

地震属性分析在高分辨率活断层 地震勘探中的应用¹

兰晓雯^{1,2)}

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2) 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要 通过分析影响地震属性的岩石物理特性及其在地震响应上的特征, 获得地震波传播过程中地震振幅、层速度与裂缝层密度、泊松比、纵横波速度、孔隙度、压力的关系。同时, 结合地震属性的分析技术, 利用地震正演模拟的方法提高地震勘探数据解释结果精确度和可信度, 为高分辨率的活断层地震勘探研究提供更为可靠的方法手段, 提高了地震数据的处理解释精度。

关键词: 地震属性 地震波传播 正演模拟 活断层

引言

高分辨率的地震勘探是未来活断层探测的发展方向。由于裂缝的存在, 造成了多种地震属性的变化, 测量这些地震属性的变化可以检测断裂。随着三维地震技术的发展, 地震属性技术在岩性和构造解释等方面得到了越来越广泛的应用。正演模拟可以帮助了解断裂是如何影响反射振幅和频率随偏移距的变化。本文利用断层附近已有的测井资料和钻井资料, 建立研究断层的地质综合模型和岩石物理模型, 通过断裂地层的正演研究技术, 研究断裂造成的地震波场和振幅的变化特征。

正演模拟能够直接提供断裂模型的理论地震响应特征, 通过对理论地震响应特征的分析, 可以建立断层地震响应与裂缝性质之间的关系, 并把由此得到的结果直接应用于地震资料的分析解释。通过对地层岩石物理参数的分析, 同时利用地震波正演模拟方法获得断裂影响岩石物理属性对地震响应的影响, 分析地震波传播过程中地震振幅、层速度、走时差等属性与裂缝层密度、泊松比、纵横波速度、孔隙度之间的关系, 从而提高地震勘探数据解释结果精确度和可信度水平。

地层间的速度差异是形成地震剖面上反射震相的主要因素, 根据活断层勘探的钻孔数据, 城市隐伏活断层一般为第四纪沉积, 因为沉积时间相对较短, 是未经胶结硬化的沉积物,

1 基金项目 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项 (No. ZDJ2010-2 and ZDJ2009-14)

[收稿日期] 2010-07-23

[作者简介] 兰晓雯, 女, 生于1978。在读博士, 助理研究员。主要研究领域: 地震波场正演模拟、地震勘探数据处理、地震工程。E-mail: lan_xiaowen@sina.com

沉积层土质类别主要包括有填土、砂土(砾石、粗砂、中砂、细砂、粉砂)、黏土、粉土等类型,多为粘土、黏土、砂土的交互层,层与层之间的波阻抗差异小。其中填土、粘土等速度相对较低,而细砂、砾石等速度相对较高,同一岩性特征的地层随着深度的增加速度增大。地震记录中反射震相主要在粘土与砾石或细砂层的分界面上产生。由断层因素引起地层属性变化包括:地层裂缝引起的地层密度的变化、孔隙度的变化、泥质含量变化,以及岩性的变化,同时断裂也会造成破裂带的各向异性。

1 影响地震属性的主要岩石物理参数

地震波特性和受到许多因素的复杂影响,诸如压力、温度、饱和度、流体类型、孔隙度、孔隙度类型等,这些因素常常是内在关联的,当一个因素变化时,其它许多因素也同时发生变化。在将岩石物理信息应用于地震解释中时,必不可少的要进行单一参数化影响的研究。

地震波速度和密度是地震勘探中的两项基本参数。速度和密度的变化反映了地震勘探中反射振幅的大小和极性。通过速度的变化可以判别介质属性的差异。Castagna等(1993)得到的不同岩性的密度与速度的经验关系式为:

$$\rho = Av_p^B \quad (1)$$

式中, ρ 为岩石的密度; v_p 为岩石的纵波速度,对于不同的岩性其系数A和B有所不同。因此依据此关系式及其深度,可以利用速度和密度的关系近似判断地层的岩性。

岩石的地震属性受到矿物成分、孔隙度、孔隙形态、孔隙流体成分、胶结程度、分选程度、泥质含量等影响,也与其所处环境的压力、温度、地质年代等因素有关。通常岩石的骨架颗粒具有较低的可压缩性,而孔隙流体具有较高的可压缩性。影响岩石地震属性的因素比较多,而很多因素又互相交织在一起,Wang(2001)总结了一些地震特性与岩石特性之间的定性关系,如表1所示。

表1 地震特性与岩石特性之间的关系

Table 1 The relationship between seismic attributes and rock properties

压实作用	由于连接性/接触性更好,压实好的岩石具有更高的地震特性(纵波、横波和波阻抗)。
固结作用	由于连接性/接触性更好,固结好的岩石具有更高的地震特性。
地质年代	因为压实的作用更有效,年代老的岩石具有更高的地震特性。
胶结作用	由于颗粒间的连接性和接触性更好,胶结的岩石具有更高的地震特性。
结构特性	结构特征包括:颗粒大小、分选情况、圆度等。一般情况下,颗粒尺寸大的砂层和颗粒分选性差的砂层由于具有更好的接触关系和更低的孔隙度,因此具有更高的地震特性。
体积密度	从统计意义上看,体积密度高的岩石具有更高的地震特性。
黏土含量	黏土对地震特性的影响取决于黏土微粒在岩石内部的位置。从统计意义上看,黏土含量高的岩石具有更高的地震特性。
各向异性	存在两种类型的各向异性:固有各向异性和诱发各向异性。几乎所有的页岩都具有固有各向异性;应力各向异性是诱发各向异性的主要起因。
裂缝	裂缝使地震特性趋于减小。当偏振波穿过裂缝时,纵波特性和横波特性所受裂缝影响比横波大得多。波的偏振正交于裂隙时,会降低 v_p/v_s ;线状排列裂缝也引起地震各向异性。
孔隙度	从统计意义上看,随着孔隙度的增加地震特性减小; v_p/v_s 通常对孔隙度没有很强的依赖关系。
岩性	白云岩具有很高的地震特性,其后是石灰石和砂岩;页岩可能又有比砂岩高或比砂岩低的地震特性。
孔隙形状	孔隙形状是影响地震特性的最重要因素,也是最难量化的参数。

纵横波速比与泊松比之间的关系也对地层岩性的分析有很大帮助,对于断裂带来说,引起其横波速度的因素有:岩石的破碎;破裂带岩性;泥质含量。Castagna (2000) 得出了不同岩石的纵横波速度关系式:

$$v_p = Av_s + B \quad (2)$$

对于不同的岩性,其系数 A 和 B 的取值不同。

对于不同的岩石,其泊松比分布范围是不同的。图 1 比较了不同岩性泊松比与纵横波速度之间的地震参数的关系 (Avserth 等, 2005)。从图 1 可以看出,综合泊松比 ν 和纵波速度 v_p 就能很好的将含水和含气砂岩分开,而单纯使用纵波信息则不能很好地区分各种岩性,因此,在岩性分析中,综合纵波和横波信息比单纯使用纵波信息更为有效。

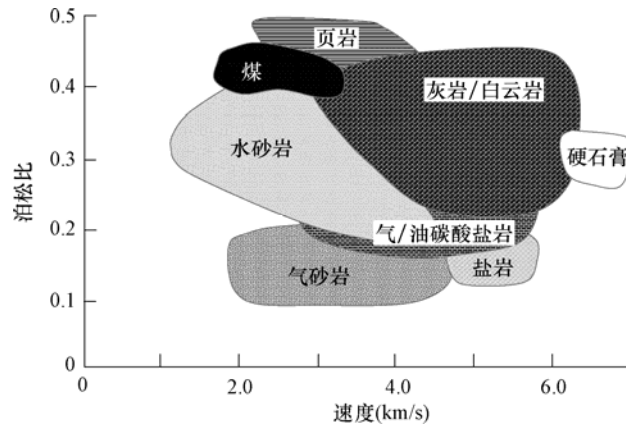


图 1 不同岩石的纵波速度与泊松比

Fig. 1 P-wave velocity and Poisson ratio of different rocks

同时,地层的速度变化还有以下规律:①速度的变化与深度呈函数关系,与固结良好的砂岩相比,未固结砂岩的速度随深度变化要大;②随着孔隙度或粘土含量百分比的增加,速度都将降低,孔隙度引起的速度降低大约是粘土含量引起的 2.5 倍;③随着孔隙度或粘土含量百分数的增加,泊松比也增加;④泊松比随深度降低 (Han 等, 2004)。

压力对地震特征的影响主要体现在以下 4 个方面 (Avserth 等, 2005):①对岩石骨架的可恢复弹性影响;②由压实和固结造成的孔隙度永久损失;③超高压对成岩作用的阻碍;④由孔隙压力引起的孔隙流体属性变化。张永刚等 (2008) 应用岩心样品的实验数据,采用以下数学模型来描述速度与压力间的关系:

$$v = v_0(1 - Ae^{-CP}) \quad (3)$$

式中, v_0 是参考点速度,一般取高压点作为参考值, A 和 C 为系数。

孔隙率变化也是影响地震属性的重要因素,砂岩速度-孔隙度趋势的斜率高度变化,并且在很大程度上依赖于控制孔隙度的地质过程。速度-孔隙度-粘土含量的关系为:

$$v_p = v_{p0} - a_1\phi - a_2C; \quad v_s = v_{s0} - b_1\phi - b_2C \quad (4)$$

式中, ϕ 和 C 分别是以体积百分数表示的孔隙度和黏土含量; v_p 和 v_s 是纵波和横波速度,单位 km/s。

在活断层地震勘探中,由于对地层动力学性能测试大多只进行剪切波速和密度的测量,目前还没有对第四纪层级地层各种特征地层的纵横波速比与泊松比的统计结果。一般也没有

对地层的压力、孔隙率进行测试的数据, 因此只能参考地层的密度和层厚度来近似判断, 以区分不同岩性在相同压力下的不同变化特征, 或者采用以往数据或经验数据进行判断。第四纪沉积层土层孔隙率及孔隙比包括, 砂土: 25%—60%, 0.30—0.90; 粉土: 30%—60%, 0.40—1.20; 粉质粘土 30%—60%, 0.40—1.20; 黏土: 30%—60%, 0.40—1.20。从实际工程应用来看, 可以依据断裂造成的孔隙度、地层剪切波速、密度等地震属性参数的变化进行综合分析。

2 地震属性数值分析方法

根据岩石物理实验得到的压力、温度、饱和度、流体类型、孔隙度、孔隙度类型对地震属性地层的密度和速度的影响规律, 不同岩性地层的泊松比、纵横波速度比等特征有所不同。但是通过岩石物理的方法在实验室获得的数据, 尺度问题是将岩石物理方法推广到实际应用中所面临的一大挑战, 因此利用实际样品在实验室测量得到的数学关系存在着推广难、物理成因解释难的问题。然而利用理论模型与经验关系有机地结合, 是一种比较理想的方法。

地层的岩石物理参数变化表现在地震响应上, 主要是反射时间的变化和振幅强度的变化。为建立岩石物理参数与地震振幅之间的关系, 利用岩石物理与地震响应的理论模型进行分析。通过分析影响地震属性的岩石物理特性及其在地震响应上的规律, 利用正演模拟方法建立地震属性与地震响应之间的联系, 将理论数据与实际勘探数据之间进行对比分析, 从而把地震属性分析的方法应用于地震解释当中, 最终获得较为精确的解释结果。

图 2 所示模型为地震勘探坐标系下 P 波下行入射到水平弹性界面的散射情况。当水平界面为 X 轴时, P 波从介质 1 入射到水平界面时的次生波与入射波能量关系遵循 Zoeppritz 方程。Zoeppritz 方程从运动方程和虎克定律出发, 推导各向同性介质 (在给定点的空间任何方向, 弹性特性恒定) 中的弹性波方程。然后, 利用连续方程 (界面上的垂直和切向应力及应力分量相同)、平面波的解和斯奈尔定律 (传播角度和波速的关系) 得到的方程计算反射 P 波和 S 波及透射 P 波和 S 波的振幅。地震波的透射和反射满足斯奈尔 (Snell) 定理。

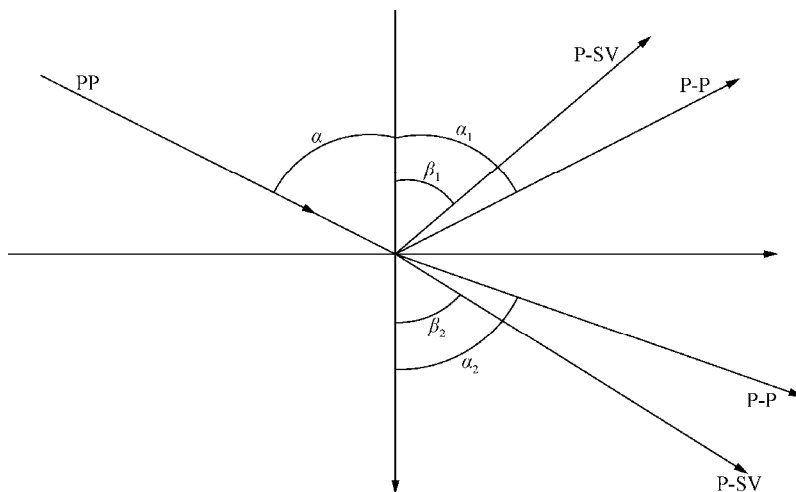


图 2 地震波在底层界面上的反射和透射模型

Fig. 2 The reflection and transmission model of seismic waves on the bottom interface

按照上述模型得到的 Zoeppritz 方程的具体表达式为 (赵邦六, 2007):

$$\begin{bmatrix} -\sin \alpha_1 & -\cos \beta_1 & \sin \alpha_2 & -\cos \beta_2 \\ \cos \alpha_1 & -\sin \beta_1 & \cos \alpha_2 & \sin \beta_2 \\ \sin 2\alpha_1 & \frac{V_{IP}}{V_{IS}} \cos 2\beta_1 & \frac{\rho_2 V_{2S}^2 V_{IP}}{\rho_1 V_{IS}^2 V_{2P}} \sin 2\alpha_2 & -\frac{\rho_2 V_{IP} V_{2S}}{\rho_1 V_{IS}^2} \cos 2\beta_2 \\ -\cos 2\beta_1 & \frac{V_{IS}}{V_{IP}} \sin 2\beta_1 & \frac{\rho_2 V_{2P}}{\rho_1 V_{IP}} \cos 2\beta_2 & \frac{\rho_2 V_{2S}}{\rho_1 V_{IP}} \sin 2\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{IP1P} \\ R_{IP1S} \\ T_{IP2P} \\ T_{IP2S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_1 \\ \sin 2\alpha_1 \\ \cos 2\beta_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, V_{1P} 和 V_{2P} , V_{1S} 和 V_{2S} 分别为介质模型的上覆地层 1 和下伏地层 2 的纵横波速度; ρ_1 和 ρ_2 分别为介质模型的上覆地层 1 和下伏地层 2 的密度; α_1 , α_2 , β_1 和 β_2 分别为反射 P-P 波, 反射 P-SV 波, 透射 P-P 波和透射 P-SV 波与法线的夹角; R_{IP1P} , R_{IP1S} , T_{IP2P} 和 T_{IP2S} 分别是 P-P 波反射系数, P-SV 波反射系数, P-P 波透射系数和 P-SV 波透射系数。

由于此方程复杂, 不能满足实际工作中的计算要求, 因此众多学者对此进行了简化 (Aki 等 1980; Shuey, 1985; 郑晓东, 1991; 杨绍国等, 1994; Hilterman, 1999)。

在上下层弹性参数变化不大, 入射角小于 30° 的前提下, 各种公式均能满足实际要求。而对于第四纪地层的勘探, 上下层界面属性差异不大, 勘探剖面深度较浅, 地震勘探时炮检距不大, 地震入射角一般均小于 30° , 因此, 本文用 Aki 等 (1980) 给出的地震反射振幅与炮检距的关系方程可以满足需求。

$$R_p(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{v_s^2}{v_p^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\sec^2 \theta}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p} - 4 \frac{v_s^2}{v_p^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta v_s}{v_s} \quad (6)$$

在上面的关系方程中, v_s , v_p , ρ , σ 均为介质上下层的平均值, 而 Δv_s , Δv_p , $\Delta \rho$, $\Delta \sigma$ 则为它们各自的差。

该方程可以很好地满足活断层勘探中上下层弹性参数变化不大的地层。据此对地层属性分析建立的地质模型进行地震属性变化的正演模拟, 能够更清晰地分辨属性差异, 从而利用正演模拟并辅助地震数据的解释将更为准确, 为高分辨率的活断层地震勘探研究提供更为可靠的方法手段, 提高地震数据的处理解释精度。

3 属性参数变化地震响应分析与实例

通过以上分析可知, 与地震响应密切相关的地层岩石物理属性参数包括: 地层密度、纵横波速度, 孔隙度、泊松比、纵横波速度。利用岩石物理特征的分析 and 统计得到的地震属性参数与地震响应之间的定量关系, 同时应用地震正演模拟的方法, 将数据的走时、振幅信息进行 AVO (Amplitude Versus Offset) 分析, 对地震剖面细部特征进行分析处理, 从而可确定地层结构特征。

为了研究断层属性及深度变化对地震响应的影响, 这里给出一个简单楔形薄层活断层模型 (图 3), 模型中最上面一层为上地层, 中间楔形地层为地层之间的裂缝地层, 最下一层为下地层。为说明断层深度和厚度对不同地震属性的地质模型在地震响应上的变化, 通过理论公式建立地震属性参数与地震响应之间的联系, 从而获得其影响规律。表 2 为断层模型属性表, 由活断层勘探获得的经验数据建立, 为了研究不同的地层属性特征, 分别给出了不同的断层模型属性进行正演模拟。其中, 属性 1 为高阻抗的地震属性特征; 属性 2 为零阻抗的地震属性特征; 属性 3 为低阻抗的地震属性特征; 底部为下地层。模拟中采用主频为 50Hz 的雷克子波进行正演模拟。图 4 为模拟结果。

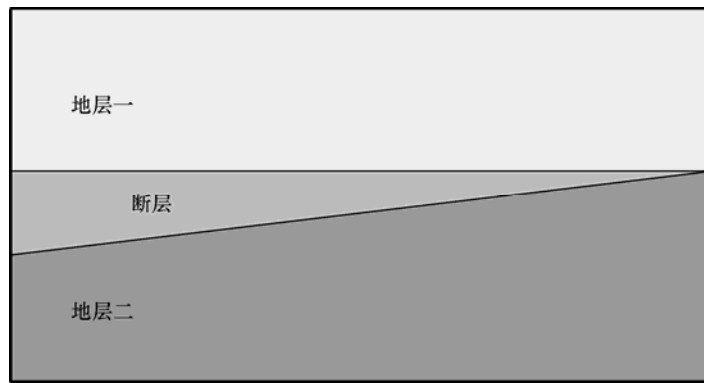


图 3 地质模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the geological model

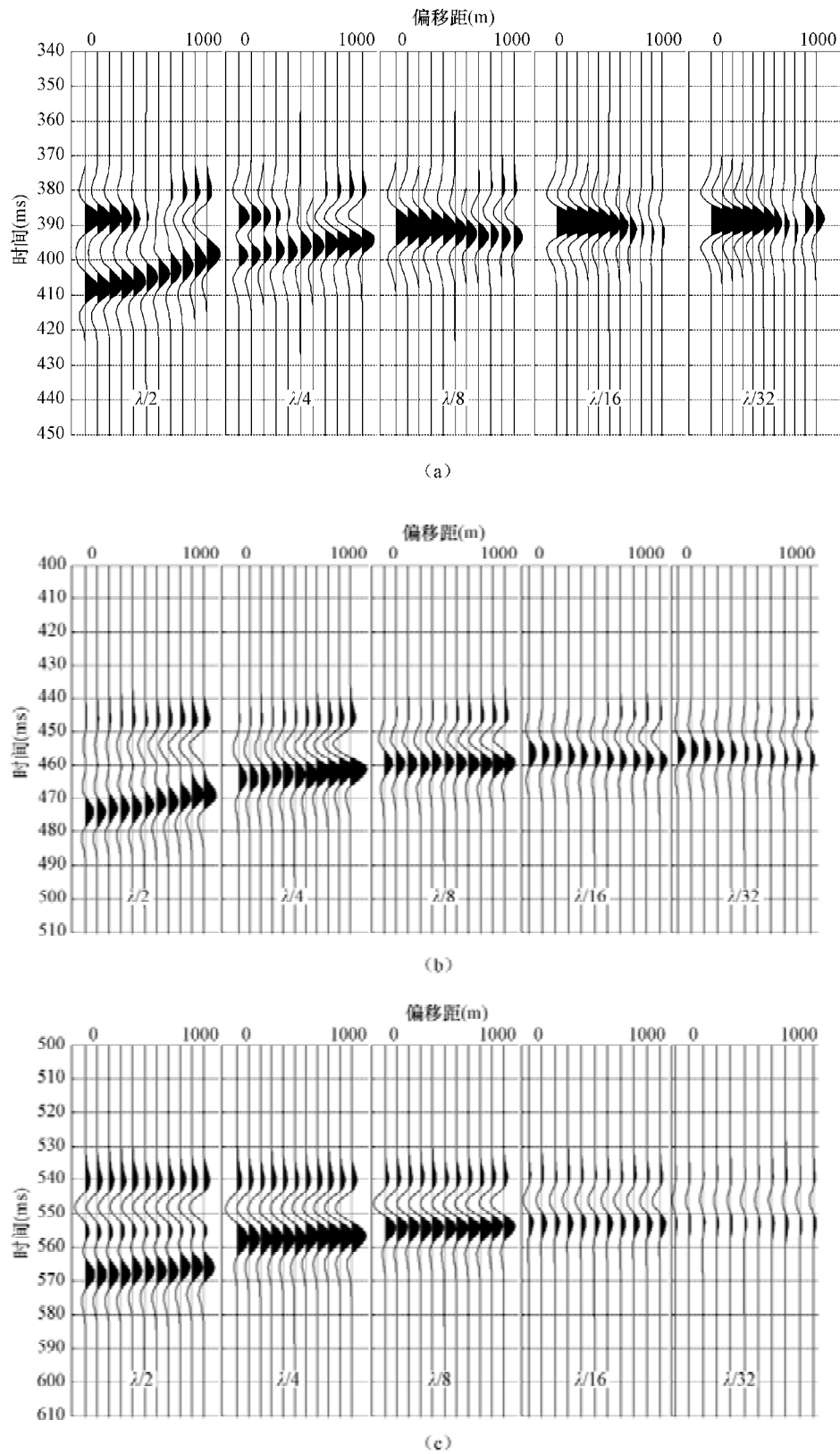
表 2 地质模型属性表

Table 2 Seismic attribute sheet of the geological model

模 型	地 层	v_p (m/s)	v_s (m/s)	ρ (g/cm^3)
I	上地层	1540	750	1.8
	断层	2050	1220	1.9
	下地层	2020	1260	1.7
II	上地层	1320	585	1.8
	断层	1520	790	1.7
	下地层	1390	830	1.6
III	上地层	1090	410	1.7
	断层	1060	430	1.6
	下地层	770	450	1.5

由图 4 可见，对于不同深度的断层，其振幅特性表现出不一样的变化规律，即使地层的岩性相同，由于地层厚度的变化，也会引起振幅特征的差异。另外，通过对不同的地层属性参数的变化规律可以看出，模型 I 中断层属性为高阻抗的地层，其振幅随偏移距变化特征为：零偏移距振幅强且为正极性，随着偏移距的增大，振幅呈减少趋势，当入射角足够大时会发生极性反转；模型 II 为近零阻抗差的断层介质，其振幅特征为：零偏移距振幅趋近于零，表现为弱振幅，随着偏移距的增大振幅逐渐增强；模型 III 为低波阻抗的断层介质，其振幅特征为：零偏移距振幅较强，呈现负极性，振幅随着偏移距的增大，振幅而逐渐增强，具有典型的负截距、负梯度振幅异常。

根据对南口孙河地震勘探数据的分析和处理，对其进行了精确的剖面解释。图 5 为精确解释后建立的地质模型模拟的单炮记录与实际单炮记录的对比。模拟剖面分为网格 2m，时间采样间隔 0.25ms，道间距 2m，子波频率 30Hz。



(a) 模型 I；(b) 模型 II；(c) 模型 III

图 4 断层界面厚度对地震振幅特征的影响

Fig. 4 The influence of fault thickness on seismic attributes

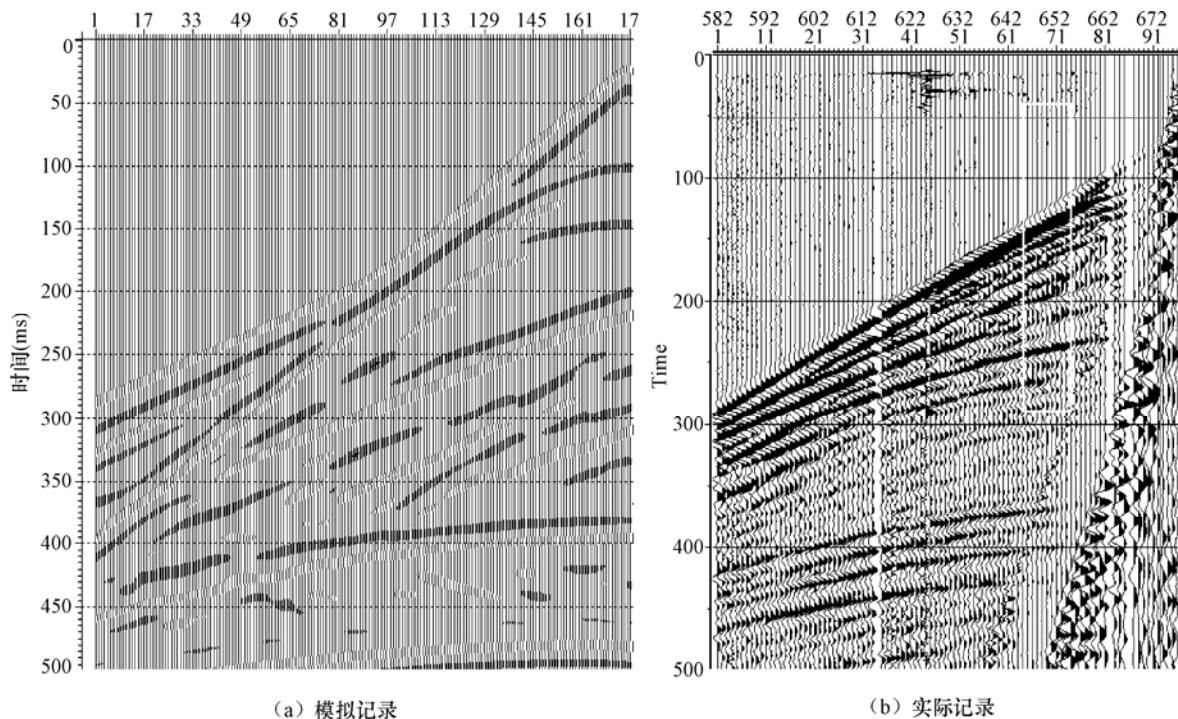


图 5 模拟记录与实际地震记录的对比

Fig. 5 Comparison of the seismic modeling profile (a) to the real seismic record data (b)

通过图 5 模拟记录与实际记录的对比可以看出, 模拟结果清晰地表现出了实际地震记录中的几条主要反射震相, 其时间也基本一致, 同时断层导致的绕射和同相轴的缺失以及能量的衰减均清晰反映。

综上所述, 通过模拟结果与实际记录的对比, 并应用前文分析的方法和结论, 可以量化断层的各项属性参数, 得到一个较为精确的地震剖面解释结果。同时, 利用地层地震属性参数影响速度变化规律的特征分析结果, 加以正演模拟分析, 可以更为准确的对地震勘探数据结果进行分析解释。

4 问题与建议

在浅层活断层探测中, 由于第四纪地层沉积层的岩土物理特性数据相对比较少, 因此在利用经验公式进行属性差异特征分析确定岩性方面, 其适用性还有待进一步研究。建议对活断层地层属性特征进行深入广泛的分析研究, 并对大量的第四纪沉积地层的分层界面岩石特征进行总结分类。

在活断层地震勘探中, 由于地层的压力、孔隙度数据缺乏, 在实际勘探解释时可应用性不强。而泊松比信息则可以利用经验公式并参考纵横波速度等信息进行分析预测, 可以加以利用。

由于裂缝和断层面会造成地震波传播的各向异性和散射特征, 因此, 通过各向异性介质波场模拟分析裂隙对地震响应的影响, 也能够更为明确地得出断裂因素对地震响应的变化情况, 在未来的研究中可加强这方面的分析和应用。

参考文献

- 杨绍国, 周熙襄, 1994. Zoeppritz 方程的级数表达式及近似. 石油地球物理勘探, **31** (3): 374—381.
- 郑晓东, 1991. Zoeppritz 方程的近似及其应用. 石油地球物理勘探, **40** (2): 126—144.
- 赵邦六, 2007. 多分量地震勘探技术理论与实践. 北京: 石油工业出版社.
- 张永刚, 2008. 复杂介质地震波场模拟分析与应用. 北京: 石油工业出版社.
- Aki K.I. and P.G. Richards, 1980. Quantitative Seismology: Theory and Method. San Francisco: W.H. Freeman & Co.
- Avserth P., T. Mukerji and G. Mavko, 2005. Quantitative Seismic Interpretation. Cambridge: Cambridge University Press.
- Castagna J.P. and M.M. Backus, 1993. Offset-dependent Reflectivity—Theory and Practice of AVO Analysis. Investigations in Geophysics. Vol. 8, Tulsa: Soc. Expl. Geophys..
- Castagna J.P., 2000. An introduction to this special section: AVO—the next step. The Leading Edge, **19** (11): 1187.
- Han D. and M.L. Batzle, 2004. Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities. Geophysics, **69**: 398—405.
- Hilterman, 1999. Is AVO the seismic signature of rock properties. Expanded Abstract of 59th SEG Mgt, P559.
- Shuey R.T., 1985. A simplification of the Zoeppritz equations. Geophysics, **50**: 609—614.
- Wang Zhijing, 2001. Y2K Tutorial: fundamentals of seismic rock physics. Geophysics, **66** (2): 398—412.

Application of Seismic Attribution Analysis in the Shallow Seismic Prospecting Methods to Active Fault Detection

Lan Xiaowen^{1, 2)}

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Based on the relationship between physical properties of rocks and seismic attributes, this paper analyzes the influential factors on the seismic amplitude and the wave velocity, which include density, Poission's ratio, P-wave velocity, S-wave velocity, porosity and pressure. By using seismic modeling method, seismic responding feature of the geological model were obtained. This technique can improve the accuracy and reliability of high-resolution seismic data interpretation, which is helpful for the high-resolution seismic data interpretation of active faults.

Key words: Seismic attribute; Seismic wave propagation; Seismic modeling; Active fault