

化等问题,有待进一步研究。对检测中所获得的大量路况信息,如路面对超声脉冲的反射率、若干对换能器多通道测量时所取得的路面横断面状况等,有待进一步分析和利用。

参 考 文 献

- [1] Elton David J., *J. of Transportation Engineering*, 114-1 (1988), 76—92.
- [2] Malhotra V. M., *International Conference on In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, Ottawa, Canada, October 1984, 1—16.
- [3] Cantor T. R., *International Conference on In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, Ottawa, Canada, October, 1984, 581—602.
- [4] Bekker M. G., *地面-车辆系统导论*, 机械工业出版社, 1978, 434—441.
- [5] 庄表中,陈乃立, *随机振动的理论及实例分析*, 地震出版社, 1985, 235—238.

检测超声换能器用 1-3 型压电 PZT/环氧复合材料及换能器的研究

耿学仓 李明轩

(中科院声学研究所)

1991 年 2 月 1 日收到

本文介绍了一种制做 1-3 型压电 PZT/环氧复合材料的新方法。此方法采用了 PZT 小柱非周期性均匀分布,有效地消除了由于 PZT 小柱周期性分布而产生的有害横向结构共振模式,获得了振动模式较单纯的 1-3 型压电复合材料晶片,研制出宽带(低 Q)换能器及高斯型换能器。

一、引 言

压电复合材料,由于具有较大的压电系数 d_{33} ,较高的机电耦合系数 k_t ,以及较小的特性阻抗,较小的机械 Q 值,是宽带超声换能器较为理想的材料。压电复合材料换能器应用于声呐、医学超声、机器人传感、声波测井、以及轻负载材料的无损检测^[1-5],都可获取较好的效果。

1-3 型压电复合材料的制备方法主要有两种,一种是 K. A. Klicker 提出的插入-填充法^[6],另一种是 H. P. Sarakus 提出的切割-填充法^[7]。这两种方法的一个共同缺点是采用了 PZT 小柱周期性分布,而必然要产生有害的横向结构共振模式^[8-9]。为了克服这一缺点, F. R. Montero 提出了切割-挤压-填充法^[10],这种方法虽然有效地消除了横向结构共振模式,但由于其制作过程中需要挤压切割后的 PZT

小柱,使其破裂成无规则形状,这需要 PZT 相体积百分比在 60% 以上时才能完成,与一般压电复合材料(PZT 相体积百分比为 20—30%)相比,挤压法制作的压电复合材料特性阻抗较大,影响其与轻负载介质(如水)匹配。

为了克服以上缺点,我们仍采用插入-填充法,所不同的是把 PZT 小柱周期性分布改为非周期性均匀分布,有效地消除了横向结构共振模式,而不改变压电复合材料的其它性能。此外,由于这种方法有任意分布 PZT 小柱的特点,我们还用这种方法研制了非均匀分布的宽带(低 Q)压电复合材料,并制出宽带换能器及高斯型换能器。

二、1-3 型压电 PZT/环氧复合材料晶片的研制及性能测试

1. 压电晶片的制备

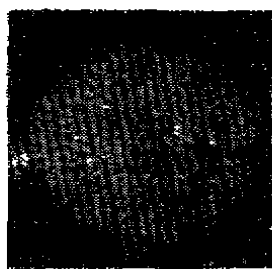


图1 非周期分布压电晶片外形

用常规的压电 PZT-5 薄片, 切割成适当尺寸的矩形条, 把这些矩形条非周期性地均匀排列在一固定支架上。再把插有 PZT 小条的支架放入塑料圆筒中, 在真空条件下灌入低粘度环氧, 高温条件下固化。最后, 切掉支架及多余的环氧, 并切成适当厚度的圆片, 磨平, 沉银电极, 在 75℃ 油中极化, 即制作出 1-3 型压电 PZT/环氧复合材料晶片。沉银前的晶片外形如图 1 所示。

2. 压电晶片的性能测试

用静态 d_{33} 测试仪测量了压电晶片的压电系数 d_{33} , 用 HP-4191A 阻抗分析仪测量了晶片的阻抗特性, 介电损耗 $\lg \delta$, 机械 Q 值, 静态电容 C_0 及夹持电容 C_T , 并用下式计算出机电耦合系数 k_t ,

$$k_t^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot \left(\frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \right) \quad (1)$$

其中 f_r 是共振频率, f_a 是反共振频率, 结果如表 1 和表 2 所示。

从表 1 可以看出, 压电复合材料的特性阻抗很小, 适合与低负载介质耦合匹配。对于水负载而言, 如果采用一层四分之一波长匹配层, 对于 PZT 相体积百分比为 30% 的压电复合材料晶片, 根据 $Z = \sqrt[3]{Z_w^2 \cdot Z_{\text{PZT}}}$ (Z 是四分之一波长匹配层的特性阻抗, Z_w 是水负载的特性阻抗, Z_{PZT} 是压电复合材料晶片的特性阻抗) 计

表 1 1-3 型压电复合材料的声学特性

样品材料	PZT 相体积百分比	密度 (g/cm ³)	共振频率 (kHz)	声速 ($\times 10^3$ m/s)	特性阻抗 ($\times 10^6$ kg/m ² ·s)	厚度 (mm)
PZT-5		7.5	997	4.35	32.63	2.00
环氧 618		1.15		2.50	2.88	
复合材料 1#	24%	2.67	686	3.33	8.90	2.10
复合材料 2#	25%	2.74	1227	3.35	9.18	1.16
复合材料 3#	30%	3.06	827	3.55	10.86	1.75

表 2 1-3 型压电复合材料的机电特性

样品材料	PZT 相体积百分比	d_{33} ($\times 10^{-12}$ C/N)	ϵ_{33}^T	k_t	Q	介电损耗 $\lg \delta$
PZT-5		420	1700	31.5%	153.4	0.020
环氧 618			4			
复合材料 1#	24%	330	419	56%	10.8	0.014
复合材料 2#	25%	335	425	58%	8	0.015
复合材料 3#	30%	345	512	65%	12.2	0.026
复合材料 4#	20%		340	71%	5	0.021
复合材料 5#	15%		255		7.3	0.039

注: 复合材料 4#、5# 为高斯型材料, 体积百分比和介电常数均为平均值

算 Z 为 2.89 Mrayl, 环氧 618 的特性阻抗 2.88 Mrayl 与其极为接近, 十分便于制作辐射阻抗匹配层。

从表 2 可以看出, 压电复合材料的压电系数较大, 介电常数适中, 机电耦合系数大, 机械

Q 值小, 是制作宽带超声换能器的较为理想的材料。

此外, 还用扫频仪观察了压电晶片的共振模式, 图 2 和图 3 是压电复合材料晶片及 PZT 材料晶片的扫频仪导纳图。由图 2 和图 3 比较

可以看出,压电复合材料的径向模振动比 PZT 材料的径向模振动弱得多。从图 2 还可以看出,压电复合材料晶片除了厚度模共振,以及一个微弱的径向模共振外,没有其它的共振模式出现,说明所采取的工艺制备的压电复合材料晶片有效地消除了横向结构共振模,具有较单纯的厚度共振模。

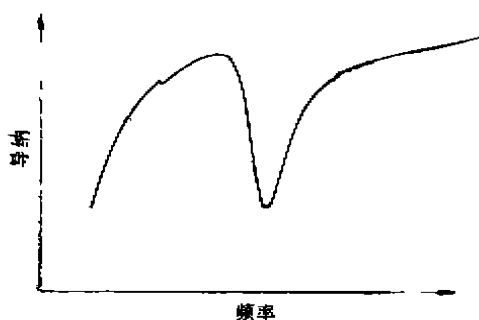


图 2 压电复合材料晶片的扫频仪导纳图

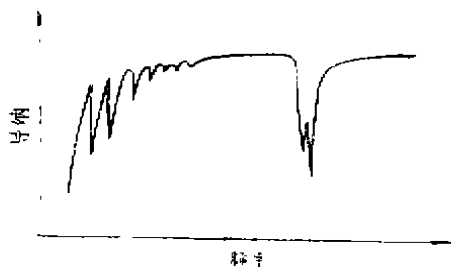


图 3 压电 PZT-5 晶片的扫频仪导纳图

三、宽带压电复合材料换能器及高斯型换能器的研制

厚度模 1-3 型压电复合材料的性能可以用下列关系表示^[11]

$$\begin{aligned}\bar{c}_{33}^D &= \nu[c_{33}^E - 2(c_{13}^E - c_{12}^E)^2/\bar{c}(\nu)] \\ &\quad + (1 - \nu)c_{11}^P \\ \bar{e}_{33} &= \nu[e_{33} - 2e_{31}(c_{13}^E - c_{12}^E)/\bar{c}(\nu)] \\ \bar{\epsilon}_{33}^S &= \nu[\epsilon_{33}^S + 2e_{31}^2/\bar{c}(\nu)] \\ &\quad + (1 - \nu)\epsilon_{11}^P \\ \bar{c}(\nu) &= c_{11}^P + c_{12}^E + [\nu/(1 - \nu)](c_{11}^P + c_{12}^E)\end{aligned}\quad (2)$$

压电复合材料的等效密度由下式给出

$$\bar{\rho} = \nu\rho^E + (1 - \nu)\rho^P \quad (3)$$

式中,角标 c 、 P 分别代表陶瓷相及聚合物相。

ν 是压电复合材料中 PZT 相的体积百分比, $c_{33}^E, c_{13}^E, c_{12}^E, e_{33}, e_{31}, \epsilon_{33}$ 分别表示压电复合材料中 PZT 相的弹性常数、压电系数、介电常数,而 $c_{11}^P, c_{12}^P, \epsilon_{11}^P$ 分别表示聚合物相的弹性常数和介电常数,字母上边的一短横表示压电复合材料的等效常数。根据压电关系有

$$\begin{aligned}\bar{c}_{33}^D &= \bar{c}_{33}^E + \bar{e}_{33}^2/\bar{\epsilon}_{33}^S \\ \bar{k}_{33} &= \bar{e}_{33}/\bar{\epsilon}_{33}^S, \quad \bar{k}_t = \bar{e}_{33}/\sqrt{\bar{c}_{33}^D \cdot \bar{\epsilon}_{33}^S} \\ \bar{z}_c &= \sqrt{\bar{c}_{33}^D \cdot \bar{\rho}}, \quad \bar{u} = \sqrt{\bar{c}_{33}^D/\bar{\rho}}\end{aligned}\quad (4)$$

其中 $\bar{z}_c$ 是压电复合材料的等效特征阻抗, $\bar{u}$ 是等效纵波声速。

从以上各式可知,压电复合材料的性能与材料中 PZT 相的体积百分比有关,这样,就可以通过改变同一压电复合材料中 PZT 小柱的横向体积百分比来设计不同性能的压电复合材料换能器。

1. 宽带(低 Q)压电复合材料晶片及高斯型压电复合材料晶片的研制。

压电复合材料具有比较低的 Q 值,是制作宽带换能器的理想材料。此外,又由于压电复合材料的声速随着 PZT 相的体积百分比 ν 的增加而增加,所以,只要使得压电晶片中的 PZT 相的体积百分比 ν 在压电圆片的径向取某种非均匀分布,压电晶片中的声速也会取相应的分布。当压电片的厚度一定时,压电晶片的厚度模共振频率会沿径向取相应的非均匀变化,这就有可能使压电复合材料的机械 Q 值进一步减小。

具体作法是,晶片直径为 30mm,在晶片中心半径 r 为 5mm 的圆面积内均匀分布 PZT 小柱,其体积百分比 ν 为 50%,然后从 $r = 5\text{mm} - 15\text{mm}$ 使 PZT 相体积百分比线性减小。整个压电晶片的平均 PZT 相体积百分比为 26%。为了比较,同时还制作了直径为 30mm, PZT 相体积百分比为 26%,均匀分布的压电晶片,两种晶片的性能列于表 3 中,从表 3 可以看出,在共振频率相当时,机电耦合系数的大小也相当,非均匀复合材料具有比均匀复合材料

表3 均匀与非均匀分布压电复合材料的性能比较

样品材料	PZT 相体积百分比	共振频率 (kHz)	k_t	Q	介电损耗
均匀复合材料 1#	26%	202	49%	27.9	0.04
均匀复合材料 2#	26%	866	57%	22.7	0.028
非均匀复合材料 1#	26%	269	49%	15.6	0.037
非均匀复合材料 2#	26%	882	62%	8.7	0.050

更低的 Q 值。

高斯型换能器用压电晶片要求其压电性能在径向取高斯分布, 由于压电复合材料的压电性能与 PZT 相体积百分比 v 有关, 也可以通过改变 v 来作出高斯型换能器用压电复合材料晶片。尽管压电复合材料的压电性能随 PZT 相体积百分比的变化关系较为复杂, 但一般说来, 压电常数随 PZT 相体积百分比的增加而增加。作为近似处理, 可让 $v(r)$ 取高斯型分布, 就有可能作出高斯型换能器用压电复合材料晶片。表 2 中所列 4#、5# 就是用这种方法制

做的直径为 30mm, PZT 相体积百分比平均值分别为 20% 和 15% 的高斯型压电复合材料晶片。需要指出的是, 高斯型晶片也是一种非均匀材料, 其机械 Q 值也小。

2. 宽带换能器及高斯型换能器的研制

用上面制作的压电复合材料晶片、制作了宽带换能器及高斯换能器。

换能器的制作工艺如下, 采用环氧加钨粉作背衬吸声块, 环氧作为四分之一波长辐射阻抗匹配层, 换能器的性能如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 同一工艺条件下制作的

表4 压电复合材料换能器的性能

换能器类型	直径 (mm)	中心频率 (kHz)	相对带宽	从 20mm 钛试块反射的回波幅值 (v)
均匀材料换能器 1#	30	830	84%	4.0
均匀材料换能器 2#	30	850	80%	4.1
非均匀材料换能器 1#	30	940	93%	4.1
非均匀材料换能器 2#	30	925	91%	4.2
高斯换能器	30	1200	85%	3.9
PZT 换能器	30	997	60%	5.0

注: 换能器上加 250V 负脉冲, 没有电匹配

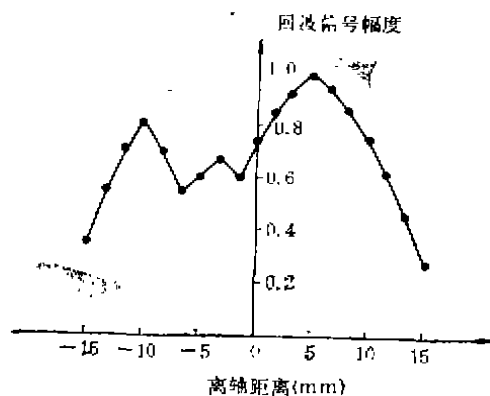


图4 直径为 30mm、中心频率为 830kHz 的普通压电复合材料换能器在水媒质中距离换能器表面 $l = 74\text{mm}$ 处的横向声场分布(近场距离为 125mm)

度基本相同, 而非均匀材料换能器的相对带宽更大一些。

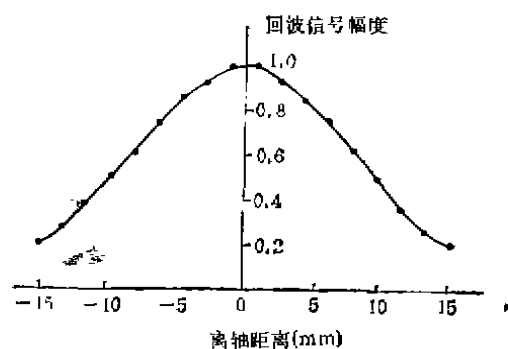


图5 直径为 30mm, 中心频率为 1.2MHz 的高斯型换能器在水媒质中距离换能器表面 $l = 74\text{mm}$ 处的横向声场分布(近场距离为 180mm)

均匀及非均匀压电复合材料换能器的相对灵敏

应用声学

高斯型换能器的制作工艺同上,其性能也列于表4中,其相对带宽和相对灵敏度和宽带压电复合材料换能器相当。用小球反射法测量了普通压电复合材料换能器及高斯换能器的声场,如图4和图5所示,从图中可以看出,高斯型换能器的横向声场分布更接近于高斯分布。

综上所述,研制的宽带换能器具有频带宽、灵敏度较高等优良性能,是医学超声和轻负载检测用的理想探头。

四、结 论

用非周期性均匀分布 PZT 小条的方法,有效地消除了横向结构共振模式,使得压电复合材料的厚度共振模式更单纯且不影响其它性能。同时,还提出了制作非均匀压电复合材料晶片及高斯型晶片的方法,用这两种晶片制作宽带换能器及高斯型换能器,取得了较好的结果。

为了制作高性能的宽带换能器和高斯换能器,还需作更深入的理论工作,以认清 PZT 相体积百分比 ν 随 r (半径)的变化对带宽和声场的影响。

感 谢

此工作在开题和研究过程中都得到了应崇

福教授的指导,实验工作得到了杨玉瑞的帮助,在此表示感谢。此外,王治庭、庄永璆、朱厚卿等提供了 PZT 材料及实验仪器,与张海澜的讨论使作者受到不少启发,也在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Shaulov, A. A., Smith, W. A. and Singer, B. M., IEEE 1984 Ultrasonics Symposium, 545—548.
- [2] Hiroshi Takeuchi and Chitose Nakaya, *Ferroelectrics*, **68** (1985), 53—61.
- [3] Chitose Nakaya, Hiroshi Takeuchi, Kageyoshi Katakura and Akimasa Sakamoto, IEEE 1985 Ultrasonics Symposium, 634—636.
- [4] Hayward, G. and Hossack, J. A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **88** (1990), 599—608.
- [5] Jong Hyun IH and Byung Ho Lee, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **35** (1988), 73—77.
- [6] Klicker, K. A., Biggers, J. V. and Newnham, R. E., *J. Am. Cera. Soc.*, **64** (1981), 5—9.
- [7] Savakus, H. P., Klicker, K. A. and Newnham, R. E., *Mat. Res. Bull.*, **16** (1981), 677—680.
- [8] Gururaja, T. R., Schulze, W. A. and Cross, L. E., *Ferroelectrics*, **54** (1984), 183—186.
- [9] Gururaja, T. R., Schulze, W. A., Cross, L. E. and Newnham, R. E., IEEE 1984 Ultrasonics Symposium, 523—527.
- [10] Montero de Espinosa, F. R., Pavia, V., Gallero-Juárez, J. A. and Pappalardo, M., IEEE 1986 Ultrasonics Symposium, 691—696.
- [11] Smith, W. A., Shaulov, A. A. and Auld, B. A., IEEE 1985 Ultrasonics Symposium, 642—647.

(上接第46页)

3. 该所已建成的表面安装技术(SMT)生产线是国内医用超声设备行业第一条具有国际先进水平的生产线,是国产超声显像诊断仪制造技术的重大进步,对提高超声显像诊断设备的质量及其可靠性具有重大意义。探头生产线采用一系列先进技术和设备,工装和检测手段齐全,能保证探头生产中质量和性能的一致性和稳定性。生产线的质量保证体系完善,生产运转正常,具备批量生产条件。

4. 四种类型的超声显像诊断仪的研制和试生产是成功的,在同类产品中,其技术性能达到八十年代中后期国际水平,在国内处于领先地位。

鉴定委员会一致通过鉴定,并建议尽快投入批量生产。

代表们对该所几年来坚持技术引进、奋力拼搏、致力于高技术开发的精神和取得的显著成绩给予了高度的评价。

代表们还强烈呼吁大力提倡使用国产仪器,因为这些仪器不仅在质量上可与同类进口仪器相媲美,而且价格仅为其2/3,这样可以节省大量外汇和加速发展民族工业。

(冯 若 供稿)