

一种改进型 1-3-2 压电复合材料的研究

井苏杰,于肇贤,王宏伟

(北京信息科技大学 理学院,北京 100192)

摘要:高质量的压电换能器需要具备较高的机电耦合系数和灵敏度。该文在传统型 1-3-2 压电复合材料的基础上提出了一种改进型 1-3-2 压电材料,提高了压电换能器的机电耦合系数和换能器的接收灵敏度。通过有限元仿真分析了不同间距对改进型 1-3-2 压电材料敏感元件的谐振频率、反谐振频率及机电耦合系数的影响,并与传统 1-3-2 型压电复合材料进行了对比。结果表明,与传统型 1-3-2 压电复合材料相比,在相同间距条件下,改进型压电材料的机电耦合系数约大 0.03。制做的 3 种不同间距改进型压电材料表明,间距为 1 mm 的改进型压电材料的机电耦合系数较大,约为 0.68。

关键词:不同间距;1-3-2 型压电复合材料;改进型;谐振频率;反谐振频率;机电耦合系数

中图分类号:TN384;TB565.1 **文献标识码:**A

Study of an Improved 1-3-2 Type Piezoelectric Composite Material

JING Sujie, YU Zhaoxian, WANG Hongwei

(College of Science, Beijing University of Information Science and Technology, Beijing 100192, China)

Abstract: High-quality piezoelectric transducers require high electromechanical coupling coefficients and sensitivity. Based on the conventional 1-3-2 type piezoelectric composite material, an improved 1-3-2 type piezoelectric material is proposed to enhance the electromechanical coupling coefficient and receiving sensitivity of the piezoelectric transducer. The effects of different spacings on the resonance frequency, anti-resonance frequency, and electromechanical coupling coefficient of the sensitive elements of the improved 1-3-2 piezoelectric material are analyzed by finite-element simulation and compared with those of the traditional 1-3-2 piezoelectric composite material. The results show that the electromechanical coupling coefficient of the improved piezoelectric material is larger than that of the traditional 1-3-2 piezoelectric composite material with same spacing by approximately 0.03. Three improved piezoelectric materials with different spacings were fabricated. The results show that the improved piezoelectric material with a spacing of 1 mm has a large electromechanical coupling coefficient of about 0.68.

Key words: different spacing 1-3-2 type piezoelectric composite material; improved type; resonant frequency; anti-resonant frequency; electromechanical coupling coefficient

0 引言

随着人类对海洋不断深入地探索与开发,水下探测与通讯技术也随之快速发展,但因海水为良性导体,电磁波在水下衰减严重,难以实现水下远距离通信。声波是人类目前掌握的唯一能稳定实现水下远距离传递信息和能量的载体^[1]。水声换能器是实现水下发射和接收声波的重要设备。随着对探测精度要求的不断提升,有必要研究高灵敏度换能器。

铅钛酸铅压电陶瓷(PZT)作为一种功能材料,

已广泛应用于水声换能器,而作为换能材料,其压电效应显著,并具有高机电耦合系数和高压电应变常数^[2]。但由于纯 PZT 压电陶瓷的振动模态较多,作为换能器材料其机械振动特性不佳。1978 年,Newnham 等^[3]提出了 PZT-聚合物复合材料。压电复合材料由压电相和聚合物相组成,按复合材料中组成相在空间连通方式分类,其每相均可按 0、1、2 或 3 维方式连通,故两相(压电相-聚合物相)复合材料共有 10 种组合,即 0-0、0-1、0-2、0-3、1-1、1-2、1-3、2-2、2-3、3-3。

收稿日期:2023-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771060);北京市教委科研计划科技重点基金资助项目(KZ202111232050)

作者简介:井苏杰(1999-),男,陕西省延安市人,硕士生。通信作者:于肇贤,男,教授,博士。

1-3 型复合材料是指一维连通的压电柱按一定规律平行排列于三维连通的聚合物中,其提高了纵向厚度机电耦合系数。1-3-2 型聚合材料由 1-3 型压电复合材料和陶瓷基底沿陶瓷极化方向串联而成,依靠基底的支撑作用,具有稳定的机械性能和较高的厚度机电耦合系数,是制作高灵敏水声换能器的理想材料^[4]。为了进一步提高厚度振动的机电耦合系数,本文通过在切割完成的压电柱阵列间不添加聚合物,同时在其上表面覆盖金属板,构成“上覆金属板带基底压电柱阵列”结构,该结构在 1-3-2 型复合材料的基础上进行改进^[5],可将整块压电相的厚度振动转化为压电柱阵列的纵向长度伸缩振动,将厚度机电耦合系数 k_t 转化为纵向机电耦合系数 k_{33} ,提高了机电耦合性能^[6]。

1 改进型 1-3-2 压电复合材料的结构

图 1(a)为传统的 1-3-2 型压电复合材料。其由一维分布的压电陶瓷柱周期性地排列在二维连通的压电陶瓷基底上组成,而压电陶瓷柱与基底间分布着三维连通的聚合物,压电陶瓷采用 PZT-5A,聚合物采用环氧树脂。图 1(b)是改进型 1-3-2 压电复合材料。改进结构材料仅有压电相,其上表面覆盖一层金属板,改进结构材料减小了压电柱阵列间的横向耦合,并且通过将压电复合材料整体的纵向厚度振动模态的机电耦合系数 k_t 转换为压电柱阵列结构的长度振动模态机电耦合系数 k_{33} ^[7]。

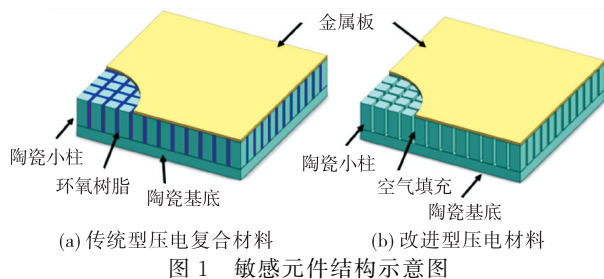
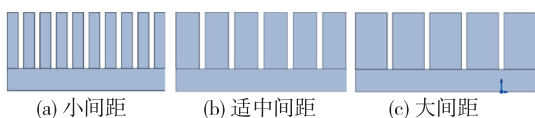


图 2 为不同间距的改进型 1-3-2 压电材料结构。通过控制数字精密切割机的切割步进得到不同间距的压电小柱。不同横截面积的压电小柱反映了振动模态间的转换程度,较大间距的压电小柱具有一定的厚度振动模态,较小间距的压电小柱具有较纯净的长度伸缩振动模态。

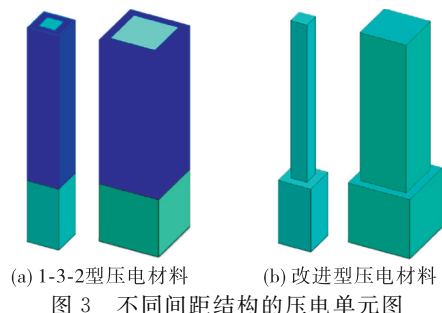


2 有限元仿真

利用有限元仿真软件分析了传统 1-3-2 压电复合材料和改进型 1-3-2 压电材料的机电力学行为。压电耦合单元选择 Solid5, 聚合物相单元选择 Solid185^[8]。压电材料选择 PZT-5A, 聚合物选择环氧树脂。对敏感元件附上相应的材料,并选择所对应的单元类型。划分网格完成后,在上、下表面施加电压并进行相应的点耦合。求解后,通过时间后处理模块分析导纳与频率的关系。

图 3 为不同结构的压电材料单元有限元模型。1-3-2 压电复合材料和改进型压电材料的厚度均为 7 mm, 基底厚均为 2 mm, 压电单元的间距选择 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm。分别对两种结构压电单元的间距进行有限元仿真,分析间距对谐振频率 f_p 和反谐振频率 f_s 的影响。不同间距的两种结构压电单元的有效机电耦合系数为

$$k_e = \sqrt{(f_p^2 - f_s^2) / f_p^2} \quad (1)$$



将不同间距的两种有限元模型导入求解器中进行分析处理,结果如图 4 所示。由图 4(a)、(b) 可看出,每条曲线的最高点表示对应的谐振频率,最低点表示对应的反谐振频率。随着间距的增大,传统型 1-3-2 压电复合材料和改进型压电材料的导纳值均逐渐增大,导纳的大小将影响换能器发送电压响应和接收灵敏度值。由图 4(c) 可见,在相同基底厚度及阵列柱体高度时,随着间距的增大,改进型压电材料的谐振频率和反谐振频率也逐渐增大。由图 4(d) 可看出,在改进型压电材料高度确定的条件下,间距为 0.5~3 mm 时,有效机电耦合系数呈现先增大后减小的趋势。间距大于 1.5 mm 时,有效机电耦合系数逐渐减小。理论分析可知,间距越小,压电小柱越细,机电耦合系数会变大。由图 4(d) 还可看出,间距为 0.5~1.25 mm 时,间距越小,机电耦合系数也越小,这是因为随着压电小柱

越细的情况下,对于压电单元,陶瓷基底占主要的体积分数,导致机电耦合系数减小。由图 4(e)可见,在压电单元高度相同的条件下,传统型 1-3-2 压电复合材料和改进型压电材料的谐振频率都随着

间距的增大而增大。在相同间距的条件下,两者具有相同的谐振频率。由图 4(f)可见,在压电单元高度相同、间距不同的条件下,与传统型压电材料相比,改进型 1-3-2 压电材料的有效机电耦合系数较大。

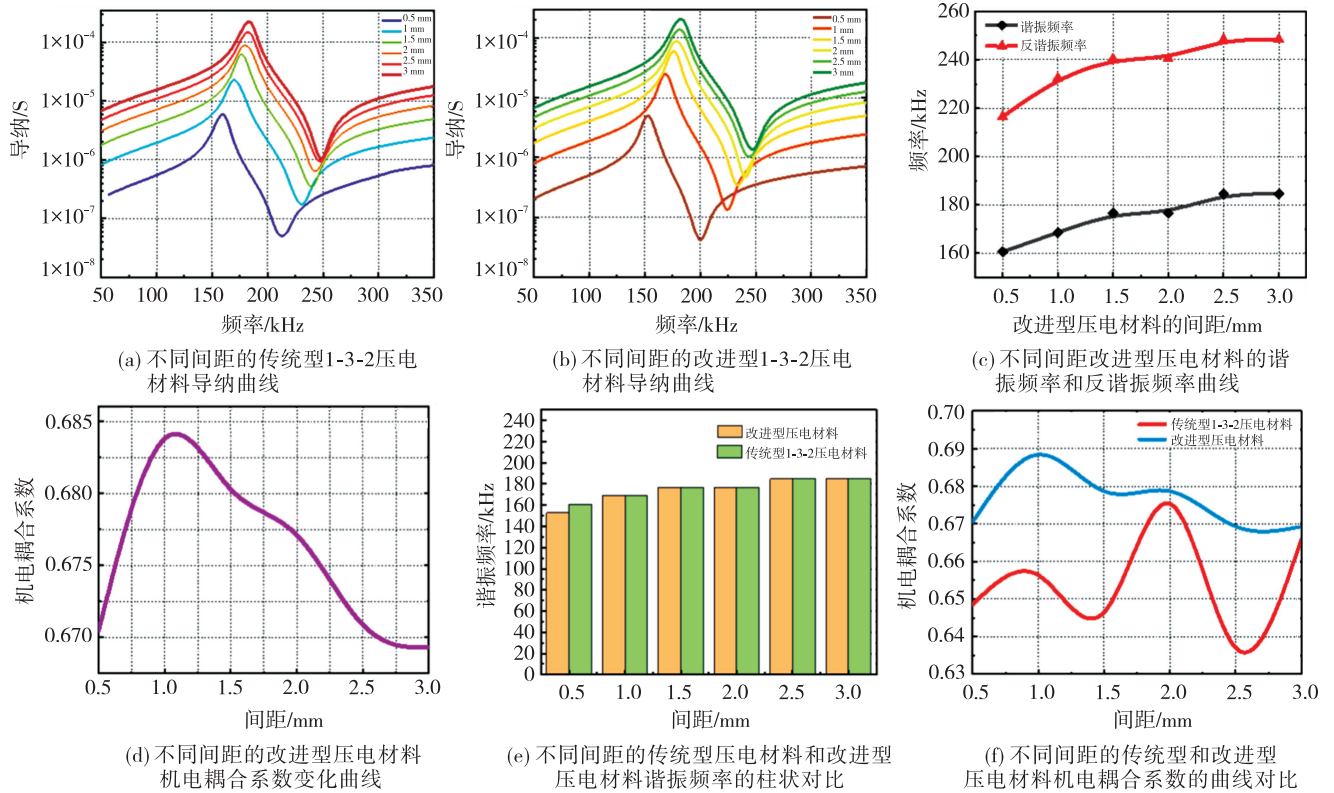


图4 不同结构不同间距的压电结构仿真分析

3 改进型压电材料实物制作与测试

3.1 改进型压电敏感元件的制备流程

为了与仿真数据进行对比,实验制作了间距分别为 0.5 mm、1 mm 和 1.5 mm 的 3 种改进型压电材料敏感元件。图 5 为改进型压电材料敏感元件的制备流程图。选取高度为 7 mm 的一块 PZT-5A 压电陶瓷,使用精密数字切割仪器对其进行切割,并保留 2 mm 的陶瓷基底。横向切割后进行纵向切割,最后清洁压电小柱阵列上的粉末。将阻抗低、导电能力强、粘性高的导电银浆均匀涂抹于铜板表面,再在压电柱阵列的上表面粘接铜板,铜板具有充当电极面和放大应力的作用。将其置于 30 ℃ 的恒温箱中 24 h,保证黄铜面板与压电小柱阵列粘接牢固。

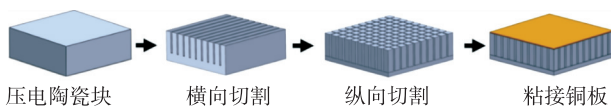


图5 改进型压电材料制备流程

3.2 改进型压电敏感元件的测试

依据图 5 制备了改进型压电敏感元件材料,考虑到结构稳定性及制作工艺,设计样品长均为 30 mm,宽均为 30 mm,基底厚为 2 mm,改进结构材料金属板厚为 0.1 mm,样品如图 6(a)~(c)所示。使用 Aligent4294 阻抗分析仪测试改进型压电敏感元件的性能,压电材料与阻抗分析仪的连接方式如图 6(d)所示。测试结果如表 1 所示。

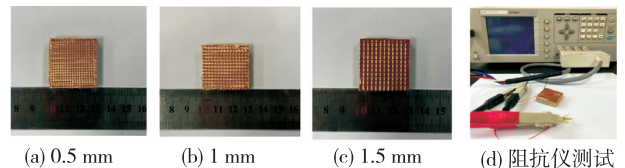


图6 不同间距改进型压电材料实物与测试

表1 不同间距的改进型压电材料测试结果与仿真对比

间距/ mm	谐振 频率/kHz	反谐振 频率/kHz	机电耦 合系数	误差/ %	
0.5	仿真	161	216	0.670	1.5
	测试	157	208	0.655	

续表					
间距/ mm		谐振 频率/kHz	反谐振 频率/kHz	机电耦 合系数	误差/ %
1.0	仿真	169	232	0.688	0.3
	测试	172	235	0.691	
1.5	仿真	177	240	0.678	1.7
	测试	177	236	0.661	

由表 1 可见,在敏感元件高度一定的条件下,考虑到陶瓷基底厚度为 2 mm,选择间距为 1 mm 的改进型压电材料具有较大的机电耦合系数。实验结果与仿真结果基本一致,但存在实验数据略高于仿真数据的误差。产生误差的原因是:

1) 实际采用的 PZT-5A 压电陶瓷的性能参数与有限元仿真中所用的材料参数有差异。

2) 由于仿真中为缩减 ANSYS 有限元仿真软件的运行时间及节省主机的计算资源,故仿真中仅选取了 1-3-2 型压电复合材料及其改进结构材料的一个单元进行仿真,并采用对称性边界条件模拟实际情况,这将会产生误差。

4 结 束 语

通过有限元仿真与实验相结合的方法,设计并制作了 3 种不同间距的改进型 1-3-2 压电材料。通过有限元仿真了不同间距对传统型 1-3-2 压电复合材料和改进型 1-3-2 压电材料谐振频率、反谐振频率及机电耦合系数的影响。通过仿真结果对比发现,改进型 1-3-2 压电材料的机电耦合系数较大。在相同间距下,传统型 1-3-2 压电复合材料和改进型压电材料的谐振频率相同。通过对制作的 3 种不同间距的改进型压电复合材料分析可知,在间距为 1 mm 时,机电耦合系数较大(约为 0.68)。改进后带基底压电柱阵列结构压电材料比传统 1-3-2 型压电复合材料能更好地满足水声换能器高灵敏度的需求^[9]。

参考文献:

[1] 鲜晓军,林书玉,王登攀,等. 基于 1-3-2 型压电复合宽带水声换能器研究[J]. 压电与声光,2014,36(4): 491-493.
XIAN Xiaojun, LIN Shuyu, WANG Dengpan, et al.

Research on 1-3-2 type piezoelectric composite broadband hydroacoustic transducer[J]. Piezoelectricity & Acoustooptics,2014,36(4):491-493.

[2] 鲜晓军. 1-3-2 型压电复合材料换能器研究[D]. 西安: 陕西师范大学,2016:45-61.

[3] 李莉,王丽坤,秦雷,等. 1-3-2 压电陶瓷/聚合物复合材料圆柱型换能器制备[J]. 功能材料,2010,41(增 1): 60-63.

LI Li, WANG Likun, QIN Lei, et al. Preparation of cylindrical transducers from 1-3-2 piezoelectric ceramic/polymer composites[J]. Functional Materials,2010, 41(Suppl. 1):60-63.

[4] CHEN H, DONG X, ZENG T, et al. The mechanical and electric properties of infiltrated PZT/polymer composite[J]. Ceram Int,2007,33(7):1369-1374.

[5] ZHENG T, YU Y, LEI H, et al. Compositionally graded KNN-based multilayer composite with excellent piezoelectric temperature stability[J]. Adv Mater, 2022, 34: 2109175.

[6] 张凯,蓝宇,李琪. 1-3 型压电复合材料宽带水声换能器研究[J]. 声学学报,2011,36(6):631-637.

ZHANG K, LAN Y, LI Q. 1-3 piezoelectric composite broadband hydroacoustic transducer[J]. Journal of Acoustics,2011,36(6):631-637.

[7] 王丽坤,秦雷,段成丽,等. PZT/环氧树脂 1-3-2 型压电复合材料的制备及性能[J]. 功能材料与器件学报, 2006(5):418-422.

WANG Likun, QIN Lei, DUAN Chengli, et al. Preparation and properties of PZT/epoxy 1-3-2 piezoelectric composites[J]. Journal of Functional Materials and Devices,2006(5):418-422.

[8] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术,2007(6):1279-1290.

MO Xiping. Application of ANSYS software in simulating and analyzing acoustic transducers[J]. Acoustic Technology,2007(6):1279-1290.

[9] 王宏伟,惠辉,荣旻. 一种高灵敏压电平面水声换能器[J]. 声学学报,2022,47(3):364-371.

WANG Hongwei, HUI Hui, RONG Tian. A highly sensitive piezoelectric planar hydroacoustic transducer [J]. Journal of Acoustics,2022,47(3):364-371.