

# 流体饱和储层砂岩超声波纵波速度频散的定量预测

刘照<sup>1</sup> 何涛<sup>1,†</sup> 杨志强<sup>1</sup> 邹长春<sup>2</sup> 任科英<sup>3</sup>

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学), 北京 100083; 3. 中国海洋石油有限公司湛江分公司, 湛江 524057; † 通信作者, E-mail: taohe@pku.edu.cn

**摘要** 针对岩芯的实验室超声波测试速度由于频散误差而不能直接用于涪西南凹陷声波测井速度标定的问题, 利用涪三段5块不同物性的储层砂岩, 通过比较盐水和4种不同密度油作为孔隙流体时的饱和岩样超声波纵波速度变化, 优化和完善速度频散机制分析流程, 提出和验证样品被喷射流机制统治时的非弛豫湿骨架模量与高压情况下的干骨架模量相当的假设, 并探索出一种BISQ理论特征喷射流长度( $R$ )的估计方法。最后建立对涪三段储层砂岩的纵波速度频散进行全频带定量预测的方法, 从而能够确定速度频散的机制和大小。通过提出的全频带速度频散预测公式, 可将实验室的超声波测试速度校正到不同频率条件, 在实际应用中满足测井(中频带)和勘探地震(低频带)的岩石物理分析需求, 具有一定实践意义。

**关键词** 储层砂岩; 流体黏度; 超声波; 速度频散; 定量预测

**中图分类号** P313; P315

## The Quantitative Prediction of Ultrasonic Compressive Wave Velocity Dispersion for Fluid Saturated Reservoir Sandstone

LIU Zhao<sup>1</sup>, HE Tao<sup>1,†</sup>, YANG Zhiqiang<sup>1</sup>, ZOU Changchun<sup>2</sup>, REN Keying<sup>3</sup>

1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Key Laboratory of Geo-detection (MOE) (China University of Geosciences), Beijing 100083; 3. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057; † Corresponding author, E-mail: taohe@pku.edu.cn

**Abstract** Due to the velocity dispersion error, the laboratory ultrasonic velocity measurement of core samples cannot be directly used to calibrate the acoustic well logging velocity of reservoir in Southwest Weizhou depression. The further work of data processing and analysis for the ultrasonic velocity dispersion were conducted for 5 representative sandstone samples of W3 reservoir. By comparing the compressive velocities of sandstone samples saturated with the brine and four oils of different densities, the method and process of velocity dispersion mechanism analysis were greatly improved. The assumption was proposed and verified that the modulus of non-relaxation wet solid frame was equivalent with the one of dry frame under high pressure condition when the sandstone samples were ruled by squirt flow mechanism. The estimation method of  $R$  value, which was the critical squirt length of BISQ theory, was also proposed and verified. Then, the method to quantitatively predict the P-wave velocity dispersion of W3 reservoir sandstones in full waveband was accomplished. Finally it is concluded that the mechanism and degree of velocity dispersion depend on both the physical properties (porosity and permeability) of samples and the kinematic viscosity of pore fluids. Using the velocity dispersion prediction formula for full waveband, the ultrasonic velocity measured in laboratory (high frequency band) can be corrected to different frequency, and then meet the demands of rock physics analysis for well logging (medium frequency band) and exploration seismology (low frequency band). Thus, the complete technique for velocity dispersion analysis and prediction has certain practical meaning.

**Key words** reservoir sandstone; fluid viscosity; ultrasonic; velocity dispersion; quantitative prediction

在岩石物理学研究中, 孔隙介质频散现象的弹性波理论一直是重要课题。Gassmann<sup>[1]</sup>建立了反映流体饱和岩石体积模量与孔隙度以及孔隙流体模量关系的 Gassmann 方程。Biot<sup>[2]</sup>根据潮湿土壤的电位特性和声波的吸收特性, 发展了 Gassmann 的流体饱和和孔隙介质理论, 导出根据干岩石来预测饱和岩石的频率相关 P 波和 S 波速度的理论表达式, 奠定了双相介质波动理论的基础, 被视为孔隙弹性波动力学的经典理论。Bourbié 等<sup>[3]</sup>及 Mavko 等<sup>[4-5]</sup>探讨用 Biot-Gassmann 理论预测液体饱和状态岩石的 P 波和 S 波速度, 认为可以用 O'Connell 等<sup>[6]</sup>提出的“喷射”流或局部流(squirt flow or local flow)来解释 King<sup>[7]</sup>所注意到的 S 波速度表现“异常”的原因。进一步地, Mavko 等<sup>[4]</sup>导出一种估计喷射流动效应的简单方法。Mukerji 等<sup>[8]</sup>将这种方法扩展到各向异性岩石中。利用喷射流理论, King 等<sup>[9]</sup>报道了干岩石和盐水饱和砂岩(承受高达 60 MPa 的围限压力)的超声波试验结果, 显示围限压力小于 40 MPa 时喷射流动理论的重要性。在国内, 众多学者进行了岩性、含油气性和有效覆盖压力对纵、横波速度的影响及其规律的实验研究<sup>[10-16]</sup>, 以及饱和储层砂岩中流体引起的超声波速度频散和衰减的实验研究<sup>[17-20]</sup>。在 Biot 理论的基础上, 巴晶等<sup>[21-22]</sup>以及聂建新等<sup>[23]</sup>讨论了双孔介质的弹性波动效应及黏弹性分析; 唐晓明等<sup>[24-25]</sup>探讨了含孔隙、裂隙介质弹性波动的统一理论, 并进

行实验验证。

在引起流体饱和岩石速度频散的诸多因素中, 流体黏滞性的影响非常显著。然而, 国内外的相关实验研究一直比较薄弱。针对这种情况, 本研究依托 He 等<sup>[20]</sup>的实验数据, 在前人工作基础上, 通过对不同流体饱和的砂岩样品超声波纵波速度实测值与理论预测值进行比较, 对流体黏度引起的超声波速度频散开展研究, 并开展全频带的定量预测工作, 优选出适合研究区的最佳速度频散预测理论, 将超声波速度校正到测井和地震频段, 从而能够更好地将实验室测量结果应用到测井和勘探地震的地层速度分析中, 为油田储层预测和评估服务, 具有重要的实际应用意义。

## 1 实验及数据

本研究用于频散分析的 5 块实验样品 W3-1, W3-7, W3-10, W3-11 和 W3-13 来自涪三段不同的钻井。经过薄片鉴定, 除样品 W3-13 外, 其他样品石英和长石含量的变化范围很窄, 含少量黏土成分, 是相对干净的砂岩。所有样品都属于颗粒支撑类型, 孔隙-颗粒的接触方式为胶结。样品的基本情况如表 1 所示。根据薄片观察得到的矿物成分比例, 采用 Hashin-Shtrikman 平均方法对砂岩样品的固体基质密度  $\rho_s$ 、体积模量  $K_s$  和剪切模量  $G_s$  进行估计。

实验过程中采用以下流体对砂岩样品进行饱

表 1 砂岩样品的基本情况  
Table 1 Basic information of sandstone samples

样品号	井号	深度/m	压差/MPa	孔隙度/%	渗透率/md	矿物含量/%				
						石英	长石	黏土	方解石	白云石
W3-1	WZ6-9-1	2508.60	31.1	18.45	44.620	≈85	≈10	<5	<0.1	0
W3-7	WZ12-1-2B	2347.17	28.7	16.46	3.872	≈87	≈5	<5	≈1.5	≈1.5
W3-10	WZ12-1-4	2478.35	30.7	13.55	2.495	≈80	≈15	≈1	<4	0
W3-11	WZ12-1-4	2658.33	33.5	17.87	63.552	≈85	≈10	<5	<0.1	0
W3-13	WZ11-4N-2	1868.60	21.6	23.73	424.20	≈75	≈10	<15	<0.1	0

样品号	$\rho_s/(g \cdot cm^{-3})$	$K_s/GPa$	$G_s/GPa$	$\rho_{dry}/(g \cdot cm^{-3})$	$V_{p,dry}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{s,dry}/(m \cdot s^{-1})$	$\gamma$	粒径/mm	R/mm
W3-1	2.6445	38.0036	38.1724	2.10	3980.0	2537.0	0.0057	0.13~0.25	0.300
W3-7	2.6497	37.6080	39.1073	2.13	3699.0	2362.5	0.0055	0.07~0.20	0.090
W3-10	2.6487	41.3590	39.7104	2.24	3875.0	2563.5	0.0037	0.10~0.25	0.090
W3-11	2.6445	38.0036	38.1724	2.05	3833.0	2503.0	0.0057	0.25~0.50	0.300
W3-13	2.6375	35.8677	31.5108	1.86	3388.0	2177.5	0.0116	0.25~1.00	0.355

说明: 修改自文献[20]; 样品 W3-7 在最后一次饱液压油测试中受损而出现裂缝; 压差为样品上覆地层压力减去孔隙流体压力;  $\rho_{dry}$  表示干样品密度,  $V_{p,dry}$  和  $V_{s,dry}$  分别表示测得的干样品纵波和横波速度,  $\gamma$  是估计的微裂缝纵横比, R 为估计的特征喷射流长度。

和：卤水(26 mg/g 的 NaCl 溶液)、石脑油、白油、液压油以及一种用石脑油和白油配制的混合油。计算时使用的这些流体的密度( $\rho_f$ )、体积模量( $K_f$ )和黏度( $\eta$ )以及对应的实验温度( $T$ )在表 2 中列出。

本文实验中采用超声波脉冲透射法进行岩样的波速测量。根据 Hornby<sup>[26]</sup>的绝对误差估算方法,得到本次实验中岩样纵波速度测量的绝对误差小于 0.9%, 横波速度测量的绝对误差小于 0.6%。如果加上人为读数误差(估计纵波速度读数误差小于 0.1%, 横波速度读数误差小于 0.2%), 则岩样纵波速度测量的总实验误差小于 1.0%, 横波速度测量的总实验误差小于 0.8%。实验所得纵波速度如图 1 中蓝色曲线所示。

## 2 纵波频散机制初步分析

将 5 块样品的纵波速度实测数据与 Gassmann 理论速度和 Biot 理论速度(极限高频)进行比较,结果显示实测速度明显偏离理论计算值(图 1)。由于 Gassmann 理论计算的是没有频散效应的速度,因此以 Gassmann 计算值作为频散是否发生的判断基准,如果实验室超声波实测速度偏离 Gassmann 计算值超过实验误差(约 1%), 则可认为观察到速度频散现象。定义实际测量的速度频散 MVD (measured velocity dispersion)为标准化的测量值  $V_m$  与 Gassmann 理论预测值  $V_G$  之差:

$$\text{MVD} = \frac{V_m - V_G}{V_G} \times 100\%。 \quad (1)$$

类似地,定义 Biot 机制的宏观平均流频散 BVD (Biot velocity dispersion)为

$$\text{BVD} = \frac{V_B - V_G}{V_G} \times 100\%, \quad (2)$$

则由非 Biot 机制导致的速度频散(主要是喷射流效应)为

$$\text{NVD} = \text{MVD} - \text{BVD}。 \quad (3)$$

用式(1)~(3)对 5 块样品进行频散百分比量化处理,结果如图 2 所示,可以看出以下特点。

1) 以 W3-7 和 W3-10 为代表的低渗透率砂岩,无论是在实验超声波频率(0.7 MHz)下,还是在理论极限高频下, Biot 速度频散都接近 0,而大部分流体类型的非 Biot 速度频散大于 2%,超过实验误差(1%),说明低渗透率砂岩内部的“软孔”(微裂隙)较多,分布和排列方向不均匀性强,导致以喷射流为代表的局部流体流动增强了砂岩的整体刚度,从而测得很强的速度频散(可达 3%~8%)。

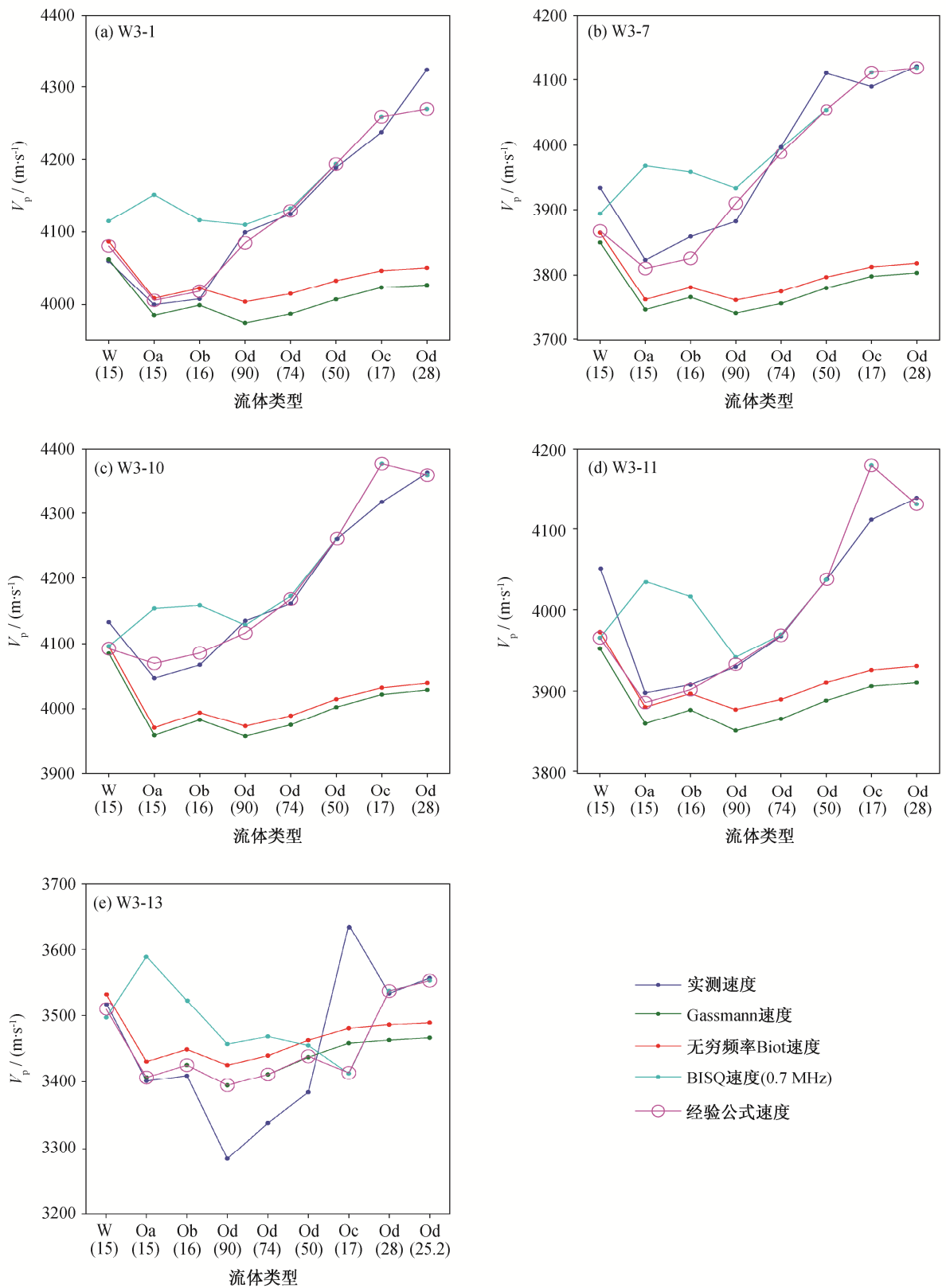
2) 以 W3-1 和 W3-11 为代表的中等渗透率砂岩情况要复杂一些。当孔隙流体黏度较小时(如 Oa 和 Ob),速度频散符合 Biot 宏观流预测值;当流体黏度增大时,喷射流的效应逐渐明显,尤其是当流体黏度超过 3 mPa·s 之后(Od(74)为 3.64 mPa·s),喷射流成为速度频散的统治机制。

3) 对于高孔隙度和高渗透率的样品 W3-13,由于高达 15%的黏土含量,其速度频散变化较复杂,特别是在实验温度较高(50~90°C)时出现负值。

表 2 大气压力下的实验流体参数<sup>[20]</sup>  
Table 4 Experimental fluid's parameters under atmospheric pressure<sup>[20]</sup>

孔隙流体		$T/^\circ\text{C}$	$\rho_f/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$K_f/\text{GPa}$	$\eta/(\text{mPa} \cdot \text{s})$
代号	名称				
W	卤水	15.0	1.0158	2.2698	1.140
Oa	石脑油	15.0	0.6910	0.9982	0.972
Ob	混合油*	16.0	0.7490	1.2097	1.010
Oc	白油	17.0	0.8340	1.5741	26.500
		25.2	0.8672	1.6850	39.820
		28.0	0.8651	1.6561	30.400
Od	液压油	50.0	0.8483	1.4385	7.880
		74.0	0.8297	1.2216	3.640
		90.0	0.8172	1.0888	2.575

注: \*混合油由密度分别为 0.691 和 0.834 的石脑油和白油混合而成。



横坐标为表 2 所列孔隙流体类型, 括号内数字为实验温度( $^{\circ}\text{C}$ ); 除卤水外, 其余流体的运动学黏度从左到右依次加大(下同)

图 1 实测值与理论预测速度比较  
Fig. 1 Comparison of theoretical velocity values and measured values

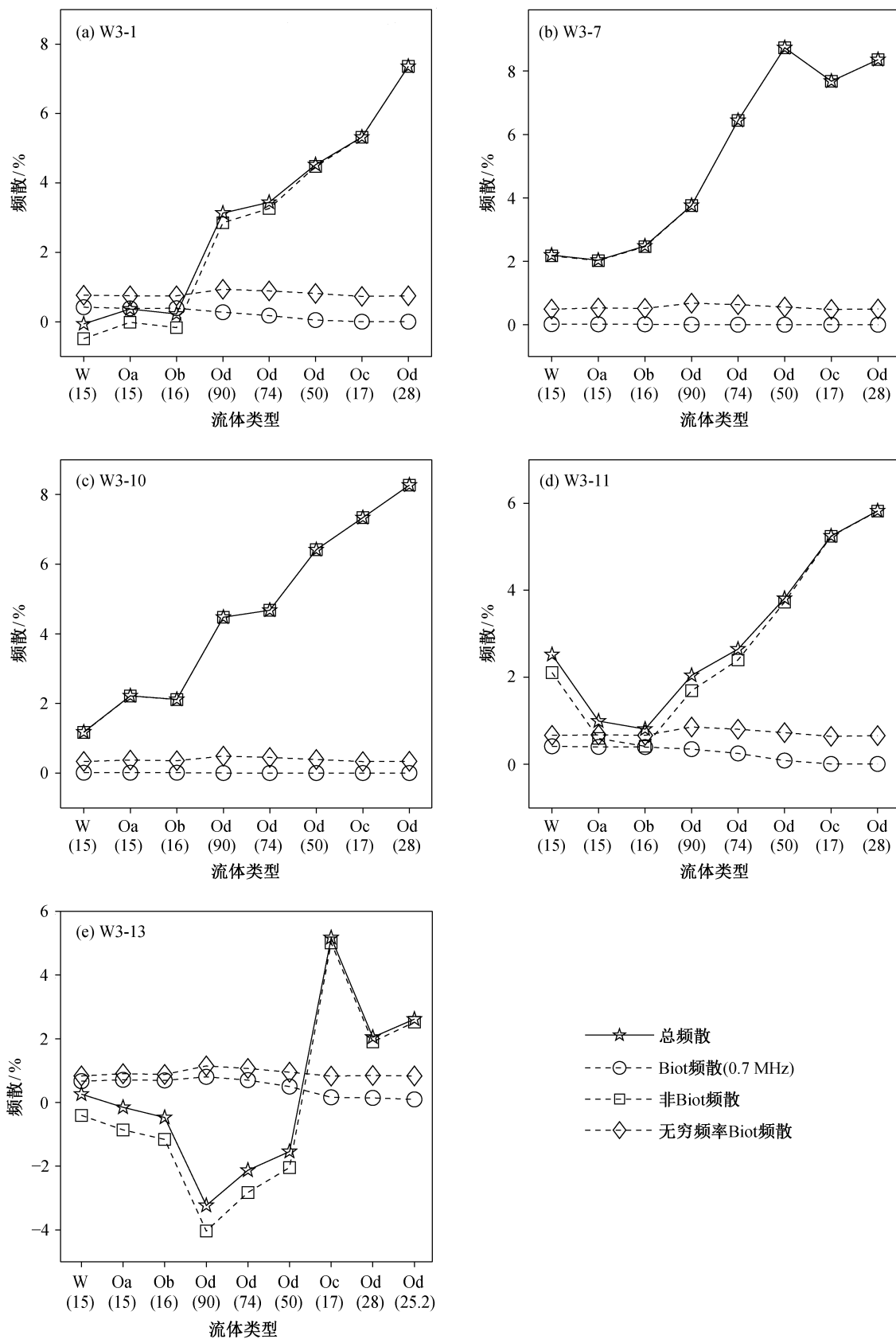


图2 纵波速度频散百分比  
Fig. 2 P-wave velocity dispersion percentage

这说明可能由于高温下黏土出现膨胀扩容现象, 增强了实验高频超声波的散射, 导致声波旅行的路程增加, 因而在以岩样长度作为直达路程基础上计算得到的视速度降低了, 即出现负频散的现象。尽管如此, 总的来看, W3-13 的速度频散以 Biot 宏观流动效应为主。

一般认为, 孔隙流体的黏度是导致弹性波在储层岩石中发生速度频散的一个重要原因。在这批实验数据中, 特别地, 对于用液压油饱和的同一样品, 非 Biot 频散(喷射流)随着温度升高而减小。由于温度对液压油的密度和体积模量影响不大, 但对黏度影响巨大(表 2), 因此说明孔隙流体黏度是造成速度频散的重要因素。

总的来看, 实验数据表明的饱和样品随流体黏度的主要频散变化规律与前人已有成果<sup>[17,27-31]</sup>基本上相符, 可以用宏观尺度上的 Biot 流惯性耦合机制和颗粒尺度上的喷射流机制进行解释。由于 Biot 理论的特征频率为

$$f_b = \frac{\eta\phi}{2\pi\rho_f\kappa}, \quad (4)$$

而喷射流机制特征频率为

$$f_s = \frac{K_0}{\pi\eta}\gamma^3, \quad (5)$$

因此黏度对这两种理论的特征频率作用相反。特征频率是区分低频域和高频域的大致界线, 实验数据充分说明这两者的不同。

由于本次实验数据均在固定压力条件下获得, 所以对于同一块样品, 测得的速度与实验流体的变化直接相关。因此, 通过不同样品之间的横向比较, 可以进一步将流体黏度与样品的物性特性(孔隙度和渗透率)结合起来分析速度频散的组分构成。更重要的是, 由于所有压力均是涇三段储层对应的地层压力, 同时这 5 块样品的物性特征具有代表性, 因此上述速度频散规律对涇三段储层的地震岩石物理分析具有重要的现场指导意义。

### 3 BISQ 理论频散预测

#### 3.1 BISQ 高压干骨架模量的估计

由于除 W3-13 外的其余 4 块样品都表现出很强的非 Biot 频散特征, 因此下面用 BISQ 理论来检验其预测的喷射流频散效应是否满足涇三段储层砂岩的分析要求。首先要确定 BISQ 方程的两个关键参

数: 高压干骨架模量和特征喷射流长度  $R$ 。

由于 BISQ 理论的高频极限与 Biot 理论相同, 而 Biot 理论的宏观平均流动主要发生在岩石内部的硬孔中(孔隙开口的纵横比在 0.1~1 之间), 因此 BISQ 方程的一个隐含条件是, 采用的干骨架模量必须是在高压条件下(砂岩为 60~90 MPa)测得的软孔闭合之后的数值。然而, 由于这批样品的速度是在地层压力下测得的, 最高压力仅 33.5 MPa (表 1), 为理论高压值的一半, 因此需要估计样品在高压下的干燥骨架模量, 以满足 BISQ 方程的要求。

Mavko 等<sup>[4]</sup>根据理论分析并通过超声波测试数据验证, 提出喷射流速度频散的一级近似可以采用将 Gassmann 方程中的干骨架模量替换为高压状态下的干骨架模量的方法计算得到。类似地, 对于本次实验中观察到的喷射流频散现象, 当孔隙连通性较差(低渗透率)或者孔隙流体黏度较高时, 高频超声波振动下的孔隙压力无法达到平衡, 即处于非弛豫状态, 此时孔隙流体就像固体一样充填在软孔中, 可以近似地认为软孔被“闭合”了, 从而增强了岩石的整体刚度。据此, 我们利用反向 Gassmann 方程计算喷射流状态下的非弛豫湿骨架模量, 然后将其作为高压干骨架模量的近似估计值代入 BISQ 方程。

以 W3-1 为例, 图 3 中五角星表示地层压力条件下实测的干骨架纵波速度, 三角形表示假设流体饱和样品的实测速度也满足零频散的 Gassmann 条件时, 由反向 Gassmann 方程计算得到的理论干骨

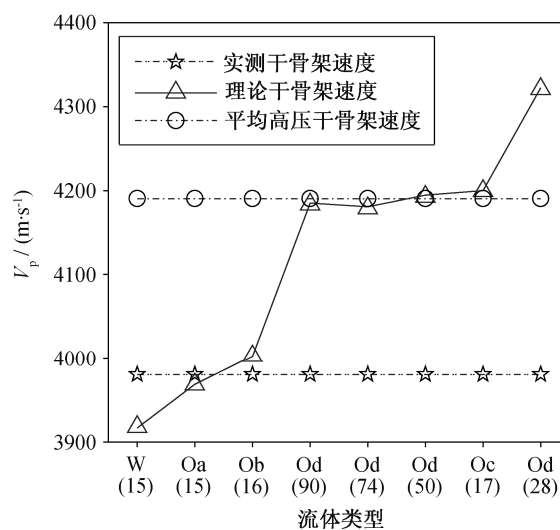


图 3 样品 W3-1 高压下干骨架纵波速度估计  
Fig. 3 Estimation of dry skeleton's P-wave velocity under high pressure for sample W3-1

架纵波速度。可见,当喷射流统治样品时,理论干骨架速度围绕一个高速平台波动,表明高频非弛豫湿骨架对流体类型不敏感,因此可以用它们的平均值(图3中用圆圈表示)作为高压下干骨架速度的合理估计值,再用式(6)和(7)计算得到对应的体积模量和剪切模量。同理,其他4块样品也表现出类似的特征,可以做相同处理。

$$K_{\text{dry}} = \left( V_{\text{pg}}^2 - \frac{4}{3} V_{\text{sg}}^2 \right) \rho_{\text{g}}, \quad (6)$$

$$\mu_{\text{dry}} = V_{\text{sg}}^2 \rho_{\text{g}}. \quad (7)$$

### 3.2 特征喷射流长度 $R$ 的估计

由于 BISQ 理论中的关键参数特征喷射流长度  $R$  的物理含义不清晰,因此在取值上有很强的主观性,需要针对实际储层岩石选取合适的  $R$  值,这对于 BISQ 理论的实用非常重要。虽然 BISQ 理论的提出者一再强调  $R$  值应该与微观尺度相当,但很多实例都表明,相对于孔隙尺寸,  $R$  值可能需要适度偏高,以避免高估局部流影响的情况。

本研究中,由于对不同流体饱和样品的测试时压力固定为地层压力,孔隙结构变化不大,因此从理论上讲,  $R$  值对所有产生喷射流效应的流体是相同的。据此,一个有效地估计  $R$  值的方法是,对不同的孔隙流体,分别计算 BISQ 纵波速度随  $R$  变化的曲线,然后与实测纵波速度进行对比,寻找能使大多数 BISQ 预测速度符合实测速度的  $R$  值。图4显示用上述方法对样品 W3-1 进行  $R$  值拟合的结果。同理,可以对其他4块样品进行相似的  $R$  值拟合,各样品最终确定的  $R$  值(图4中代表实测纵波速度的圆圈等符号对应的横坐标)列在表1的最后一列。通过对比各样品  $R$  值与矿物颗粒的直径,得到以下结论。

1) 物性相近的样品具有近似的  $R$  值。例如, W3-1 和 W3-11 的  $R$  均为 0.3 mm, W3-7 和 W3-10 的  $R$  均为 0.09 mm。

2) 对于润三段的储层砂岩,拟合出的  $R$  值与矿物颗粒的直径尺度相同(例如, W3-1 的颗粒直径在 0.13~0.25 mm 之间, W3-7 的颗粒直径在 0.07~0.2 mm 之间),符合 BISQ 理论对特征喷射流长度的基本定义。

### 3.3 结果对比

图1对实验室超声波频率(0.7 MHz)下的 BISQ

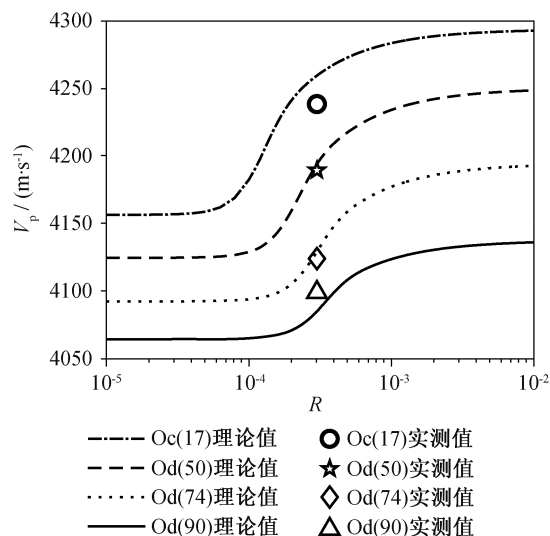


图4 样品 W3-1 的  $R$  值拟合结果  
Fig. 4 Fitting result of  $R$  value for sample W3-1

理论预测值(蓝绿色曲线)与实测值(蓝色曲线)进行了对比。当流体运动学黏度较大(如常温下白油、液压油等)时,喷射流作用在频散效应中占据优势, BISQ 理论可以获得较为理想的频散预测值。然而,在孔隙流体的运动学黏度较小(如卤水或轻质的石脑油、混合油及高温下的液压油)的情况下, BISQ 理论应用效果很差,预测结果明显偏大,这主要是由于 BISQ 理论使用了高压干骨架模量,而实际测试仅在较低的地层压力下完成。

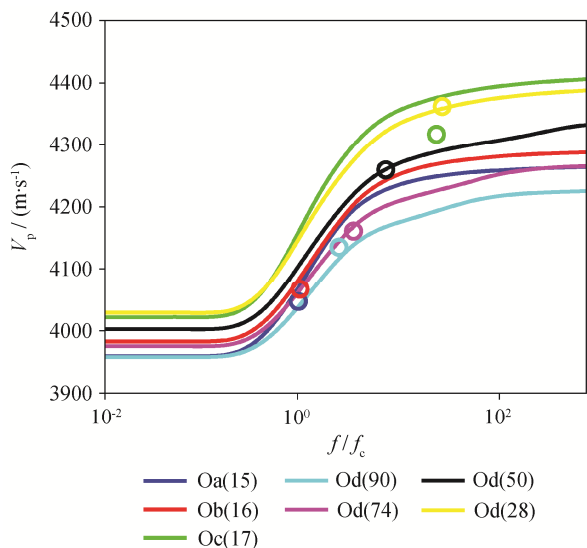
可见,由于 BISQ 理论在使用高压干骨架模量后偏重于喷射流频散的预测,导致对 Biot 宏观流主导的岩样速度预测效果不佳,这种局限性使得仅靠 BISQ 理论不能很好地完成全频带速度频散预测。

## 4 融合 Biot 和 BISQ 的全频带纵波速度预测

由于 Biot 理论和 BISQ 理论各自的局限性,使得它们不能独自对由孔隙流体的宏观平均流动和局部流动效应导致的速度频散都进行很好的预测。前面的分析表明:在孔隙流体黏度较小(如 W(15)和 Oa(15))时, Biot 理论预测效果较好,而 BISQ 理论的预测效果不佳;在孔隙流体黏度较大(如 Od(50), Oc(17)和 Od(28))时则正好相反。由于 Biot 理论的频散预测值一般与实验误差的量级相当(小于 1%),因此本研究关注的重点是喷射流机制(速度频散达到 3%~8%)。

从式(5)可以看出,当流体黏度增大时,喷射流机制的特征频率 $f_s$ 减小,使得实验室超声波频率相对于 $f_s$ 往高频段移动,对应的喷射流效应增强,速度频散也随之增加。因此,可以将 $f_s$ 作为区分目标频率(例如实验室超声波高频、测井声波中频和勘探地震低频)相对高、低的标准。当目标频率显著高于 $f_s$ 时,采用 BISQ 理论重点预测喷射流效应;当目标频率显著低于 $f_s$ 时,采用 Biot 理论预测宏观平均流动效应;当目标频率与 $f_s$ 相比量级不大(高低频转换段)时,则可以考虑将两种理论速度值进行整合,构建经验公式来预测频率转换段的速度。

计算 5 块样品对不同流体饱和时 BISQ 理论纵波速度  $V_p$  随目标频率  $f$  的变化情况,并对  $f/f_c$  作图(图 5,以样品 W3-10 为例)。其中,  $f_c$  为喷射流特征频率。对同一样品,  $f_c$  随着流体黏度变化,即不同的流体对应不同的  $f_c$  值。图 5 中各条  $V_p-f/f_c$  曲线的形态可以总结为图 6 所示的“高低平台夹陡坡”的模式: 1) 当目标频率小于喷射流特征频率的 1/10 时(图 6 中  $f/f_c$  值小于  $10^{-1}$  的部分), 纵波速度在低平台上几乎不随频率变化, 此时饱和流体样品处于相对低频段; 2) 当目标频率大于喷射流特征频率 100 倍以上(图 6 中  $f/f_c$  值大于  $10^2$  的部分)时, 纵波速度在高平台上, 趋于不随频率变化, 此时饱和流体样品处于



圆圈表示流体饱和时的实测纵波速度,颜色与理论预测曲线相对应(下同)

图 5 样品 W3-10 整合 Biot 与 BISQ 后的纵波速度随  $f/f_c$  变化

Fig. 5 Integrated P-wave velocity of Biot and BISQ with  $f/f_c$  variation of sample W3-10

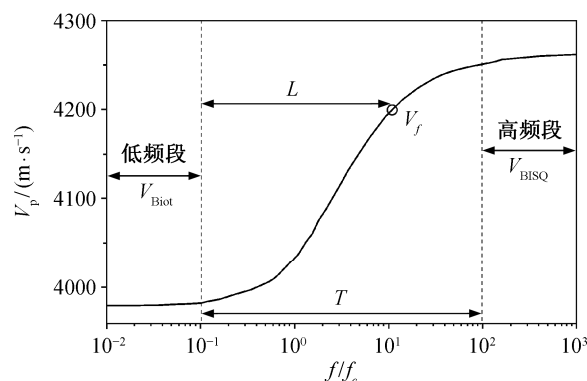


图 6 整合 Biot 与 BISQ 后的纵波速度随  $f/f_c$  变化示意图  
Fig. 6 Sketch map of integrated P-wave velocity of Biot and BISQ with the  $f/f_c$  variation

高频段; 3) 当  $f/f_c$  值在  $10^{-1} \sim 10^2$  的区间时, 对应高低频段的转折陡坡, 纵波速度随着频率升高而迅速增大。

根据图 6 所示的比例关系, 如果令低频段的速度为 Biot 理论速度, 高频段的速度为 BISQ 理论速度, 高低频转折段的  $f/f_c$  比值宽度为  $T$  (取对数; 对于 W3 储层砂岩, 转折段的左边界为 -1, 右边界为 2, 故  $T$  值为 3), 则对于任意目标频率  $f$ , 可以构建出计算对应的纵波速度  $V_f$  的经验公式如下:

$$\begin{cases} V_f = V_{\text{Biot}} (\lg(f / f_c) \leq -1), \\ V_f = W \times V_{\text{Biot}} + (1 - W) \times V_{\text{BISQ}} \\ \quad (-1 < \lg(f / f_c) < 2), \\ V_f = V_{\text{BISQ}} (\lg(f / f_c) \geq 2), \\ W = (1 - L / T)^{a \times L^b}, \end{cases} \quad (8)$$

式中, 当目标频率  $f$  处于转折段(例如图 6 中圆圈)时,  $W$  是 Biot 理论速度的权重系数;  $L$  为圆圈到转折段左边界的距离;  $a$  和  $b$  为地区经验系数, 与储层砂岩的物性有关, 可以由样品实测的速度频散情况拟合确定。

表 3 列出根据这 5 块样品确定的涪三段储层砂岩经验系数  $a$  和  $b$  的取值条件。需要指出的是, 当砂岩样品的渗透率达到中等及以上时的  $a$  和  $b$  对于样品 W3-1, W3-11 和 W3-13 都是适用的, 这在一定程度上验证了经验公式(8)的有效性。

图 7 显示式(8)对 5 块样品的全频带速度预测结果。总体而言, 在实验室超声波频率下, 预测结果与实测结果符合程度较好。

图 1 对 Gassmann 理论、Biot 理论、BISQ 理论

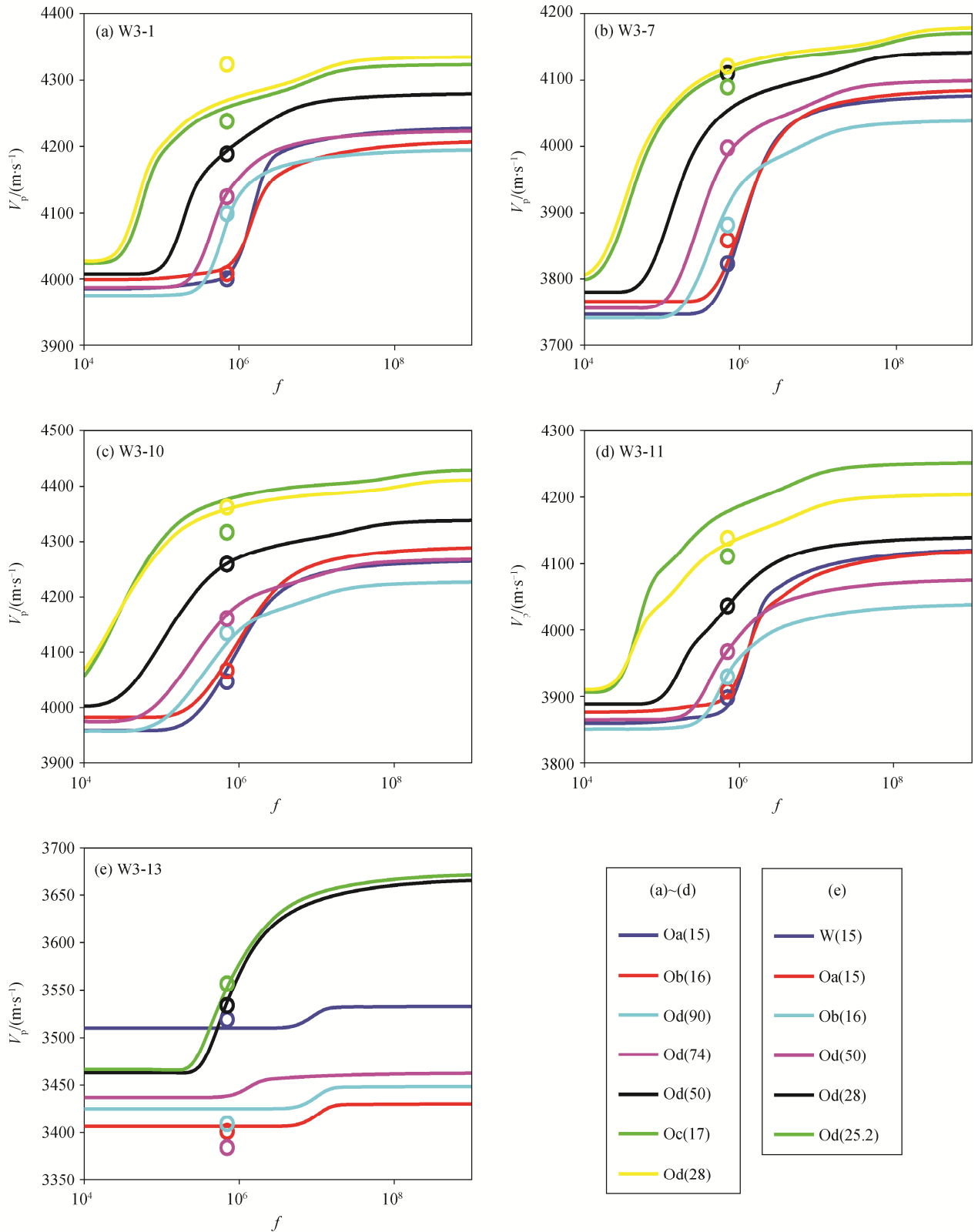


图 7 整合 Biot 与 BISQ 理论后的全频带速度频散预测值  
 Fig. 7 Averaged velocity of Biot and BISQ theoretical values for full waveband dispersion prediction

表 3 涠三段储层砂岩经验系数  $a$  和  $b$  的取值  
Table 3 Empirical coefficient values of  $a$  and  $b$  for W3 reservoir sandstones

$a$	$b$	取值条件
9	4	渗透率中等以上(W3-1, W3-11, W3-13)
6	2	渗透率差, 但孔隙度相对较好(W3-7)
2	2	渗透率、孔隙度都差(W3-10)

以及本文提出的经验公式预测的纵波速度与实测结果进行对比, 可以看出, 用经验公式(8)获得的速度频散预测结果有了很大程度的优化(粉红色曲线), 在实验所用几种流体黏度范围之内, 不论流体黏度高, 预测值与实测值(蓝色曲线)的偏离度几乎都小于 1%, 也就是说, 与实验速度测量误差相近, 达到预期目标。

## 5 结论

1) 喷射流发生的原因是波传播过程中在半个周期内孔隙压力难以在软孔和硬孔之间达到平衡, 因此砂岩的物性差(尤其是低渗的储层)会导致孔隙之间流体交换困难, 这是喷射流发生的关键因素, 流体黏度上升的影响次之; 中等渗透率的砂岩仅在流体黏度升高时表现出显著的喷射流效应。

2) 流体黏度对于 Biot 流惯性耦合机制和颗粒尺度上的喷射流机制的特征频率作用相反, 而特征频率是区分这两种理论相对低频域与高频域的大致界线。

3) 以喷射流特征频率作为高、低频段和转折段的划分基准, 以 BISQ 理论预测值作为高频段输入, 以 Biot 理论预测值作为低频段输入, 以转折段的高低频占比为权重的经验公式能在一定程度上对全频带纵波速度频散做定量预测。

4) 本文通过频散百分比量化、高压干骨架模量估算以及 BISQ 理论特征喷射流长度估算等流程, 建立对涠三段储层砂岩的纵波速度频散进行全频带定量预测的方法, 从而可以将实验室的超声波测试速度校正到不同频率条件下, 对于研究区内测井(中频带)和勘探地震(低频带)的速度标定以及岩石物理分析具有一定的实践意义。

5) 进一步地, 由于图 6 所示的速度频散曲线变化形态是多孔介质物性特征的本质反应, 因此本研究提出的经验公式理论上可以应用于大多数自然界岩石的频散预测, 但需要通过实验方法(例如本文

实验) 获得频散曲线特征以确定公式参数( $L, T, a, b$ ) 合适的取值, 从而反映岩石类型以及各向异性强弱等因素的影响。

## 参考文献

- [1] Gassmann F. Über die Elastizität poröser Medien. *Veierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 1951, 96: 1-23
- [2] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, II. Higher frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168-191
- [3] Bourbié T, Coussy O, Zinsner B. *Acoustics of porous media*. Paris: Gulf Publishing, 1987
- [4] Mavko G, Jizba D. The relation between seismic P- and S-wave velocity dispersion in saturated rocks. *Geophysics*, 1994, 59: 87-92
- [5] Mavko G, Mukerji T. Bounds on low-frequency seismic velocities in partially saturated rocks. *Geophysics*, 1998, 63(3): 918-924
- [6] O'Connell R J, Budiansky B. Viscoelastic properties of fluid-saturated cracked solids. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82: 5719-5740
- [7] King M S. Wave velocities in rocks as a function of changes in overburden pressure and pore fluid saturation. *Geophysics*, 1966, 31(1): 50-73
- [8] Mukerji T, Mavko G. Pore fluid effects on seismic velocity in anisotropic rocks. *Geophysics*, 1994, 59(2): 233-244
- [9] King M S, Marsden J R. Velocity dispersion between ultrasonic and seismic frequencies in brine-saturated reservoir sandstones. *Geophysics*, 2002, 67(1): 254-258
- [10] 史譔, 沈联蒂. 灰岩含水饱和度对纵、横波速度变化影响的实验研究. *石油地球物理勘探*, 1990, 25(4): 469-479
- [11] 史譔, 沈联蒂. 根据波速-压力关系评价岩石岩性、物性的实验研究. *地球物理学报*, 1990, 33(2): 212-219
- [12] 沈联蒂, 史譔. 岩性、含油气性、有效覆盖压力对纵、横波速度的影响. *地球物理学报*, 1994, 37(3): 391-399
- [13] 史譔, 杨东全. 上覆压力变化时孔隙岩层弹性波速度的确定及其普遍意义. *中国科学: D 辑*, 2001, 31(11): 896-901
- [14] 史譔, 沈文略, 杨东全. 岩石弹性波速度和饱和度、

- 孔隙流体分布的关系. 地球物理学报, 2003, 46(1): 138-142
- [15] 李金臣, 史譔, 陈思远. 黏度和矿化度对岩石速度各向异性影响的实验研究. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(6): 851-858
- [16] 史譔, 邓继新. 地层条件下泥、页岩衰减各向异性研究. 中国科学: D辑, 2005, 35(3): 268-275
- [17] 邓继新, 史譔, 俞军. 流体饱和岩石超声速度频散的特性研究. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 835-843
- [18] 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. 石油物探, 2005, 44(4): 334-338
- [19] 邓继新, 王尚旭. 储层砂岩纵波衰减的实验结果分析. 石油物探, 2008, 47(4): 346-351
- [20] He T, Zou C C, Pei F G, et al. Laboratory study of fluid viscosity induced ultrasonic velocity dispersion in reservoir sandstones. Applied Geophysics, 2010, 7(2): 114-126
- [21] 巴晶, 卢明辉, 胡彬, 等. 黏弹双相介质中的松弛骨架模型. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1527-1537
- [22] 巴晶. 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, 2010, 40(11): 1398-1409
- [23] 聂建新, 杨顶辉, 巴晶. 含泥质低孔渗各向异性黏弹性介质中的波频散和衰减研究. 地球物理学报, 2010, 53(2): 385-392
- [24] 唐晓明. 含孔隙、裂隙介质弹性波动的统一理论: Biot理论的推广. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(6): 784-795
- [25] 唐晓明, 钱玉萍, 陈雪莲. 孔隙、裂隙介质弹性波理论实验研究. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4226-4233
- [26] Hornby B E. Experimental laboratory determination of the dynamic elastic properties of wet, drained shales. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B12): 29945-29964
- [27] Winkler K W. Dispersion analysis of velocity and attenuation in Berea sandstone. Journal of Geophysical Research, 1985, 90: 6793-6800
- [28] Wang Z, Nur A. Dispersion analysis of acoustic velocities in rocks. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87(6): 2384-2395
- [29] Dvorkin J, Mavko G, Nur A. Squirt flow in fully saturated rocks. Geophysics, 1995, 60(1): 97-107
- [30] Batzle M, Han D, Hofmann R. Optimal hydrocarbon indicators. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2001, 20(1): 1697-1700
- [31] Nie J X, Yang D H, Yang H Z. A generalized viscoelastic Biot/squirt model for clay-bearing sandstones in a wide range of permeabilities. Applied Geophysics, 2008, 5(4): 249-260