量相等的点。当密度达到一定值时,动态杨氏模量要远大于静态杨氏模量。

利用孔隙度和岩石动、静态杨氏模量建立图版(图3b)。孔隙度和动、静态杨氏模量之间差异间也有较好的相关性,即随着孔隙度的减小,动态杨氏模量逐渐偏离静态杨氏模量。

对于致密储层砂岩,物性较好的岩样,即密度越小、孔隙度越大的样品,原位条件下测量的动态杨氏模量略大于静态。物性差的即密度越大、孔隙度越小的样品,动态杨氏模量远大于静态,两者相差甚至接近2倍。随着岩石致密程度的增大,动、静态杨氏模量差异增大。

2 致密储层动、静态力学参数差异机制

静态杨氏模量指的是应力-应变曲线中近似直线部分的斜率,表示应力与应变变化量之间的比值,受实验条件的影响小,具有明确的力学含义。

为了表征物性和动、静态杨氏模量差值的关系,分别用孔隙度、密度与动、静态杨氏模量差值做回归,如图4和图5所示。两者之差和孔隙度及密度相关性好。表明动、静态杨氏模量的差值随物性变差增大。

动态杨氏模量是根据声波的纵横波速度测算[公式(2)],速度在岩石中传播时存在频散现象。速度频散是指地震波在实际地层中传播时速度随频率变化的现象,其往往伴随着振幅随着距离增加而减弱的特征,即地震波的衰减^[21]。

任科英研究了岩石物性对声学速度频散现象的影

响,提出物性较好的样品,频散现象较小,而对物性较差的样品,频散现象较为明显^[22]。对于孔隙度小于10%,渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品(图6,图7),岩性致密,矿物成分除骨架矿物石英、长石外,也赋存大量的粘土矿物。物性差的样品频散现象较明

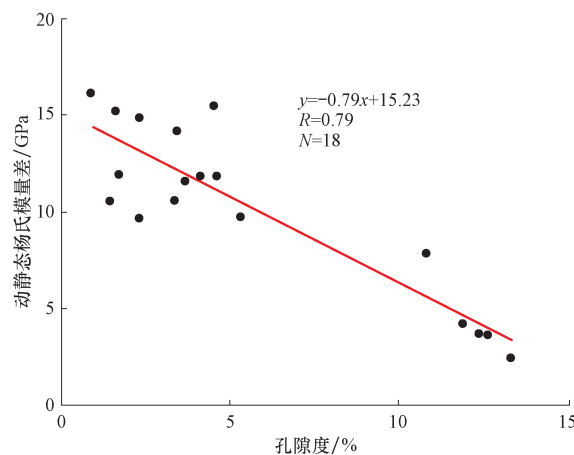


图4 孔隙度和动、静态杨氏模量差的关系

Fig. 4 Porosity vs. difference between dynamic and static Young's modulus

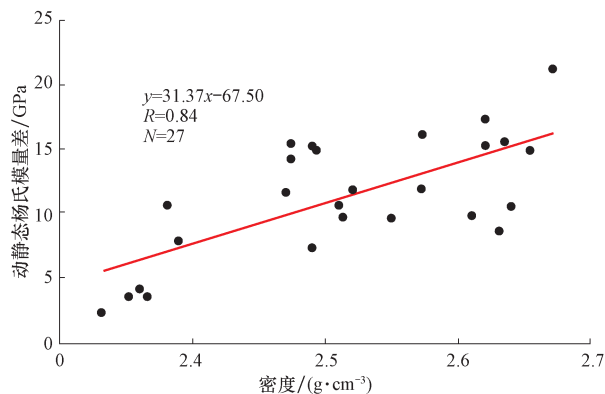


图5 密度和动、静态杨氏模量差的关系

Fig. 5 Density vs. difference between dynamic and static Young's modulus.

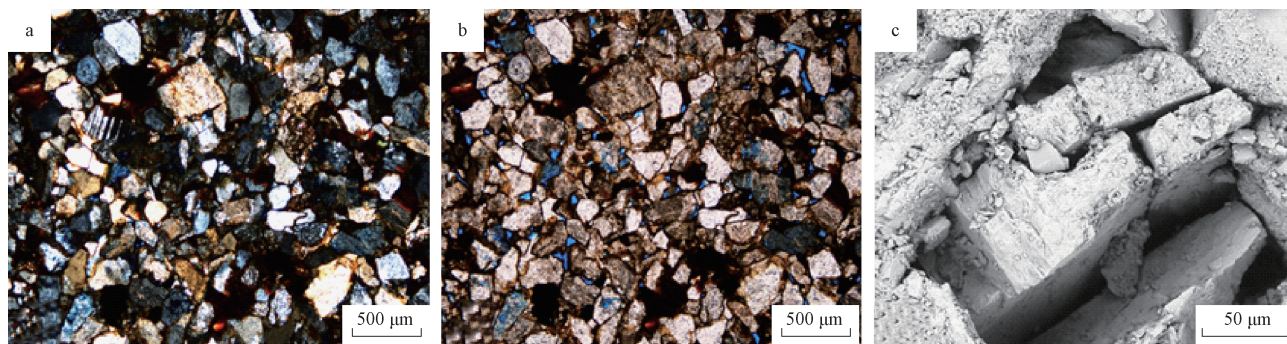


图6 物性好样品照片

Fig. 6 Good reservoir sample photos

a. 单偏光镜下铸体薄片; b. 正交偏光镜下铸体薄片; c. 扫描电镜

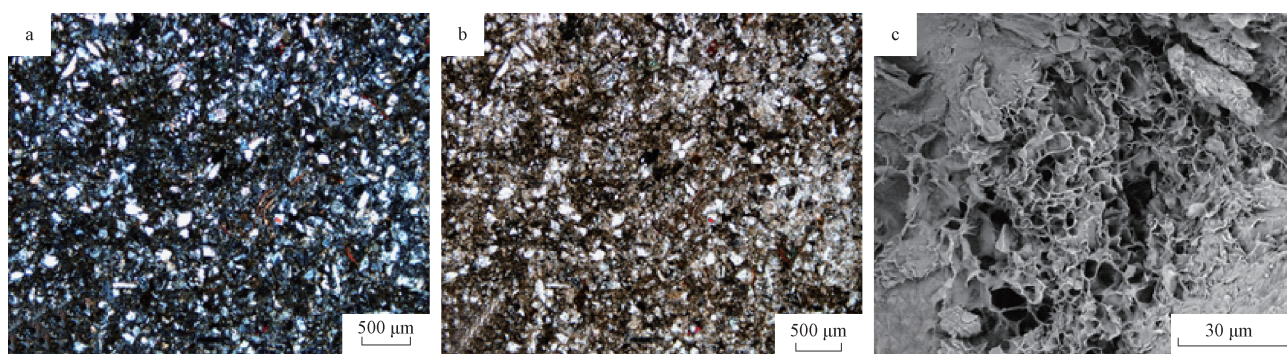


图7 物性差样品照片

Fig. 7 Poor reservoir sample photos

a. 单偏光镜下铸体薄片; b. 正交偏光镜下铸体薄片; c. 扫描电镜

显,是动态杨氏模量和静态杨氏模量相差大的重要原因。

储层岩石作为一种多孔介质,孔隙中赋存流体。孔隙流体特征也是导致动、静态杨氏模量差异的原因。岩石受到外力的作用时引起孔隙变形,致使孔隙压力增大。考虑到岩石在很慢的“准静态”过程中有充分的时间供给孔隙流体以达到平衡,即在测算出岩石静态杨氏模量视为“排水”状态。对于岩石动态杨氏模量,因测试过程进行得很快,导致孔隙流体不能与外界发生流体的交换,岩石处于“不排水”的状态,孔隙压力升高,相当于一个“封闭”系统,孔隙流体为岩石提供了附加刚度,岩石有效模量增大,这导致岩石的动态杨氏模量大于静态杨氏模量^[23]。

岩样的致密性对动、静态杨氏模量的影响,随致密性的增大,动态杨氏模量逐渐偏离静态杨氏模量。致密性主要由岩石孔隙度、渗透率和密度3个物理量表征。利用此3个物理量对致密储层岩石分为3类,在原位条件下每一类动、静态杨氏模量回归公式不同,具体的分类和回归公式如下。

第一类:孔隙度大于10%、渗透率大于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、密度小于 2.40 g/cm^3 动、静态杨氏模量关系

图版:

$$E_s = 0.912E_d - 1.019 (N = 12, R = 0.955) \quad (3)$$

第二类:孔隙度5%~10%、渗透率 $(0.05 \sim 0.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、密度 $2.40 \sim 2.53 \text{ g/cm}^3$ 动、静态杨氏模量关系图版:

$$E_s = 0.953E_d - 8.318 (N = 23, R = 0.975) \quad (4)$$

第三类:孔隙度小于5%、渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、密度大于 2.53 g/cm^3 动、静态杨氏模量关系图版:

$$E_s = 0.841E_d - 10.110 (N = 14, R = 0.935) \quad (5)$$

孔隙度、渗透率和密度对致密储层岩石力学动、静态参数有较大的影响,但是通过三者划分储层类型,会有不可兼顾的情况,因此存在争议。通过进一步的研究和探索,得到孔隙度和动、静态杨氏模量的关系(图8)

分别对动态杨氏模量和静态杨氏模量取以孔隙度(Φ)为底的对数,对两个结果做回归,得出较好的线性关系: $\log_{\Phi} E_s = 0.8589 \log_{\Phi} E_d + 0.1627$,最后对两边同时取孔隙度的指数,可以得到动、静态杨氏模量的校正关系式:

$$E_s = (0.8589 \log_{\Phi} E_d + 0.1627)^{\Phi} \quad (6)$$

在石油开发压裂和施工的初期,通过测井技术,可

测算出储层岩石在原位条件下的杨氏模量和孔隙度。利用上式的方程算出静态杨氏模量。算出的结果会更准确、更可靠。

3 讨论

储层岩石是一种多孔介质非均质性的天然材料,影响岩石动、静态力学性质的因素很多,包括岩石类型、围压、孔隙压力、温度以及孔隙类型等。

石油开发的中后期,随着石油不断被采出,岩石初始的平衡被打破(孔隙压力减小、含油饱和度降低);注水开发会使岩体的孔隙压力增大、含水饱和度和增大。以上条件的改变,岩体力学动、静态参数的差异如何?

在上述49块样品中随机选取了3块岩心编号1,2,3,孔隙度分别为11.10%,10.30%,13.00%;渗透率分别为 0.15×10^{-3} , 0.26×10^{-3} , $0.62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;密度分别为2.43,2.60,2.32 g/cm³。分别依次变化孔隙

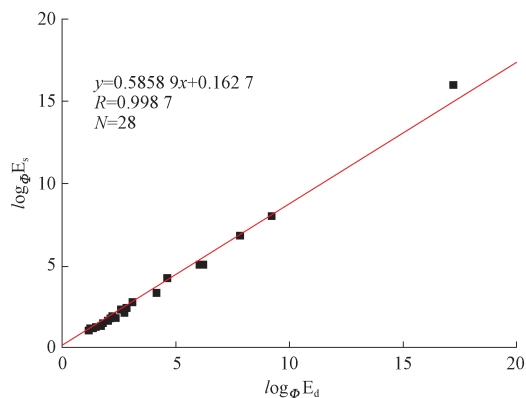


图8 经转换后的动态杨氏模量与静态杨氏模量关系

Fig. 8 Transformed dynamic vs. static Young's modulus

压力和流体饱和度等条件(岩石的其他条件为岩石地层条件),同步测量岩石动、静态杨氏模量。结果显示随着油水两相的改变两者差值的变化较为复杂,有不同程度的波动(图9a),随着孔隙压力增大,动、静态杨氏模量差减小(图9b)。随着围压的增大,动、静态杨

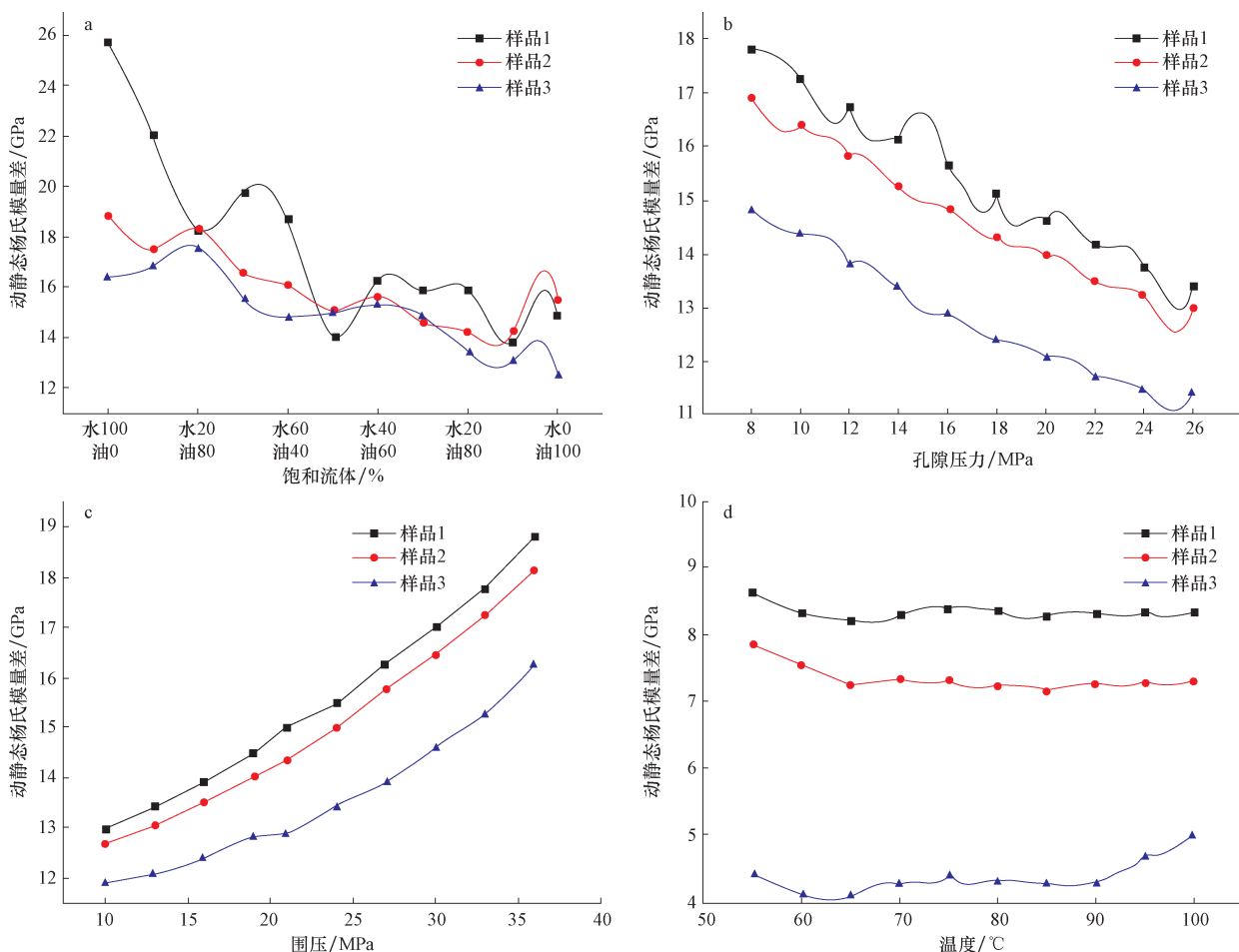


图9 不同参数对动、静态杨氏模量的影响

Fig. 9 Relationship of static and dynamic modulus with other parameters

- a. 不同饱和度和流体对动、静态杨氏模量的影响;b. 孔隙压力对动、静态杨氏模量的影响;
c. 围压对动、静态杨氏模量的影响;d. 温度对动、静态杨氏模量的影响

氏模量差呈线性增大(图9c);温度对动、静态杨氏模量差影响不大(图9d)。

4 结论

1) 恢复岩石地下所处的围压、孔隙压力、温度及饱和流体条件,减小了外界条件对岩体的动、静态力学参数的影响。在生产和施工中利用测井测算出的动态杨氏模量,参数是测井设备在地下测得的,将动态杨氏模量校正原位条件下测得的静态杨氏模量,结果会更精准、更可靠。

2) 原位条件下测得岩石的动态杨氏模量和静态杨氏模量有较好的相关关系,动态杨氏模量普遍大于静态杨氏模量,并且随着岩石的致密性的增大差异变大。

3) 根据岩石致密程度的差异,建立不同的动、静态杨氏模量校正图版,两者相关性显著提高。引入孔隙度作为评价因子,实现原位条件下杨氏模量的动、静态校正。

4) 岩体力学动、静态参数,受到岩石的内部因素(包括成分、结构、构造、物性等)和外部因素(围压、孔隙压力、温度等)的影响。内部因素岩石的致密程度和外部因素孔隙压力对岩石力学动、静态参数的差异影响规律性强。

致谢:本文得到了北京大学地球与空间科学学院何涛老师、工学院赵俊良同学的热忱指教,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 刘波涛,李清泉,张福祥,等. 致密油藏多级压裂水平裂缝井不稳态产能分析[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):138-142.
Liu Baotao, Li Qingquan, Zhang Fuxiang, et al. Rate transient analysis of multistage fractured wells with horizontal fractures in tight oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):138-142.
- [2] 郭建春,曾凡辉,赵金洲. 酸损伤射孔井储集层破裂压力预测模型[J]. 石油勘探与开发,2011,38(2):221-227.
Guo Jianchun, Zeng Fanhui, Zhao Jinzhou. A model for predicting reservoir fracturing pressure of perforated wells after acid damage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2):221-227.
- [3] 苏玉亮,王文东,周诗雨,等. 体积压裂水平井三线性流模型与布缝策略[J]. 石油与天然气地质,2014,35(3):435-440.
Su Yuliang, Wang Wendong, Zhou Shiyu, et al. Trilinear flow model and fracture arrangement of volume-fractured horizontal well[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3):435-440.
- [4] 宋连腾,刘忠华,李潮流,等. 基于横向各向同性模型的致密砂岩地应力测井评价方法[J]. 石油学报,2015,36(6):707-714.
Song Lianteng, Liu Zhonghua, Li Chaoli, et al. Geostress logging evaluation method of tight sandstone based on transversely isotropic model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6):707-714.
- [5] 黄思静,单钰铭,王维国,等. 储层砂岩岩石力学性质与地层条件的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(4):54-459.
Huang Sijing, Shan Yuming, Liu Weiguo, et al. The relationship between mechanical parameters of rock and formation conditions of reservoir sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4):54-459.
- [6] 张浩,康毅力,陈景山,等. 变围压条件下致密砂岩力学性质实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增2):4227-4231.
Zhang Hao, Kang Yili, Chen Jingshan, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S):4227-4231.
- [7] Drooper R K, Johnson J N. The influence of pore pressure on the mechanical properties of Kayenta sandstone[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83(B6):2817-2824.
- [8] Van Den Abeele K E - A, Carmeliet J, Johnson P A, et al. Influence of water saturation on the nonlinear elastic mesoscopic response in Earth materials and the implications to the mechanism of nonlinearity[J]. Journal of geophysical research. 2002, 107(B6):2122-21322.
- [9] Ernest H Rutter. The influence of temperature, strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks[J]. Tectonophysics, 1974, 22, 311-334.
- [10] 罗运军,秦本东. 温度对砂岩弹性模量影响的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2005,2:98-99.
Luo Yunjun, Qin Bendong. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2005, 2:98-99.
- [11] 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(6):1177-1181.
Meng Zhaoping, Li Mingsheng, 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(6):1177-1181.
- [12] 史譔,沈联蒂,王建新,等. 岩性、含油气性、声波动力学特征规律的研究[J]. 石油学报,1995,16(1):1-9.
Shi Ge, Shen Liandi, Wang Jianxin et al. Integrative experimental study of lithologies, hydrocarbon-bearing and dynamic properties[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(1):1-9.
- [13] Kuhlman R D, Heemstra T R. Field tests of downhole extensometer used to obtain formation in-situ stress data[J]. SPE25905, 1933:625-634.
- [14] Tutuncu A N, Sharma M M. Relating static and ultrasonic laboratory measurement to acoustic log measurement in tight gas sands[J]. SPE 24689, 1993:299-311.
- [15] Thomas G. Stability analysis of a horizontal coalbed methane well in the Rocky Mountain Front Ranges of southeast British Columbia, Canada[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(2009):238-337.
- [16] 林英松,葛洪魁,王顺昌. 岩石动静力学参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(2):216-222.
Lin Yingsong, Ge Hongkui, Wang Shunchang. Testing study on dynamic and static elastic parameters of rocks[J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 216 - 222.
- [17] 袁仕俊, 夏宏泉, 范文同, 等. 库车地区地面岩芯岩石力学实验与应用研究[J]. 石油工业计算机应用, 2013, 77: 47 - 50.
- Yuan Shijun, Xia Hongquan, Fan Wentong, et al. Experiment and application of ground core mechanics Kuqa[J]. Computer Application of Petroleum, 2013, 77: 47 - 50.
- [18] 葛洪魁, 黄荣樽, 庄锦江, 等. 三轴应力下饱和水砂岩动、静态弹性参数的试验研究[J]. 石油大学学报, 1994, 18(3): 41 - 47.
- Ge Hongkui, Huang Rongzun, Zhuang Jinjiang, et al. Experimental study on dynamic and static elastic parameters of water-saturated sands under triaxial stresses[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1994, 18(3): 41 - 47.
- [19] 李敏, 练章华, 陈世春, 等. 岩石力学参数试验与地层破裂压力预测研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(5): 15 - 18.
- Li Min, Lian Zhanghua, Chen Shichun, et al. Rock mechanical parametric experiments and the research of formation fracture pressure prediction[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(5): 15 - 18.
- [20] 尤明庆, 苏承东, 杨圣奇. 岩石动、静态参数之间的研究[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2002, 21(6): 413 - 419.
- You Mingqing, Su Chengdong, Yang Shengqi. Relation between static and dynamic parameters of rocks[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science) 2002, 21(6): 413 - 419.
- [21] Wang Z, Nur A. Dispersion analysis of acoustic velocities in rocks[J]. Journal of the Acoustic Society of America, 1990, 87(6): 2384 - 2395.
- [22] 任科英. 实验室岩石声学速度测试中的频散现象[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 05: 779 - 782 + 836 + 665.
- Ren Keying. Acoustic testing laboratory core speed dispersion phenomenon[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 05: 779 - 782 + 836 + 665.
- [23] 葛洪魁, 陈颀, 林英松. 岩石动态与静态弹性参数差别的微观机理[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 04: 34 - 36 + 7 - 6.
- Ge Hongkui, Chen Yu, Lin Yingsong. Microscopic mechanism of difference between static and dynamic elastic parameters of rock[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences) 2001, 04: 34 - 36.

(编辑 张亚雄)

(上接第108页)

- [20] Zanin Y N, Eder V G, Zamirailova A B G, et al. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia[J]. Chemie der Erde-Geochemistry, 2010, 70(4): 363 - 376.
- [21] Khamidullin R R. Reservoir properties of the Bazhenov formation[J]. SPE 162094, 2012.
- [22] IHS. Going Global: Predicting the Next Tight Oil Revolution[EB/OL]. [2014 - 09 - 01]. <http://www.ihs.com/products/cera>.
- [23] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343 - 350.
- Jia chengzao, Zhou Caineng, Li jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343 - 350.
- [24] Ulmishek G F. Petroleum geology and resources of the West Siberian Basin, Russia[J]. USGS Bulltin, 2003: 9 - 20.
- [25] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resources; an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[EB/OL]. [2013 - 05 - 01]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas>.
- [26] EIA. Review of emerging resources: US shale gas and shale oil plays[EB/OL]. [2011 - 07 - 01]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>.
- [27] Hartenergy. North American Shale Quarterly[EB/OL]. [2015 - 03 - 01]. <https://stratadsadvisors.com>.
- [28] Walls J D, Sinclair S. Eagle Ford shale reservoir properties from digital rock physics[J]. First Break, 2011, 29(6): 97 - 101.
- [29] Pollastro R M, Roberts L N, Cook T A. Geologic assessment of technically recoverable oil in the Devonian and Mississippian Bakken Formation[C]//Geological Survey Digital Data Series DDS-69-W. U S Geological Survey, 2013.
- [30] Hsu S C, Nelson P P. Characterization of eagle ford shale[J]. Engineering Geology, 2002, 67(1): 169 - 183.
- [31] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150 - 158.
- Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150 - 158.
- [32] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1 - 11.
- Yang hua, Li Shixiang, Liu Xiangyang. Characteristic and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1 - 11.
- [33] Zumberge J E. Petroleum geochemistry of Upper Jurassic Bazhenov shale source rocks and corresponding crude oils, West Siberian Basin, Russia[C]//Unconventional Resources Technology Conference (URTEC). Colorado: 2014, 1369 - 1376.
- [34] Deacon A, Mackay H. The salym project[J]. SPE 136559, 2010.

(编辑 张亚雄)