

压电复合换能器的结构对其频率特性的影响

刘鹏,龙士国,程驰,袁娅

(湘潭大学 材料与光电物理学院,湖南 湘潭 411105)

摘要:研究了多模耦合宽频带复合换能器,结果发现,这种换能器在空气中的纵弯振动具有明显的规律性。针对1-3型压电复合材料,采用有限元法研究了压电陶瓷体积分数对换能器共振频率的影响,并研究了换能器共振频率与其几何尺寸间的关系。结果表明,换能器共振频率与压电陶瓷体积分数及其几何尺寸有关,即随压电陶瓷体积分数增加,共振频率增大;换能器前盖板几何尺寸越大,共振频率越小,纵振基频与弯振基频间距亦随之减小。

关键词:有限元法;共振频率;压电陶瓷;体积分数;纵弯振动

中图分类号: TB552 **文献标识码:** A

Effect of the Structure of Piezoelectric Compound Transducer on Its Frequency Characteristics

LIU Peng, LONG Shiguo, CHENG Chi, YUAN Ya

(Faculty of Materials, Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: After investigating the multi-mode wideband composite transducer, it has been found that the flexural and longitudinal vibration of this kind of transducer in air has significant regularity. For 1-3 type piezo-composite material used as the piezoelectric stack, the effect of the volume-fraction of piezoelectric ceramic on the resonant frequency has been studied by using the commercial finite element method and the relationship between the resonant frequency of the transducer and its dimension has also been studied in this paper. The results show that the resonant frequency of transducer will become higher with increase of volume fraction; and will become lower with increase of the dimension of front layer of transducer, and the resonant frequency is lower, the interval of longitudinal and flexural fundamental frequencies will be smaller.

Key words: finite element method; resonance frequency; piezoelectrics; volume fraction; flexural and longitudinal vibration

0 引言

超声检测技术具有穿透能力强,设备简单,使用条件和安全性好,检测深度大等优点,是目前应用最广泛,使用频率最高的无损检测技术之一^[1-2]。超声无损检测系统一般由发射换能器、数据采集器、数据处理软件和接收换能器等部分组成,其中压电换能器以其良好的收发性能成为无损检测系统的重要组成部分。对换能器来说,提高其检测性能,就需要换能器在工作时,具有宽频带,高灵敏度的特性。近年来,由于聚合物和压电陶瓷复合构成的压电复合材料,如1-3型压电复合材料,与压电陶瓷具有低声阻抗、低机械品质因数(Q)及高静水压压电常数等优点^[3],因而被广泛用于新型压电复合换能器的生产与使用^[4-6]。Chong等^[7]提出用PZT与1-3型压电复合材料组成的混合结构作为换能器压电晶堆,研

究了不同压电晶堆结构组合对换能器频率特性的影响。Li等^[8]采用1-3-2型压电复合材料制作了换能器及换能器阵,结果证明此种换能器具有频带宽、灵敏度高及稳定性好等优点。换能器一般由背衬、压电晶堆和前盖板构成,前盖板呈倒喇叭状。这种结构将产生两种振型,一种是换能器本身的纵向振动,另一种是由前盖板引起的弯曲振动,根据换能器的多模耦合原理^[9-11],通过调节弯曲振动频率,使弯曲振动频率与纵向振动频率相互之间较接近,达到增加带宽的目的^[12-13]。因此,前盖板几何尺寸的设计对换能器的共振频率具有重要影响。

另外,由于压电复合材料中压电陶瓷体积分数的变化^[3,5]会引起换能器共振频率的不同,这对拓宽换能器的频带会产生重要影响^[7,14],但针对这方面的研究较少,压电换能器的结构与共振频率的相

收稿日期:2011-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172258);湖南省科技厅基金资助项目(2010GK3029)

作者简介:刘鹏(1984-),男,湖南衡阳人,硕士生,主要从事检测用压电复合换能器的设计与性能优化的研究。

互关系尚不清楚。因此,本文采用 1-3 型压电复合材料设计了压电换能器,并利用有限元软件 ANSYS 研究了 1-3 型压电复合材料中压电陶瓷体积分数及前盖板几何尺寸对换能器共振频率影响。

1 有限元模型的建立

图 1 为换能器结构,前盖板设计成 T 型形状,压电晶堆采用压电复合材料。选取铝、钢分别作为前盖板与背衬的材料,压电陶瓷选用 PZT5A。背衬、压电晶堆及前盖板后端面的直径和厚度分别为 $\varnothing 10\text{ mm}$ 和 6 mm。表 1、2 分别为换能器、压电陶瓷 PZT5A 的材料参数^[15]。

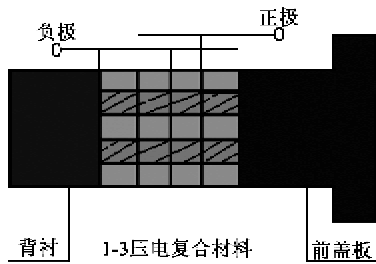


图 1 压电复合换能器结构示意图

表 1 换能器的材料参数

材料类型	密度/(kg/m ³)	泊松比	杨氏模量/Pa
钢	7 840	0.30	2.1×10^{11}
铝	2 770	0.33	7.1×10^{10}
环氧树脂	1 430	0.30	2.5×10^9

表 2 压电陶瓷 PZT5A 的材料参数

弹性参数/ (10^{10} N/m^2)	压电参数/ [N/(V·m)]	介电常数/ (10^{-3} C/m)
$C_{11}=12.04, C_{33}=11.087$	$e_{31}=-5.351$	$\epsilon_{11}=826$
$C_{12}=7.518, C_{13}=2.258$	$e_{33}=15.78$	$\epsilon_{33}=919$
$C_{13}=7.509, C_{66}=2.105$	$e_{15}=12.29$	

首先确定构成压电复合换能器各种材料的有限元单元类型,然后选择 ANSYS 有限元软件的六面体压电分析单元 solid5 来模拟 1-3 型压电复合材料,其他结构选用 3-D 结构实体单元 solid45,并略去粘结层、上下电极片的影响^[14-17],即背衬与前盖板,他们的位移和力是连续的。最后,建立三维有限元模型,划分网格,施加边界条件,模态分析及求解。

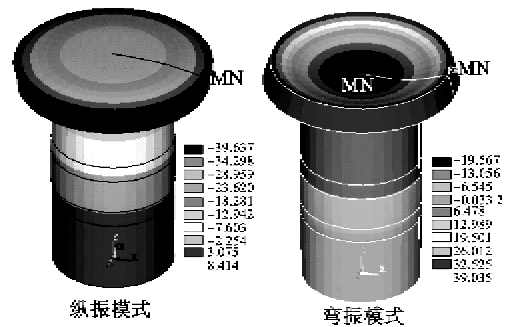
2 压电复合换能器的纵弯振动

为了设计宽频带换能器,寻求换能器的纵向振动与前盖板弯曲振动的恰当耦合,首先研究 1-3 型压电复合材料中压电陶瓷体积分数对换能器纵向振动与弯曲振动的影响,然后选择合适的压电陶瓷体积分数分析前盖板几何尺寸对换能器纵向振动与弯曲振动的影响。压电陶瓷体积分数变化范围为

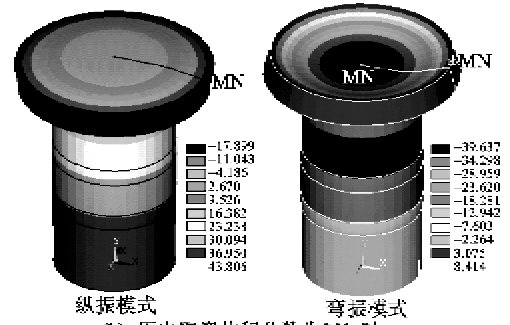
10%~90%,以 10% 递增;前盖板前端面半径变化范围为 2~9 mm,以 1 mm 递增;前盖板前端面厚度变化范围为 1~5 mm,以 1 mm 递增。

2.1 空气中换能器的耦合振动

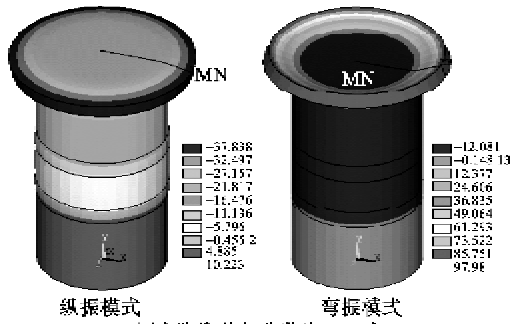
利用有限元软件的模态分析来寻找换能器不同的振动模态。图 2 为压电陶瓷体积分数及换能器前端面半径和厚度不同时,其在空气中自由振动时的前两阶耦合振动。从换能器前端面最大位移的变化可知,前两阶耦合振动模式分别对应换能器的纵向振动和因前盖板引起的弯曲振动,第一阶振动模式为换能器的纵向振动,即图 2(a)~(c)中的左图所示,第二阶振动模式为因前盖板引起的弯曲振动,即图 2(a)~(c)中的右图所示。



(a) 压电陶瓷体积分数为 30% 时,前端面半径和厚度分别为 7 mm 和 1 mm



(b) 压电陶瓷体积分数为 30% 时,前端面半径和厚度分别为 8 mm 和 2 mm



(c) 压电陶瓷体积分数为 50% 时,前端面半径和厚度分别为 8 mm 和 2 mm

图 2 空气中换能器前两阶振动模态

2.2 1-3型压电复合材料中压电陶瓷体积分数对换能器共振频率的影响

图3为前盖板小端厚度和直径分别为1 mm和 $\varnothing 6$ mm时,压电陶瓷体积分数变化对纵振基频 $f_{纵}$ 与弯振基频 $f_{弯}$ 的影响曲线。由图可知,在换能器几何尺寸不变的情况下,换能器纵向振动频率与前盖板弯曲振动频率随着压电陶瓷体积分数的增加而增大,且因前盖板引起的弯振基频增幅大于纵振基频的增幅并趋于一稳定值。由图可预测,当压电陶瓷体积分数很小时,换能器的纵振基频与前盖板的弯振基频间的间距较小。

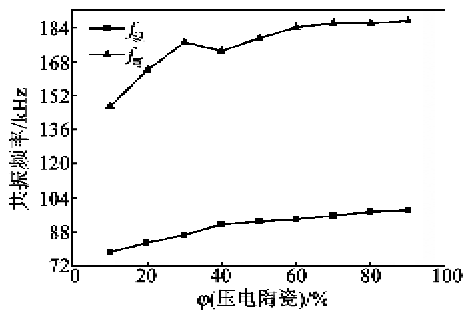


图3 压电陶瓷体积分数对换能器谐振频率影响曲线

2.3 前盖板前端面几何尺寸对换能器共振频率的影响

根据2.2节中的分析结果可知,当压电陶瓷体积分数较小时,弯振基频与纵振基频较接近,因此在后续的分析中选定了1-3型压电复合材料中压电陶瓷体积分数为20%,研究前盖板前端面几何尺寸对换能器共振频率的影响。图4为前端面对换能器纵向振动频率影响的曲线。由图可知,在换能器其他部件尺寸不变的情况下,换能器的纵向振动频率随前端面半径和前端面厚度的增加而减小。当前端面半径不大于7 mm时,在相同的半径增加条件下,前端面厚度越大,纵振基频减少越快;当前端面半径大于7 mm时,在相同的半径增加条件下,前端面厚度越小,纵振基频减少越快。

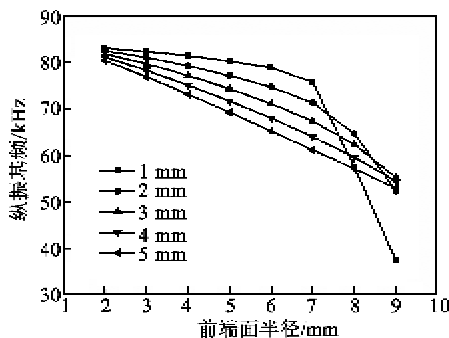


图4 前端面厚度与半径对换能器纵振基频的影响曲线

图5为前端面对换能器前盖板弯曲振动频率影响的曲线。由图可看出,在换能器的其他部件尺寸不变的情况下,换能器的弯曲振动频率随着前端面半径的增加而减小。当前端面半径小于6 mm时,在相同的半径增加条件下,前端面厚度越大,弯振基频减少越快;当前端面半径大于6 mm时,在相同的半径增加条件下,前端面厚度越小,纵振基频减少越快。可以预料,在换能器其他尺寸不变的情况下,当前端面半径很大且厚度较薄时,换能器的纵振基频与前盖板的弯振基频间的间距较小。

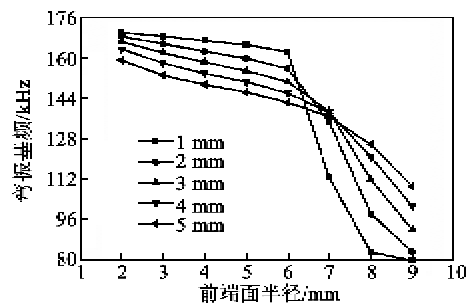


图5 前端面厚度与半径对前盖板弯振基频的影响曲线

因为当前盖板前端面半径越大时,弯振基频减少越快且前两个频率间的间距较小,所以进一步研究了前盖板前端面半径增至13 mm时对前两个频率差值的变化情况,如图6所示。在换能器其他部件尺寸不变的情况下,当前端面半径和厚度分别为8 mm和1 mm时,换能器的纵振基频与前盖板的弯振基频间的间距最小。在此半径条件下,厚度越薄,前两个频率间距越小,但在实际加工制作中又要考虑控制换能器的实际尺寸在一个合理的范围内。

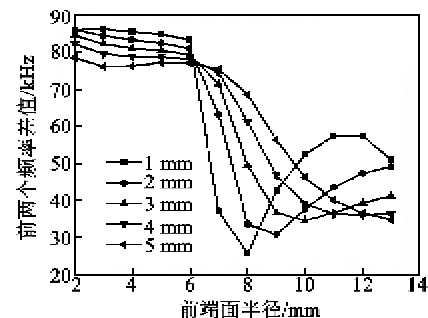


图6 前端面厚度与半径对换能器前两个频率差值的影响曲线

3 结论

本文利用ANSYS有限元软件建立了超声检测用压电复合换能器的轴对称模型,针对换能器的实际结构,对其进行了耦合模态分析。当换能器的尺寸给定后,其共振频率也随之确定。为了达到拓宽

换能器频带的目的,可使换能器前盖板的弯振基频向换能器的纵振基频靠近。得到以下结论:

1) 换能器的共振频率随着 1-3 型压电复合材料中压电陶瓷体积分数的增加而变大。压电陶瓷体积分分数越小,前盖板的弯振基频越接近换能器的纵振基频。

2) 换能器的前两个频率间距取决于前盖板前端半径和厚度之比,若比值变大,则两频率间距将缩小;若比值变小,则两频率间距将变大。

参考文献:

- [1] 黎连修. 超声检测技术在中国[J]. 无损检测, 2008, 30(4): 791-795.
LI Lianxiu. Review and expectation of ultrasonic testing technique[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(4): 791-795.
- [2] 罗雄彪, 陈铁. 超声无损检测的发展趋势[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 148-152.
LUO Xiongbiao, CHEN Tie. Development trends of ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(3): 148-152.
- [3] KAR G, VENKATESH T A. Electromechanical response of piezoelectric composites; Effects of geometric connectivity and grain size[J]. Acta Materialia, 2008, 56(15): 3810-3823.
- [4] 李莉, 王丽坤, 秦雷, 等. 1-3-2 压电陶瓷/聚合物复合材料圆柱形换能器制备[J]. 功能材料, 2010, 41(s1): 60-63.
LI Li, WANG Likun, QING Lei, et al. 1-3-2 ceramic/epoxy piezocomposite and cylinder array transducer[J]. Functional Material, 2010, 41(s1): 60-63.
- [5] HARALD B, SREEDHAR K, ULRICH G, et al. An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(21/22): 5692-5714.
- [6] 张晋弘, 马剑强, 李保庆, 等. MEMS 压电超声换能器的结构设计及性能表征[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 604-607.
ZHANG Jinhong, MA Jianqiang, LI Baoqing, et al. Structure design and characterization of MEMS piezoelectric ultrasonic transducer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 604-607.
- [7] CHONG C P, CHAN H L W, NG M W, et al. Effect of hybrid structure (1/3 composite and ceramic) on the performance of sandwich transducers [J]. Materials Science and Engineering B, 2003, 99(1/3): 6-10.
- [8] LI Guang, WANG Likun, LUAN Guidong, et al. Study of 1-3-2 type piezoelectric composite transducer array[J]. Ultrasonics, 2006, 44(1): e673-e677.
- [9] LIN S Y. Effect of electric load impedances on the performance of sandwich piezoelectric transducers [J]. IEEE Transactions on UFFC, 2004, 51(10): 1280-1286.
- [10] YAO Qingshan, Leif Bjorno. Broadband tonpiliz underwater acoustic transducers based on multimode optimization[J]. IEEE Transactions on UFFC, 1997, 44(5): 1060-1066.
- [11] 孙好广, 俞宏沛. 一种利用前盖板弯曲扩展带宽的纵向换能器仿真计算[J]. 声学技术, 2004, 23(Suppl. 1): 370-374.
SUN Haoguang, YU Hongpei. Simulation of widening bandwidth of longitudinal transducer by using front layer flexed[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(Suppl. 1): 370-374.
- [12] 贺西平. 复合棒型压电换能器的纵弯振动[J]. 压电与声光, 2005, 27(6): 655-657.
HE Xiping. Flexural and longitudinal vibration of a compound bar piezoelectric transducer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(6): 655-657.
- [13] DHILSHA R. Performance of a low-frequency, multi-resonant broadband tonpiliz transducer[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1692-1694.
- [14] 刘殿锋, 李明轩. 1-3 型压电复合材料非均匀振动换能器的研究[J]. 应用声学, 1998, 17(1): 11-14, 42.
LIU Dianfeng, LI Mingxuan. Investigation of 1-3 piezo-composite nonuniformly-vibrating transducers[J]. Applied Acoustics, 1998, 17(1): 11-14, 42.
- [15] 何涛焘, 龙士国, 刘鹏, 等. 背衬对压电传感器瞬态特性影响的模拟研究[J]. 压电与声光, 2010, 33(1): 100-104.
HE Taotao, LONG Shiguo, LIU Peng, et al. Simulation study of the effect of backing on the transient properties of piezoelectric transducer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 33(1): 100-104.
- [16] 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, 26(6): 1279-1289.
MO Xiping. Simulation and analysis of acoustics transducers using the ANSYS software[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1279-1289.
- [17] 许龙, 林书玉. 耦合振动夹心式换能器的振动模态研究[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 596-600.
XU Long, LIN Shuyu. Study on the vibrational mode of coupled vibration sandwich transducer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 596-600.