

所以 $B_E = A \circ B = \left(\frac{3}{17}, 1, 0\right)$

归一化有:

$$B_E = (0.15, 0.85, 0)$$

即 E 区得分为 7 的隶属度最大. 预测正确.

本问题中评价对象是厅堂中的各区, 指标值差别不大. 此结果用于一般厅堂的预测时可能要外推, 易致结果不准确. 欲避免外推而用内插, 表 5 中指标值不应过分集中.

四、结 语

本文提出了一些厅堂音质评价中应用模糊数学的方法, 其意义在于: **1.** 了解各物理指标的重要性次序, 用于指导设计; **2.** 设计阶段即可预测建成后的单项主观指标和总评价结果; **3.** 已建厅堂的音质评价, 只需少量评价人员给出单项评价便可预测大多数观众的总评价.

用 Fuzzy 关系方程求 A , 再用 $B = A \circ B$ 求 B 从数学上看似乎陷入了逻辑混乱. 但事实

上 A 是从大量厅堂的大量观众中得出的结果, 并经多次调试, 故可认为是准确的. 综合评价时将它与较准确的单项评价结合, 得出的总评价将比直接调查观众总评价的结果准确. 当然, 后者样本足够大时, 二者结果应趋于一致.

本文仅是一些初步的探讨. 还有许多问题须深入研究, 如: **1.** 设计与模糊数学方法相适应的调查、评价及实验方案; **2.** 最优 Fuzzy 关系方程运算模型的选定; **3.** 用 Fuzzy 方程解的存在性来寻求最优指标集.

最后应指出的是, 解决厅堂音质评价问题的途径多种多样, 模糊数学方法不是唯一的也不一定是最好的方法.

参 考 文 献

- [1] Leo. L. Beranek, "Music, Acoustics & Architecture" John Wiley & Sons, Inc. 1962.
- [2] 王季卿, 声学技术, 3(1984), 35—40.
- [3] 包紫薇, 电声技术, 1(1984), 1—5.
- [4] 汪培庄, 模糊集合论及其应用, 上海科技出版社, 1983.
- [5] 陈贻源, 模糊数学, 华中工学院出版社, 1984.

夹心复合 PZT 材料及其应用

庄 詠 珍 徐 其 昌

(中国科学院声学研究所)

1986年3月5日收到

本文主要描述致密-多孔-致密夹心复合 PZT 材料及其在窄脉冲超声换能器方面的应用. 通过两类六种不同夹心复合材料的换能器实验表明, 未充硅橡胶的夹心复合材料是一种制作窄脉冲超声换能器的新型换能材料.

一、前 言

由压电陶瓷相和高分子聚合物相(或空气相)按特定方式连结的复合压电陶瓷材料是近几年兴起的新型压电陶瓷材料, 它大大改善了压电特性, 最突出的是它具有小的介电常数 ϵ 和大的压电电压系数 g 常数, g 常数比普通压

电陶瓷大几十倍. 因此近年来美国^[1-6]. 日本^[7-9]等积极研制各种模式的新型复合压电陶瓷材料, 努力探索应用领域并取得了一定的进展. 1980年我所也研制成有特色的致密-多孔-致密夹心复合(3-3)压电陶瓷材料^[11-12], (本文简称“夹心复合材料”)并用这种材料制成了复合压电陶瓷水听器^[13]. 1985年我所与地矿部保定水文地质、工程地质技术方法研究队合

作。用夹心复合材料研制成宽带窄脉冲超声岩用换能器^[14]，都达到了较好的水平。本文将着重描述适用于窄脉冲超声换能器的夹心复合材料的初步应用情况。实验结果表明，夹心复合(3-3)型压电陶瓷材料具有许多独特的优点，是目前制作窄脉冲超声换能器十分理想的换能材料。

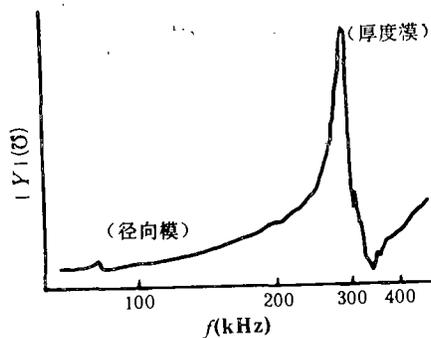
二、实验方法和结果

1. 夹心复合材料的制备

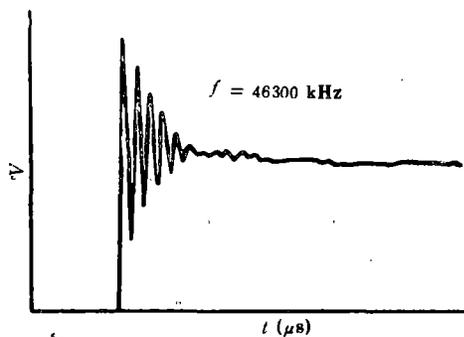
一类试样是三种不同气孔率(0.53—0.61)的夹心复合材料，按文献[11]制备，经烧结、磨加工、烧渗银电极后极化；另一类试样是在上述已制备好的三种材料中注入硅橡胶。所有试样尺寸均为 $\phi 18 \times (1-2.5\text{mm})$ 。两类试样按压电陶瓷测量标准测定性能，其中压电应变系数 \bar{d}_{33} 是用准静态法测得，比常用的静态法正确可靠^[15]。

2. 夹心复合材料的性能

图1给出了夹心复合材料振子的阻抗特性曲线和应电压波形。表1给出了夹心复合材料的



(a)



(b)

图1 (a) 夹心复合材料的阻抗特性曲线；(b) 应电压波的主要介电、压电性能，为了比较，普通压电材料(P-5)性能亦同时列出。

表1的夹心复合材料有以下特点：

a. 密度小 ($\bar{\rho} = 4.0-4.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)，声速低 ($\bar{C} = 1000-1350 \text{m/s}$)，所以它的声阻抗率 ($\bar{\rho C} = 4.2 \sim 6.5 \times 10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) 只有普通压电材料 ($\rho C = 34 \times 10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) 的五分之一，这大大方便了背衬匹配的实施工艺。

b. 介电常数低 ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 300-400$)，远小于普通压电陶瓷材料(1500)，因此尽管夹心复合材料的压电应变系数 \bar{d}_{33} 略小，但它的压电电压系数 $\bar{g}_{33} (= 90-140 \times 10^{-3} \text{Vm/N})$ 比普通压电陶瓷材料大3—4倍，这是夹心复合材料非常突出的优点。

c. 夹心复合材料的径向有效耦合系数与厚度耦合系数之比 (\bar{k}_e/\bar{k}_t) 远小于普通压电陶瓷，而且它仍具有较大的 \bar{k}_t 值 (~ 0.50)，所以它的横向振动的干扰就小，而厚度振动强，波形单纯，从图1(a)可以清楚地看到，它的阻抗曲线径向模很弱，厚度模明显而单纯。

d. 夹心复合材料的机械 Q_M 很小 (< 10)，

表1 夹心复合材料的介电、压电性

	气孔率 p	密度 ρ $\times 10^3 \text{kg/m}^3$	声速 C m/s	声阻抗率 $\rho C \times 10^6$ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$	介电常数 $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	压电常数		耦合系数		机械 Q_M
						\bar{d}_{33} PC/N	$\bar{g}_{33} \times 10^{-3}$ Vm/N	\bar{k}_t	\bar{k}_e	
P-5*		7.7	4500	34	1500	450	30	0.50	0.58	70
夹心复合材料	0.53—0.61	4.0—4.6	1000—1350	4.2—6.5	300—400	350—400	90—140	0.51	0.15	<10

注：*系我所常用接收型压电陶瓷材料。

所以它的应电压波形衰减很快(图1(b))。综上所述,夹心复合压电陶瓷材料非常适于制作窄脉冲超声换能器,若在一定范围内调节夹心复合材料的气孔率(即复合两相的比例),还可望满足不同的设计要求。

3. 夹心复合材料在岩体用换能器方面的初步应用

有关宽带岩用换能器的设计、构造和测试方法可参考文献[14]。这里仅将部分结果在图2和表2给出。图2(a, b)分别是方脉冲和阶跃脉冲激励下换能器的接收波形及其频谱曲线。表2是两类六种不同夹心复合材料的岩用换能器主要性能。为比较起见,同时列出了普通压电陶瓷岩用换能器的性能。表2中 f_0 为岩用换能器的共振频率; Δf 为换能器6dB带

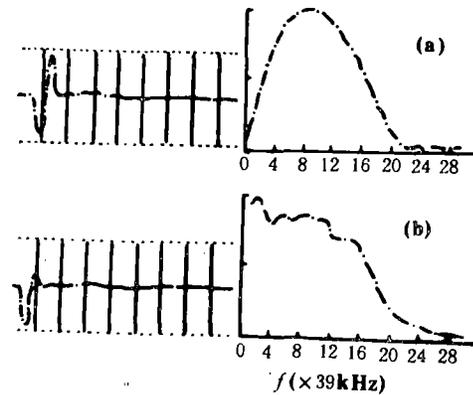


图2 夹心复合材料换能器的接收波形(左)和频谱曲线, (a)方脉冲激励($\tau \sim 1/2f_0$); (b)阶跃脉冲激励

宽; η 为一对换能器收发传输效率,定义为接收电压与发射电压之比; Q 为换能器的机械品质

表2 夹心复合材料岩用换能器特性

	普通压电陶瓷 (PZT-5)	夹心复合压电陶瓷					
		未注硅橡胶			注硅橡胶		
		1	2	3	1'	2'	3'
f_0 (kHz)	547	700*	400	234	231	351	234
Δf (kHz)	314	700	514	325	287	321	276
η (%)	3.5	10.0	7.8	5.5	3.1	4.5	4.8
Q	1.9	1.0	0.76	0.71	0.81	1.1	0.84

注: * 背衬材料的PC略大于换能材料。

因素,定义为 $f_0/\Delta f$ 。

图2清楚地看到,在方脉冲激励下,换能器的接收波形单纯,仅一个周期(见(a));在阶跃脉冲激励下,换能器接收波形单纯,仅半个周期(见(b))。从频谱图看,几乎不存在径向振动能量,因此,用夹心复合材料制作的超声换能器性能十分优良,它是窄脉冲超声换能器的理想换能材料。

表2清楚地看到,夹心复合压电陶瓷材料制作的岩用换能器,比用PZT-5材料制作的岩用换能器具有更高的收发传输效率(3.1%—10.0%)、更低的 Q (0.71—1.1)。比较不同的夹心复合材料制作的岩用换能器性能,可以看到,用未注硅橡胶的夹心复合材料制作岩用换能器,比注入硅橡胶的收发传输效率更高、 Q 更

低。因此,实验表明,未注硅橡胶的夹心复合压电材料是目前制作窄脉冲超声换能器理想的换能材料。

三、结 论

致密-多孔-致密夹心复合(3-3)压电陶瓷材料具有 ρC 小, $\bar{\epsilon}$ 低及 \bar{g}_{33} 大的独特优点,它比现有压电材料(如PZT, PVDF等)更适用于窄脉冲超声换能器。调节夹心复合材料的气孔率,还可以得到不同特性的夹心复合材料。用气孔率为0.53—0.61未注硅橡胶的夹心复合材料制得换能器灵敏度高,收发传输效率达5—10%,接收波形单纯,几乎没有余振,从而大大提高了分辨率。由于夹心复合材料的 ρC 小

(下转第24页)

级与它对应的时间关系,折合时可应用下列公式:

$$t_2 = t_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

或者

$$t_2 = t_1 \cdot 10^{\frac{\alpha(L_1-L_2)}{20}} \quad (2)$$

式中, t_1 和 t_2 , L_1 和 L_2 , p_1 和 p_2 分别为改变试验参数前后的试验时间,总声压级,总声压值; α 为加速因子,它与结构形式、材料、尺寸、应力集中情况等有关,视具体结构而定。

在编制进气管道试验噪声载荷谱时,根据飞机的使用寿命及考虑载荷的分散和安全系数取 3.3,并据结构具体情况取加速因子 α 为 5,其谱最后归纳为:总声压级为 156dB,试验时间为 20 小时,频率范围为 50—2000Hz。

试验结果,结构未发生疲劳破坏现象,达到了预期的目的。并证明了被试进气管道结构具

有较高的抗声疲劳性能,其原因是:

1. 结构型式:进气管道由泡沫塑料夹层、蜂窝夹层、蒙皮垫块夹层、滚焊、化铣壁板等结构构成,它们都有较好的抗声振能力,如两铝板间填充硬质泡沫塑料夹层结构,由于激振空气通过泡沫网眼结构的抽动而消耗了振动能,提高结构的耐振能力。这些结构型式又都减少了象铆钉、螺栓孔之类的应力集中源。

2. 在气密座舱和整体油箱部段结构,缝内都加垫密封腻子布或胶膜连接,这相当于加阻尼材料。舱内的增压也起了振动阻尼作用。

3. 进气管道结构都由具有曲率的壁板构成,提高了承载能力。

本文应用研究结果,分析与排除了结构声疲劳故障,成效较显著。

参加研究试验的有姜亮、顾文达、袁骧麟、余立蓉等同志。

(上接第 31 页)

(4.2—6.5 × 10⁶kg/m²·s) 只有普通压电陶瓷的五分之一,使背衬匹配易于实现,从而简化了换能器结构,改善了工艺。不难预料,这种新型换能材料的出现,宽频带、窄脉冲超声换能器的优良应用效果,将有助于岩石试件、混凝土等方面的超声检测,有助于三维地震物理模型的试验以及岩体声波频谱分析方面的研究工作。夹心复合压电陶瓷材料亦将会在超声医学、超声无损检测等方面获得广泛的应用。

文中有关换能器的数据、图表由地矿部保定水文地质、工程地质技术方法研究队夏振英等同志提供,在材料制备中还得到本所四室同志的大力帮助,在此一并致衷心感谢。

参 考 文 献

[1] R. E. Newnham, D. P. Skinner, and L. E. Cross, *Mater. Res. Bull.*, 13(1978), 525.

[2] D. P. Skinner, R. E. Newnham and L. E. Cross, *Mater. Res. Bull.*, 13(1978), 599.
[3] T. R. Shrout, W. A. Schulze, and J. V. Biggers, *Mater. Res. Bull.*, 14(1979), 1553.
[4] K. Rittenmyer, T. R. Shrout, W. A. Schule, and R. E. Newnham, *Ferroelectrics*, 41(1982), 189.
[5] A. Safari, R. E. Newnham, L. E. Cross, and W. A. Schule, *Ferroelectrics* 41(1982), 197.
[6] R. E. Newnham, A. Safari, J. Giniewicz, and B. H. Fox *Ferroelectrics*, 60(1984), 15.
[7] K. Nagata, H. Igarashi, K. Okazaki, and R. C. Bradt, *Japan J. Appl. Phys.*, 19(1980), L37.
[8] M. Miyashita, K. Takano and T. Toda, *Ferroelectrics*, 28(1980), 397.
[9] H. Hikita, K. Yamada, M. Nishioka and M. Ono. *Ferroelectrics*, 49(1983), 265.
[10] H. Banno, *Ferroelectrics*, 50(1983), 329.
[11] 庄詠璆、何远光、徐其昌,应用声学, 1-3(1982), 39.
[12] Y-Q Zhuang, Y-G He, and Q-C Xu, *Ferroelectrics*, 49(1983), 241.
[13] 何远光、庄詠璆、徐其昌,一种新型的多孔复合 PZT 陶瓷水听器,第三届全国声学会议论文,上海,1982. 6.
[14] 夏振英等,(待发表).
[15] 潘潮,陈守六,应用声学, 6-1 (1987), 37.