

# 利用叠前地震数据预测火山岩储层裂缝

孙炜<sup>1</sup>, 王彦春<sup>1</sup>, 李梅<sup>2</sup>, 杨锐<sup>3</sup>, 郭海华<sup>2</sup>, 李玉凤<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 恒泰艾普石油天然气技术服务股份有限公司, 北京 100084; 3. 川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院, 四川成都 610051)

**摘要:** 通过对叠前弹性波阻抗反演及各向异性理论的研究, 归纳出一种通过叠前地震数据来预测火山岩裂缝的方法思路: 首先引入叠前弹性波阻抗反演, 利用其分辨率高的优点来寻找火山岩储层, 然后分析裂缝引起的地震波动力学属性随方位角的变化特征, 通过各向异性来预测裂缝的方向和发育程度, 综合判断火山岩储层裂缝的分布情况。该方法以“面向储层找裂缝”为原则, 在分辨率和预测准确性上都有其理论优势, 将该思路在试验区进行尝试, 取得了较好的效果。

**关键词:** 叠前地震; 裂缝; 弹性波阻抗反演; 火山岩储层; 方位各向异性

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2010)02-0229-04

近年来, 火山岩储层正逐渐成为储层预测新的研究热点。在地层中, 裂缝是火山岩形成有利储层的重要因素, 火山岩中找裂缝已成为学科内的研究重点和难点。火山岩在地震剖面上往往表现出纵向厚度变化大、内部反射杂乱等特点, 这就要求反演算法有足够的分辨能力。针对这种情况, 引入了弹性波阻抗反演方法, 由于其反演结果同时包含横波和纵波的信息, 且相同频率条件下横波的分辨率高于纵波, 因此, 该方法的分辨能力比一般的声波反演方法要高。笔者也正是利用弹性波阻抗反演的这种优点来确定火山岩储层的分布。在火山岩储层中, 裂缝沟通孔隙, 共同形成储集空间和油气运移的重要通道, 我们的研究目标就是如何在火山岩储层中预测裂缝的发育情况和方向。常规的曲率算法在预测火山岩储层裂缝时表现相对不敏感, 于是, 考虑使

用地震方位各向异性来预测裂缝。所谓方位各向异性, 即由于裂缝存在而导致地震波动力学属性随着方位角的不同而发生变化。用于检测裂缝的地震属性有衰减, 频率和波阻抗等, 笔者分别对衰减、频率和波阻抗属性的方位各向异性进行计算、统计、筛选和分析, 从而实现对火山岩储层裂缝特征的预测。

## 1 研究现状

早在 20 世纪末, BP 公司的 Patrick Connolly<sup>[1]</sup> 将叠前地震道集与叠后地震反演方法相结合来区分砂泥岩储层, 从而大大提高了反演的分辨率。长久以来, 学者们均以佐布里兹 (Zoeppritz) 方程的矩阵形式来表示地震波非垂直入射 (炮检距不为零) 时, 纵、横波的反射和透射系数的关系

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_1 & -\cos\varphi_1 & -\sin\theta_2 & -\cos\varphi_2 \\ \cos\theta_1 & \sin\varphi_1 & \cos\theta_2 & -\sin\varphi_2 \\ \sin(2\theta_1) & -\frac{v_{p1}}{v_{s1}}\cos(2\varphi_1) & \frac{\rho_2 v_{s2}^2 v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2 v_{p2}}\sin(2\theta_2) & \frac{\rho_2 v_{s2} v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2}\cos(2\varphi_2) \\ \cos(2\varphi_1) & \frac{v_{s1}}{v_{p1}}\sin(2\varphi_1) & -\frac{\rho_2 v_{p2}}{\rho_1 v_{p1}}\cos(2\varphi_2) & \frac{\rho_2 v_{s2}}{\rho_1 v_{p1}}\sin(2\varphi_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \\ T_{ps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ \sin(2\theta_1) \\ -\cos(2\varphi_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Connolly 将这种新的高分辨率反演方法定义为弹性波阻抗反演, 并根据对佐布里兹方程的合理近似, 定义 P 波入射角  $\theta$  的弹性波阻抗  $E_I(\theta)$  为

$$E_I = v_p^{1+\tan^2\theta} v_s^{-8K\sin^2\theta} \rho^{1-4K\sin^2\theta} \quad (2)$$

其中,  $\theta$  为入射角;  $v_p$  为纵波速度,  $v_s$  为横波速度,  $\rho$  为密度,  $K = v_s^2/v_p^2$  为常数, 取相邻层的平均值。

由于叠前地震数据包含了更多的地下信息且弹性波阻抗反演方法在分辨率上有其独特的优越性,

使得叠前弹性波阻抗反演被越来越多的应用于解决各种储层预测难题。

在 20 世纪 70 年代以前,地震学以及地球物理学几乎都是围绕各向同性介质展开研究,科学家们并不愿意认可各向异性的存在,因为这不仅加大了问题的复杂性,而且加大了地震反演的多解性。直到 1975 年,Auld 得到各向异性介质中地震波的位移解,才真正拉开了各向异性研究的序幕。在裂隙各向异性介质理论的研究中,Hudson 较早提出了与之相关的本构关系<sup>[2]</sup>。笔者通过研究基于 Hudson 模型各向异性情况来预测裂缝的发育程度和方向。Hudson 模型建立在以下的假设前提下:①介质包含比地震波长小得多的定向的疏排列裂隙;②裂隙是相互分离的,单个裂隙是薄扁球体(硬币状),即裂隙间流体不能流动,且单个裂隙的高宽比较小;③包体内所含气体、液体或其他充填物的体模量和剪切模量比围体小。

## 2 方法原理

### 2.1 技术思路

火山岩一般为不规则分布,且由于后期的沉积作用,往往夹杂砂泥岩,这为我们确定裂缝储层的分布带来很大困扰,根据大量的理论研究和反复讨论,确定了如下的技术路线(图 1):

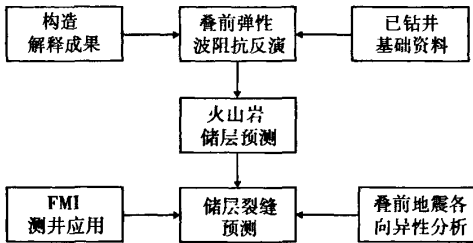


图 1 火山岩裂缝预测技术路线

(1)以构造解释成果等层位、断层信息和已知井资料为基础,进行叠前弹性波阻抗反演,通过对反演结果的分析来确定火山岩储层分布有利区。

(2)用叠前地震各向异性预测裂缝的方向和发育程度,结合 FMI 测井资料,论证预测结果的正确

性,最终分析火山岩储层裂缝的空间分布特征。

### 2.2 叠前弹性波阻抗反演

首先探讨弹性波阻抗的适用性。在式(2)中  $E_I$ 、 $v_p$ 、 $v_s$  和  $\rho$  是四个未知数,当给出足够多的入射角  $\theta$  时,可以建立关于  $E_I$ 、 $v_p$ 、 $v_s$  和  $\rho$  的线性方程组,且该方程组为超定的。

根据其定义给出某一反射界面上下介质的弹性波阻抗

$$E_{I\pm} = v_{p\pm}^{1+\tan^2\theta} v_{s\pm}^{-8K\sin^2\theta} \rho_{\pm}^{1-4K\sin^2\theta}, \quad (3)$$

$$E_{I\mp} = v_{p\mp}^{1+\tan^2\theta} v_{s\mp}^{-8K\sin^2\theta} \rho_{\mp}^{1-4K\sin^2\theta}, \quad (4)$$

根据上述公式定义的弹性波阻抗,可得入射角为  $\theta$  时的反射系数可近似为

$$R_{pp}(\theta) \approx \frac{E_{I\mp} - E_{I\pm}}{E_{I\pm} + E_{I\mp}}. \quad (5)$$

这样,由弹性波阻抗表示的非垂直入射时反射系数表达式与常规的垂直入射时反射系数表达式一样,这为借用相对成熟的叠后波阻抗反演方法来反演弹性波阻抗提供了理论基础:

(1)根据已知井的纵、横波速度和密度计算井中弹性波阻抗,再结合地质层位信息及沉积模式,采用分形插值方法构建初始弹性波阻抗模型。

(2)采用叠后的宽带约束反演方法来计算弹性波阻抗数据体。先根据入射角的不同进行分角度道集叠加,得到不同入射角的角道集数据,再采用广义线性反演技术反演各个角度的地震子波,得到与入射角有关的地震子波。根据得到的弹性波阻抗模型、地震子波,使用叠后宽带约束反演方法来计算弹性波阻抗数据体。

(3)通过弹性波阻抗数据体来推导横波阻抗、纵波阻抗等弹性参数。

(4)分析各弹性参数的敏感性,找出最优属性及该属性能够区分火山岩与其他岩性的界限值,在平面上根据界限值统计出火山岩有利储层的分布。

### 2.3 叠前各向异性分析

在确定了火山岩有利区的前提下,再进一步探讨如何进行裂缝的预测研究。图 2a、b、c 分别表示地震波沿平行于裂缝方向、与裂缝成一定角度以及

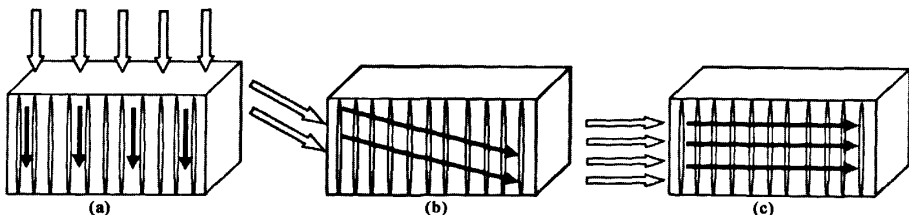


图 2 地震波穿过裂缝的不同情况

表 1 动力学属性及裂缝预测对比

	波阻抗值	频率值	衰减值
地震波平行于裂缝传播	最大	最大	最小
地震波成角度穿过裂缝	随角度增加而减小	随角度增加而减小	随角度增加而增大
地震波垂直于裂缝传播	最小	最小	最大
裂缝走向	最大值,即椭圆长轴方向	最大值,即椭圆长轴方向	最小值,即椭圆短轴方向
裂缝法向	最小值,即椭圆短轴方向	最小值,即椭圆短轴方向	最大值,即椭圆长轴方向
裂缝密度	长短轴之比	长短轴之比	长短轴之比

垂直于裂缝方向穿过裂缝。根据物理学基本原理,分析了波阻抗、频率和衰减等动力学属性随地震波和裂缝夹角的变化情况(表 1),依据属性值的大小差异来拟合椭圆,并对得到的椭圆进行分析。

Mallick 和 Craft 等人认为<sup>[3]</sup>,裂缝密度越大,由波阻抗拟合出的方位椭圆的扁率越扁,其长轴方向代表裂缝走向,从而实现了对裂缝密度和方向的预测。

### 3 应用实例

将该研究思路应用于松辽盆地 A 区块的火山岩储层及裂缝预测研究中。该区块属于下白垩统断陷构造层,中间贯穿南北向大断裂 B,西部为断裂的构造高部位,岩芯显示该区域发育酸性火山岩及沉积屑岩。

在研究中,首先运用叠前弹性波阻抗反演来判定火山岩储层的分布情况,对反演得到的弹性参数进行筛选,根据井岩芯分析、试油数据等资料,认为横波阻抗对火山岩储层更敏感,通过交会分析已知

波阻抗的取值特征,确定出火山岩储层初步的有利区;然后分析频率、衰减和波阻抗属性的各向异性特征,通过分析认为波阻抗属性更适合松辽盆地 A 区块的裂缝研究,从而预测裂缝的分布情况。

根据预测结果,火山岩储层主要沿大断裂 B 两侧呈近东北向条带状分布(图 3 中色标数值代表火山岩储层的时间厚度),将全区储层平面分布按发育情况划分为以下四类:储层发育(红色区域)、储层较发育(黄色区域)、储层相对不发育(绿色区域)及储层极不发育(浅蓝色区域),a2 井火山岩储层发育,a1、a3 井火山岩储层较发育,a4 井火山岩储层极不发育,其中 a4 井钻遇火山岩与砂泥岩互层,预测的火山岩储层分布特征与已钻井的情况较符合,同时,a2、a3 井获得高产工业气流,a1 井低产,a4 井无产量。由图 4(图中色标数值代表裂缝发育程度的时间厚度)可见,预测的裂缝在 a2、a3 井区比较发育(红色区域),a1 井附近相对不发育(黄绿色区域),说明裂缝是本区形成高产气层的重要因素。a3 井

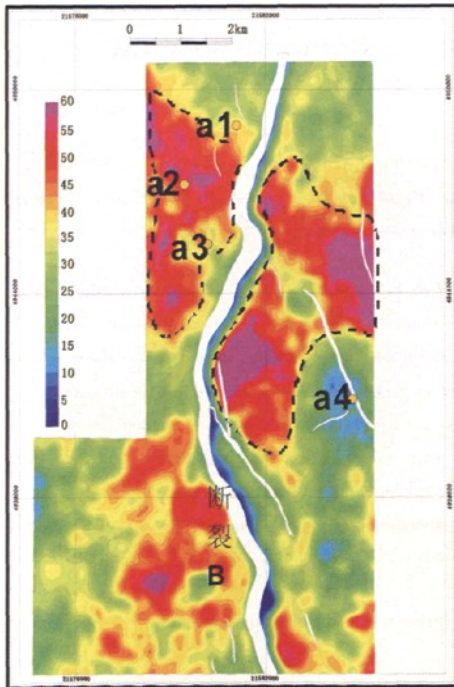


图 3 研究区火山岩平面分布

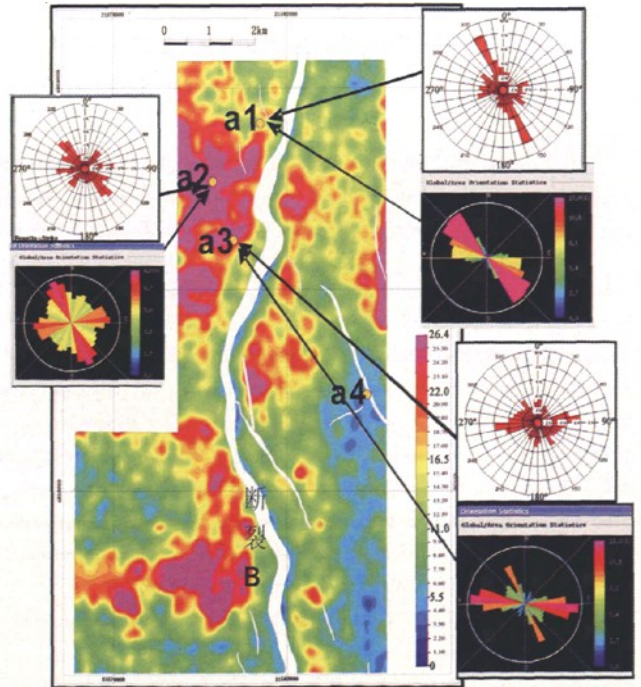


图 4 火山岩裂缝分布及井点处预测裂缝方向与 FMI 对比

岩芯显示为角砾熔岩和流纹岩, FMI 测井显示目的层段裂缝发育, 造成该井区地下介质连通性非常好, 且 a3 井周围储层物性较好, 裂缝沟通孔隙, 使该井获得高产工业气流。裂缝的方向通过玫瑰图来指示 (玫瑰图中色标代表百分比, 即某一方向的裂缝占该位置目的层段所有裂缝方向的百分比。玫瑰图中的紫红色指示预测出的裂缝优势方向, 预测的 a1、a2、a3 井的裂缝方向与对应井的 FMI 测井分析的裂缝方向基本一致 (图 4)。

#### 4 结论

通过叠前地震数据来预测火山岩储层裂缝是一种新颖的思路方法, 其优点在于: ①叠前数据的引入最大程度地保证了地下介质的信息量; ②与传统的声波阻抗反演相比, 弹性波阻抗反演在分辨率上有不可比拟的优越性; ③作为岩石物理学新成果的应用, 方位各向异性分析技术的准确度令人满意。

目前, 该方法还未大范围应用于勘探开发, 究其原因, 其对地震数据采集及处理均具有较高要求: ①研究区目的层不能太深, 同时地震采集要宽方位, 这样才能引入弹性波阻抗反演和方位各向异性分析; ②为了构建较好的弹性波阻抗初始模型, 需要有横波测井数据, 但横波测井的其成本昂贵, 在推广上有

一定局限性。而且, 并不是所有的动力学属性均可直接用于裂缝预测, 笔者之所以并未提到振幅属性, 是因为在使用振幅属性进行裂缝预测时, 由于地下介质的复杂性, 可能导致裂缝预测的结果不唯一, 因为振幅的大小取决于地层反射系数, 而根据反射系数的定义, 反射系数取决于上下层的波阻抗差值, 在平行和垂直裂缝的两个方向, 波阻抗差值会表现出不同的情况, 从而使振幅的大小无法唯一预测最终的裂缝方向。可以考虑通过岩石物理模型正演的方法予以解决。

#### 参考文献:

- [1] Connolly P. Elastic impedance [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18 (4): 438.
- [2] Hudson J A. A higher order approximation of elastic wave in material containing cracks [J]. *Geophys*, 1981, 64: 133
- [3] Mallick S, Craft K, Meister L, et al. Determination of the principle direction of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data [J]. *Geophysics*, 1998, (63), 692.
- [4] 桂志先, 贺振华, 张小庆. 基于 Hudson 理论的裂隙参数对纵波的影响 [J] *江汉石油学院学报*, 2004, 26(1): 45.
- [5] 舒萍, 曲延明, 王国军, 等. 松辽盆地深层火山岩储层裂缝地质特征与地球物理识别 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(4): 726.

### THE DETECTION OF FRACTURES IN THE VOLCANIC RESERVOIR WITH PRE-STACK SEISMIC DATA

SUN Wei<sup>1</sup>, WANG Yan-chun<sup>1</sup>, LI Mei<sup>2</sup>, YANG Rui<sup>3</sup>, GUO Hai-hua<sup>2</sup>, LI Yu-feng<sup>1</sup>

(1. Geo-detection Laboratory, Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Landocean Energy Services Co. Ltd, Beijing 100084, China; 3. Geological Exploration and Development Research Institute of Sichuan Petroleum Administration, Chengdu 610051, China)

**Abstract:** In recent years, the volcanic reservoir has become a new focus in reservoir prediction. Generally, fractures constitute an important factor of the volcanic reservoir, and volcanic rocks are characterized by variation of spatial distribution and complex internal lithology. Therefore, the detection of fractures in volcanic rocks is considered to be a research challenge. Based on the theory of pre-stack elastic impedance inversion and azimuthal anisotropy, this paper presents an idea for predicting fractures in the volcanic reservoir with pre-stack seismic data. First, the pre-stack elastic impedance inversion, as a high-resolution inversion method, is introduced to predict the volcanic reservoir; then the change of kinetic property of seismic wave caused by fractures is analyzed, and the density and direction of fracture are predicted with the azimuthal anisotropy; finally, the distribution of volcanic reservoir as well as fractures is estimated comprehensively. The key to this idea is "detecting fractures with the thought of finding volcanic reservoir", and the special advantage of the method lies in its high resolution and outstanding prediction accuracy. As an example, this idea was used for reservoir prediction in a test area, with a satisfactory result obtained.

**Key words:** pre-stack seismic data; fracture; elastic impedance inversion; volcanic reservoir; azimuthal anisotropy

作者简介: 孙炜 (1984 -), 男, 中国地质大学地球探测与信息技术专业硕士, 主要从事火山岩储层裂缝预测研究工作, 公开发表学术论文数篇。