

低声阻抗复合压电陶瓷的研究及应用

庄咏璆 周建国 易晓星 潘 潮

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1996年2月27日收到

摘要 本文研究了我们所配制夹心结构复合压电材料低声阻抗的特性. 实验表明, 夹心复合压电陶瓷材料的声阻抗, 与所用陶瓷材料的种类、气孔率、孔径、样品厚度以及工艺制备过程有关. 实验证明, 研制特定声阻抗的材料是可行的. 最后, 用研制的新材料成功地应用于混凝土、C/C 复合材料等非金属材料的超声检测中.

关键词 复合压电陶瓷材料, 声阻抗, 宽带超声换能器

Piezoelectric composites with low acoustic impedances and their applications

Zhuang Yongqiu, Zhou Jianguo, Yi Xiaoxing, Pan Chao

(*Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing 10080*)

Abstract The characteristics of low acoustic impedance in our sandwich piezoelectric composites are studied. The results show that acoustic impedance value depends on ceramic material, porosity, thickness of sample and their processing. It has also been demonstrated that manufacturing sandwich piezoelectric composite with specific acoustic impedance is feasible. Ultrasonic transducers made of our sandwich piezoelectric composites have been successfully applied to ultrasonic nondestructive testing of concrete and carbon-carbon composite.

Key words Piezoelectric composite, Acoustic impedance, Wide-band ultrasonic transducer

1 前言

在超声检测领域, 压电换能器是一个最为关键的器件, 尤其在电子技术高度发达、高质量电路设计和制作更为方便的今天, 更是如此. 作为一个理想的超声检测换能器, 要求其与被测介质实现理想的声匹配, 以达到声能的应用声学

最佳利用, 也即必须具有宽带窄脉冲的特性, 才能对改善超声检测仪器的特性(诸如, 纵向分辨率……等)起到不可替代的重要作用, 事实上被检测介质的声阻抗却是千差万别的, 而目前常用的换能材料尚难以与它实现理想的声匹配, 所以, 以往人们一直在致力于采用一至二层过渡匹配层的研究, 以改善声匹配的效

算^[1-3]。但即便这样,严格说来这种方法也仅是在某一定频率实现匹配;再有,多层匹配使工艺上增加了复杂性,而所需的中间层材料也难以寻找,要实现也相当困难。为此,我们采用压电复合原理,用直接调节压电材料自身的声阻抗,使之与被测介质尽量匹配,这比常用的增加中间匹配层方法更直接、更有效、更合理;在工艺上也更易于实现。实验表明,这一方法是可行的。

2 实验方法

(1) 样品制备

本实验按文献[4]所提出的夹心复合模型和制备工艺研制样品。两部分瓷料(代号为LS、BL、PM及NL四种压电陶瓷粉和分别在该瓷粉中混入一定比例的球状甲基丙烯酸甲酯制成多孔陶瓷粉)按三层夹心模型压制成坯体,经缓慢排塑、烧结、磨加工后烧渗电极,极化后十天测量介电、压电性能。

(2) 性能测定

夹心复合压电陶瓷材料按IEEE压电测量标准测量试样的介电和压电性能,用HP 4192 A低频阻抗分析仪测得计算所需的各参数。

夹心复合压电陶瓷材料的厚度模声速按下列公式计算:

$$C = 2 f_p t$$

其中厚度模并联共振频率(f_p)由HP 4192 A测得, t 为样品总厚度。夹心复合压电陶瓷材料的表观密度 ρ 通过测量体积和称取干重来计

算。这样,夹心复合压电陶瓷的声阻抗率就为 ρ 和 C 的乘积。样品的 d_{33} 值直接由ZJ-2型准静态 d_{33} 计多点测定后取平均值。

3 实验研究

(1) 陶瓷基料对夹心复合压电陶瓷材料 ρC 的影响。通过用四种不同组成的压电陶瓷(LS, BL, PM及NL)作基料制备四种相应的夹心复合材料(LS I, BL I, PM I及NL I),其性能列于表1,实验表明:选择附合性能要求的压电陶瓷是研制低阻抗夹心复合压电材料的基础。

表1 基料与对应夹心复合压电陶瓷材料 ρC 的关系

	LS I	BL I	PM I	NL I
$\rho C(10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s})$	7.34	8.19	9.25	10.7
$d_{33}(10^{-12} \text{ C/N})$	450	600	620	410

注:样品密度趋于一致条件下

(2) 气孔率 P 对夹心复合压电陶瓷材料 ρC 的影响。用代号为LS的压电陶瓷基料,制备六种不同气孔率的夹心复合材料,得到了六种不同声阻抗率的夹心复合材料,全部性能见表2及图1。实验表明:选用合适的气孔率是研究具有特定声阻抗夹心复合压电陶瓷材料的关键。

(3) 厚度对夹心复合压电陶瓷资料 ρC 的影响。当多孔陶瓷的气孔率不变的情况下,不同厚度的夹心复合压电陶瓷材料,呈现不同的 ρC 值,其变化规律见表3及图2。

表2 P 与 ρC 的关系(含性能)

	LS	1	2	3	4	5	6
气孔率 P	0.04	0.46	0.53	0.57	0.61	0.64	0.68
密度 $\rho(10^3 \text{ kg/m}^3)$	7.70	5.20	4.64	4.34	4.06	3.56	3.57
声速 $C(\text{m/s})$	4500	2000	1587	1414	1200	1017	966
声阻抗率 $\rho C(10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s})$	34	10.4	7.36	6.13	4.87	3.77	3.42
介电常数 ϵ_{33}/ϵ_0	1700	600	468	401	335	277	258
压电常数 $d_{33}(10^{-12} \text{ C/N})$	450	430	410	434	427	452	473
$g_{33}(10^{-3} \text{ Vm/N})$	29	79	99	122	144	184	207
机械品质因素 Q_m	60	10	15	16	11	13	15

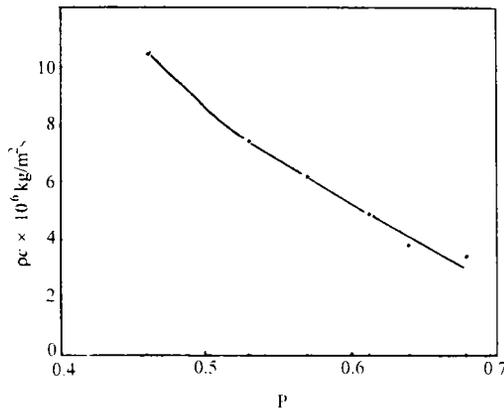


图1 夹心复合材料声阻抗 ρC 与气孔率 P 的关系

表3 厚度 t 与 ρC 的关系

参数 $\sqrt{10^{-3}m}$	0.40	0.65	0.70	0.75	0.90	1.10	1.21	1.69	2.40
密度 $\rho(10^3 \text{ kg/m}^3)$	6.41	5.67	5.70	5.20	5.08	4.69	4.35	4.34	4.17
声速 $C \text{ (m/s)}$	2358	2052	2013	1841	1605	1340	1403	1420	1416
声阻抗率 ρC ($10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$)	15.1	11.6	11.5	9.57	8.16	6.28	6.18	6.16	5.90

表4 孔径与 ρC 的关系

孔径 ($\mu \text{ m}$)	~100	50~60	30~40
$\rho(10^3 \text{ kg/m}^3)$	4.64	4.36	4.62
$C \text{ (m/s)}$	1800	1798	1890
$\rho C(10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s})$	8.30	7.84	8.70

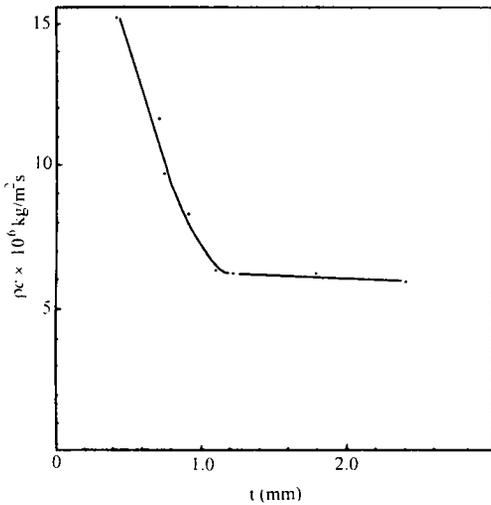


图2 夹心复合材料声阻抗 ρC 与厚度 t 的关系

(4) 孔径对夹心复合压电陶瓷材料 ρC 的影响. 在试样厚度、气孔率不变的情况下, 引入不同孔径的造孔材料, 得到了 ρC 值相近的夹心复合材料, 见表4. 这表明在本实验的范围内, 孔径对 ρC 而言不是关键因素.

(5) 工艺因素对 ρC 的影响. 在大量的实应用声学

验研究中, 已发现, 成型压力的大小、烧结制度的合理程度、磨量的控制以及极化的完善程度, 均在不同程度上影响着夹心复合压电陶瓷材料的 ρC 值, 但其规律性还有待深入研究.

综上所述, 选择性能符合要求的瓷料, 确定合适的气孔率和造孔材料, 并考虑其厚度影响, 研制出特定 ρC 的夹心复合压电陶瓷材料是可实现的.

4 应用实例

本文研究的夹心复合压电陶瓷, 不仅声阻抗低, 而且可随需要调节; 不仅纵向耦合系数高 k_t 为(0.50~0.70), 横向耦合系数低(K_p 为 0.16~0.20), 而且 Q_m 小于常用压电陶瓷. 因此, 用它制成的窄脉冲短余振宽带超声换能

器,在混凝土及工程复合材料的超声检测中得到了满意的应用效果.

例 1:

同济大学声学所研制的水泥混凝土路面厚度检测仪^[5],由于采用了本研究材料研制的换能器得了波形清晰的反射波(图 3),确保完成了上海 1994 年的新建道路(公平路、平凉路、外滩、建国西路、共和路……)的竣工验收工作.在 30 cm 范围内,路面厚度检测精度的平均相对误差达到 5%左右.经专家鉴定,该仪器目前处于国内领先水平.

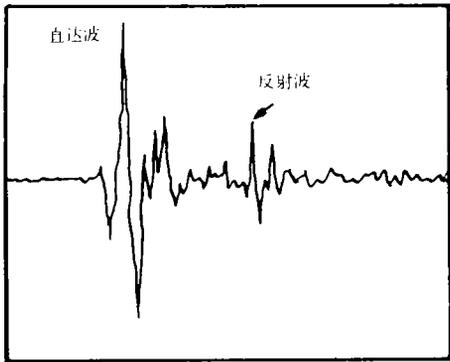


图 3 水泥混凝土路面厚度仪所测得到的直达波与反射波

(地点:上海建国西路.超声: $t=245 \mu s$ 厚度: 27.8 mm)

例 2:

航天部某研究所用本研究材料研制的超声传感器完成了国家重点工程中 c/c 复合材料部件的超声测厚任务.由于本材料振动模式单纯,使传感器在脉冲激励下发射余振缩短 1/3 (与 PZT 比较),大大减小了测量盲区;由于声

阻抗与被测材料接近,易于匹配,使相同条件下的回波信号增加 8—10 dB;在相同性能水平下传感器的背衬层厚度变薄,有利于减小传感器的体积、重量,并给传感器的工艺带来方便.因此,用本材料做的传感器通过了温度(-40~+70 高低温循环 10 次),振动(20~2000 Hz)三向随机振动(5~10 g)和三向 70 g 冲击(各冲击 5 次)等恶劣条件的测试,1992 年作为正式产品在飞行条件下使用.

5 结论

夹心复合压电陶瓷材料,具有可调节的低声阻抗值、大的纵向压电性能和低的 Q 值,它是目前压电陶瓷的新品种之一.用它制作窄脉冲、短余振的超声换能器,在非金属材料超声检测中具有独特的应用价值.

致谢 中国科学院声学所陈守六同志在整个研究工作中的支持和帮助,同济大学林维正老师和航天部某所魏沛仁等同志提供了新材料应用结果,作者在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Kossoff G. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, 1966, **SU-13**: 20—30.
- [2] Gool J H. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, 1979, **SU-26**: 385—393.
- [3] Breimesser USP 4672591, 1987.
- [4] 庄咏, 何远光, 徐其昌. *硅酸盐学报* 1988; 16 (1): 41—49.
- [5] 林维正, 袁益镛, 孙常俊等. *中国机械工程学会无损检测学会第六届年会论文集*, 北京, 1995, 53—55.

(上接第 6 页)

参 考 文 献

- [1] Tsuyoshi Usagawa, Yuji Morita, Masanao Ebata. *J. Acoust. Soc. Jap.*, 1992, (E)**13**(5): 295—300.
- [2] Tsuyoshi Usagawa, Masanao Ebata. *Proceedings of 14th international congress on acoustics*, 3 G6-1, Sept, 1992, Beijing, China.
- [3] Mean-Hoa Lu, Clarkson P M. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, **93**(2): 1122—1135.

- [4] 郑兆宁, 向大威. *水声信号被动检测与参数估计理论*, 北京: 科学出版社, 1983.
- [5] 向大威. *噪声抵消系统及其抵消性能*, 水声通讯, 1981, (2): 1—15.
- [6] Kuttruff H. *Room Acoustics*, New York: Applied Science, 1973.
- [7] 向大威, 温周斌, 顾亚平. *声学技术*, 1992, **11**(1, 2): 32—39.