

基于 1-3-2 型压电复合宽频带水声换能器研究

鲜晓军^{1,2}, 林书玉¹, 王登攀², 马晋毅²

(1. 陕西师范大学 应用声学研究所, 陕西 西安 710062; 2. 中国电子科技集团公司第 26 研究所, 重庆 400060)

摘要:设计并制作了 1-3-2 型压电复合陶瓷材料, 利用该型压电复合陶瓷材料具有低声阻抗, 低机械品质因数(Q), 高机电转换系数, 电极制作工艺简单及结构稳定不易发生变形等特点, 制作了水声换能器件, 并进行了电声性能分析与测试。分析结果表明, 基于 1-3-2 型压电复合材料制作的水声换能器具有在工作频带内模态单一、高发射响应及宽频带等特点。

关键词:1-3-2 型压电复合材料; 水声换能器; 宽频带; 有限元法

中图分类号:TM282; TB565

文献标识码:A

Study of Broad-band Underwater Transducers Based on 1-3-2 Piezocomposite Material

XIAN Xiaojun^{1,2}, LIN Shuyun¹, WANG Dengpan², MA Jinyi²

(1. Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The 1-3-2 piezo-composite material was designed and fabricated in this paper. The 1-3-2 piezo-composite material had the advantages of low acoustic impedance, low quality factor(Q), high electromechanical coupling factor, easy way of making electrode and steady structure. The broad-band underwater transducer based on 1-3-2 piezo-composite material was fabricated, and the electroacoustic performances were analyzed and measured. It was shown experimentally and theoretically that this type of transducer had the characteristics of pure mode, high transmitting voltage response and broad band in the working frequency range.

Key words: 1-3-2 piezocomposite material; underwater transducer; broad band; finite element method

0 引言

压电复合陶瓷材料作为一种新型的功能材料, 由于具有较低的声阻抗, 与水有机材料的声阻抗匹配, 并具有较好的柔顺性和易成型等优点, 近年来一直是材料科学研究的热点, 各种新的理论研究成果和相关工程应用被广泛报道^[1]。

与其他压电复合陶瓷材料相比, 1-3 型压电复合陶瓷材料具有高静水压电常数、较小的平面机电耦合系数及制作工艺相对简单且成熟等优点, 现已在医学超声和水声换能器制作中得到广泛应用^[2]。然而, 在相关工程应用中发现, 1-3 型压电复合陶瓷材料由于在受热或有外力作用时, 极易发生形变, 影响相关声学辐射特性; 同时, 1-3 型压电复合陶瓷材料由于其结构中有不导电的聚合物存在, 使在电极引出上存在一定困难, 且制作工艺复杂, 难以满足高性能的要求, 限制了其在某些特殊领域的应用^[3-4]。

研究具有 1-3 型压电复合陶瓷材料的结构特征和性能优势, 同时具有陶瓷基底的 1-3-2 型压电复合陶瓷材料成为新的热点。

1 1-3-2 型压电复合陶瓷材料压电特性理论分析^[5-6]

1.1 1-3-2 型压电复合陶瓷材料压电特性

1-3-2 型压电复合陶瓷材料是对 1-3 型压电复合陶瓷材料的改进(见图 1), 包括按矩阵排列的 1-3 型压电复合陶瓷材料部分和陶瓷基底。其压电方程为

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^E \epsilon_{kl} - e_{ijk} E_k - \beta_{ij} \theta \quad (1)$$

$$D_i = e_{ijk} \epsilon_{kl} + k_{ij}^s E_j + P_i \theta \quad (2)$$

式中: σ_{ij} , ϵ_{kl} , E_k 和 D_i 分别为压电应力张量、压电应变张量、电场强度矢量及电位移矢量; C_{ijkl} , e_{ijk} , k_{ij}^s , β_{ij} 和 P_i 分别为弹性刚度张量、压电张量、介电常数

收稿日期: 2014-04-28

基金项目: 国际科技合作计划基金资助项目(2010DFR10690)

作者简介: 鲜晓军(1981-), 男, 四川绵阳人, 工程师, 博士生, 主要从事声学换能器的研究。

张量、热系数张量及焦耳热张量； θ 为温度变量。

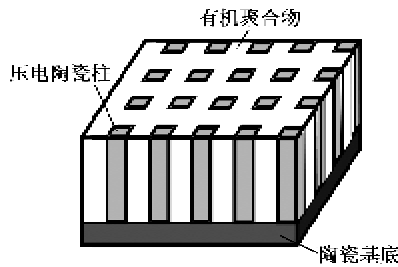


图1 1-3-2型压电复合陶瓷材料结构示意图

1.2 1-3-2型压电复合陶瓷材料声学特性

厚度方向的机电耦合系数 K_t 、声阻抗 Z 及纵向声速 v_{33}^D 常用于压电复合陶瓷材料声学特性的表征，且

$$K_t = \sqrt{1 - C_{33}^E / C_{33}^D} \quad (3)$$

$$Z = (C_{33}^D \rho)^{1/2} \quad (4)$$

$$v_{33}^D = \sqrt{C_{33}^D / \rho} \quad (5)$$

式(3)~(5)中 ρ 和 C_{33}^D 分别为1-3-2型压电复合材料的密度与短路刚度常数。

假设1-3-2型压电复合陶瓷材料的等效厚度为 t ，由式(5)可知，1-3-2型压电复合陶瓷材料厚度方向共振频率方程为

$$f_r = v_{33}^D / (2t) \quad (6)$$

1-3-2型压电复合陶瓷材料静水压力常数 d_h^s 、压电材料灵敏度 ($d_h \cdot g_1$) 及静水机电耦合系数分别为

$$d_h = d_{31} + d_{32} + d_{33} \quad (7)$$

$$g_h = d_h^s / k_y \quad (8)$$

$$k_h^s = d_h^s / (k_y S_h) \quad (9)$$

其中

$$S_h = 2S_{11} + 2S_{12} + 4S_{13} + S_{33} \quad (10)$$

2 1-3-2型压电复合陶瓷材料有限元分析与制作

与制作

有限元分析法是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法。它是将弹性理论、计算数学和计算机软件有机的结合在一起的一种数值分析技术。ANSYS软件是一种大型通用有限元分析软件，融结构、流体、电磁场、声场和耦合场分析于一体，特别是它的多物理场模块可分析和解决多学科问题，能有效进行压电学的分析与计算，因此在压电学研究与应用领域得到了广泛的应用。

根据理论设计与工程需要，1-3-2型压电复合材料采用直径为 $\varnothing 60$ mm、厚为4.5 mm的PZT-43陶瓷圆片制作而成，其有机物填充切缝为0.3 mm，相

邻陶瓷方柱中心间距为2.5 mm，陶瓷基底厚为0.4 mm。1-3-2型压电复合材料有限元模型如图2所示，对其进行谐响应分析，其数值模拟导纳曲线如图3所示；根据理论计算与有限元分析的设计尺寸，制作了1-3-2型压电复合材料试验样品，其实物照片如图4所示，测试导纳的测试曲线如图5所示。从图3~5可看出，1-3-2型压电复合陶瓷材料在工作频带内具有单一的响应频点，无其他寄生响应；制作的实物样品平整度好，由于有陶瓷基底作为支撑，受热或外力作用时不易发生变形。

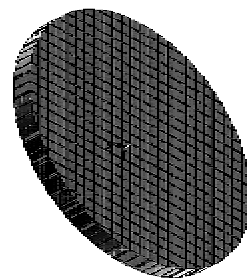


图2 1-3-2型压电复合材料有限元模型

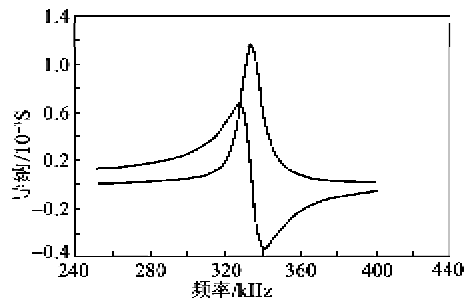


图3 1-3-2型压电复合陶瓷材料导纳曲线仿真图

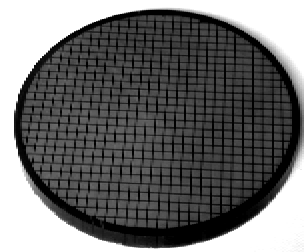


图4 1-3-2型压电复合陶瓷材料实物样品图

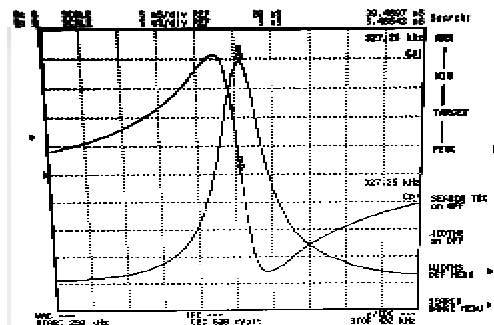


图5 1-3-2型压电复合陶瓷材料导纳测试曲线

3 1-3-2 型压电复合陶瓷材料水声换能器的分析与制作

利用 1-3-2 型压电复合陶瓷材料低声阻抗、低机械品质因数(Q)值,高静水压力常数以及结构稳定不易变形等优点,分析并制作了基于 1-3-2 型压电复合陶瓷水声换能器。

在 1-3-2 型压电复合材料换能器中,除了边缘的周期单元,其他周期单元负载基本相同,可采用分析一个周期单元计算整个器件的声学特性。模型可简化为单个周期单元处于一刚性壁波导管的一端,而在波导管的另一端施加边界条件,利用 ANSYS 计算出波导管的声压。换能器有限元分析的电导曲线如图 6 所示,发射响应曲线如图 7 所示。

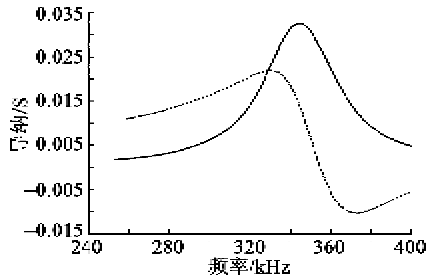


图 6 1-3-2 型压电复合水声换能器电导仿真曲线

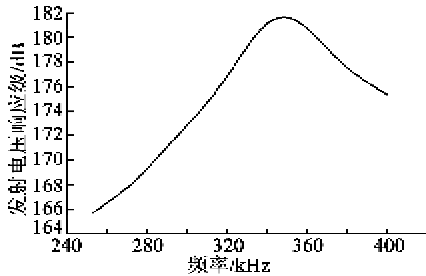


图 7 1-3-2 型压电复合水声换能器发送电压仿真曲线

按照设计尺寸制作了 1-3-2 型压电复合材料换能器,图 8 为换能器的实物图,并将换能器放在消声水池中,对相关电性能进行测试。水中电导曲线如图 9 所示,发射响应曲线如图 10 所示。同时,对相同几何尺寸的 1-3-2 型和 1-3 型压电复合换能器的发射响应进行了对比分析,对比曲线如图 11 所示。

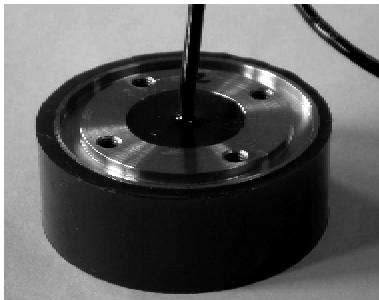


图 8 1-3-2 型压电复合陶瓷材料水声换能器实物图

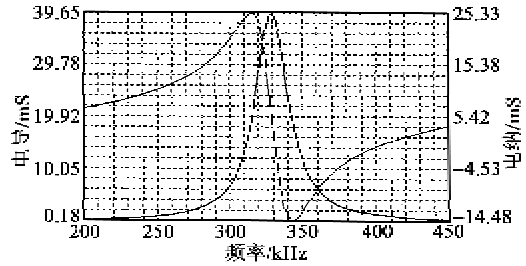


图 9 1-3-2 型压电复合材料水声换能器电导测试曲线

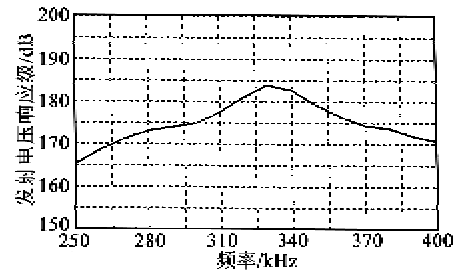


图 10 1-3-2 型压电复合材料水声换能器发送电压响应测试曲线

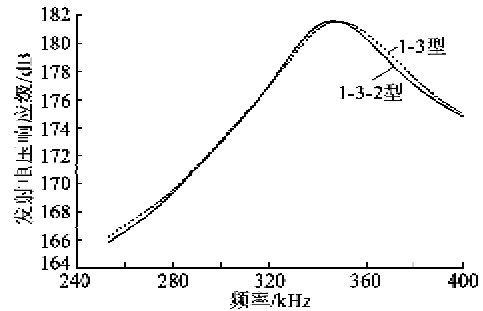


图 11 1-3-2 型与 1-3 型压电复合换能器发射响应对比图

将图 7 与图 9 相比可知,基于 1-3-2 型压电复合陶瓷材料水声换能器在工作频带内模态单一,仿真频率与测试频率很接近。由图 8、10、11 可知,1-3-2 型压电复合换能器和 1-3 型复合换能器一样具有较高的发送电压响应,最大值达到 183 dB 左右;同时具有较宽的工作频带, -3 dB 带宽接近 40 kHz。

从仿真结果与测试结果的比较可看出,电导曲线与发送电压响应曲线的变化趋势一致,但存在一定误差。分析误差的来源主要包括以下几方面:

- 1) 仿真过程中采用的是标准参数,与实际材料参数存在一定差异。
- 2) 换能器制作过程大多采用手工工艺,最后制成的样品与仿真实论模型存在差异。
- 3) 在消声水池中进行测量时,存在测量误差。

4 结束语

本文对 1-3-2 型压电复合陶瓷材料的结构与电性能特性进行了分析,给出了相关参数的计算表达

(下转第 497 页)