

# 地震物理模拟实验的超声换能器的研制

林维正 洪有根 孙长俊 袁益镛  
(同济大学声学研究所)

本文描述了在地震物理模拟实验中所需要的窄脉冲数兆赫频率的超声换能器的研制过程,文中描述了降低换能器 $Q$ 值的措施,换能器的结构和工艺,并在消声水池中对该换能器的性能做了测试。

## 一、前言

在超声检测技术中,窄脉冲换能器的研究越来越受到重视,人们已研究出适用于高频范围(几兆赫)的宽带窄脉冲压电换能器。在地震物理模拟实验中,为了模拟地震波、研究多层介质中声传播,一般需几十千赫到几百千赫的低频窄脉冲超声换能器。高频和低频窄脉冲换能器,虽然原理相同,但两者也有差异。低频窄脉冲换能器要求辐射面积小,指向性均匀,脉冲波形简单,以便对传播现象很好地进行分析。我们在开展地震物理模型实验研究中,也用复合材料研制的这种低频窄脉冲换能器。

## 二、窄脉冲换能器的获得及其影响因素

压电表面换能理论由E. C. Cook提出,在压电体受到外加电信号激励时,把电能转换成机械能的换能过程,发生在两电极表面的电场不连续处,因此,可把两电极表面等效为产生声信号的二个激励源。图1表示表面处电场不连续形成表面换能的双面辐射。图2表示表面换能的等效网络。

在单位 $\delta$ 电压脉冲激励之下,由于不同背衬和负载条件,其辐射声波的脉冲特性是不同的。图3表示声波辐射的波形。图中 $R_T$ 、

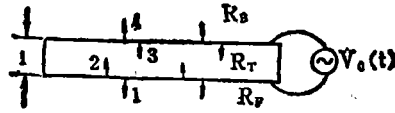


图 1

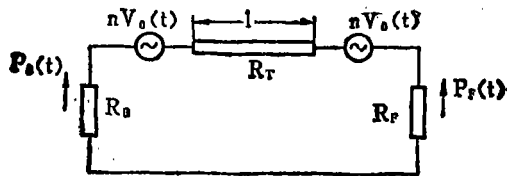


图 2

| 背衬 \ 负载             | $m_B < 1$ | $m_B = 1$ | $m_B > 1$ |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| $m_B < 1$           |           |           |           |
| $m_B = 1$           |           |           |           |
| $1 < m_B < 2 + m_F$ |           |           |           |
| $m_B > m_F + 2$     |           |           |           |

图3 单位 $\delta$ 脉冲激励下负载内声

$R_B$ 、 $R_F$ 分别为压电片,背衬和辐射介质的声阻抗率。

图3中  $m_F = \frac{R_F}{R_T}$ ,  $m_B = \frac{R_B}{R_T}$ 。由图中

可见,当  $m_B=1$ , 即背衬阻抗与压电片阻抗相匹配时,可获得最窄的声脉冲。因为铜的声阻抗率与PZT材料声阻抗率接近,因此用铜棒做背衬时可获得窄脉冲,但铜棒声吸收差,为了使铜棒末端反射的声波不干扰有效波,往往要把铜棒做得很长,这样用起来不甚方便,为此,人们就研究了用钨粉加环氧树脂做背衬的新工艺。背衬阻尼块有匹配和吸收作用,它减少了在界面处产生的反射波,同时也降低了换能器的  $Q$  值,但是,加了背

衬阻尼块后换能器的灵敏度就降低了。

压电材料性质也影响换能器的脉冲宽度,为了减少换能器的脉冲宽度就必须降低换能器的电  $Q_e$  值和机械  $Q_m$  值,从换能器的等效电路可知,换能器的  $Q_e$  值主要由电激发电源和压电材料的特性来决定;而换能器的  $Q_m$  值则依赖于压电材料,背衬、保护层以及被检测材料的特性。表1列举了常用压电材料的性能参数。

从表1中可看出,PZT-5材料声阻抗率

表1 常用压电材料的性能参数

| 材料          | 参 数   |       |  |       |       |         |                                      |
|-------------|-------|-------|--|-------|-------|---------|--------------------------------------|
|             | $Q_m$ | $Q_e$ | $R_T \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$ | $K_t$ | $K_p$ | 居里点(°C) | $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$ |
| PZT-5       | 75    | 200   | $32 \times 10^6$   | 0.60  | 0.50  | 365     | 140                                  |
| 钛酸铝         | 150   | 300   | $34 \times 10^6$   | 0.46  | 0.10  | 400     | 185                                  |
| 偏铌酸铝        | 12    | 100   | $18 \times 10^6$   | 0.42  | 0.07  | 550     | 260                                  |
| PZT/硅橡胶复合材料 | 9~12  |       | $4.8 \times 10^6$  | 0.45  | 0.17  | 330     | 206                                  |

较大,  $R_T = \rho C = 32 \times 10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , 用环氧树脂加钨粉做背衬,很难做到完全匹配,另外PZT-5的  $K_t$  较大,但  $K_p$  也大,因此厚向和径向振动耦合较强。而钛酸铝的  $K_p$  小,但是  $Q$  值偏高。偏铌酸铝材料的  $Q$  值低,声阻抗率也较小,  $K_p$  也小,是做窄脉冲换能器的较好材料,高频换能器用它较多。我们用它做低频窄脉冲换能器也获得较好的效果。复合材料是近十多年来发展起来的新型材料,它具有下列优点:(1)压电系数  $\epsilon_{33}$  比PZT-5大;(2)密度比PZT小;(3) $Q$  值低,所以很适合于做地震物理模型在水中实验窄脉冲换能器。

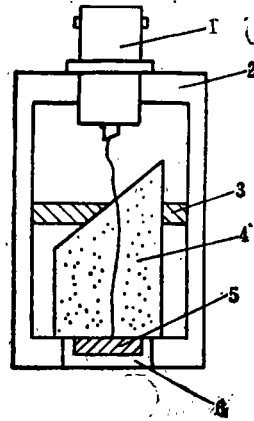


图4

研究所研制的PZT/硅橡胶,其主要性能如表2所示。

### 三、换能器的结构与工艺

换能器的结构如图4所示。图中1为插头,2为金属外壳,3为支撑环,4为背衬,5为复合材料压电片,6为保护层。

换能器主要组成部分为:

1. 复合压电材料是中科院上海硅酸盐

2. 背衬,由环氧树脂加钨粉组成。其制作工艺是先在环氧树脂内加入少量邻苯二甲酸二丁脂,加温  $80^\circ\text{C}$ ,搅拌均匀,去气、冷却后加少量固化剂,再加入钨粉搅拌均匀,然后在模子中预压成型。调节钨粉和环氧树脂的比例,可得到声阻抗率不同的阻尼块,如图5所示。从图5中看到,当钨粉与环

表2 PZT/硅橡胶复合材料的性能

| $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$ | tg $\delta$ (%) | $d_{33}$<br>(PC/N) | $g_{33}$<br>(Vm/N)   | $K_p$ | $K_t$ | $Q$  | $C$ (m/s) | $\rho C$ $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$ | $d_{33}g_{33}$ $(\frac{m^2}{N})$ |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|-------|-------|------|-----------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 3.2                            | 206                                  | 1.4             | 209                | $114 \times 10^{-3}$ | 0.17  | 0.45  | 6~12 | 1496      | $4.8 \times 10^6$                 | $14168 \times 10^{-15}$          |

之比在 4 左右, 这个阻尼块的声阻抗率为  $5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  左右, 它与复合材料的声阻抗率相近。

3. 保护层厚度的选择, 保护层能起保护晶片和声学匹配的作用, 它也直接影响换能器的灵敏度和频率特性。所以保护层应该选择与压电片和负载的声阻抗率接近的材料。在地震物理模型实验中负载是水, 所以保护层的声阻抗率为压电片和水声阻抗率的几何平均值, 即  $R_{保} = \sqrt{R_{晶} \cdot R_{水}} = 2.74 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。我们选用环氧树脂做保护层, 其声阻抗率约为  $2.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , 其厚度做成  $\frac{1}{4} \lambda$  左右。

#### 四、换能器性能测试

用 CTS-25 超声检测仪配上这种窄脉冲换能器, 通过 10cm 环氧树脂试件, 所接收到的波形如图 6 所示, 得到比较理想的单脉冲波形。

用方波窄脉冲激发换能器通过有机玻璃试样, 被接收换能器接收, 由瞬态记录仪采集数据, 送到微机处理, 为了避免发射脉冲影响, 我们把原接收信号中扣除发射信号,

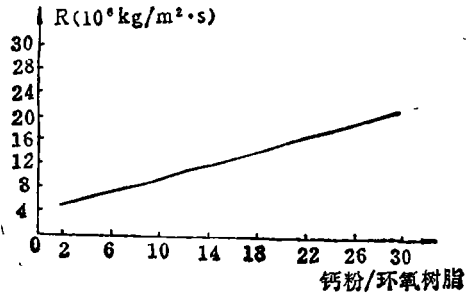


图 5 阻尼块与声阻抗率的关系



图 6 窄脉冲波形

而得到如图 7 所示的接收信号波形和振幅谱, 即得到频响特性曲线, 并由曲线上可得信号幅度下降一半时的频率  $f_1 = 195 \text{ KHz}$ ,  $f_0 = \sqrt{f_1 f_2} = 375 \text{ KHz}$ ,  $f_2 = 609 \text{ KHz}$ , 由此可算出换能器倍频程带宽  $n = \log_2 \frac{f_2}{f_1} = 1.64$ , 相对带宽  $W = \frac{\Delta f}{f_0} = 1.2$ 。

在消声水池中, 测了换能器的指向性图,

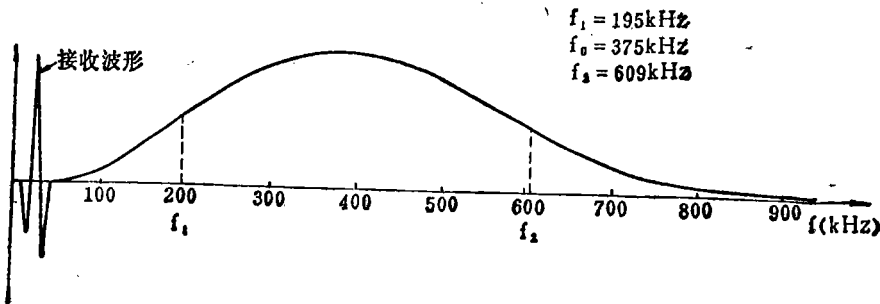


图 7 换能器接收波形及幅度谱

如图 8 所示。这是在频率 138KHz 条件下的指向性图。

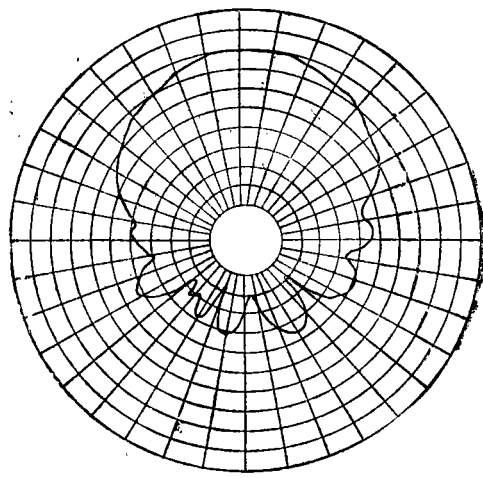


图 8 换能器指向性图

## 五、复合材料的窄脉冲换能器 在地震物理模拟实验中应用

地震物理模拟实验是配合地震勘探和地震学研究的重要实验手段，为了开展这方面研究，我校建立了地震物理模拟实验室，其中地震物理模拟数据采集系统的工作原理如图 9 所示。用这套系统对厚度为 25cm 的三层模型(沥青、水泥、石膏)，进行实验，如图 10 所示。我们看到采用复合材料换能器，

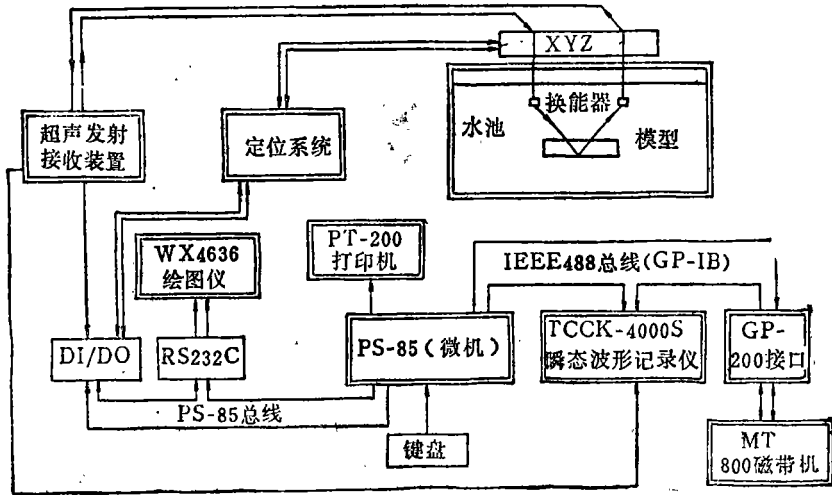


图 9 数据采集系统示意图

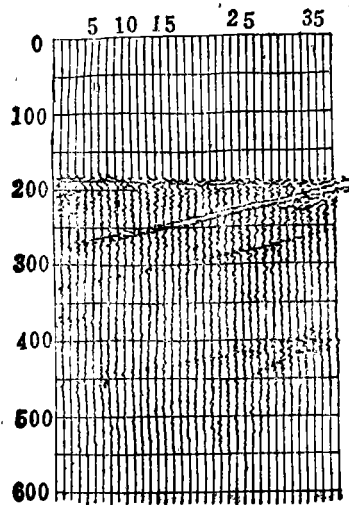


图 10 三层模型测线位置数据采集波形

# 在高压氧下吸氧与噪声暴露间隔 时间对豚鼠听阈偏移的影响

胡正元 史秀凤 魏晶 王曦  
(海军医学研究所)

本文通过实验研究在不同氧压下,以氧与噪声暴露间隔时间对豚鼠听阈偏移的影响,表明组织内储藏的氧不仅在有限时间内可以减轻耳蜗的缺氧状态,而且氧在耳蜗中还进一步改善了内耳的代谢过程,可在较长的时间间隔内提高内耳对噪声的耐受性。

在以往的实验中,我们探讨了高压氧和高浓度氧在预防和治疗噪声性听觉损伤中的作用。研究发现,在噪声暴露前、后呼吸2ATA\*纯氧可以避免噪声引起的永久性听阈偏移;并且噪声暴露前的吸氧效果要比暴露后的吸氧效果为好。研究证实了这种设想,在高压氧或高浓度氧条件下,组织内储藏的氧可以有效地减轻噪声引起的耳蜗缺氧状态。但是应该指出的是,在上述实验中动物预先吸氧与噪声暴露的间隔时间仅限于15分钟。因此,这一实验结果又提出了一个新的问题:如果吸氧与噪声暴露的间隔时间延长,高压氧的预防效果是否依然存在。毫无疑问,这一问题的解答对于高压氧预防噪声引起的听觉损伤具有一定的理论和实际意义。本实

验企图在前述实验的基础上探讨在不同氧压下,吸氧与噪声暴露间隔时间对豚鼠听阈偏移的影响。

## 实验方法

实验动物为雄性豚鼠,体重在200~300克间,平均体重251克,耳廓反射正常。动物随机分成四组:噪声对照组(29只),1ATA吸氧组(9组88只),2ATA吸氧组(12组115只),3ATA吸氧组(12组118只)。上述各吸氧组每次实验由9~10只动物组成一组(一种间隔时间)进行实验。

\*文中ATA指绝对大气压

即使1cm厚的沥青,其顶和底面的反射波也可以清晰地加以分辨,这为多层物理模型资料采集提供了良好的前提。

## 六、结束语

地震物理模拟超声实验中窄脉冲换能器是很重要的。选择合适的压电材料、背衬阻

尼块和保护层,可以有效地做成窄脉冲换能器。在研制这种窄脉冲换能器过程中,得到上海硅酸盐研究所等单位的支持,在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] E. C. Cook: IRE-Convention Record, Vol.4 Part. 9(1956)
- [2] 应崇福等:物理学报Vol.30 No.1 (1981).