

PP波 AVO 多属性交绘图分析*

孙鹏远^{1,2} 孙建国^{1,2} 卢秀丽¹

(1. 吉林大学 2. 国土资源部应用地球物理综合解释理论开放实验室—波动理论与成像技术实验室)

孙鹏远等. PP波 AVO 多属性交绘图分析. 天然气工业, 2004; 24(2): 44~47

摘要 文章通过对 Aki, Xu 等给出的两个不同参数表示的 PP 波反射系数近似公式的重新整理和表述, 给出了两组不同形式的 AVO 属性, 并讨论了利用特殊角度道所反映的 AVO 属性及其组合特征来提取 AVO 属性的方法。在此基础上, 详细地分析了各个属性之间的关系及其不同属性所反映的 AVO 背景趋势的变化特征; 讨论了利用这些 AVO 属性组合来构建速度、密度、波阻抗、拟泊松比因子、流体因子及拉梅常数等地震属性剖面的原理和方法; 选用不同地区的 25 个含油气砂岩模型进行了多属性 AVO 交绘图分析, 讨论其不同岩性参数在不同 AVO 属性交绘图上的响应特征。通过分析和讨论可以得出: ①利用文章给出的两组 AVO 属性不仅可以构建多种地震属性剖面, 而且还可以构建多参数、多属性 AVO 交绘图; ②不同属性的 AVO 交绘图体现了不同岩性参数对储层填充物及含油气性的敏感程度; ③只有综合利用多种属性的 AVO 交绘图才能可靠地对岩性参数进行反演和准确地预测储层。

关键词 地震波 AVO 图 储集层 地层参数 地震解释

AVO 交绘图是指利用 AVO 属性之间的依赖关系反映的背景趋势来进行定性 AVO 分析的一种技术。它是 AVO 数据简单且形象的表达方式, 也是检验 AVO 响应对应岩性或流体类型变化产生差异的理想方法^[1]。但由于对不同类型的储层及孔隙填充物, 其 AVO 响应不尽相同, 人们提出了不同形式的 AVO 交绘图^[2~4]。但是, 在目前已发表的文献中, 几乎所有的 AVO 交绘图都仅反映了两个 AVO 属性之间的关系, 而且主要讨论速度、密度的变化所体现的 AVO 背景趋势。

为了能够利用 AVO 交绘图反映和获取更多的储层特征参数以降低勘探风险, 为人们进一步研究孔隙流体与储层特征对 AVO 的影响及划分不同类型储层的 AVO 异常特征提供了新的思路, 笔者通过对 PP 波反射系数近似公式^[5,6]的不同表述, 讨论了利用 AVO 属性及其组合提取多种地震属性剖面的方法及多属性 AVO 交绘图分析的原理。在此基础上, 选用 25 个含油气砂岩模型^[7]进行了 AVO 交

图分析, 讨论了不同岩性参数对储层含油气性的影响和敏感程度, 并得出了相应的结论。

PP 波反射系数的近似公式

Aki & Richards 给出的 PP 波反射系数具有如下形式:

$$R_{PP}(i) = \frac{1}{2}(1 - 4\gamma^2 \sin^2 i) \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{1}{\cos^2 i} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4\gamma^2 \sin^2 i \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (1)$$

式中: $\gamma = \beta/\alpha$, $x = (x_1 + x_2)/2$, $\Delta x = x_2 - x_1$, x 分别表示 α 、 β 、 ρ 、 i 和 j ; 下脚标 1 表示入射波和反射波所在的介质为 1; 下脚标 2 表示透射波所在的介质为 2; α_1 和 α_2 、 β_1 和 β_2 、 ρ_1 和 ρ_2 分别表示介质 1 和介质 2 中的纵波速度、横波速度和密度; i_1 和 j_1 、 i_2 和 j_2 分别表示纵波的入射角和横波的反射角及纵波和横波的透射角。

利用三角函数之间的关系, 上式可以表示为:

$$R_{PP}(i) = A_0 + B_0(1 + \cos 2i) + \frac{C_0}{1 + \cos 2i} \quad (2)$$

* 本文由国家自然科学基金项目(49874029)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(97018705)、教育部回国启动基金(981303005)、教育部骨干教师资助计划长江学者专项共同资助。

作者简介: 孙鹏远, 1975 年生; 2001 年获吉林大学地探学院地球探测与信息技术硕士学位, 现为吉林大学地球探测科学与技术学院在读博士; 主要从事广角反射地震数据处理、AVO 正反演理论等方面的研究。地址: (130026) 吉林大学地探学院波动理论与成像技术实验室。电话: (0431)8502592, 8504583。E-mail: sunpy16210@etang.com 或 sunpy163@163.com

$$\text{式中: } \begin{cases} A_0 = \Delta\rho/(2\rho) - 2\gamma^2(\Delta\rho/\rho + 2\Delta\beta/\beta) \\ B_0 = \gamma^2(\Delta\rho/\rho + 2\Delta\beta/\beta), C_0 = \Delta\alpha/\alpha \end{cases} \quad (3)$$

类似地, Xu 等给出的拉梅常数反射系数近似公式也可以表示为:

$$R_{PP}(i) = A_1 + B_1(1 + \cos 2i) + \frac{C_1}{1 + \cos 2i} \quad (4)$$

式中各属性应满足:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\Delta\rho}{2\rho} - \frac{\Delta(2\mu)}{\lambda + 2\mu} = \frac{\Delta\rho}{2\rho} - \frac{\Delta(2\mu)}{\kappa + 4\mu/3} \\ B_1 = \frac{\Delta(2\mu)}{2(\lambda + 2\mu)} = \frac{\Delta(2\mu)}{2(\kappa + 4\mu/3)} \\ C_1 = \frac{\Delta(2\mu)}{2(\lambda + 2\mu)} - \frac{\Delta\rho}{2\rho} = \frac{\Delta(2\mu)}{2(\kappa + 4\mu/3)} - \frac{\Delta\rho}{2\rho} \end{cases} \quad (5)$$

各属性间的关系及地震剖面

对于公式(2)、(3)而言,如果取一些特殊的人射角,便可以得到 AVO 属性 A_0, B_0, C_0 及 A_1, B_1, C_1 :

$$\begin{cases} A = -10R_{0^\circ} + 18R_{30^\circ} - 7R_{45^\circ} \\ B = 2(2R_{0^\circ} - 3R_{30^\circ} + R_{45^\circ}) \\ C = 6(R_{0^\circ} - 2R_{30^\circ} + R_{45^\circ}) \end{cases} \quad (6)$$

利用公式(3)所给的 AVO 属性,可得到密度和横波速度剖面 $\Delta\rho/\rho = 2(A_0 + 2B_0), \Delta\beta/\beta = -(-B_0 + 2A_0\gamma^2 + 4B_0\gamma^2)/(2\gamma^2)$ 。如果借助于 Gardner's 经验关系式^[8] $\Delta\rho/\rho \approx \Delta\alpha/(4\alpha)$, 还可以得到纵波速度剖面 $\Delta\alpha/\alpha \approx 8(A_0 + 2B_0 + C_0)/9$ 和纵横波阻抗剖面 $R_{P0} = (13A_0 + 17B_0 + 13C_0)/9, R_{S0} = -(B_0 + 2A_0\gamma^2 + 4B_0\gamma^2)/(4\gamma^2)$ 。

根据上述这些属性剖面,还可以构建 $\Delta\mu/\mu$ 及 $\Delta(\mu\rho)/\mu\rho$ 属性剖面:

$$\begin{cases} \Delta\mu/\mu = 2\Delta\beta/\beta + \Delta\rho/\rho \\ \quad = -(-B_0 + 4A_0\gamma^2 + 8B_0\gamma^2)/\gamma^2 \\ \Delta(\mu\rho)/(\mu\rho) = \Delta\rho/\rho + \Delta\mu/\mu \\ \quad = -(-B_0 + 6A_0\gamma^2 + 12B_0\gamma^2)/\gamma^2 \end{cases} \quad (7)$$

另外,利用公式(5),还可以得到与纵横波速比无关的多种弹性参量属性剖面:

$$\begin{cases} \Delta\rho/\rho = 2(A_1 + 2B_1) \\ \frac{\Delta(2\mu)}{\lambda + 2\mu} = \frac{\Delta(2\mu)}{\kappa + 4\mu/3} = 2B_1 \\ \frac{\Delta(\lambda + 2\mu)}{\lambda + 2\mu} = \frac{\Delta(\kappa + 4\mu/3)}{\kappa + 4\mu/3} \\ \quad = 2(A_1 + 2B_1 + C_1) \\ \Delta\lambda/(\lambda + 2\mu) = 2(A_1 + B_1 + C_1) \\ \frac{\Delta\kappa}{\kappa + 4\mu/3} = 2\left(A_1 + \frac{2B_1}{3} + C_1\right) \end{cases} \quad (8)$$

根据拟泊松比因子定义 $\Delta q/q = \Delta\alpha/\alpha - \Delta\beta/\beta = \frac{\Delta(1/\gamma)}{1/\gamma}$, 而 $\frac{\Delta(1/\gamma)}{(1/\gamma)} = \frac{\Delta\lambda}{2(\lambda + 2\mu)} - \frac{(1/\gamma^2 - 2)\Delta(2\mu)}{\lambda + 2\mu}$,

如果进一步令 $\alpha/\beta \rightarrow 2$, 则有 $\frac{\Delta(1/\gamma)}{1/\gamma} \approx \frac{\Delta\lambda}{2(\lambda + 2\mu)} -$

$\frac{\Delta(2\mu)}{\lambda + 2\mu}$ 。这样,就可以得到拟泊松比属性剖面:

$$\Delta q/q = A_1 + C_1 \quad (9)$$

不同属性的 AVO 交绘图分析

上面讨论了利用不同的 AVO 属性可以提取多种地震属性剖面。事实上,利用这些不同的 AVO 属性之间的关系,还得到多种用于定性 AVO 分析的交绘图。

与岩性参数的变化关系

由上述各种 AVO 属性的表达式(3)、(5)可以看出,不同的 AVO 属性之间都可以表示成一种线性组合,而这些直线的截距都反映了不同地层参数的变化。对于 A_0, B_0, C_0 属性,可以得出如下线性组合:

$$\begin{cases} A_0 = -2B_0 + \Delta\rho/(2\rho) \\ A_0 = -\left(2B_0 + \frac{1}{2C_0}\right) + R_{P0} \\ A_0 \approx -(2B_0 + C_0) + 9\Delta\alpha/(8\alpha) \end{cases} \quad (10)$$

从式(10)可以看出,属性 A_0, B_0, C_0 存在多种线性组合,这些线性组合分别反应了地层密度、波阻抗及纵波速度的相对变化。图 1 给出了不同属性组合随密度、波阻抗等地层参数之间的关系。同样,利用公式(7)、(8)还可以得出不同属性组合与拉梅常数、拟泊松比因子之间的变化关系。

不同模型的多属性 AVO 交绘图

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。特别是地层的密度一般变化都比较小,而不同的波阻抗可以对应不同类型的含油气储层。因此,多属性的 AVO 交绘图对于提高勘探精度和降低勘探风险都有着非常重要的意义。为了说明这一问题,并体现不同类型储层所反映的地层参数变化特征,笔者利用 25 个含油气砂岩模型对上述 AVO 属性进行了 AVO 交绘图分析(图 2)。

图 2-a、b 分别为 AVO 属性 A_1 与 $B_1, C_1/2$ 与

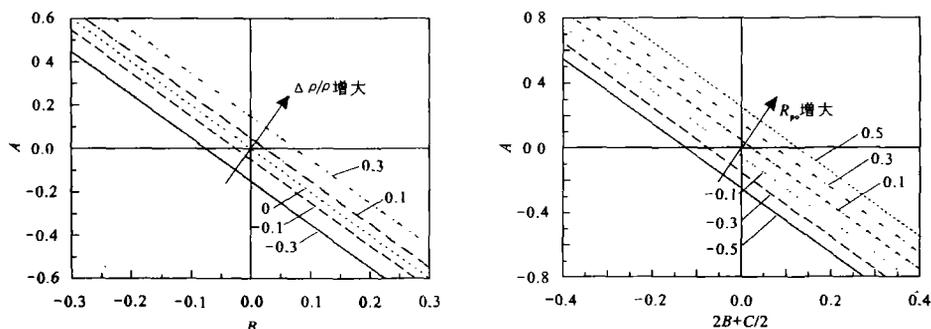


图1 不同属性组合反映的地层参数变化

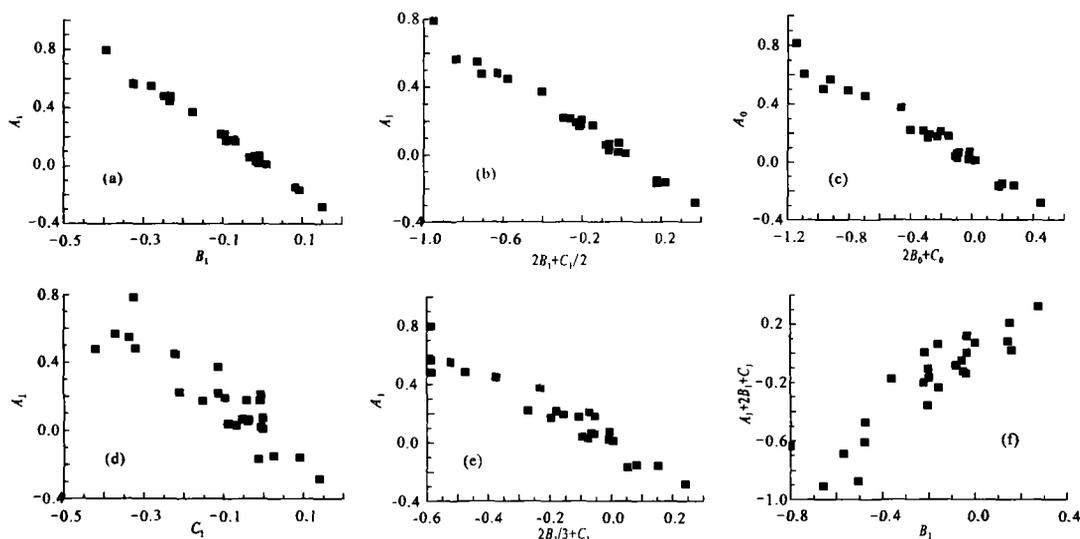


图2 不同AVO属性组合的交绘图

的交绘图。理论上,这两种交绘图的斜率分别为-2和-1,而截距分别反映了地层体密度和纵波阻抗的相对变化。从图2-a可以看出, A_1 与 B_1 的交绘图分布都比较集中,这说明对于不同的含油气砂岩模型,密度的相对变化比较小;而 A_1 与 $2B_1+C_1/2$ 的交绘图要比体现地层密度的交绘图分散,因此可以利用这一关系来定性反映地层波阻抗的变化。图2-c、d为 A_0 与 $2B_0+C_0$ 、 A_1 与 C_1 的交绘图,它们分别反映了纵波速度和拟泊松比因子的变化。由图可以看出,不同地层的纵波速度及拟泊松比因子的相对变化比较大,特别是拟泊松比因子,在整个交绘图背景趋势上的分布特别分散,这同时也说明纵波速度及拟泊松比因子的相对变化对储层的含油气性具有很大的影响。图2-e为 A_1 与 $2B_1/3+C_1$ 的交绘图,它反映了地层弹性参数 $\Delta\kappa/(\kappa+4\mu/3)$ 的变化规律。图2-f为 B_1 与 $(A_1+2B_1+C_1)$ 的交绘图,它反

映了 $\Delta(2\mu)/(\lambda+2\mu)$ 与 $\Delta(\lambda+2\mu)/(\lambda+2\mu)$ 弹性参量之间的关系。由图可知,对于不同的模型,拉梅常数的变化在AVO交绘图上也有明显的特征,而且比较分散,这同时也表明储层的含油气性对拉梅常数的变化非常敏感。

结 论

上面我们讨论了不同AVO属性之间的关系及其不同类型的AVO交绘图分析方法。并利用Castagna等人给出的25个含油气模型进行了交绘图分析,通过上面的讨论和分析,可以得出如下结论:①利用新的AVO属性及其它它们之间的关系不仅可以得到纵横波速度、密度、波阻抗等地震属性剖面,而且还可以得到流体因子、拟泊松比因子及多种弹性模量等属性剖面;②利用不同AVO属性在交绘图上的截距和梯度关系,可以很容易地获取密度、速度、

裂缝孔隙度数值评价技术*

秦启荣¹ 张烈辉² 刘莉萍¹ 李乐¹ 郭贵安³

(1. 西南石油学院 2. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室 3. 中国石油西南油气分公司川中油气矿)

秦启荣等. 裂缝孔隙度数值评价技术. 天然气工业, 2004; 24(2): 47~51

摘 要 裂缝是岩石在构造力作用下发生破裂的结果, 岩石的破坏程度在一定程度上能反映裂缝的发育程度和裂缝孔隙度的大小。据此, 我们建立了一套以构造为基础, 以构造地质和岩石力学理论为指导, 以数值模拟分析技术为手段的裂缝孔隙度的数值评价技术。文章首先介绍该技术的原理和技术思路, 然后以 GSM 沙一油气藏二维裂缝孔隙度数值评价为例, 简要介绍该技术的步骤和方法, 并展示了所作的具体结果。

主题词 裂缝孔隙度 数值评价 数值模拟 回归分析

裂缝及裂缝孔隙度的评价是长期困扰石油界的世界级难题; 目前评价裂缝孔隙度的技术方法主要有: 利用野外露头观测的裂缝长度和宽度资料计算裂缝孔隙度; 利用岩心观测资料分析计算裂缝孔隙度; 利用测井资料(成像、常规)计算裂缝孔隙度等。我们从裂缝的形成机理出发, 初步建立了一套以构造为基础、以构造地质和岩石力学理论为指导, 以数

波阻抗及弹性模量的等参量; ③不同 AVO 属性的交会图分别从不同方面反映了地层参数变化对储层含油气性的影响, 同时也体现了不同参数对含油气性及储层流体的敏感程度; ④储层的含油气性是多种地层参数共同作用的结果, 只有将多种属性的 AVO 交会图结合起来, 才能更准确、更可靠地描述储层特征。

参 考 文 献

- 1 Castagna J P, Swan H W. Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 1997; 16: 337~342
- 2 Castagna J P, Swan H W, Foster D J. Framework for AVO gradient and intercept interpretation. *Geophysics*, 1998; 63: 948~956
- 3 Sams M. Yet another perspective on AVO crossplotting.

值模拟分析技术为手段的裂缝孔隙度数值评价技术方法; 将这一方法用于川中 GSM 构造沙溪庙组油气藏的裂缝孔隙度数值评价, 效果较好, 并得到了现场技术人员的认同。

基 本 原 理

自然岩体中的裂缝按照成因主要分为 3 大类

- The Leading Edge, 1998; 17: 911~918
- 4 Foster D J, Keys R G. Interpreting AVO responses. 69th Ann Internat Mtg, Soc Expl Geophys, Expanded Abstracts, 1999; 748~751
- 5 Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology. Theory and Methods*. W H Freeman & Co, San Francisco, 1980
- 6 Xu Y, Bancroft J C. Joint AVO analysis of PP and PS data. *Crewes Research Reports*, 1997; 1~44
- 7 Castagna J P, Smith S W. Comparison of AVO indicators: A modeling study. *Geophysics*, 1994; 59: 1849~1855
- 8 Gardner G H F, Gardner L W, Gregory A R. Formation velocity and density: The diagnostic basis for stratigraphic traps. *Geophysics*, 1974; 39: 770~780

(收稿日期 2003-09-24 编辑 韩晓渝)

* 本文的实例部分为西南油气分公司川中气矿委托西南石油学院所作的“公山庙构造沙溪庙油气藏构造应力数值评价”研究课题的部分内容。

作者简介: 秦启荣, 1964 年生, 博士、教授; 一直从事构造地质和岩石力学方面的教学与科研工作, 研究方向为构造应力、裂缝及其预测; 西南石油学院优秀中青年骨干教师, 构造地质学术带头人, 曾获部级科技进步一等奖等 10 多项奖, 发表论著近 30 篇(部)。地址: (637001) 四川省南充市西南石油学院资源与环境学院。电话: (028) 88112433。E-mail: qqrong@163.net 或 qqrong@swpi.edu.cn