# 岩石孔隙对 AVO 的影响研究

# 周巍,郭全仕

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 南京石油物探研究所,江苏 南京 210014)

摘要:岩石中的孔隙和裂隙可用椭球状孔隙模拟,用椭球的长短轴之比定量描述这类孔隙的纵横比。笔者利用 Berryman 散射模型方法,得到孔隙度、流体饱和度、孔隙纵横比与泊松比、速度、密度的关系,通过一个砂泥岩界面 的理论模型的 AVO 正演模拟,探讨孔隙纵横比对 AVO 的影响,模拟结果表明对具有相同矿物成份和孔隙度的岩 石,由于椭球状孔隙的纵横比不同,导致反射系数(振幅)随入射角的变化也不同。随着孔隙纵横比的增大,AVO 交会图对气层的识别能力逐渐降低,孔隙纵横比越小,对 AVO 交会图识别气层越有利。

关键词:孔隙纵横比;流体替换;AVO 属性;泊松比;反射系数

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918 (2008) 01 - 0053 - 04

众所周知介质的孔隙度、流体饱和度是影响地 震反射波振幅随炮检距变化的重要因素,长期以来 人们利用振幅随炮检距变化及其 AVO 属性交会图 进行储层预测和油藏描述取得了很好的效果,特别 是对于固结较差的碎屑岩储层,有许多成功的例 子<sup>[1-5]</sup>。然而,随着油气勘探向复杂地区延伸,勘探 目标越来越复杂,特别是在裂缝发育的地区,AVO 应用受到了挑战,主要困难是难以确定岩石物性与 AVO 响应的关系。笔者通过裂缝介质的 AVO 正演 模拟,研究裂缝对 AVO 的影响,并进一步分析对 AVO 交会图识别气层的影响。AVO 的地质基础在 于不同岩石以及含有不同流体的同类岩石之间泊松 比的差异,故在做 AVO 正演模拟时, 泊松比与孔隙 度、流体饱和度、孔隙纵横比变化关系的求取变得十 分重要,利用 Berryman 散射模型方法模拟孔隙介 质[6],通过设定不同的孔隙几何形状(孔隙纵横比) 及其分布,来模拟裂隙分布。通过对一个两层砂泥 岩介质模型的 AVO 正演模拟(保持孔隙度和流体 饱和度不变,只改变孔隙纵横比),研究反射系数与 孔隙纵横比的关系。根据 Gassmann 方程<sup>[7]</sup>,对孔 隙流体进行替换,研究孔隙纵横比对 AVO 交会图识 别气层的影响。

1 方法原理

### 1.1 Berryman 散射模型

把岩石当作是由不同形状的孔隙、各种矿物成 分及孔隙流体组成的复合介质,矿物成分的百分含

收稿日期:2007-08-11

量可任意设定(所有矿物成分百分含量的总和为 1),矿物颗粒形状及孔隙形状是可变的。Berryman 根据长波长的一次散射理论,即弹性波波长远大于 组成复合介质矿物颗粒和孔隙尺寸,此时可忽略高 次散射,推导出了复合介质的等效密度 $\rho_m$ 、等效体 积弹性模量 $K_m$ 和等效剪切模量 $\mu_m$ 与各组分的密 度 $\rho_i$ 、体积弹性模量 $K_i$ 和剪切模量 $\mu_i$ 的关系<sup>[4]</sup>

$$\sum_{i=1}^{n} c_i (\rho_i - \rho_m) = 0 ,$$
  

$$\sum_{i=1}^{n} c_i (K_i - K_m) P_i = 0 ,$$
 (1)  

$$\sum_{i=1}^{n} c_i (\mu_i - \mu_m) Q_i = 0 .$$

式中,n为组分数, $c_i$ 为第i种介质的体积与复合介质的体积百分比, $P_i$ 和 $Q_i$ 是与组分和孔隙形状有关的参数,Berryman给出了球状、针状、碟状和椭球状4种形状的 $P_i$ 和 $Q_i$ 表达式。笔者用椭球状孔隙 模拟裂隙,对于椭球状孔隙,其表达式如下

$$P_{i} = \frac{K_{m} + \frac{4}{3}\mu_{i}}{K_{i} + \frac{4}{3}\mu_{i} + \pi\alpha\beta_{m}}, \qquad (2)$$

$$Q_{i} = \frac{1}{5} \left[ 1 + \frac{8\mu_{m}}{4\mu_{i} + \pi\alpha(\mu_{m} + 2\beta_{m})} + \frac{K_{i} + \frac{2}{3}\mu_{i} + \frac{2}{3}\mu_{m}}{K_{i} + \frac{3}{4}\mu_{i} + \pi\alpha\beta_{m}} \right], \quad (3)$$

式中, $\beta = \mu \frac{3K + \mu}{3K + 4\mu}$ ,  $\alpha$  是椭球的短轴与长轴的比值 ( $\alpha \leq 1$ ), 当  $\alpha$  接近 1 时, 椭球状接近球状, 当  $\alpha$  接近 0 时, 椭球状接近碟状, 因此通过改变  $\alpha$  值的办法, 模拟不同的形状。

# 1.2 AVO 响应

AVO 分析技术在实际应用中乃是利用地震反 射的共成像点(CIP) 道集资料分析反射振幅随炮检 距的变化规律,或通过计算纵波反射振幅随入射角 的变化参数,估算界面上的 AVO 属性参数和泊松比 差,进一步推断储层岩性和含油气性质<sup>[8]</sup>。AVO 正 演模拟是采用 AVO 方法进行烃类检测的基础,模拟 的结果可以指导利用实际的地震道集的 AVO 反演 结果进行可靠的含气砂岩解释,AVO 主要的理论基 础是Zoeppritz(1919)方程,对于各向同性介质,平面 纵波以某一角度入射到某一平界面上,发生的反射 和透射及波的转换可由 Zoeppritz 方程计算得到。 由于 Zoeppritz 方程的复杂性,从应用的角度考虑, 不少研究者从不同方面对其进行了简化(例如 Aki 等,1980; Bortfeld, 1961; Shuey, 1985)。Shuey 在基 干一定假设的基础上,推导出了 PP(纵波入射,纵波 反射)反射系数随入射角变化的关系<sup>[4]</sup>

$$R(x) = R_0 + \left[A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2}\right] \sin^2 \alpha + \frac{\Delta v_p}{2v_p} (\tan^2 \alpha - \sin^2 \alpha) ,$$

$$A_0 = B - 2 \frac{(1-B)(1-2\sigma)}{1-\sigma} ,$$
(4)

式中, $v_p$ 为相邻 2 层纵波速度的平均, $\Delta v_p$ 为相邻 2 层的纵波速度差, $R_0$ 为垂直入射时的反射系数, $\sigma$ 

为相邻 2 层的泊松比的平均, $\Delta\sigma$  为相邻 2 层的泊松 比差, $\alpha$  为入射角。该公式是目前应用最多的 Zoeppritz 近似方程,笔者采用该公式计算 AVO 响应。

# 2 计算结果和分析

# 2.1 孔隙纵横比对对速度和泊松比的影响

依据上述理论,对一个上层为泥岩,下层为砂岩 的二层介质模型,探讨孔隙纵横比对界面反射系数 和振幅的影响。泥岩的纵波速度  $v_n$  为 3 400 m/s, 横波速度  $v_s$  为1450 m/s, 泊松比  $\sigma$  为0.38, 密度  $\rho$ 为2.5 g/cm<sup>3</sup>。下层的砂岩由固体骨架和孔隙水组 成,孔隙度为0.15,骨架的主要矿物成分是石英,含 少量长石和方解石,参数见表1<sup>[10]</sup>。计算过程中, 保持骨架和孔隙流体及孔隙度不变,只改变孔隙纵 横比,根据 Berryman 散射理论模型计算复合介质的 等效弹性参数和速度(图 1a),图 1b 是饱水砂岩孔 隙纵横比与速度的关系,这是根据 Gassmann 方程做 流体替换得到的饱气砂岩孔隙纵横比与速度的关 系,从图中看出孔隙纵横比对速度影响很大,随着 孔隙纵横比增大,纵横波速度迅速增大。图1c是根 据饱气砂岩的纵横波速度计算得到的孔隙纵横比与 泊松比的关系,随着孔隙纵横比增大,泊松比先快速 降低然后缓慢增加。

表1 各种矿物成分的物性参数及在骨架中的含量

矿物	$\frac{\rho}{\text{g/ cm}^3}$	$\frac{v_p}{m/s}$	$\frac{v_s}{m/s}$	K GPa	<u>_µ</u> GPa	<u>矿物含量</u> %
石英	2.650	6037.6	4120.8	36.6	45.0	90
方解石	2.710	6639.6	3436.3	76.8	32.0	5
正长石	2.550	5900.0	3070.0	56.8	24.0	5
水	1.000	1500	0	2.25	0	

<sup>2.2</sup> 孔隙纵横比对 AVO 识别气层的影响 前人已证明 Wyllie(1956)的时间平均公式对于



a一饱水砂岩波速与孔隙纵横比关系曲线;b---饱气砂岩波速与孔隙纵横比关系曲线;c---饱气砂岩泊松比与孔隙纵横比关系曲线 图1 各类砂岩的波速、泊松比、孔隙度纵横比的相互关系曲线

30

ふ

20

Berryman 散射理论模型的孔隙纵横比  $\alpha \approx 0.07$  是 准确的,Raymer(1980)公式对应的 Berryman 散射理 论模型的孔隙纵横比 α≈0.1<sup>[11]</sup>,所以取砂岩的孔 隙纵横比变化范围 α 为 0.02~0.14. 研究孔隙纵横 比对 AVO 交会图识别气层的影响。图 2 是根据 Shuey 公式计算的气砂岩的反射系数(振幅)随入射 角的变化关系,对应的孔隙纵横比分别是0.02、0. 06、0.10、0.14,图中实线是含水砂岩的反射系数,虚 线是气砂岩的反射系数。当孔隙纵横比是0.02时, 砂岩的波阻抗和泊松比均小于上覆泥岩,所以反射 系数全部为负,随入射角增大呈现缓慢下降趋势,此 时水砂和气砂层反射系数差异最大,气层反射振幅 远远大于水层;当孔隙纵横比≥0.06时,由于速度 增大,导致砂岩波阻抗大于上覆泥岩的波阻抗,因此 垂直入射时反射系数由负变正,但由于泊松比小于 上覆泥岩,因此反射系数随入射角的增大逐渐减小。 从图中发现,随着孔隙纵横比的增大,水层和气层的 反射系数差异逐渐减小,合成记录上反射振幅的变 化也越来越相似。

图 3a 是不同孔隙纵横比时水砂和气砂的斜 率一截距交会图,即P--G交会图,该交会图通常用 于储层流体的地震识别,图中实心点为水砂岩,空心 点为气砂岩,数字代表不同的孔隙纵横比,数字越大 孔隙纵横比越大。从交会图上可以看出,随着孔隙 纵横比的增大水砂和气砂点逐渐靠近,如果把水砂 岩看成是背景趋势,孔隙纵横比越小,气砂岩偏离背 景趋势越大,越利于识别;反之,偏离背景趋势越小, 不利识别气砂岩。因此,用 P-G 交会图对识别小 孔隙纵横比的气层比较有利。



图3b是 $\lambda o$ 一 $\omega o$ 交会图,它是一种常用的识别

不同孔隙纵横比时的震波反射系数及合成记录 图 2



图 3 不同孔隙纵横比时水层和气层的不同参数交会图

流体的 AVO 交会图, $\lambda$  是拉梅系数, $\mu$  是剪切模量,  $\rho$  为密度,从图中可以看出,由于流体没有剪切模 量,只有体积模量,所以不同孔隙纵横比的水层和气 层的 $\mu\rho$ 数值相差不大,其微小的变化是由密度的变 化引起的,但  $\lambda\rho$ 数值差别较大,特别是当孔隙纵横 比较小时,随着孔隙纵横比的增大, $\lambda\rho$  差别逐渐减 小,说明  $\lambda\rho-\mu\rho$  交会图对识别孔隙纵横比较小的气 砂层有利,而大孔隙纵横比的气砂层相对困难。

### 3 结束语

通过一个砂泥岩理论模型,在保持上覆泥岩和 砂岩孔隙度不变的条件下,研究了砂岩孔隙纵横比 对 AVO 的影响,并分析了孔隙纵横比对 AVO 交会 图识别气层的影响,根据计算结果得到了以下结论:

(1)对于具有相同含气饱和度和孔隙度的储层, 当储层的孔隙纵横比不同时,速度和泊松比也不同,造 成气层的 AVO 特征(反射系数和振幅)有明显的差异, 小孔隙纵横比的水层和气层的反射系数(振幅)差异大 于大孔隙纵横比时水层和气层的差异。

(2) 孔隙纵横比影响 AVO 交会图,在 P-G 交 会图上,孔隙纵横比越小,气层偏离背景趋势越大, 越容易识别;反之异常偏离背景趋势越小,呈现出与 背景趋势相似的性质,利用 P-G 交会图较难识别。 同样,在  $\lambda \rho - \mu \rho$  交会图上,孔隙纵横比越小, $\lambda \rho$  对 孔隙流体越敏感,利用  $\lambda \rho - \mu \rho$  交会图识别气层比较 有利;随着孔隙纵横比增大, $\lambda \rho$  对孔隙流体越敏感 性变差,所以  $\lambda \rho - \mu \rho$  交会图不利于识别大孔隙纵横 比的异常。这就是为什么 AVO 在松散的碎屑岩中 容易成功的重要原因之一。因为在松散的碎屑岩 中,除了孔隙度较大以外,孔隙纵横比较小,而固结 的砂岩,因孔隙纵横比小,整个岩石的孔隙纵横比较 大,不利于 AVO 碳氢检测,所以我们在实际资料的 AVO 处理解释时,要加强对孔隙结构的研究。

### 参考文献:

- [1] 胡贤根,尚新民.基于叠前时间偏移资料的 AVO 处理技术 [J].石油物探,2002,41(3):343.
- [2] 马朋善,高秀花,李旭华.一个典型的地震"模糊带"的 AVO 检 测[J].石油物探,2005,44(2):147.
- [3] 张广娟,胡天跃. 地震波 AVO 与岩性分析[J]. 石油地球物理 勘探,2002,37(6):578.
- [4] 徐仲达,邬庆良. AVO 技术在寻找薄气层中的应用[J]. 石油物 探,1993,32(3):1.
- [5] 张永刚. 第73 届 SEG 年会论文概要[M]. 北京:石油工业出版社, 2004.
- [6] Berryman J G. Long wavelength propagation in composite elastic media[J]. J Acoust Soc Am, 1980, 68:1809.
- [7] Mavko G, Mukerji T. Seismic pore space compressibility and Gassmann's relation [J]. Geophysics, 1995, 60(6):1743.
- [8] 殷八斤,曾灏,杨在岩. AVO 技术的理论与实践[M]. 北京:石 油工业出版社 1995.
- [9] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equations [J]. Geophysics, 1985, 50:609.
- [10] 多尔特曼 H b. 岩石和矿物的物理性质[M]. 北京:科学出版社 1985.
- [11] Wu S, White R E. A new velocity model for clay-sand [J]. Geophysics, 1995, 43:91.
- [12] 陈习蜂. 岩石孔隙流体交会技术最新进展[J]. 勘探地球物理 进展,2004,27(6):397.
- [13] 马中高,周巍,孙成龙. 地震岩石物理分析软件设计和实现
   [J]. 物探与化探,2006,30(3):260.
- [14] 孙鹏远. AVO 技术新进展. 勘探地球物理进展[J]. 2005,28 (6):432.

# THE INFLUENCE OF ROCK PORES ON AVO

#### ZHOU Wei, GUO Quan-shi

(Nanjing Institute of Geophysical Prospecting, EPRI, Sinopec, Nanjing 210014, China)

Abstract: Pores and fractures in rocks described with the aspect ratio as their shapes can be simulated by ellipsoids. The Berryman dispersion method was used in this paper, with which the Poisson's ratio, velocity and density of porous rocks are related to the porosity, fluid saturation and pore aspect ratio. The effect of aspect ratio on AVO response was also studied by a shale/sand modeling. The results show that the reflectivity or amplitude versus incidence varies with the aspect ratio change under the condition of the same mineral component and porosity, and the distinguishability of gas in AVO cross-plot decreases with the increasing aspect ratio. The smaller the aspect ratio, the easier the gas layer recognition by cross-plot.

Key words: aspect ratio; fluid substitute; AVO attribute; Poisson's ratio; reflectivity

作者简介:周巍(1963-),高工,1987年毕业于中国科技大学地球物理专业,获硕士学位,现就职于中石化石油勘探开发研究 院南京石油物探研究所,从事石油物探方法、测井及岩石物理研究及相关软件的开发等工作,公开发表论文数篇。