

变有效应力条件下致密砂岩声波特性实验研究

庞留法

(中国石化华东油气分公司南川页岩气项目部, 重庆 408400)

摘要:致密砂岩气藏在钻完井、生产过程中有效应力会发生变化,致密砂岩孔隙结构复杂,微裂隙发育,当有效应力增大时,微裂隙发生闭合,孔隙被压缩,使得声波在致密砂岩中的传播特性发生变化。通过探究变有效应力条件下声波传播特点对预测致密砂岩地层压力以及对岩石动态力学参数响应特征的认识具有重要意义。以鄂尔多斯盆地上古生界二叠系典型致密砂岩为研究对象,测定了有效应力增加时,干岩样纵波、横波波速和渗透率。结果表明,当有效应力低于临界有效应力时(0~15 MPa),致密砂岩主要表现为微裂隙的闭合,纵、横波波速与有效应力均呈幂指数关系;当高于临界有效应力时(15~50 MPa),岩石变形特征由线弹性阶段逐渐向塑性变形阶段过渡,致密砂岩发生层间错动,孔隙被压缩,纵、横波波速随有效应力线性变化。同时,渗透率和波速对有效应力的响应具有一致性,当小于临界有效应力时,渗透率随有效应力呈幂指数递减。

关键词:致密砂岩;纵横波波速;孔隙结构;应力敏感;渗透率

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Acoustic characteristics of tight sandstone under different variable effective stress

PANG Liufa

(Nanchuan Shale Gas Project Department, East China Oil and Gas Company, SINOPEC, Chongqing 408400, China)

Abstract: During the process of drilling, well completion and production, the effective stress changes, the pore structure of tight sandstone is complex, and the micro-fracture is developed. When the effective stress increases, the micro-fracture will close, and the pores volume will decrease, which make a difference in the propagation characteristics of sound waves in tight sandstone. The researches on the characteristics of acoustic wave propagation under variable effective stress are significant for the prediction of formation pressure of tight sandstone and the cognition of response characteristics of dynamic mechanical parameters of rock. Taking the typical tight sandstone of upper Paleozoic Permian in Ordos basin as the research object, velocity of P-wave and S-wave and permeability of dry rock samples with the increasingly effective stress were measured. It was proved that when the effective stress (between 0~15 MPa) was lower than the critical value, the tight sandstone was mainly characterized by the closure of micro-fractures, and there was an exponential relation between effective stress and velocity of P-wave and S-wave respectively; when the effective stress (between 15~50 MPa) was higher than the critical value, the deformation characteristics of rock gradually transited from linear elastic stage to plastic deformation stage, the interlayer dislocation occurred in tight sandstone, the pores volume decreased, and the velocity of P-wave and S-wave changed with the effective stress in a liner relation. Meanwhile, the response of permeability and wave velocity on effective stress matched with each other. When it was below the critical value, it went down exponentially with the effective stress.

Key words: tight sandstone, velocity of P-wave and S-wave, pore structure, stress sensitivity, permeability

纵波是压缩波,横波是剪切波,其在岩石中传播主要受温度、压力、饱和度、孔隙度、流体类型、孔隙结构等因素的影响。致密砂岩孔喉细小,微裂隙发育,孔隙结构复杂,储层孔隙压力在钻井、完井、开发

和生产过程中都会发生变化。地层孔隙压力减少时,引起有效应力增加,致密砂岩微裂隙、孔喉都会被压缩,渗流能力减弱,声波在致密砂岩中的传播速度增大,动态杨氏模量也发生变化。

收稿日期:2019-03-27。

作者简介:庞留法(1968—),男,本科,工程师,从事非常规油气资源地质研究。通讯地址:重庆市南川区渝南大道10号传媒中心宿舍楼中国石化南川项目部,邮政编码:408400。E-mail:157334594@qq.com

纵、横波的传播速度与有效应力有着密切的联系, WANG等^[1]对地震波的传播影响因素作了全面总结, 并对每种因素做了单独讨论。未晞等^[2]通过实验探究了孔隙度、孔隙结构、含水饱和度、压力、频率等对致密砂岩纵、横波速度的影响, 并利用微CT得到了岩石的微观孔隙结构, 指出裂缝闭合是致密砂岩纵波速度随有效应力增加急剧增大的主要原因。SMITH等^[3]研究了有效应力和孔隙结构对地震波传播的影响, 指出孔隙结构对岩石的声学性质具有重要影响。余夫等^[4]基于Biot理论, 分析了异常高压地层的纵波速度变化特征, 研究了砂泥岩与碳酸盐岩异常高压地层的纵波速度变化特征。马中高等^[5]通过实验探究了岩石的纵波、横波传播随有效应力的变化特点, 并给出了不同有效应力下的波速预测公式。PHILLIPS等^[6]研究了64块砂岩样声波传播随有效应力的响应特征, 指出随着有效应力的增加, 波速与有效应力的关系由幂指数变为线性关系, JI等^[7]对PHILLIPS提出的公式中的各参数进行了分析, 指出经验公式中各参数的物理意义。ASEF等^[8]在前人基础上探究了不同有效应力下微裂缝的闭合对纵、横波波速及其对力学性能的影响, 并提出根据波速与有效应力之间的关系预测地层压力, DVORKIN等^[9]发现孔隙度不同岩样波速对有效应力的敏感程度不同。有效应力的变化会引起孔隙结构发生变化进而影响纵、横波的传播, 孔隙结构的变化同时表现为渗透率的变化。以往针对不同有效应力下岩石的声学性质的研究主要集中在碳酸盐岩上, 针对微裂缝发育的致密砂岩则研究的较少, 而且研究主要集中在纵波随有效应力的变化上, 针对横波随有效应力的变化特点以及动态力学参数随有效应力的变化则研究得较少。

通过实验的方法, 研究了不同有效应力下致密砂岩纵、横波传播的特征。从声学的角度客观反映不同有效应力下孔隙结构的变化特点, 并且分析了动态岩石力学参数随有效应力的响应特征。实验结果对于运用声波测井资料预测地层压力和获取岩石的基础力学参数具有重要的意义。

1 实验岩样和实验方法

1.1 实验岩样

以鄂尔多斯盆地上古生界二叠系典型致密砂岩

为研究对象, 该地区致密砂岩孔隙结构复杂、孔隙类型多样, 非均质性强, 其中黏土矿物含量高于常规的砂岩。黏土矿物含量以伊利石、高岭石、绿泥石及伊/蒙间层矿物为主。选取实验岩样6块, 其岩心的基础物性见表1。

表1 实验岩样基础物性参数
Table 1 Basic physical parameters of experimental rock samples

编号	长度/cm	直径/cm	层位	孔隙度, %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
A-1	5.27	2.51	盒8上	7.35	0.081
A-2	4.91	2.51	盒8上	8.98	0.031
A-3	4.86	2.52	盒8上	4.09	0.042
A-4	5.00	2.52	盒8上	9.85	0.737
A-5	4.96	2.51	盒8上	9.73	0.170
A-6	4.22	2.53	盒8上	16.51	0.084

注: 孔隙度和渗透率测试条件为有效应力3 MPa, 入口端压力1.6 MPa, 出口端压力1.0 MPa, 测试介质为纯度99.9%的氮气

1.2 实验方法及步骤

岩心波速测量装置为西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室自研设备高温高压三轴渗流仪(图1)。其声波测试系统由超声波发射器(发射频率为960 kHz)、DS10522E型示波器和计算机声波采集系统组成。根据声波测试系统可以得到声波的传播时间。致密砂岩中纵波波速计算公式为:

$$V_p = \frac{L(1-\varepsilon)}{T-T_0} \times 10^3 \quad (1)$$

式中: V_p 为纵波波速, km/s; T 为声波测量装置探头及岩样的延迟时间之和, μs ; T_0 为装置回路自身延迟时间, μs ; L 为测试样品的长度, mm; ε 为测试样品在有效应力变化过程中轴向应变, %。

具体实验步骤: ①岩样制备, 将岩样切割成长度约为5 cm, 直径约为2.5 cm的岩心柱, 采用行业标准法对岩心进行洗盐和洗油, 在60℃下烘干岩样, 抽真空1 h, 去除岩样孔隙中的吸附气; ②采用高温高压三轴渗流仪(图1)测量有效应力分别为1 MPa、3 MPa、5 MPa、7 MPa、15 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa、50 MPa时的渗透率和声波传播时间。在有效应力增大的过程中, 每次压力稳定的时间分别为30 min。实验过程中岩样入口端压力为1.6 MPa, 出口端压力为1.0 MPa, 有效应力对应着上覆地层压力, 岩心孔隙压力对应着井底流压。该实验过程主要模拟气体产

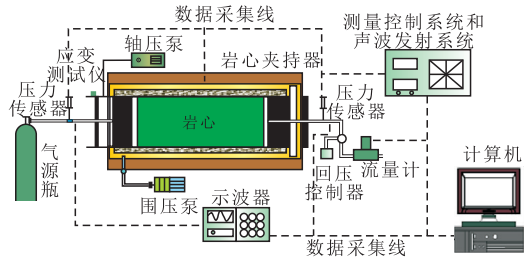


图1 高温高压三轴渗流仪示意图

Fig. 1 Triaxial seepage instrument with high temperature and high pressure

出,孔隙压力减小,上覆地层压力不变,有效应力增加的过程。

2 实验结果

2.1 不同有效应力下纵波、横波的传播特点

当有效应力低于临界有效应力 σ_c (岩石变形由压密阶段向线弹性阶段过渡时对应的有效应力),致密砂岩纵波波速与有效应力符合幂指数关系;当有效应力高于临界有效应力时,纵、横波波速随着有效应力线性变化;当有效应力 σ 小于临界值,纵、横波波速 V_p 、 V_s 与有效应力均符合公式:

$$V = B_0 e^{-k\sigma} \quad (2)$$

式中: σ 为有效应力,MPa; V_p 、 V_s 分别为对应有效应力下纵、横波波速,km/s; B_0 、 k 为运用最小二乘法拟合得到的2个常数。

当有效应力 σ 大于临界值,纵、横波随着有效应力增大呈线性,符合公式:

$$V = V_0 + D\sigma \quad (3)$$

式中: V_0 、 D 分别为对应的拟合参数(表2、表3、图2、图3)。

表2 纵波波速与有效应力的关系

Table 2 Relation between P-wave velocity and effective stress

编号	V_p			
	$\sigma \leq \sigma_c$	R^2	$\sigma > \sigma_c$	R^2
A-1	$V_p = 4.403\sigma^{0.018}$	0.94	$V_p = 0.003\sigma + 4.557$	0.99
A-2	$V_p = 4.190\sigma^{0.033}$	0.93	$V_p = 0.004\sigma + 4.557$	0.97
A-3	$V_p = 4.109\sigma^{0.017}$	0.92	$V_p = 0.003\sigma + 4.262$	0.94
A-4	$V_p = 4.099\sigma^{0.020}$	0.93	$V_p = 0.005\sigma + 4.294$	0.98
A-5	$V_p = 3.236\sigma^{0.035}$	0.92	$V_p = 0.016\sigma + 3.359$	0.98
A-6	$V_p = 4.279\sigma^{0.021}$	0.95	$V_p = 0.003\sigma + 4.533$	0.93

表3 横波波速与有效应力的关系
Table 3 Relation between S-wave velocity and effective stress

编号	V_s			
	$\sigma \leq \sigma_c$	R^2	$\sigma > \sigma_c$	R^2
A-1	$V_s = 1.714\sigma^{0.045}$	0.96	$V_s = 0.002\sigma + 1.899$	0.99
A-2	$V_s = 1.524\sigma^{0.0016}$	0.98	$V_s = 0.001\sigma + 1.575$	0.96
A-3	$V_s = 1.771\sigma^{0.097}$	0.95	$V_s = 0.005\sigma + 2.190$	0.98
A-4	$V_s = 1.389\sigma^{0.0018}$	0.95	$V_s = 0.002\sigma + 1.449$	0.96
A-5	$V_s = 1.748\sigma^{0.036}$	0.98	$V_s = 0.002\sigma + 1.886$	0.97
A-6	$V_s = 1.733\sigma^{0.017}$	0.98	$V_s = 0.001\sigma + 1.809$	0.92

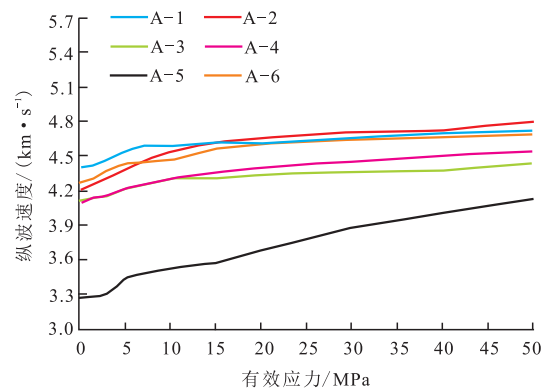


图2 纵波波速与有效应力的关系

Fig. 2 Relation between P-wave velocity and effective stress

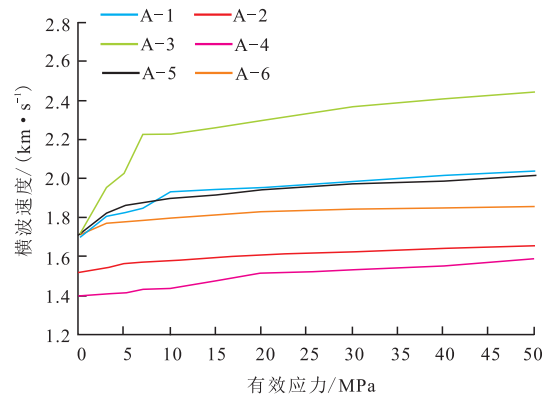


图3 横波波速与有效应力的关系

Fig. 3 Relation between S-wave velocity and effective stress

通过公式 $E_d = \frac{(3t^2 - 4)\rho V_s^2}{t^2 - 1}$, 其中 $t = \frac{V_p}{V_s}$, 得到不同有效应力下岩心的动态杨氏模量(图4), 可以看出当有效应力小于临界有效应力时, E_d 随着有效应力增大迅速增大; 当有效应力大于临界有效应力时, E_d 随有效应力变化的速率较慢。

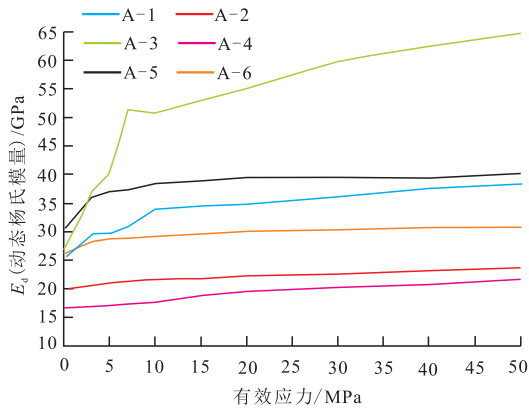


图4 动态杨氏模量与有效应力的关系

Fig. 4 Relation between dynamic Young modulus and effective stress

2.2 渗透率随有效应力的响应特征

渗透率随着有效应力的增大而减小,当 $\sigma < \sigma_c$ 时,渗透率随有效应力增大迅速减小;当 $\sigma > \sigma_c$ 时,渗透率随有效应力变化较小(图5)。

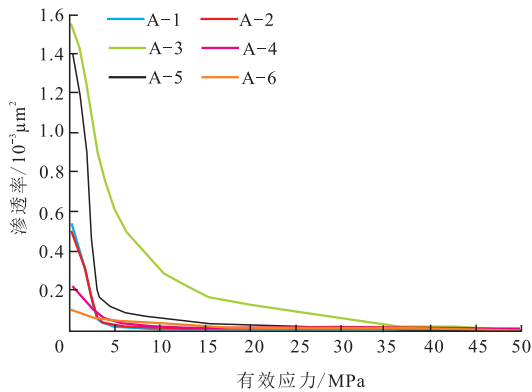


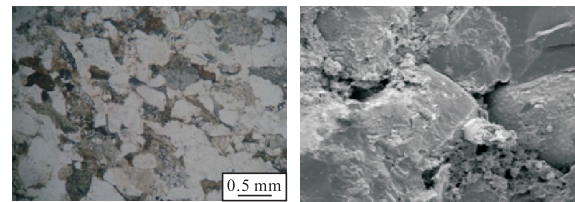
图5 岩样A-1至A-6渗透率随不同有效应力的变化关系
Fig. 5 Permeability of shale sample A-1 to A-6 change with different effective stress

3 讨论与分析

致密砂岩的声学性质受砂岩的密度、孔隙度、孔隙结构、孔隙流体、矿物组分以及胶结程度等综合因素的影响。在烘干的情况下,致密砂岩的声学性质取决于其孔隙结构特征和矿物类型、分布以及产状。针对本文研究的致密砂岩岩样,由于做了烘干处理,所以当有效应力发生变化时,岩样声波速度发生变化只有一个原因,即孔隙结构发生变化。微裂缝的闭合以及岩石骨架颗粒的变形,使得声波传播路径发生变化,同时引起岩样的渗透率发生变化。

3.1 不同有效应力对岩石声学性质的影响

纵横波波速是反映岩石力学性质的一个重要指标,波速越高,表明介质弹性性质越强,压缩程度越大,微裂隙闭合程度越高,力学强度越大。岩石在单轴受载条件下,微裂隙在有效应力变化后的变形(闭合、张开、扩展等)是改变岩石声学性质的重要因素^[10]。致密砂岩裂缝发育多尺度性,微裂缝提供主要渗流通道,粒间孔隙连接方式以片状微—细喉道连接为主^[11-13],通过铸体薄片和扫描电镜(图6)分析发现,样品A-1通过铸体薄片分析可清晰地看到呈微波状、分叉状的微裂隙,局部可见细小粒内溶孔。在扫描电镜下放大150倍可以清晰地看到粒间孔隙和颗粒。



a. 铸体薄片 b. 扫描电镜(放大150倍)

图6 A-1铸体薄片和扫描电镜

Fig. 6 Casting thin sections and SEM of sample A-1

在低有效应力下 $\sigma < \sigma_c$,这一阶段岩石的变形机制为随着有效应力的增大,微裂缝发生闭合,较大孔喉被压缩,岩石变形朝着较为稳定的线弹性方向进行。这一阶段致密砂岩纵、横波波速与有效应力之间符合公式 $V=B_0e^{-k\sigma}$,其中 B_0 表示的是无有效应力时的声波速度, k 称为“衰变常数”,其值的大小主要受裂缝闭合程度的影响。当有效应力 $\sigma > \sigma_c$ 时,岩石的变形机制以稳定的线弹性为主,并随着有效应力的增大,并逐渐向塑性变形过渡,在这一阶段,微裂缝进一步闭合,骨架颗粒向孔隙中间移动,孔隙进一步被压缩。纵、横波波速与有效应力 σ 呈线性变化关系 $V=V_0+D\sigma$,其中 V_0 表示无有效应力条件下没有孔隙度时对应的波速, D 表示不同有效应力下速度的修正系数。

3.2 致密砂岩 E_d 与有效应力之间的关系

致密砂岩的渗透率与孔隙结构有密切的联系。在含微裂缝的岩心中,对渗透率作主要贡献的是微裂缝和喉道^[14],当有效应力从0 MPa增加到15 MPa

时,渗透率大幅度下降;当有效应力大于 15 MPa 时,渗透率变化不明显(图 5)。说明在低有效应力状态下,主要是微裂缝闭合,当有效应力增大到一定程度时,喉道开始闭合,孔隙被压实。从渗透率随有效应力的变化特点可以看出,15 MPa 就是对应的临界有效应力,在大于 15 MPa 和小于 15 MPa 时,声波随有效应力呈现出不同的变化规律。

E_d 表示动态杨氏模量,运用纵横波速和岩样密度得到,是描述材料抵抗外界变形能力的物理量。从有效应力与弹性模量之间的关系曲线可以看出,在小于 15 MPa 有效应力时,弹性模量值快速增大,岩样 A-3 在 15 MPa 有效应力下的弹性模量是 3 MPa 时的 1.85 倍;在 15 ~ 50 MPa 时,弹性模量随有效应力增加变化相对平缓,这一阶段以线弹性变化为主。钻井、完井及开发过程中,孔隙压力降低,有效应力增大,储层岩石的体积模量增大。在通过纵、横波获得岩石的动态力学参数时,要在原地有效应力条件下进行。

4 结论

1) 当有效应力低于临界有效应力时,致密砂岩的纵波波速随有效应力的增大呈幂指数增大,当有效应力高于临界有效应力时纵、横波波速随着有效应力增大线性变化,且通过渗透率的变化可以确定临界有效应力的值。

2) 根据波速与有效应力的关系可以预测地层压力的大小, E_d 随着有效应力的增大而增大,增大速率与有效应力大小有关。

3) 运用岩石的声学性质获得动态力学参数,要考虑有效应力对纵横波传播的影响,要在原地有效应力条件下进行。

参考文献

- [1] WANG Z J. Fundamentals of seismic rock physics[J]. *Geophysics*, 2001, 66(2): 372-698.
- [2] 未晞,王尚旭,赵建国,等.致密砂岩纵、横波速度影响因素的实验研究[J]. *石油物探*, 2015, 1(1): 9-16.
- [3] SMITH T, SONDERGELD C, TINNI A O. Microstructural controls on electric and acoustic properties in tight gas sandstones some empirical data and observations[J]. *Leading Edge*, 2010, 29(12): 1470-1474.
- [4] 余夫,金衍,陈勉,等.异常高压地层的纵波速度响应特征分析[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(2): 23-27.
- [5] 马中高,伍向阳,王中海.有效压力对岩石纵横波速度的影响[J]. *勘探地球物理进展*, 2006, 29(3): 183-186.
- [6] PHILLIPS E D, HAN D H, ZOBACK M D. Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone[J]. *Geophysics*, 1989, 54(1): 82-89.
- [7] JI S, WANG Q, MARCOTTE D, et al. P wave velocities, anisotropy and hysteresis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks as a function of confining pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(B9): 204.
- [8] ASEF M R, NAJIBI A R, ASEF M R. The effect of confining pressure on elastic wave velocities and dynamic to static Young's modulus ratio[J]. *Geophysics*, 2013, 78(3): D135-D142.
- [9] DVORKIN J, NUR A. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets[J]. *Geophysics*, 1996, 61(5): 1363-1370.
- [10] 高建,吕静,王家禄.储层条件下低渗透岩石应力敏感评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 3899-3902.
- [11] 何更生,唐海.油层物理[M].北京:石油工业出版社,2011.
- [12] 刘向君,刘洪,徐晓雷,等.低孔低渗砂岩加载条件下的声波传播特性实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(3): 560-567.
- [13] 黄晓程.单轴压缩下岩石声波波速变化特征的试验研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2013.
- [14] 郝明强,刘先贵,胡永乐,等.微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 93-98.

(编辑 黄颖)