Vol. 30 No. 3 Sept., 2008

# 基于等效 Thomsen 参数的 P-SV 波 AVO 属性研究

刘前坤<sup>1,2</sup>,韩立国<sup>1</sup>,廉玉广<sup>1</sup>,王恩利<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

2. 中石油勘探研究院西北分院,甘肃 兰州 730020)

摘 要:在等效 Thomsen 各向异性参数的 P-SV 波反射系数近似公式基础上研究了反射系数的多种 AVO(振幅随炮检距变化)属性特征,针对不同的属性特征构建了多属性 AVO 交绘图;并利用反射 系数公式对三类含气砂岩 AVO 的特征进行分析。结果表明 P-SV 波反射系数公式可以有效的区分 第三类含气砂岩;岩石的孔隙度、流体饱和度等信息是影响地震波 AVO 的重要因素。利用 Gassmann 方程进行了对上层为 HTI 介质,下层为孔隙储层的介质模型进行了流体替换计算,分析了孔 隙度、含气饱和度和各向异性参数变化对地层 AVO 的影响。

关键词:HTI介质; P-SV波;反射系数;交绘图; Gassmann 方程

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 0844 (2008) 03 - 0214 - 07

# AVO Attributes Analysis of P-SV Wave Based on the Thomsen Anisotropic Parameters

LIU Qian-kun<sup>1,2</sup>, HAN Li-guo<sup>1</sup>, LIAN Yun-guang<sup>1</sup>, WANG En-li<sup>1,2</sup>

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest (NWGI), PetroChina, Lanzhou 730020, China)

Abstract:Based on the new approximation reflection coefficient in HTI media, the attributes of AVO and the characteristics of AVO background trends crossplotting are described by the Thomsen anisotropic parameters. The effect of new reflection coefficient to three kind of gas sand AVO model is discussed, and it is visible tools to identify the AVO III gas sand. Futermore, the effects of porosity, saturation and Thomsen anisotropic parameters to P-SV wave reflection coefficients in HTL/Isotropic pore reservoir model are studied.

Key words: HTI media; P-SV wave; Reflection coefficient; Crossplotting; Gassmann formula

0 前言

随着 AVO(振幅随炮检距变化)技术的不断发展以及三维三分量地震勘探技术的广泛应用<sup>[13]</sup>,多 波 AVO 的研究已经成为油气勘探和开发的重要技术手段。早期对 AVO 的研究主要是基于各向同性 介质的 Zeoppritz 方程的各种近似公式的研究。但 是在实际的勘探中,更多的时候地下介质是各向异性的,如果忽略各向异性条件,使用 AVO 技术进行 处理解释时振幅随入射角的变化特征可能会产生很 大的误差,甚至会给实际应用带来错误的结果。因

此研究各向异性条件下的振幅随偏移变化特征对于 更好的利用 AVO 技术寻找油气是非常必要的。

20世纪90年代开始国外学者开始研究在弱各向异性条件下的 AVO 反射系数公式。Ruger<sup>[4]</sup>和 Vavrycuk<sup>[5]</sup>分别对弱各向异性条件下的 VTI 和 HTI 介质中的 PP 波反射系数进行了理论研究。随后 Cherepanov 和 Nefedkina<sup>[6]</sup>利用扰动理论推导出了 弱各向异性条件下 HTI 介质中 P-SV 波反射系数近 似公式,但是无法直接用于 AVO 分析和岩性参数反

基金项目:国家 973 项目(No. 2007CB209603);863 计划项目(No. 2006 AA06Z108)

作者简介:刘前坤(1979-),男(汉族),黑龙江讷河人,在读博士,主要从事各向异性介质中转换波 AVO 方法研究.

收稿日期:2008-06-18

第3期

215

演。针对这个问题,刘前坤和韩立国等<sup>[4]</sup>引入了常用的等效 Thomsen 各向异性参数,推导出能够直接用于 AVO 分析的 P-SV 反射系数公式。

本文在此基础上详细分析了在 HTI 介质中 P-SV 反射系数公式在不同表达式的情况下的 AVO 属 性,并针对这些不同属性之间的特征构建了多属性 AVO 交绘图。首次提出上层为 HTI 介质、下层为孔 隙储层的模型,利用 Gassmann 流体替换理论研究了 孔隙度、含气饱和度和各向异性参数同时影响下的 含气储层反射系数的变化情况,比较了这三种因素 共同作用下反射系数变化的情况。这些模型的研究 对转换波在实际地震勘探中的应用具有十分重要的 意义。

# 1 基于 Thomsen 各向异性参数的 P-SV 波反射系数公式

刘前坤等<sup>[7]</sup>利用广义矩阵替换的方法得到 HTI介质(图1)中基于 Thomsen 各向异性参数的 P-SV 波反射系数方程为<sup>[6]</sup>



图 1 HTI 介质模型 Fig. 1 Model of HTI.

 $R_{\rm PS}(\theta,\phi) = R_{\rm PS}^{\rm iso}(\theta) + R_{\rm PS}^{\rm ans}(\theta,\phi) \qquad (1)$ 

其中: 
$$R_{PS}^{iso}(\theta) = A_{iso}\sin\theta + B_{iso}\sin^3\theta$$
 (2)

$$R_{PS}^{ans}(\theta,\phi) = A_{ans}\sin\theta + B_{ans}\sin^3\theta \qquad (3)$$

$$A_{\rm iso} = -\left(\frac{1}{2}\frac{\Delta\rho}{\rho} + k\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} + 2\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)\right) \tag{4}$$

$$B_{\rm iso} = -\frac{1}{2}k^2 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} - \left(1 + \frac{1}{k}\right)\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} + 2\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)\right) (5)$$

$$A_{\rm uns} = \left(-2k\gamma^{(V)} + \frac{1}{2(k+1)}\delta^{(V)}\right)\cos^2\phi \quad (6)$$

$$B_{ans} = \left( \left( \frac{1}{4} \frac{(6+k)}{(k+1)} - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + k(2k-1) \gamma^{(V)} - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + k(2k-1) \gamma^{(V)} - \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} + \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} k - \frac{1}{2} k \right) \delta^{(V)} +$$

$$\frac{1}{k+1}\varepsilon^{(\nu)}\bigg)\cos^2\phi + \bigg(-\frac{1}{2(k+1)}\delta^{(\nu)} + \frac{1}{4(k+1)}\varepsilon^{(\nu)}\bigg)\sin^2 2\phi$$
(7)

*R*  $\frac{19}{PS}(\theta)$  是各向同性介质中的反射系数; *R*  $\frac{19}{PS}(\theta, \phi)$  表示各向异性介质中的反射系数; $\rho_1, \rho_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  分别为上下层介质的密度,纵波速度和 横波速度; $\theta$  为人射角; $\phi$  为方位角。各向异性系数  $\varepsilon^{(v)}$  表示纵波的各向异性程度; $\delta^{(v)}$  表示纵波在横向 和垂向之间各向异性变化的快慢程度; $\gamma^{(v)}$  表示快、 慢横波速度的差异程度。上标 *V* 表示等同于 VTI 介 质的 Thomsen 各向异性参数。公式(1)一方面说明 了反射系数随着入射角的改变情况,另一方面,说明 了在各向异性因素的影响下反射系数也是随着方位 角的变化的。

# 2 P-SV 波反射系数 AVO 属性分析

研究弱各向异性条件下 HTI 介质中 P-SV 波反 射系数的 AVO 属性有助于减少我们在进行 AVO 解 释时的误差。而通过研究 AVO 属性交绘图有利于 对 AVO 进行解释。

对公式(1)进行整理得到  $R(\theta,\phi) = A_1 \sin \theta + B_1 \sin^3 \theta + C_1 \cos^2 \phi \sin \theta + D_1 \cos^2 \phi \sin^3 \theta + E_1 \sin^2 2 \phi \sin^3 \theta$  (8)

其中

$$\begin{cases} A_{1} = -\left(\frac{1}{2} + k\right)\frac{\Delta\rho}{\rho} - 2k\frac{\Delta\beta}{\beta} \\ B_{1} = \frac{1}{2}k\frac{\Delta\rho}{\rho} + (k^{2} + k)\frac{\Delta\beta}{\beta} \\ C_{1} = \frac{1}{2(k+1)}\delta^{(\nu)} - 2k\gamma^{(\nu)} \\ D_{1} = \left(\frac{1}{4}\frac{(6+k)}{(k+1)} - \frac{1}{2}k\right)\delta^{(\nu)} + k(2k-1)\gamma^{(\nu)} - \frac{1}{k+1}\varepsilon^{(\nu)} \\ E_{1} = -\frac{1}{2(k+1)}\delta^{(\nu)} + \frac{1}{4(k+1)}\varepsilon^{(\nu)} \end{cases}$$
(9)

根据公式(9)给出的各种岩性参数之间的关 系,如果我们已知式(9)中给出的各种 AVO 属性, 便可以构建如下地震属性剖面: 密度剖面

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{2(k+1)}{2k^2+k+1}A_1 - \frac{4k}{k(2k^2+k+1)}B_1$$
(10)

第30卷

横波速度剖面

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{1}{2k^2 + k + 1}A_1 + \frac{2k + 1}{k(2k^2 + k + 1)}B_1 (11)$$

剪切模量剖面

$$G = \frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \frac{\Delta \beta}{\beta} = -\frac{2k}{2k^2 + k + 1} A_1 + \frac{2}{k(2k^2 + k + 1)} B_1 \quad (12)$$

横波阻抗剖面

$$R_{so} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta \beta}{\beta} \right) = -\frac{1}{2} \left( \frac{2k+1}{2k^2+k+1} A_1 + \frac{2k-1}{k(2k^2+k+1)} B_1 \right)$$
(13)

根据 Antonio 和 John<sup>[8]</sup>给出的气砂岩,含水砂 岩和页岩三种典型岩性实际测量得到的含气砂岩纵 横波速度和密度数据,建立不同的地震属性剖面如 图1所示。尽管不同 AVO 属性组合体现了地层岩 性参数变化的某一方面,但事实上地层的含油气性 的体现是多种参数共同作用的结果,多属性地震剖 面图有助于更准确的确定含油气储层。如图 2(a)、 (c)、(d)(图版 I)所示,横波速度剖面、剪切模量 剖面和横波阻抗剖面的交绘图分布都比较集中,其 中含气砂岩的斜率最小,含水砂岩的斜率略大于含 气砂岩的斜率,页岩的斜率最大。从图 2(b)(图版 I)密度剖面可以看到,对于具有不同横纵波速比 的含气砂岩、含水砂岩和页岩的密度模量相对变化 在交绘图上有明显的特征,而且比较分散,这说明了 储层的含油气性对密度模量的变化非常敏感。

如果对式(9)中的 AVO 属性进行线性组合就 可以得到不同形式的 AVO 交绘图。其中对于属性 *A*<sub>1</sub>和 *B*<sub>1</sub>,则有

$$A_{1} = -\frac{2k+1}{k}B_{1} + (2k^{2}+k+1)\frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (14)$$

当横纵波速度比一定时, A<sub>1</sub>—B<sub>1</sub> 交绘图的斜率 为(2k + 1)/k 的平行直线族。利用 Antonio 和 John<sup>[8]</sup>给出的25个实际测量得到的含气砂岩纵横 波速度和密度数据, 绘制了 k 取不同值时的 A—B 背景趋势 AVO 交绘图。从图3中可以看出, 横纵波 速比的变化直接决定着该 AVO 背景趋势的斜率的 变化, 横纵波速比越大, 该直线的斜率越小, 反之则 越大; 而直线的截距同时受到横纵波速比和横波速 度差的影响, 在横纵波速比一定时, 横波速度差越 大, 截距越大。

由方程(9)的后三项,当横纵波速度比确定时,

是关于 Thomsen 三个各向异性参数的三元三次方程 组,所以可以很容易的求得三个各向异性参数的表 达式。假定 *k* = 0.5 时,就可以得到各向异性参数的 表达式为

$$\begin{cases} \delta^{(V)} = 6(D_1 + 2E_1) \\ \varepsilon^{(V)} = 6(2D_1 + 5E_1) \\ \gamma^{(V)} = (2D_1 + 4E_1 - C_1) \\ \frac{\delta^{(V)}}{6(D_1 + 2E_1)} = \frac{\varepsilon^{(V)}}{6(2D_1 + 5E_1)} = \frac{\gamma^{(V)}}{(2D_1 + 4E_1 - C_1)} \end{cases}$$
(15)

公式(14)表明,在已知 AVO 属性参数 *D*、*E*、*F*,横纵 波比一定的情况下,各向异性参数之间的关系是可 以定量分析的。这将有助于对地层受到各向异性的 影响程度进行判断,可以减少 AVO 解释时的误差。



#### Fig. 3 Backgroud trends of $A_1 - B_1$ vary with k.

## 3 P-SV 波反射系数对烃类的识别

Rutherford 等根据波阻抗差值将含气砂岩分为 3 类:第1 类是正波阻抗差含气砂岩;第2 类是近零 波阻抗差含气砂岩;第3 类是负波阻抗差含气砂岩。 目前用 P 波 AVO 曲线识别上覆层为 TI 解释的第1 类、第2 类含气砂岩准确率很高,但是很难区分第3 类含气砂岩与含水砂岩。下面用一组页岩一含气砂 岩、页岩一含水砂岩模型<sup>[9]</sup>来说明 P-SV 波对 3 类 含气砂岩的 AVO 响应(表1)。

图 4 是 3 类 AVO 页岩一含水饱和砂岩、页岩一 含气饱和砂岩模型的 P-SV 波反射系数曲线。图中 P-SV 波反射系数对 3 类 AVO 模型响应有明显的差

维普资讯 http://www.cqvip.com

异:对第1类 AVO 异常,含气砂岩层和含水砂岩响 应的振幅随炮检距的变化十分接近,近乎无法分辨; 第2类 AVO 异常的含气砂岩和含水砂岩反射振幅 随炮检距的变化在入射角为 20°以内的很接近,在 入射角大于 20°时,这种差异缓慢变大;第3类 AVO 异常的含气砂岩和含水砂岩反射振幅随炮检距的变 化的差异随着入射角的增大迅速增大,变化十分明 显。由此可知,利用 HTI 介质中的 P-SV 波反射系 数可以十分有效的区分第3类 AVO 含气砂岩。

	岩性	$V_{\rm P}/[{\rm m}\cdot{\rm s}^{-1}]$	$V_{\rm S}/[{\rm m\cdot s^{-1}}]$	$\rho/[g \cdot cm^{-3}]$	$\varepsilon^{(V)}$	$\gamma^{(V)}$	$\delta^{(V)}$
第3类AVO,1 200 m 深	页岩	2 157	805	2.16			
	水饱和砂岩	2 100	846	2.11	~0.1	-0.2	-0.1
	气饱和砂岩	1 518	887	1.88	-0.1	-0.2	-0.1
第2类AVO,2700 m 深	页岩	2 601	1 148	2.29			
	水饱和砂岩	3 000	1 570	2.23	-0.1	-0.2	-0.1
	气饱和砂岩	2 738	1 639	2.08	-0.1	-0.2	-0.1
第1类AVO,4 200 m 深	页岩	3 045	1 491	2.40			
	水饱和砂岩	4 050	2 425	2.32	-0.1	-0.2	-0.1
	气饱和砂岩	3 986	2 486	2.21	-0.1	-0.2	-0.1

表1 三类 AVO 模型的岩石特性





Fig. 4 P-SV wave reflection coefficients to three kind of AVO model of shale-gas sand and shale-water sand.

#### 各向异性参数、饱和度、孔隙率对 P-4 SV 波 AVO 响应的影响

正演模型研究是应用 AVO 方法进行烃类检测 的基础。先前我们所做的研究主要是在考虑上覆盖 层为 VTI(横向各向异性)介质时的流体替换理论及 其 AVO 响应特征,在这种情况下各向异性参数的影 响相对饱和度、孔隙度对 AVO 响应的影响可以忽 略。但是在实际的工作中岩石的组合是复杂多变 的,当上层介质为裂隙介质,下层为多孔隙各向同性 介质的情况也十分普遍,此时的 AVO 响应特征同时 受到各向异性参数、饱和度、孔隙度三种因素的影 响。有效的认识这种岩层组合时储层的含油气变化 情况,会更有利于知道实际地震道集的 AVO 反演结 果进行含油气性预测。

流体替换是地震属性研究的重要部分,能够模 拟和定量分析孔隙流体对含流体岩石弹性参数的影 响,而介质的孔隙度、含气饱和度等是影响地震波振 幅随炮检距变化的重要因素,因此可以利用它进行 AVO 异常研究。其中 Gassmann 方程是研究流体替 换最常用的理论基础。

Gassmann 方程通过已知的岩石基质、骨架和孔 隙流体的体积模量来计算流体饱和的多孔介质的弹 性模量,其理论关系可表示为

$$K = K_{\rm d} + \frac{(1 - K_{\rm d}/K_{\rm m})^2}{\frac{\varphi}{K_{\rm f}} + \frac{(1 - \varphi)}{K_{\rm m}} - \frac{K_{\rm d}}{K_{\rm m}^2}}$$
(17)

其中:

$$\mu = \mu_{\rm d} \tag{18}$$

$$\rho = \rho_{\rm d} + \varphi \rho_{\rm f} \tag{19}$$

$$\rho_{\rm f} = S_{\rm W} \rho_{\rm W} + S_{\rm o} \rho_{\rm o} + S_{\rm g} \rho_{\rm g} \qquad (20)$$

$$\rho_{\rm d} = (1 - \varphi)\rho_{\rm m} \qquad (21)$$

$$\frac{1}{K_{\rm f}} = \frac{S_{\rm W}}{K_{\rm W}} + \frac{S_{\rm o}}{K_{\rm o}} + \frac{S_{\rm g}}{K_{\rm g}}$$
(22)

$$V_{\rm P} = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}} \tag{23}$$

$$V_{\rm s} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{24}$$

式中:K是体积模量;K,是岩石孔隙流体的体积模 量; $K_{a}$ 是骨架体积模量; $K_{m}$ 是基质(颗粒)体积模 量; $\mu$  和 $\mu_a$ 分别是岩石和岩石骨架的剪切模量; $\rho$  和  $\rho_{\rm d}$ 分别是岩石和岩石骨架的密度, $\rho_{\rm m}$ 是基质(颗粒) 密度, $\rho_f$ 是孔隙流体的密度; $\varphi$ 是孔隙度; $S_w, S_o, S_e$ 

218

第 30 卷

分别是水	、油和气	的饱和度	Ēo			
	表 2	上层 HT	「介质模型	参数		
$V_{\rm P} / [{\rm m \cdot s}]$	$^{-1}$ ] $V_{\rm S}$ [m	$\cdot s^{-1}$ ] $\rho/[$	g • cm <sup>3</sup> ]	$\varepsilon^{(V)}$	$\gamma^{(V)}$	$\delta^{(V)}$
4 000	2 (	000	2.21	-0.1	-0.2	0.1
	表	3 下层储	皆层介质参	数		
	介质参数	$\rho / [g \cdot cm^{-2}]$	<sup>3</sup> ] <i>K</i> /GPa	μ/G	Pa	
	基质	2.650	37	39		
	骨架	2.120	15.71	12.2	21	

表4 流体参数

$ ho_0/[g\cdot cm^{-3}]$	K₀⁄GPa	$\rho_{g}/[g \cdot cm]$	<sup>-3</sup> ] $K_g$ /GPa $_f$	o <sub>w</sub> ∕[g ·cm <sup>−</sup>	<sup>3</sup> ] K <sub>W</sub> /GPa
0.7	0.57	0.111	0.043	1.04	2.25

建立上层为 HTI 介质,下层为孔隙介质的模型 (表 2—4),利用 PS 波反射系数公式和 Gassmann 方 程,对模型的各种属性进行分析研究。图 5 为在保 持孔隙度为 20% 的情况下,地层弹性参数随含气饱 和度的变化曲线,可见地层含气后纵波速度和泊松 比迅速下降。当含气饱和度小于 27%,特别是含气 饱和度从 0 增加到 6.8% 时,纵波速度降低了 224 m/s,相对降低了 5.19%;在饱和度为 25% 时,纵波 达到最小值;之后随着含气饱和度的增大纵波速度 逐渐增大,但增速变缓。饱和度从 25% 增加到 100%时,纵波速度增加了 58 m/s,相对增加了 1.43%。纵波速度的这种变化是由于含气饱和度较 低时,天然气的体积模量决定了混合流体的体积模 量,而气体的可压缩性大,因此导致了孔隙的可压缩 性急剧增加,地层体积模量急剧降低;当含气饱和度 继续增加时,孔隙的可压缩性不再增加,从而随着密 度的降低,纵波速度略有增加。显然,纵波速度降低 是含气地层的一个重要标志,但是不能依据这一标 志判断含气饱和度。

随着含气饱和度的增大,密度近似呈线性降低, 横波速度略有增加。饱和度从0到100%时,密度相 对降低5.1%,横波速度相对增加2.63%。而泊松 比的降低则是在含气饱和度小于20%时比较明显, 之后变化缓慢。饱和度从0到20%时,泊松比相对 降低了8.05%;含气饱和度从20%增加到100%,泊 松比相对降低了1.2%。







维普资讯 http://www.cqvip.com

图 6 为在含气饱和度为 60% 的情况下,地层弹 性参数随孔隙度的变化曲线。从图中可以看出,孔 隙度的变化对横、纵波速度和密度的影响较大,密度 随孔隙度增加线性降低,横、纵波速度也近似呈线性降低,泊松比略有增加。孔隙度从4%增加到16%, 泊松比增加了6.1%。





图7(图版 I)显示了各向异性参数、含气饱和 度分别变化时,模型分界面处反射系数的变化情况。 当地层孔隙度保持20%不变时,无论孔隙中含气量 是多少,分界面处反射系数的值都是随着入射角的 增加而增加的。10%的含气层与100%饱和含气层 的反射系数在0°时没有差异,随着入射角的增大, 这种差异逐渐增大,但从整体来看差异变化是比较 小的。入射角由0°到60°,10%的含气层与100%的 含气层反射系数差异变化了4.4%。此时Thomsen 各向异性参数也在变化,图7(图版 I)中蓝色一组 曲线为各向异性较弱时,红色一组为各向异性较强 时的反射系数曲线。可以看出,各向异性参数的变 化对反射系数的影响是很明显的,在入射角从0°到 60°时,10%含气层在各向异性的影响下反射系数变 化了 39.5%,100%饱和含气层的反射系数变化了 34.3%,很显然各向异性的影响要强于与饱和度对 反射系数的影响。

图 8(图版 I)显示了各向异性参数、孔隙度对 反射系数的影响。当含气饱和度 60% 不变,各向异 性影响相对较弱,人射角为 40°时,孔隙度由 2% 到 16%,相应的反射系数由 0.216 8 增大到0.451 4。 在各向异性影响较强的时候,人射角为 40°,孔隙度 由 2% 增大到 16%,相应的反射系数由 0.358 9 增 大到 0.596 6,变化非常大。在孔隙度为 2% 保持不 变的情况下,人射角为 40°时,不同各向异性参数的 影响下,反射系数的值由 0.218 8 增大到 0.358 9; 在孔隙度为 16% 保持不变的情况下,入射角为 40° 时,不同各向异性参数的影响下,反射系数的值由 0.464 1增大到 0.606 8。

很显然,孔隙度和各向异性参数的对反射系数

的影响都是很大的,相对来说,孔隙度对界面处反射 系数的影响还要大于各向异性参数对反射系数的影 响。

### 5 结论

本文通过对弱各向异性介质条件下基于 Thomsen 各向异性参数的 P-SV 波反射系数的 AVO 属性 进行研究得到如下结论:

(1)对反射系数的 AVO 属性及其交绘图研究, 可以根据需要得到横波速度剖面,密度剖面,剪切模 量剖面和横波波阻抗剖面。而且不同形式的交绘图 反映了不同的地层岩性特征响应,这为 AVO 定性分 析提供了有利的途径。

(2)当横纵波速比一定的时候,可以对各向异 性参数进行定量分析,发现各向异性参数与 AVO 属 性系数之间有固定的比例关系。

(3)利用 HTT 介质中 P-SV 波反射系数可以有 效的区分第3 类含气砂岩。

(4) 通过 HTL/ 孔隙流体介质模型, 可知含气饱 和度、孔隙度、各向异性参数对反射系数都有影响, 其中含气饱和度对反射系数的影响最弱, 孔隙度的 影响最强; 各向异性参数的影响也是很强的。所以 在以裂隙介质为上覆地层时,各向异性的影响是不可以忽略的。

#### [参考文献]

- [1] 王德利,雍运动,韩立国,等.三维粘弹介质地震波场有限差 分并行模拟[J].西北地震学报,2007,29(1):30-34.
- [2] 刘鲁波,陈晓非,王彦宾.切比雪夫伪诸法模拟地震波场[J].
   西北地震学报,2007,29(1):18-25.
- [3] 李清河,阮爱国,范小平,等. 地壳介质弹性和电性各向异性研究的新进展[J]. 西北地震学报,2004,26(1):10-17.
- [4] Vavrycuk V, I Psencik. PP wave reflection coefficients in weakly anisotropic media[J]. Geophysics, 1998, 63: 2129-2141.
- [5] Ruger A. Variation of P wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media [J]. Geophysics, 1998,63: 935-947.
- [6] Maxim V, Cherepanov, Tatyana N Nefedkina. Analytic description of PS wave reflection in weakly anisotropic media[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23(1): 191-194.
- [7] Liu Qiankun, Han Liguo, Wang ENli, et al. Reflection coefficients of P---SV waves in weak anisotropic media[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(1):11-17.
- [8] Antonio C B R, P C John. Useful approximations for convertedwave AVO[J]. Geophysics, 2001, 66(6): 1721-1734.
- [9] Fred J Hilterman. 孙夕平,等译. 地震振幅解释[M]. 北京:石 油工业出版社,2006:70-71.





parameters to reflection coefficients.

Fig.7

反射系数的影响 The effects of gas saturation and anisotropic Fig.8 Th



to reflection coefficients.