

基于 1-3 压电复合材料的透镜式聚焦换能器设计

汤旭东,曾德平,杨增涛,赵 强

(重庆医科大学 生物医学工程学院,省部共建超声医学工程国家重点实验室,超声医学工程重庆市市级重点实验室,重庆 400016)

摘 要:为了抑制压电陶瓷透镜式聚焦换能器振动的多模耦合现象,提高换能器电声转换效率,采用 1-3 压电复合材料,设计了一种新型的透镜式聚焦换能器;首先计算并仿真了 1-3 压电复合材料的厚度谐振频率 f_t 和厚度机电耦合系数 k_t ,理论和仿真结果分别相差 2.947% 和 0.933%;接着对换能器做振动分析,结果表明,在换能器谐振频率 f_t 处,声透镜中心径向振幅仅为厚度振幅的 7.9%,径向振动得到有效抑制,这有助于提高换能器电声转换效率。

关键词:1-3 压电复合材料;声透镜;聚焦换能器;有限元分析;ANSYS

中图分类号:TB552

文献标识码:A

Design of a Lens-focused Transducer Based on 1-3 Piezoelectric Composites

TANG Xudong, ZENG Deping, YANG Zengtao, ZHAO Qiang

(Chongqing Municipal Key Lab. of Ultrasound Engineering in Medicine, State Key Lab. of Ultrasound Engineering in Medicine Co-founded by Chongqing and MOST, College of Biomedical Engineering, Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

Abstract: To suppress the multi-mode coupling effect and improve the electro-acoustic conversion efficiency of a lens-focused transducer made of the piezoelectric ceramic material, a novel lens-focused transducer using 1-3 piezoelectric composites is designed in this work. First, the thickness resonant frequency f_t and thickness electro-mechanical coupling coefficient k_t of the 1-3 piezoelectric composites were calculated and simulated, the difference between the theoretical value and the simulation value for f_t and k_t are 2.947% and 0.933% respectively. Next, the vibration condition of the transducer was analyzed. At the resonant frequency f_t of the transducer, the displacement amplitude at radial direction of the acoustic lens center is only 7.9% of the thickness direction, which shows that the radial vibration has been suppressed effectively, and thus the electro-acoustic conversion efficiency of transducer has been improved. This study could be used as reference in the development work on focused transducers.

Key words: 1-3 piezoelectric composites; acoustic lens; focused transducer; finite element analysis; ANSYS

0 引言

随着高强度聚焦超声成功地应用于临床治疗,医用超声技术逐渐从检测领域拓展到治疗领域,被誉为 21 世纪“科技前沿”项目^[1]。作为聚焦超声技术的核心器件,目前普遍使用的是基于压电陶瓷的透镜式聚焦换能器,其工作频率通常约在 1 MHz,主要利用压电陶瓷的厚度振动实现电声能量转换。但压电陶瓷存在的多振动模耦合问题,使该类型换能器的电声转换效率较低。1-3 压电复合材料由于本身的结构特点,有着高的厚度机电耦合系数(k_t),但目前文献未见基于 1-3 压电复合材料的透镜式聚焦换能器的研究。由此,我们设计并仿真了基于 1-3 压电复合材料的透镜式聚焦换能器,以期为后续聚焦换能器的研制提供指导方案。

1 换能器结构设计

结合实际使用条件,本文设计的基于 1-3 压电复合材料的透镜式聚焦换能器 1/4 结构示意图如图 1 所示。

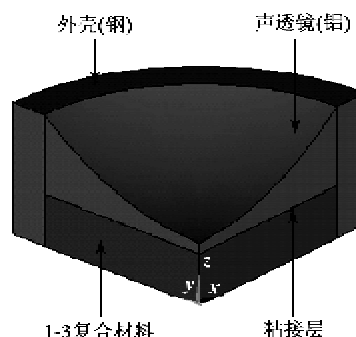


图 1 换能器结构示意图

其中,1-3 压电复合材料直径为 $\varnothing 50$ mm,厚为

收稿日期:2012-09-11

基金项目:国家自然科学基金委重大科学仪器设备研制专项基金资助项目(81127901);国家自然科学基金资助项目(81201102)

作者简介:汤旭东(1987-),男,重庆荣昌人,硕士生,主要从事聚焦超声换能器研究。通信作者:曾德平,E-mail:zengdp@haifu.com.cn。

5 mm;粘接层直径为 $\varnothing 50$ mm,厚为 0.1 mm;声透镜直径 $\varnothing 50$ mm,中心处厚为 1 mm,凹面球半径为 50 mm;外壳高 20 mm,厚为 5 mm。各材料参数如表 1 所示。表中, ρ 为密度; σ 为泊松比。

表 1 材料参数

	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	σ
粘接剂	1 700	10	0.38
声透镜	2 700	71	0.33
外壳	7 840	216	0.28

2 1-3 压电复合材料参数选择

2.1 理论计算

将一维连通压电陶瓷柱周期性排列在三维连通聚合物中就得到 1-3 压电复合材料,其最早由美国学者 Newnham^[2]于 20 世纪 70 年代末提出,之后众多学者对其进行了理论研究,这其中主要有 Auld^[3]提出的压电陶瓷(PZT)柱周期排列的 1-3 压电复合材料理论;Smith^[4]提出的厚度振动宏观等效性能参数理论;Chan^[5]在 Smith 理论的基础上进行扩展而建立的理论等。

根据 Chan 的理论,1-3 压电复合材料厚度谐振频率 f_t 和 k_t 由以下式子确定^[5]。

$$f_t = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^w E + \frac{(e_{33}^w)^2}{\epsilon_{33}^w}}{\rho^w}} \quad (1)$$

$$k_t = \sqrt{1 - \frac{c_{33}^w E}{c_{33}^w E + \frac{(e_{33}^w)^2}{\epsilon_{33}^w}}} \quad (2)$$

其中

$$c_{33}^w E = v_1 \left[c_{33}^p E - \frac{2(c_{13}^p E - c_{12}^r)^2}{U(v_1)} \right] + (1 - v_1) c_{11}^r \quad (3)$$

$$e_{33}^w = v_1 \left[e_{33}^p - \frac{2e_{31}^p (c_{13}^p E - c_{12}^r)}{U(v_1)} \right] \quad (4)$$

$$\epsilon_{33}^w = v_1 \left[\frac{-\epsilon_{33}^p + 2(e_{31}^p)^2}{U(v_1)} \right] + (1 - v_1) \epsilon_{11}^r \quad (5)$$

$$\rho^w = v_1 \rho^p + (1 - v_1) \rho^r \quad (6)$$

$$U(v_1) = c_{11}^p E + c_{12}^r E + \frac{v_1 (c_{11}^p + c_{12}^r)}{1 - v_1} \quad (7)$$

式中: w 为 1-3 压电复合材料; p 为压电陶瓷; r 为聚合物; C 为弹性刚度常数; e 为压电应力常数; ϵ 为介电常数; ρ 为密度; E 、 S 为恒定电场和等应变条件; v_1 为 1-3 压电复合材料中压电陶瓷柱的体积分数; t 为 1-3 压电复合材料厚度。

本文选择 PZT-4 和环氧树脂进行 1-3 压电复合材料设计,压电陶瓷柱横截面尺寸为 1 mm $\times$ 1 mm,

柱间距为 0.5 mm,压电陶瓷柱体积分数为 41.8%。

PZT-4 材料^[6]的密度为 $\rho = 7\,500 \text{ kg/m}^3$,弹性刚度常数矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} 13.9 & 7.78 & 7.43 & & & \\ 7.78 & 13.9 & 7.43 & & & \\ 7.43 & 7.43 & 11.5 & & & \\ & & & 3.06 & & \\ & & & & 2.56 & \\ & & & & & 2.56 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad (8)$$

压电应力常数矩阵

$$e = \begin{bmatrix} & & -5.2 \\ & & -5.2 \\ & & 15.1 \\ & 12.7 & \\ 12.7 & & \end{bmatrix} \quad (9)$$

介电常数矩阵

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 730 & & \\ & 730 & \\ & & 635 \end{bmatrix} \epsilon_0 \quad (10)$$

环氧树脂材料参数如表 2 所示。

表 2 环氧树脂材料参数

$\rho/(\text{kg/m}^3)$	ϵ_{11}/ϵ_0	$C_{11}/(10^{10} \text{ N/m}^2)$	$C_{11}/(10^{10} \text{ N/m}^2)$
1 140	4	0.701 8	0.394 4

注:真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.84 \times 10^{-12} \text{ C/m}$ 。

由式(1)~(7)和表 1、2 参数可计算得 $f_t = 302.098 \text{ kHz}$, $k_t = 0.643$ 。

2.2 ANSYS 仿真

由于 1-3 压电复合材料具有对称性,故取 1/4 结构进行仿真即可^[7],采用 SOLID98 压电耦合场单元,建立有限元模型如图 2 所示。

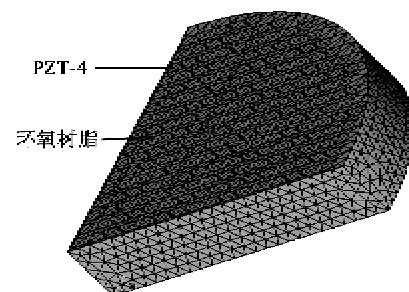


图 2 1-3 压电复合材料有限元模型

由 1-3 压电复合材料的 f_t 和反谐振频率 f_a ,通过下式可求得 k_t ^[8],即

$$k_t = \sqrt{\frac{\pi f_t}{2 f_a} \cdot \cot\left(\frac{\pi f_t}{2 f_a}\right)} \quad (11)$$

利用 ANSYS 软件仿真 1-3 压电复合材料的导纳曲线如图 3 所示。图中, Y 为 1-3 压电复合材料电导, f 为正弦激励电压频率。

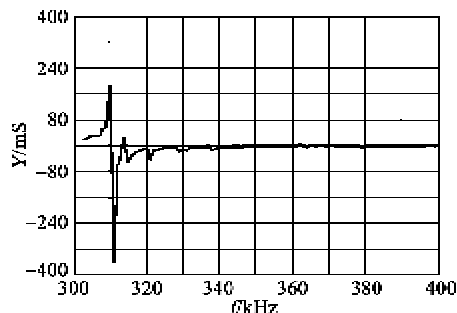


图3 1-3压电复合材料导纳曲线

由仿真结果可得 1-3 压电复合材料 f_t 和 f_s 分别为 311.0 kHz 和 388.0 kHz, 通过式(11)计算得 $k_t = 0.637$ 。

f_t 、 k_t 理论和仿真结果对比情况如表 3 所示。

表3 理论和仿真结果对比情况

	理论值	仿真值	相差/%
f_t/kHz	302.098	311.0	2.947
k_t	0.643	0.637	0.933

由表 3 结果可见, f_t 、 k_t 理论和仿真值相符, 相差均小于 5%。

3 换能器振动分析

由于换能器具有对称性, 取换能器 1/4 结构, 采用 SOLID98 压电耦合场单元, 建立有限元模型如图 4 所示。

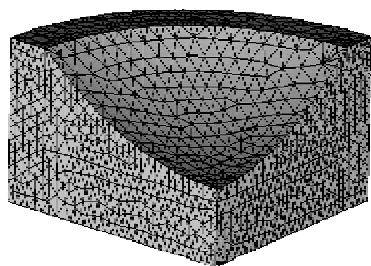


图4 换能器有限元模型

计算换能器导纳曲线如图 5 所示。

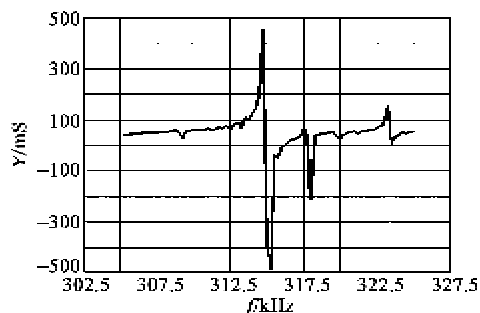


图5 换能器导纳曲线

图 5 结果显示, $f_t = 315.0$ kHz。图 6 为 f_t 处声透镜凹球面的振幅分布情况。

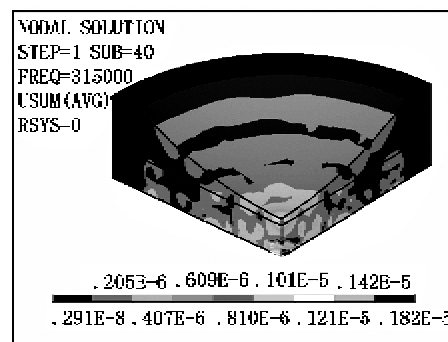


图6 声透镜凹球面振幅分布图

由图 6 可见, 换能器外壳及声透镜边缘振幅很小, 量值上比其余部分低 2 个数量级; 声透镜凹球面中部呈若干个较均匀的振幅分布带, 量值介于声透镜边缘和声透镜中心之间, 约为 $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$; 声透镜凹球面中心处振幅最大, 量值约为 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 。

取声透镜凹球面中心处厚度振幅和径向振幅作进一步对比分析, 结果如图 7、8 所示。图中, U 为振幅幅值。

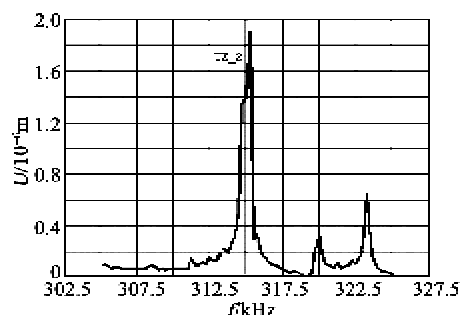


图7 声透镜凹球面中心厚度振幅

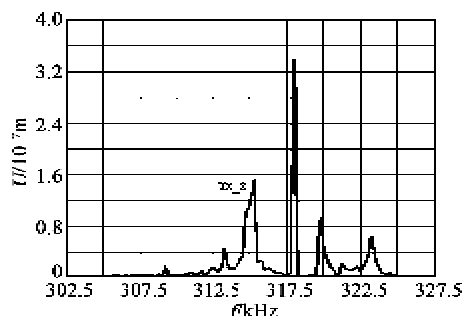


图8 声透镜凹球面中心径向振幅

由图 7、8 结果可见, 在 f_t 处, 厚度振幅达到最大值(为 $1.914 \mu\text{m}$), 径向振幅为 $0.151 \mu\text{m}$, 仅为厚度振幅的 7.9%; 另外, 在 f_t 附近, 径向振幅最大值为 $0.338 \mu\text{m}$, 仅为厚度最大振幅的 17.6%, 不到 1/5, 表明径向振动得到较好抑制, 这有助于提高换能器的电声转换效率。

4 结束语

压电陶瓷透镜式聚焦换能器存在多振动模耦合问题,针对实际使用条件,结合 1-3 压电复合材料的优秀性能,本文设计了基于 1-3 压电复合材料的透镜式聚焦换能器,分析结果显示采用 1-3 压电复合材料研制聚焦超声换能器能较好地解决以上问题。

通常,压电陶瓷的厚度机电耦合系数低于 0.5,使压电陶瓷透镜式聚焦换能器电声转换效率较低。而正如本文所分析的那样,1-3 压电复合材料较强的径向振动抑制能力,使其厚度机电耦合系数达到 0.6 以上,这有助于提高换能器的电声转换效率。

本文首先设计了基于 1-3 压电复合材料的透镜式聚焦换能器结构;其次计算并仿真了 1-3 压电复合材料的厚度谐振频率 f_t 和厚度机电耦合系数 k_t ,仿真和理论结果分别相差 2.947% 和 0.933%,符合较好,表明参数设计在要求范围内;在此基础上,对换能器进行了振动分析,结果表明换能器谐振频率 $f_t = 315.0$ kHz,声透镜中心厚度振幅为 $1.914 \mu\text{m}$,径向振动较弱,达到了预期目的。

参考文献:

- [1] 冯若. 我国聚焦超声治疗技术的迅速崛起与展望[J]. 声学技术, 2011, 30(1): 17-20.
FENG Ruo. Rapid rise of focused ultrasound therapeutic technique and prospect in China[J]. Technical Acoustics, 2011, 30 (1): 17-20.
- [2] NEWNHAM R E, SKINNER D P, CROSS L E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites[J]. Mat Res Bull, 1978, 13(5): 525-536.
- [3] AULD B A, KUNKEI H A, SHUI Yongan, et al. Dynamic behavior of periodic piezoelectric composites. In: IEEE. 1983 Ultrasonics Symposium Proceedings[C]// America: IEEE, 1983: 554-558.
- [4] SMITH W A, AULD B A. Design of piezocomposites for ultrasonic transducers[J]. Ferroelectrics, 1989, 91 (1): 155-162.
- [5] CHAN H L W, UNSWORTH J. Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1-3 composites used in ultrasonic transducer applications[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 1989, 36(4): 434-441.
- [6] 王荣津. 水声材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 145-147.
- [7] RAMESH R, PRASAD C D, VINOD KUMAR T K. Experimental and finite element modeling studies on single-layer and multi-layer 1-3 piezocomposite transducers[J]. Ultrasonics, 2006, 44(4): 341-349.
- [8] 王炳辉. 1-3 压电复合材料的有限元分析计算[J]. 声学技术, 2009, 28(2): 300-301.
WANG Binghui. Finite element analysis of 1-3 composite piezoelectric material [J]. Technical Acoustics, 2009, 28(2): 300-301.
- [9] 李莉. 1-3 系压电复合材料及水声换能器研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [9] 韩权威, 李坤, 严玲, 等. 磁场增强压电悬臂梁震动发电装置[J]. 压电与声光, 2011, 33(1): 85-92.
HAN Quanwei, LI Kun, YAN Ling, et al. Magnetic field enhanced piezoelectric cantilever-structure vibration generatora [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(1): 85-92.
- [10] 马华安, 刘景全, 唐刚, 等. 一种宽频的磁式压电振动能量采集器[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 66-68.
MA Hua'an, LIU Jingquan, TANG Gang, et al. A magnetic structure for broadband piezoelectric vibration energy harvester[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(4): 66-68.
- [11] 孙舒, 曹树谦. 双稳态压电悬臂梁发电系统的动力学建模及分析[J]. 物理学报, 2012, 61(21): 210505.
SUN Shu, CAO Shuqian. Dynamic modeling and analysis of a bistable piezoelectric cantilever power generation system [J]. Acta Phys Sinica, 2012, 61 (21): 210505.
- [12] 陈树辉. 强非线性振动系统的定量分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(上接第 544 页)