

丁拼搏,狄帮让,魏建新等. 2015. 利用含可控裂缝人工岩样研究裂缝密度对各向异性的影响. 地球物理学报, 58(4): 1390-1399, doi:10. 6038/cjg20150425.

Ding P B, Di B R, Wei J X, et al. 2015. Experimental research on the effects of crack density based on synthetic sandstones contain controlled fractures. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(4): 1390-1399, doi:10. 6038/cjg20150425.

## 利用含可控裂缝人工岩样研究裂缝密度 对各向异性的影响

丁拼搏<sup>1,2,3</sup>, 狄帮让<sup>1,2</sup>, 魏建新<sup>1,2</sup>, 李向阳<sup>1,2,3</sup>, 邓颖华<sup>4</sup>

1 油气资源与探测国家重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 CNPC 物探重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

3 Edinburgh Anisotropy Project, Edinburgh, EH9 3LA, UK

4 东方地球物理公司大港分院研究所, 天津 300280

**摘要** 利用新方法制作出含可控裂缝的双孔隙人工砂岩物理模型, 具有与天然岩石更为接近的矿物成分、孔隙结构和胶结方式, 其中裂缝密度、裂缝尺寸和裂缝张开度等裂缝参数可以控制以得到实验所需要的裂缝参数, 岩样具有真实的孔隙和裂缝空间并可以在不同饱和流体状态下研究流体性质对于裂缝介质性质的影响. 本次实验制作出一组具有不同裂缝密度的含裂缝人工岩样, 对岩样利用 SEM 扫描电镜分析可以看到真实的孔隙结构和符合我们要求的裂缝参数, 岩样被加工成八面棱柱以测量不同方向上弹性波传播的速度, 用 0.5 MHz 的换能器使用透射法测量在饱和空气和饱和水条件下各个样品不同方向上的纵横波速度, 并得出纵横波速度、横波分裂系数和纵横波各向异性强度受裂缝密度和饱和流体的影响. 研究发现流体对于纵波速度和纵波各向异性强度的影响较强, 而横波速度、横波分裂系数和横波各向异性强度受饱和流体的影响不大, 但是对裂缝密度的变化更敏感.

**关键词** 双孔隙物理模型; 裂隙密度; 纵横波速度; 各向异性; 横波分裂; 岩石物理

doi:10. 6038/cjg20150425

中图分类号 P631

收稿日期 2014-03-13, 2015-03-18 收修定稿

### Experimental research on the effects of crack density based on synthetic sandstones contain controlled fractures

DING Pin-Bo<sup>1,2,3</sup>, DI Bang-Rang<sup>1,2</sup>, WEI Jian-Xin<sup>1,2</sup>, LI Xiang-Yang<sup>1,2,3</sup>, DENG Ying-Hua<sup>4</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249, China

2 CNPC Key Laboratory of Geophysical Exploration, Beijing 102249, China

3 Edinburgh Anisotropy Project, British Geological Survey, Edinburgh, EH9 3LA, UK

4 BGP Dagang Branch, CNPC, Tianjin 300280, China

**Abstract** Fracture development and distribution in underground rocks have strong influence on rock properties, understanding the fracture system is critical to the oil and gas reservoir detection and production, groundwater resource, underground wastes storage, mining, seismology and CO<sub>2</sub> capture and storage.

Due to the complex fracture distribution and geometry in nature rocks, the lack of information about fracture parameters (fracture density, length and thickness) makes the nature

**基金项目** 国家重大专项(2011ZX05019-008)资助.

**作者简介** 丁拼搏,男,1988年生,中国石油大学(北京)在读博士,目前主要从事裂缝介质地震各向异性、岩石物理学及实验、地震物理模拟方面的研究. E-mail:dingpinbo@163.com

rock cannot be used in laboratory experiments. Rock physics experiments require the controlled and known fracture parameters and orientation in rock samples, thus synthetic samples were used to represent fractured rocks in several previous studies. However, the fractures were represented by other weak material, such as silica rubber imbedded in epoxy solid, to simulate the fractured rocks in previous studies. The materials used to construct the samples (Lucite, silica rubber, sand bonded by epoxy) were very different from nature rocks, the solid representing background matrix and the weak material representing fractures have no porous and fracture space and saturated fluids. In this study, we use new construction method based on material science progress to build synthetic samples which have similar mineral component, porous structure, cementation as nature rocks. The synthetic rock containing controlled fracture geometry provides a different way to create fractured rocks to observe the seismic anisotropy influenced by fracture parameters and fluids. The synthetic rocks are tested under high pressure to observe the pressure sensitivity, and SEM is used to observe the porous structure and fractures distribution. We build a set of synthetic rocks to observe the effect of fractures upon seismic wave velocity and anisotropy. The samples are measured with 0.5 MHz transducers. P and S wave velocity in different propagation directions of these four samples are measured when saturated by air and water.

The experimental results can help in investigating the relationship between fracture density and P and S wave anisotropy in fractured reservoirs. The measurement results show that the P wave velocity and anisotropy is significantly influenced by saturating fluid. Shear wave velocity, shear wave splitting and shear wave anisotropy are less sensitive to saturating fluid but significantly affected by fracture density. P wave velocities in perpendicular direction show significant influences of fracture, the velocity decreases as the fracture density increases. Shear wave velocity in perpendicular direction decreases with the increasing fracture density, the difference between fast shear wave and slow shear wave velocity is smaller in this direction. However the slow shear wave velocity is more sensitive to fracture density than fast shear wave velocity in parallel direction, thus the difference of fast and slow shear wave velocity in parallel direction increases as the fracture density increases. P wave velocity is more sensitive to saturating fluids, as the velocity is higher in water saturation than air saturation. P wave anisotropy is much higher in air saturation, but decreases while saturated by water. Shear wave velocity and anisotropy is less sensitive to fluid saturation, but is more sensitive to fracture density since shear wave anisotropy increases significantly with increasing fracture density.

The new construction process can provide more realistic rocks for rock physics experiments, in which the fracture parameters can be controlled. The measurement results show that P wave velocity and anisotropy is very sensitive to fluid saturation, P wave anisotropy decreases while rock is saturated by fluid with higher modulus. Shear wave velocity is not sensitive to fluids but is significantly influenced by fracture density.

**Keywords** Physical model; Fracture density; Elastic wave velocity; Anisotropy; Shear wave splitting; Rock physics

## 1 引言

裂缝的存在对油气资源的存储和运移起到非常重要的作用,裂缝较为发育的地层通常具备良好的

储层条件.寻找裂缝发育的地层并获取地下裂缝的空间分布和裂缝发育信息,对于裂缝油气藏的储层评价、保障钻井成功率和提高采收率都有着至关重要的影响.从地震资料中可以提取纵横波速度、各向异性、衰减等信息来反应裂缝储层的裂缝发育程度

和分布情况,因此研究裂缝介质中裂缝参数在 seismic 波传播过程中对纵横波的速度、衰减以及各向异性特征的影响具有非常大的理论意义和实践意义. 在裂缝油气藏的勘探和开发过程中,裂缝密度是最重要的参数之一,裂缝密度的大小直接与该地层的裂缝发育程度和油气储量有着紧密的联系. 在地震勘探中,裂缝密度的大小对地震波的速度、衰减和各向异性特征都有着显著的影响,裂缝密度较为发育的储层在地震记录中具有明显的纵横波各向异性的反应.

在岩石物理学中,等效介质理论(Equivalent medium theory)被用于描述裂缝介质的岩石物理性质,通过某些假设把复杂的岩石物理问题简化为具体的数学物理问题,建立岩石的矿物、孔隙形态、孔隙度、渗透率、裂缝参数等与岩石的弹性性质之间的关系,以进一步研究地震波在岩石中的传播. 最近几十年里发展出了若干种描述裂缝介质的等效介质理论. Eshelby(1957)推导了各向同性介质中含有包体的岩石物理模型,背景介质被看做是各向同性的围体,而裂缝被看做是各向同性围体中的一个包体. KT 模型考虑到了不同的孔隙形状对岩石弹性性质的影响(Kuster and Toksoz, 1974). O'Connell 和 Budiansky(1977)推导了孤立、饱和流体的裂缝介质理论. Hudson(1980)基于长波长假设提出了各向同性介质中含有独立裂缝时的表达式,裂缝中包含气体、液体或者其他体积模量和弹性模量比较小的弱介质,且裂缝中的流体被封闭在裂缝内不发生流动,因此被称为高频模型. 该模型被推广到了流体部分饱和及等径孔隙背景下的连通孔隙模型(Hudson, 1988; Hudson et al., 1996). Thomsen(1995)建立了等径孔隙背景下的裂缝模型,该模型基于局部流体压力平衡的假设,孔隙和裂缝中的流体在流体压力梯度的作用下会发生局部流动,因此该模型被称为低频模型. Berryman 和 Wang(2000)提出了考虑两种孔隙度和两种渗透率的岩石物理模型,其中岩石中的孔隙具有较大的孔隙度和较低的渗透率,而裂缝则对应了较小的孔隙度和具有较大的渗透率. Chapman(2003)提出了同时考虑颗粒尺度的孔隙、微裂纹和中等尺度的裂缝的多尺度频变模型,其中颗粒尺度的孔隙和微裂纹对应着较小的弛豫时间和较高的特征频率,较大尺度的裂缝则对应着较大的弛豫时间和较低的特征频率,因此在 Chapman 理论中裂缝介质的弹性性质是随着地震波的频率的变化而变化. Jakobsen 和 Chapman(2009)推导了考虑两

种流体流动机制的统一理论,该理论认为在岩石孔隙均匀的情况下孔隙流体发生全局流产生正频散,在岩石孔隙不均匀或者含有裂缝时流体发生局部喷射流产生负频散. 巴晶推导了双孔隙介质的岩石物理性质和地震波传播特征,并进一步推导了非饱和岩石中的纵波频散与衰减(巴晶, 2010; 巴晶等, 2012). Tang(2011)基于 Biot 理论推导了双孔隙介质统一理论.

以上描述裂缝介质的等效介质理论还需要有岩石物理实验的验证,但是由于天然岩石中裂缝分布和形态比较复杂,裂缝参数(如裂缝密度、裂缝张开度、裂缝长度等)是无法确定的,因此在对裂缝介质的岩石物理实验中通常要借助物理模型来研究裂缝参数对裂缝介质弹性性质的影响. Ass' Ad(1992)用环氧树脂作为基质用硅橡胶片模拟裂缝研究了裂缝密度对于横波各向异性的影响. Rathore(1995)利用环氧树脂胶结石英砂制作了含裂缝的双孔隙模型,实验结果表明 Hudson 理论对于含水条件下的纵波各向异性计算高于实验测量值,同时证明了孔隙流体流动对地震波的传播有着重要的影响. 贺振华等(2001)利用环氧树脂板和黄铜板制作了定向排列裂缝物理模型,研究了裂缝对地震波速度和振幅的影响. 魏建新(2002)用环氧树脂做基质,用硅橡胶薄片近似模拟裂缝,制作出了一批具有不同裂缝密度的模型,研究了裂缝密度对于横波速度和各向异性系数的影响. 曹均等(2003)利用环氧树脂板和铜箔制作了裂缝物理模型,研究了裂缝密度和裂缝张开度等对地震波传播的影响. 魏建新和狄帮让(2008)研究了裂缝张开度对纵横波速度和振幅的影响. 尹志恒等(2012)制作了含不同裂缝参数的几组裂缝物理模型,研究了裂缝参数对纵横波振幅和衰减的影响,并得出了衰减各向异性对裂缝参数更敏感的结论. Tillotson 等(2011)研究了含裂缝介质中流体对横波各向异性的影响. Wei 等(2013)用不同频率的超声波换能器测试了含不同裂缝张开度的裂缝模型,研究了裂缝张开度对纵波速度、各向异性以及频散的影响. 但是在上述研究中使用的裂缝模型具有很大的局限性,用有机玻璃、环氧树脂、硅橡胶等材料模拟裂缝介质与天然岩石有着非常大的差异. 同时,在上述很多裂缝模型中并没有真实的孔隙和裂缝的存在,也没有孔隙流体的填充,因此其弹性性质和地震波的传播特征与实际裂缝岩石有较大差异.

本研究利用新方法构建含有可控裂缝的物理模型,与之前的实验样品相比其在矿物成分、孔隙结构、

胶结方式等方面与天然岩石更为接近.扫描电镜图片显示其具有真实的孔隙结构和裂缝空间,能更好的研究双孔隙介质的弹性性质和地震波传播特征.本文制作了一组具有不同裂缝密度的裂缝模型,并在含气和含水的条件下利用超声波换能器对每块实验样品在不同方向上的纵横波传播速度进行了测量,并分析了纵横波速度、横波分裂、纵横波各向异性系数受饱和流体和裂缝密度的影响.

## 2 含可控裂缝的人工岩样

### 2.1 制作含可控裂缝的新型人工砂岩物理模型

本研究利用一种新方法制作具有真实孔隙可进行不同饱和流体状态下岩石物理实验,以研究裂缝介质中弹性波的传播规律和各向异性特征.该方法成功率高可以制作出稳定可靠的双孔隙人工砂岩物理模型,并用于研究裂缝参数和饱和流体对于地震波传播的影响以及裂缝介质的各向异性特征.

首先从材料学的角度入手,为了寻找适合制作与天然岩石具有类似矿物成分、孔隙结构和胶结方式的人工砂岩物理模型,本研究选择了石英砂、高岭土、长石作为原料.文中涉及到的双孔隙人工砂岩物理模型的制作是基于材料学制作工艺和流程,其制作流程如下:

①实验设计:据实验需要设计出相应的生产工艺和流程;

②原料选择和预制:选择合适的原料,并对原料做预处理;

③配料:原料的称量,粉料的均匀化,杂质的筛除;

④成型:填料,压制成型,脱模;

⑤烧结:高温烧结,烧结环境选择和烧结制度控制;

⑥后处理:制成岩样的后续处理,切割打磨,参数测试.

在人工砂岩物理模型的制作过程中,首先按照所需的颗粒目数和配比要求将石英砂、长石、高岭土等(如图1)进行充分均匀的混合,再在混合粉体中加入辅助粘结剂,搅拌混合均匀之后,得到最终的混合物料;取混合物每次按照一定量放入模具中,在每一层上铺放事先准备好的硬币状高分子材料薄片,使得薄片尽可能随机均匀地分布在每一层上.最后把模具放入压机压实,将胚体脱模放入恒温干燥箱静置,最后将胚体放入高温马弗炉内烘烤若干小时,高分子材料受热分解成为气体,留下的孔隙则是真实的裂缝.可根据要求制备不同形态的高分子材料薄片,以制作不同形态要求的裂缝模型;同时在铺放过程中通过控制薄片的大小和数量可以制作出含不同裂缝密度的裂缝模型.

由于选用的原料(石英、长石和高岭土等)均是砂岩中常见的矿物成分,因此本方法制作的人工砂岩物理模型具有和天然岩石相似的矿物成分;通过SEM扫描电镜图片分析可以看出与传统的利用有机玻璃、环氧树脂胶结等方式不同的是,该方法制作



图1 石英砂(a)、水玻璃(b)、长石(c)、高岭土(d)

Fig. 1 Silica sand (a), sodium silicate (b), feldspar (c), kaolinite (d)

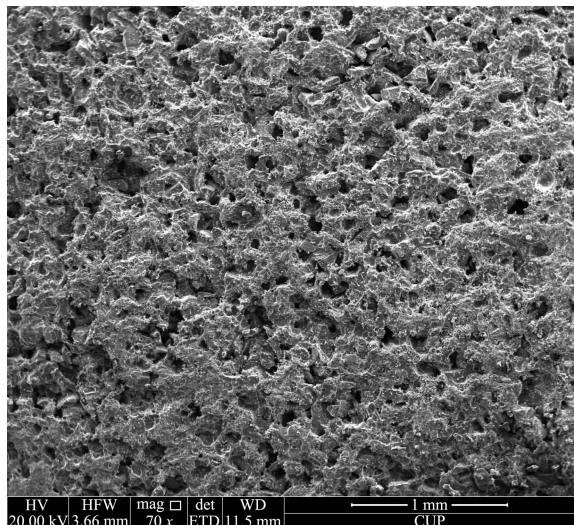


图 2 人工砂岩物理模型的 SEM 扫描电镜图片(不含裂缝)

Fig. 2 SEM image of synthetic sandstone (blank)

出的人工岩样具有真实的孔隙形状和结构(如图 2);因此本研究中使用的方法制作双孔隙人工砂岩物理模型具有和天然岩石更为接近的矿物成分、孔隙和胶结方式,并可在不同饱和流体填充的条件下观测地震波的传播和各向异性特征,可以用于更多的岩石物理测试和提供更加丰富的数据.

## 2.2 含不同裂缝密度的裂缝模型的制作

利用上述的方法制作出一组含不同裂缝密度的人工砂岩物理模型,用于测试裂缝密度对于纵横波传播和地震各向异性的影响.选用直径为 4 mm、厚度为 0.06 mm 的薄片,为制作不同的裂缝密度样品,

在制作过程中把一个 100 mm×100 mm 的模具中每层分为 4 个区域,并且在每个区域放入 0、20、40、60 个上述规格的薄片,这 4 个部分具有不同的裂缝密度但是具有相同的背景介质,因此除了裂缝密度之外其他的岩石物理性质几乎相同.制作完成之后模型被加工成 4 块八面棱柱的岩样,每个方向上的长度大约为 50 mm,以测试不同方向上的纵横波速度(如图 3 所示).图 4 为 SEM 图像显示扫描电镜下的孔隙结构和裂缝形态.

## 3 含可控裂缝的人工岩样的测试结果

利用超声波透射法对含裂缝岩样在不同饱和流体条件下进行测试,样品的含气饱和是通过对样品进行长时间的烘干而得到的,而含水饱和的过程是将样品浸入水中并放在抽真空的密封容器内将水和样品中的气体抽出而得到的.测试频率为 0.5 MHz,图 5 所示为裂缝样品内裂缝的分布及测试方位.首先对不含裂缝的基质岩样进行测试,以检验基质的稳定性和均匀性.含气和含水条件下纵波的测试波形如图 6 所示,分别为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  和  $145^\circ$  方向上的纵波透射波形.通过纵波波形初至到达时间可以确定超声波在某个方向上从岩样一侧的激发换能器透射到另一侧的接受换能器的时间,并计算出透射波的速度.含气和含水条件下横波的测试波形如图 7 所示,分别为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  和  $145^\circ$  每个方向上快横波

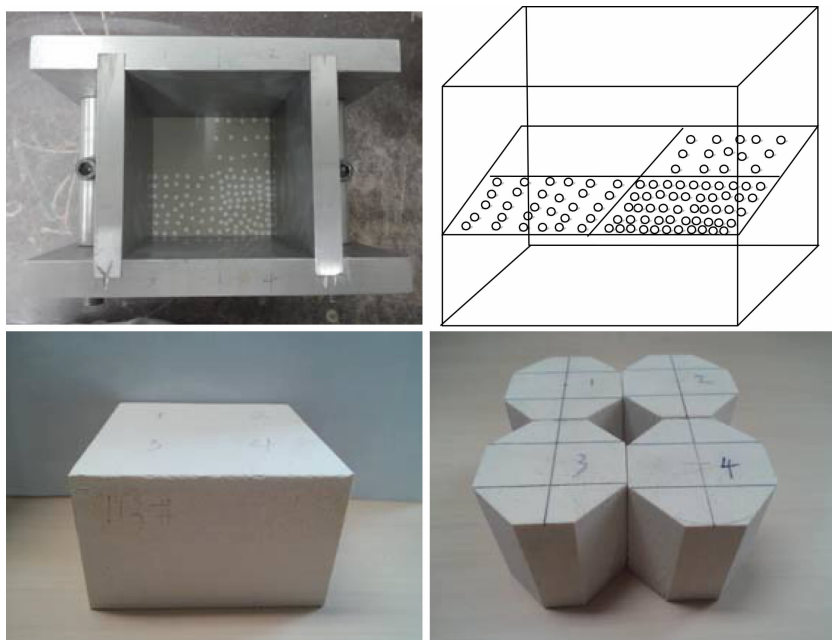


图 3 含可控裂缝岩样的制作过程

Fig. 3 Construction process of synthetic sandstone with controlled fracture density



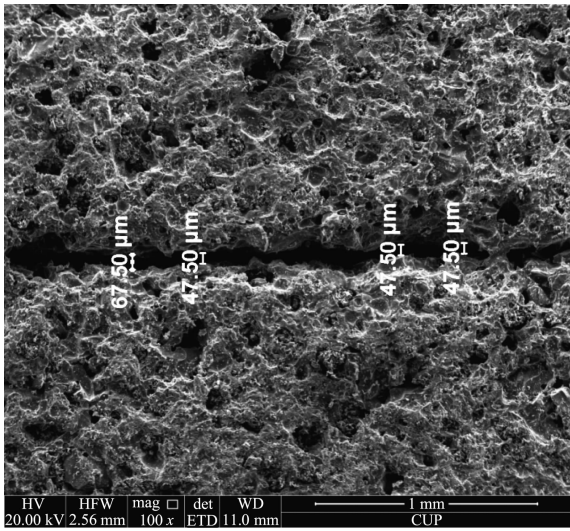


图 4 含裂缝岩样 SEM 扫描电镜图片

Fig. 4 SEM image of synthetic sandstone with fracture

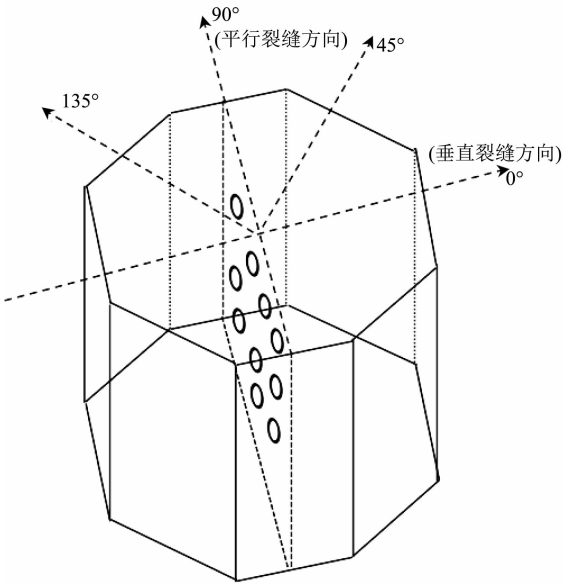


图 5 裂缝岩样中裂缝分布及测试方向示意图(图中所示 0°方向为垂直于裂缝平面的法向即各向同性对称轴的方向,90°方向为平行于裂缝平面的裂缝走向方向)

Fig. 5 Measurement directions on synthetic rocks with aligned fractures

和慢横波的透射波形。

不含裂缝的基质岩样和三块含裂缝的岩样的纵波速度测试结果如图 8 所示,含水条件下的纵波速度比含气条件下的纵波速度高,这是由于纵波速度是由体积模量和密度决定的,而体积模量对纵波速度的影响比密度大,相比较而言水的体积模量比空气的体积模量高,当岩石被体积模量较高的流体填充时岩石的纵波速度升高。从图 8 中可以看出纵波速度随着裂缝密度的增加而迅速降低,平行于裂缝

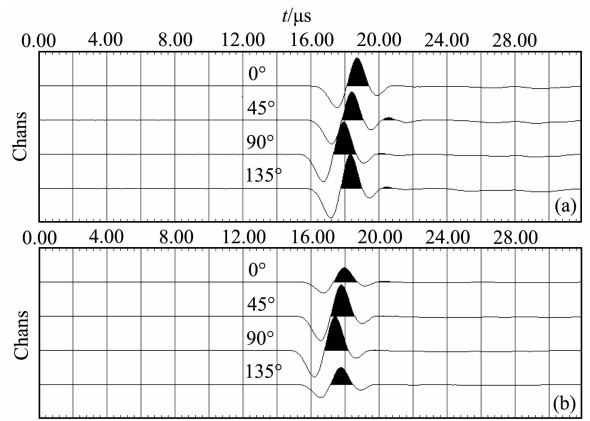


图 6 不含裂缝岩样在不同方向上的纵波透射信号 (a)含气;(b)含水。

Fig. 6 P wave transmission signal in different directions saturated by air and water

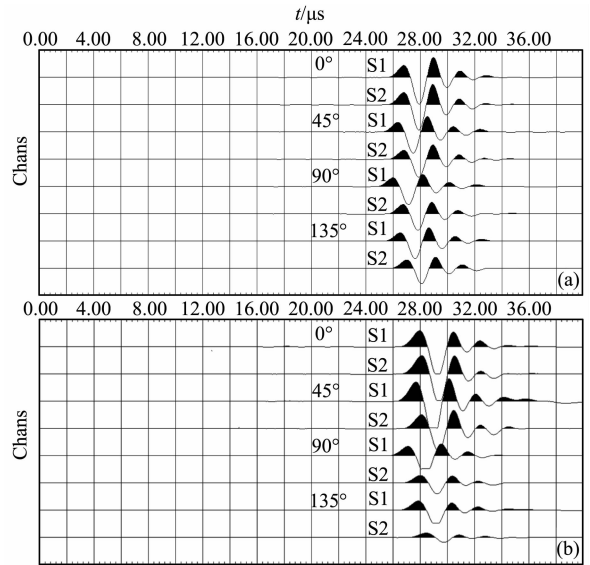


图 7 不含裂缝岩样在不同方向上的快横波和慢横波透射信号 (a)含气;(b)含水。

Fig. 7 Fast and slow shear wave transmission signal in different directions saturated by air and water

方向上纵波速度降低的趋势较小而垂直于裂缝方向上的纵波速度显著降低。由于在裂缝的长轴方向不易压缩,所以裂缝密度的增加使得平行裂缝上体积模量略微下降,纵波速度下降幅度不大;而在裂缝短轴方向上更容易被压缩,裂缝密度的增加使得垂直裂缝方向上的体积模量大幅降低,纵波速度明显降低。因此裂缝对于平行裂缝方向上的纵波速度影响略弱,而对垂直裂缝方向上的纵波速度影响更为明显。纵波各向异性是由平行裂缝方向上纵波速度和

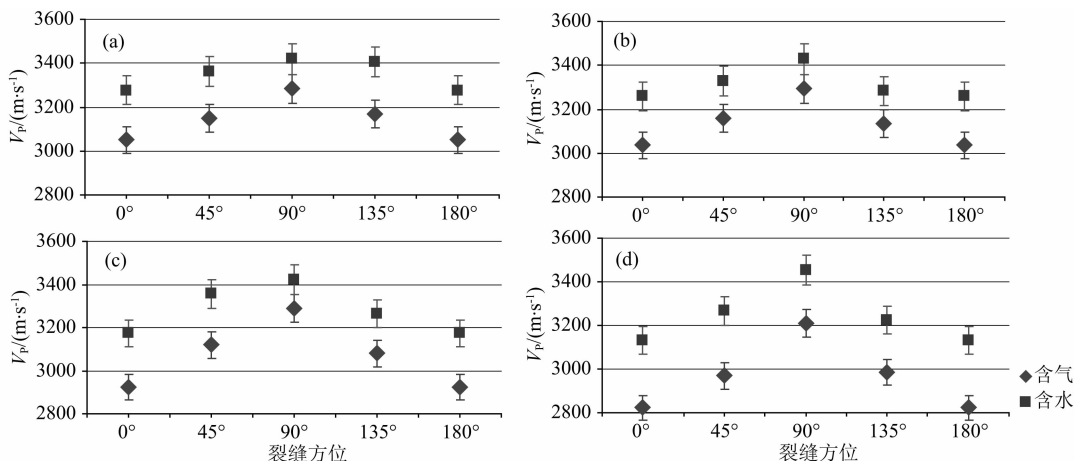


图 8 不同裂缝密度岩样的在不同饱和流体条件下的纵波速度

(a) 1# 纵波速度; (b) 2# 纵波速度; (c) 3# 纵波速度; (d) 4# 纵波速度.

Fig. 8 P wave velocities of samples with different fracture density

垂直裂缝方向上纵波速度的差异决定的,垂直裂缝方向上纵波速度随着裂缝密度的增加而迅速降低也意味着裂缝密度升高会使纵波各向异性增大。

图 9 为纵波各向异性系数受裂缝密度变化的影响,随着裂缝密度的增加纵波各向异性系数增加。但是相比较而言,含空气时纵波各向异性系数比含水时纵波各向异性系数更高。由此可见岩石中填充的流体的性质对于裂缝介质的纵波各向异性的影响非常明显,流体的性质主要有流体的体积模量、密度和黏度,而纵波的各向异性主要受到流体的体积模量的影响。当岩石中填充的空气时,空气的体积模量比较小,因此饱和空气的裂缝岩石纵波各向异性系数较大;当岩石中填充水时,水的体积模量比空气大,所以饱和水的裂缝岩石的纵波各向异性系数降低。

岩样在含空气条件下横波速度测试结果如图 10 所示,90°方向(平行于裂缝方向上)快横波速度受裂缝密度影响较弱,慢横波随着裂缝密度增加明显降低。而在 0°方向(垂直于裂缝方向上)快横波与慢横波的速度都随着裂缝密度的增加显著降低,但

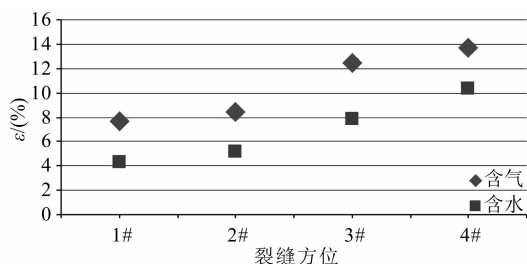


图 9 纵波各向异性系数随裂缝密度变化影响

Fig. 9 P wave anisotropy versus fracture density saturated by air and water

是快横波的速度与慢横波的速度差异较小。这也说明了在 90°方向(平行于裂缝方向上)横波分裂系数随着裂缝密度的增加而显著增强,而 0°方向(垂直于裂缝方向上)横波分裂系数比较小。图 11 为饱和和水条件下快横波与慢横波速度测试结果,在饱和和水条件下的横波速度比饱和空气条件下的横波速度低,这是由于横波速度是由岩石的剪切模量和密度决定的,剪切模量不受岩石中所饱和的流体的影响,但是由于饱和不同流体时岩石整体的密度不同,因此不同饱和条件对岩石的横波速度产生较小的影响。饱和水使得岩石的密度增加,因此含水条件下的横波速度比含空气条件下的横波速度略低。

图 12 为 4 块岩样在饱和空气和饱和水条件下横波分裂系数随着方位角的变化情况,在 0°方向(垂直于裂缝方向上)快慢横波速度相差不大因此横波分裂系数较小,在 90°方向(平行于裂缝方向上)快慢横波速度差异很大因此横波分裂系数较高。随着裂缝密度的增加,0°方向(垂直于裂缝方向上)横波分裂系数几乎不受影响,而 90°方向(平行于裂缝方向上)横波分裂系数显著升高。在 4 个岩样沿不同方向上的饱和空气和饱和水条件下的横波分裂系数相差不大,说明横波分裂受饱和流体的影响较小。图 13 为含空气(a)和含水(b)条件下的横波分裂系数,在 0°方向(垂直于裂缝方向上)横波分裂系数受裂缝密度的影响较弱,而在 90°方向(平行于裂缝方向上)含水和含气条件下的横波分裂系数都明显的随着裂缝密度的增加而升高,说明横波分裂受流体的影响不明显,但是对裂缝密度的变化更加敏感。

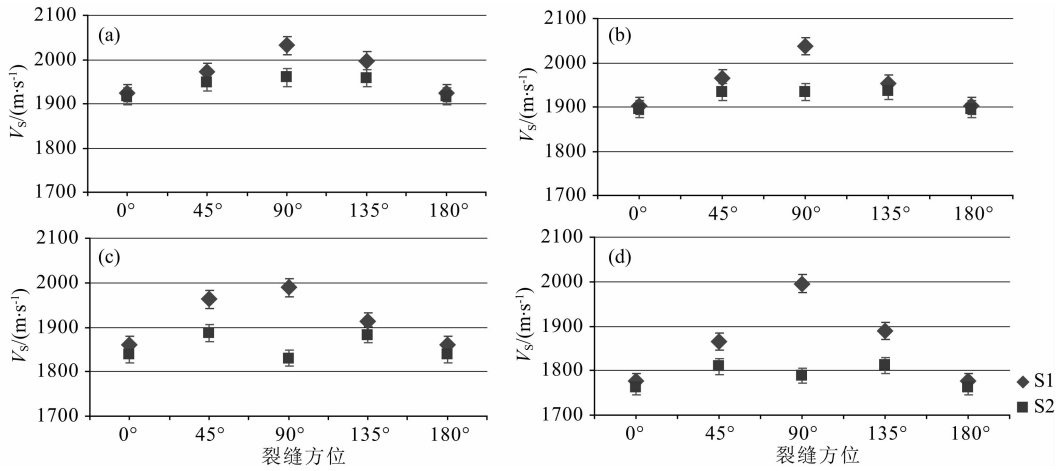


图 10 不同裂缝密度岩样饱和空气条件下的横波速度

(a) 1# 横波速度(含气); (b) 2# 横波速度(含气); (c) 3# 横波速度(含气); (d) 4# 横波速度(含气).

Fig. 10 Shear wave velocities of samples with different fracture density (air saturated)

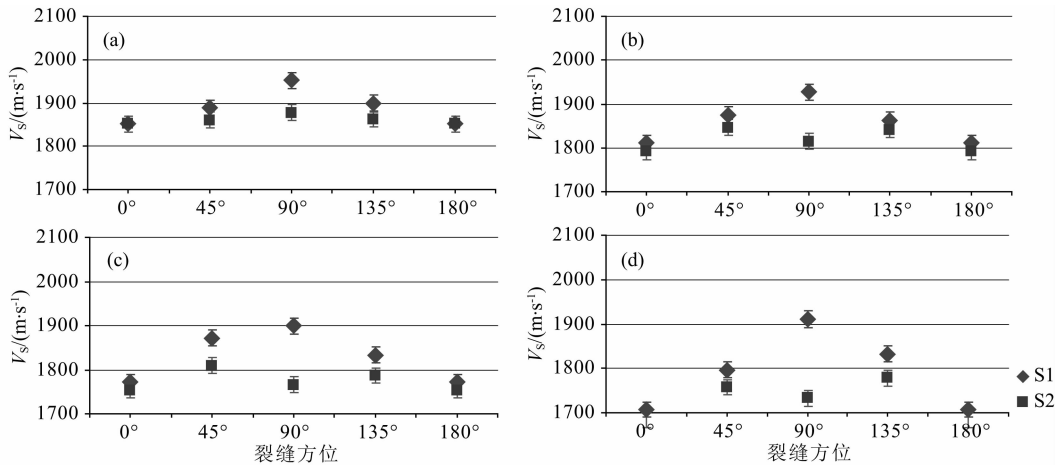


图 11 不同裂缝密度岩样饱和水条件下的横波速度

(a) 1# 横波速度(含水); (b) 2# 横波速度(含水); (c) 3# 横波速度(含水); (d) 4# 横波速度(含水).

Fig. 11 Shear wave velocities of samples with different fracture density (water saturated)

图 14 为 4 块岩样的横波各向异性系数随着裂缝密度的增加而变化,与图 9 中纵波各向异性随着裂缝密度的变化相比,纵波各向异性系数和横波各向异性系数都随着裂缝密度的增加而增加,但是相比较而言横波各向异性系数对裂缝密度的变化更为敏感,随着裂缝密度的增加横波各向异性系数升高的幅度更大,含空气条件下的横波各向异性系数和含水条件下的横波各向异性系数差异不大,说明横波各向异性系数对饱和流体不敏感,而纵波各向异性在含空气和含水条件下差异很大,在饱和空气条件下纵波各向异性系数更高,当岩样饱和水之后纵波各向异性系数降低。

## 4 结论

裂缝各向异性理论是岩石物理学中非常重要的一项研究课题,裂缝介质是一个双孔隙多相介质,其中孔隙和裂缝的形态参数和流体的性质都对裂缝介质的弹性性质和地震波传播规律有着重要的影响,因此裂缝介质各向异性理论是个非常复杂的问题。最近几十年来发展出了很多种描述裂缝介质的双孔隙各向异性理论,为了解裂缝介质的弹性性质和弹性波在裂缝介质中的传播特征提供了非常多的思路,而理论的正确性和精确性则需要有实验数据的



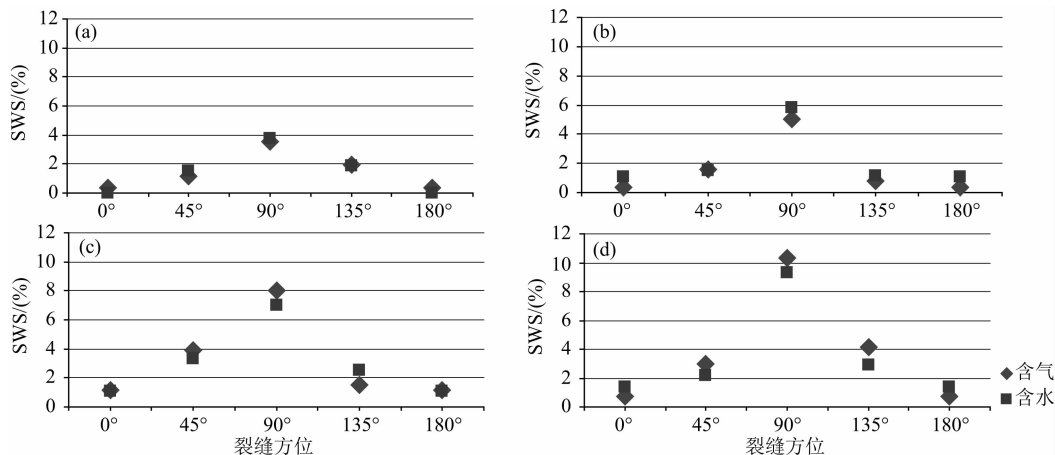


图 12 不同裂缝密度岩样横波分裂系数在不同方位角上的变化

(a) 1# 横波分裂系数; (b) 2# 横波分裂系数; (c) 3# 横波分裂系数; (d) 4# 横波分裂系数.

Fig. 12 Shear wave splitting in different directions to axis

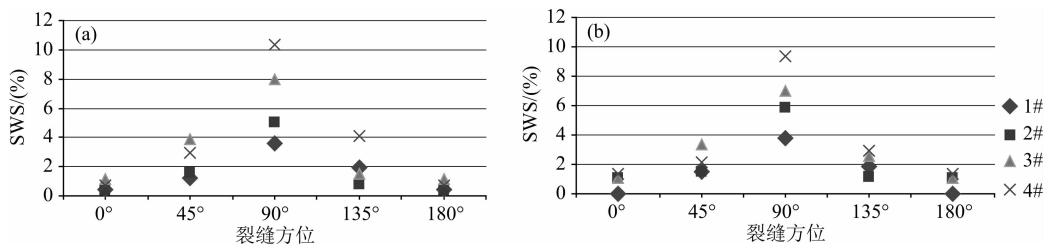


图 13 横波分裂受裂缝密度、传播方向、饱和和流体的影响

(a) 横波分裂系数(含气); (b) 横波分裂系数(含水).

Fig. 13 Shear wave splitting influenced by fracture density, propagate direction and saturated fluids

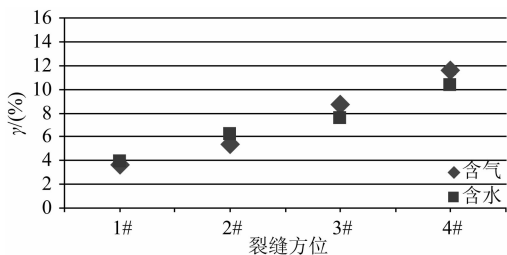


图 14 横波各向异性强度随着裂缝密度的变化

Fig. 14 Shear wave anisotropy versus fracture density saturated by air and water

验证,因此在实验室中对含裂缝和流体的岩样进行测试,观测弹性波在岩样中的传播速度、各向异性特征、裂缝和流体的影响等,对认识裂缝介质中弹性波传播规律和检验含裂缝和流体的双孔隙介质理论具有非常重要的意义.

本实验可以得出以下结论:

(1) 本次实验使用的新方法可以制作出与天然岩石更为接近的含可控裂缝的人工砂岩,其中裂缝密度、裂缝尺度和裂缝张开度等裂缝参数可以按照实验的需要制作,并且具有真实的孔隙和裂缝空间

为研究流体对地震波传播和地震各向异性的影响提供了可能和基础.

(2) 通过实验测试结果可以看出,流体的性质尤其是体积模量对于纵波的速度和纵波各向异性强度有着非常明显的影响,当饱和流体的体积模量较高时纵波的速度变大而纵波各向异性系数减小.

(3) 相比而言,横波受流体的影响比纵波小.通过实验测试结果可以得出横波速度、横波分裂系数以及横波各向异性系数在饱和不同流体状态下变化并不大,但是对裂缝密度的变化更为敏感.当裂缝密度升高时,横波速度显著降低而横波分裂系数和横波各向异性强度明显升高.

(4) 本次实验中使用的制作可控裂缝人工砂岩方法,可以为研究裂缝参数、流体性质、压力等因素对于地震波传播、地震各向异性、地震波频散和衰减的影响提供实验样品.

致谢 本研究受国家科技重大专项(2011ZX05019-008)资助.感谢爱丁堡大学 Mark Chapman 对于本研究的关注和建议,感谢中石化南京物探研究院

王丁博士对于本研究内容的讨论和建议。

## References

- Ass'ad J M, Tatham R H, McDonald J A, et al. 1993. A physical model study of scattering of waves by aligned cracks: Comparison between experiment and theory. *Geophysical Prospecting*, 41(3): 323-339.
- Ba J, Hong C, Du Q Z, et al. 2010. Wave propagation theory in double-porosity medium and experimental analysis on seismic responses. *Scientia Sinica Phys, Mech & Astron* (in Chinese), 40(11): 1398-1409.
- Ba J, Carcione J M, Cao H, et al. 2012. Velocity dispersion and attenuation of P waves in partially-saturated rocks: Wave propagation equations in double-porosity medium. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(1): 219-231, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.021.
- Berryman J G, Wang H F. 2000. Elastic wave propagation and attenuation in a double-porosity dual-permeability medium. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(1-2): 63-78.
- Chapman M. 2003. Frequency-dependent anisotropy due to mesoscale fractures in the presence of equant porosity. *Geophysical Prospecting*, 51(5): 369-379.
- Cao J, He Z H, Huang D J, et al. 2003. Seismic responses of fractured reservoirs by physical modeling. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 26(2): 88-93.
- Eshelby J D. 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 241(1226): 376-396.
- He Z H, Li Y L, Zhang F, et al. 2001. Different effects of vertically oriented fracture system on seismic velocities and wave amplitude-Analysis of laboratory experimental results. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 23(1): 1-5.
- Hudson J A. 1980. Overall properties of a cracked solid. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 88(2): 371-384.
- Hudson J A. 1988. Seismic wave propagation through material containing partially saturated cracks. *Geophysical Journal*, 92(1): 33-37.
- Hudson J A, Liu E, Crampin S. 1996. The mechanical properties of materials with interconnected cracks and pores. *Geophysical Journal International*, 124(1): 105-112.
- Jakobsen M, Chapman M. 2009. Unified theory of global flow and squirt flow in cracked porous media. *Geophysics*, 74(2): WA 65-WA 76.
- Kuster G T, Toksoz M N. 1974. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media; Part II. Experimental results. *Geophysics*, 39(5): 607-618.
- OConnell R J, Budiansky B. 1977. Viscoelastic properties of fluid-saturated cracked solids. *Journal of Geophysical Research*, 82(36): 5719-5735.
- Rathore J S, Fjaer E, Holt R M, et al. 1995. P- and S-wave anisotropy of a synthetic sandstone with controlled crack geometry. *Geophysical Prospecting*, 43(6): 711-728.
- Tang X M. 2011. A unified theory for elastic wave propagation through porous media containing cracks—An extension of Biot's poroelastic wave theory. *Sci. China Earth Sci.*, 54(9): 1441-1452.
- Thomsen L. 1995. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock. *Geophysical Prospecting*, 43(6): 805-829.
- Tillotson P, Chapman M, Best A I, et al. 2011. Observations of fluid-dependent shear-wave splitting in synthetic porous rocks with aligned penny-shaped fractures. *Geophysical Prospecting*, 59(1): 111-119.
- Wei J X. 2002. A physical model study of different crack densities. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 41(4): 433-8.
- Wei J X, Di B R. 2008. A physical model study of effect of fracture aperture on seismic wave. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.*, 51(2 Supplement): 233-240.
- Wei J X, Di B R, Ding P B. 2013. Effect of crack aperture on P-wave velocity and dispersion. *Applied Geophysics*, 10(2): 125-133.
- Yin Z H, Di B R, Wei J X, et al. 2012. P-wave attenuation by fracture parameter on physical models. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 47(5): 728-734, 753.

## 附中文参考文献

- 巴晶. 2010. 双重孔隙介质波传播理论与地震响应实验分析. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 40(11): 1398-1409.
- 巴晶, Carcione J M, 曹宏等. 2012. 非饱和岩石中的纵波频散与衰减: 双重孔隙介质波传播方程. *地球物理学报*, 55(1): 219-231, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.021.
- 曹均, 贺振华, 黄德济等. 2003. 裂缝储层地震波特征响应的物理模型实验研究. *勘探地球物理进展*, 26(2): 88-93.
- 贺振华, 李亚林, 张帆等. 2001. 定向裂缝对地震波速度和振幅影响的比较——实验结果分析. *物探化探计算技术*, 23(1): 1-5.
- 魏建新. 2002. 不同裂缝密度的物理模型研究. *石油物探*, 41(4): 433-438.
- 魏建新, 狄帮让. 2008. 裂隙张开度对地震波特性的模型研究. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 38(S1): 211-218.
- 尹志恒, 狄帮让, 魏建新等. 2012. 裂缝参数对纵波能量衰减影响的物理模型研究. *石油地球物理勘探*, 47(5): 728-734, 753.

(本文编辑 汪海英)