

地层衰减在地震记录上的特征分析

李生杰* 施行觉 王宝善 叶林 孙道远 温丹 杨宏峰

(中国科学技术大学地球与空间科学系)

摘要

李生杰,施行觉,王宝善,叶林,孙道远,温丹,杨宏峰. 地层衰减在地震记录上的特征分析. 石油地球物理勘探, 2002, 37(3): 248~253

本文采用理论计算与实验模拟的方法,对利用地震反射资料估算的地层衰减量的影响因素进行研究,认为在使用反射地震记录计算地层衰减量时,应对地层引起的地震波相位变化进行分析,正确选择计算窗口的位置。使用叠前道集进行衰减分析时,需充分考虑不同炮检距对所计算的衰减量精度的影响。本文的物理模拟结果表明,不同炮检距对地震波衰减的影响较大。近炮检距处地震波的衰减较之远炮检距的相应衰减量更能准确反映地层的岩性信息。本研究对地震勘探工作具有一定的实用价值。

关键词 品质因子 地震子波 正演记录 物理模型 炮检距

ABSTRACT

Li Shengjie, Shi Xingjue, Wang Baoshan, Ye Lin, Sun Daoyuan, Wen Dan and Yang Hongfeng. Analyzing characters of formation attenuation on seismic records. *OGP*, 2002, 37(3): 248~253

The influence factors of formation attenuation estimated from seismic data are investigated by means of calculation in theory and simulation in laboratory in the paper. The authors considered that in order to determine the position of calculating window accurately, the variation of the seismic phase caused by formation attenuation should be analyzed when the latter is estimated from reflecting data. The effect of different offsets on the precision of estimated attenuation needs to be fully considered when using pre-stack seismic gather to analyze attenuation. The result of physical simulation show that the different offsets have strong influence on seismic attenuation. The attenuation of seismic wave in near-offset can more correctly reflect the lithologic information of formation than that in far-offset. The study has some practical value in the routine seismic exploration.

Key words: quality factor, seismic wavelet, forward record, physical model, offset

引言

地震波在黏弹性介质中传播的一个基本特征是能量的衰减及地震波的瞬时波形变化。地震波的衰减反映了传播介质的本征属性,因此,地震波在特定地层的衰减量信息包含了该地层的岩性及含流体性信息。许多研究者阐述了利用地震波的衰减量进行

地震监测^[1]或预测岩性^[2]、饱和度^[3]、流体性质^[4]甚至渗透率^[5]的事例。地震波的衰减信息在地震勘探中愈现其重要性。

引起地震波衰减的因素有很多,从广义上来说,可分为两类。一类是与地震波传播特性有关的衰减,如球面扩散、与地震波波长有关的介质非均匀性引起的散射^[6]以及层状结构地层引起的地震波衰减^[6](简称阻抗滤波或阻抗滤波的有效品质因子)。另一

* Li Shengjie, Department of Earth and Space Science, China University of Science and Technology, Hefei City, Anhui Province, 230026, China

本文于2001年8月16日收到,修改稿于2002年4月12日收到。

类是反映介质内在属性的地层本征衰减(称为地层固有品质因子)。地层固有品质因子具有重要意义,它反映了地层的岩性、含流体类型、流体饱和度、压力及渗透率等信息。

根据地震波衰减的一维模型,本文分别采用理论计算与物理模拟实验的方法,对地震波在黏弹性介质中传播的一些特点进行分析。重点讨论了由地层固有品质因子引起的地震波衰减特征,并对利用地震反射资料估算的地层衰减量精度的影响因素进行研究,分析了地层衰减引起的地震波相位变化,炮检距对地震波衰减的影响以及地层阻抗滤波与地震波总衰减的关系等。本项研究对实际地震勘探工作具有一定的实用价值。

方法原理

为研究地层的吸收衰减特性以及地震波传播的频散特征,我们首先讨论地震波在无损耗介质中的传播特征。假定在 $x = 0, t = 0$ 处产生脉冲信号,其频谱为 $A(\omega)$,其记录可表示为

$$A(0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (1)$$

其中 ω 为角速度。

如果该波动信号以恒定速度 v (不考虑传播方向) 在无损耗介质中传播了距离 z 或时间 t 后,其波形表示为

$$B(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) \exp\left[i\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)\right] d\omega \quad (2)$$

若将时间 t 作为地震波的传播起点,地震波以不同于 v 的速度 v' 传播了时间 t' 后,其记录可表示为

$$B(z, t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) \exp\left[i\omega\left(t' - \frac{z}{v} + \frac{z}{v'}\right)\right] d\omega \quad (3)$$

比较式(1)与式(3)可知,当 $v=v'$ 时,即地震波在弹性介质中传播一段时间 t 后,其波形保持不变,即有 $B(z, t') = A(0, t)$ 。

但地震波在实际地层(非弹性介质)中传播时,地震波的能量总是随着传播时间的增大高频能量急剧衰减,该衰减过程可用一个指数函数近似为

$$|B(z, \omega)| \approx |A(0, \omega)| \exp(-\alpha\omega z) \quad (4)$$

式中 α 为地震波能量衰减速率。

实际经验表明,衰减速率在较宽的频带范围内近似为一常数。如果我们期望能采用一个线性模

型^[8]来描述地震波的衰减过程,则上式违背了系统的因果性原理。解决上述问题的方法之一就是允许地震波在非弹性介质中传播时存在速度频散现象。

因此,对于存在吸收衰减的介质,地震波传播了距离 z 后,其记录可表示为

$$B(z, \omega) = A(0, \omega) \exp(-i\omega kz) \quad (5)$$

其中 k 为复波数,可表示为

$$k = \frac{\omega}{c(\omega)} + i\alpha(\omega) \quad (6)$$

式中 c 为地震波的相速度,可由频散公式确定

$$\frac{c(\omega_1)}{c(\omega_2)} = 1 + \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)$$

式中 α 为衰减因子,与品质因子关系如下

$$\alpha = \frac{\omega}{2Qv}$$

根据线性叠加原理,地震波传播了距离 z 和时间 t 后,其记录可表示为

$$B(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(0, \omega) \exp[i(kz - \omega t)] d\omega \quad (7)$$

由频散公式以及衰减因子与地层品质因子的关系,很容易推得非弹性介质的传播因子 $\rho(\omega) = \exp[i(kz - \omega t)]$ 与品质因子的关系式

$$\begin{aligned} \rho(\omega) &= \exp[i(kz - \omega t)] \\ &= \exp\left(\frac{-|\omega|z}{2Qv}\right) \exp\left[i\omega\left(\frac{z}{v_0} - t\right)\right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中 v 可看成高频相速度。当最小相位波源起始于 $t = \frac{z}{v}$ 时,其相位谱 $\varphi(\omega)$ 则有如下关系^[9]

$$\rho(\omega) = \exp\left[-\frac{|\omega z|}{2Qv} - i\frac{\omega z}{v} - i\varphi(\omega)\right] \quad (9)$$

其中相位谱 $\varphi(\omega)$ 包含了速度频散项。相位谱与衰减因子或振幅谱的关系如下

$$\varphi(\omega) = \frac{\omega z}{v} + \mathbf{H}\{\alpha(\omega)\} = \mathbf{H}\{\rho(\omega)\} \quad (10)$$

$\mathbf{H}\{\}$ 为希尔伯特变换。

则地震记录可记为

$$B(z, t) = A(0, t) * \rho(z, t) \quad (11)$$

其中,传播衰减因子 $\rho(z, t)$ 可由式(8)或式(9)确定,即

$$\rho(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{-|\omega|z}{2Qv}\right) \exp\left[i\omega\left(\frac{z}{v} - t\right)\right] d\omega \quad (12)$$

上述讨论的平面波衰减过程都是一维情况下地震波的衰减特征。在此过程中,地震波传播的最大衰

减方向就是相位滞后增大的方向。对于一般情况下的平面波,这两个方向是不同的。

模型分析

模拟地震波在黏弹性介质中的传播特征可直接利用式(9)计算。例如,对于深度为 z 的单个反射界面的响应,可利用式(9)的反傅氏变换得到

$$p(\tau, t) = \text{IFT}\{p(\omega)\} \quad (13)$$

其中 $\tau = \frac{2z}{v}$ 为垂直双程旅行时。

根据最小相位的特性及希尔伯特变换的线性关系,对于深度 z 反射界面的响应可表示为

$$p(z, t) = p'(\tau, t)$$

其中 p' 表示 $p(\tau, t)$ 的 $j-1$ 次自相关。所以,对于以时间间隔为 τ ,反射系数为 $r_k (k=1, 2, \dots, n)$ 的 n 层反射波,其记录可表示为

$$s_i = r_1 p_i^1 + r_2 p_i^2 + \dots + r_n p_i^n \quad (14)$$

采用上述方法,本文分别计算了8层无衰减(图1左侧)和有衰减的合成记录道(图1右侧)。所采用的衰减模型见表1。

表1 地层衰减模型

地层	$v_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	厚度/m	Q
R ₁	2500	2.19	2000	150
R ₂	3559	2.39	524	228
R ₃	3395	2.37	244	206
R ₄	3788	2.43	188	262
R ₅	3456	2.38	253	214
R ₆	3814	2.44	188	266
R ₇	3980	2.46	233	292
R ₈	3837	2.44	328	269

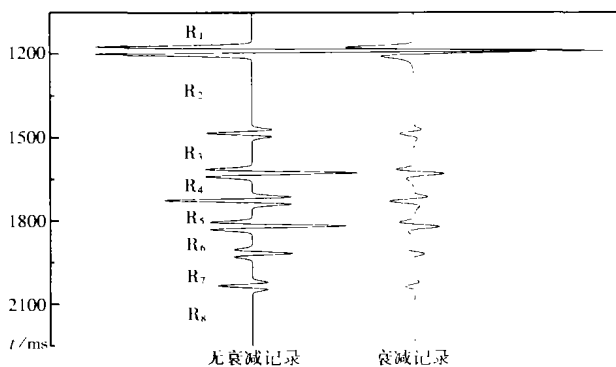


图1 理论合成衰减模型记录与无衰减记录对比

通过对合成的无衰减记录和有衰减记录对比分析可知,地震波在衰减介质中随着传播时间的增大,高频信息迅速衰减,振幅信息的衰减可用指数函数近似表示。伴随着振幅衰减的过程,地震波的相位在衰减地层中发生相移。相位角的变化使得衰减后的记录中,各阻抗界面的反射能量向子波前部集中,主峰宽度变窄,大约为无衰减记录主峰宽度的四分之一。

物理模拟分析

波动信号的衰减特征也可通过实验室进行观测。本文所使用的实验材料分别为铝板、钢板、岩石样品和铜板。为了便于理论计算,在模拟实验前分别对上述材料的物性参数进行了测定,结果见表2。

表2 实验材料物性参数

材料	厚度 (mm)	v_p (km/s)	v_s (km/s)	ρ (g/cm^3)	Q
铜板	19.48	4.48	1.69	8.90	1000
岩石样品	15.18	5.84	3.37	2.81	30
钢板	19.42	5.80	2.24	7.80	1000
铝板	19.16	6.39	3.69	2.70	5000

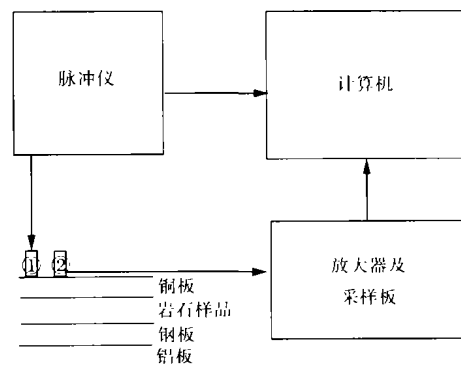


图2 物理模拟实验装置示意图

物理模拟实验装置的示意图如图2所示。实验过程中,为模拟地震勘探中不同炮检距接收到的记录,我们将发射换能器固定,接收换能器与发射换能器初始位置间的距离(炮检距)设定为3cm,并记录该位置处的反射波形。之后,以0.5cm为间距(道间距)沿直线方向移动接收换能器的接收位置,记录不同接收点位置的反射波。实验观测到的记录如图3所示。

同时,我们根据表 2 中实验材料的参数及上述正演计算方法,计算出该物理模型的理论记录,并分别对各实验材料的反射界面特征进行了标定,标定结果如图 3 中箭头所示。

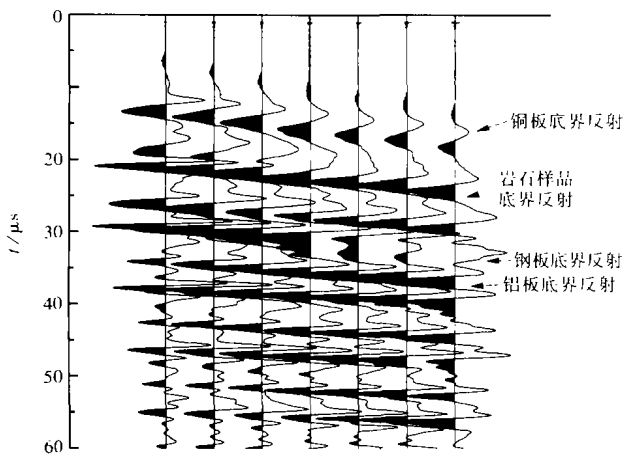


图 3 实验模拟地震记录

由图 3 可知,地层的吸收作用不仅改变反射波的能量、滞后反射波的相位,而且这种吸收作用将随着入射波的角度不同而发生变化。其变化主要表现在两个方面:在横向上,由于岩石样品相对较低的衰减品质,使得岩样底界及其随后的反射波能量随着炮检距的增大而减弱;衰减层之后的反射波相位随着炮检距的增大相位角发生转动。反射波相位角的变化严重影响了同一反射界面相邻记录道的反射振幅相对关系。在纵向上,衰减引起的相位变化随着炮检距的变化而变化,位于小炮检距位置处的记录相位变化较小,随着炮检距的增大相位变化加剧。

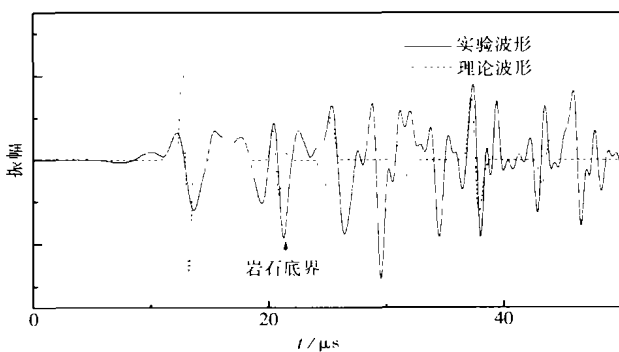


图 4 理论记录与实测记录对比示意图

根据本文所使用的各种实验材料的物性参数及前述理论正演计算模型所计算的一维理论衰减记录与实测的反射记录具有一定的相似性,如图 4 所示。通过对图 4 分析可知,根据岩石样品测定的固有品

质因子所计算的理论记录与实测的反射记录相比,理论记录的衰减幅度没有实测记录的大。产生该现象的原因之一是波在层状介质中传播时,其振幅幅度不仅要受到介质的固有品质因子的影响,而且将受到介质间各个阻抗的滤波作用,即地层滤波作用^[7]的影响。Banik 等人定义了一个与频率无关且反映了阻抗滤波作用的有效品质因子 Q_c 。

$$Q_c = \frac{\omega}{2R(\omega)} \quad (15)$$

其中 $R(\omega)$ 为介质反射系数的归一化功率谱,由 $R(\omega)$ 可构成一个统计平稳的时间序列。

因此,由式(8)所表示的衰减函数 $|F(\hat{\omega}, \tau)| = \exp(-\omega\tau/2Q)$ 中, Q 值应是介质固有品质因子 Q_0 和阻抗滤波的有效品质因子 Q_c 的综合反映^[10],即

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_c} \quad (16)$$

根据理论记录与实测记录对比可知,理论记录的相对衰减量约为实测衰减量的三分之二。换言之,由 Q_c 引起的衰减在波动过程中的总衰减中占有一定的比例。

野外资料分析

根据上述分析,我们对实际野外地震资料进行了衰减补偿量分析。所采用的补偿褶积模型为

$$X(f) = \int e^{-2\pi f t} e^{-\frac{\pi}{Q} [|f| + iH\{ |f| \}]} \cdot r(t) dt \quad (17)$$

及

$$s(t) = w(t) * x(t) \quad (18)$$

其中: $x(t)$ 为地震波在衰减介质中的响应; $s(t)$ 为经地层吸收衰减后的地震记录; $w(t)$ 为震源响应。式(17)中 $r(t)$ 可由下式确定

$$r(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j!} \left[\frac{\pi t}{Q} \right]^j [g^{(j)}(t) * x(t)] \quad (19)$$

其中 $g(t)$ 为 $|f| + iH\{ |f| \}$ 的反傅氏变换,且 $g^{(j)}(t) = g^{(j-1)}(t)g^{(j-2)}(t)\dots g(t)$ 。

上式中的 Q 为衰减介质的固有品质因子 Q_0 与阻抗有效品质因子 Q_c 之和。本文在选取 Q_c 时,将介质固有品质因子 Q_0 的两倍作为 Q_c 的取值。如在图 5 中双程反射时间 1800ms 时刻,由 CDP651 位置处钻井资料计算的固有品质因子为 375,则取 $Q_c = 750$,因此地层总衰减量为 $Q = 250$ 。

采用该方法进行处理的实际地震记录效果如图 5 所示。

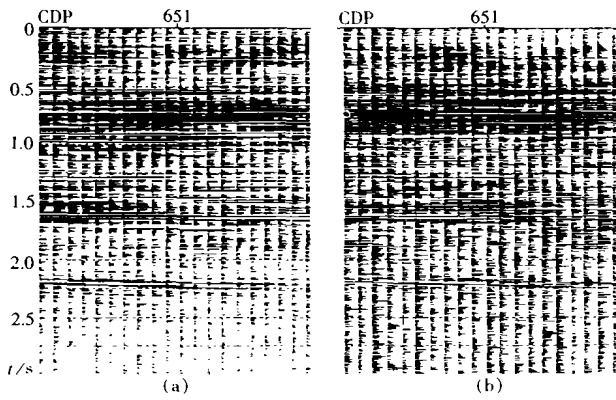


图5 野外资料衰减补偿效果分析

(a) 衰减记录; (b) 衰减补偿记录

该地震记录经上述方法补偿后,剖面质量显著提高,反射能量由浅至深基本保持一致。地震记录的分辨率得到提高。由式(8)可知,地震波在衰减介质中传播呈指数衰减,即地震记录的高频信息较之低频信息衰减得快而剧烈。地层的衰减作用使得地震

波的频率降低,地震波随着传播距离的增大,其子波形态变得越来越宽,其频谱表现为有效频率成分大多集中在较低频率范围内,如图6所示。该图分别反映了图5a中0.5,1.5,2.0s处地震子波的形态及其频谱。

通过衰减补偿处理后,地震记录的浅、中、深层的子波形态明显得到改观,子波的主峰宽度较之衰减补偿前压缩了很多,其频带得到合理的拓宽。不同深度的子波形态趋于一致,且浅、中、深层的频带范围保持较好,如图7所示。该图反映了相应于图6中不同时间位置衰减补偿后子波的形态及其频谱。

实际资料的处理结果表明,采用综合衰减品质因子对地震波在衰减地层中传播的影响进行校正是一种行之有效的方法。衰减补偿效果也说明了地震波的衰减不仅与反映地层性质的固有品质因子有关,而且还与其他因素引起的地震波散射有关。这从另外一个角度说明,由实际地震资料计算的地震波

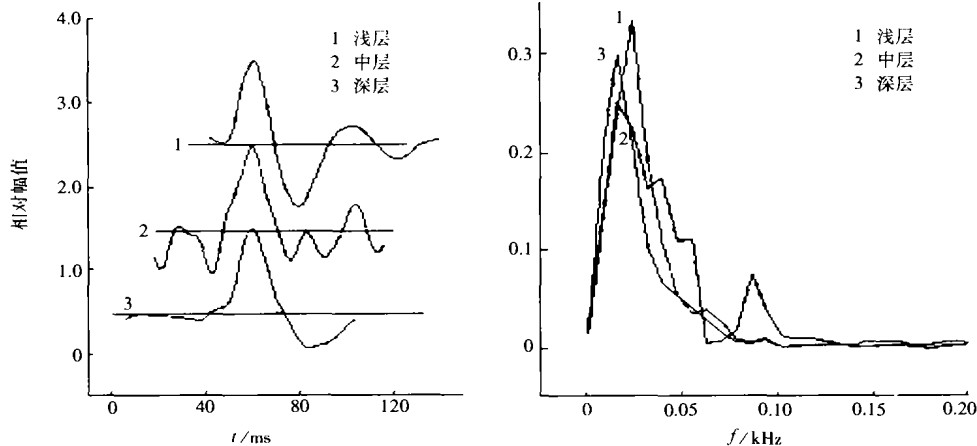


图6 衰减地层中不同传播时间子波形态(左)及其频谱(右)

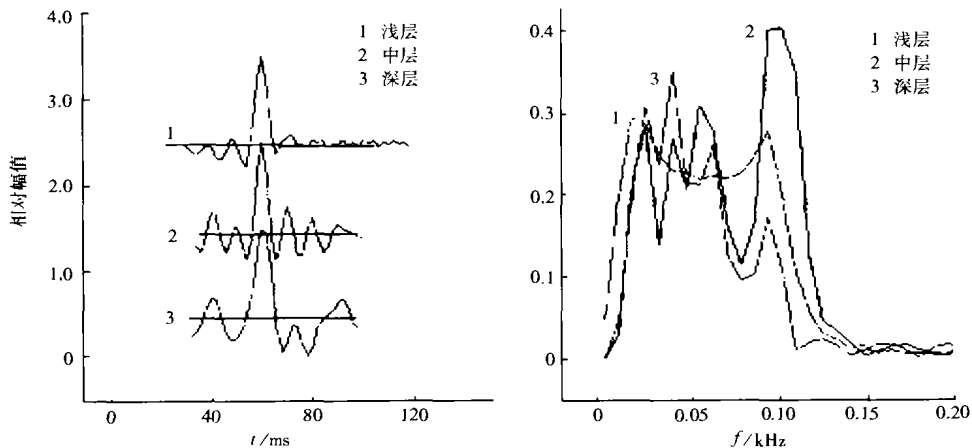


图7 衰减补偿后相应时间子波形态(左)及其频谱(右)

衰减量中,不仅包含了有意义的地层性质信息,同时也包含了与地层性质无关的散射信息。

结论与讨论

本文对地震波在黏弹性介质中传播及由此而引起的能量衰减和速度频散进行了研究,并给出了地震波衰减正、反演数学模型的解析式。该解析式仅反映了地层固有品质因子及其阻抗滤波效应而引起的地震波衰减作用,不包含与地震波长有关的地层非均匀性引起的地震波频散影响。

根据地震波在黏弹性介质中传播的衰减特征,进行岩性及含流体性预测的依据主要是介质的固有品质因子反映了该介质的本征属性。因此由反射地震记录计算地层衰减量时,需综合考虑地层衰减在地震记录中的特征。如在计算目的层的衰减量时,应对目的层引起的地震波相位变化进行分析,正确选择计算窗口的位置。使用叠前道集进行衰减分析时,需充分考虑不同炮检距对所计算的衰减量精度的影响。本文的物理模拟结果表明,不同炮检距对地震波的影响较大。地震波的相位随着炮检距的增加相位角发生变化,衰减量随着炮检距的增加缓慢减小。小炮检距处地震波的衰减较之大炮检距的相应衰减量更能准确反映地层的岩性信息。炮检距虽然对所计算的地层衰减量有一定的影响作用,但该因素也可作为因固有品质因子引起地震波衰减的一种指标。

由地震资料计算的衰减量中,不仅包含了反映目的层的岩性、含流体性等信息的地层固有品质因子,而且也包含了与阻抗滤波及地层非均匀性等因素引起的地震波散射损耗。

本文在讨论地震波的衰减时,采用一维模型进行理论分析。由于该模型未考虑地层横向不均匀性,因此由此模型得到的地震波衰减特征只能是一种定性的认识。同时,物理模型的简化可能掩盖了许多衰减与炮检距之间的复杂关系。但上述结论反映了地震波衰减的基本特征。

参 考 文 献

- [1] 黄中玉,王于静,苏永昌. 一种新的地震波衰减分析方法——预测油气异常的有效工具. 石油地球物理勘探, 2000, 35(6): 768~773
- [2] Batzle M, Han D H and Castagna J. Attenuation and velocity dispersion at seismic frequencies. *Expanded Abstracts of 66th SEG Mtg*, 1996
- [3] Jones S M. The effect of degree of saturation on ultrasonic velocity and attenuation in sandstones. *Expanded Abstracts of 67th SEG Mtg*, 1997
- [4] Klimentos T and McCann C. Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones. *Geophysics*, 1990, 55(8): 998~1914
- [5] Klimentos T and McCann C. Attenuation of P- and S-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water. *Geophysics*, 1995, 60(2): 447~458
- [6] 王宝善,孙道远,李生杰等. 岩石非均匀性对超声波衰减的影响及其修正. 中国地震, 2001, 17(1): 1~7
- [7] Banik N C, Lerche I and Shuey R T. Stratigraphic Filtering, Part 1: Derivation of the O'Doherty-Anstey Formula. *Geophysics*, 1985, 50(3): 2768~2774
- [8] Futterman W I. Dispersive body waves. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67: 5279~5291
- [9] Aki K and Richards P G. *Quantitative Seismology Theory and Methods*, M H Freeman and Company
- [10] Lerche I and Menke W. An inversion methods for separating apparent and intrinsic attenuation in layered media. *Geophys J R*, 1986, 87: 333~347

更 正

应作者要求,本刊 2002 年第 2 期发表的“埕北 30 潜山构造演化与油气富集规律研究”一文中,作者单位由“胜利油田管理局物探公司”更改为“胜利油田有限公司物探研究院”,其中第一作者谭明友现在中国科学院兰州地质研究所攻读博士学位。

《石油地球物理勘探》编辑部