

用 1-3 及 2-2 连通复合换能器测量冻土^{*}

袁易全

(东南大学无线电系 南京 210096)

2002 年 1 月 14 日收到

摘要 根据冻土弹性波测试要求, 研制了一种测试冻土用的 500 kHz 纵波、横波 1-3 及 2-2 连通复合超声换能器, 其灵敏度高、频带宽、声阻抗低、波形简单及脉冲波形前沿陡峭, 亦适用于其它介质力学特性测试。文章介绍了换能器结构原理及测量系统特性, 实测了不同含水量 (7% — 25%) 及负温 (-2°C — -20°C) 条件下兰州黄土试块的纵、横波声速, 获得很高测量精度 (10 ps 级)。

关键词 冻土, 宽带换能器, 纵波声速, 横波声速

Measuring frozen soils with composite piezoelectric transducers of 1-3 and 2-2 connectivity

YUAN Yiquan

(Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract 500 kHz Composite piezoelectric broadband ultrasonic transducers with 1-3 and 2-2 connectivity are developed and used for measuring longitudinal wave and transverse wave in frozen soils. The ultrasonic transducers have the characteristics of high sensitivity, wide frequency-band and low acoustic impedance. They are suitable for measuring the mechanical properties of frozen soil. The configuration, the corresponding characteristics and the are presented in this paper. The longitudinal and transverse wave velocities of frozen Lanzhou loess are measured under various water contents (7% — 25%) and temperatures (-2 — -20°C) using this system, and the measuring precision is within ± 10 ps.

Key words Frozen soils, Broadband transducers, Longitudinal wave velocity, Transverse wave velocity

1 引言

冻土的弹性模量和剪切模量是研究冻土基本力学性质的重要内容和设计冻土地基基础的主要指标。崔托维奇通过实验发现冻土的弹模

量比未冻土大几十到几百倍, 即冻土的弹性模量极高, 并且其值与冻土成份、含水量、温度及外力作用等因素有关, 并随温度的降低而增加^[1,2]。

近 20 年来, 人们曾用“质点振动法”, 把

^{*} 冻土工程国家重点实验室资助项目 (批准号 9724)

冻土球看作质点,由阻尼振动原理,推导得冻土弹性模量。但此法误差大,与实用条件差别更大。而超声传播法具有快速、简便、高效、准确及无损性,并接近实用条件,故近年来这种方法在冻土弹性波力学特性测定中被广泛地推广应用^[3,4]。但由于传统探头声阻抗高,与冻土失配,波形欠理想,故测量精度不高。

随着压电材料学科的飞速发展,新颖纵、横波超声换能器的出现^[5],进一步为冻土声速精确测定奠定了基础。本文利用1-3及2-2连通复合压电材料,首次成功研制了专门适合于冻土测量用的宽带超声换能器。并首次与日本产UVM-2声速仪构成检测系统,以10 ps精度测定了冻土纵、横波声速。

2 冻土纵、横波宽带换能器的压电材料

2.1 1-3 连通 (PZT/ 环氧) 复合纵波压电换能材料

PZT 压电陶瓷历史上曾经发挥过汗马功劳,但由于PZT的声阻抗高、性能脆,发展似受到限制。70年代末,美国教授R.E.Newnham等人研究出两相复合压电材料。1983年我国南京大学水永安教授与美国B.A.Auld等人合作分析了周期复合压电材料的动态特性,并首创了谐振理论模式,优化了1-3、2-2连通复合压电材料的特性^[6,7]。主要贡献是提高了探头工作频率的上限至20 MHz。中国科学院声学研究所近年来开发出一些1-3、2-2连通复合压电材料,有优良的纵波^[8]和横波^[9]发射性能。

1-3 连通 (PZT/ 环氧) 复合压电材料比常规PZT有更高的压电系数 g_{33} 或 g_h 和机电耦合系数 K_{eff} ,同时具有较低的声阻抗特性。从而与冻土等非金属材料耦合使用时,有优良的宽带、窄脉冲特性,极大地改善了检测分辨率。

鉴于过高频对冻土衰减极大,故本文探头工作频率选在1 MHz以下。作者采用了一种中科院声学所提供的PZT小柱非周期随机分布的1-3连通复合材料^[8],用这种压电晶堆制作的探头,有利于抑制横向振动模,获得较单纯的纵向振动模式,检测波形极其简单和陡削。利用压电陶瓷加以适当的匹配能达到“一个半波”的单纯波形,而用压电复合材料和适当匹配则能达到“半个波”。其物理和声学特性如表1、表2所示。

2.2 2-2 连通复合横波压电换能材料

2-2 连结复合横波换能材料,是用PZT材料作骨架,用环氧树脂作为填充物,以2-2连通方式制作出厚度切变振动的复合压电晶片^[9],这种复合材料的声学特性如表3所示。

3 纵、横波宽带换能器设计

3.1 冻土用 1-3 连通复合纵波换能器设计

换能器结构如图1所示。

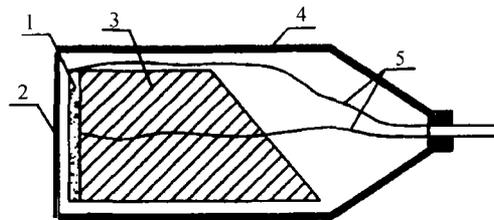


图1 1-3 连通复合材料换能器结构

1. PZT composite disc 2. Transmitting sound layer 3. Backing 4. Shield 5. Cable

1-3 连通两相复合,沿厚向为均匀一致,沿横向非周期两相复合抵消了耦合振动。因此,这类薄圆盘晶堆具有更理想的一维厚度振动声学特性。

表1 1-3 型复合宽带压电材料的声学特性

材料名称	PZT 相对体积 %	密度 $g \cdot cm^{-3}$	声速 $km \cdot s^{-1}$	特性阻抗 $M rayL$	厚度 mm
复合压电材料	24	2.67	3.33	8.09	2.10

表 2 1-3 型复合压电材料的机电特性

材料名称	PZT 相对体积 %	压电系数 d_{33} $10^{-12} \text{C}\cdot\text{N}^{-1}$	ϵ_{33}^T %	k_1^2	Q_m	介电损耗
复合压电材料	24	330	419	0.56	10.8	0.014

表 3 2-2 型复合压电厚度切变材料声学特性

材料名称	PZT 相对体积 %	共振频率 kHz	k_{15}^2	Q_m	声速 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	特性声阻抗 M rayL
复合压电材料	50	648	0.69	17	2.14	9.25

设晶片两端面为自由边界(暂不考虑机电耦合和损耗)。当晶片受外界简谐力策动时,按它的力平衡方程、电流方程及机械阻抗方程,不难推导出传感器的传递矩阵^[10]为

$$\begin{bmatrix} f_0 \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{m0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N & 0 \\ 0 & -1/N^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -Y_e & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -Y_{e0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} f_0 \\ \nu \end{bmatrix} = \frac{1}{N^*} \cdot \begin{bmatrix} N^2 + \left(\frac{Z_m + Z_{m0} + N^2}{Y_e + Y_{e0}} \right) & -Z_m + Z_{m0} \\ Y_e + Y_{e0} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 f_0 是实际机械力; i_0 是实际电流; N^* 为 N 的共轭复数。

若 1-3 连通复合换能器谐振点附近的动态特性能用质量 M , 刚性 k 和阻尼 R ($R = R_R + R_m$, R_R 为等效辐射阻, R_m 为机械损耗阻) 等集中参数表示, 则传感器接收灵敏度频响为

$$\frac{e}{f_0} = \frac{N}{N^2 \{ R + j(\omega M - k/\omega) \} (Y_{e0} + Y_e + j\omega C_0)} \quad (3)$$

式中 C_0 是晶片静态电容。

以上方程亦可表述成标准梅森(Mason)机电等效图形式, 见图 2。图 2 中 ω_1 是晶片的厚度谐振角频率; s_0 是声波接收面积; P_f 是自由场声压; ν 是声压畸变系数。

考虑到实际机械能转变成电能的机械耦合

应用声学

系数 $K_{33}^2 = d_{33}^2 / s_{33}^E \epsilon_{33}^T$, 经推导

$$\phi = N \cdot K_{33}^2 = \frac{s_0 d_{33}}{t S_{33}^E} = \frac{s_0}{t} e_{33} \quad (4)$$

式中 ϕ 是等效图 2 中的电力转换系数, e_{33} 是压电常数。

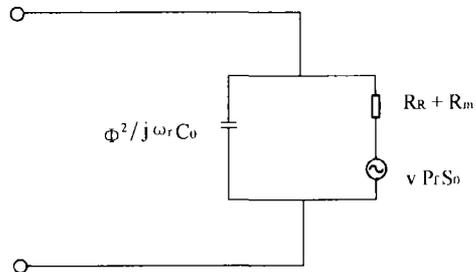


图 2 计算 1-3 连通复合材料换能器在谐振频率处的接收灵敏度的等效电路

因为远离谐振点时, 传感器处在劲度控制区 $1/\omega C_a \gg R$, 故它的接收灵敏度等效计算图可进一步简化, 如图 3 所示。

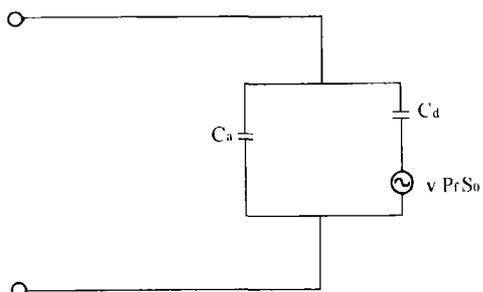


图 3 计算 1-3 连通复合材料换能器在远离谐振频率处的接收灵敏度的等效电路

图 3 中的 C_d 为机械电容 ($C_d = 1/k$); C_a 为静态电容反映到机端的数值

$$C_a = \phi^2 / jC_0\omega_r \quad (5)$$

根据图 2 及图 3, 1-3 连通复合接收型换能器, 谐振点附近接收自由场声压灵敏度为

$$(S)_{open} = \nu\phi s_0\eta_{a/m}K/\phi R_R \cdot \sqrt{(C_0\omega_r/\phi^2) + 1/(R_m + R_R)^2} \quad (6)$$

式中 $\eta_{a/m}$ 为机电效率, 且

$$\eta_{a/m} = R_R/(R_m + R_R) \quad (7)$$

式中 K 为不同背衬结构的修正系数 (空气背衬时, $K = 1$; 完全声吸收背衬时, $K = 1/2$; ν 为声压畸变系数。在远低离谐振点或接近谐振点时, ν 可近似为 $1^{[10]}$ 。

低离谐振点接收自由场声压灵敏度为

$$(S)_{open} = \nu \cdot s_0 \cdot K_{eff}^2 \cdot K/\phi \quad (8)$$

$$K_{eff}^2 = C_d/(C_a + C_d) \quad (9)$$

或

$$(S_g)_{open} = t \cdot g_h \cdot K, \quad g_h = g_{33} + 2g_{31} \quad (10)$$

式中 g_h 为静水压压电常数; 此处即 K_{eff}^2 即 K_{33}^2 称为有效机电耦合系数。

通常谐振点的接收灵敏度理论上难以精确计算。它约是低离谐振点灵敏的若干倍 (例如经验常数为 2 即 6 分贝)。故完全声吸收背衬时谐振点附近灵敏度约为

$$(S)_{open} \geq t \cdot g_h \quad (11)$$

由式 (11) 可知, 复合换能器因 $g_h > g_{33}$, 故在同样条件下, 若用传统 P-5 的 PZT 压电晶片做成的换能器, 用 P-5 参数代入式 (11), 不难发现: 1-3 连通复合晶片制成的换能器确实比实心 PZT(P-5) 换能器具有更高灵敏度, 而且

检测冻土的波形更简单, 窄脉冲激励持续时间和余响极短, 图 4 显示一例。

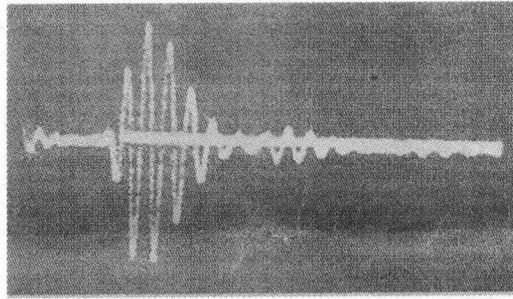


图 4 500 kHz 1-3 型纵波换能器在冻结 (-10°C) 兰州黄土试样上的波形

3.2 冻土用 2-2 连通复合横波换能器设计

2-2 连通复合横波换能器结构亦如图 1 所示 (仅仅晶片用 2-2 型替代 1-3 型)。研制表明: 500 kHz 横波换能器, 当空载时, 在窄脉冲电信号激励下的波形 (频谱 -3dB 相对宽度为 57%) 持续时间仅 2.5 个周期。该换能器在负载冻土上波形持续时间仅 2 个周期。

4 冻土纵、横波声速的实际测定

4.1 实验测试原理

测量电学系统原理框图与日本产 UVM-2 仪相同, 如图 5 所示。UVM-2 仪原用于测定浸入液态中的固体纵波、横波声速值, 国内外

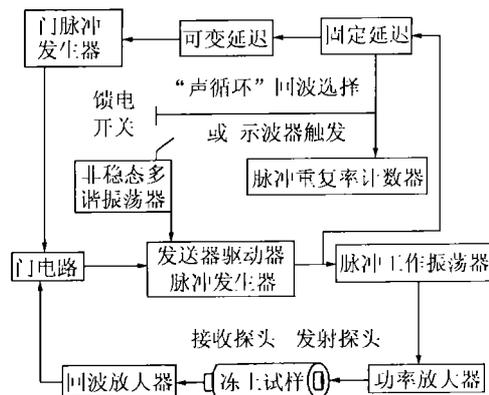


图 5 冻土超声“声循环”测量原理图

尚无直接耦合到冻土上的声速仪。作者首次把 UVM-2 仪改造,直接耦合用于冻土力学测量。

图 5 中,将发送脉冲重复率正好控制调节为,发送脉冲与接收脉冲重叠。换言之,每一次新发送脉冲,正好被接受脉冲所触发,“声循环”后,达到很大累加值再计数时延,经平均后大大提高了时延分辨率,所以系统有很高的测量精确度。例如,本系统用 100 MHz 晶振,分辨率仅 10 ns,但计数重复率若为 10^6 ,则最终分辨率达 $10\text{ ns} \times 10^{-6}$,也即 $\pm 10\text{ ps}$ 。

另外,在用直接耦合法测量时应特别注意固定延时的设定,由于固体中声波传输的衰减较小,如果固定延时设置不足,则声循环易受多重反射波的影响。所以在测量时应注意通过示波器观察波形,将固定延时调到多重反射波幅度很小为止。如不具备用示波器实时观测的条件,则最好先将固定延时设在一个较大的值,测得数据后再将固定延时值缩小,直到声时无明显回波干扰,再读取测量值。

4.2 实验结果

众所周知,固体介质中弹性波的传播速度与其密度和弹性参数密切相关。冻土是个复杂的介质,其弹性波的传播速度与其内部结构特性密切联系,依矿物成分、密度、冻及未冻水、空隙度及温度的不同而有显著变化。密度大,空隙率小的冻土波速高,反之波速低。表 4、5、6 及图 5、图 6 给出了一些实验数据。由这些表图可知:冻土纵、横波速度、均随含水量增加而递增,随着负温不断降低而递增,而且相关性很好。根据这些测定数据,按照弹性力学理论可以准确推导出寒区工程设计中应用的一系列重要的弹性力学参数。如冻土的动弹性模量 E 、动剪切模量 G 及冻土的动泊松比 (μ) ,即:

动弹性模量:

$$E = 3\rho V_s^2 (V_t^2 - 4/3V_s^2)(V_t^2 - V_s^2)^{-1} \quad (12)$$

动剪切模量:

$$G = \rho V_s^2 \quad (13)$$

表 4 不同负温条件(同含水量)试块纵横波声速值

含水量 %	干密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^3$	湿度 $^\circ\text{C}$	耦合压 N	延时 μs	声速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
18.86	1.60	-2	200	19.527	3065
18.86	1.60	-4	200	18.307	3310
18.86	1.60	-6	200	17.729	3439
18.86	1.60	-8	200	17.316	3539
18.86	1.60	-10	200	17.047	3606
18.86	1.60	-12	200	16.838	3661
18.86	1.60	-14	200	16.666	3707
18.86	1.60	-14.3	200	16.634	3715
18.86	1.60	-14.6	200	16.613	3721

注:实验尺寸: 61 mm×50.7 mm;

实验时间: 1998 年 5 月 30 日至 6 月 1 日;

地点: 中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室。

表 5 不同负温条件(同含水量)试块横波声速值

含水量 %	干密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^3$	湿度 $^\circ\text{C}$	耦合压 N	延时 μs	声速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
22.28	1.57	-20	500	16.587	2090
22.28	1.57	-18	500	16.738	2069
22.28	1.57	-16	500	16.914	2044
22.28	1.57	-14	500	17.117	2017
22.28	1.57	-12	500	17.374	1983
22.28	1.57	-10	500	17.658	1947
22.28	1.57	-8	500	18.014	1905
22.28	1.57	-6	500	18.512	1847
22.28	1.57	-4	500	19.249	1760
22.28	1.57	-2	500	21.249	1584

表 6 不同含水量条件(同负温)试块纵、横波声速值

试样编号	温度 $^\circ\text{C}$	干密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^3$	含水量 %	延时 μs	声速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
W7	-12	1.60	7.78	15.483	2665
W10	-12	1.59	10.41	16.321	2679
W16	-12	1.55	16.69	12.068	3668
W22	-12	1.56	22.50	11.773	4076
W25	-12	1.53	25.41	8.939	5211
W7	-12	1.60	7.78	22.721	1607
W10	-12	1.59	10.41	24.299	1625
W16	-12	1.55	16.69	17.927	2090
W22	-12	1.56	22.50	18.311	2194
W25	-12	1.53	25.41	15.978	2218

动柏松比:

$$\mu = 1/2\{1 - [(V_t/V_s)^2 - 1]^{-1}\} \quad (14)$$

式中: ρ 为冻土密度, kg/m^3 , V_t 为冻土纵波速度, ms^{-1} ; V_s 为冻土横波速度, ms^{-1} 。

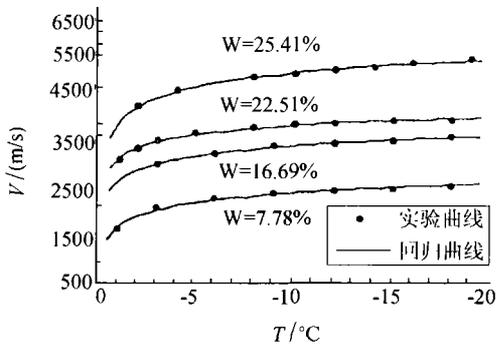


图6 UVM-2 仪实测冻结兰州黄土不同含水量 (W) 纵波声速随负温变化曲线

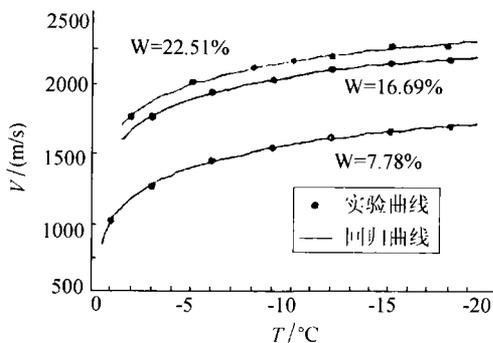


图7 UVM-2 仪实测冻结兰州黄土不同含水量横波声速随负温变化曲线

5 结论

综上所述, 本文复合换能器及冻土测试系

统具有以下主要优点:

(1) 1-3 或 2-2 连通复合纵、横波换能器的频带宽、灵敏度高, 其声阻抗值 8-10 MrayL, 接近冻土与岩石, 因此适用于它们的超声力学特性测试。

(2) 由于信噪比高, 波形陡峭, 故测量系统精度高。

(3) 该大型实验设备的测量稳定性好, 数据重复率高。

(4) 采用并改进 UVM-2 仪测量时延, 具有自动快捷、准确、可靠 (在声循环次数为 10^6 时, 声时分辨精度可达 ± 10 ps 级)。

应用显示, 冻土弹性波声速与其冻结温度和含水量之间有很好的相关关系。本测试系统为我国冻土弹性参数的直接测量提供了可行的技术和研究方法。

参 考 文 献

- 1 Johnson D L, Plona T J. *J. Acoust. Soc. Am*, 1982, **72**(2): 556-565.
- 2 Kuster G T, Toksoz M N. *Geophys. (part 1)*, 1974, **36**(3): 587-606.
- 3 傅容, 张津生. 冻川冻土, 1983, **5**(2): 65-73.
- 4 马芹永. 冰川冻土, 1998, **20**(1): 55-59.
- 5 Klicker K A, Biggers J V, Newnham R E. *J. Acoust. Soc. Am*, 1981, **60**(2): 168-178.
- 6 Auld B A, Kunkel R A, Shui Y A et al. *IEEE Ultrasonic Symposium*, 1983. 554-558.
- 7 Gururaja T R, Schunlze W A, Cross L E et al. *Ferroelectrics*, 1984, **54**(6): 183-186.
- 8 党长久, 李明轩. 应用声学, 1995, **14**(1): 10-14.
- 9 耿学仓, 杨玉瑞, 李明轩. 应用声学, 1995, **14**(3): 10-13.
- 10 袁易全. 超声换能器. 南京: 南京大学出版社, 1992. 415-418.