黄土层内的声波传播衰减*

穆 林　范惠珍　宁显宗

（西北工业大学声学工程研究所　西安　710072）

原稿 1993 年 4 月 8 日收到，修改稿 1994 年 8 月 8 日收到

摘要　通过对声波在黄土层内传播的实验研究，本文分析了黄土介质中声波传播的强烈衰耗特性，得出了声波的衰减系数．这可为浅层地下声探设备的研制提供依据．黄土的声学特性依赖于其结构形状等多种因素而有所不同，而我们的实验环境和所获数据有限，因而我们的研究结果只是该问题的一个特例．

关键词　声波吸收系数，传播衰减

Attenuation of sound waves in soil

Mu Lin　Fan Huizhen　Ning Xianzong

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xian 710072)

Abstract　This paper deals with the attenuation of sound waves as they travel through the soil. Based on the experimenal data, an absorption factor is given. Using these data will help to design acoustic instruments for shallow underground. The acoustic characteristics of soil are complicated, depending on a large number of factors, while our exprimental enviroment is confined and data are limited and therefore our results only offer a special example.

Key words　sound wave, absorption factor, Propagation attenuation

1　引言

人们对于水饱和疏松砂岩、气饱和疏松砂岩、多种岩石中的声波传播已进行过大量的研究[1]．国内也有人对于黄河粉砂沉积层的声波吸收衰减做过研究[2]．但对于黄土，这种由不同矿物颗粒为骨架，充有水和空气的多孔介质，关于声波传播衰减研究的文献还很少见．

为了在黄土复盖地区开发地表浅层的声波探测技术，必须掌握黄土介质的一些基本声学特性．要想在这一领域得到具有普遍意义的结果，需要进行奠基性的大量工作．这里，我们仅围绕黄土层内声波的传播衰减课题进行了实验研究．虽然受地域、天候和实验条件等限制，所得结果有其局限性，但仍能对工程技术的开发提供有用的资料．

2　黄土层内声波的强烈衰耗

声波在黄土介质中传播时，有三种因素造成其振幅衰减．一是由于存在不连续的声学界

* 国家自然科学基金资助项目

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

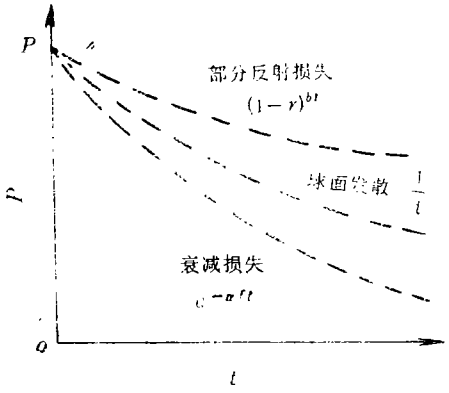

图 1　振幅随时间衰减曲线

面而引起一部分能量反射或散射；二是由于波阵面随时间而扩展，从而导致单位面积内能量的缩减；三是由于介质具有较强的弹性粘滞现象而产生对声波能量的吸收，对高频成分尤为突出。其中，第三种因素对声波能量的衰耗起着极为重要的作用。图 1 为说明上述三种衰减规律的定性曲线[3]。

当我们在一定的空间范围把土壤看成是各向同性的介质时，根据 Voigt 的理论，可以用吸收介质的波动方程来描述介质内声压的变化。这个波动方程如下：

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \left[\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} + \frac{\lambda' + 2\mu'}{\rho}\frac{\partial}{\partial t}\right] \cdot \nabla^2 P = 0 \qquad (1)$$

式中 P 为声压；λ 和 μ 为 Lame 常数；λ' 和 μ' 为与弹性介质的粘滞特性有关的常数；ρ 为介质密度。(1)式的解：

$$P = P_0 e^{j\omega(t - r/V^*)}$$

$$V^{*2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} + j\omega\frac{\lambda' + 2\mu'}{\rho} = V^2 + jV_2' \qquad (2)$$

式中 ω 为圆频率；r 为距声源的距离；P_0 为 $r = 0$ 处的声压。

设介质内距声源 r 处的声压为 P，传播 dr 距离后，声压由于介质的吸收作用而降低 dp，其值正比于 P 和 dr，这个比例系数 a 就是介质的吸收系数

$$a = -dP/(P \cdot dr) \qquad (3)$$

于是

$$P = P_0 e^{-ar} e^{j\omega(t - r/V)} \qquad (4)$$

比较(2)和(4)得

$$V^* = V/(1 - jaV/\omega) \qquad (5)$$

考虑到 jav/w 为甚小量，又知 $\lambda' + 2\mu' = 4\eta/3$，这里 η 为介质粘滞系数，可以导出介质吸收系数

$$a = \frac{2}{3}\frac{\eta\omega^2}{\rho V^3} \qquad (6)$$

表 1 给出水、空气、土壤和岩石四种介质的密度、声速、粘滞系数和吸收系数。其中吸收系数 a 是声波频率取 2kHz，按(6)式计算的所得值。由表 1 可见，土壤对声波的吸收系数远远大于其它三种介质，因而使声波（尤其高频成分）在土壤内传播过程中产生强烈的衰耗。这也就是迄今在黄土介质中的声学应用工程绝大多数限于 1kHz 以下频段的原因。

表 1　几种介质的吸收系数

介　质	密度 ρ g/cm³	声速 V m/s	粘滞系数 η Pa. s	吸收系数 a cm⁻¹
水	1	1500	1.5×10^{-2}	4.7×10^{-10}
空气	1.29×10^{-3}	330	1.7×10^{-4}	3.9×10^{-7}
土壤	1.4	400	7×10^{11}	8.2×10^{6}
岩石	2.8	5000	1.5×10^{14}	4.5×10^{4}

3　黄土介质声波衰减的实验研究

为了得到黄土层内声波的传播衰减规律，我们进行了实验研究。实验采用自制小型机械式声源和直径为 300mm、厚度为 25mm 的铁质耦合器作为声辐射系统，其频谱特性见图 2。接收传感器采用 SSJ-15 型数字检波器，下限频率为 10Hz；在 15—600Hz 范围内有很平坦的响应；灵敏度为 0.32v/cm/s；失真度<0.2%；动圈式结构；内阻为 390Ω。传播介质为西安地区经压实的黄土，其物理性质见表 2。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

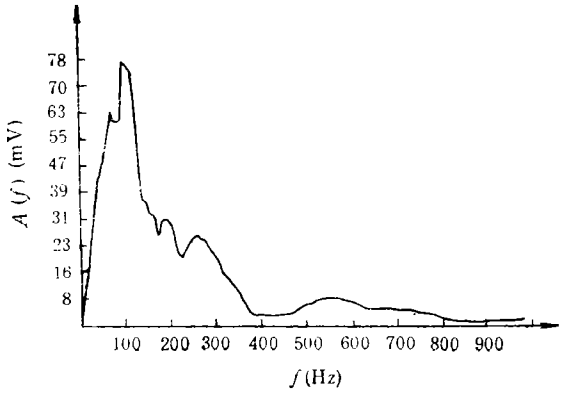

图 2　声源频谱特性

表 2　黄土物理性质

天然含水量%	单位体积密度	孔隙比	砂粒%	粉粒%	粘粒%
12.1	1.6	0.8	9	74.5	16.5

实验系统由声源 S，接收线列阵 Ri。多路磁带记录器 MTR 及 7T17S 多路信号处理机 MSP 构成。图 3 为实验原理图。

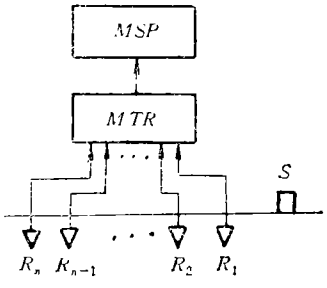

图 3　实验原理图

通过 FFT 分析，可求得不同接收点信号的振幅谱，进而绘出不同频率声波的振幅-距离关系曲线，如图 4 所示。该图说明，声波在黄土介质中传播时，随着距离的增大，不同频率成分皆呈指数规律衰减，频率愈高，衰减愈烈。

我们对某一频段内的声波振幅值进行积分，得此积分值

$$E_i = \int_{f_1}^{f_2} A_i(f)df \qquad (7)$$

与距离 r 的关系曲线如图 5 所示。这一结果与图 4 相吻合。

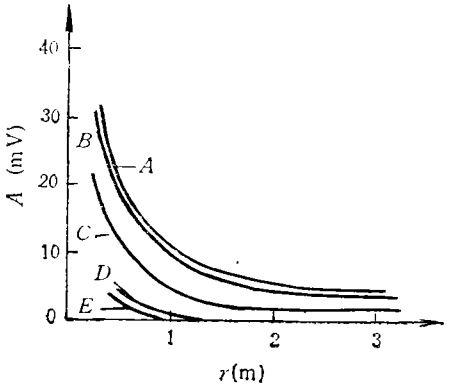

图 4　不同频率振幅-距离关系曲线

A:F = 100Hz　B:F = 200Hz
C:F = 300Hz　D:F = 500Hz
E·F = 800Hz

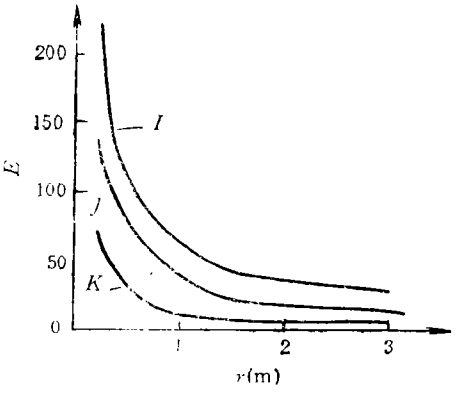

图 5　振幅积分值-距离关系曲线

I:F = 100—200Hz　J:F = 200—300Hz
K:F = 500—600Hz

声波传播的衰减规律还可以用衰减系数 $a(f)$ 表示

$$a(f) = \frac{20}{D_2 - D_1}\left(\lg\frac{A_1(f)}{A_2(f)} - \lg\frac{D_2}{D_1}\right) \qquad (8)$$

式中 D_1、D_2 为声源到传感器的距离，$D_1 < D_2$；$A_1(f)$、$A_2(f)$ 为对应于 D_1、D_2 的频谱；$\lg(D_2/D_1)$ 为因球面扩展而造成的衰减。

取 $D_1 = 0.25$m，$D_2 = 3$m，相应的频谱 $A_1(f)$ 和 $A_2(f)$ 如图 6 所示。根据公式(8)求得的衰减系数 $a(f)$ 见图 7 的虚线。

依照

$$\hat{a}(f) = A \cdot f^B \qquad (9)$$

用最小二乘法对 $a(f)$ 作回归分析，得到

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

超声波对单胞藻敌害——急游虫的作用

路德明　胡保革　惠少华
（青岛海洋大学物理系　青岛市　266003）
曹　翔　　张奋展
（镇江科技公司）　（中国人民大学）

1993年11月13日收到

摘要　本文提出了用超声波处理虾饵料培养中的敌害(急游虫)的新方法，我们得到了一些初步结果并

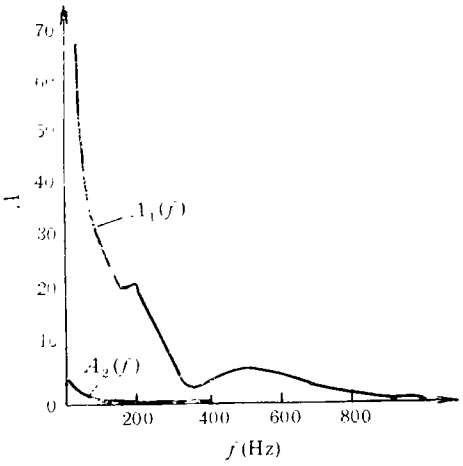

图6　不同距离频谱图

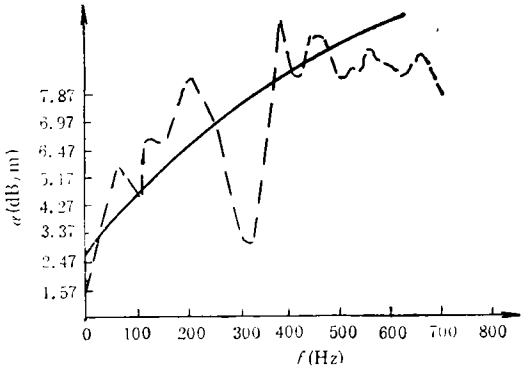

图7　a-f，$\hat{a}$-f 关系曲线
——$a(f)$，- - - $\hat{a}(f)$

$$A = 1.158$$
$$B = 0.545 \qquad (10)$$
$$\hat{a}(f) = 1.158 f^{0.545}$$

相应的衰减系数拟合曲线见图7的实线.

4　结束语

本文通过实验研究，得到了黄土层内声波传播衰减特性数据. 据此，我们研制的地下声探系统已在防空洞和古墓的探测中获得了符合实际情况的结果. 但是，由于黄土介质的声学特性受其地质年代、土质类型、结构成分、密度、水份含量等具体条件的制约，吸收系数和衰减系数不可能是一个固定值，而是存在于一定范围的数值. 它随黄土介质的组分和物化特性而异. 因此，我们的研究结果就像该问题的一个特解. 可以使人们对它建立一个量的概念，并有一定的实用价值.

应当指出，本文所得衰减系数的频率指数 B，与某些文献的估计值[1]、[2]相比要低些. 这说明了有可能采用较高的工作频率.

致谢　武延祥、李亚安和朱治富同志在本项实验研究中做了许多工作，在此谨表谢意.

参　考　文　献

[1]　White. J E. Underground Sound: Apllication of Seismic Wave, Elsevier Science Publishers B. V. 1983, 99—158.
[2]　单汝政，周树义. 声学学报，1984，9(3): 201-204.
[3]　欧·罗意. 石油地球物理勘探，1973，(5)39—51.
[4]　王冠贵. 声波测井理论基础及其应用，石油工业出版社，1988，26—29.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net