

文章编号: 1001-4888(2018)02-0228-11

水对砂岩纵横波速及弹性参数影响的实验研究^{*}

钟江城¹, 赵阳¹, 任伟光¹, 陈超凡¹, 周宏伟^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 水对含不同黏土矿物油气储层的纵横波速以及弹性参数有很大影响。为研究此影响, 在相同条件下制作了三组(黏土成分分别为蒙脱石、伊利石和伊利石/蒙脱石混合)不同黏土含量(体积分数)的人造泥质砂岩岩样, 并先后在常态、饱和及干燥三种状态下进行了纵横波速测量, 在人工岩样黏土填隙分布模型下计算了孔隙度。首先, 通过结合临界孔隙度模型和 Gassmann 模型, 验证了人工岩样实验数据的合理性; 然后, 确定了影响岩样波速及弹性参数的主要因素, 并在主要因素控制下对比分析了常态、干燥态岩样的纵横波速及剪切模量和体积模量。结果表明: 对于含伊利石岩样, 水对纵横波速及弹性参数影响较小, 且孔隙度越大影响越小; 对于含伊蒙混合岩样, 水的影响较大, 浸泡水后岩样纵横波速及弹性参数均明显变小, 说明蒙脱石吸水膨胀后其内部微观孔隙不能被忽略。

关键词: 黏土; 人造泥质砂岩; 孔隙度; 纵横波速; 弹性参数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-077

0 引言

泥质砂岩和页岩是沉积岩盆地中的重要组成部分, 也是与油气储存最直接相关的岩石, 对其进行岩石力学特性和声波特性方面的研究, 可以为油田钻井和页岩气开发等工作提供技术支撑^[1,2]。黏土作为储层岩石中的重要组成成分, 特别是当有水存在时, 其对岩石的弹性参数和弹性波特性的影响是不容忽视的。因此, 对于含不同黏土类型的砂岩储层, 研究水对其弹性波特性及力学特性的影响对于油气勘探与开发具有重要意义。

早在 1982 年, Tosaya 等^[3]就以不同的砂岩岩样为研究对象, 研究了纵波波速与黏土含量和孔隙度之间的关系, 并给出了初步的拟合关系式。紧接着, Han、Castagna 和 Klimentos 等进一步展开了类似工作, 经验性地发现纵波速度是孔隙度和黏土含量双变量的线性函数, 且随孔隙度或黏土含量增加而降低^[1,4,5]。Khaksar 等^[6]以库珀盆地砂岩为研究对象, 研究了横波、纵波速度与孔隙度之间的单一变量线性关系。然而, Marion 等^[7]观察得到不完全一样的结论, 发现纵波速度随着黏土含量的增加先增加后减小, 黏土含量存在一个临界值(一般介于 20% 到 40% 之间)。后来, 一些学者不单单满足于特定岩石现场或实验室测量数据的研究, 他们开始寻找匹配实验数据的通用理论计算模型。Xu 等^[8]基于有效介质理论和 Gassmann 理论得到一种计算黏土和砂子混合物的纵横波速计算方法。Jiang 等^[9]应用一种各向同性双孔隙度模型计算了泥质砂岩的弹性模量, 并在此基础上研究了孔隙纵横比和黏土含量对泥质砂岩弹性特性的影响。除此之外, 一些学者^[10-12]研究了岩样在不同饱和气和不同饱和水状态下岩样

^{*} 收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-06-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20130023110017)资助; 国家重点研发计划项目(2016YFC0600704)资助

通讯作者: 钟江城(1988—), 男, 博士生。研究方向: 岩石力学、渗流力学及其数值模拟。Email: zhongjc1988@126.com

孔隙度、弹性模量、纵横波速度、纵横波速比等参数的变化规律,另有学者^[2,13-15]则针对不同的岩石储存(碳酸盐、泥页岩、砂岩和花岗岩等)对岩石力学特性以及纵横波速等开展了研究。

研究自然岩石的地震波性质是极其困难的,其孔隙三维几何形状、尺寸大小及分布和连通性在不透明的情况下通常是未知的。因此,对于预知孔隙度的各向同性人造岩石的实验研究可以帮助我们更好地理解天然岩石的弹性波特性^[16]。尽管以上学者通过实验室研究得到黏土对弹性波波速有很大的影响,但是他们基本都是现场取样。天然样品中黏土种类较为复杂,且均匀度较差,各向异性比较明显,利用弹性波波速计算得到的弹性参数偏差较大。Cockaerts 等^[17]曾在 1993 年以黏土和石英砂混合料制作的人工岩样为对象研究过黏土对弹性波特性的影响。鉴于此,本文以自制的含有特定黏土种类的人工岩样为例,分别在常态、饱和态和干燥态三种状态下进行弹性波波速测试,研究了岩石物理属性(黏土含量、种类及孔隙度等)与弹性波波速间的关系以及水对含不同黏土砂岩岩样弹性参数的影响规律,为相同物理属性的天然砂岩储层弹性参数的确定提供了参考依据。

1 实验材料及方法

韩学辉和熊钰等^[18,19]指出采用骨架覆膜(胶结剂)、泥质(黏土)黏附、压实固化方法制作的人工岩样在接触方式、孔隙结构特征等方面与天然泥质胶结砂岩接近,且制作价格低廉,重复性好,成功率高;王子振等^[20]也认为类似多重孔隙结构人造岩心方法可用于岩石的渗流机理及声波特性等实验研究。鉴于此,本文采用相同方法制作了不同黏土含量的人造泥质砂岩,并对其岩石物理属性与纵横波速及弹性参数间的关系展开研究。

1.1 岩样制作选料

泥质砂岩主要材料成分为石英及黏土,黏土种类及含量对砂岩的弹性波速度及相关力学性质有很大影响^[9]。黏土矿物通常包括高岭石、伊利石、蒙脱石等,根据研究需要可选用不同的黏土矿物。本次研究共 18 个人工岩样,按黏土成分不同平均分成三组,黏土成分采用常见的蒙脱石(钙基)粉末、伊利石以及伊利石与蒙脱石等质量混合(简称伊蒙混合);骨料为石英砂,采用 100~200 目细砂,颗粒直径为 0.150~0.075mm;胶结剂采用中等环氧值的环氧树脂和固化剂,每个试件制作时均加入等量的环氧树脂胶结剂,确保其对各个岩样物理弹性参数影响一致。

1.2 岩样制作设备及流程

人工岩样制作时依次加入称好的石英砂、黏土及粘结剂,搅拌均匀后加入到直径约为 25mm 的圆柱形合金钢模具中,然后通过单臂液压机加载到指定荷载(约 40MPa),并通过连接的压力传感器保压 30 分钟后卸载,最后在模具中固结 17 小时后将其用压力机压出。将压出的岩样两端进行切割并磨平,最终岩样的直径大小控制在 24.2~24.4mm 之间,长度控制在 48~52mm 之间。制作设备如图 1(a)所示,加工后的岩样如图 1(b)所示。由于三组岩样仅在黏土类型上有所不同,其他制作参数保持一致,这里列出了含伊利石的岩样选料及制作参数(见表 1)。

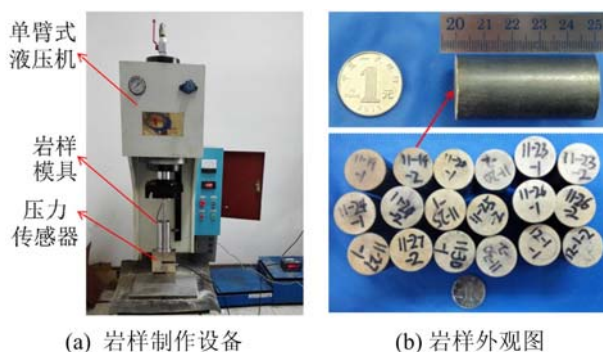


图1 人工岩样制作设备及外观尺寸图

Fig. 1 The producing equipment and outline dimension drawing of man-made rock samples

表 1 含伊利石人工岩样制作参数
Tab. 1 The parameters of artificial samples containing illite

岩样 编号	石英砂 /目	黏土 成分	黏土质量配比 /%	成型压力 /t	保压时间 /h	固结时间 /h
11-24-1	100~200	伊利石	5	2.0	0.5	17
11-24-2	100~200	伊利石	10	2.0	0.5	17
11-25-1	100~200	伊利石	15	2.0	0.5	17
11-25-2	100~200	伊利石	20	2.0	0.5	17
11-26-1	100~200	伊利石	25	2.0	0.5	17
11-26-2	100~200	伊利石	30	2.0	0.5	17

随机取一个人工岩样($\Phi 24.3 \times 49.9\text{mm}$)进行 CT 全高扫描,扫描间距为 0.05mm ,视窗 28mm ,图像尺寸为 $1010 \times 1010\text{pixels}$,像素分辨率为 $28\mu\text{m}$,图 2 为岩样等间距的 4 张横截面的 CT 切片图像及 9 张图像的灰度分布,可以发现岩样不同位置处图像灰度分布曲线基本相同,呈对称分布且灰度区域较窄,CT 图像中没有明显的黑点或亮点,表明整个岩样均匀,不存在较大的孔隙或缺陷(裂隙)。因此宏观上可以将人工岩样看成均匀的各向同性材料。根据人工岩样制作方法及 CT 扫描结果,可以做出以下假定:①宏观上人工岩样可以看成均匀的各向同性材料,石英砂与黏土均匀混合共同构成岩样的骨架,不存在石英砂或黏土分层、扎堆的现象;②岩样中主要为微细观孔隙(各成分基质颗粒间的孔隙,忽略固体基质内部孔隙),不存在宏观孔裂隙;③各成分基质间不发生化学反应,颗粒间不存在内部嵌入,只存在表面接触。

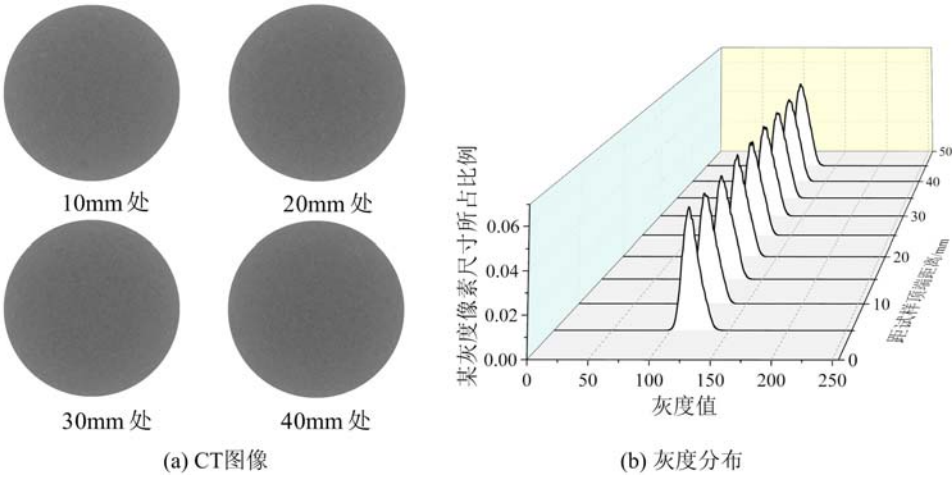


图 2 岩样的 CT 切片图像及其灰度分布图
Fig. 2 CT images and their gray distribution histogram

1.3 实验过程及方法

1.3.1 纵横波速测量

本次实验为了研究水对含不同黏土泥质砂岩纵横波速及力学特性的影响,在正常潮湿环境中、无载荷作用状态下,利用 500kHz 超声波探测装置依次在以下三种状态下对各个岩样进行纵横波速测量:

①常态(浸泡水前):将加工好的 18 个人工岩样放置于正常室内环境下,每隔 12 个小时用电子称测试一次质量,直至相邻两次质量改变量小于 0.1% 为止,记录各个人工岩样的质量 M 和体积 Vol (直径 D 和高 H)。

②饱和态:将 18 个岩样放在自来水中浸泡,测量质量前将浸泡在水中的试件再放到真空泵中抽真空 10 分钟(抽出岩样中的空气,让水进入孔隙中,加速饱和速度,但时间过长容易损坏试件),然后拿出岩样用滤纸吸干表面的水,用电子称测试各个岩样的质量;每隔 12 个小时重复一次上述工作,直至相邻

两次质量改变量小于 0.1% 为止,记录此时各个人工岩样的质量和体积。

③干燥态(浸泡水后):将饱和后的 18 个人工岩样先放置于烘干机中烘干,再放入室内环境下每隔 12 个小时用电子称测试一次质量,直至相邻两次质量改变量小于 0.1% 为止,记录此时各个人工岩样的质量和体积。

1.3.2 孔隙度计算

一般油气储层砂岩的黏土分布模式主要有四种,即骨干框架结构、填隙结构、层状分布结构和散状分布结构^[21]。基于本文人工岩样基本假定,可以推断本文人工岩样符合黏土填隙分布模型(见图 3),即黏土细颗粒填充石英砂粗颗粒间的空隙,且整体呈均匀分布。石英砂和黏土共同构成岩石骨干框架,石英砂起主要框架作用,黏土的骨架作用大小与黏土含量相关。

Han 等^[1]1986 年实验采用的岩样所含黏土为非膨胀性黏土,在计算孔隙度时忽略了饱和水引起岩样总体积的微小变化,采用了经典的常规土力学计算孔隙度方法,即

$$\phi = \frac{\rho_{sat} - \rho_d}{\rho_f} \quad (1)$$

其中, ρ_{sat} , ρ_d 分别为岩样在饱和态和干燥态下的密度; ρ_f 为饱和液体的密度。

Gassmann 提出了低频地震波情况下,在流体饱和和孔隙岩体中,描述纵横波速度与岩石弹性参数间的表达式,并给出了孔隙度与相关密度间的关系式^[22]:

$$\phi = \frac{\rho_{sat} - \rho_s}{\rho_f - \rho_s} \quad (2)$$

考虑到本文所用黏土具有相对较大的金属阳离子团和吸水性能,浸泡水前后岩样体积会发生较大的变化,式(1)和式(2)不再适用。结合本文人工岩样黏土填隙分布模型,根据人工岩样制作时的质量配比,在各个成分混合均匀的条件下,可以计算出各个成分的质量,根据密度进一步计算出各个成分的体积。假设人工岩样中含有 n 种材料,质量分别为 $m_i (i=1, 2, \dots, n)$, 材料基质密度分别为 ρ_i , 设一个试件的总质量为 M , 总体积为 Vol , 则孔隙度 ϕ 可以通过下式计算:

$$\phi = \frac{Vol - \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}}{Vol} \quad (3)$$

其中, $M = \sum_{i=1}^n m_i$, $Vol = \frac{\pi}{4} D^2 H$ 。岩样中各个成分的部分物理弹性参数见表 2, 其中, 由于本文不考虑黏土颗粒内部微小孔隙, 蒙脱石、伊利石密度采用压实法测量; 粘结剂密度为环氧树脂和固化剂均匀混合固化后的密度。

表 2 岩石各个成分的弹性物理参数^[9,21]

Tab. 2 Elastic and physical parameters of the components of rock^[9,21]

名称	石英砂	蒙脱石	伊利石	水	胶结剂
体积模量/GPa	37.2	—	27.7	2.20	—
剪切模量/GPa	45.0	—	17.8	0.00	—
密度/(g/cm ³)	2.65	2.25	2.79	1.00	1.06

基于三种状态的定义,本文研究主要从以下两部分内容中展开:一是常态与干燥态下对比研究,即研究浸泡水前后水对岩样纵横波速及力学性质的影响,两种状态下岩样内部结构会因为膨胀性黏土的存在而发生变化;二是饱和态下纵横波速预测值与实测值对比研究,即通过常态(饱和气)下实测值结合 Gassmann 理论预测饱和态(饱和水)下纵横波速,并与饱和态实测值对比,干燥态和饱和态下仅仅是

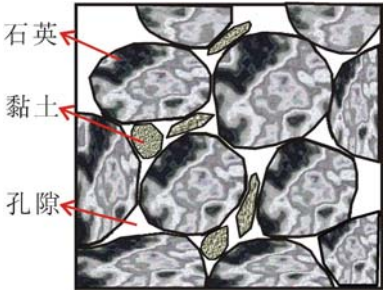


图 3 人工岩样黏土填隙分布模型结构示意图

Fig. 3 Schematic diagrams showing the interstitial distribution of clay in a man-made rock sample

饱和气与饱和水的过程,岩样内部结构基本保持不变。

2 实验结果

2.1 孔隙度计算结果

常态和干燥态下孔隙度计算结果:①常态下,岩样孔隙度范围为 0.03~0.19;②干燥态下,岩样孔隙度范围为 0.05~0.19,图 4 给出了孔隙度与黏土含量间的关系。从整体上分析,含有同一种黏土成分的岩样孔隙度随着黏土含量的增加呈线性减少的趋势,这说明随着黏土含量的增加,黏土细颗粒充分填充了石英砂粗颗粒间的孔隙,符合黏土填隙分布模型;从不同状态的角度分析,同一试件干燥状态下的孔隙度大于常态下孔隙度,且黏土含量越高相对变化越大,说明黏土吸水后在岩样体积膨胀的同时还增加了岩样内部孔隙结构的复杂程度。

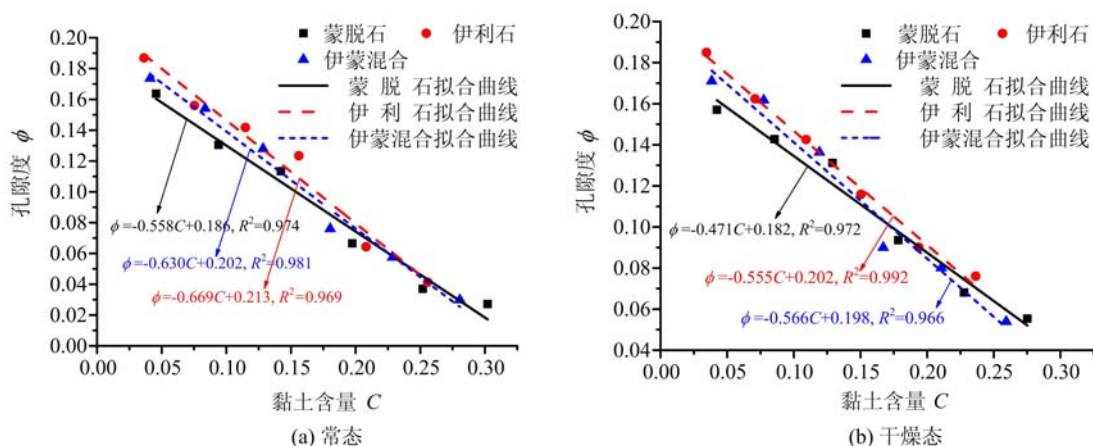


图 4 岩样孔隙度与黏土含量关系

Fig. 4 Clay content versus porosity for rock samples

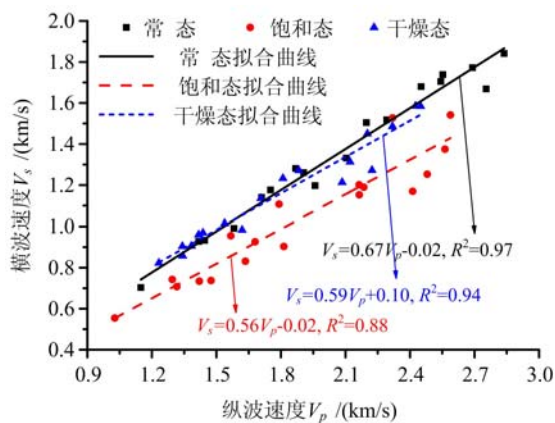


图 5 三种状态下纵横波速度的测量结果

Fig. 5 Measured P-wave velocities versus S-wave velocities under three conditions

2.2 纵横波速测量结果

三种状态下纵横波速测量结果:①常态下,横波速度范围为 0.77~1.84km/s,平均值为 1.27km/s,纵波速度范围为 1.20~2.84km/s,平均值为 1.94km/s;②饱和态下,横波速度范围为 0.56~1.38km/s,平均值为 0.98km/s,纵波速度范围为 1.03~2.56km/s,平均值为 1.85km/s;③干燥态下,横波速度范围为 0.81~1.58km/s,平均值为 1.10km/s,纵波速度范围为 1.22~2.42km/s,平均值为 1.71km/s。干燥态与常态比较,横波波速与纵波波速平均值均是干燥态较小,表明岩样浸泡水后孔隙度增加,这与图 4 结果一致;干燥态与饱和态比较,横波波速平均值干燥态较大,纵波波速平均值

值饱和态较大,这与 Gassmann 理论是一致的。图 5 给出了具体的实验数据以及三种状态下岩样纵横波速间的拟合关系式。饱和态和干燥态拟合结果与 King 等^[22]给出的饱和态和干燥态下横波与纵波的线性拟合关系式 $V_s = 0.73V_p - 0.54$, $V_s = 0.70V_p - 0.16$ 以及 Kassab 等^[23]给出的饱和态和干燥态下横波与纵波的线性拟合关系式 $V_s = 0.75V_p - 0.87$, $V_s = 0.73V_p + 0.49$ 纵横波速比变化趋势一致,且相关系数更高。纵横波速比大小有所不同是由岩样黏土成分、孔隙度及载荷水平等因素所导致的^[13]。

3 实验结果讨论

3.1 实验结果合理性分析

Gassmann 模型是最常用的研究流体饱和度对多孔岩石地震波速影响的模型。如果已知干岩石骨架岩石弹性参数以及饱和流体的物理性质,就可以计算出饱和岩石纵横波速。在低频假设下,Gassmann 模型给出了流体饱和岩石纵波速度 V_p 和横波速度 V_s 的计算公式^[22]:

$$V_p = \sqrt{\frac{K_b + (4G_b/3) + n^2 M}{\rho_{sat}}} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G_b}{\rho_{sat}}} \quad (5)$$

其中, $n = 1 - \frac{K_b}{K_s}$, $M = 1 / [\frac{\phi}{K_f} + \frac{1-\phi}{K_s} - \frac{K_b}{K_s^2}]$, $\rho_{sat} = (1-\phi)\rho_s + \phi\rho_f$ 。式中, K_b , K_s 分别为干燥岩石骨架、岩石基质的体积模量; K_f 为饱和岩石的液体的体积模量,取 2.2GPa; G_b 为干燥岩石骨架的剪切模量; ρ_{sat} , ρ_s , ρ_f 分别为流体饱和岩石、岩石固体基质及饱和流体的密度,其中固体基质密度取固体基质总质量与固体基质总体积的比值,饱和流体密度取 1g/cm^3 。

蒙脱石吸水膨胀为物理、化学反应并存,此过程岩样内部孔隙结构发生改变,因此岩样由常态→饱和态过程不可逆,饱和流体与岩样发生反应,不满足 Gassmann 模型孔隙流体与固体基质不相互影响的假设。但鉴于烘干温度为 60°C ,可以假定饱和态→干燥态过程岩样仅仅失去孔隙中的自由水以及不稳定结合水,此过程为物理反应,且可逆,满足 Gassmann 模型假设。因此,本文预测波速公式中的 K_b , G_b 分别取干燥态(正常室内环境下)实测的体积模量和剪切模量。

由于本文岩样中含有 2~3 种固体基质, K_s 值不便于通过查文献资料获得。基于经验关系的干岩石骨架模型,简单假设模量与孔隙度有关,而不考虑岩石的孔隙结构。最常见的经验模型是临界孔隙度模型,它假设在岩石的孔隙度小于某个临界孔隙度下干岩石骨架的体积和剪切模量都随孔隙度线性变化,Nur 等^[15]建议用下面公式建立干岩石骨架与基质的体积模量之间的关系:

$$K_b = K_s(1 - \frac{\phi}{\phi_c}) \quad (6)$$

其中, ϕ_c 为临界孔隙度,对于砂岩,临界孔隙度 $\phi_c \approx 0.4$ 。采用式(6)并结合 K_b 则可以反算得到 K_s 。

图 6 为岩样饱和状态下采用 Gassmann 模型计算得到的纵横波速与实验室实测纵横波速的对比图。图 6(a)表明整体上实测数据和预测数据比较吻合(大部分数据点在直线 $y=x$ 附近),说明 Gassmann 模型对于人工泥质砂岩的适用性以及实测数据的准确性。将图 6(a)中的数据按岩样中含黏土成分不同分成三类,并对三类数据分别进行线性拟合,得到拟合直线方程及相关系数,如图 6(b)(c)(d)所示。可以看出,关于实测波速与预测波速,伊利石岩样数据的拟合直线和伊蒙混合岩样数据的拟合直线与直线 $y=x$ 较接近,且拟合系数较高;而蒙脱石岩样数据的拟合直线偏离直线 $y=x$ 较大,且相关系数也较低。因此,黏土成分为伊利石的岩样吻合度很高,黏土成分为伊蒙混合的岩样吻合度较高,而含有蒙脱石的岩样吻合度则相对较低,表明含蒙脱石的岩样浸水饱和后由于蒙脱石本身的强吸水性能而导致岩样内部结构发生了不均匀变化,间接证明了实测数据的合理性。由于仅含蒙脱石的岩样遇水后内部结构发生了不均匀性变化,与通过波速计算弹性参数的理论前提(各向同性均匀岩石)相矛盾。因此,在对岩样纵横波速与力学性质做水敏性分析时,为了增强实验结论的可靠性,将只考虑含有伊利石的岩样,对于蒙脱石的影响可以间接通过仅含伊利石和含伊蒙混合的岩样进行对比分析间接得到。

3.2 水对岩样纵横波速影响分析

文中纵横波速的影响因素有黏土含量和孔隙度两个,Khaksar 等^[6]研究表明纵横波速与孔隙度满足明显的线性相关性,即

$$V = A_0 - A_1 \phi \quad (7)$$

其中, A_0 , A_1 为线性方程的拟合系数; V 为波速; ϕ 为孔隙度。

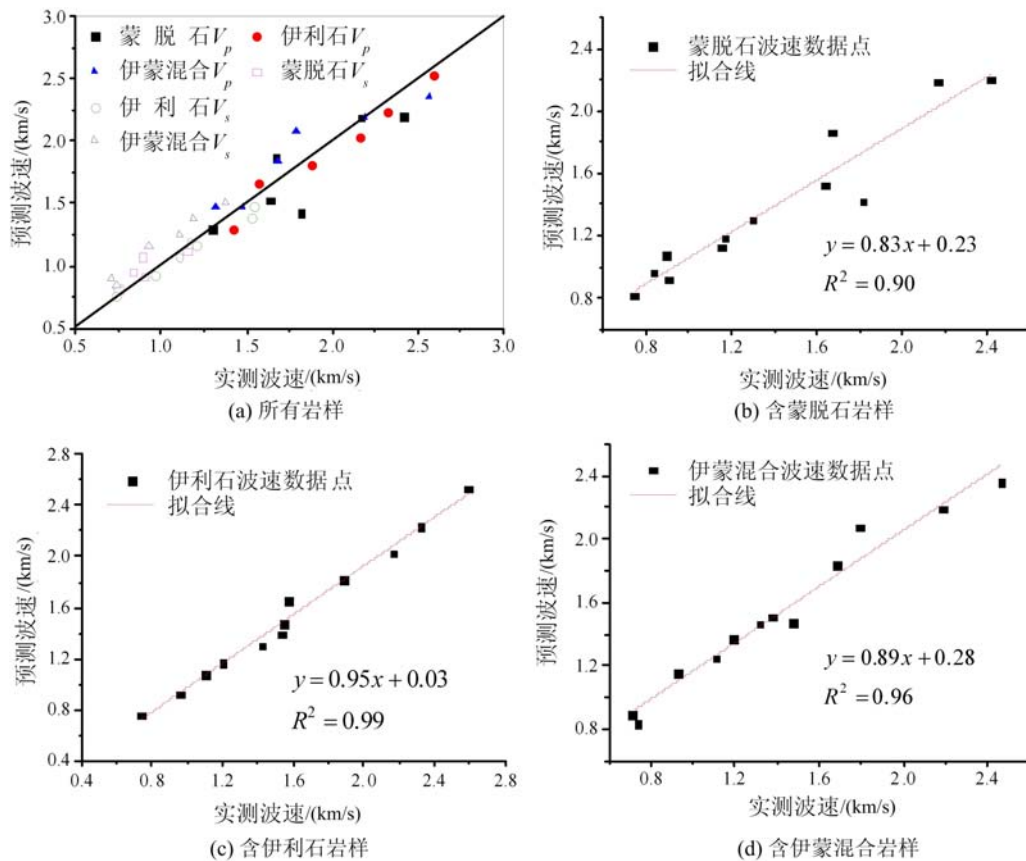


图 6 饱和状态下岩样实测波速与由 Gassmann 模型预测波速的对比

Fig. 6 Predicted wave velocities using Gassmann model versus measured wave velocities for water-saturated samples

Han 等^[1]在大量实验的基础上,提出了波速-孔隙度-黏土含量模型,该模型纵横波速与孔隙度和黏土含量之间满足双变量线性经验方程:

$$V = B_0 - B_1 \phi - B_2 C \quad (8)$$

其中, B_0 、 B_1 、 B_2 为双变量线性方程的拟合系数; C 为黏土含量。

为研究纵横波速的主要影响因素,图 7 给出了常态和干燥态两种情况下含不同黏土类型岩样纵横波速随孔隙度的变化规律(个别岩样实验中损坏)。可以看出无论何种状态,岩样含何种黏土,纵横波速均随孔隙度的增加而减小,且纵横波速与孔隙度之间有比较明显的线性相关性,相关性系数 R^2 最低 0.85,最高 0.97。图 8 给出了常态和干燥态两种状态下纵波波速与孔隙度和黏土含量间的关系云图及拟合关系式,从云图上可以定性分析得到纵波波速随黏土含量的增大而增大,随孔隙度的增大而减小;式(8)拟合结果表明孔隙度对纵波波速的影响明显大于黏土含量对纵波波速的影响,且相关系数显示了纵波波速与黏土含量和孔隙度的弱相关性。说明波速-孔隙度模型更适用于本文人工泥质砂岩,孔隙度为影响纵横波速的主要因素,能更好反映波速的变化规律。

对于含伊利石的岩样而言,常态和干燥态下横波和纵波速度基本相等,表明水对含伊利石岩样的内部孔隙结构影响不大,基质颗粒间的孔隙仍然占主导地位,这同时体现了伊利石的弱吸水能力;对于含伊蒙混合的岩样而言,可以明显看出在同等孔隙度下,常态下的纵横波速大于干燥态下的纵横波速,波速与孔隙度满足线性关系,表明水对含伊蒙混合岩样的内部孔隙结构影响很大,此时各成分基质颗粒间的孔隙不再是整个岩样孔隙的主要构成部分,黏土内部孔隙也成为岩样孔隙的重要组成,可以解释为黏土吸水膨胀内部微孔隙扩张而各成分基质颗粒间孔隙压缩的“此消彼长”的现象,这是由蒙脱石的强吸水膨胀性能以及黏土的填隙分布模式共同决定的。

3.3 水对岩样弹性参数影响分析

对于各向同性均匀岩石,只要测出超声波在岩样中的横波速度与纵波速度,就可计算得到岩样的动

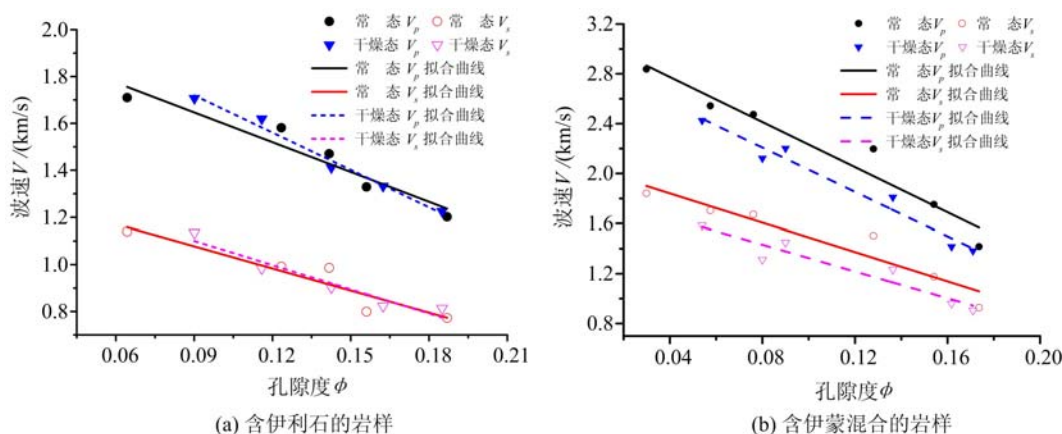


图7 常态与干燥态两种状态下纵横波速与孔隙度按照式(7)的拟合关系曲线

Fig. 7 P- and S-wave velocity with porosity fitted by equation (7) under normal and dry conditions

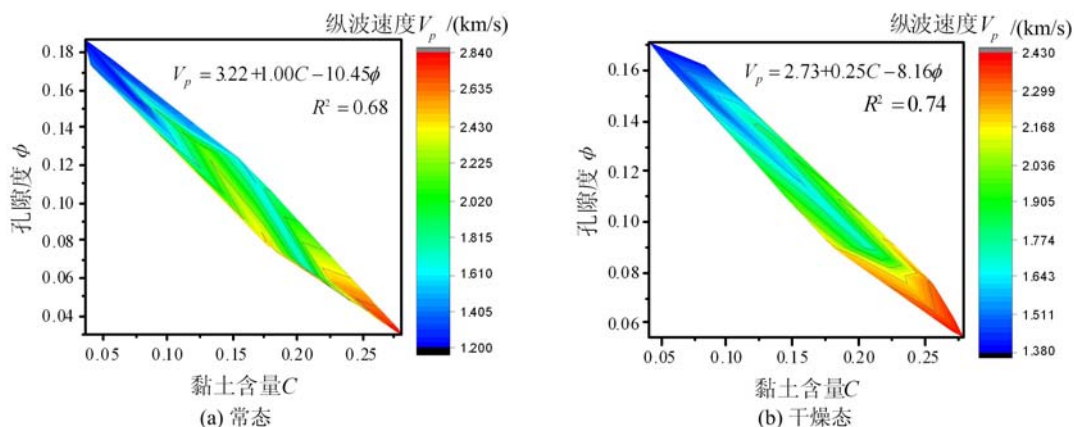


图8 含伊利石和伊蒙混合岩样纵波波速与孔隙度和黏土含量间的关系云图及按照式(8)的拟合结果

Fig. 8 P-wave velocity with porosity and clay content fitted by equation (8)

for rock samples containing illite and illite-montmorillonite mixed

态杨氏模量、泊松比、剪切模量以及体积模量,并且这四个岩石弹性参数知道其中任何两个便能计算出另外两个,本文将对剪切模量和体积模量进行分析。体积模量 K 和剪切模量 G 与纵横波速 V_p, V_s 间的关系为:

$$G = \rho V_s^2 \quad (9)$$

$$K = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \quad (10)$$

由于孔隙度是岩样纵横波速的最主要影响因素,图9给出了常态和干燥态下含伊利石和伊蒙混合岩样剪切模量 G 和体积模量 K 随孔隙度的变化规律。不考虑岩样所处状态时,黏土成分为伊利石和伊蒙混合的泥质砂岩岩样的剪切模量 G 和体积模量 K 均随孔隙度的增加而减小,说明孔隙越多,岩样越容易发生剪切破坏,其体积也越容易压缩,这很好地体现了本文黏土填隙分布模式人工岩样的结构特征。

当孔隙度一定时,对比分析常态和干燥态,从图9(a)可以发现,黏土成分为伊利石时,岩样常态(浸水前)剪切模量 G 和体积模量 K 小于干燥态(浸水后),且随孔隙度的逐渐增大,两种状态下的体积模量与剪切模量越接近,其对水的敏感性也越弱,表明只有当岩样本身的孔隙度足够小时,由伊利石的弱吸水膨胀性引起的岩样孔隙的微弱变化才会对岩样力学性质带来一定的影响;从图9(b)可以看出,黏土成分为伊蒙混合时,岩样干燥态(浸水后)剪切模量 G 和体积模量 K 小于常态(浸水前),表明含蒙脱石岩样的弹性参数对水的敏感性很强,这说明蒙脱石的强吸水膨胀性能,不仅影响了石英砂颗粒间的孔隙结构,而且还改变了整个岩样黏土分布方式,造成岩样整体体积增大,此时黏土内部形成大量微孔隙,将

不能被忽略。

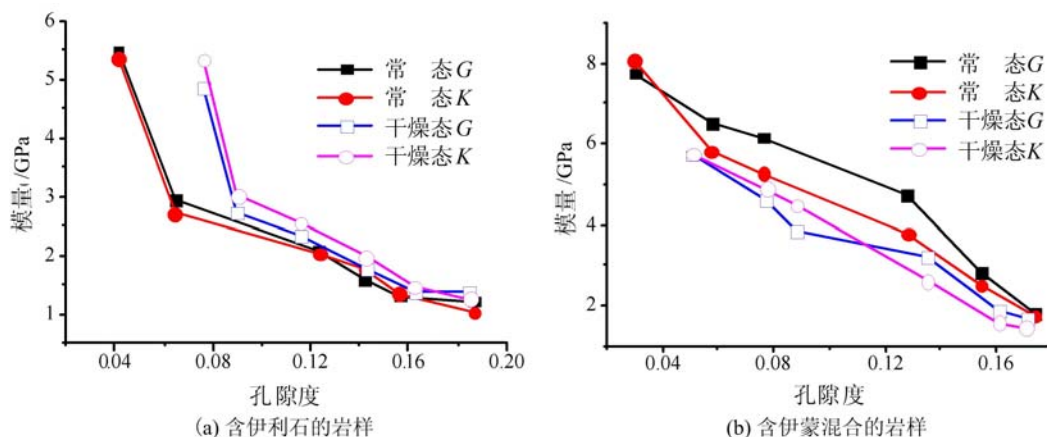


图 9 含不同黏土成分的岩样常态和干燥态剪切模量 G 和体积模量 K 随孔隙度的变化规律

Fig. 9 Shear modulus G and bulk modulus K versus porosity under normal and dry conditions for rock samples containing different clay

4 结论

在实验基础上,通过对比分析泥质砂岩岩样三种不同状态下纵横波速和弹性参数,得到以下结论:

(1) 饱和状态下,结合临界孔隙度模型的 Gassmann 模型计算得到的纵横波速预测值与实验实测值吻合度很高,说明 Gassmann 模型能很好地适用于人造泥质砂岩岩样,同时表明了实验结果的合理性;同样说明人造岩样可以用于砂岩储层声波特性及弹性参数等方面的实验研究。

(2) 对于含伊利石和伊蒙混合的岩样,波速-孔隙度模型更适用,孔隙度对纵横波速的影响大于黏土含量,说明孔隙度能更好反映岩样模量变化规律;对于含蒙脱石的岩样,实验结果预测值与实测值偏离较大,在有水存在的条件下,通过弹性波速预测含蒙脱石岩样的模量是不可靠的。

(3) 在主要影响因素孔隙度的控制下,对比分析常态和干燥态,①当黏土成分为伊利石时,浸泡水前后岩样纵横波速基本相等,岩样常态(浸水前)剪切模量 G 和体积模量 K 略小于干燥态(浸水后),且随孔隙度的逐渐增大,两种状态下的体积模量与剪切模量越接近,说明水对于含伊利石岩样的弹性性能影响较小,且孔隙度越大影响越小;②当黏土成分为伊蒙混合时,不管孔隙度为何值,岩样干燥态纵横波速及剪切模量 G 和体积模量 K 明显小于常态,说明水会降低含伊蒙混合岩样的弹性性能,这是由于蒙脱石吸水膨胀后,黏土内部形成大量孔隙,可以比肩固体颗粒间孔隙,此时黏土内部的孔隙不能被忽略。

本文仅考虑了浸水饱和前后两个始终状态以及零应力条件,更多应力条件及浸水过程状态也需要进一步研究。由于黏土类型复杂性,样品局限性,实验误差等因素,应用这些规律还必须与常规测井与全波测井等资料相结合。基于天然岩石的各向异性,各向异性状态下含不同黏土人工砂岩相关性质的水敏性研究显得尤为重要,也是今后研究工作的一个重要方向。

参考文献:

- [1] Han D H, Nur A, Morgani D. Effect of porosity and clay content on wave velocities in sandstones[J]. Geophysics, 1986, 51(11):2093-2107.
- [2] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9):3300-3306 (DIAO Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9):3300-3306 (in Chinese))
- [3] Tosaya C, Nur A. Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks[J]. Geophysical Research Letters, 1982, 9(1):5-8.
- [4] Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks[J]. Geophysics, 1985, 50(4):571-581.

- [5] Klimentos T. The effects of porosity, permeability and clay content on the velocity of compressional waves[J]. *Geophysics*, 1991, 56(12):1930—1939.
- [6] Khaksar A, Griffiths C. Effects of porosity and clay content on P- and S-wave velocities in Cooper Basin Sandstones[J]. *Exploration Geophysics*, 2000, 31(2):433—440.
- [7] Marion D, Nur A, Yin H, et al. Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures[J]. *Geophysics*, 1992, 57(4):554—563.
- [8] Xu S Y, Roy E. A new velocity model for clay-sand mixtures[J]. *Geophysical Prospecting*, 1995, 43(1):91—118.
- [9] Jiang L, Sun J, Liu X. Pore-space microstructure and clay content effect on the elastic properties of sandstones[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2012, 30(8):830—840.
- [10] 张玲, 乔悦东, 李洪奇. 泥岩蚀变对声波测井影响的试验研究[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(4):79—82 (ZHANG Ling, QIAO Yuedong, LI Hongqi. Experimental study on influence of shale erosion on acoustic logging[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(4):79—82 (in Chinese))
- [11] 胡学红, 李长文, 李新, 等. 低孔隙度低渗透率砂岩的声波特性实验研究[J]. *测井技术*, 2004, 28(4):273—276 (HU Xuehong, LI Changwen, LI Xin, et al. Experiments on acoustic characters of low porous and permeable sandstones[J]. *Well Logging Technology*, 2004, 28(4):273—276 (in Chinese))
- [12] 刘荣和, 冯文光, 龙玲, 等. 致密碳酸盐岩石力学与声学实验研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 2008, 27(6):131—135 (LIU Ronghe, FENG Wenguang, LONG Ling, et al. Experimental studies on the mechanics and acoustics of tight carbonate rock[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2008, 27(6):131—135 (in Chinese))
- [13] 尹帅, 丁文龙, 王濡岳, 等. 陆相致密砂岩及泥页岩储层纵横波波速比与岩石物理参数的关系及表征方法[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(3):22—28 (YIN Shuai, DING Wenlong, WANG Ruyue, et al. Characterization method of v_p/v_s and its relationship with rock physical parameters of continental tight sandstone and shale reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(3):22—28 (in Chinese))
- [14] 唐晓明, 钱玉萍, 陈雪莲. 孔隙、裂隙介质弹性波理论的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(12):4226—4233 (TANG Xiaoming, QIAN Yuping, CHEN Xuelian. Laboratory study of elastic wave theory for a cracked porous medium using ultrasonic velocity data of rock samples[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(12):4226—4233 (in Chinese))
- [15] Nur A, Mavko G, Dvorkin J, et al. Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks[J]. *The Leading Edge*, 1998, 17(3):357—362.
- [16] Yu C B, Ji S C, Li Q. Effects of porosity on seismic velocities, elastic moduli and Poisson's ratios of solid materials and rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(1):35—49.
- [17] Cockaerts G, De Cooman P. Measuring wave propagation characteristics in artificial sand-clay mixtures[J]. *Surveys in Geophysics*, 1994, 15(5):495—513.
- [18] 韩学辉, 杨龙, 侯庆宇, 等. 一种分散泥质胶结疏松砂岩的人工岩样制作新方法[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(6):2944—2949 (HAN Xuehui, YANG Long, HOU Qingyu, et al. A new method for making artificial rock of unconsolidated sandstone cemented by dispersed shale[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(6):2944—2949 (in Chinese))
- [19] 熊钰, 王帅, 耿站立, 等. 弱胶结高渗疏松砂岩人造岩心制作新技术[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(3):1474—1479 (XIONG Yu, WANG Shuai, GENG Zhanli, et al. A new technology of making weakly cemented and hypertonic artificial cores of unconsolidated sandstone[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(3):1474—1479 (in Chinese))
- [20] 王子振, 王瑞和, 邱浩, 等. 一种多重孔隙结构人造岩心的制备新方法及其应用[J]. *石油物探*, 2015, 54(2):150—156 (WANG Zizhen, WANG Ruihe, QIU Hao, et al. A new method for artificial core preparation with multiple pore structures and its application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(2):150—156 (in Chinese))
- [21] Mark S S, Martijn A. The effect of clay distribution on the elastic properties of sandstones[J]. *Geophysical Prospecting*, 2001, 49(1):128—150.

- [22] King M S, Marsden J R, Dennis J W. Biot dispersion for P- and S-wave velocities in partially and fully saturated sandstones[J]. *Geophysical Prospecting*, 2000, 48(6):1075–1089.
- [23] Kassab M A, Weller A. Study on P-wave and S-wave velocity in dry and wet sandstones of Tushka region, Egypt [J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2015, 24(1):1–11.

Experimental investigation on the influence of water on P- and S-wave velocities and elastic parameters of argillaceous sandstone

ZHONG Jiang-cheng¹, ZHAO Yang¹, REN Wei-guang¹, CHEN Chao-fan¹, ZHOU Hong-wei^{1, 2}

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Water has a great impact on the P- and S-wave velocities and elastic parameters of oil and gas reservoir containing different clay minerals. In order to study this effect, three sets of artificial argillaceous sandstone samples (montmorillonite, illite and illite/montmorillonite mixture) with different clay contents (volume fraction) were made under the same conditions. The P- and S-wave velocities were measured successively under normal, saturated and dry conditions respectively, and porosity was calculated under the artificial rock sample filling distribution model. Firstly, the rationality of experimental data of artificial rock samples was verified by Gassmann model combining with the critical porosity model. Then, the main factors affecting wave velocities and elastic parameters of rock samples were determined. Under its control, the P- and S-wave velocities, shear modulus and bulk modulus of normal and dry rock samples were compared and analyzed. Results show that the influence of water on P- and S-wave velocities and elastic parameters is small for rock samples containing illite. The larger the degree of porosity, the smaller the influence is. However, for rock samples containing illite/montmorillonite mixture, the influence of water is great. The P- and S-wave velocities and elastic parameters of rock samples after immersion become smaller obviously, which indicates that the microscopic pores of montmorillonite can not be ignored after water absorption and expansion.

Keywords: clay; artificial shaly sandstones; porosity; P- and S-wave velocities; elastic parameters