# 利用常规测井资料基于岩石物理和 多矿物分析反演横波速度

邵才瑞1,印兴耀1,张福明1,宋明水2

1. 中国石油大学地球资源与信息学院,山东东营 257061

2. 中石化胜利油田有限公司勘探项目管理部,山东东营 257001

摘要:测井横波速度是测井地震联合反演的重要标定参数.为克服大量老井缺少横波速度资料和现有横波速度估算方法的不足,基于孔隙介质岩石物理理论,通过常规测井资料求取多矿物组分,利用 VRH 模型求得地层的等效弹性模量;最后利用纵 波速度作为约束条件,根据 Biot-Gassmann 方程得到地层横波速度.计算结果与实测结果对比表明,平均相对误差限在 5% 左 右,与 Xu White 模型相比,该方法物理意义更为明确,使用更简便,计算精度提高一倍左右.

关键词: 岩石物理; 测井资料; 多矿物分析; Biot-Gassmann 方程; 横波速度; 地球物理.

中图分类号: P584; P631.4 文章编号: 1000-2383(2009)04-0699-09

收稿日期: 2008-06-28

# Shear Wave Velocity Inversion with Routine Well Logs Based on Rock Physics and Multi-Mineral Analysis

SHAO Cai-rui<sup>1</sup>, YIN Xing-yao<sup>1</sup>, ZHANG Fu-ming<sup>1</sup>, SONG Ming-shui<sup>2</sup>

Faculty of Geo-Resource & Information, China University of Petroleum, Dongying 257061
 Department of Exploration Administration, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257001

**Abstract:** The shear wave velocity of well log is an important parameter for mutual inversion, but lots of wells are short of this value. As present estimation method can't calculate the shear velocity precisely, based on rock physics, using VRH model this paper firstly calculates the equivalent elastic modulus via multi-mineral analysis from routine well logs, and then by taking compressional velocity as a constraint, calculates the shear wave velocity based on Biot-Gassmann equations. The method has clearer physics meaning, and practice results show that this method is much more convenient, economic and precise than Xu-White methods, and the error between computational value and measured value is less than 5 percent.

Key words: rock physics; well logs data; multimineral analysis; BiotGassmann equation; shear wave velocity; geophysics.

0 引言

测井资料是重要的地震勘探标定资料,其中波 速是联系岩石物理实验、测井储层评价和地震储层 预测的重要参数.为建立测井资料与地震资料之间 的联系,Faust(1953)、Gardner *et al*.(1974)曾对其 他测井资料与波速之间的关系进行过大量研究.纵 横波速测井方法的出现为测井与地震勘探资料联合 反演提供了直接的基础资料.通过对纵横波速的分 析,可以计算岩石弹性参数,进而分析和识别岩相和 流体性质,另外在进行叠前地震反演及AVA、AVO 属性处理中也需要准确的纵横波速度.然而,由于各 种原因,许多井无法获取横波速度测井资料,因此利 用其他测井资料估算横波速度成为必要.为研究纵 横波速之间的关系,Pickett(1963)、Milholland *et al*.(1980)、Castagna *et al*.(1985,1993)等经大量的 岩石物理实验,得出了纵横波速之间的经验公式; Xu and White(1995)给出了砂泥岩地层 Xu-White

基金项目:中石化"十一。五"重大科技攻关项目.

作者简介: 邵才瑞(1966—),男,博士,副教授,从事地球物理测并信息处理教学及科研工作. Email. shaoer @hdpu.edu.en (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模型波速计算方法;国内谢进庄等(2003)利用 Biot (1956a,1956b)理论与Berryman(1980a,1980b)自 洽模型研究了泥质砂岩弹性参数的影响因素,也给 出了相应的波速计算方法;王玉梅等(2006)通过建 立岩石弹性参数和测井数据之间的统计关系,给出 了横波速度估算方法.

包括上述文献在内的许多工作满足了一定条件 和精度要求下的波速求解问题,但尚存在许多不足 之处.统计方法需要统计分析大量的实验室资料,而 日具有区域性, Xu-White 模型基于时间平均公式利 用体积加权求取骨架时差,然后利用速度和弹性参 数之间的关系估算出砂泥混合骨架的弹性参数,再 利用 Kuster-Toksöz( Kuster-Toksöz,1974) 等效介 质模型求得干岩石弹性模量,最后利用 Gassmann 方程(Gassmann, 1951) 求得纵横波速,由干利用 Kuster-Toksöz 介质模型需要得知孔隙形状参数, 而该参数常利用泥质和孔隙度来估算,因此,Xu-White 模型不仅存在孔隙形状参数难以确定的问 题,而且波速最终演变成了泥质和孔隙度的函数,谢 进庄等(2003)从饱和流体多孔介质纵横模式体波的 频散方程出发给出了波速计算方法,克服了 Xu-White 模型利用时间平均加权估算骨架弹性模量的 不足,但利用自洽模型计算等效弹性参数时仍然需 要确定孔隙形状参数,因此在使用上仍存在一定难 度,针对现有方法地层骨架矿物组分简单、孔隙形状 参数难以确定、计算精度较低等不足,本文通过测井 资料多矿物组分分析,充分考虑地层骨架多矿物、流 体性质、孔隙大小等多因素对波速的影响、利用 VRH 模型求得地层的等效弹性模量后,基于 Biot-Gassman 理论求得地层横波速度.

# 1 饱和流体地层波速和等效弹性模量 的关系

1.1 各向同性均匀线弹性介质波速与弹性参数的 关系

对于各向同性均匀线弹性介质,根据 Hook 定 量和牛顿定律可建立弹性波方程,进而导出纵横波 速度与介质体积模量和剪切模量存在以下关系:

$$\begin{cases} \rho V_{\rm p}^2 = K + \frac{4}{3}\mu, \\ \rho V_{\rm s}^2 = \mu. \end{cases}$$
(1)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publi

其中:K为体积模量, $\mu$ 为剪切模量, $\rho$ 为介质密度.

*V*<sub>P</sub>、*V*<sub>s</sub>分别为纵、横波速.

1.2 饱和流体孔隙介质弹性参数的耦合关系— Biot-Gassmann 理论

由于地层岩石是由多种矿物组分和流体构成的 孔隙介质,声场的速度、幅度等参数受到岩石骨架、 孔隙大小和形态以及流体性质的影响,地层波速难 以直接采用公式(1)计算,必须得知地层的等效弹性 参数.Biot-Gassmann 理论揭示了低频情况下,饱和 流体孔隙介质固一流两相介质弹性参数的耦合关 系,奠定了求解等效弹性参数的理论基础.

对低频情况, Gassmann(1951) 给出了饱和流体 岩石体积模量  $K_{\rm fm}$ 、剪切模量  $\mu_{\rm fm}$ 与开放干燥岩石的 体积模量  $K_{\rm dry}$ 、剪切模量  $\mu_{\rm dry}$ 和矿物骨架体积模量  $K_{\rm ma}$ 之间的关系——Gassmann 方程. 对于饱和流体 孔隙介质, Biot(1962) 认为双相介质中的形变由固 相应变张量和流体含量变化组成,采用虚功原理,推 导出了应力和应变之间的关系. 基于 Biot 理论, Gassmann 方程可化为用  $\beta$  系数表示的 Biot-Gassmann等价关系(Mavko *et al.*, 2003):

$$\begin{cases}
K_{dry} = K_{ma}(1-\beta), \\
\mu_{dry} = \mu_{ma}(1-\beta), \\
\mu_{fm} = \mu_{dry}, \\
K_{fm} = K_{dry} + \beta^2 M.
\end{cases}$$
(2)

M 和β之间满足:  $\frac{1}{M} = \frac{\beta - \varphi}{K_{\text{ma}}} + \frac{\varphi}{K_{\text{ff}}}.$  (3)

其中: *M* 是等体积宏观应变时, 使流体含量增加单 位体积而需施加于流体的压力; β 是开放系统情形 下, 在视宏观体积应变 θ 中流体含量变化所占比例 数(它与孔隙度有关而且也与流通通道的几何形状 有关, 常称 Biot 系数).β<sup>2</sup>M 项代表充满于孔隙的流 体与地层固相部分的相互作用.

Krief *et al*. (1990) 研究认为 Biot 系数满足 关系:

$$(1-\beta) = (1-\phi)^{m(\phi)}, \qquad (4)$$

其中: $m(\phi)$  是孔隙度的函数, Krief *et al*.(1990) 认 为 $m(\phi) = 3 / (1 - \phi)$ . 由(2) 式可知岩石骨架等效 弹性参数  $K_{ma}$ 和  $\mu_{ma}$ 是应用 Biot-Gassmann 方程求 解地层等效弹性模量的关键参数之一.

1.3 多矿物岩石骨架等效介质弹性参数计算方法

Kuster-Toksöz模型、Berryman 自洽模型给出 了求解复合介质等效弹性参数的理论公式,但由于 需要孔隙形状参数,因此难以实际应用.VRH (Voight-Ruess-Hill,据Hill, 1952)空间平均模型 不涉及孔隙形状参数,对于固一固混合其计算精度 shing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne 与K-T模型、自洽模型差别不大,足以满足工程需 要,因此利用 VRH 模型计算岩石骨架等效弹性参 数是一种简便方法(陈颙和黄庭芳,2001).

假设岩石中有 N 种矿物. 第 i 种矿物的体积模 量为 K<sub>i</sub>, 剪切模量为 B<sub>i</sub>, 所占岩石体积百分比为  $V_i$ , 据 V RH 模型岩石骨架体积模量  $K_{ma}$ 和  $\mu_{ma}$ 为:

$$\begin{cases} K_{ma} = (K_V + K_R)/2, \\ \mu_{ma} = (\mu_V + \mu_R)/2. \end{cases}$$
(5)

根据 N 种矿物组分体积和弹性模量,体积模量  $K_V$ 和剪切模量 μν, 由 Voight 等应变模型(Voight, 1910)得到. 岩石体积模量  $K_{\rm R}$  和剪切模量  $\mu_{\rm R}$  由 Ruess 等应力模型(Reuss, 1929)得出.对于混合流 体体积模量  $K_{\rm fl}$ 可采用 Ruess 模型得出.

1.4 饱和流体地层声速和等效弹性模量的关系

宏观上将地层等效为各向同性均匀弹性介质, 则据公式(1)得到声速与地层的等效体积模量  $K_{\rm fm}$ 、 剪切模量 μm之间满足以下关系.

$$\begin{cases} \rho_{\rm b} V_{\rm p}^2 = K_{\rm fm} + \frac{4}{3} \mu_{\rm fm} , \qquad (6) \end{cases}$$

 $\left( \rho_{\rm b} V_{\rm s}^2 = \mu_{\rm fm} \right)$ 

据(2)、(6) 式可以推出:

$$V_{\rm s} = \sqrt{\frac{\mu_{\rm ma}(1-\beta)}{\rho_{\rm b}}} \,. \tag{8}$$

其中: 8. 是地层密度. 因此只要求得地层的等效体 积模量、剪切模量和密度,即可估算出综合波速度或 时差(速度的倒数).

### 利用测井资料多矿物分析反演横波 2 谏度

### 2.1 多矿物组分地层体积模型

实际地层是由多种矿物和流体组成的混合物. 利用常规测井资料采用 CRA 复杂岩性分析程序, 除泥质外,还可求解4种主要矿物组分(单深度点实 际得到2种矿物组分).将油气储层视为由4种矿物 和泥质组成的饱含流体孔隙介质模型,且固体骨架 为弹性固体、流体可压缩且没有粘性( $\mu_{n}=0$ ),则地 层模型如表1所示.其中固体包括所有矿物和干粘

土:  $V_{\text{ma}} = \sum_{i=1}^{4} V_{\text{T物}i} + V_{\text{sh}}(1-\phi_{\text{sh}})$ ; 流体包括孔隙中

 $\phi(1-s_w)+V_{sh}\phi_{sh}\phi_{sh}$ 为粘土束缚水的体积与泥质体 积之比.

2.2 横波速度反演算法步骤

第一步,首先根据表1多矿物地层组分体积模 型,利用测井资料计算地层组分:

(1) 输入伽玛、自然电位、中子、密度、电阻率及 纵波测井资料,通过交会图分析,确定岩石骨架的主 要矿物组分、粘土参数及用于矿物交会分析的测井 曲线校正量.

(2) 据表 2 输入粘土颗粒、不同矿物组分和流体 的体积模量、剪切模量、密度参数.

(3)采用 CRA 复杂岩性地层组分计算方法,计 算地层骨架矿物组分、有效孔隙度 $\phi$ 、饱和度 $S_w$ 、泥 质含量 V<sub>3</sub>和粘土束缚水体积  $\phi_3$ 等参数.

泥质含量利用自然伽马、自然电位或中子测井 曲线采用 CRA 程序中的算法来计算(雍世和和张 超谟,1996).

孔隙度及矿物组分采用中子-密度、中子-声 波或密度一声波交会图,利用CRA 多矿物计算方 法,根据岩性三角形进行求解(雍世和和张超谟, 1996).由于矿物组分对波速影响较大.因此通过实 际交会图分析、根据理论图版准确确定矿物种类和 岩性三角形顶点参数及测井附加校正量是控制矿物 组分精度的重要手段,必要时可采用最优化方法 处理.

含水饱和度利用电阳率根据阿尔奇公式计算. 对于泥质束缚水体积 🖣 目前尚没有直接的测量方 法,可利用以下公式估算:

①采用密度平均公式估算:

 $\phi_{\rm sh} = (\rho_{\rm d} - \rho_{\rm dd}) / (\rho_{\rm wel} - \rho_{\rm dd})$ . (9)

式中, Pad、Pa、Pwa为干粘土、湿粘土和粘土水的密度, 受地区沉积环境的控制.对于同地区沉积环境基本 固定. Pa 为密度一中子交会图上粘土点的密度响 应值.

②据阿尔奇公式:

$$\phi_{\rm sh} \approx S_{\rm w\,sh} = \frac{1}{\phi} (R_{\rm w}/R_{\rm sh})^{0.5}$$
 (10)

第二步:根据地层组分.利用 V RH 模型计算岩 石骨架和流体的等效弹性模量  $K_{ma}$ 、 $\mu_{ma}$ 、 $K_{fl}$ .

第三步:以纵波为约束条件估算横波速度.

(1) 利用纵波速度 V<sub>P</sub> 作为约束估算 β 系数. 据 (3)和(7)式可以推出:

的自由水、油气和泥质中的束缚水:  $V_{1} = \phi_{s_w} + \frac{3}{(C)}$  (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 多矿物地层组分体枳槔	Į型
----------------	----

Table 1 Multi-mineral mode of formation

			$\rho_{\rm b}$	$K_{\rm fm}$	u <sub>fm</sub>			
固体部分					流体部分			
	$V_{\mathrm{ma}}$ $\rho_{\mathrm{ma}}$ $K_{\mathrm{ma}}$ $\mu_{\mathrm{ma}}$			$\mu_{ m ma}$	$V_{\rm fl}$	$\rho_{\rm fl}$	$K_{ m fl}$	
矿物 4	矿物 3	矿物 2	矿物 1	干粘土	粘土水	水	烃	
$V_{\rm min4}$	$V_{\rm min3}$	$V_{\rm min2}$	$V_{\min 1}$	$V_{\rm sh}(1-\phi_{\rm sh})$	$V_{\rm sh} \circ \phi_{\rm sh}$	$\phi \circ S_w$	$\phi(1-S_w)$	
$\rho_{\rm min4}$	$\rho_{min3}$	$\rho_{\min 2}$	$\rho_{\min 1}$	ρ <sub>cl</sub>	Pw	ρ <sub>w</sub>	$\rho_{\rm h}$	
$K_{\min 4}$	$K_{min3}$	$K_{\min 2}$	$K_{\min}$	$K_{ m cl}$	K <sub>w</sub>	K <sub>w</sub>	$K_{ m h}$	
$\mu_{\rm min4}$	$\mu_{\rm min3}$	$\mu_{\min\!2}$	$\mu_{\min 1}$	$\mu_{ m c1}$				
骨架			泥质		孔隙			
$V_{\min}$			V	sh		φ		

#### 表 2 计算地层波速所用矿物组分参数

Table 2 Parameters for formation velocity calculation

矿物	体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	<b>纵波速度</b> ( km⁄ s)	横波速度 ( k m⁄ s)
石英	37.0	44.0	2.65	6.05	4.09
方解石	76.8	32.0	2.71	6.64	3.44
白云石	94.9	45.0	2.87	7.37	3.96
硬石膏	62.1	33.6	2.98	6.01	3.37
粘土	25.0	9.0	2.55	3.81	1.88
水	2.20	0.0	1.00	1.48	0.00
石油	1.37	0.0	0.85	1.27	0.00

注:水和石油见陈颙和黄庭芳(2001)及楚泽涵(1987),其他见 Mavko et al. (2003).

$$\left(K_{\mathrm{ma}} + \frac{4}{3}\mu_{\mathrm{ma}}\right)(1-\beta) + \beta^{2} \frac{K_{\mathrm{ma}}K_{\mathrm{fl}}}{K_{\mathrm{ma}}\beta + (K_{\mathrm{ma}} - K_{\mathrm{fl}})V_{\mathrm{fl}}}.$$
(11)

将上式化成一元二次方程或略去二次项即可算 出β,当没有纵波资料时,可用(4)式估算β值.

(2)利用β、μma、 θ 根据(8)式计算横波速度 Vs,
 其中 θ 可根据 Vma和 Vn的密度进行加权得出或直接采用密度测井值.

# 3 计算实例对比

为验证本文方法的正确性和精度,选择研究区 中有实测横波速度的 A、B、C 井与 Xu-White 模型 进行实际计算对比.其中 A、B 井目的层段位于上古 生界石炭、二叠系古潜山地层,实验室分析资料表 明,矿物以石英、长石和白云石为主,储集空间主要 以次生溶蚀孔隙和裂缝为主.C 井目的层段为新生 界老第三系地层,母岩为前震旦花岗片麻岩,实验室 分析资料表明,基质矿物以石英、长石为主,胶结物 为以方解石、白云石为主的碳酸盐,孔隙以贴粒缝次 牛孔隙为主.

# 3.1 Xu-White 单矿物砂泥模型

Xu-White 模型将岩石骨架组分视为石英和粘 土、孔隙饱含水, 是利用单矿物砂泥组分估算饱含流 体岩石波速度的经典方法, Xu and White(1995) 给 出了该模型的详细计算方法. 为便于利用 Kuster-Toksöz 模型计算干岩石等效弹性模量, 本文采用孔 隙长短轴之比统计关系:  $\alpha$ =0.171 14-0.244 77 $\phi$ + 0.004 314 $V_{sh}$ .

采用SAND2程序进行砂泥组分分析后,据表2 参数利用 Xu-White 模型得出地层波速.为与本文 所述方法进行比较,将本文所述方法中的地层模型 由多矿物简化为单矿物,采用与 Xu-White 模型相 同的单矿物砂泥体积组分,利用 V RH 模型求得等 效骨架弹性模量后,利用纵波速度求得β值后算出 横波速度.

由于3个样本井目的层较深、较为致密、井径变 化不大、井眼条件较好,加上双发双收声波仪器的井 眼补偿作用,因此可认为纵横波测井值为真实值.统 计两种不同算法计算值与实际测井值之间的平均相 对误差限,得到结果见表3.从表3中可以看出由于 本文所给方法利用纵波作为约束条件,因此计算纵 波与实测纵波相等,平均相对误差限为零;计算横波 与 Xu-White 模型计算精度也基本等同,即在单矿 物砂泥岩地层条件下本文所述方法与 Xu-White 模 型精度基本相同.

图 1 是 A 井 4 415~4 470 m 井段, 采用单矿物 砂泥组分计算所得结果, 其中 VP、VS 为实测纵、横 时差, XVP、XVS 为 Xu-White 模型 计算时差, MVP、MVS 为本文方法计算时差. Xu-White 模型 计算纵波平均相对误差限为 0.077 715、横波为 0.132 033;本 文 方 法 分 别 为 0.000 000 和 0.076 498, 其中横波估算精度超过了Xu-White模

7	0	3
	~	~

	表 3	单矿物砂泥组	1分模型不同方	法平均相	对误差限比较		
Table 3	Average rela	tive error band	comparison of	different	method under	sand-shale	mode

加田井夕		计算纵波平均相	<b>1</b> 对误差限	计算横波平均相	计算横波平均相对误差限	
处理开石	处连开段(m)	Xu-Wihte 模型	本文方法	Xu-White 模型	本文方法	
А	3 000 ~ 4 470	0.088 893	0.000000	0. 116 789	0. 127 429	
Α	3 880 ~ 3 945	0.071019	0.000000	0. 107 242	0.096094	
Α	4 415 ~ 4 470	0.077715	0.000000	0. 132 033	0.076498	
В	3 370 ~ 3 795	0. 110 833	0.000000	0. 121 989	0.138914	
В	3 480 ~ 3 560	0.127185	0.000000	0.157177	0.149794	
В	3 700 ~ 3 780	0.054 695	0.000000	0.090233	0. 083 993	
С	4 705 ~ 5 050	0.077 891	0.000000	0.117 884	0.111317	
С	4 760 ~ 4 815	0.073 303	0.000000	0.127 817	0.110 852	



图 1 A 井 4415~4470 m 砂泥简化模型与 Xu-White 模型对比 Fig. 1 Comparison of Xu-White and simplified multi-mineral mode for well A at 4415—4470 m

型.在4431.5~4432.53 m煤层处由于计算矿物组 分与煤层实际成分差别较大, Xu-White 模型计算值 与实测值变化趋势相反,表现为异常,而本文方法由 于采用纵波速度作为约束,仍能得出较为合理的 结果.

# 3.2 多矿物组分分析处理

根据交会图分析得知,上述井段矿物组分以石 英、方解石和白云石为主,利用石英、方解石、白云石 和硬石膏的中子、密度理论值作为中子一密度交会 图中确定矿物组分的岩性三角形顶点坐标,利用

CRA 方法计算多矿物组分后据本文所述算法反演 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

#### 表 4 多矿物组分析法与 Xu White 砂泥模型平均相对误差限比较

Table 4 Average relative error band comparison of multi-mineral mode and Xu-White sand-shale mode

	起止深度(m)	Xu-White	砂泥模型	本文多矿物组分模型	
处理开石		纵波	横波	纵波	横波
А	3 000 ~ 4 470	0.088 893	0. 116 789	0.000000	0.052679
А	3 880 ~ 3 945	0.071019	0.107242	0.000000	0. 039 441
А	4 415 ~ 4 470	0.077715	0. 132 033	0.000000	0.070484
В	3 370 ~ 3 795	0.110 833	0.122 000	0.000000	0.082 405
В	3 480 ~ 3 560	0.127185	0.157177	0.000000	0.067 289
В	3 700 ~ 3 780	0.054695	0.090233	0.000000	0.046765
С	4 705 ~ 5 050	0.077 891	0.117 884	0.000000	0.058 556
С	4 760 ~ 4 815	0.073 303	0. 127 817	0.000000	0.062114









图 3 B 井 3 370~3 795 m 不同模型与测井值交会对比

Fig. 3 Comparison of Xu-White and multi-mineral mode VS log data for well B at 3 370-3 795 m

横波时差.如表4所示统计不同层段实测值和计算 值之间的平均相对误差限,与Xu-White 模型所得 结果对比.将三口井全部处理井段所得结果和XuWhite 模型所得结果分别与实际测井值做交会图对 比,如图 2~图 4 所示.

从表 4 中可以看出, 采用多矿物组分分析横波





Fig. 4 Comparison of Xu-White and multi-mineral mode VS log data for well C at 4 075-5 050 m



图 5 A 并 3 880~3 945 m 多矿物模型与 Xu-White 模型结果对比 Fig. 5 Comparison of Xu-White mode and multi-mineral mode for well A at 3 880-3 945 m

计算精度比 Xu-White 砂泥模型提高了一倍, 平均 相对误差在 5%左右, 而 Xu-White 模型相对误差在 11%左右.由图 2~图 4 也可看出, 由 Xu-White 模 型所得结果与实测结果交会图偏离斜率为 1 的对角 线, 而多矿物模型所得结果与实测结果交会图则在 斜率为 1 的对角线附近.

图 5 是 A 井 3 880~3 945 m 井段采用本文多矿 物模型方法与 Xu-White 砂泥模型 计算结果对比. 其中 VP、VS 为实测纵、横时差曲线, M VP 与 MVS 为采用多矿物组分分析得到的纵、横时差曲线, XVP 与 XVS 为采用 Xu-White 单矿物砂泥岩模型 得到的纵、横时差曲线. 从图中看出 MVP 与 VP 完 全重合, M VS 较 XVS 精度提高近 3 倍(表 4).

# 4 结论

实例表明,通过测井资料多矿物组分分析,基于 岩石物理理论计算横波速度是可行和可靠的,为无 横波测井资料的井段提供了反演手段.该方法与 Xu-White 及其他横波速度计算方法相比有以下 优点:

(1) 具有较清晰的物理意义. 该方法根据岩石骨 架矿物和流体组分计算弹性模量,求得地层的等效 弹性模量后,再计算横波速度,各步骤具有明确的物 理意义.( 2) 经济简便. 利用 Xu-White 模型计算纵 横波速时,需要混合矿物岩石骨架时差(或波速)参 数,要准确获取该参数,必需利用研究区岩样进行实 验测定;而本文多矿物模型不必需混合矿物岩石骨 架波速及孔隙形状参数, 因此可不依赖岩心实验资 料, 可减少繁重的实验测定和统计分析工作, 节省试 验费用和时间.(3)稳定性好.由于利用纵波速度作 为约束条件,因此应用表明(在煤层段 Xu-White 模 型表现为异常,多矿物组分模型所得波速基本合理) 只要地层组分求解基本合理,利用表 2 中的常数就 可较准确地求出横波速度.(4)精确度高.实际资料 处理结果表明,将本文多矿物模型简化为单矿物砂 泥模型时,横波估算精度与 Xu-White 模型基本相 同:直接采用多矿物模型时横波计算结果平均相对 误差限在 5% 左右, 较 Xu-White 模型精度提高近 一倍.

需要指出的是, Biot 频散方程(Biot, 1956a; Berryman, 1980a, 1980b) 及基于喷射流模型的研究 (Dvorkin *et al.*, 1995)表明饱含流体孔隙介质波速 会随频率的升高而增大.Gassmann 方程描述的是 低频情况下波速与弹性参数之间的关系,对低于 100 Hz 的地震波是适用的.对于相同介质,用 Gassmann 方程所得计算值较主频在 20 kHz 左右的实 测值一般偏小.由于本文利用测井纵波速度求解 Biot-Gassmann 方程中的β系数,进而计算横波速度, 因此在一定程度上减小了频散影响,实际上高频散 射效应也会抵消一部分频散现象(Winkler, 1983), 从而改善了 Gassmann 方程在高频条件下的适用局 限性.虽然理论上采用 Boit 纵横波速频散方程更为 合理,但频率因素与孔隙大小、流体性质和骨架矿物 组分等因素相比对波速影响小得多,因此本文方法 仍不失为一种较好的工程方法.另外尚未对缝洞较 为发育的灰岩地层进行处理比较,对该类地层的适 用性有待考查.

感谢中石化胜利油田有限公司的支持,感谢楚 泽涵教授对本文的指正.

#### References

- Berryman, J. G., 1980a. Long-wavelength propagation in composite elastic media. J. Acoust. Soc. Am., 68(6): 1809–1831.
- Berryman, J. G., 1980b. Confirmation of Biot's theory. *Appl. PhysLett.*, 37(4): 382-384.
- Biot, M. A., 1956a. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I : Low-frequency range. *Acoust. Soc. Amer.*, 28: 168-178.
- Biot, M. A., 1956b. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, II: High-frequency range. Acoust. Soc. Amer., 28: 179-191.
- Biot, M. A., 1962. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media J. Appl. Phys., 33(4): 1482-1498.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., Eastwood, R. L., et al., 1985. Relationship between compressional-wave and shearwave velocities in clastic silicate rock. *Geophysics*, 50, 571-581.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., Kan, T. K., et al., 1993. Rock physics: The link between rock properties and AVO response. In: Castagna, J. P., Backus, M. M., eds., Offset dependent reflectivity-theory and practice of AVO analysis. SEG Investigations in Geophysics Series, 8: 135-171.
- Chen, Y., Huang, T. F., 2001. Rock physics. Peking University Press, Beijing (in Chinese).Chu, Z. H., 1987. Theory of acoustic logging. Petroleum In-

dustry Press, Beijing (in Chinese).

- Dvorkin, J., Mavko, G., Nur, A., et al., 1995. Squirt flow in fully saturated rocks. *Geophysics*, 60(1): 97-107.
- Faust, L. Y., 1953. A velocity function including lithologic variation. *Geophysics*, 18(2): 271-288.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., Gregory, A. R., et al., 1974. Formation velocity and density: The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39 (6): 770-780.
- Gassmann, F., 1951. Über die elastizität poröser Medien. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 96: 1–23.
- Hill, R., 1952. The elastic behavior of crystalling aggregate. Proc. Physical Soc., A65: 349-354.
- Krief, M., Garat, J., Stellingwerff, J., et al., 1990. A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-wave form sonic). *The Log Analyst*, 31(6): 355-369.
- Kuster, G. T., Toksöz, M. N., 1974. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media, part I: Theoretical formulations. *Geophysics*, 39(5): 587–606.
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., et al., 2003. The rock physics handbook. Cambridge University Press, Cambridge.
- Milholland, P., Manghnani, M. H., Schlanger, S. O., et al., 1980. Geoacoustic modeling of deep sea carbonate sediments. J. Acoust. Soc. Am., 68(5): 1351-1360.
- Pickett, G. R., 1963. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. J. Petrol. Tech., 15(6): 659-667.
- Reuss, A., 1929. Berechnung der Fliegrenze Von Misch Kri-

stallen. Angew. Mathem. U. Mech., 9(1): 49-58.

- Voight, W., 1910. Lehrbuch der Kristallphysik, Teunber-Verlag, Leipzig.
- Wang, Y. M., Miao, Y. K., Meng, X. J., et al., 2006. Calculation procedure of shear velocity curve on petrophysics. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 13 (4): 58-61 (in Chinese).
- Winkler, K. W., 1983. Frequency dependent ultrasonic properties of high porosity sandstone. *Journal of Geophysi*cal Research, 88(B11): 9493-9499.
- Xie, J. Z., Chu, Z. H., Li, Y. H., et al., 2003. On the method to determine residual oil saturation from acoustic compression coefficient. *Well Logging Technology*, 27(3): 181-184 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S., White, R. E., 1995. A new velocity model for claysand mixtures. *Geophys. Prospecting*, 43(1):91-118.
- Yong, S. H., Zhang, C. M., 1996. Digital processing and interpretation of well-logging. China University of Petroleum Press, Dongying, 313-316 (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 陈颙,黄庭芳,2001.岩石物理学.北京:北京大学出版社.
- 楚泽涵, 1987. 声波测井原理. 北京: 石油工业出版社.
- 王玉梅, 苗永康, 孟宪军, 等, 2006. 岩石物理横波速度曲线 计 算技术. 油气地质与采收率, 13(4):58-61.
- 谢进庄, 楚泽涵, 李艳华, 等, 2003. 用声波弹性参数确定剩余 油饱和度的方法探讨. 测井技术, 27(3): 181-184.
- 雍世和,张超谟,1996.测井数据处理与综合解释.东营:中国 石油大学出版社,313-316.