

# The Establishment of Seismic Rock Physics Model of Reservoir Sandstone in Chunguang Oilfield and Its Application

Xue Xiao, Zhenfeng Yang, Chunfeng Yang, Pengfei Wang, Feng Li

Research Institute of Exploration and Development, Henan Oilfield Company, SINOPEC, Zhengzhou Henan  
Email: xiaoxue2218@sohu.com

Received: Sep. 12<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2018; published: Oct. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Seismic rock physics model was an important tool for analyzing the rules of seismic elastic variation of reservoir rock and the prediction of hydrocarbon. The existing methods seldom considered the complex pore structure characteristics of reservoir rock when the rock physical model was established, which resulted in some errors in the prediction results. Systematical rock physics experiments were conducted on the sandstone samples of Shawan Formation of Chunguang Oilfield in Chepaizi Area of Xinjiang Province. After determining the pore system and concentration, the non-interaction approximation (NIA) was used to analyze the effects of porosity, pore shape and the concentration of micro-crack to the elastic properties of the dry frame of sandstone samples. The test results were used for calibrating the model parameters. Furthermore, a rock physical model was established to characterize the seismic elasticity of the rock skeleton of the target reservoir. The results of the model were in good agreement with the experimental results. According to the experimental results and model results, the jet flow model is used to replace the traditional Gassmann Equation for fluid replacement, which can better explain the ultrasonic frequency test results of fluid saturated sandstone samples.

## Keywords

Pore Structure, Rock Physical Modeling, Non-interaction Approximation, Squirting-fluid Model

---

# 春光油田储层砂岩地震岩石物理模型构建及其应用

肖学, 杨振峰, 杨春峰, 王鹏飞, 李锋

中石化河南油田分公司勘探开发研究院, 河南 郑州

作者简介: 肖学(1966-), 男, 高级工程师, 现主要从事地震地质综合研究。

Email: xiaoxue2218@sohu.com

收稿日期: 2017年9月12日; 录用日期: 2018年7月21日; 发布日期: 2018年10月15日

## 摘要

地震岩石物理模型是分析储层岩石地震弹性性质变化规律及烃类预测的重要工具。现有方法在构建岩石物理模型时较少考虑储层岩石复杂孔隙结构特征, 从而造成预测结果存在一定误差。在实验室内对新疆车排子地区春光油田沙湾组储层砂岩样品进行了系统地震岩石物理试验, 在确定储层砂岩中不同孔隙类型组成的条件下, 基于非接触模型, 综合考虑储层砂岩孔隙度以及孔隙形状对于干燥岩石骨架弹性性质的影响, 并利用试验结果对模型参数进行标定, 进而建立表征目标储层岩石骨架地震弹性性质的岩石物理模型, 模型结果与试验结果符合良好。依据试验及模型结果, 利用喷射流作用模型替代传统Gassmann方程进行流体替换, 能够更好地对流体饱和砂岩样品超声频率试验结果进行解释。

## 关键词

孔隙结构, 岩石物理建模, 非接触模型, 喷射流作用模型

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 随着油气勘探的不断深入和开发的难度加大, 地震技术从构造研究逐渐深入到岩性识别和烃类检测。利用叠前弹性反演能够直接给出纵、横波速度与密度信息, 在其基础上可进一步计算泊松比、拉梅常数等其他弹性参数或组合弹性参数。然而, 由于影响地下岩石弹性特征的因素众多, 造成参数反演具有多解性, 需要利用先验信息建立岩石物理模型, 从而进行定量或者定性解释, 以达到储层岩性识别和烃类预测的目的[1] [2] [3]。

岩石物理模型的构建有助于计算地下储层岩石的弹性参数, 提高岩石物性参数的反演精度, 进而更好地了解地下含油气储层特征及流体分布规律, 在储层岩性、物性分析以及流体识别分析中发挥着重要的作用[4] [5] [6]。岩石骨架在干燥条件下的地震弹性特征可以通过等效介质模型或者已有的岩石物理经验关系获得[7] [8]。但由于储层岩石地震弹性性质的区域性造成等效介质模型以及经验关系并不完全适用, 需要在模拟储层条件下对目标储层岩心样品进行系统的地震岩石物理试验来确定关键参数或者对已有模

型的标定[7][8]。对于两相(气/水、油)或多相流体饱和(气/水/油)岩石,地震勘探中一般用 Gassmann 方程和有效流体模型来定量表征流体替换过程中地震弹性性质的变化[9][10]。Gassmann 方程计算结果代表严格低频条件,由于储层岩石孔隙结构的不均匀性造成流体流动相关频散作用,对岩石地震弹性性质有明显影响,如储层岩石微观孔隙尺度不均匀所形成的“喷射”流作用,其特征频率可位于测井频段;同时,已有研究表明,在考虑孔隙分布的情况下速度频散曲线并无明显的低频段,即地震频段(<100 Hz)或者测井频段(10~20 kHz)并不完全等同于低频条件,造成在构建岩石物理模型时仅用 Gassmann 方程表征孔隙流体影响从而定量解释地震或者测井结果,会出现明显预测误差[11][12][13][14][15]。

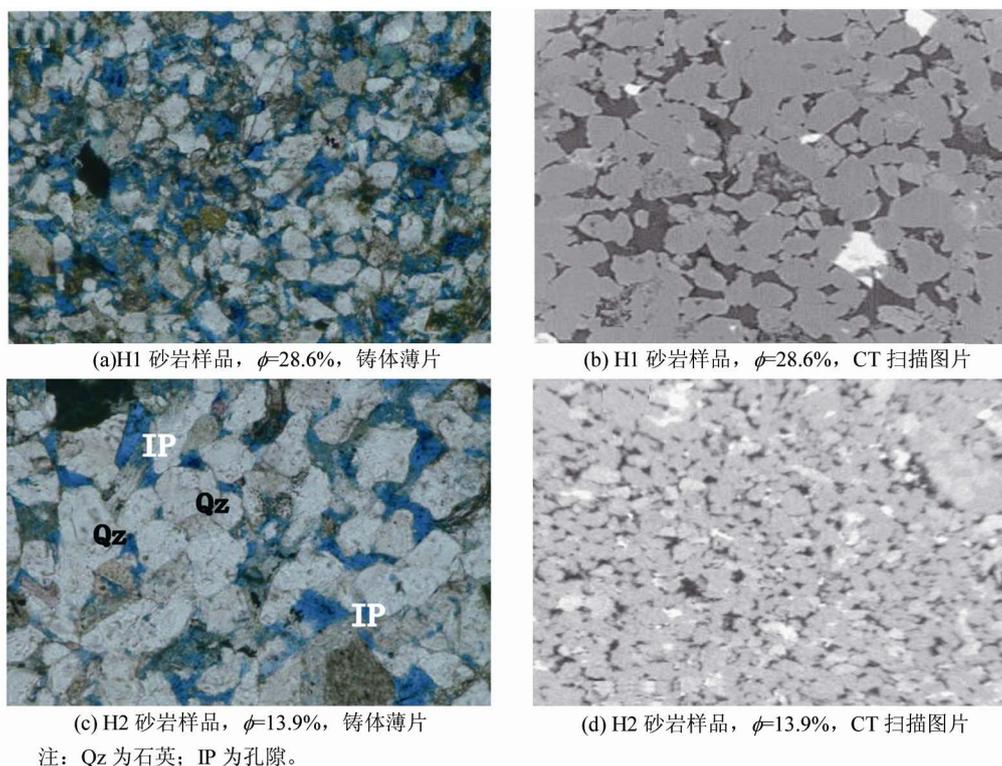
近几年,新疆车排子地区春光油田在沙湾组、古近系、白垩系等多层系不同砂岩体系中陆续发现和开采了一批大小不等、与岩性有关的油藏,展示了巨大的勘探潜力。沙湾组中-高孔隙度砂岩为研究区主要勘探层位,但砂体规模通常较小,油层薄且单一,储层横向物性变化快,是典型的复杂岩性油藏。有学者通过储层岩性物理特征分析,利用地震正演分析技术,验证油砂体的类亮点地震反射特征,总结出了一套以“亮点”技术为主的储层预测方法;应用实际测井资料进行地震正演、流体替换和 AVO 模拟,发现沙湾组砂岩在不同含油饱和度时具有不同的 AVO 响应特征[11][12][13][14][15]。但由于对春光油田沙湾组储层砂岩岩石物理特征缺乏系统性、规律性认识,影响到振幅分析、波阻抗反演等储层预测方法的适用性和应用效果,使得储层及油层的分布情况难以进行更为准确的地震预测。

笔者以春光油田沙湾组砂岩岩心样品测试结果为基础,利用 Mori-Tanaka 非接触模型,从微细观力学角度综合考虑储层砂岩孔隙度、孔隙形状及微裂隙(在相同有效压力下容易被压缩,主要表现为颗粒基础边界和微裂隙)含量对干燥岩石骨架弹性性质的影响;结合试验结果对模型参数进行标定,进而建立表征目标储层岩石骨架地震弹性性质的岩石物理模型。在该基础上,再利用孔隙尺度喷射流作用模型替代传统 Gassmann 方程进行流体替换,从而构建与频率相关的流体饱和岩石介质的定量岩石物理模型,以反映具有复杂孔隙结构特征的储层岩石,及其孔隙流体与固体骨架间的耦合作用对岩石地震弹性特征的影响,从而为不同频率测量数据的储层和流体解释提供一种方便的工具。

## 2. 试验样品制备与测量

试验使用的 15 块储层砂岩岩心样品均来自于新疆准噶尔盆地车排子地区春光油田的沙湾组。沙湾组主要为辫状河三角洲及滨海浅湖相沉积环境,以发育块状砂体为特征,具多个较大规模的低水位三角洲,总体属高孔、高渗储层。为使地震岩石物理研究有代表性,对目标储层(沙湾组 2 砂组)进行取样,取样井包括 C2-5 井、P201 井等 10 口井,取样原则为确保样品能够覆盖目标层可能的孔隙度变化。根据样品的薄片和 X 射线衍射全岩心分析结果,样品以石英细砂岩为主,分选性较好;岩石成分以长英质为主,体积分数 60%以上,胶结物主要表现为泥质、碳酸盐和石英胶结,体积分数小于 30%;孔隙类型主要为原生孔隙和部分溶蚀孔隙,其中原生孔隙约占总孔隙的 65%以上。从高孔隙到低孔隙,从点接触变为凸凹接触,反映压实作用增强(图 1)。在样品对应的微米 CT 扫描图片中,高孔隙岩石样品(图 1(b), H1 砂岩样品,孔隙度  $\phi = 28.6\%$ )在孔隙形态上表现为弹性性质较“软”的复杂多边形粒间孔隙,同时存在大量由接触边界或刚性颗粒压实破碎面所构成的弹性性质更“软”的孔隙;随着孔隙度的逐渐下降,孔隙形态也逐渐从多边形的软孔隙转变为近似三角形的“硬”孔隙(图 1(d), H2 砂岩样品,  $\phi = 13.9\%$ ),同时以颗粒接触边界为代表的软孔隙含量也明显减少。

由于试验样品取自 10 口井的不同深度,因此具有不同的压差(上覆地层压力与孔隙流体压力之差)。样品被制成符合试验标准的圆柱体(直径约 25 mm,长 40~50 mm),在洗盐、洗油和烘干等准备工作之后,采用 CMS-300 仪器测量模拟地层压差条件下的有效孔隙度。试验测试的干燥条件均指实验室干燥,即将烘干后的样品在潮湿空气条件下的露天放置 24 h 以上,得到约含有 2%~3%水分的“干燥”样品,

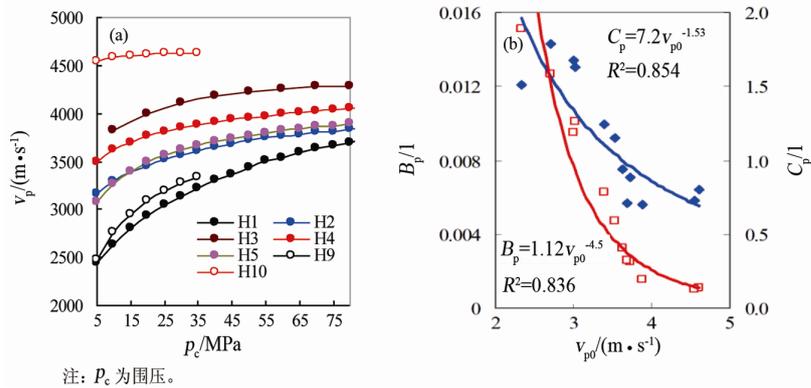


**Figure 1.** The characteristics of micro-pore structures of reservoir sandstone samples  
**图 1.** 储层砂岩样品微观孔隙结构特征图

以消除黏土矿物脱水对岩石骨架弹性性质的影响。而水饱和和样品则均采用抽空加压饱和的方法, 饱和时间超过 48 h, 样品已达到完全水饱和状态。利用超声波脉冲穿透法测定样品速度, 使用设备为成都理工大学“油气藏地质与开发工程”国家重点实验室的 MTS 储层岩石弹性参数测量系统, 装置配套纵波 PZT 换能器的主频为 800 kHz, 横波主频为 350 kHz。试验中, 压力从 2 MPa 加至 60 MPa, 在 10 MPa 前每隔 2 MPa 测量一次, 随后每隔 5 MPa 测量一次, 压力点测量间隔 15 min, 以保证围压在样品中的平衡。水饱和条件下速度测量时孔隙压力始终保持在 1 MPa 的非排水状态, 围压与孔压的压力偏差均小于 0.3%。围压与孔隙压力分别通过两台 ISCO 高压无脉冲计量泵控制, 围压通过连接压力釜体的 ISCO 高压泵控制, 而孔隙压力则通过 ISCO 高压泵直接作用于样品表面, ISCO 高压泵控制输入、输出流量, 使液体压力达到预设值, 并通过压力传感器进行计量。所用示波器时间测试误差  $\leq 0.01 \mu\text{s}$ , 则测试系统速度测量相对误差的量级纵波约为 1%, 横波约为 2%。

### 3. 样品地震岩石物理特征

图 2(a)给出了研究区砂岩样品纵波速度随围压的变化, 从变化形态上可以看出 2 种不同的速度变化趋势: 第 1 种变化趋势以 H10 样品为代表, 纵波速度随压力的增加呈近似线性的增加而无明显的非线性段, 同时整个压力变化范围内纵波速度变化均小于 5%; 第 2 种变化趋势以 H1~H9 样品为代表, 纵波速度均在压力较小(小于 30~40 MPa)时迅速增加, 在超过该压力时纵波速度变化较小并与压力呈近似线性关系, 根据该类样品可大致认为研究区岩石中微裂隙闭合的有效压力应在 30~40 MPa 以上。第 1 种变化趋势表明岩石样品中主要以纵横比较大的刚性孔隙为主, 反映岩石样品的“单一孔隙”结构类型。第 2 种变化趋势表明岩石中含有一定量的微裂隙, 在压力作用下逐渐闭合, 使纵、横波速度明显增加, 反映岩石样品的“双孔隙”结构特征。Walsh [16]讨论了围压与微裂隙纵横比的关系:



**Figure 2.** The variation of  $v_p$  with confining pressure under dry condition of sample (a) and relationship between P-wave fitting Factor and  $v_p$  (b)  
**图 2.** 样品干燥条件下纵波速度随围压变化(a)及纵波拟合因子与  $v_p$  关系(b)

$$p_{close} = \left[ \frac{\pi E_s}{4(1-\nu_s^2)} \right] \alpha \approx E_s \alpha \quad (1)$$

式中： $p_{close}$  为裂缝闭合压力，MPa； $E_s$  为岩石基质的弹性模量，GPa； $\nu_s$  为岩石基质的泊松比，1； $\alpha$  为微裂隙纵横比，1。

对于砂岩样品，岩石基质的弹性模量为 72.5 GPa，可粗略估计  $\alpha$  平均约为 0.001。

图 2(a) 中亦反映出研究样品速度随压力的变化率与其零压力速度关系明显，初始零压力速度越小，则速度随压力的变化率也越大；如 H1、H3 样品初始零压力速度分别为 2423 m/s 与 3587 m/s，在干燥时整个压力范围内纵波的变化率分别为 14.3、5.35 m/(s·MPa)。图 2(a) 仅给出样品干燥纵波的变化特征，干燥横波及水饱和纵、横波表现为相同的变化规律。

通常，岩石的速度与压力的相关性可通过计算公式拟合：

$$\begin{aligned} v_{pd}(p_e) &= -C_p \exp(-d \cdot p_e) + v_{p0} + B_p p_e \\ v_{sd}(p_e) &= -C_s \exp(-d \cdot p_e) + v_{s0} + B_s p_e \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $v_{pd}$ 、 $v_{sd}$  分别为有效压力下干燥样品的纵、横波速度，m/s； $p_e$  为有效压力，MPa； $v_{p0}$ 、 $v_{s0}$  分别为干燥条件下初始有效压力时的纵、横波速度，m/s； $C_p$ 、 $B_p$  为纵波拟合因子，1； $C_s$ 、 $B_s$  为横波拟合因子，1； $d = 0.02 + 0.003 \times p_e$  为试验拟合参数[17]，1。

从拟合结果看，公式(2)对纵、横波速度与压力的拟合误差非常小，相关系数均接近于 1。从图 2(b) 给出的  $B_p$ 、 $C_p$  随  $v_{p0}$  的变化关系可以看出： $B_p$  与  $v_{p0}$  呈明显的指数关系 ( $B_p = 1.12v_{p0}^{-4.5}$ )，在物理意义上  $B_p$  代表速度与压力变化关系线性段的梯度， $v_{p0}$  越大则其线性段的梯度越小，即速度随压力的变化较为缓慢； $C_p$  与  $v_{p0}$  也呈一定的指数关系 ( $C_p = 7.2v_{p0}^{-1.53}$ )， $C_p$  反映低压力下非线性段的变化，正比于岩石样品中的微裂隙含量， $v_{p0}$  越大则固结与胶结程度越高，同时微裂隙含量也越低， $C_p$  也越小，非线性段的变化也越不明显。

## 4. 岩石物理模型

### 4.1. 岩石骨架模型

#### 4.1.1. 模型建立

砂岩的孔隙体系如果依据其孔隙结构的差异总能理想化为不同形状的硬孔隙与软孔隙(微裂隙)组合。

基质中任意类型孔隙的加入都会改变岩石介质的等效刚度或者等效柔度。从静力学角度看, 孔隙的加入形成附加应变, 从而改变岩石的等效柔度, 其物理意义更为明确。因此, 在表征孔隙度及孔隙形状对岩石弹性性质影响时, 采用等效柔度表示方法相较于等效刚度表示方法更为准确, 尤其是在孔隙或裂隙等软孔隙含量较高的情况下。假定岩石基质的柔度为  $S_0$ , 硬孔隙与软孔隙的加入所产生的附加柔度分别为  $\Delta S_{\text{stiff}}$ 、 $\Delta S_{\text{crack}}$ , 则岩石等效柔度  $S$  可表示为:

$$S = S_0 + \Delta S_{\text{crack}} + \Delta S_{\text{stiff}} \quad (3)$$

由于附加柔度的线性叠加性, 具有双孔结构特征的砂岩其基质中孔隙的添加可以分成 2 个阶段:

第 1 阶段, 将硬孔隙加入基质中, 如果考虑孔隙间的相互作用, 则岩石介质的等效弹性模量按其柔度形式可用 Mori-Tannaka 公式计算[18]:

$$\begin{aligned} K_{\text{stiff}} &= K_0 \left( 1 + \frac{p\phi_t}{1-\phi_s} \right)^{-1} \\ G_{\text{stiff}} &= G_0 \left( 1 + \frac{q\phi_t}{1-\phi_s} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $K_{\text{stiff}}$ 、 $G_{\text{stiff}}$  分别为岩石介质的等效体积模量和剪切模量, MPa;  $K_0$ 、 $G_0$  分别为岩石基质组成颗粒的体积模量和剪切模量, MPa;  $\phi_t$  为总孔隙度, 1;  $\phi_s$  为硬孔隙的孔隙度, 1;  $p$ 、 $q$  为硬孔隙形状因子, 是基质弹性模量与  $\alpha$  的函数, 1。

对于球形孔隙等规则孔隙,  $p$ 、 $q$  可得到解析解; 对于不规则孔隙,  $p$ 、 $q$  可通过对弹性模量或速度的测量结果进行拟合得到。

第 2 阶段, 加入软孔隙, 岩石介质的等效弹性模量按其柔度形式仍可用 Mori-Tannaka 公式计算 [18]:

$$\begin{aligned} K_d &= K_{\text{stiff}} \left( 1 + \frac{P\phi_c}{1-\phi_c} \right)^{-1} \\ G_d &= G_{\text{stiff}} \left( 1 + \frac{Q\phi_c}{1-\phi_c} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $K_d$ 、 $G_d$  分别为加入微裂隙后的岩石介质等效体积模量和剪切模量, MPa;  $\phi_c$  为软孔隙的孔隙度, 1;  $P$ 、 $Q$  为软孔隙形状因子, 1。

如果将软孔隙看作微裂隙, 在  $\alpha$  小于 0.1~0.2 的情况下, 裂隙自身的柔度与  $\alpha$  无关, 而是更多的取决于裂隙密度( $\varepsilon$ ), 因此在考虑软孔隙影响时, 可利用  $\varepsilon$  代替其孔隙度, 两者关系为:

$$\varepsilon = \frac{3}{4\pi\alpha} \phi_c \quad (6)$$

岩石中裂隙的形状极为复杂, 而形状又对其柔度有明显影响, 为使后续计算简化, 采用简单类球体模型代替软孔隙形状,  $P$ 、 $Q$  可给出解析表达式。同时, 由于岩石中微裂隙的  $\phi_c$  很小, 公式(5)可表示为:

$$\begin{aligned} K_d &= K_{\text{stiff}} \left( 1 + \frac{16(1-\nu_{\text{stiff}}^2)}{9(1-2\nu_{\text{stiff}})} \varepsilon \right)^{-1} \\ G_d &= G_{\text{stiff}} \left( 1 + \frac{32(1-\nu_{\text{stiff}})(5-\nu_{\text{stiff}})}{45(2-\nu_{\text{stiff}})} \varepsilon \right)^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\nu_{\text{stiff}}$  为仅含硬孔隙时的岩石介质泊松比, 1。

由于硬孔隙随压力变化较小, 仅含该类孔隙的岩石介质, 其等效弹性模量与高有效压力下的体积模量和剪切模量( $K_h$ 、 $G_h$ )近似。综合公式(5)、(7), 可计算岩石样品的等效弹性模型。

#### 4.1.2. 模型试验

公式(4)中,  $p$ 、 $q$  分别代表硬孔隙的形状因子, 根据试验结果可给出  $p$ 、 $q$  与春光油田沙湾组砂岩岩心样品  $\phi$  的经验关系。假定样品在 80 MPa 下的弹性模量代表岩石样品中仅含刚性孔隙时的弹性模量(即微裂隙全部闭合), 利用公式(4)则可求出  $p$ 、 $q$ , 其结果见图 3。由图 3 可以看出,  $p$ 、 $q$  在 1:1 线附近, 表明  $p$ 、 $q$  近于相等,  $p$ 、 $q$  与  $\phi$  亦具有较为明显的线性关系( $p \approx q = 15.3\phi + 3.61$ ), 利用该关系式可计算一定孔隙度下的  $p$ 、 $q$ 。

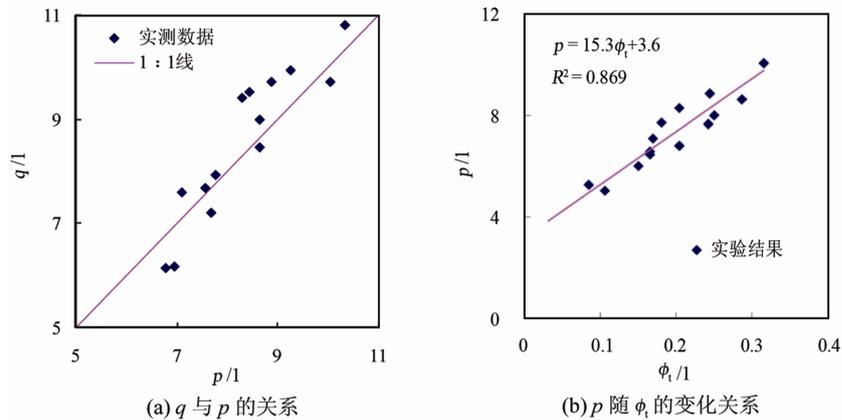


Figure 3. The relationship of pore shape factor of sandstone samples in Shawan Formation of Chunguang oilfield  
图 3. 春光油田沙湾组砂岩岩心样品孔隙形状因子关系图

图 4(a)给出了 H2 样品总孔隙( $\phi$ )随  $p_c$  的变化关系, 通过该变化曲线可求取不同  $p_c$  下的  $\phi$ ,  $\phi$  随  $p_c$  的变化是硬孔隙与微裂隙共同逐渐闭合的结果( $\phi = \phi_c + \phi_s$ )。在高围压下, 样品  $\phi$  的变化主要受硬孔隙的逐渐闭合影响, 此时  $\phi$  随  $p_c$  变化亦表现为线性趋势, 将该线性趋势外推至低压力范围, 从而得到不同压力下的  $\phi_s$  (如图 4(a)中的红色虚线所示), 不同压力下实测孔隙度减去对应  $\phi_s$  即可得到对应  $\phi_c$ 。从试验结果看, 样品的  $\phi_c$  (零压力条件下)与  $\phi$  (零压力条件下)呈明显的指数关系( $\phi_c = 0.151\phi_1^{2.2897}$ ), 表明对于所研究的中、高孔隙度砂岩, 其孔隙度越高, 所含的微裂隙也越多(图 4(b))。据公式(6)可计算样品零压力的微裂隙密度( $\varepsilon_0$ ), 该值与  $\phi$  呈明显的线性关系( $\varepsilon_0 = 1.8\phi + 0.4$ ) (图 4(c))。

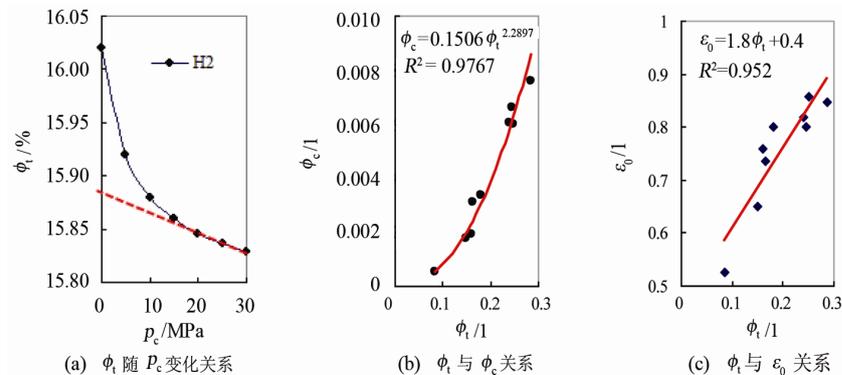


Figure 4. The feature of  $p_c$  Change with  $\phi$  and the relationship between  $\phi$ ,  $\phi_c$  and  $\varepsilon_0$   
图 4. H2 样品  $\phi$  随  $p_c$  变化特征及  $\phi$  与  $\phi_c$ 、 $\varepsilon_0$  关系

微裂隙密度随有效压力的变化可表示为[17]:

$$\varepsilon(p_e) = \varepsilon_0 \exp(-d \cdot p_e) \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon(p_e)$ 为有效压力下的微裂隙密度, 1; 此处的  $p_e$ 在干燥条件下等价于  $p_c$ 。

取碎屑砂岩的  $v_{stiff} = 0.146$  [17], 公式(7)可简化为:

$$\begin{aligned} K_d &= K_0 \left[ 1 + p \cdot \phi_1 + 2.46 \cdot \varepsilon_0 \exp(-d \cdot p_e) \right]^{-1} \\ G_d &= G_0 \left[ 1 + q \cdot \phi_1 + 1.59 \cdot \varepsilon_0 \exp(-d \cdot p_e) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

图 5(a)、图 5(b)分别给出干燥试验样品在 20 MPa 与 50 MPa 压力条件下纵、横波速度随孔隙度的变化规律, 同时给出按公式(9)所计算出的理论模型值, 可以看出, 在 2 个试验压力下, 理论模型计算结果与实际测量结果符合率均较高。当试验压力高于 50 MPa 时, 纵、横波速度随压力的变化较弱, 使得 50 MPa 时的理论模型计算结果, 与高于该围压的实际测量结果有较好的一致性。

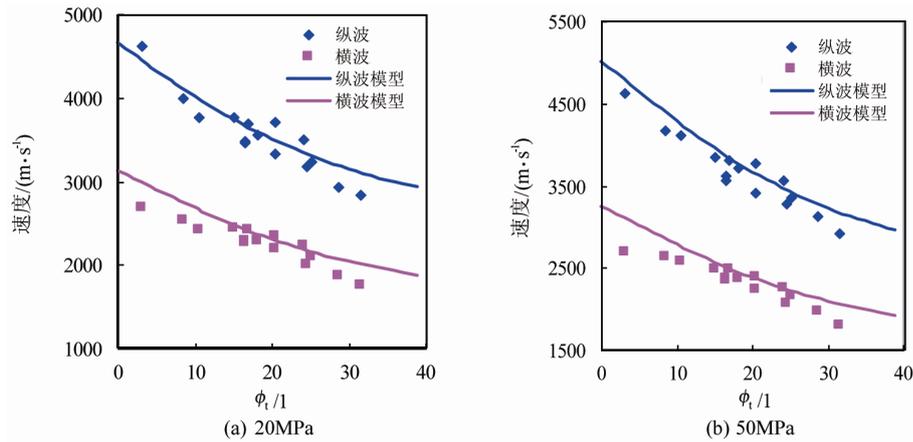


Figure 5. The comparison of measured  $v_p$ ,  $v_s$  and theoretically calculated results under different pressures  
图 5. 不同压力条件下纵、横波速度测量结果与理论模型计算结果对比

#### 4.2. 孔隙流体作用

在微观孔隙尺度下, 流体流动作用对岩石介质弹性性质的影响可用喷射流理论描述。对具有双孔隙结构的岩石, 弹性波的频散和衰减主要是由岩石中的微裂隙决定。在众多喷射流作用理论表述中, 唐晓明给出了岩石介质中微裂隙与孔隙并存的弹性波同一理论, 并将喷射流作用与岩石中  $\varepsilon$  与  $\alpha$  两个重要孔隙结构参数建立了联系。利用相同的孔隙结构模型, Gurevich 将喷射流作用与岩石中  $\phi_c$  与  $\alpha$  联系起来[5]。在 Gurevich 的方法中, 延续了 Murphy 与 Dvorkin 的思想, 考虑了微裂隙中流体弛豫作用对其柔度的影响。如果将  $K_h$  (该模量为岩石中不含微裂隙的干燥体积模量)加入微裂隙, 并考虑其与硬孔隙中流体喷射流作用影响时, 介质等效模量  $K_{mf}$ 、 $G_{mf}$  可通过下式计算[15] [19]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_{mf}(p_e, \omega)} &= \frac{1}{K_h} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{K_d(p_e)} - \frac{1}{K_h}} + \frac{3i\omega\eta}{8\phi_c\alpha_c^2}} \\ \frac{1}{G_{mf}(p_e, \omega)} &= \frac{1}{G_d(p_e)} - \frac{4}{15} \left( \frac{1}{K_d(p_e)} - \frac{1}{K_{mf}(p_e, \omega)} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $K_d(p_e)$ 、 $G_d(p_e)$ 分别为一定有效压力下岩石介质的干燥体积模量与剪切模量, MPa;  $\omega$  为圆频率, rad/s;

$\eta$  为孔隙流体动态黏度, mPa·s;  $\alpha_c$  为微裂隙特征纵横比, 1。

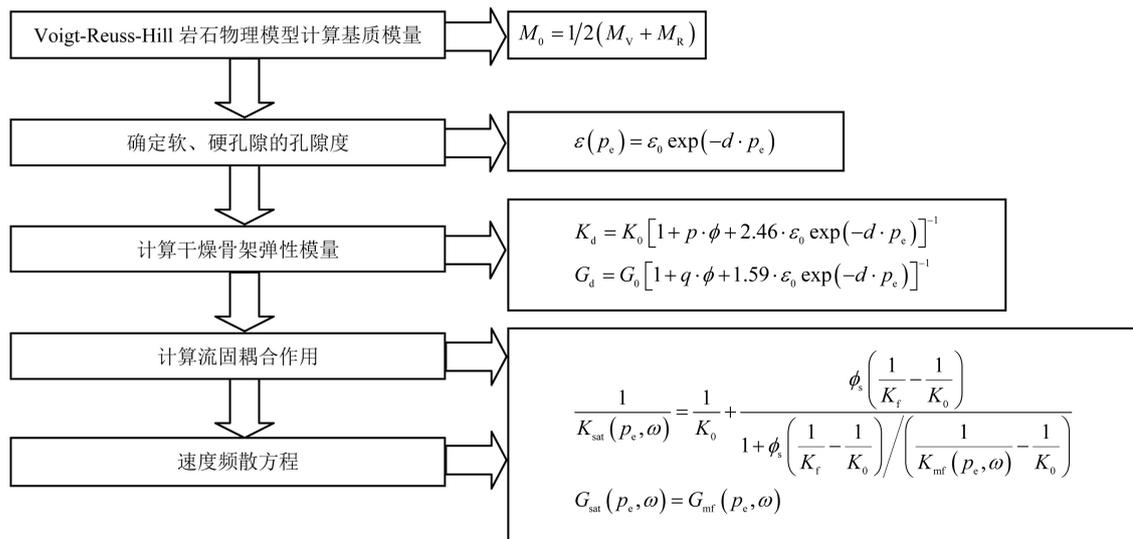
公式(10)等号右端第二项也可理解为加入特定纵横比微裂隙并在考虑喷射作用下对  $K_h$  的改变。在考虑微裂隙作用后, 剩余硬孔隙因其不可压缩性, 在流体饱和后仍满足 Gassmann 方程, 此时硬孔隙完全饱和时的体积模量  $K_{sat}$  与剪切模量  $G_{sat}$  可用下式计算[15] [19]:

$$\frac{1}{K_{sat}(p_e, \omega)} = \frac{1}{K_0} + \frac{\phi_s \left( \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_0} \right)}{1 + \phi_s \left( \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_0} \right) / \left( \frac{1}{K_{mf}(p_e, \omega)} - \frac{1}{K_0} \right)} \quad (11)$$

$$G_{sat}(p_e, \omega) = G_{mf}(p_e, \omega)$$

式中:  $K_f$  为混合流体体积模量, MPa;  $K_0$  是岩石基质组成颗粒的体积模量, MPa。

总体建模思路见图 6: 第一步, 在得到主要组成矿物含量的条件下, 通过 Voigt-Reuss-Hill 岩石物理模型计算平均等效颗粒模量  $K_0$ 、 $G_0$ ; 第二步, 利用孔隙与压力变化试验关系, 并结合公式(8)计算样品中的软、硬孔隙的孔隙度; 第三步, 依据非接触模型(公式(9))计算干燥岩石弹性模量; 最后, 依据 Gurevich 喷射流模型进行流体替换计算(公式(11)), 得到考虑喷射流作用的速度频散模型。



注:  $M_0$  为岩石弹性模量, MPa;  $M_v$  为利用 Voigt 公式计算得到的岩石弹性模量上限, MPa;  $M_R$  为利用 Reuss 公式计算得到的岩石弹性模量下限, MPa。

Figure 6. The procedures of seismic rock physics modeling based on porosity and pore shape  
图 6. 基于孔隙度与孔隙形状的地震岩石物理建模流程

为了验证上述速度频散模型的适用性, 将 H1 与 H5 砂岩样品在 700 kHz 频率下测量的饱和岩石速度与模型计算的理论饱和速度进行了对比(图 7)。图 7 中“干燥”表示岩石干燥速度测量值, “饱水”表示水饱和速度测量值。不难看出, 岩石速度频散模型计算结果与实际测量结果符合度更高, 而 Gassmann 方程计算结果在整个压力范围内均与测量结果存在明显差异。

### 5. 结语

地震岩石物理模型是建立储层特征与地震特征的桥梁, 也是进行岩性和烃类预测的依据, 而岩石物理模型的准确性取决于对岩石骨架地震弹性性质以及流固耦合作用的准确表征, 因此, 符合特定目标

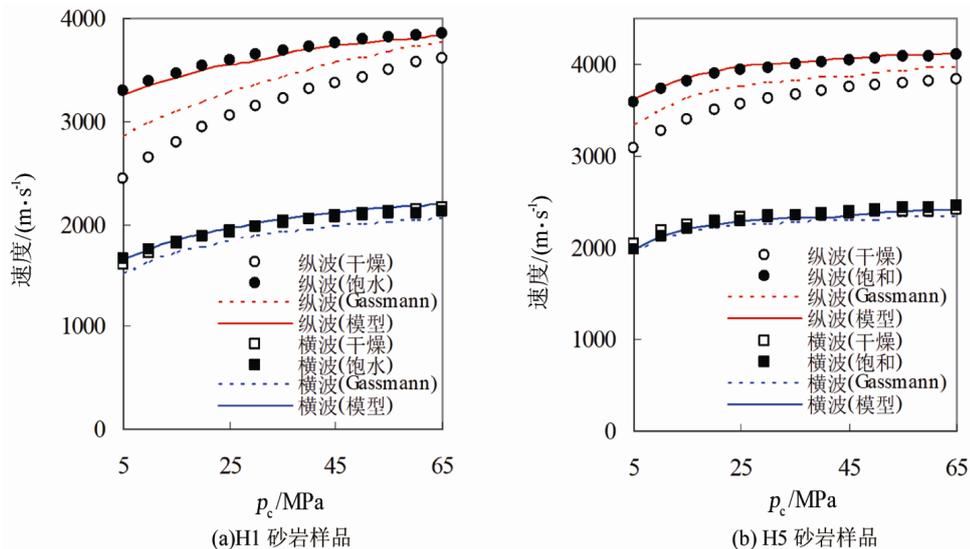


Figure 7. The interpretation of ultrasonic experimental results  
 图 7. 超声实验结果解释

储层特征的岩石物理模型至关重要。

该次研究以新疆车排子地区春光油田沙湾组储层砂岩岩心样品实验室测试结果为基础, 利用 Mori-Tanaka 非接触模型, 提出了综合考虑储层砂岩孔隙度、孔隙形状以及微裂隙孔隙度对干燥岩石骨架弹性性质影响的地震岩石物理模型; 模型中的参数均通过试验进行求取和标定, 大大降低了建立储层岩石骨架弹性性质模型的复杂性和不确定性。

利用孔隙尺度喷射流作用模型替代传统 Gassmann 方程进行流体替换, 既可以用于实验室岩石超声波测量数据的模拟和解释, 也可用于地震测量数据的模拟和解释, 从而为不同频率测量数据的储层和流体解释提供了一种方便的工具。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(41374135)。

## 参考文献

- [1] Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G. (2005) Quantitative Seismic Interpretation. Cambridge University Press, Cambridge, 48-108. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511600074>
- [2] 魏嘉. 定量地震解释离我们有多远[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(6): 433-437.
- [3] Tang, J.W. (2008) Discussion on Several Issues about Seismic Rock Physics. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, **47**, 398-404.
- [4] 邓继新, 王尚旭, 伍向阳. 东营凹陷储层砂岩的地震特征及对岩石结构的指示作用[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 294-299.
- [5] Yin, X.Y., Zong, Z.Y. and Wu, G.C. (2015) Research on Seismic Fluid Identification Driven by Rock Physics. *Science China (Earth Sciences)*, **58**, 159-171. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4992-3>
- [6] Mavko, G., Mukerji, J. and Dvorkin, J. (2003) The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media. Cambridge University Press, New York, 1-329.
- [7] Han, D.H., Nur, A. and Morgan, D. (1986) Effect of Porosity and Clay Content on Wave Velocities in Sandstones. *Geophysics*, **51**, 2093-2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>
- [8] Xu, S. and White, R.E. (1995) A New Velocity Model for Clay-Sand Mixtures. *Geophysical Prospecting*, **43**, 91-118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00126.x>

- [9] Gassmann, F. (1951) Elastic Waves through a Packing of Spheres. *Geophysics*, **16**, 673-685. <https://doi.org/10.1190/1.1437718>
- [10] 邓继新, 王尚旭. 基于统计岩石物理的含气储层饱和度与孔隙度联合反演[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2009, 31(1): 48-52.
- [11] Batzle, M.L., Han, D. and Hofmann, R. (2006) Fluid Mobility and Frequency-Dependent Seismic Velocity-Direct Measurements. *Geophysics*, **71**, 1-9. <https://doi.org/10.1190/1.2159053>
- [12] Müller, T.B., Gurevich, B. and Lebedev, M. (2010) Seismic Wave Attenuation and Dispersion Resulting from Wave-Induced Flow in Porous Rocks: A Review. *Geophysics*, **75**, 147-164. <https://doi.org/10.1190/1.3463417>
- [13] Pride, S.R., Berryman, J.G. and Harris, J.M. (2004) Seismic Attenuation due to Wave-Induced Flow. *Journal of Geophysical Research*, **109**, B01201. <https://doi.org/10.1029/2003JB002639>
- [14] 邓继新, 王尚旭, 俞军. 频散作用对储层砂岩速度实验结果的影响分析[J]. 石油物探, 2005, 44(4): 334-338.
- [15] Deng, J.X., Zhou, H. and Wang, H. (2015) The Influence of Pore Structure in the Reservoir Sandstone on the Dispersion Properties of Elastic Wave. *Chinese Journal of Geophysical Research (in Chinese)*, **58**, 3389-3400.
- [16] Walsh, J.B. (1965) The Effect of Cracks on the Compressibility of Rocks. *Journal of Geophysical Research*, **70**, 381-389. <https://doi.org/10.1029/JZ070i002p00381>
- [17] Vernik, L. and Kachanov, M. (2010) Modeling Elastic Properties of Siliciclastic Rocks. *Geophysics*, **75**, 171-182. <https://doi.org/10.1190/1.3494031>
- [18] Mori, T. and Tanaka, K. (1973) Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions. *Acta Materialia*, **21**, 571-574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- [19] Gurevich, B., Makarynska, D., Paula, O., *et al.* (2010) A Simple Model for Squirt-Flow Dispersion and Attenuation in Fluid-Saturated Granular Rocks. *Geophysics*, **75**, 109-120. <https://doi.org/10.1190/1.3509782>

[编辑] 龚丹

**Hans** 汉斯**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)