

微地震信号低衰减传播

肖 健,孙书廷,刘建中

(北京科若思技术开发股份有限公司,北京 100082)

[摘要] 本文探讨了弱地震信号低衰减传播的可能性。结果表明,地下的地震信号传播介质均表现出一定的弹性,振动信号幅度在低于介质弹性限度时传播,衰减很小,表现出低衰减特征。这一特点保证了可以在地面,甚至黄土覆盖区监测到微地震信号。

[关键词] 微地震;低衰减;非弹性衰减

[中图分类号] P315.73 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0083-05

1 前言

微地震监测技术是地震学研究的前沿技术,随着油田开采科学性的增加,已经成为一个不可或缺的实用监测手段。油田微地震是指-2至-5级地震,震级小、信号弱,震源处地动位移幅度常常在微米量级。在地面能否接收到如此弱的微地震信号成为一个重要的议题。事实上,即使在黄土高原,也接收到了来自千米以下深度的微地震信号,这表明微地震信号必有一个特定的传输机制,可以在几千米外被接收到。

2 地震信号的衰减机制

地震信号在传输过程中衰减,随着传输距离增加,地震信号幅度趋小。衰减有多种原因:散射衰减、辐射面积增加衰减、非弹性衰减;还有很多其他衰减原因,但对于近源深地震而言,上述衰减是信号在传输过程中趋小的主要原因。

2.1 散射衰减

地质界面、颗粒晶面均会形成反射、折射,使本来传向接收点的地震信号传向其他方向,致接收点的地震波能量趋小,减小了信号幅度。

在信号从高速层进入低速层时,反射信号弱,衰减相对较小;反之,衰减大。

界面上入射P波和反射、折射P波和S_v波的能量之间的关系如下^[1]

$$\frac{1}{2}\rho A_1^2 k^4 c^2 \cot i_p = \frac{1}{2}\rho A_2^2 k^4 c^2 \cot i_p + \frac{1}{2}\rho B_2^2 k^4 c^2 \cot i_s + \frac{1}{2}\rho' A'^2 k^4 c^2 \cot i'_p + \frac{1}{2}\rho' B'^2 k^4 c^2 \cot i'_s \quad (1)$$

$$\text{或者} \quad 1 = a^2 + b^2 + a'^2 + b'^2 \quad (2)$$

式(2)中

$$\begin{cases} a^2 = A_2^2/A_1^2 \\ b^2 = B_2^2 \cot i_s/A_1^2 \cot i_p \\ a'^2 = A'^2 \rho' \cot i'_p/A_1^2 \cot i_p \\ b'^2 = B'^2 \rho' \cot i'_s/A_1^2 \cot i_p \end{cases} \quad (3)$$

式(3)的第3项是笔者研究关注的,即穿过层面部分的P波能量,图1给出了计算结果,从下向上传输,有90%以上的P波能量可以穿过层面。

折射S_v波也可能对监测结果有影响,式(3)的第4项是穿过层面部分的S_v波能量,图3给出了计算结果,从下向上传输,有不大于30%的转换S_v波能量可以穿过层面。

图1和图2的计算结果使用表1的介质参数。

[收稿日期] 2013-11-20

[作者简介] 刘建中,1947年出生,男,吉林吉林市人,高级工程师,主要从事采油工程和地应力研究工作;

E-mail: jianzhong.liu@microseismic.net

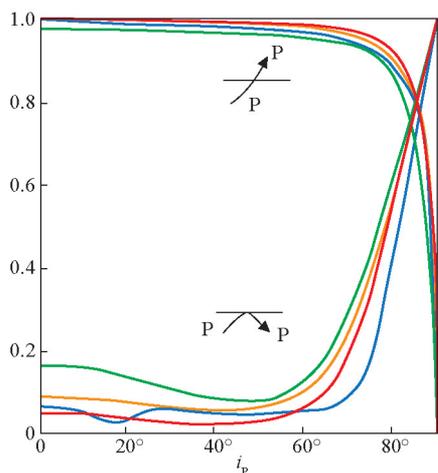


图1 P波自下而上传播的透过信号

Fig. 1 P-wave propagation through a bottom-up signal

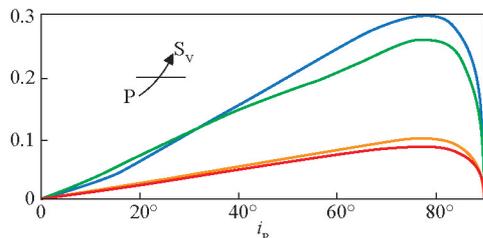


图2 P波自下而上传播转换成S波的透过信号

Fig. 2 Bottom-up P-wave converted into S-wave propagation through the signal

表1 图1、图2中各曲线采用的介质参数
Table 1 Medium parameters used by each curve in Fig. 1 and Fig. 2

曲线颜色	介质参数				
	ρ_2/ρ_1	α_2/α_1	β_2/β_1	σ_1	σ_2
红色	1.036	1.07	1.07	0.24	0.24
黄色	1.09	1.10	1.09	0.25	0.26
蓝色	1.00	1.14	1.30	0.28	0.16
绿色	1.103	1.286	1.286	0.25	0.25
.....	情况不明				

表1给出不同参数反射、折射曲线的图例,表中: ρ_1 、 ρ_2 、 σ_1 、 σ_2 、 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 分别是传播介质密度,泊松比,P波波速,S波波速;下角标1是指上层介质,下角标2是指下层介质。

从图1和图2可以看出,从下向上传输,层面散射的衰减并不大。在沉积地层,结晶颗粒相对较少,晶面散射的作用不是很强烈。

在油田地震监测领域,地震波散射形成的衰减不是信号衰减的主要原因。

2.2 辐射面积增加衰减

微地震震源可以看做点源,辐射出的信号随着距离增加,波及面积也增加,单位面积上的辐射能量减小。面积与距离的关系可以写为

$$S=4\pi r^2 \quad (4)$$

照射面积是距离的平方,辐射能量按着距离的平方减小,振幅则随着距离的一次方减小。从物理上考虑,球面波的振幅因子为 r^{-1} 是可以理解的,因为当球面波向外传播时,波前面积(球面)随 r^2 增大,因此每单位面积的能量就按 r^{-2} 减小。因为能流与振幅的平方成正比,所以球面波的振幅与 r^{-1} 成正比。

2.3 非弹性衰减

在浅层,地层结构主要是沉积层、土层,这些层的介质存在明显的非弹性。地震波传播过程,在路径上形成不可恢复的变形,形成能量损耗。如土层结构疏松,在很小的位移作用下就会粉末化;在很大地震的地震波作用下,有些砂体也会粉末化;被统称为砂、土液化。更大的地震,其地震波会导致房倒屋塌,形成宏观裂缝。这些均会形成能量损耗。地震波传播过程中的非弹性损耗是地震波衰减的主要原因。

3 微地震信号的弱衰减传输

所有固体介质,均有一定的强度,在弱外力作用下表现出一些弹性。被传递的信号如果很弱,传播介质受到的外力作用始终在弹性范围内,就会表现为低衰减传播。

图3、表2是泥岩的压缩实验,可以看出,在几兆帕压力作用下,应变也表现为线性^[2]。

黄土实验表明,即使是黄土,低压力下,应力、应变曲线表现为线性,也表现出很弱的弹性^[3]。从表2可见,试验点砂质黄土的水平向变形模量 E_{0H} 和垂直变形模量 E_{0V} ,分别为

$$E_{0H}=14 \sim 43 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$E_{0V}=30 \sim 86 \text{ MPa} \quad (6)$$

实验已经证明,弱结构介质的变形模量是压力的函数,随着压力变小而增大。图4是来自珠江三角洲不同工程的土层加压实验结果,可以看到,在很小的压力下,土层仍有较大的变形模量。随着压力升高,模量显著减小。

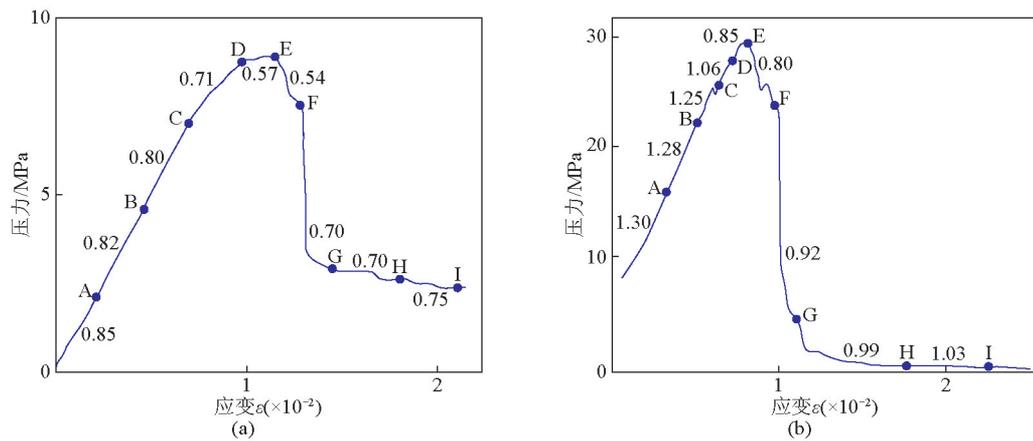


图3 泥岩应力、应变实验

Fig. 3 Mudstone stress and strain experiment

表2 土层力学实验结果

Table 2 The results of soil mechanics experiment

土层	埋深/m	加载方向	变形模量/MPa
Q_3^{nd+al}	20 ~ 40	水平向 15 竖向 30	~ 25 ~ 50
Q_3^{nd}	10 ~ 30	水平向 15	~ 25
Q_2^{nd}	120 ~ 160	水平向 30 竖向 60	~ 40 ~ 80
Q_1^{nd}	90 ~ 120	水平向 25 竖向 55	~ 40 ~ 70

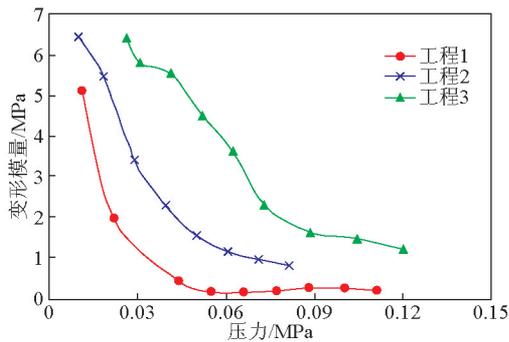


图4 由载荷实验成果所得到的 $p-E_0$ 关系

Fig. 4 $p-E_0$ curves gathered by bearing test

软土的非线性特性主要表现为土体的应力-应变关系为非线性函数。图4为根据珠江三角洲内3个典型工程的载荷实验成果,采用公式(7)得到的压力 p 与变形模量 E_0 的关系。

$$E_0 = 0.79 \frac{pd(1-\mu^2)}{S} \quad (7)$$

式(7)中: d 为压板直径。

图4表明,由载荷实验确定的变形模量随着压力的增大而呈非线性减小。在很小的作用力作用下,即使土层也表现出足够大的模量,表现出弹性。

微地震信号在发震点位移幅度在毫米量级,在接收点远小于微米量级。在整个传播途径中,扰动

强度均会在传播介质的弹性范围内,不会形成永久变形,没有或很少有非弹性衰减,出现微地震信号弱衰减效应。

4 微地震信号弱衰减实例

图5是根据圣费尔南多大地震作出的不同距离的加速度反应谱,可以看出,随着距离增加,谱线间的间距变小,衰减趋小。量出1周、0.05周在不同距离的幅度(见表3),作出其随距离的衰减曲线,可以看出,随着距离增加,衰减趋势变小。0.05周已经近于仪器工作频率的下限,可以作为微地震研究、弱信号传播衰减研究的依据^[4]。

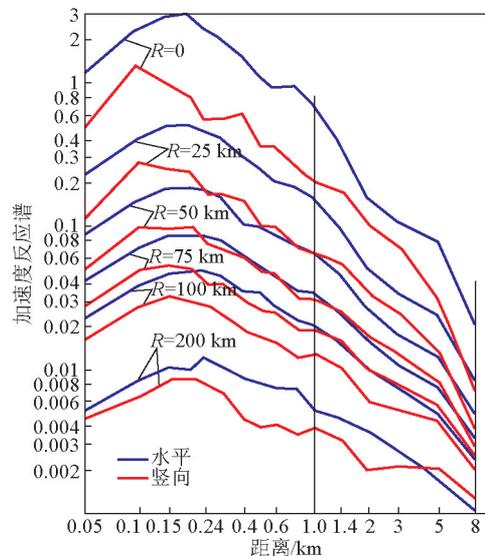


图5 圣费尔南多地震不同距离处加速度反应谱

Fig. 5 San fernando earthquake acceleration response spectrum at different distances

表3 统计出的圣费尔南多地震
不同距离处的加速度幅值

Table 3 San Fernando earthquake acceleration amplitude
at different distances

距离/km	周期1 s时振幅	周期0.05 s时振幅
0	0.25	0.5
25	0.075	0.119
50	0.033	0.05
75	0.018	0.028 6
100	0.015	0.017 5
200	0.003 6	0.004 7

图6中,蓝色线是1周加速度幅值随距离的衰减曲线;粉色线是0.05周加速度幅值随距离的衰减曲线。随着距离增加,曲线变得平缓,衰减趋势急剧变小。对于指定周期的地震信号,传播过程变化的就是信号强度,该图表明,随着地震信号的趋弱,衰减也急剧变小。这使微地震衰减不同于大地震,可以出现弱衰减传播效应。

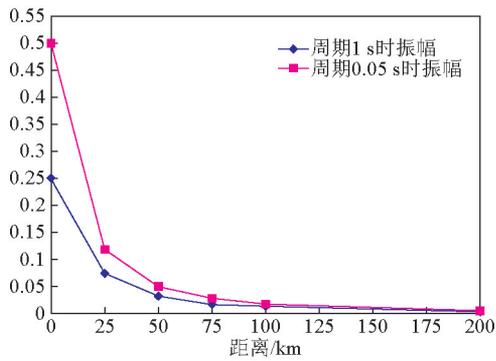


图6 不同距离的幅度衰减图

Fig. 6 Amplitude attenuation figure at different distances

5 在黄土覆盖区记到微震

在镇泾油田进行压裂裂缝监测,该油田位于黄土高原,覆盖厚层黄土,通常地震勘探效果较差,厚

黄土层严重影响地震信号质量。在红河371井压裂时,笔者监测到可以分辨的微地震波形。证明了弱信号衰减系数应该远小于大震信号,黄土层也存在弱弹性。极小的微地震信号不能打破脆弱的黄土层结构,微地震信号传播形成的振动限制在土层的弹性范围内,信号很少衰减^[5]。在镇泾油田监测到的微地震波形见图7。

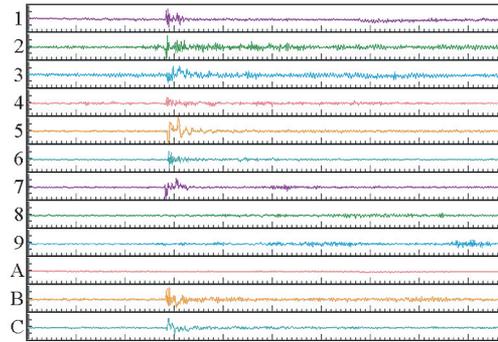


图7 在镇泾油田监测到的微地震波形

Fig. 7 Micro-seismic waveform monitored
in zhenjing oilfields

研究表明,只要传输信号振动幅度足够小,在土层中仍然会在传播介质弹性范围内传输,表现出弱信号低衰减的传输特性。

参考文献

- [1] 傅承义,陈运泰,祁贵仲. 地球物理学基础[M]. 北京:科学出版社,1985:328-329.
- [2] 陈晓平,黄国怡,梁志松. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(1):137-141.
- [3] 方钱宝,马建林,喻 渝. 大断面黄土隧道围岩弹性抗力系数—变形模量与压缩模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):3932-3937.
- [4] 王俊国. 近震地震波衰减时间与震级的关系[J]. 地震地磁观测与研究,1985,6(6):114-116.
- [5] 刘建中,唐春华,左建军. 微地震监测技术发展方向及应用[J]. 中国工程科学,2013,15(10):54-58.

Micro-seismic signal propagation of low attenuation

Xiao Jian, Sun Shuting, Liu Jianzhong

(Beijing Traverse Technology and Development Ltd., Beijing 100082, China)

[Abstract] This article explored the possibility of spread of weak seismic signals and low attenuation. The results showed that both underground seismic signal propagation medium showed a degree of elasticity, the vibration signal amplitude, just below the elastic limit attenuation is very small, showing low attenuation characteristics. This feature ensures that on the ground, and even the loess coverage area of micro seismic signal detected.

[Key words] micro-seismic; low attenuation; inelastic attenuation