

文章编号: 0253-2697(2002)04-0042-04

裂缝介质中地震波方位 AVO 特征分析

范国章 牟永光 金之钧

(石油大学盆地与油藏研究中心 北京 102249)

摘要: 预测储集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,裂缝的存在将导致介质属性的变化,不同的裂缝发育模式具有不同的表现特征,地震反射波振幅的方位变化就是一个重要的特征。对不同裂缝各向异性地质模型的地震波方位 AVO 特性进行了分析,建立地震波方位 AVO 的变化特征与裂缝走向和倾向的关系,尤其是具有一定倾斜角度的裂缝对地震波方位 AVO 的响应特征,为利用振幅变化信息预测裂缝提供了依据。将其应用于千米桥古潜山有利裂缝发育带的分析,取得了一些效果,促进了该方法在油气勘探中的应用。

关键词: 裂缝; 各向异性; 地震波; 方位; 振幅-炮检距关系

中图分类号: P631

文献标识码: A

地震波的振幅是地震资料的一个重要参数,也是用来研究地层属性的重要信息。利用纵波方位 AVO 检测介质的各向异性在近几年得到了迅速发展, Schoenberg^[1]、D. Cray^[2]等利用地震波方位 AVO 检测裂缝的分布,取得了良好的效果。分析不同裂缝各向异性介质中地震波方位 AVO 变化特征与裂缝分布的关系及其影响因素,对于利用纵波的振幅特性预测裂缝的分布具有重要意义。

1 理论模型

1.1 各向异性介质中的 Zoeppritz 方程

常用的 Zoeppritz 方程及其简化形式^[3,4]的理论基础都是建立在各向同性介质中地震波波动方程基础上的,它不适用于分析各向异性介质中的情况。根据基本的应力和应变关系、应变和位移关系,结合边界条件,得到在各向异性介质中纵波入射时的反射系数和透射系数满足的 Zoeppritz 方程为

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha_1) & \cos(\beta_1) & -\sin(\alpha_2) & \cos(\beta_2) \\ \cos(\alpha_1) & -\sin(\beta_1) & \cos(\alpha_2) & \sin(\beta_2) \\ M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \\ T_{ps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \\ M_0 \\ N_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $M_1 = f_1 \cdot [C_{31}\sin^2(\alpha_1) + C_{33}\cos^2(\alpha_1) - C_{35}\sin(2\alpha_1)]$; $N_1 = f_1 \cdot [C_{51}\sin^2(\alpha_1) + C_{53}\cos^2(\alpha_1) - C_{55}\sin(2\alpha_1)]$
 $M_2 = f_2 \cdot [0.5 \cdot (C_{31} - C_{33})\sin(2\beta_1) - C_{35}\cos(2\beta_1)]$; $N_2 = f_2 \cdot [0.5 \cdot (C_{51} - C_{53})\sin(2\beta_1) - C_{55}\cos(2\beta_1)]$
 $M_3 = -f_3 \cdot [C'_{31}\sin^2(\alpha_2) + C'_{33}\cos^2(\alpha_2) + C'_{35}\sin(2\alpha_2)]$; $N_3 = -f_3 \cdot [C'_{51}\sin^2(\alpha_2) + C'_{53}\cos^2(\alpha_2) + C'_{55}\sin(2\alpha_2)]$
 $M_4 = f_4 \cdot [0.5 \cdot (C'_{31} - C'_{33})\sin(2\beta_2) + C'_{35}\cos(2\beta_2)]$; $N_4 = f_4 \cdot [0.5 \cdot (C'_{51} - C'_{53})\sin(2\beta_2) + C'_{55}\cos(2\beta_2)]$
 $M_0 = -[C_{31}\sin^2(\alpha_1) + C_{33}\cos^2(\alpha_1) + C_{35}\sin(2\alpha_1)]$; $N_0 = -[C_{51}\sin^2(\alpha_1) + C_{53}\cos^2(\alpha_1) + C_{55}\sin(2\alpha_1)]$

其中 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 为入射波速度与反射纵波、反射横波、透射纵波和透射横波速度的比值; C 和 C' 为上下层介质弹性张量分量。

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(G19990344)资助。

作者简介: 范国章,男,1973年生,2001年毕业于石油大学,现为中国石油天然气集团公司杭州石油地质研究所工程师,主要研究方向为石油地质和地球物理勘探。

1.2 裂缝各向异性介质中地震波方位 AVO 特征

根据露头、测井和岩心分析资料，建立了典型的裂缝分布模式及其与坐标系的关系(图 1)，三个模型的裂缝倾角分别为 90°、60°和 0°，并定义入射角为入射方向与 z 轴夹角，方位角为地震采集方位与 x 轴的夹角。用于地震采集的地质模型上下两层的各向同性参数为：上层厚度 4000m，密度 2.5g/cm³，纵波速度 4.531km/s，横波速度 2.539km/s；下层为裂缝发育层：厚度 1000m，密度 2.6g/cm³，纵波速度 5.8km/s，横波速度 3.349km/s。CDP 道集的最大炮检距为 5500m，炮检距增量为 50m，采集道数为 110，最大入射角约 35°，基本满足目前实际观测系统下地震资料分析的需要。结合实际地质情况，在分析裂缝对 AVO 的影响时，裂缝模型各向异性系数 ϵ 为 12%^[5]。

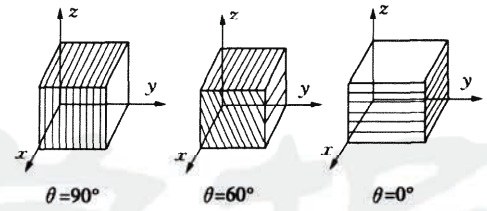


图 1 裂缝分布模式示意图

Fig.1 The distribution models of fractures

利用方程(1)，分别计算了图 1 中各裂缝模型顶面的反射系数随地震波入射角和方位角的变化，建立起反射系数变化特征与裂缝分布的关系。

1.2.1 裂缝倾角为 90°

图 2 中，反射系数不仅随着炮检距的变化而变化，同时也随着观测方位的不同而变化。在小炮检距时，各个方位上的反射系数变化相差较小；在中炮检距时，90°和 270°方位附近的反射系数随炮检距的增大变化较大，而在 0°和 180°方位附近，随炮检距的增大反射系数变化较小；在大炮检距时，90°和 270°方位附近的反射系数随炮检距的增大变化较小，而在 0°和 180°方位附近，随炮检距的增大反射系数迅速增大。即：在平行和垂直于裂缝面的方位上检测到的反射系数的变化特征明显不同。

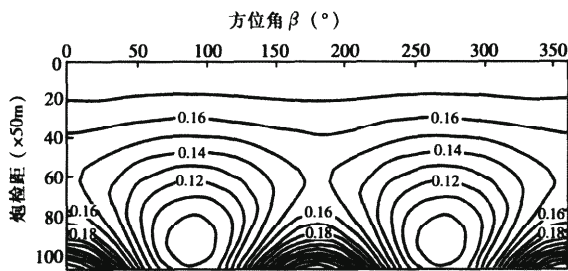


图 2 裂缝倾角为 90°时介质分界面上反射系数分布

Fig.2 Distribution of reflection coefficients on the surface of perpendicular fracture

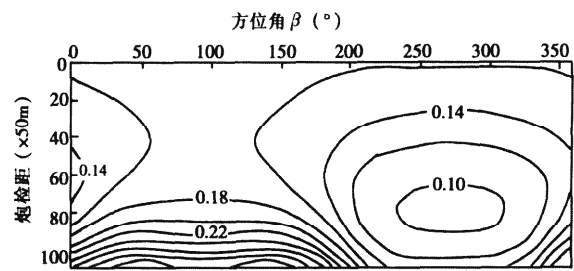


图 3 裂缝倾角为 60°时介质分界面上反射系数分布

Fig.3 Distribution of reflection coefficients on the surface of inclined fracture with obliquity 60°

1.2.2 裂缝倾角为 60°

图 3 中，反射系数随观测方位和炮检距的变化特征与 1.2.1 有很大的差别。由于在当前坐标系下裂缝的分布关于坐标轴平面是不对称的，反射系数的变化特征关于坐标轴平面也是不对称的。在中小炮检距下，270°方位附近的反射系数随炮检距的变化远大于 90°方位附近的变化值；恰恰相反，在大炮检距下，270°方位附近的反射系数随炮检距增大的变化远小于 90°方位附近的变化值。即反射系数随炮检距变化显著的方位处在与裂缝面走向近于垂直的位置，并且其变化特征与裂缝面的倾向具有一定的对应关系。

1.2.3 裂缝倾角为 0°

图 4 中，反射系数仅随炮检距的变化而改变，不存在方位上的变化特征。从这一点来看，与均匀介质分界面的反射特征相似。所不同的是，裂缝的存在会影响反射系数变

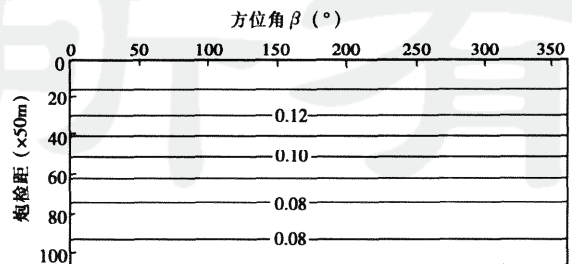


图 4 裂缝倾角为 0°时介质分界面上反射系数分布

Fig.4 Distribution of reflection coefficients on the surface of parallel fracture

化的快慢。通过对比可以为正确认识地层属性提供信息,只是难于利用反射系数的方位变化特征来预测裂缝分布。

综合上述3个裂缝模型的分析,当裂缝面与地层面存在一定的夹角,尤其是裂缝倾角较大时,裂缝的存在将引起反射系数随炮检距和方位角的不同而变化,并且反射系数的变化特征与裂缝的展布方向存在一定的对应关系。利用地震资料中方位AVO特征在平面上的变化可以预测裂缝的有利发育带,并预测裂缝展布的主要方位。结合具体的地质情况,根据振幅变化的大小还可以确定不同地区的裂缝发育程度。而在实际的地质情况下,Crampin^[6]等研究成果表明,由于裂缝的存在或其他因素引起的地层各向异性程度为15%是很常见的,最大可达30%以上,这对地震资料的处理和解释将带来不容忽视的影响,同时也可以为各向异性研究提供大量可利用的信息。

2 千米桥古潜山 BS* 井区方位 AVO 特征

2.1 裂缝地质模型的建立

根据岩心描述、FMI测井等资料,BS*井在4515~4649m地层发育以北倾为主的有效缝,其走向为近东西向,倾角变化较大,大多在50°~85°。在地震资料上,BS*井4498~4525m的层速度为5670m/s,速度较低,4525~4580m层速度为6300m/s,BS*井奥陶系顶反射较强。

根据地质情况,我们认为该井区裂缝发育与1.2.2中裂缝模型有相似之处。结合该区资料的观测系统,根据地震波入射方向的不同,将CDP道集沿测线展布方向分解为A1和A2两个角度道集(图5),分别对它们AVO特征进行分析,提取P波剖面 and 梯度剖面。

2.2 地震波方位 AVO 属性的变化

在研究区,奥陶系顶界反射的2个地震波方位AVO纵波剖面(图6)上,都可以看到较强的反射。在A1的AVO属性剖面上存在两个梯度高值区,而在A2的AVO属性剖面上存在一个梯度高值区,这种不同方位剖面上的变化特征显示正是需要捕捉的重点研究区段。

2.2.1 同一层段上不同方位 AVO 属性的变化

将角度道集A1和A2在L1层段的纵波剖面 and 梯度剖面交会图叠加在同一张图上[图7(a)],角度道集A1和A2上AVO属性的变化特征有较小的差别。引起这种变化的原因可能是裂缝的作用,也可能是误差因素,须对其他剖面进行分析才能确定。

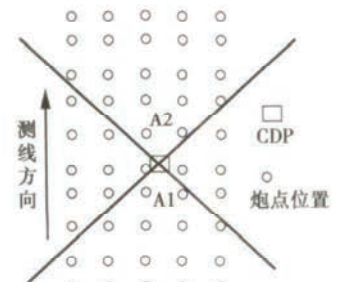


图5 CDP与方位道集、炮点位置及测线位置示意图

Fig.5 The relation of CDP with azimuthal gather, shot point and on-line position

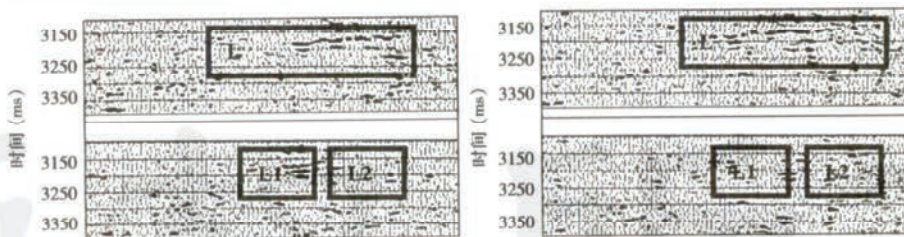


图6 角度道集A1和A2上的P波剖面 and 梯度剖面

Fig.6 Intercept and gradient profiles of azimuthal gather A1 and A2

将角度道集A1和A2在L2层段的纵波剖面 and 梯度剖面交会图叠加在同一张图上[图7(b)],可以看出角度道集A1和A2上AVO属性变化特征明显不同,由数学模型1.2.2的分析结果 and 该井区的地质情况可知,它反映了L2层段地层属性的变化,该区的裂缝作用引起较强的地层各向异性。L2层段AVO属性与L1层段也不同。在L2层段,投影点非常集中,充分反映了两个道集AVO属性特征的差别,而L1层段的投影点很分散,难以区分两个方位的变化趋势。

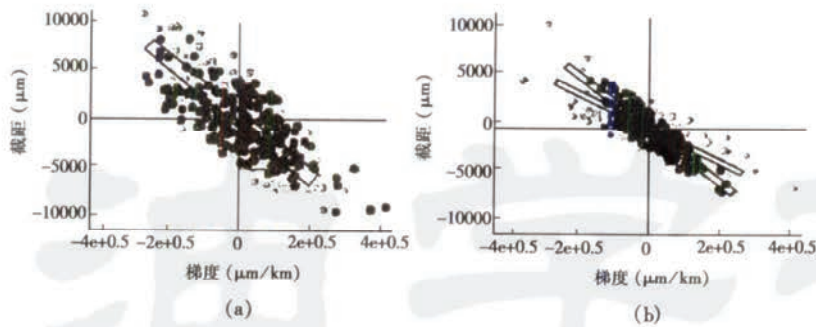


图7 角度道集 A1 和 A2 的梯度剖面与 P 波剖面交会图对比

Fig.7 Contrast of crossplot of intercept and gradient between locations L1 and L2 of azimuthal gathers

2.2.2 地震波方位 AVO 属性变化特征的地质解释

该井区奥陶系储层沉积经历了多次构造运动和古岩溶作用,使得储层的主要储集空间为溶孔和溶洞,裂缝的发育程度直接影响了储层的性能,也直接导致了储层发育带在平面分布上的不均匀性。如何在平面上区分出有利的裂缝发育带是寻找油气藏的首要任务。

根据地震波方位 AVO 属性特征分析结果,可以认为具有强烈各向异性特征的 L2 层段为有利的裂缝发育段,而 L1 层段则相对较差。

3 结论与建议

通过对裂缝介质中地震波方位 AVO 属性特征的分析,探讨了其在方位上的变化特征,建立了 AVO 的方位特征与裂缝展布方位的联系,为利用方位 AVO 预测裂缝发育带奠定了理论基础。同时,在千米桥古潜山进行了应用,在识别裂缝发育带上取得了成功,为裂缝非均质储层的评价发展了一种新的方法。

在石油勘探中,裂缝性储集层占有重要的地位,尤其在碳酸盐岩广布的西部地区,是寻找大型裂缝性油气田的有利地区,利用现有的三维地震资料开展地震波振幅特性、时间特性等方位属性特征的研究,有助于解决油气勘探的裂缝各向异性问题。

参 考 文 献

- [1] Schoenberg M A, Dean S, Sayers. Azimuth-dependent tuning of seismic waves reflected from fractured reservoirs[J]. Geophysics, 1999, 64(4): 1160 ~ 1171.
- [2] Gray D, Head Kim. Fracture detection in Manderson Field: A 3-D AVAZ case history[J]. Leading Edge, 2000, 19(11): 1214 ~ 1221.
- [3] Shuey R T. A Simplification of the Zoeppritz Equations[J]. Geophysics, 1985, 50(4): 609 ~ 634.
- [4] Aki K I, Richards P G. Quantitative Seismology[M]. W. H. Freeman and Co. 1985.
- [5] Thomsen L. Weak elastic anisotropy[J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1954 ~ 1966.
- [6] Crampin S, McGonigle R, Bamford D. Estimating crack parameters from observations of P-wave velocity anisotropy[J]. Geophysics, 1980, 45(3): 345 ~ 360.

(收稿日期 2001-04-16 改回日期 2002-01-18 编辑 张 怡)

AMPLITUDE VERSUS OFFSET CHARACTERISTICS OF AZIMUTH OF SEISMIC WAVE IN FRACTURED RESERVOIR

FAN Guo-zhang, et al. (*University of Petroleum, China, Beijing 102200, China*) ACTA 2002, 23(4): 42 ~ 45

Abstract: It is important to predict favorable fractured reservoir and its main azimuth of fracture during the exploration and exploitation of petroleum. The distribution of fractures will change the property of reservoir. The azimuthal change of seismic reflection amplitude is an important character. The amplitude versus offset (AVO) features of azimuth of seismic wave in anisotropic geological models with different distribution of fractures were analyzed. The relation between the AVO characteristics of seismic wave and the fracture strike and dip was built, especially for the tilt fracture, which provided the foundation to predict favorable fractured reservoir. The theory was also applied to analyze the favorable fractured zone of paleo buried hill in Qianmiqiao. The application result is of benefit to improve this method being used in petroleum exploration.

Key words: fracture; anisotropy; seismic wave; azimuth; amplitude versus offset

OIL FIELD DEVELOPMENT

NEW TECHNOLOGY SERIES FAVORABLE TO DEVELOP COAL BED METHANE RESERVOIRS YANG Lu-wu, et al. (*Asian-American Energy Inc., Beijing 100016, China*) ACTA 2002, 23(4): 46 ~ 50

Abstract: The commonly used technology for exploitation of coal bed methane (CBM) is not so working for CBM reservoir in China. Six particularities, including poor permeability, low reservoir pressure, poor desorptionability, regionally appeared pulverized coal lenses, etc., are summarized to characterize China CBM reservoirs. It is pointed out that five items are very important in developing China CBM resources. They are: ① enhancing reservoir permeability; ② cultivating adequate pressure difference from the production wellbore to far away; ③ speeding up gas desorption; ④ making use of the relief zone; ⑤ avoiding pulverized coal lenses. To develop various particular CBM reservoirs in China, three technology series are proposed. They are as follows: ① relief zone related gas production technology; ② multilateral horizontal well pattern plus cavitation technology; ③ commonly used surface drilling technology.

Key words: China; coalbed methane; reservoir; development technology

GEOMETRY OF ARTIFICIAL FRACTURES FORMED BY HYDRAULIC FRACTURING IN LASAXING OILFIELD OF DAQING AREA

WANG Xiu-juan, et al. (*Dept. of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*) ACTA 2002, 23(4): 51 ~ 55

Abstract: Geometry of artificial fractures produced by hydraulic fracturing is very important to assess stimulation effect and to study relationship between fracturing and casing damage. Study-history about artificial (hydrofracturing) fracture geometry in Daqing Oilfield was reviewed. The evidence of every conclusion about artificial fracture geometry was analyzed. Integrating research on geometry with stress-in-situ shows that Lasaxing oilfield in Daqing area is situated in a transitional zone of two stress-in-situ types, because the vertical principal stress is very near to the minimum horizontal one. In this zone, the vertical principal stress may be a minimum principal stress or an intermediate one. However, the latter are slightly dominant, especially in fractured well depth of more than 950m. It is concluded that vertical artificial fracture has a slightly higher priority over horizontal one in Daqing Oilfield.