

准 1-3 复合型压电换能器的研制

毕彦¹, 周益明², 童晖², 翁汝莲²

(1. 海军驻上海地区水声导航系统军事代表室, 上海 201108; 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 水声高频换能器在水声领域具有广泛运用, 然而常规厚度振动高频换能器在高频段存在强烈的高次径向耦合振动, 制作出的换能器出现了阻抗曲线杂乱, 相位一致性差, 电声效率低的问题。设计制作了一种单一振动模态的换能器, 通过将常规厚度振动换能器陶瓷片切割成密排矩形颗粒, 再用环氧树脂将切缝填充。制作两片直径为 55mm 的准 1-3 复合材料, 由该材料制作的换能器谐振频率为 293 kHz, 谐振点阻抗 50Ω, -3 dB 阻抗带宽 23.5 kHz, -3 dB 开角为 5.75°, 50W 电功率输出声源级达到 217.5dB。通过该工艺可以消除高频厚度振动换能器的高次径向耦合振动, 提高高频厚度振动换能器的电声转换效率和一致性, 并能实现批量制作, 为高频换能器在水声领域的广泛运用提供了新的手段。

关键词: 1-3 复合材料; 高频换能器; 振动模态

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-03-0331-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.03.020

The study of similitude 1-3 piezo-composites transducer

BI Yan¹, ZHOU Yi-ming², TONG Hui², WENG Ru-lian²

(1. Naval Agency in Shanghai Underwater Acoustics and Navigation System, Shanghai 201108, China;

2. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: For conventional high-frequency thickness vibration transducers, the strong presence of high-order radial coupled vibration at high frequencies leads to the problems of disordered transducer impedance curve, poor phase coherence and low electro-acoustic efficiency. A transducer with a single thickness vibration mode is developed. The ceramic of the conventional thickness vibration transducer is cut into close-packed rectangular particles through a special process, and then all joints are filled with epoxy resin. Two pieces of 55mm diameter quasi 1-3 composite material are produced, with the transducer resonant frequency achieved to 293 kHz, resonant impedance 50Ω, -3dB impedance bandwidth of 23.5 kHz, -3dB open angle of 5.75°, and output source level of 217.5dB for 50 watts of electric power. This process may eliminate the high-order radial coupled vibration of the high frequency thickness vibration transducer, and advance the electric-acoustic conversion efficiency and consistency. Batch manufacturing can be realized, which provides a new device for underwater acoustic applications.

Key words: 1-3 piezo-composites; high frequency transducer; vibration mode

0 引言

随着 1-3 复合材料在水声换能器中的运用越来越广泛^[1-3], 其制备方式和工艺也取得了较大的进展。传统模型对复合材料的计算忽略了作为复合材料主体材料之一的填充聚合物, 在计算频率的时候也局限在长条状陶瓷单元的简化模型上^[4], 而常规的 1-3 复合材料大都采用长条柱状陶瓷颗粒, 振动模态比较单一, 具有横向耦合小, 声阻抗低, 频带较宽等优点^[5-7], 但存在大功率发射效率低, 容易发

热等缺点。区别于常规 1-3 复合材料, 准 1-3 复合材料的陶瓷颗粒形状介于柱和板之间, 具有类似 1-3 复合材料的结构及制作工艺, 而陶瓷相的体积百分比^[8]达到 75%以上, 能承受较大发射功率。本文利用有限元法计算了矩形陶瓷颗粒不同尺寸下的耦合振动频率, 并对填充聚合物前后颗粒的频率特性作了对比。在仿真的基础上制作了两个准 1-3 复合材料, 具有较好的频率一致性, 达到了较高的电声效率, 该方法为解决 1-3 复合材料在大功率发射条件下发热量高的问题拓展了思路。

1 仿真

1.1 陶瓷颗粒频率特性仿真

设计准 1-3 复合材料前需要计算单个陶瓷颗粒

收稿日期: 2011-08-15; 修回日期: 2011-12-30

作者简介: 毕彦(1976—), 男, 山东人, 工程师, 研究方向为水声导航研究。

通讯作者: 毕彦, E-mail: by58713780@sohu.com

的谐振频率，工程设计中常用到频率常数，但定义频率常数的时候对压电陶瓷的形状都有限制。例如，对于正方形截面、边长为 l 、极化方向厚度为 t 的矩形薄板，见图 1(a)，在给出其横向伸缩模基波串联谐振频率 f_s 的频率常数时，尺寸限制条件为 $(l/t)^2 \geq 10$ ；对于正方形截面、边长为 l 、极化方向高度为 t 陶瓷柱，见图 1(b)，在给出其纵向伸缩模基波串联谐振频率 f_s 的频率常数时的尺寸要求为： $(t/l)^2 \geq 10$ 。准 1-3 复合材料所采用的陶瓷颗粒形状大多介于两者之间，其频率常数不是一个固定数，而是随其形状不同而变化的。

对于该类形状陶瓷，本文利用有限元法对耦合振动模态的频率进行了计算，对处于柱和板之间的过渡尺寸陶瓷颗粒频率常数作了统计。在此，定义陶瓷颗粒沿高度 t 方向振动的频率常数为：

$$N_t = f_s t \tag{1}$$

利用有限元法对一种截面为正方形、高度为 t 的压电陶瓷进行了仿真计算，所选用的材料参数分别为常用的 PZT-4 与 PZT-8。首先建立一个正方形截面边长为 l ，极化方向高度为 t 的压电陶瓷模型。令陶瓷形状系数 $K = l/t$ ，则

$$l = Kt \tag{2}$$

任意选取 $t = 6.2\text{mm}$ ，则 $l = K \cdot 6.2(\text{mm})$ ，通过改变 K ，计算得到如表 1 所示的耦合模态频率 f_s 。

表 1 K 与 N_t 关系表($t=6.2\text{mm}$)
Table 1 The relation between K and $N_t(t=6.2\text{mm})$

陶瓷尺寸		PZT-4		PZT-8		
K	t/mm	l/mm	f_s/Hz	$N_t/(\text{Hz}\cdot\text{m})$	f_s/Hz	$N_t/(\text{Hz}\cdot\text{m})$
0.1	6.2	0.62	246646	1529	262988	1631
0.2	6.2	1.24	245914	1525	262170	1625
0.3	6.2	1.86	244666	1517	260772	1617
0.4	6.2	2.48	242856	1506	258737	1604
0.5	6.2	3.10	240428	1491	255992	1587
0.6	6.2	3.72	237302	1471	252437	1565
0.7	6.2	4.34	233390	1447	247961	1537
0.8	6.2	4.96	228631	1418	242495	1503
0.9	6.2	5.58	222971	1382	235997	1463
1.0	6.2	6.20	216464	1342	228572	1417

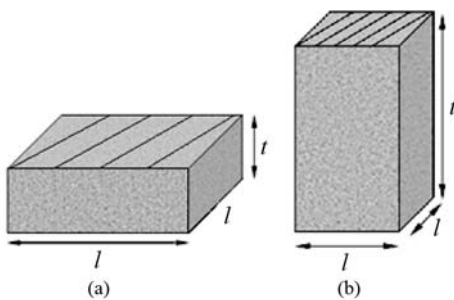


图 1 陶瓷颗粒模型
Fig.1 Ceramics grain model

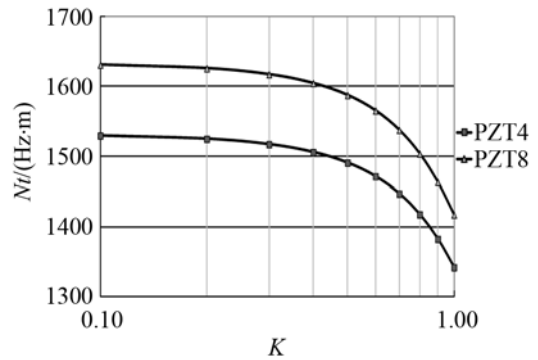


图 2 仿真计算当 $t=6.2\text{mm}$ 时 N_t 随 K 的变化曲线
Fig.2 N_t curve with K in the simulation for $t = 6.2\text{mm}$

计算结果表明，随着形状的改变，陶瓷的频率常数也随之发生改变，变化趋势如图 2 所示。由于上述计算中任意选取了 $t = 6.2\text{mm}$ ，为了证明上述计算结果的严密性，使其成为普遍适用的结果，需要证明 N_t 与形状系数 K 成一一对应的函数关系，即对于给定的 K ，计算得到的 N_t 是一个确定值，而与 l 或者 t 的选取无关。不妨给定 $K=0.5$ ，对尺寸为 l 与 t 的 PZT-8 陶瓷进行计算，结果在表 2 中列出。

表 2 K 与 N_t 关系表($K=0.5$)
Table 2 The relation between K and $N_t(K=0.5)$

K	l/mm	t/mm	f_s/kHz	$N_t/(\text{kHz}\cdot\text{mm})$
0.5	0.5	1	1587	1587
0.5	5	10	158.7	1587
0.5	50	100	15.87	1587
0.5	500	1000	1.587	1587

从表 2 可以看出，只要保持 K 值不变，频率常数 N_t 在不同的几何尺寸条件下保持不变，即 N_t 仅是 K 的函数，验证了上述计算的严密性。

通过上述计算结论，对于固定高度 t 的压电矩形柱体，可以通过改变横向尺寸 l 对谐振频率 f_s 进行微调。这一特性可以在生产中得到运用。

1.2 复合材料单元频率计算及实物测试

考虑到用于发射的实际情况，制作时选用的陶瓷材料为 PZT-8，后续仿真中运用的参数也为 PZT-8 的陶瓷参数。将一片原厚度振动谐振频率为 350 kHz 的 PZT-8 陶瓷片切割成若干个谐振频率为 268 kHz 的密排陶瓷颗粒，制作出了符合设计要求的准 1-3 复合材料换能器。

采用切割填充法制作准 1-3 复合材料，根据切缝结构和选用的填充材料先进行有限元仿真计算。该类型复合材料几何结构网格化，除了边缘少数陶瓷单元外，大部分单元颗粒具有相同的边界条件。于是忽略边缘部分不对称边界条件，分析单个陶瓷颗粒包覆环氧后的频率特性就能得到整体复合材

料的频率特性。建立三维模型,如图3所示,外围为环氧树脂,中间为PZT-8压电陶瓷。

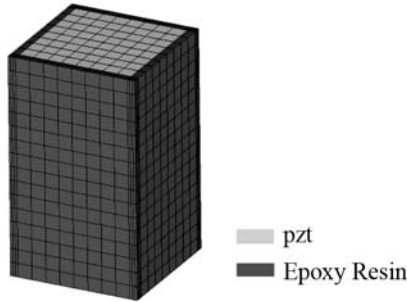


图3 复合材料单元有限元模型

Fig.3 The finite element model of the composite material unit

由于相邻的陶瓷颗粒振动相位一致,环氧填缝层的中心面横向位移为零,可以通过在环氧层中心面上施加对称边界条件来进行仿真建模。环氧的材料参数和模型几何尺寸见表3。

表3 复合材料单元有限元模型尺寸及材料参数
Table 3 Sizes and parameters of finite element model of the composite material unit

环氧树脂	厚度 t_E/mm	高度 h_E/mm	杨氏模量 E_E/GPa	泊松比 δ	密度 $\rho_E/(g \cdot cm^{-3})$
	0.2	5.9	4.6	0.37	1.177
PZT-8陶瓷	截面边长 l/mm	高度 t/mm			
	3	5.9			

通过计算,对比单陶瓷颗粒和陶瓷颗粒灌注环氧后的两种结果发现,陶瓷颗粒包覆环氧层形成复合材料单元后,谐振频率明显上升,结果如图4所示,图中实线为陶瓷颗粒有限元仿真电导数据曲线, $F_s=268\text{ kHz}$;虚线为填缝后形成复合材料单元有限元仿真电导数据曲线, $F'_s=297\text{ kHz}$ 。

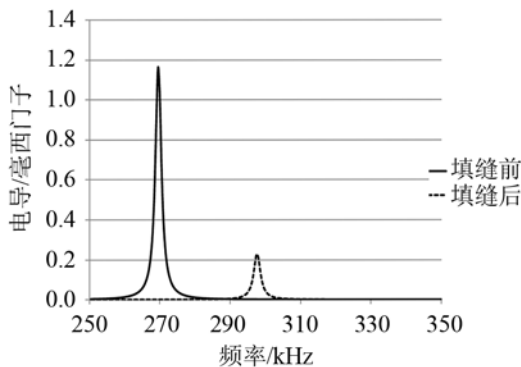


图4 填充环氧前后陶瓷颗粒仿真电导曲线

Fig.4 Simulated conductance curve of the ceramic grain before and after filling epoxy resin

单陶瓷颗粒横向振动为半波长模态,填充环氧树脂后陶瓷与环氧树脂在横向形成全波长耦合振动,陶瓷横向振动振幅的波峰由边缘向中心偏移,频率升高。陶瓷环氧复合材料单元振幅分布见图5。

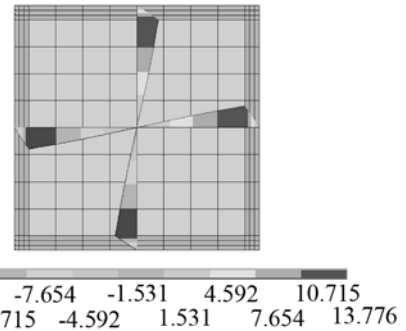


图5 复合材料单元振幅分布图

Fig.5 Swing distribution diagram of the composite material unit

2 换能器实测参数

将一个直径55mm、厚度5.9mm的PZT-8压电陶瓷圆片切割成密排的3mm×3mm×5.9mm陶瓷颗粒,切缝宽度为0.4mm,对单个陶瓷颗粒进行阻抗测量。灌注环氧填缝剂后,该复合材料的陶瓷相的体积百分比达到了77.85%。将该复合材料阻抗与单个陶瓷颗粒的阻抗曲线进行对比,结果如图6所示。该结果与仿真结果比较吻合:仿真结果中,灌注环氧填缝剂前后谐振频率从268kHz升高到297kHz;实测结果中,谐振频率从267kHz升高到294kHz。由于仿真参数中材料参数做不到与实际无偏差,因此存在细微的偏差,但可以定性解释频率变化的原因。最后用聚氨酯灌注透声水密层,连接8m长水密电缆后进行测量。测得换能器水中阻抗曲线如图7所示,同时测得换能器发送电压响应曲线如图8所示。由图8可见,换能器的谐振频率为293kHz,最大发送电压响应为183dB,匹配成纯阻后电声转换效率达到73%,换能器在不同发射电功率条件下的声源级和发送电压响应曲线如图9所示,可以看出换能器在60W电功率以下都具有较好的发射响应线性度。图10为换能器发射指向性图。

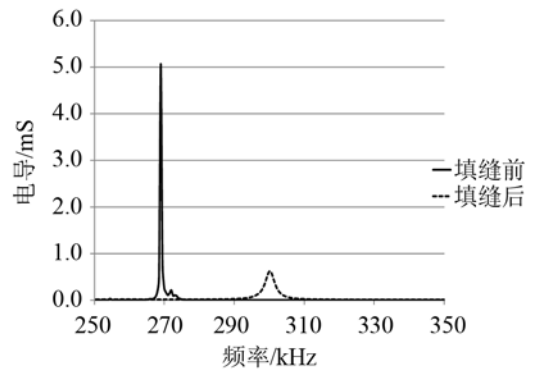


图6 填充环氧前后陶瓷颗粒实测电导曲线

Fig.6 Real conductance curve of the ceramic grain before and after filling epoxy resin

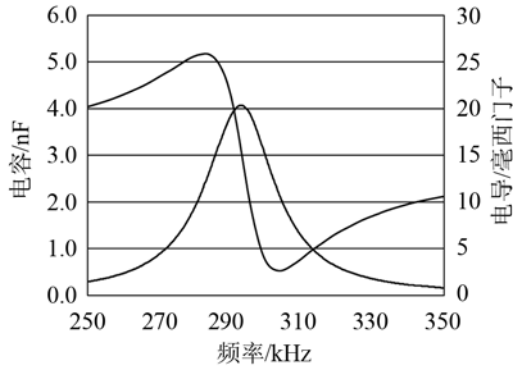


图 7 准 1-3 复合材料换能器水中阻抗曲线
Fig.7 Impedance curve of similtude 1-3 composite material transducer in water

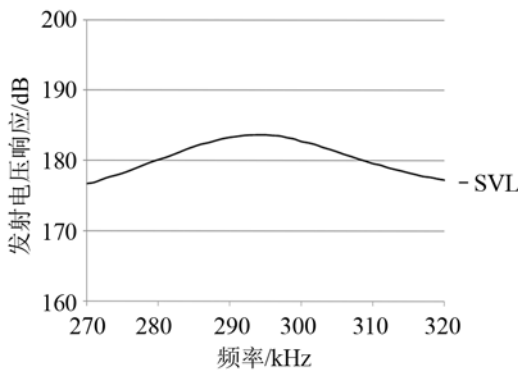


图 8 换能器发射电压响应曲线
Fig.8 Transmitting voltage response of the transducer

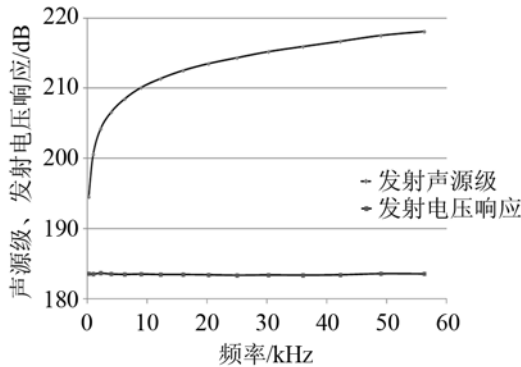


图 9 准 1-3 复合材料换能器发射声源级线性度曲线
Fig.9 Transmitting source level of the transducer

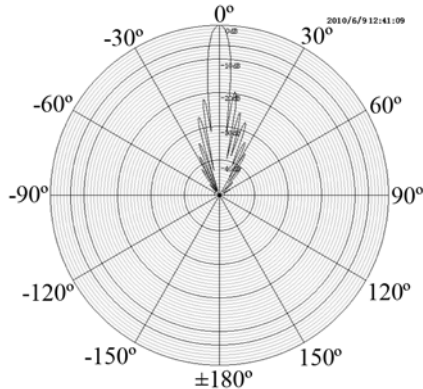


图 10 换能器发射指向性图
Fig.10 Graph of radiation directivity of the transducer

3 结 论

运用仿真软件对厚度振动的陶瓷颗粒进行仿真优化设计, 设计出准 1-3 复合型压电换能器的陶瓷颗粒, 并通过特殊工艺将特定厚度振动陶瓷片切割成密排矩形颗粒, 再用环氧树脂将切缝填充满从而制作出一个准 1-3 复合型压电换能器, 通过实验测得换能器谐振频率为 293 kHz, 谐振点有功阻抗 50Ω, -3 dB 阻抗带宽 23.5 kHz, -3 dB 开角为 5.75°, 调谐后 50 W 电功率输出声源级达到 217.5 dB, 电声转换效率达到 73%。由于该形状的陶瓷颗粒工作时存在耦合振动, 与同尺寸圆板状换能器相比, 换能器在谐振点具有较低的阻抗和较高的发射响应, 但其阻抗带宽也略偏窄一些, 可以通过改变颗粒形状调节阻抗与带宽。

通过实测表明, 本文设计的准 1-3 复合型换能器具有较优的高频性能, 为高频水声换能器设计提供新的设计思路。

参 考 文 献

- [1] 李邓化, 居伟骏, 贾美娟, 等. 新型压电复合换能器及其应用[M]. 科学出版社, 2007: 3-5.
LI Denghua, JU Weijun, JIA Meijuan, et al. New piezoelectric transducer and application[M]. Science Press. 2007: 3-5.
- [2] 徐玲芳, 陈文, 周静. 1-3 型压电复合材料研究现状与展望[J]. 陶瓷学报, 2006, 27(1): 145-150.
XU Lingfang, CHEN Wen, ZHOU Jing. Research on 1-3 piezoelectric ceramic composites[J]. Journal of Ceramics, 2006, 27(1): 145-150.
- [3] 陈俊波, 王月兵, 钟林建. 1-3 型压电复合材料和普通 PZT 换能器性能对比分析[J]. 声学与电子工程, 2007(87): 25-27.
CHEN Junbo, WANG Yuebing, ZHONG Linjian. 1-3 piezoelectric composite materials and the general properties of PZT transducers compared[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2007 (87): 25-27.
- [4] 赵寿根, 程伟. 1-3 型压电复合材料及其研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(1): 57-68.
ZHAO Shougeng, CHENG Wei. 1-3 piezoelectric composite materials and its research progress[J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(1): 57-68.
- [5] 张福学, 王丽坤. 现代压电学(中册)[M]. 科学出版社, 2002, 281-286.
ZHANG Fuxue, WANG Likun. Modern piezoelectricity[M]. Science Press, 2002, 281-286.
- [6] Kim C. Benjamin. Recent advances in 1-3 piezoelectric polymer composite transducer technology for AUV/UUV acoustic imaging applications[J]. Journal of Electroceramics, 2002, 8(3): 145-154.
- [7] Thomas R. Howarth, and Robert Y. Ting. Electro acoustic evaluations of 1-3 piezocomposite sonopanel materials[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr, 2000, 47(4): 886-894.
- [8] 李邓化, 张良莹, 姚熹. 压电陶瓷相体积分数对 1-3 型压电复合材料性能的影响[J]. 电子元件与材料. 1999, 18(4): 24-52.
LI Denghua, ZHANG Liangyin, YAO Xi. Volume fraction of the properties of 1-3 piezoelectric composites[J]. Electronic Components and Materials, 1999, 18(4): 24-52.