

# 裂缝性储层 AVO 模型研究<sup>\*</sup>

莫午零 吴朝东

(北京大学地球与空间科学学院)

莫午零等. 裂缝性储层 AVO 模型研究. 天然气工业, 2007, 27(2): 43-45.

**摘 要** 预测储层中的有利裂缝发育带及裂缝发育的主方位在油气勘探开发中具有重要的意义。当储层中存在裂缝时, 流体与致密岩石的巨大物理性质差异形成一定规模的物理界面, 引起储层地震波反射特征的改变, 成为地震剖面上反映裂缝存在的重要信息。AVO 分析方法所表现的方向性, 可从三维道集的地震资料中分析出不同方向上的地震属性参数变化, 这些参数与地层的各向异性具有一定的对应关系。当储层存在一定方位的裂缝时, 其弹性参数会表现出方向性差异, 这种差异能被 AVO 方法有效地检测。通过对不同方位角裂缝储层 AVO 模型研究得出: 当地震波传播方向与裂缝走向的夹角逐渐增大时, 反射系数随入射角的增大而减小; 含水平裂缝地层的曲线斜率逐渐减小, 地层的 AVO 截距逐渐减小, 斜率逐渐增大; 垂直裂缝地层的曲线斜率逐渐增大, 地层的 AVO 截距逐渐增大, 斜率逐渐减小。

**主题词** 储集层 裂缝(岩石) 方位角 AVO 模型

AVO 技术是具有明确地质意义的地球物理勘探方法<sup>[1]</sup>。当地层出现一定方位的裂缝时, 地层的弹性参数会表现出方向性差异<sup>[2,3]</sup>, 这种差异能被 AVO 方法有效地检测。地质建模实际上是建立一定地质形态、具有不同物理参数变化的各种参数模型, 采用地球物理方法进行模拟, 以确定地质参数和物理参数的改变对地震响应的影响<sup>[4]</sup>。

## 一、模型原理

模型均采用多层次状模型, 建立的地质模型有两个层面、三个地层: 纵向结果为围岩层—裂缝层—围岩层模型。在模型中假设上下地层的厚度足够大(200 m), 即不考虑盖层的影响。对于固结致密的岩石而言, 裂缝储层与非储层的波阻抗可能相近, 但由于形成它们的骨架成分和孔隙结构不同, 其泊松比差异还是较大, 利用 AVO 技术是可以有效识别含气裂缝性储层的。因此, 模型中的主要参数包括砂岩和泥岩的纵波速度、密度以及泊松比等。具体方法如下: 按一定的深度间隔(每 200 m 取一样点)拾取目的层岩石的物性参数作为模型参数; 对于每个深度点的物性参数, 改变砂岩层中地震传播方向与裂缝走向的夹角( $0^\circ \sim 90^\circ$ , 每隔  $10^\circ$  取一个角度), 分垂

直裂缝与水平裂缝做不同角度的模型。李向阳(1999 年)在 Thomsen(1986 年)的模型基础上提出了正交方向上地震传播的时差方程, 展示出时差与方位角( $\theta$ )的二倍余弦( $\cos 2\theta$ )呈函数关系<sup>[5,6]</sup>。事实上, 地震波在裂缝介质中的传播速度可表示为:

$$v_p = v_{p0} [1 - b\epsilon(1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \theta)]^{\frac{1}{2}}$$

式中:  $v_p$  为地震波在裂缝介质中的传播速度;  $v_{p0}$  为地震波在无缝介质中的传播速度;  $\epsilon$  为裂缝密度;  $b$  为常数, 取  $0 \sim 1$ ;  $\alpha$ 、 $\theta$  分别为地震波传播方向与裂缝面的入射角和与裂缝的方位角。

## 二、参数统计与计算

模型中的主要参数是由塔里木某盆地马 7 井的测井曲线统计得出(见表 1)。对典型有裂缝层和无裂缝层的声波时差值和密度值进行统计, 就可以总结出  $b \times \epsilon$  值, 同时也可以确定泥岩的声波时差值和密度值以及  $v_{p0}$ , 进而就可以计算出各角度下的  $v_p$ (见表 2)。根据计算出的  $v_p$  值再算得各角度下的地层声波时差, 然后用计算出的声波时差值建立不同角度裂缝地层的 AVO 模型。

从马 7 井的声波曲线可以读出典型泥岩层的声波时差为  $350 \mu\text{s}/\text{m}$ , 典型泥岩层的地层速度为 2857

<sup>\*</sup> 本文受到国家重大基础研究项目(编号: G1999043304)资助。

**作者简介:** 莫午零, 1978 年生, 博士研究生; 现从事地球物理勘探方法研究。地址: (100871) 北京市北京大学畅春园畅 1 楼 563 信箱。电话: 13811120242。E-mail: mow150@pku.edu.cn

表1 典型裂缝带与非裂缝带测井参数统计表

井段 (m)	声波时差 ( $\mu\text{s}/\text{m}$ )	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	注释
1781.8~1876.7	228.95	2.43	非裂缝带
1950.7~2098.4	212.27	2.42	非裂缝带
2111.1~2192.0	356.55	2.33	裂缝带
2209.2~2219.5	299.84	2.27	裂缝带
2238.4~2257.1	420.77	2.24	裂缝带

表2  $v_p$  计算结果数据表

$\alpha$ ( $^\circ$ )	$\theta$ ( $^\circ$ )	$v_p$ (m/s)	$\Delta t$ ( $\mu\text{s}/\text{m}$ )
0	0	5000	200
0	10	4975	201
0	20	4902	204
0	30	4785	209
0	40	4608	217
0	50	4386	228
0	60	4115	243
0	70	3802	263
0	80	3436	291
0	90	3003	333
90	0	3000	333
90	10	3020	331
90	20	3079	324
90	30	3174	315
90	40	3297	303
90	50	3444	290
90	60	3606	277
90	70	3777	265
90	80	3951	253
90	90	4123	243

m/s;典型无裂缝砂岩层的声波时差为  $200 \mu\text{s}/\text{m}$ ,典型无裂缝层的地层速度为  $5000 \text{ m/s}$ 。再根据几个典型有裂缝砂岩层的声波时差值与无裂缝砂岩层的声波时差值的比例关系,即裂缝对地层速度的最大影响比例为  $40\%$ ,总结出  $b \times \epsilon$  的值,最后把计算出的  $v_{p0}$  及  $b \times \epsilon$  值带入上式中,再分别带入不同的  $\theta$  值得到数据表(见表3)。

表3 模型 AVO 属性参数表

方位角 ( $^\circ$ )	水平裂缝面		垂直裂缝面	
	AVO 截距	AVO 斜率	AVO 截距	AVO 斜率
0	0.327795	-0.975218	0.030374	-0.050927
10	0.331984	-0.609922	0.034613	-0.061631
20	0.324641	-0.54552	0.046643	-0.088402
30	0.310975	-0.442656	0.065576	-0.118455
40	0.290402	-0.373226	0.089371	-0.155041
50	0.262252	-0.372853	0.116277	-0.195000
60	0.225158	-0.348457	0.144527	-0.230709
70	0.177069	-0.283545	0.172549	-0.266826
80	0.114495	-0.190837	0.199906	-0.300882
90	0.030611	-0.057036	0.225058	-0.304207

根据表3中的声波时差值建立不同裂缝方位角和裂缝倾角的模型、以及对应的声波时差曲线,然后应用 GMA/Well Editor 软件导出密度与泊松比曲线,再应用 GMA/AVO Synthetic 软件进行各种模型的 AVO 响应模拟。

### 三、裂缝模型分析

通过 AVO 理论模拟得到反射振幅序列和射线追踪角度数据,对反射振幅做归一化处理,并对射线追踪角度数据进行插值,得到入射角。再利用 Shuy 的 Zoeppritz 方程简化式对反射系数和入射角进行拟合,进而得到 AVO 的截距和斜率。根据上述参数的交会图<sup>[7]</sup>,便可对所建地质模型的 AVO 特征进行分析。

地震传播方向与裂缝走向夹角(方位角)从  $0^\circ \sim 90^\circ$  的反射系数随入射角变化的曲线如图1所示。从图中我们观察到当地震传播方向与裂缝走向的夹角为  $0^\circ$  时,反射系数随入射角的增大而减小,其中含水平裂缝地层的曲线斜率比垂直裂缝地层的曲线斜率大很多;当地震传播方向与裂缝走向的夹角从  $10^\circ$  增加到  $70^\circ$  时,反射系数随入射角的增大而逐渐减小,含水平裂缝地层的曲线斜率逐渐减小,垂直裂缝面的曲线斜率逐渐增大,直到地震传播方向与裂缝

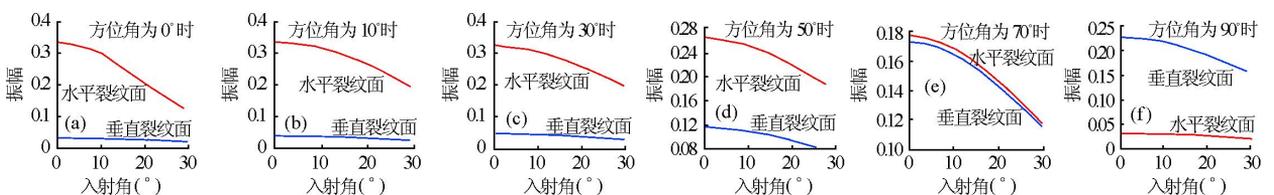


图1 反射振幅随入射角变化曲线图

走向夹角达到  $70^\circ$  时两种裂缝地层的曲线基本重合, 大于  $70^\circ$  以后垂直裂缝地层的曲线斜率逐渐超过含水平裂缝地层。

然后, 计算出各角度下 AVO 截距和斜率的值, 再以 AVO 截距为横轴、AVO 斜率为纵轴分别做水平裂缝面和含垂直裂缝地层的 AVO 截距和 AVO 斜率随地震传播方向与裂缝走向夹角(方位角)的变化曲线图(图 2)。从图 2-a 中可以观察出水平裂缝 AVO 截距随地震传播方向与裂缝走向夹角的增大而逐渐减小, 且曲线向上凸; 其斜率随地震传播方向与裂缝夹角的增大而逐渐增大, 且曲线向上凸。从图 2-b 中可以看出含垂直裂缝地层的 AVO 截距随地震传播方向与裂缝走向夹角的增大而增大, 且曲线向下凸; 其 AVO 斜率随地震传播方向与裂缝走向夹角的增大而减小, 且曲线向上凸。以上 AVO 响应特征的变化反映了地震传播方向的变化对含裂缝地层的层速度各向异性和 AVO 响应各向异性的影响。

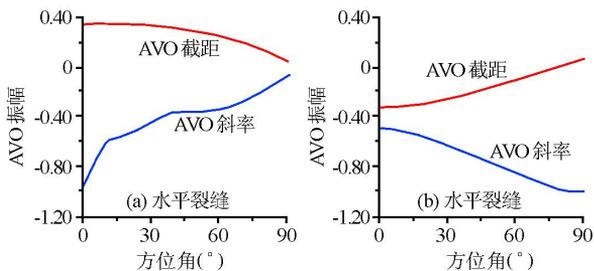


图 2 水平、垂直裂缝 AVO 属性参数随方位角变化图

## 四、结 论

通过分析地震传播方向与裂缝走向夹角变化时水平和垂直裂缝地层的反射系数随入射角变化曲线以及 AVO 截距、斜率交会图, 可以得出以下结论。

(1) 对于固结致密的岩石而言, 裂缝储层与非储层的波阻抗可能相近, 但由于形成它们的骨架成分

和孔隙结构不同, 其泊松比差异还是较大。因此, 利用 AVO 技术可有效识别含气裂缝性储层。

(2) 对于含裂缝地层, 随着入射角的增大, 反射系数总体上都在减小, 只是梯度变化不同。对于含水平裂缝地层, 随着地震传播方向与裂缝走向夹角的增大, 反射系数随入射角的变化梯度逐渐减小, 地层的 AVO 截距逐渐减小, 斜率逐渐增大。当地震传播方向与裂缝走向的夹角达到  $90^\circ$  时, 其反射系数随入射角的变化梯度接近于零。

(3) 对于含垂直裂缝地层, 随着地震传播方向与裂缝走向夹角的增大, 反射系数随入射角的变化梯度逐渐增大, 地层的 AVO 截距逐渐增大, 斜率逐渐减小。当地震传播方向与裂缝走向的夹角为  $70^\circ$  时, 垂直裂缝地层与含水平裂缝地层的反射系数随入射角的变化梯度基本达到相同的值; 到夹角达到  $90^\circ$  时, 其反射系数随入射角的变化梯度达到最大值。

## 参 考 文 献

- [1] 殷八斤. AVO 技术的理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [2] 张立勤, 彭苏萍, 李国发, 等. 方位 AVO 技术检测储层各向异性的方法和实践[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 38-40.
- [3] 许多, 李正文, 等. AVO 在复杂碳酸盐岩储层中的应用[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 38-40.
- [4] 朱广生. 地震资料储层预测方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 92-106.
- [5] 朱海龙, 李向阳. 运用正交地震测线 P 波时差的方位角变化检测裂缝[J]. 石油物探译丛, 2000, 2(1): 17-26.
- [6] HOMSEN L. Weak elastic anisotropy [J]. Geophysics, 1986, 51: 1954-1966.
- [7] 陆孟基. 地震勘探原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 340-360.

(修改回稿日期 2006-10-13 编辑 韩晓渝)