

球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料研究

管弦,鲜晓军,李洪平,刘振华,刘良芳,汪红兵,王登攀

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:该文设计并制作了球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料并对其压电特性、声学特性与制作工艺进行了分析和研究,给出了相关参数的计算表达式并对其性能参数进行了测试。仿真分析了球面状 1-3 型压电复合材料换能器的阻抗特性和发射响应特性。结果表明,球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料具有在工作频带内模态单一,高频工作时宽波束等优点,可广泛应用于水声探测与成像发射换能器及其阵列的研制。

关键词:1-3 型压电复合陶瓷;球面状;宽波束;换能器

中图分类号:TN384;TM282;TB565 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.03.009

Study on Spherical 1-3 Piezoelectric Composite Ceramic Material

GUAN Xian, XIAN Xiaojun, LI Hongping, LIU Zhenhua, LIU Liangfang, WANG Hongbing, WANG Dengpan

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The spherical 1-3 piezoelectric composite material is designed and prepared in this work. The piezoelectric properties, acoustic characteristics and the fabrication process of the spherical 1-3 piezoelectric composite material are analyzed and studied. The calculated expressions of related parameter are given and the performance parameters are tested. The impedance and emission response characteristics of the spherical 1-3 piezoelectric composite transducer are simulated and analyzed. The results show that the spherical 1-3 piezoelectric composite ceramics have the advantages of single mode in the operating frequency band and wide beam at high frequency operation, and can be used for the development of the transmitted transducer for underwater acoustic detection and imaging as well as the transducer array.

Key words: 1-3 piezoelectric composite ceramics; spherical shape; wide beam; transducer

0 引言

压电复合材料通常由压电陶瓷和高分子聚合物按一定的连通方式、体积或质量比,通过特定空间几何分布复合而成。平面状 1-3 型压电复合陶瓷材料作为一种新型的功能材料,其具有声阻抗低,与水与有机材料的声阻抗匹配,机电转换效率高及工艺制作简单等优点,广泛应用于超声水声换能器和传感器的研制^[1-3]。随着蛙人载具、水下无人潜水器(UUV)等小型水下装备的发展,舰艇及港口面临的水下威胁日益严峻。为防御上述小型目标的威胁,要求用于港口防御的声呐浮标等设备装配高频宽带及宽波束的水声发射换能器及其阵列,平面状 1-3 型压电复合材料不能满足该类型器件的研制。由于球面状 1-3 型压电复合材料与换能器件在工作频带内具有模态单一,高频时可实现宽波束等优点,

随着高频、宽波束换能器及其阵列应用领域的不断扩大,近年来球面状 1-3 型压电复合材料及换能器已成为新的研究热点^[4-9]。

1 球面状 1-3 型压电复合材料理论分析

球面状 1-3 型压电复合材料由沿球面均匀分布的压电陶瓷基元与聚合物组成,电极球面的内、外表面,陶瓷柱的极化方向沿径向方向(见图 1),1-3 型压电复合材料陶瓷相的体积分数为 v_1 。

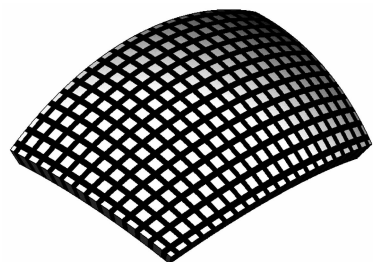


图1 球面状 1-3 型压电复合材料结构图

收稿日期:2018-04-09

基金项目:预研基金资助项目

作者简介:管弦(1987-),男,四川绵阳人,工程师,硕士,主要从事声学器件的研究。通信作者:鲜晓军(1981-),男,四川绵阳人,高级工程师,博士,主要从事声学换能器的研究。

由于球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料与平面状 1-3 型压电复合陶瓷材料空间分布相同,由此可采用平面状 1-3 型压电复合陶瓷材料来分析球面

状 1-3 型压电复合陶瓷材料的各种特性。1-3 型压电复合陶瓷材料的横、纵向应变及电位移计算表达式为

$$\mathbf{S}_1^{\text{pc}} = [v_1(s_{11}^{\text{E}^c} + s_{12}^{\text{E}^c}) + (1-v_1)(s_{11}^{\text{E}^p} + s_{12}^{\text{E}^p})]\mathbf{T}_1^{\text{pc}} + v_1(s_{13}^{\text{E}^c} - s_{12}^{\text{E}^p})\mathbf{T}_3^{\text{pc}} + s_{12}^{\text{E}^p}\mathbf{T}_3^{\text{pc}} + v_1 d_{31} E_3^{\text{pc}} \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_3^{\text{pc}} = \frac{2[v_1 s_{11}^{\text{E}^p} s_{13}^{\text{E}^c} + (1-v_1)s_{33}^{\text{E}^c} s_{12}^{\text{E}^p}]\mathbf{T}_1^{\text{pc}} + s_{33}^{\text{E}^c} s_{11}^{\text{E}^p}\mathbf{T}_3^{\text{pc}} + v_1 d_{31} s_{11}^{\text{E}^p} E_3^{\text{pc}}}{v_1 s_{11}^{\text{E}^p} + (1-v_1)s_{33}^{\text{E}^c}} \quad (2)$$

$$\mathbf{D}_3^{\text{pc}} = 2v_1 d_{31} \mathbf{T}_1^{\text{pc}} - \frac{2(1-v_1)d_{33}(s_{13}^{\text{E}^c} - s_{12}^{\text{E}^p})\mathbf{T}_1^{\text{pc}} - v_1 d_{33} s_{11}^{\text{E}^p} \mathbf{T}_3^{\text{pc}} - v_1(1-v_1)(d_{33})^2 E_3^{\text{pc}}}{v_1 s_{11}^{\text{E}^p} + (1-v_1)s_{33}^{\text{E}^c}} + [v_1 \epsilon_{33}^{\text{T}} + (1-v_1)\epsilon_{11}^{\text{T}}]E_3^{\text{pc}} \quad (3)$$

式中:上标 c, p 及 pc 分别为陶瓷相、聚合物相及 1-3 型压电复合材料; $\mathbf{S}$, $\mathbf{T}$ 分别为应变和应力张量; D 和 E 为电位移和电场强度; ϵ^{T} , s^{E} 及 d 分别为恒应力下的介电强度、恒电场下的弹性柔顺常数及压电常数。

1-3 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)的表达式为

$$k_t = \sqrt{1 - \frac{c_{33}^E}{c_{33}^D}} \quad (4)$$

$$Z = (c_{33}^D \rho)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$v_{33}^D = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} \quad (6)$$

式中 ρ 和 c_{33}^D 分别为 1-3 型压电复合陶瓷材料的密度与短路刚度常数。

假设 1-3 型压电复合陶瓷材料的等效厚度为 t , 由式(6)可计算出 1-3 型压电复合陶瓷材料厚度方向共振频率为

$$f_t = \frac{v_{33}^D}{2t} \quad (7)$$

2 球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料有限元分析与试验制作

根据理论设计与工程应用需要,对球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料进行了有限元设计与分析,有限元模型如图 2 所示。运用 ANSYS 建模对其进行谐响应分析,其数值模拟导纳曲线如图 3 所示。根

据理论设计的几何尺寸,试验制作了球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料,制作工艺采用切割填充平面压电陶瓷弯曲成型制作而成,其工艺流程如图 4 所示。试验制作过程中,采用对外形尺寸为 $\varnothing 90 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 PZT-41 型压电陶瓷切割填充后弯曲成型。其中,有机物填充切缝宽为 0.3 mm,弯曲成型后的曲率半径为 50 mm。图 5 为试验制作出的 1-3 型球面状压电复合材料试验样品,对试验样品进行了测试,测试的导纳曲线如图 6 所示。由图 4~6 可知,球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料具有在工作频带内模态单一,宽频带等特性,可用于研制高频宽波束水声换能器件及其阵列。



图 2 1-3 型压电复合材料有限元模型

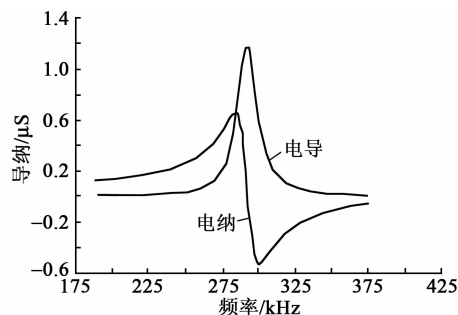


图 3 球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料导纳仿真曲线

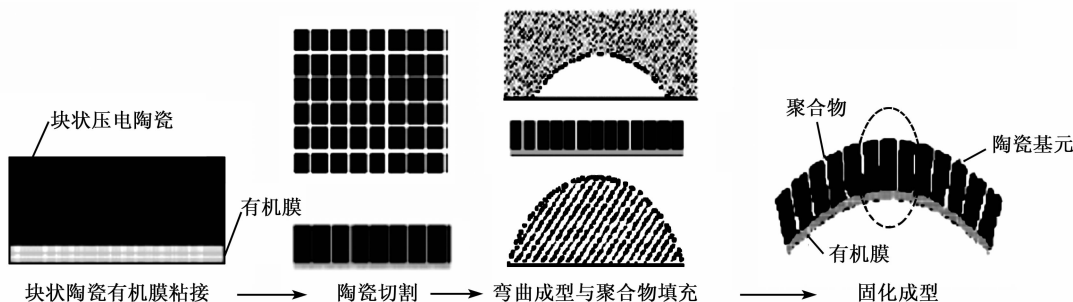


图 4 球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料切割填充弯曲成型工艺示意图

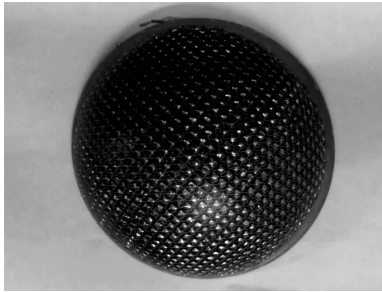


图 5 球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料实物图

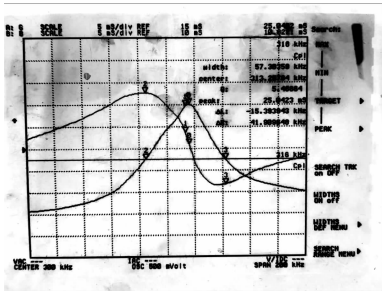


图 6 球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料导纳测试曲线

3 基于球面状 1-3 型压电复合材料换能器的仿真设计

为了验证研制的球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料的声学特性,利用 1-3 型压电复合陶瓷材料的低声阻抗、低机械品质因数(Q)值,高频工作模式单一等优点,设计了基于球面状 1-3 型压电复合材料的高频宽波束换能器。换能器由压电复合材料、背衬、聚氨酯透声橡胶等组成,其结构设计示意图如图 7 所示。根据设计尺寸,运用有限元 ANSYS 软件仿真分析了换能器的导纳曲线和发射电压响应曲线,其理论计算曲线如图 8、9 所示。由图 8、9 可知,基于球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料设计的高频水声换能器在 200~400 kHz 频带内,只有单一谐振峰,最大发射电压响应达 165 dB,−3 dB 带宽近 70 kHz,具有高频工作时模式单一,宽带及可实现宽波束辐射等特点,可广泛应用于水下声探测与三维成像等方面。

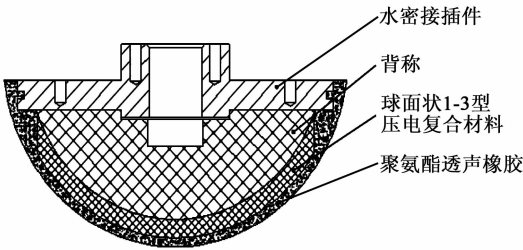


图 7 球面状 1-3 型压电复合材料的高频宽波束换能器

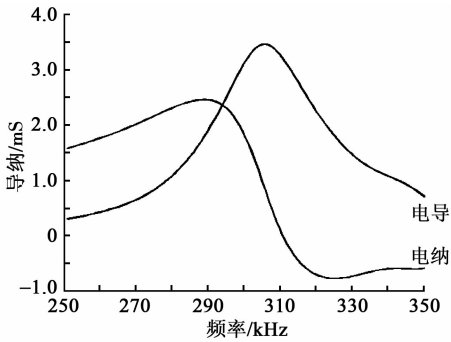


图 8 球面状 1-3 型压电复合材料高频宽波束换能器导纳仿真曲线

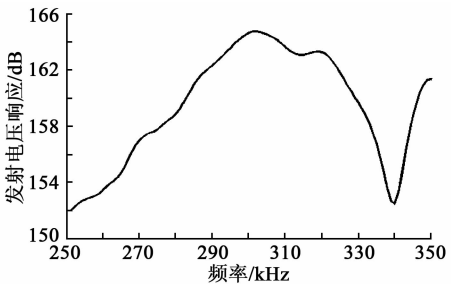


图 9 球面状 1-3 型压电复合材料高频宽波束换能器发射电压响应仿真曲线

4 结束语

本文分析了球面状 1-3 型压电复合陶瓷材料的压电特性与声学特性,并给出了相关参数的计算表达式。通过切割填充弯曲成型工艺路线,成功制作出了球面状 1-3 型压电复合陶瓷样品,并进行了性能测试,试验结果和仿真结果吻合较好。通过有限元仿真验证了基于球面状 1-3 型压电复合材料设计的水声换能器高频工作时,具有模式单一,宽带及宽波束辐射等特点,该换能器可广泛应用于水下声探测与三维成像等方面。

参考文献:

[1] 甘国友,严继康,孙加林,等. 压电复合材料的现状与展望[J]. 功能材料,2002,31(5):456-460.
[2] 盖学周. 压电材料的研究发展方向和现状[J]. 中国陶瓷,2008,44(5):9-13.
[3] 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.
[4] 吴培荣,刘振君,王艳,等. 一款高频弧形换能器[J]. 声学技术,2012,31(6):628-630.
[5] 张凯. 高频宽带压电复合材料换能器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
[6] 秦雷. 宽波束水声发射换能器研究[D]. 北京:北京邮电大学,2010.
[7] 鲜晓军,林书玉,唐平. 1-3-2 型弧形压电陶瓷复合材料与换能器研究[J]. 南京大学学报,2015,51(6):1148-1152.
[8] 吴培荣,刘振君,王艳. 一款高频弧形换能器[J]. 声学技术,2012,31(6):628-630.
[9] 仲林建,唐军,钟琴琴. 高频宽波束球冠形换能器研究[J]. 声学及电子工程,2011,103(3):22-25.