

铁电驻极体空气耦合声换能器的研制

童立坤¹, 项延训¹, 邓明晰², 邱勋林³

(1. 华东理工大学, 上海 200237; 2. 重庆后勤工程学院, 重庆 401331; 3. 波茨坦大学物理和天文系, 波茨坦 14476)

摘要: 基于多孔聚丙烯铁电驻极体薄膜系统研制了平面型和球型聚焦空气耦合超声波换能器。平面型换能器孔径为 20 mm, 两个球型聚焦换能器的孔径和焦距分别为 20 mm 和 35 mm、30 mm 和 40 mm。使用激光干涉仪测得了三个换能器作为发射器工作时的带宽和谐振频率, 并且将在脉冲回波模式下测得的换能器作为接收机工作时的响应与激光干涉仪测试结果进行比较。最后选择孔径为 20 mm 的球型聚焦换能器, 在脉冲回波模式下对不同直径孔的聚乙烯阶梯楔进行扫描成像。

关键词: 空气耦合超声; 多孔聚丙烯铁电驻极体; 换能器

中图分类号: TB552

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-05-0507-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.05.017

Development of EMFi-based air-coupled ultrasonic transducer

TONG Li-kun¹, XIANG Yan-xun¹, DENG Ming-xi², QIU Xun-lin³

(1. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Logistics Engineering University, Chongqing 401331, China; 3. Department of Physics and Astronomy, University of Potsdam, Potsdam 14476, Germany)

Abstract: The planar and spherically focused air-coupled ultrasonic transducers are developed based on electrical mechanical film (EMFi) system, which contains two-sided Al electrodes and cellular polypropylene (cPP) ferroelectret films. Three transducers are fabricated and tested. The planar one has a diameter of 20 mm. One of the spherically focused transducers has an aperture of 20 mm and a focal length of 35 mm; another has an aperture of 30 mm and a focal length of 40 mm. The bandwidth and resonance frequency of the transducer as a transmitter are obtained by using laser interferometer. As a receiver, the pulse-echo response of the transducer is compared with the results of laser interferometer test. Finally, the spherically focused transducer of 20 mm aperture is selected to scan the polyethylene (PE) ladder wedge with different diameter holes in pulse-echo mode.

Key words: air-coupled ultrasonic; cellular polypropylene ferroelectret; transducers

0 引言

近年来, 空气耦合超声(Air-Coupled Ultrasonic, ACU)技术已经被广泛应用于工业材料研究开发以及非破坏性测试中^[1-5]。空气作为唯一的耦合介质, 不需要对材料和环境条件进行任何额外处理, 并且配合适当的夹具和平台可以实现自动化测试。然而, 空气和换能器、空气和被测材料之间的非常高的阻抗失配会导致超声信号能量的极大衰减^[1]。目前, 这个问题一般通过在换能器前端添加匹配层构成复合换能器来解决。但匹配层的材料需要根据被检对象的特性来进行计算选择, 而且制作工艺较为复杂^[3], 这使得匹配层的推广和使用受到了

限制。

为了克服以上的问题, 人们提出了一些新的压电材料用来制造空耦合换能器。其中最有可能的是铁电驻极体薄膜(Electrical Mechanical Film, EMFi)^[6], 其特征在于材料本身具有很强的压电响应、柔性和极低的声阻抗。目前国际上研究较多的是一种名为多孔聚丙烯(cellular Polypropylene, cPP)的 EMFi, 性能参数见表 1^[7]。

表 1 压电材料参数对比
Table 1 Comparison of piezoelectric materials' parameters

材料	EMFi (cPP)	PZT	PVDF
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	330	4 000~8 000	1780
准静态压电系数 $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	25~700	70~600	20~25
声速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	85	4 000~6 000	2 200
声阻抗 $Z(\text{MRayl})$	0.028	25~37	3.9

注: 声阻抗单位: 1 MRayl=1 kg·(m²·s)⁻¹

EMFi 材料的声速小、密度低, 导致声阻抗非常低, 相比于锆钛酸铅、聚偏二氟乙烯, 可以更好

收稿日期: 2018-01-26; 修回日期: 2018-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11474093)

作者简介: 童立坤(1991-), 男, 安徽宣城人, 硕士研究生, 研究方向为超声检测。

通讯作者: 项延训, E-mail: yxxiang@ecust.edu.cn

地与空气(声阻抗 $Z \approx 0.0004 \text{ MRayl}$)实现匹配。目前,EMFi 已被用于构建声学、振动换能器^[2-6],例如扬声器和麦克风、生理传感器^[8]、键盘^[9]、位置力传感器^[9]等。此外,EMFi 材料的宽带频率响应使其非常适合作为超声波传感器用于范围测量^[10]、局部定位系统、蝙蝠研究^[11]、超声成像等应用。已有的研究^[12-13]发现,压电驻极体在工作时表现出的类似理想活塞的声源的特征也使其非常适合用于开发自定义尺寸和形状的超声换能器。

本文基于 EMFi(cPP)系统开发、制作和表征了平面型、球型聚焦空气耦合超声换能器。该 EMFi(cPP)系统包含了双面 Al 电极,成本极低。然后,我们在不同实验条件下对不同性能设计参数的换能器的性能从以下 4 个方面做了研究:

- (1) 驻极体薄膜在背衬上的固定方式;
- (2) 以薄膜为振动元件的换能器频率响应特性;
- (3) 球型聚焦换能器的焦距;
- (4) 换能器的成像性能。

1 换能器制作

如图 1 所示是基于 EMFi(cPP)制作的三只空气耦合超声换能器,从右往左为平面型换能器 P2,球型聚焦换能器 F1、F2。每个换能器包括 7 个可更换的组件: BNC 接头、绝缘体、黄铜背衬、导电胶、氟聚合物驻极体薄膜、铝外壳和顶盖。换能器几何参数和薄膜压电系数见表 2。



图 1 空气耦合超声换能器

Fig.1 Picture of air-coupled ultrasonic transducers

表 2 换能器设计参数

Table 2 Design parameters of transducers

探头形式	探头编号	EMFi (cPP)- $d_{33}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	孔径/mm
平面型	P2	205	20
球型聚焦	F1	205	20
	F2	205	30

虽然球型聚焦换能器比平面型换能器的制作难度要大很多,但在许多情况下,球形聚焦换能

器相对于平面型换能器可以提高分辨率^[13]。在理想情况下,超声成像系统的分辨率是受超声衍射限制的^[12],而空气中相对低的声速(约 $343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)导致波长比在常见的液体和固体中更短,因此聚焦超声在空气中可以在较低频率下提供较好的空间分辨率。例如,频率为 300 kHz 的超声波信号在空气中的波长约为 1.14 mm ,在水中为 4.98 mm 。球型换能器的聚焦区域的宽度通常为波长 λ 的数量级^[12]。

平面型换能器的薄膜和背衬之间不添加任何粘合剂,仅仅是膜的边缘被机械夹持在背衬上,且不对膜施加张力,但尽量保证平整度。

对于球型聚焦换能器,为了实现自聚焦,我们使用了一个球型、刚性黄铜背板作为背衬,并使用导电胶带作为膜和背板之间的粘合剂。相比于环氧树脂导电胶,使用双面导电胶带可以提供更均匀的支撑表面,使薄膜更容易获得均匀的厚度方向振动模式。

2 实验测试

2.1 频率响应测试

图 2 为使用迈克尔逊激光干涉仪获得的三种换能器作为激发器、在 $100 \text{ V}_{\text{pp}}$ 电压激发下换能器薄膜中心单点的频率响应曲线,具体性能参数见表 3。

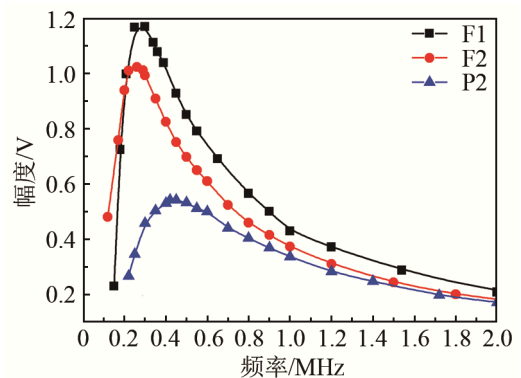


图 2 激光干涉仪测量的换能器频率响应曲线

Fig.2 Frequency response curves of transducers measured by laser interferometer

表 3 换能器性能参数

Table 3 Performance parameters of transducers

探头编号	频带区间/MHz		频带/MHz	中心频率/MHz
	下限	上限		
P2	0.24	1.06	0.82	0.42
F1	0.17	0.70	0.53	0.28
F2	0.14	0.65	0.51	0.26

以幅值下降一半作为标定带宽的标准,对比图

2 频响曲线可以发现，P2 的带宽和中心频率高于 F1、F2，这是因为在 F1、F2 中 EMFi 与背衬间用导电胶带粘合较为紧密，从而导致了带宽和中心频率的降低。这同样也可以解释在 100 V 激发电压下，P2 的振动幅值要明显低于 F1(两者孔径相同)和 F2。相较于 P2 只是将薄膜的周边机械夹持在夹具上，F1、F2 由于导电胶的存在使薄膜可以更加均匀、直接地受到电压刺激，激发的振动幅值较大。

2.2 激发电压与振动幅值

以 P2 为例，图 3 是使用迈克尔激光干涉仪获得的在 50~400 V 电压激发下换能器中心单点振动幅值。

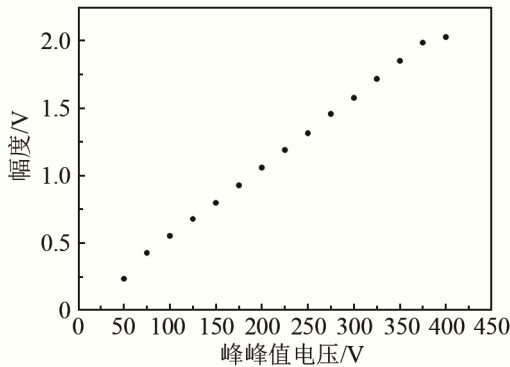


图 3 激光干涉仪测量的激发电压对信号幅值的影响
Fig.3 The influence of excitation voltage on signal amplitude measured by laser interferometer

可以发现，在 50~400 V 范围内，单点振幅与激发电压有着良好的线性关系，F1、F2 与之类似，这与已有文献的报道相同^[10]。

2.3 换能器焦距测试

在脉冲回波模式下，分别在 F1、F2 各自对应的中心频率下，激发 5 个周期的、附加汉宁窗的正弦脉冲信号。以表面抛光的光滑铝块作为反射块，测试回波信号强度随换能器薄膜中心至反射铝块距离的增加而发生的变化，从而确定换能器的焦距。实验过程中注意保持铝块与换能器激发面平行和对齐，而且作为反射块的铝块表面必须保证光滑，否则回波信号强度会受到很大影响。

图 4 为 F1 在脉冲回波模式下测得的经过滤波的信号。由图 4 可以看出信噪比极高，但遗憾的是实际回波信号的幅值却很小(10 mV 以下)。

图 5、6 分别是在脉冲回波模式下 F1(孔径 20 mm)、F2(孔径 30 mm)回波信号的幅值随激发-接收距离变化测试的结果，F1、F2 焦距分别为距薄膜中心 35~38 mm、38~43 mm。这说明 EMFi 聚焦换能器焦距与换能器的孔径大小有关。

2.4 成像测试

图 7 为使用 F1 聚焦换能器在脉冲回波模式下一系列不同直径孔的聚乙烯阶梯楔块在 X、Y 方向上扫描成像的原始结果，扫描的空间分辨率为 1 mm×1 mm。

根据扫描图像的结果，可以发现，该换能器有一定的灵敏度，对于直径在 2 mm 以上的孔基本可以识别，孔边缘不是很明显，这除了换能器本身分辨率的原因外，也和扫描时的空间分辨率较大有关。

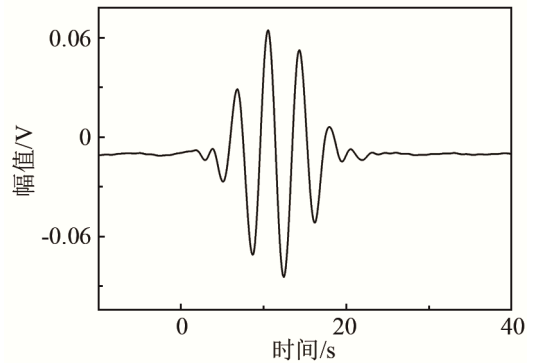


图 4 F1 换能器的脉冲回波响应
Fig.4 The pulse-echo response of F1 transducer

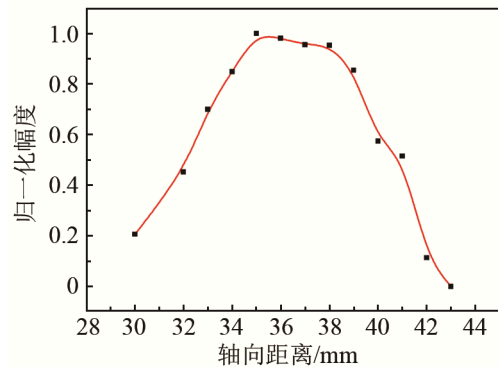


图 5 F1 换能器的聚焦区域
Fig.5 The focus area of F1 transducer

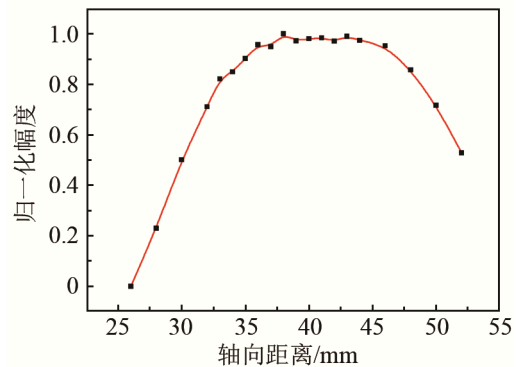


图 6 F2 换能器的聚焦区域
Fig.6 The focus area of F2 transducer

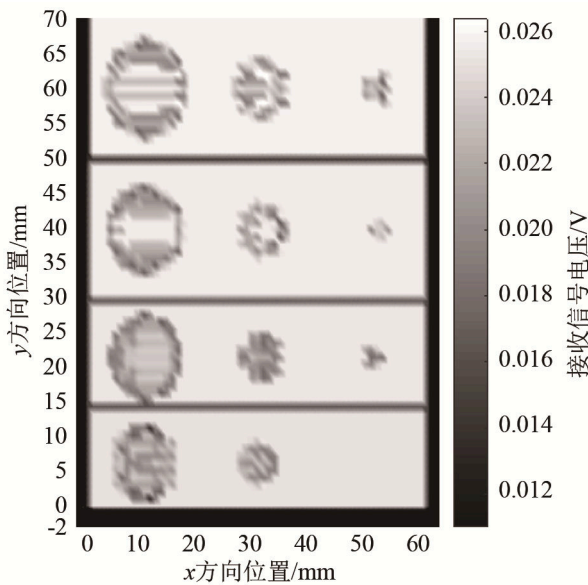


图7 使用 F1 换能器对不同直径孔的聚乙烯梯楔的扫描成像结果
Fig.7 Images of the polyethylene (PE) ladder wedge with different diameter holes scanned by F1 transducer

3 结 论

基于氟聚合物铁电驻极体开发的 EMFi(cPP)换能器目前只是原型。尽管换能器的结构简单，没有添加匹配层和匹配电路，但空气耦合超声实验中证明了该换能器的宽带特性以及较好的成像分辨率，这表明 EMFi 铁电驻极体是一种在非接触式超声波成像和测试方面有着应用前景的材料。

参 考 文 献

- [1] SECO F, EALO J L, JIMÉNEZ A R, et al. Modulation and codification of ultrasonic signals with EMFI transducers[C]//2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2009.
- [2] GAAL M, BARTUSCH J, SCHADOW F, et al. Airborne ultrasonic systems for one-sided inspection using thermoacoustic transmitters[C]//2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2016.
- [3] RUPITSCH S J, LERCH R, STROBEL J, et al. Ultrasound transducers based on ferroelectret materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 69-80.
- [4] ROBERTSON T J, HUTCHINS D A, BILLSON D R. Capacitive air-coupled cylindrical transducers for ultrasonic imaging applications[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(5): 758.
- [5] ROBERTSON T J, HUTCHINS D A, BILLSON D R, et al. Surface metrology using reflected ultrasonic signals in air[J]. Ultrasonics, 2002, 39(7): 479-486.
- [6] ZHONG Q, ZHONG J, CHENG X, et al. Paper-Based Active Tactile Sensor Array[J]. Advanced materials, 2015, 27(44): 7130-7136.
- [7] DÖRING J, BOVTUN V, BARTUSCH J, et al. Cellular Polypropylene Ferroelectret Film: Piezoelectric Material for Non-contact Ultrasonic Transducers[C]//17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008.
- [8] WU N, CHENG X, ZHONG Q, et al. Cellular Polypropylene Piezoelectret for Human Body Energy Harvesting and Health Monitoring[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(30): 4788-4794.
- [9] MEDEIROS L J, BASSO H C, ALTAFFIM RAC, et al. Multi-layer piezoelectret hydrophone for ultrasonic applications[C]//Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International. IEEE, 2012: 1-4.
- [10] JIMENEZ A, HERNANDEZ A, URENA J, et al. EMFi-based ultrasonic transducer for robotics applications[J]. Sensors and Actuators a-Physical, 2008, 148(1): 342-349.
- [11] STREICHER A, KALTENBACHER M, LERCH R, et al. Broadband EMFi ultrasonic transducer for bat research[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.
- [12] EALO J L, SECO F, JIMENEZ A R. Broadband EMFi-based transducers for ultrasonic air applications[J]. Ieee Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control, 2008, 55(4): 919-929.
- [13] SONG J, CHIMENTI D E. Design, fabrication and characterization of a spherically focused capacitive air-coupled ultrasonic transducer[J]. International Journal of Applied Science and Engineering, 2006, 4(1): 1-19.