

基于修正 Xu-White 模型的碳酸盐岩横波速度估算方法

张广智*^① 李呈呈^② 印兴耀^① 张金强^③

(^①中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266555; ^②中国石化石油物探技术研究院,江苏南京 210014; ^③中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

张广智,李呈呈,印兴耀,张金强. 基于修正 Xu-White 模型的碳酸盐岩横波速度估算方法. 石油地球物理勘探, 2012, 47(5): 717~722

摘要 在许多实际地球物理资料中往往缺失横波速度信息,这给叠前地震属性分析和叠前地震反演均带来不利影响。如今针对碎屑岩地区的横波速度预测方法已日趋成熟,而针对碳酸盐岩地区的研究相对较少。本文基于经典 Xu-White 模型,从岩石物理角度构建出一种适用于碳酸盐岩的修正 Xu-White 模型;然后类比于 Pickett、Castagna 等建立的碳酸盐岩纵横波速度经验公式,建立了更适用于碳酸盐岩地区的经验公式;将该经验公式和修正 Xu-White 模型应用于实际碳酸盐岩地区的横波速度预测,对预测结果进行的对比分析证实,修正 Xu-White 模型具有更高的横波速度预测精度。

关键词 横波速度预测 碳酸盐岩 修正的 Xu-White 模型 经验公式 岩石物理 测井资料

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

从全球范围看,碳酸盐岩蕴藏量约占沉积岩蕴藏量的二成,却含有五成以上的油气探明储量,因此它是十分重要的油气勘探领域。然而,碳酸盐岩分布区地表及地下地质条件复杂,油气藏埋藏较深,大部分地区的地震资料信噪比较低,导致碳酸盐岩的储层预测与流体识别的难度加大,制约了油气勘探的进程。

在应用 AVA、AVO 属性分析和叠前地震反演进行储层预测及流体识别时需预知准确的纵横波速度数据,而实际应用中往往缺乏横波速度信息^[1]。为此,有很多人一直致力于探讨岩石速度的估算方法。如 Kuster 等^[2]基于长波一阶散射理论推导出纵波和横波表达式;Xu 等^[3]结合 Kuster 公式^[2]、微分等效介质理论(DEM)和 Gassmann 方程^[4],建立了含泥砂岩的理论模型;为了探究纵横波速度间的

关系,Han 等^[5]和 Castagna 等^[6]给出了砂泥岩纵横波速度间的经验公式。但上述理论模型和经验公式均是针对碎屑岩地层提出的,对碳酸盐岩储层预测并不适用。因为碳酸盐岩的孔隙系统远比碎屑岩的复杂,碎屑岩中的孔隙主要属粒间孔隙类型,而碳酸盐岩却包含多种类型孔隙,如印模孔隙、孔洞、粒间孔隙和粒内孔隙,且岩石组分也存在差异。

为了获得碳酸盐岩横波信息,人们常用 Pickett^[7]、Milholland 等^[8]和 Castagna 等^[6]经大量岩石物理实验得出的纵横波速度间的经验公式。这些公式仅是通过统计分析实验室数据得到,其准确性和可靠性有待探究和验证。

本文参考 Pickett、Castagna 等的碳酸盐岩纵横波速度经验公式和经典 Xu-White 模型,构建了适用于碳酸盐岩的纵横波速度经验公式和修正 Xu-White 模型,将其应用于实际工区的横波速度估算,并对其预测效果进行对比分析,证明修正 Xu-White 模型具有较高的预测精度。

* 山东省青岛市中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,266555. Email:zhanggz@upc.edu.cn

本文于2010年12月31日收到,最终修改稿于2012年5月28日收到。

本研究受国家油气重大专项(2011ZX05014-001-010HZ)、中国石油科技创新基金(2011D-5006-0301)和中央高校基本科研业务费专项资金(11CX05006A)联合资助。

2 修正 Xu-White 模型的构建

参考经典 Xu-White 模型^[3]的含泥砂岩等效模型的建立方式,我们建立了碳酸盐岩的岩石等效模

型。首先将经典 Xu-White 模型的矿物成分——石英和黏土矿物替换为方解石和白云石;然后将经典 Xu-White 模型的孔隙——砂岩和泥岩孔隙替换为粒间孔隙(p)、溶洞(s)和裂缝(m);孔隙流体不变,同样为油、气和水,如图 1 所示。

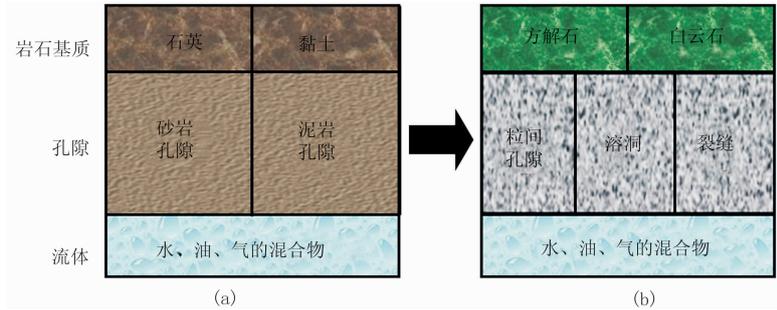


图 1 经典 Xu-White 模型(a)和修正 Xu-White 模型(b)的示意图

应用修正 Xu-White 模型求取相应弹性参数的步骤如下:

(1) 利用 Voigt-Reuss-Hill 平均^[9]计算混合矿物的弹性模量

$$\begin{cases} K_m = \frac{K_V + K_R}{2} \\ U_m = \frac{U_V + U_R}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} K_V &= V_{cal} K_{cal} + V_{dol} K_{dol} \\ \frac{1}{K_R} &= \frac{V_{cal}}{K_{cal}} + \frac{V_{dol}}{K_{dol}} \\ U_V &= V_{cal} U_{cal} + V_{dol} U_{dol} \\ \frac{1}{U_R} &= \frac{V_{cal}}{U_{cal}} + \frac{V_{dol}}{U_{dol}} \\ \rho_m &= V_{cal} \rho_{cal} + V_{dol} \rho_{dol} \end{aligned}$$

式中: K_m 和 U_m 分别为混合矿物的体积模量和剪切模量; K_{cal} 和 K_{dol} 分别为方解石和白云石的体积模量; U_{cal} 和 U_{dol} 分别为方解石和白云石的剪切模量; V_{cal} 和 V_{dol} 分别为基质体积百分比归一化后的方解石和白云石的含量; K_V 和 U_V 分别为利用 Voigt 平均求取的体积模量和剪切模量; K_R 和 U_R 分别为利用 Reuss 平均求取的体积模量和剪切模量; ρ_m 、 ρ_{cal} 和 ρ_{dol} 分别为混合矿物、方解石和白云石的密度。

(2) 利用 Kuster 理论和微分等效介质模型 (DEM), 将所有的孔隙加进系统以便计算干燥岩石骨架的体积模量和剪切模量

$$\begin{cases} K_d = K_m (1 - \phi)^p \\ \mu_d = \mu_m (1 - \phi)^q \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{3} \sum_{l=p,s,m} v_l T_{ijj}(\alpha_l) \\ q &= \frac{1}{5} \sum_{l=p,s,m} v_l F(\alpha_l) \\ F(\alpha) &= T_{ijj}(\alpha) - \frac{T_{ijj}(\alpha)}{3} \end{aligned}$$

式中: K_d 和 μ_d 分别是孔隙度为 ϕ 时的干岩骨架体积模量和剪切模量; K_m 和 μ_m 分别是岩石基质的体积模量和剪切模量; v_p 、 v_s 和 v_m 分别是粒间孔隙、溶洞和裂缝的体积分量; α_p 、 α_s 和 α_m 分别是粒间孔隙、溶洞和裂缝的纵横比; p 和 q 为假设岩石骨架泊松比是常数时, 一组只与纵横比 α 有关、与孔隙度无关的系数; $T_{ijj}(\alpha_l)$ 和 $F(\alpha_l)$ 为孔隙纵横比的函数^[10]。

(3) 利用 Wood^[11] 方程将孔隙流体进行混合, 计算出混合流体的体积模量 K_f

$$\frac{1}{K_f} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} + \frac{S_g}{K_g} \quad (3)$$

式中: K_w 、 K_o 和 K_g 分别是水、油、气的体积模量; S_w 、 S_o 和 S_g 分别是水、油、气的饱和度, 且有 $S_w + S_o + S_g = 1$ 。

混合流体的密度可由

$$\rho_f = S_w \rho_w + S_o \rho_o + S_g \rho_g \quad (4)$$

计算得到。式中 ρ_w 、 ρ_o 和 ρ_g 分别是水、油、气的密度^[12]。

(4) 利用 Patchy 饱和模型^[13,14] (即文献[12]中的斑块饱和模型) 将流体混合物加入到孔隙空间, 这里假设岩石中流体为两相流体 a 和 b 混合, 饱和度

分别为 S_a 和 S_b , 则饱和碳酸盐岩的体积模量、剪切模量和纵横波速度表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \phi \rho_i + (1 - \phi) \rho_m \\ K_i = K_d + \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_m}\right)^2}{\frac{\phi}{K_{fi}} + \frac{1 - \phi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}} \\ M_i = K_i + \frac{4}{3} \mu_i \quad \mu = \mu_i \quad i = a, b \\ M = \left(\frac{S_a}{M_a} + \frac{S_b}{M_b}\right)^{-1} \\ V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: ϕ 为岩石总孔隙度; ρ_m 、 ρ_i 和 ρ 分别是岩石基质、流体和饱和流体岩石的密度; K_i 、 μ_i 和 M_i 分别是饱和流体 i 时岩石体积模量、剪切模量和纵波模量; K 、 μ 和 M 分别是饱和流体的岩石的体积模量、剪切模量和纵波模量; K_{fi} 为岩石中流体 a 或 b 的体积模量; V_P 、 V_S 分别为饱和流体岩石的纵、横波速度^[15]。

3 横波速度的预测原理

由于实际应用中通常缺乏碳酸盐岩各类孔隙的孔隙度和纵横比数据, 我们可利用 Kumar 等^[16] 提出的估算碳酸盐岩各类孔隙的孔隙度和纵横比的方法求取这两个参数。根据修正 Xu-White 模型, 结合声波时差曲线, 并利用由测井软件 Forward 中的 CRA 程序估算出的方解石及白云石含量曲线, 反演得到孔隙度曲线; 然后利用该孔隙度数据计算纵波速度和横波速度, 再将此纵波速度曲线与实测纵波速度数据进行对比验证^[17]。若反演得到的孔隙度曲线是可靠的, 则可利用 Kumar 等提出的方法^[16] 估算碳酸盐岩各类孔隙(粒间孔隙、溶洞和裂缝)的体积分量和纵横比。其流程包括以下步骤。

(1) 估算纵横比(α) ①对于给定的粒间孔隙, 利用时间平均方程计算纵波速度 V_P ; ②对于给定的溶洞, 利用 Hashin-Shtrikman 上界^[18] 计算纵波速度 V_P ; ③对于给定的裂缝, 利用 Hashin-Shtrikman 下界^[18] 计算纵波速度 V_P ; ④对于给定的孔隙度和初始纵横比(假设粒间孔隙 $\alpha_p \approx 0.1$, 溶洞 $\alpha_s \approx 1$, 裂缝 $\alpha_m \approx 0.01$), 利用微分等效介质理论(DEM)计算岩石的纵波速度 $V_{P,DEM} = (K_m, \mu_m, \alpha, \phi)$, 其中 K_m 和 μ_m 是基质的体积和剪切模量; ⑤若 $(V_{P,DEM}(\alpha) - V_P(\alpha))^2 > \epsilon$, 则 $\alpha = \alpha \pm \delta\alpha$; ⑥若 $(V_{P,DEM}(\alpha) - V_P(\alpha))^2 < \epsilon$, 则接受每一种孔隙的纵横比; ⑦分别得到粒间孔隙纵横比 α_p , 溶洞纵横比 α_s , 裂缝纵横比 α_m 。

(2) 估算各类孔隙的孔隙度 ①对于给定的总孔隙度, 利用时间平均方程估算 $V_{P,Wyllie}$; ②如果测量的纵波速度 $V_P > V_{P,Wyllie}$, 选取 $\alpha_1 = \alpha_p, \alpha_2 = \alpha_s, \phi_1 = \phi, \phi_2 = 0$; ③计算 $V_{P,DEM} = (K_m, \mu_m, \alpha_1, \alpha_2, \phi_1, \phi_2)$; ④若 $(V_{P,DEM} - V_P)^2 > \epsilon$, 则 $\phi_1 = \phi_1 - \delta\phi, \phi_2 = \phi_2 + \delta\phi$; ⑤重复步骤③和④, 直到 $(V_{P,DEM} - V_P)^2 \approx \epsilon$; ⑥获得粒间孔隙体积分量 $\phi_p = \phi_1$, 溶洞体积分量 $\phi_s = \phi_2$; ⑦若测量的纵波速度 $V_P < V_{P,Wyllie}$, 选取 $\alpha_1 = \alpha_p, \alpha_2 = \alpha_m, \phi_1 = \phi, \phi_2 = 0$; ⑧重复步骤③④⑤; ⑨获得粒间孔隙体积分量 $\phi_p = \phi_1$, 裂缝体积分量 $\phi_m = \phi_2$ 。

利用反演所得各类孔隙的体积分量及孔隙纵横比, 结合上述修正 Xu-White 模型, 求取横波速度。

4 实际应用

参考 Castagna 等^[6]、Pickett^[7] 的碳酸盐岩纵横波速度经验公式, 应用修正 Xu-White 模型构建了改进的碳酸盐岩纵横波速度经验公式, 进而用于 M 油田实际数据的横波速度预测, 证实修正 Xu-White 模型的估算精度较高。计算过程中所用的矿物组分参数如表 1 所示。

表 1 计算地层波速所用的矿物组分参数

矿物或流体	体积模量 GPa	剪切模量 GPa	密度 g/cm ³	纵波速度 m/s	横波速度 m/s
方解石	76.8	32	2.71	6640	3440
白云石	94.9	45	2.87	7340	3960
水	2.25	0	1.00	1500	0
油	1.02	0	0.80	1129.2	0
气	0.00013	0	0.00065	4472.1	0

4.1 基于经验公式及修正 Xu-White 模型的横波速度求取

对 M 油田有实测纵波数据的 A 井分别用 Pickett^[7] 的灰岩经验公式 $V_S = V_P/1.9$ 和 Castagna 等^[6] 的灰岩经验公式 $V_S = -0.055V_P^2 + 1.017V_P - 1.031$ 建立了纵横波速度间的线性和非线性经验关系式(图 2 和图 3)。利用上述两拟合关系式对 A 井进行横波速度预测, 预测结果如图 4 和图 5 所示。图 6 是基于修正 Xu-White 模型的预测结果。

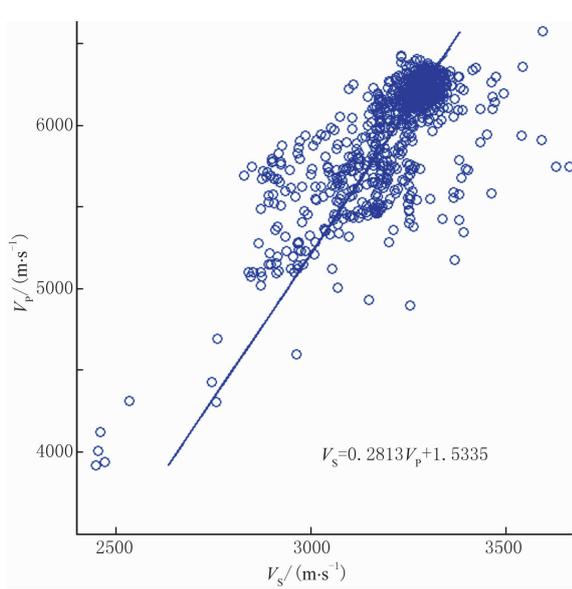


图2 A井的线性拟合

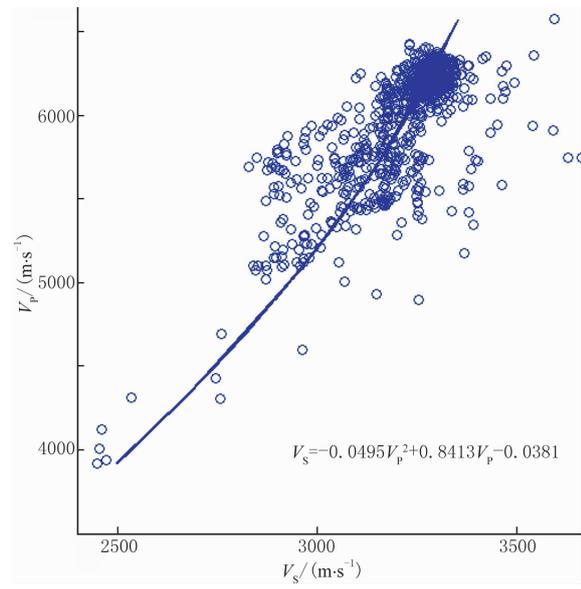


图3 A井的非线性拟合

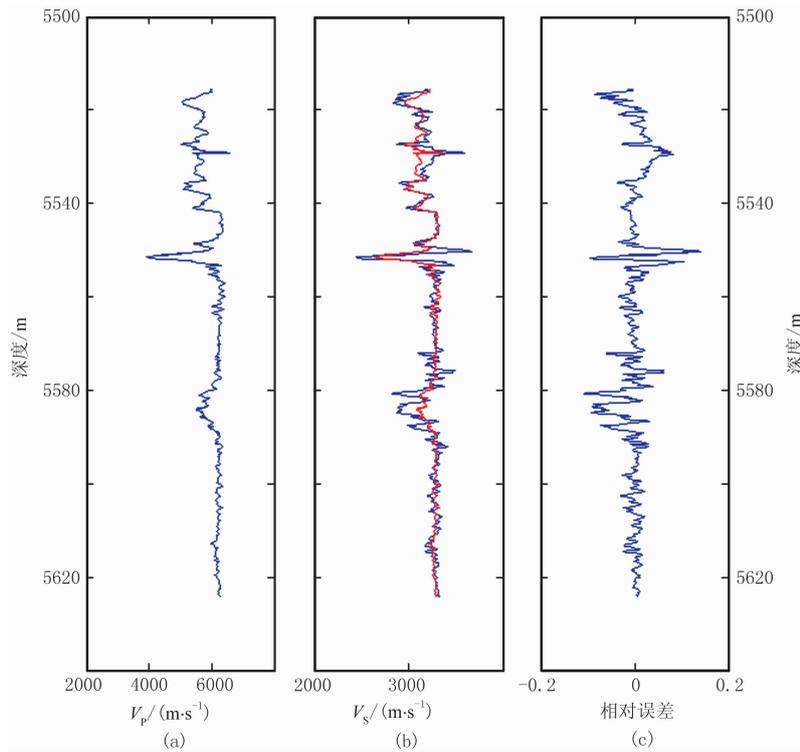


图4 基于线性拟合的横波速度预测结果

(a)实际纵波曲线；(b)实际横波曲线(蓝色)和预测横波曲线(红色)；(c)实际横波数据与预测横波数据的相对误差曲线

4.2 效果分析

对比图4~图6可看出,基于修正 Xu-White 模型的预测误差(图6)较小,充分证实了基于修正 Xu-White 模型的横波速度预测方法的有效性。

在此基础上,利用基于修正 Xu-White 模型预测的纵波和横波速度数据做岩石物理交会图以区分

和评价该井所在地区的储层。从图7中可见:一类储层(红色)和二类储层(浅黄色)的物性较好,为有利储层;三类储层(绿色)和非储层(蓝色)的物性较差,为不利岩层。在该纵横波速度交会图中,可清晰地看到有利储层与不利岩层具有较好的区分,这也从另一角度反映出所预测横波速度的准确性。

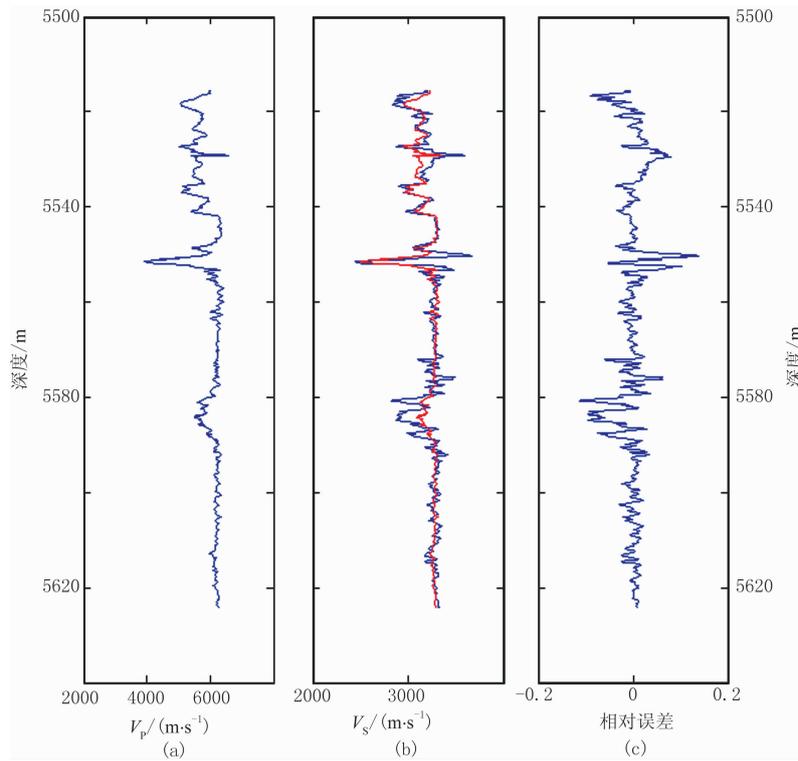


图 5 基于非线性拟合的横波速度预测结果

(a)实际纵波曲线；(b)实际横波曲线(蓝色)和预测横波曲线(红色)；(c)实际横波数据与预测横波数据的相对误差曲线

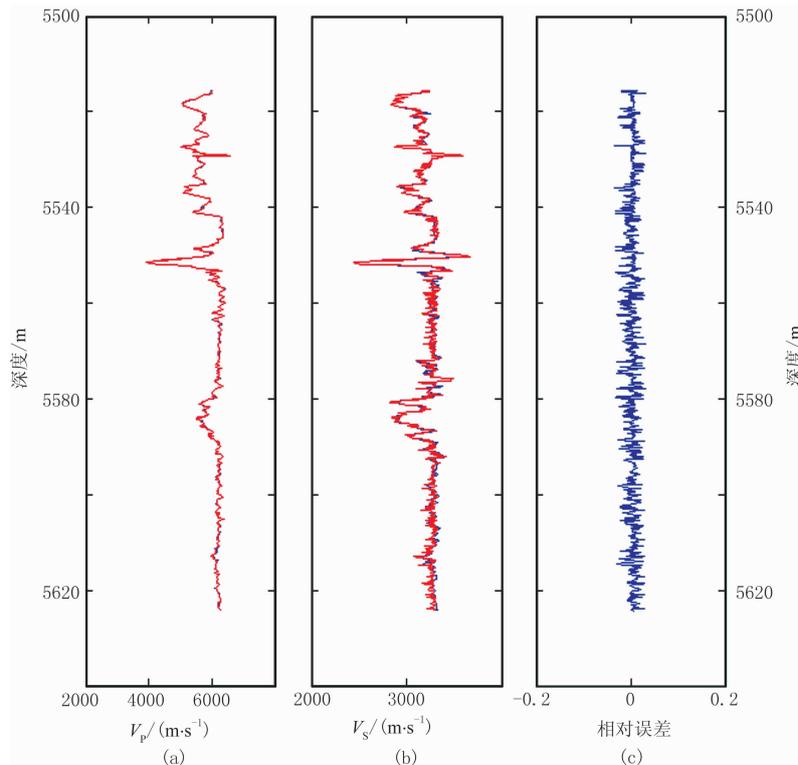


图 6 基于修正 Xu-White 模型的横波速度预测结果

(a)实际纵波曲线(蓝色)和预测纵波曲线(红色)对比图；(b)实际横波曲线(蓝色)和预测横波曲线(红色)对比图；(c)实际横波数据和预测横波数据的相对误差曲线(蓝色)

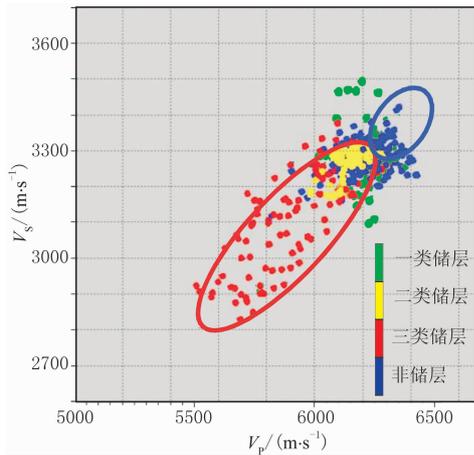


图7 A井的纵波速度和横波速度交会图

5 结束语

实例应用效果表明,本文提出的基于修正 Xu-White 模型的横波估算方法与基于经验公式的估算方法相比,具有更高的预测精度。其原因是经验公式仅是通过统计分析一定量的资料得到的,其准确性和可靠性有待考证;而修正 Xu-White 模型充分考虑了碳酸盐岩的岩石矿物组分和孔隙的构成,将经典 Xu-White 模型的矿物成分——石英和黏土矿物替换为方解石和白云石,且将经典 Xu-White 模型的孔隙——砂体和泥岩孔隙替换为粒间孔隙、溶洞和裂缝。同时,本文提出的基于修正 Xu-White 模型的横波估算方法结合了 Kumar 和 Han 提出的估算碳酸盐岩各类孔隙的孔隙度和纵横比的方法,降低了对碳酸盐岩中各种孔隙的孔隙度及其纵横比输入精度的要求,因而具有很强的实用性。

参考文献

- [1] 孙福利,杨长春,麻三怀等. 横波速度预测方法. 地球物理学进展,2008,23(2):470~474
Sun Fuli, Yang Changchun, Ma Sanhuai et al. An S-wave velocity predicted method. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(2): 470~474
- [2] Kuster G T, Toksöz M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media. *Geophysics*, 1974, 39(5): 587~618
- [3] Xu S, White R E. A new velocity model for clay-sand

mixtures. *Geophysical Prospecting*, 1995, 43(1): 91~118

- [4] Gassmann F. Über die elastizität poroser medien. *Vierteljahrsschrift der Naturforschende Gesellschaft*, 1951, 96: 1~23
- [5] Han D H. *Effects of Porosity and Clay Content on Acoustic Properties of Sandstones and Unconsolidated Sediments*[D]. Stanford University, 1986
- [6] Castagna J P, Batzle M L, Kan T K. Rock physics—The link between rock, properties and AVO response. // Castagna J P, Backus M. *Offset-Dependent Reflectivity—Theory and Practice of AVO Analysis*. Tulsa, Oklahoma: Investigations in Geophysics, No. 8, Society of Exploration Geophysicists, 1993, 135~171
- [7] Pickett G R. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Pet Technol*, 1963, 15(6): 650~667
- [8] Milholland P, Manghnani M H, Schlanger S O et al. Geoacoustic modeling of deep-sea carbonate sediments. *Acoust Soc Am*, 1980, 68: 1351~1360
- [9] Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials. *J Mech Phys Solids*, 13(4): 213~222
- [10] Keys R G, Xu S Y. An approximation for the Xu-White velocity model. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1406~1414
- [11] Wood A W. *A Textbook of Sound*. New York: The MacMillan Co, 1995, 360
- [12] 韩文功, 印兴耀, 王兴谋等. 地震技术新进展(上). 山东东营: 中国石油大学出版社, 2005
- [13] Gary M, Tapan M, Jack D. *Rock Physics Handbook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, 184~185, 219~224
- [14] Thierry C, Gary M, Bernard Z. Fluid distribution effect on sonic attenuation in partially saturated limestones. *Geophysics*, 1998, 63(1): 154~160
- [15] 周水生, 张波, 伍向阳. 流体替换方法研究及应用分析. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1660~1664
Zhou Shuisheng, Zhang Bo, Wu Xiangyang. Research on fluid substitution method and its application. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(5): 1660~1664
- [16] Kumar M, Han Dehua. Pore shape effect on elastic properties of carbonate rocks. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005, 24: 1477~1480
- [17] Xu Shiyu, Michael A Payne. Modeling elastic properties in carbonate rocks. *The Leading Edge*, 2009, 28(1): 66~74
- [18] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to theory of elastic behavior of multiphase materials. *J Mech Phys Solids*, 11(2): 127~140

(本文编辑:朱汉东)