

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

多匹配层空气耦合压电超声换能器*

卞加聪 胡文祥[†] 周八妹

(同济大学声学研究所 上海 200092)

摘要 该文针对超声无损检测与成像功能空气耦合换能器开展了分析计算和研制。为解决压电材料与空气间巨大的阻抗失配问题,进行了多匹配层设计,并基于有限元技术仿真设计了 1-3 压电复合材料参数。借助复数压电方程,导出考虑损耗的多匹配层压电复合材料换能器厚度振动等效电路,获得其等效导纳,以此计算电导谱,同时基于有限元技术数值计算相应电导谱,二者有较好的一致性。在此基础上分别设计制作复合压电材料,多匹配层材料以及由此构成的空气耦合超声换能器。换能器的实测电导谱与数值仿真结果一致。进一步的换能器回波信号测试及其谱分析结果表明,所研制的 160 kHz 中心频率空气耦合换能器样品有较好灵敏度和带宽。这些结果说明,该文研制的空气耦合超声换能器的初样是成功的。

关键词 空气耦合超声换能器,多匹配层,压电复合材料

中图法分类号: TB552 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)01-0096-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.014

Multi-matching layer air-coupled piezocomposite ultrasonic transducer

BIAN Jiacong HU Wenxiang ZHOU Bamei

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract This paper describes our work on the numerical analysis, design, fabrication for air-coupled piezocomposite ultrasonic transducer employed in the NDT and imaging or materials characterization. The parameters of multi-matching layer and 1-3 connectivity composite are designed through numerical simulation technique in order to overcome the enormous impedance mismatch between air and piezoelectric element. Using complex piezoelectric equation, the thickness vibration equivalent circuit with an introducing attenuation for multi-matching layer air-coupled piezocomposite ultrasonic transducer is deduced, its equivalent admittance is then obtained to calculate the conductivity spectrum of this kind transducer. This spectrum is also calculated by finite element method. Both results are in good agreement. Based on these numerical results and parameters, the piezocomposite, multi-matching layer, and the air-coupled ultrasonic transducer are designed and fabricated. The experimental testing result of the conductivity spectrum for the transducer is agreed with the numerical results. The echo signal of the transducer and its frequency spectrum are further tested and analyzed. These results show that the transducer with a central frequency 160 kHz have fairly good sensitivity and frequency bandwidth, and the success on this development is also demonstrated by these results.

Key words Air-coupled ultrasonic transducer, Multi-matching layer, Piezocomposite

2017-11-01 收稿; 2017-12-01 定稿

*国家自然科学基金项目 (11374230, 11774264)

作者简介: 卞加聪 (1992-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向: 超声换能器与超声检测。

[†] 通讯作者 E-mail: wxhu@tongji.edu.cn

1 引言

对于超声材料表征、无损检测与成像问题,非接触检测方式由于其诸多的优点,得到越来越多的应用,特别是对某些特定材料和检测条件(如无法进行水和油耦合,或避免试样污染等条件)。目前主要的非接触超声无损检测手段包括电磁声换能器(EMATs)方式、激光超声、空气耦合超声换能器方式等。这些检测方式各有其优缺点,可根据具体使用条件选择。其中电磁声换能器的电磁声转换效率低,虽然可以非接触检测,但换能器与试样表面的距离要求极其近,否则其检测灵敏度很低,且只能检测金属材料,因此其应用范围明显受到限制。激光超声可以较为灵活进行非接触超声检测,但脉冲激光的激发可能导致试样表面的烧蚀损伤,对某些材料来说是避免的。此外,其设备系统相对较为庞大和昂贵。

随空气超声换能器的发展和进步,非接触的空气耦合超声检测目前受到越来越多的重视,并开始研究用于较多的领域,如铁路钢轨的在役检测、混凝土检测、材料参数表征等^[1-4]。非接触 NDT 在这些领域的应用有高速检测的需求,有避免接触检测方式污染试样,或表面无法有效耦合导致的问题,也有对传统检测方式效果改善的需求,如改善传统铁轨轮式换能器检测方式的缺点,以及提高检测速度等^[1-2]。由于上述电磁声换能器的弱点,以及纯激光超声技术或激光超声-空气声混合检测技术的一些缺点,纯空气声换能器或换能器阵技术越来越得到重视^[1-2]。

目前,空气耦合超声换能器主要有电容式与压电式两类。电容式换能器的制作虽易于与空气间进行声阻抗匹配,但对于超声频段换能器一方面要求底板与上层膜之间的空气间隙很小,更主要的是需要进行一些要求较高的微加工形成特定的结构,以使频率和带宽等满足要求。这是目前使用较多的一类空气声换能器^[5],但制作成本高,工艺设备比较昂贵。压电式空气耦合换能器实现的主要困难在于压电材料与空气之间严重的阻抗失配,如通常的 PZT 材料的特性阻抗可能大于 30 M Rayl,而空气则仅 425 Rayl 左右。按通常水浸式换能器匹配层的制作方式显然无法找到相应的材料,通过 1-2 个匹配层来解决阻抗失配问题并达到相应性能。解决的主要

途径之一是多匹配层方式。此外,为了降低 PZT 材料的特性阻抗,通常需要对其进行改造,如通过切割制成压电复合材料^[6-7]。多匹配层方式的实现虽看似在工艺上困难较小,但寻求或制作满足要求的各匹配层材料与工艺却往往十分困难。这也是目前及今后需要努力的方向。

本文采用厚度振动 Mason 等效电路解析分析计算有损耗的压电晶片与多匹配层系统等效导纳^[8],以此作为匹配层材料选择的依据。同时用有限元分析来确定复合压电材料的切割参数。在此基础上制作了 160 kHz 中心频率多匹配层空气超声换能器样品。导纳谱测试结果与计算较为吻合,进一步的回波测试结果显示带宽和灵敏度等结果也较为理想。本文结果为进一步的数百千赫兹到低兆赫兹频率空气耦合压电超声换能器的研制奠定了基础。

2 1-3型厚度振动压电复合材料的有限元分析

为了与空气介质很好匹配,采用复合压电陶瓷材料是一种有效途径。可以降低 PZT 材料的声阻抗、密度,增加其弹性柔顺性等。通常采用的 1-3 型复合材料,是由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基体中而构成的两相体。可采用对 PZT 材料切割后填充环氧树脂的方式实现。由于径向振动模式被破坏,其厚度模更纯,可以更好拓展带宽。因此,压电复合材料具有低阻抗、低 Q 值,较高机电耦合系数等优点。

本文使用 COMSOL Multiphysics 软件进行有限元分析。图 1 是 1-3 型压电复合材料结构示意图以及一个周期单元的 1/4 有限元模型和厚度振动模式,图 1(a) 和图 1(b) 中蓝色的是压电相,其余部分是聚合物相。由于 1-3 型压电复合材料具有周期性和对称性,只需建立一个周期单元的四分之一有限元模型来进行仿真,以节省计算时间^[6]。

本文所采用 PZT-4 压电陶瓷与环氧树脂两相体,有限元仿真给出的结果是当 PZT-4 压电相为总体积的 65%,所切割的压电相柱宽高比为 0.2 时,压电复合材料拥有较低的特性阻抗和更好的振动模式,因此用体积百分数为 65% 比例来进行进一步地仿真和研究。

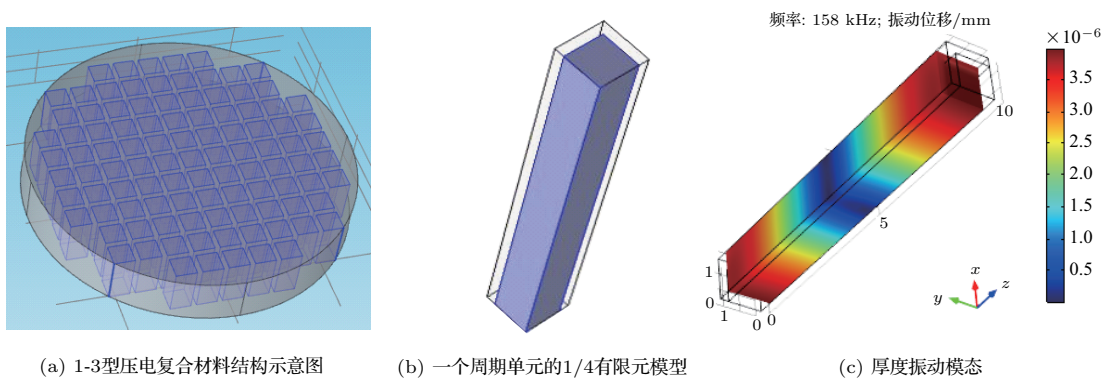


图1 1-3型压电复合材料结构示意图以及一个周期单元的1/4有限元模型和厚度振动模式
 Fig. 1 1-3 piezoelectric composite structure, finite element model of a quarter of element and the thickness vibration mode

进一步采用COMSOL固体力学模块对该1-3型压电复合材料一个周期的四分之一有限元模型进行模态分析,可获得复合材料的厚度共振频率和相应模态振型。由仿真结果可知,本文采用的复合材料厚度为10 mm,相应厚度共振频率为158 kHz。本文制作得到的复合压电材料的特性阻抗为15 Mrayl。

3 多匹配层时换能器等效导纳分析

由于复合压电材料与空气间的声阻抗仍严重失配,多匹配层结构是必要的。本文尝试设计了四层匹配层,初步获得较好效果。所得到的多匹配层复合压电换能器的静态特性如等效导纳谱等,可以采用等效电路,或有限元进行分析计算。其中的Mason等效电路分析和计算,采用复数压电方程^[8],导出考虑损耗的多匹配层压电复合材料厚度振动等效电路,其形式与不考虑损耗时是相同的。但由于此时弹性、介电与压电常数均为复数,相应的导

出参数如纵波声速、波数、机电转换系数、静电容等也为复数,由此计算的等效导纳更接近实际情况。

四匹配层换能器厚度振动的Mason等效电路可由推导给出,如图2所示。

等效电路参数及其意义分别说明如下:

$$\begin{aligned} Z_1 &= j\rho v S \tan(kt/2), \\ Z_2 &= \rho v S / (j \sin(kt)), \\ Z_{ia} &= j\rho_i v_i S_i \tan(k_i t_i / 2), \\ Z_{ib} &= \rho_i v_i S_i / (j \sin(k_i t_i)), \end{aligned} \quad (1)$$

$$(2)$$

其中, C_0 、 n 、 ρ 、 v 、 S 、 k 、 t 分别为晶片的静态电容、机电转换系数、密度、声速、横截面积、波数和厚度, ρ_i 、 v_i 、 S_i 、 k_i 、 t_i 分别为第*i*个匹配层的密度、声速、横截面积、波数和厚度。

自由振动时, $F_1 = F_2 = 0$, 等效电路可以化简如图3所示的形式。由此得到整个换能器的等效导纳为

$$Y = j\omega C_0 - \frac{1}{-1/j\omega C_0 + Z/n^2}. \quad (3)$$

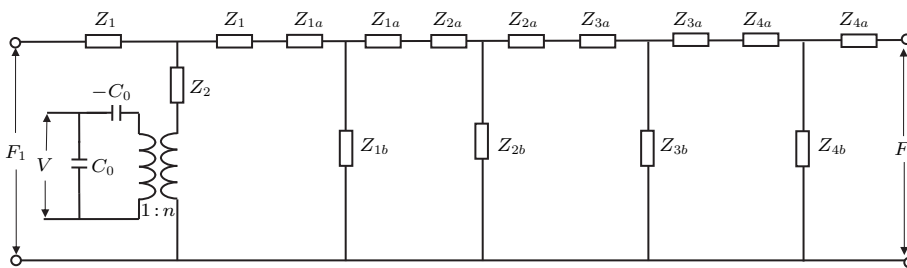


图2 四层匹配层换能器的等效电路

Fig. 2 Mason equivalent circuit for four matching layer transducer

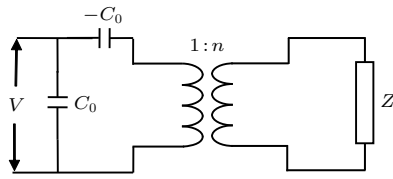
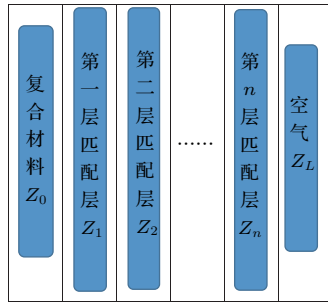


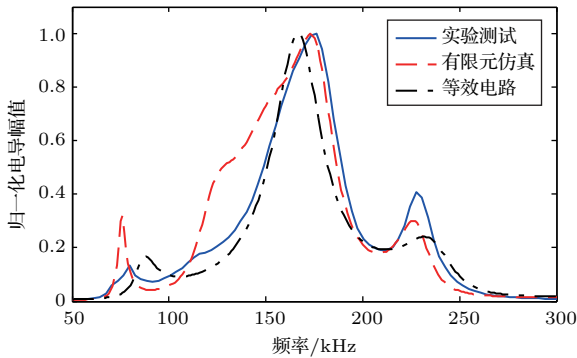
图3 四层匹配层换能器自由振动时的等效电路

Fig. 3 Free vibration equivalent circuit for four matching layer transducer

本文的有限元分析采用COMSOL中固体力学模块计算。图4给出了换能器结构与四匹配层压电复合材料等效电路计算、有限元分析与实测电导谱(WK6500精密阻抗分析仪测试结果)的比较。四个匹配层分别为环氧树脂加填料,环氧树脂,两种多孔材料,厚度分别采用1/4波长。



(a) 换能器结构



(b) 四匹配层压电复合材料电导谱: 等效电路-有限元计算-实测结果比较

图4 换能器结构与四匹配层压电复合材料换能器电导谱: 等效电路、有限元计算与实测结果比较

Fig. 4 The transducer structure and conductivity spectrum of four matching layer piezoelectric composite transducer: results comparison of the equivalent circuit, finite element, and experimental testing

4 换能器样品试制

根据仿真结果确定了压电复合材料的加工参数,并以此实施压电材料的切割与聚合物充填等加工过程。对完成加工的压电复合材料晶片进行了测

量,其共振频率为164 kHz(WK6500精密阻抗分析仪测试结果)。图5(a)为复合压电晶片样品,四匹配层压电复合材料换能器样品见图5(b)。



(a) 1-3型压电复合材料样品

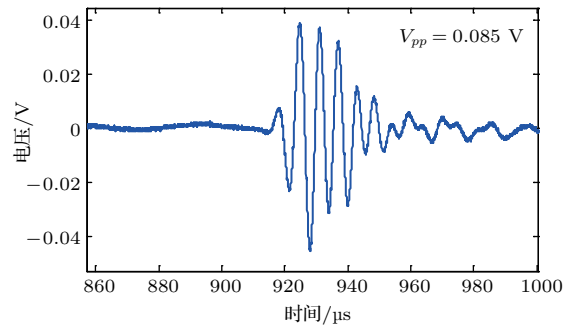
(b) 四匹配层压电复合材料换能器

图5 1-3复合压电片样品与四匹配层压电复合材料换能器

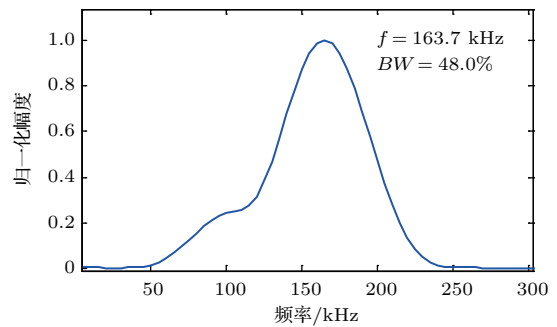
Fig. 5 The sample of 1-3 connectivity piezoelectric composite material and four matching layer piezoelectric composite transducer

5 空气耦合1-3型复合材料压电超声换能器回波信号的测试

进一步进行了以平面钢块为反射体的换能器脉冲回波方式的空气耦合测试。所使用的信号源为Panametrics 5077PR、示波器为Tektronix 3032。



(a) 换能器回波信号图



(b) 回波信号频谱图

图6 空气耦合超声换能器回波信号和频谱分析图 Fig. 6 Echo signal and spectrum of the air coupling ultrasonic transducer

换能器距离钢块 14 cm(回波双向 28 cm),所施加的脉冲电压为 200 V。测试结果及其回波谱如图 6 所示,其中心频率为 163.7 kHz, -6 dB 相对带宽约为 48.0%。

6 结论

为解决压电材料与空气间巨大的阻抗失配问题,研制空气耦合无损检测压电超声换能器,通过仿真计算设计了多匹配层结构和压电复合材料。先通过 COMSOL Multiphysics 有限元软件对 1-3 型压电复合材料的切割参数进行了仿真计算,研究不同陶瓷相体积比时 1-3 型压电复合材料的等效参数的变化以及其压电柱宽/高比变化时,复合压电片的振动模式特性,优化确定了复合材料加工参数与频率参数。进一步采用厚度振动 Mason 等效电路解析分析计算有损耗的压电晶片与多匹配层系统等效导纳,由此计算换能器的电导谱。该结果与有限元计算得到的电导谱吻合较好。在此基础上制作了空气耦合换能器,实测电导谱与数值仿真结果有较好一致性。换能器的回波及频谱测试结果显示,所研制的 160 kHz 空气耦合压电换能器带宽与灵敏度较为理想。说明该换能器的研制是成功的。该工作也为数百千赫兹与低兆赫兹的空气耦合换能器的研

制奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Mariani S, Nguyen T, Phillips R R, et al. Noncontact ultrasonic guided wave inspection of rails[J]. *Structural Health Monitoring*, 2013, 12(5/6): 539-548.
- [2] Mariani S, Nguyen T, Zhu X, et al. Field test performance of noncontact ultrasonic rail inspection system[J]. *J. Transp. Eng., Part A: Systems*, 2017, 143(5): 04017007.
- [3] Berriman J R, Hutchins D A, Neild A, et al. The application of time-frequency analysis to the air-coupled ultrasonic testing of concrete[J]. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 2006, 53(4): 768-776.
- [4] Álvarez-Arenas G T E, Sancho-Knapik D, Peguero-Pina J J, et al. Noncontact and noninvasive study of plant leaves using air-coupled ultrasounds[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(19): 208-268.
- [5] Chimenti D E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7): 1804-1816.
- [6] Hayward G, Bennett J. Assessing the influence of pillar aspect ratio on the behavior of 1-3 connectivity[J]. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 1996, 43(1): 98-108.
- [7] Smith W A, Auld B A. Modeling 1-3 composite piezoelectrics thickness-mode oscillation[J]. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 1991, 38(1): 40-47.
- [8] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.