

20 MHz 超声聚焦换能器的设计及其应用

连红运^{1,2}, 齐 峥³, 王书双²

1. 河南职业技术学院机械电子工程系, 郑州 450046
2. 清华大学机械工程系, 北京 100084
3. 郑州市联通公司运行维护部, 郑州 450000

摘要 为提高工业超声显微镜的成像分辨率, 需要用高灵敏度的超声聚焦换能器。本文对研制的聚焦换能器的等效电路进行了理论分析, 利用 Matlab 软件, 数值模拟了聚焦换能器沿轴线方向辐射的脉冲聚焦声场, 讨论了聚焦换能器的脉冲声场特性。采用特殊工艺研制压电晶片, 用环氧树脂和钨粉的混合物作背衬, 由此研制的主频为 20 MHz 宽带窄脉冲有源自聚焦换能器, 在实际检测中回波仅有一个波形, 缺陷的成像分辨率达 0.4 mm。

关键词 超声显微镜; 聚焦换能器; 聚焦声场; 压电晶片; 成像分辨率

中图分类号 TP157

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)02-0066-04

Design and Applications of 20 MHz Ultrasonic Focused Transducer

LIAN Hongyun^{1,2}, QI Zheng³, WANG Shushuang²

1. Department of Mechanical & Electronic Engineering, Henan Technical College, Zhengzhou 450046, China
2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Department of Operation & Maintenance, Zhengzhou City Unicom, Zhengzhou 450000, China

Abstract High sensitivity transducers are essential in improving the image resolution of industrial ultrasonic microscopes. The equivalent circuits of the ultrasonic focused transducer are analysed by Mason's equivalent circuit, the pulse focused sound fields are simulated with Matlab in the direction of the focused transducer axis, and the results are compared with the sound fields of circle flat transducer. The transducing piezoid is developed with special technologies, and with the mixture of epoxide and tungsten powder for backing, the ultrasonic transducers enjoy good qualities of narrow pulse, higher sensitivity, higher resolution, among others. In applications, the returning wave of broadband narrow pulse focused transducer (with center frequency of 20 MHz) is merely of one waveform and the image resolution for flaws in testing multi-layer composite materials reaches up to 0.4 mm.

Keywords ultrasonic microscope; focused transducer; focused

sound fields; piezoelectric chip; image resolution

0 引言

超声换能器具有发射/接收超声波信息的功能, 是进行能量转换的器件^[1-3]。由于检测对象为层状非均匀介质复合材料, 对超声波的衰减较大, 因此, 要求超声波具有较强的穿透性; 此外, 多层散射使得超声波在穿过试件时产生多种回波, 需要用高灵敏度检测用换能器才能把缺陷与噪声 (非缺陷回波) 区分开来; 对小缺陷的检测需要高分辨力, 高分辨力意味着使用高频率的波, 而频率越高, 超声波在复合材料中的衰减越严重, 普通商用换能器无法完成检测。只有使用窄脉冲、高灵敏度和高分辨力的换能器才能使超声波穿透复合材料, 从而了解缺陷和组织的细微状态, 完成其内部结构的评价。

本文针对作者所设计的工业超声显微镜成像系统, 研制了主频为 20 MHz 水浸式有源自聚焦发/收超声换能器。

1 压电换能器的等效电路

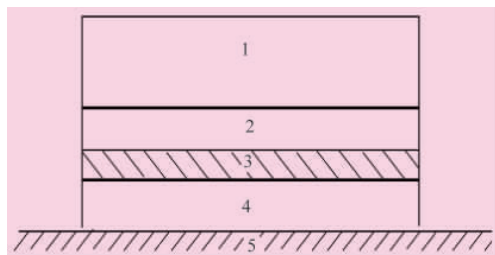
换能器的设计采用 Mason 等效电路法^[1-5]。Mason 等效电路通过傅里叶变换, 可计算在脉冲电声作用下脉冲声波入射时的输出电压^[6-7]。超声换能器的典型结构如图 1 所示, 其作为发射时的 Mason 等效电路如图 2 所示。

图 2 中, $Z_{ia} = \rho_i v_i \tanh(k'_i l_i / 2)$, $Z_{ib} = \rho_i v_i S / \sinh(k'_i l_i)$ (其中 $i=2, 3, 4$), $Z_1 = \rho_1 v_1 S$, $Z_5 = \rho_5 v_5 S$, S 为晶片的有效辐射面积, ρ_i 、 v_i 、 l_i 分别为各层的密度、声速和厚度, $k'_i = k_i(j+1/(2Q_i))$, $k_i = \omega/v$, Q_i 为材料的机械值。

若取

收稿日期: 2008-10-20

作者简介: 连红运, 副教授, 研究方向为无损检测、材料评估, 电子信箱: lianhy03@126.com



1—背衬吸收块;2—背衬匹配层;3—压电片;4—保护膜;5—负载

图 1 换能器结构示意图

Fig. 1 Sketch of a transducer

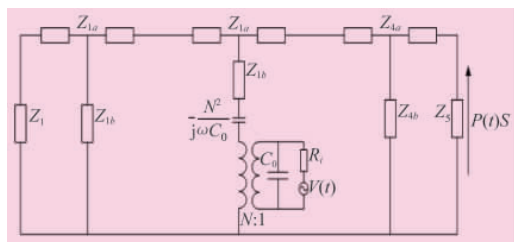


图 2 发射等效电路图

Fig. 2 Transmission equivalent circuit

$$\begin{aligned} z_1 &= [n^2 R_l / (1 + j\omega C_0 R_l)] - (n^2 / j\omega C_0) + Z_{1a} \\ z_2 &= Z_{2a} + [Z_{2b}(Z_{2a} + Z_1) / (Z_{2b} + Z_{2a} + Z_1)] + Z_{3a} \\ z_3 &= Z_{3a} + Z_{4a} \\ z_4 &= Z_{4b} \\ z_5 &= Z_{4a} + Z_5 \end{aligned} \quad (1)$$

则换能器发射声波频响为

$$P(\omega) = \frac{nF[v_s(t)]Z_5}{(1 + j\omega C_0 R_l)[\alpha_3 z_2 + (\alpha_1 + \alpha_3)z_1]S} \quad (2)$$

式中, $a_1 = 1 + z_1/z_4$, $a_3 = (a_1 z_3 + z_5)/z_2$, 故声压脉冲频响为

$$P(t) = F^{-1}[P(\omega)] \quad (3)$$

当换能器作为接收时的等效电路如图 3 所示。

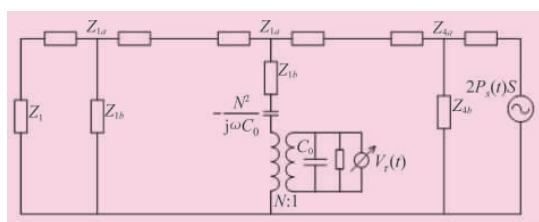


图 3 接收等效电路图

Fig. 3 Receiver equivalent circuit

其接收输出电压频响为

$$V_r(\omega) = \frac{2nSR'_l F[P_s(t)]}{(1 + j\omega C_0 R'_l)[\alpha'_3 z'_4 + (\alpha'_1 + \alpha'_3)z'_5]} \quad (4)$$

式中 R'_l 是接收换能器的输入阻抗, $z'_5 = z_5 - Z_5 = z_{4a}$, $\alpha'_1 = 1 + z_1/z_2$, $\alpha'_3 = (a'_1 z_3 + z_1)/z_4$, 所以电压脉冲响应为

$$V_r(t) = F^{-1}[V_r(\omega)] \quad (5)$$

如果换能器工作在既发又收状态, 则其示意图如图 4 所示。

其输出电压频响为

$$V_{sr}(\omega) = \frac{2n^2 Z_{sr} e^{-2\beta l} R'_l F[V_s(t)]}{(1 + j\omega C_0 R_l)(1 + j\omega C_0 R'_l)[\alpha_3 z_2 + (\alpha_1 + \alpha_3)z_1][\alpha'_3 z'_4 + (\alpha'_1 + \alpha'_3)z'_5]} \quad (6)$$

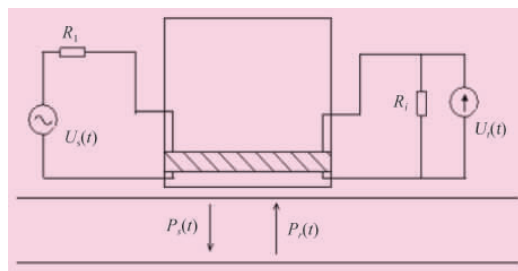


图 4 既发又收状态示意图

Fig. 4 Sketch of transmission/receiver

电压脉冲响应为

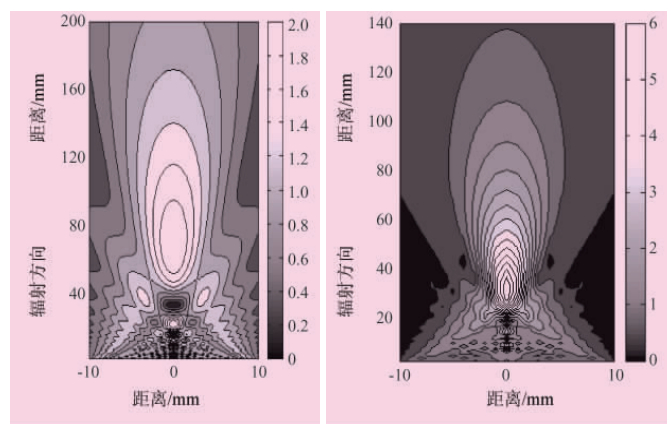
$$V_{sr}(t) = F^{-1}[V_{sr}(\omega)] \quad (7)$$

式中, l 是负载厚度, τ 是底面的反射系数, β 是介质内的传播衰减系数, 且 $P_r = P_s \tau e^{-2\beta l}$ 。

设计中所使用的压电片的厚度和径向的机电耦合都较弱, 且片厚远小于直径, 故符合纯厚度模式振动或纯径向模式振动一维问题的近似条件^[8]。

2 超声换能器的声场数值模拟

为优化设计, 用 Matlab 辛普森 (Simpson) 二阶积分算法对设计的球形聚焦换能器沿轴向辐射的声强分布进行数值模拟, 并对圆形平面换能器辐射声场进行数值模拟比较, 为了便于比较大小, 对声压 p 进行归一化, 如图 5 所示。图 6 为不同换能器轴线的声压幅值曲线, 除声压幅值外其他坐标单位均为 mm。



(a) 圆形平面换能器

(b) 球形聚焦换能器声场分布图

(a) Circle flat transducer

(b) Spherical focusing transducer

图 5 换能器声场分布图

Fig. 5 Transducer sound fields

换能器的振动频率 $f = 20$ MHz, 介质为水, 声速 $c = 1.5 \times 10^3$ m/s, 则辐射声波波长 $\lambda = 0.075$ mm。球形聚焦换能器的曲率半径 $R = 15$ mm, 横向半径 $a = 8$ mm; 圆形平面换能器的半径 $a = 8$ mm。

由图 6(b) 可以看出聚焦换能器的聚焦特性: 在凹球面的球心内侧, 即远场与近场的交界处有明显的声场幅值隆起; 当聚焦换能器的横向半径增大时, 轴向声强分布最大点的位置

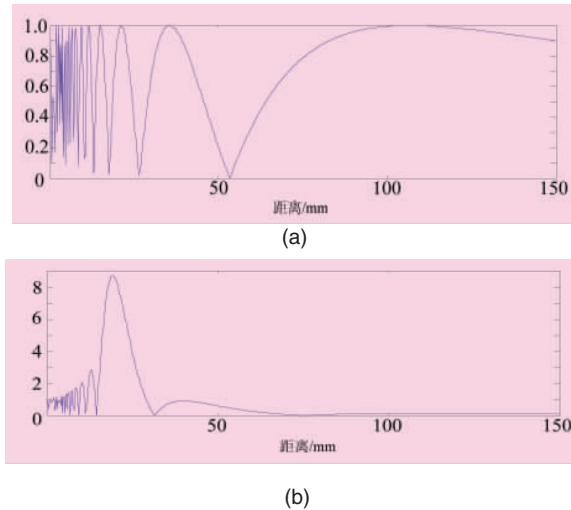


图6 圆形平面换能器(a)和球面聚焦换能器(b)轴线上的声压幅值曲线

Fig. 6 Sound pressure curve of circle flat transducer and spherical focusing transducer along axis

置向换能器所在球面的球心靠拢;当横向半径较小时,则移近曲率半径的中点;当横向半径一定时,随着曲率半径减小,轴向声强分布的最大点向球面移动;若曲率半径增大,则声强分布的最大点向球心靠近,直至 $R \rightarrow \infty$ 时,得出圆形平面换能器幅值沿轴向的分布曲线。

3 换能器的设计与制作

设计时将超声换能器作为一个三端网络来对待^[3,9],压电晶片选用钛酸铅(PbTiO_3),其基本参数为:密度 $\rho=7.6 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$;压电常数 $d_{33}=51$;介电常数 $\varepsilon_{33}^s/\varepsilon_0=140$;纵波声速 $C_l=4300 \text{ m/s}$;机电耦合系数 $k_t=0.46$;机械品质因数 $Q_m=1050$;电学品质因数 $Q_e=300$;居里温度点 $T_c=490$ 。其压电晶片厚度 d 为

$$d=\frac{\lambda}{2}=\frac{c}{2f} \quad (8)$$

式中 c 是压电晶片的纵波声速, f 是换能器的设计频率。

经过分析计算,确定了聚焦换能器的压电陶瓷外形尺寸,见表1。

表1 压电晶片参数表 Table 1 Piezoelectric chip parameters	
项目	数值
中心频率/MHz	20
厚度/mm	0.108
曲率半径/mm	15
横向半径/mm	8

将压电元件直接制作成球面的形状,此时换能器的几何焦距就是压电元件的曲率半径^[3],即

$$F=R \quad (9)$$

超声换能器的结构如图7所示。换能器的背衬材料是环氧树脂

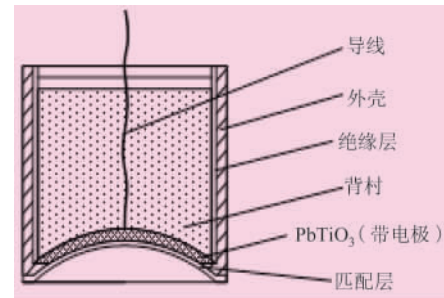


图7 超声换能器结构图

Fig. 7 Ultrasonic transducer structure

脂+钨粉,换能器的外壳材料是铜,绝缘层是有机玻璃。

3.1 声学阻抗匹配

由于工艺上的需要,采用单层阻抗匹配^[6]。匹配层的声阻抗为

$$Z_p=\sqrt[3]{Z_1Z_2^2} \quad (10)$$

其中, Z_p 是匹配层的声阻抗; Z_1 是压电元件的声阻抗; Z_2 是水的声阻抗。

钛酸铅的声阻抗为 $34 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$,而水的声阻抗为 $1.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$ 。从理论上计算可知,选用的匹配层声阻抗大小 $4.25 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$ 。

3.2 电学阻抗匹配

为了提高超声换能器的灵敏度和带宽,需要使它的电学端口与发射电路相匹配^[10-11]。当超声换能器工作在谐振频率附近时,其等效电路如图8所示。其中 C_0 是超声换能器的静态电容, R_m 、 C_m 、 L_m 分别是超声换能器的等效电阻、等效电容和等效电感,它们组成了超声换能器等效电路中的动态支路。当超声换能器处于机械谐振状态时,它的动态支路仅剩下电阻分量,此时可等效成静态电容和机械电阻的并联,对外呈现容性状态,所以需要与超声换能器并联一个电感元件来调谐。外加电感应满足

$$L=\frac{1}{\omega_0^2 C_0}=\frac{d}{\omega_0^2 \varepsilon S} \quad (11)$$

式中, ω_0 是换能器的共振角频率; d 是压电元件的厚度; S 是压电元件的有效表面积。

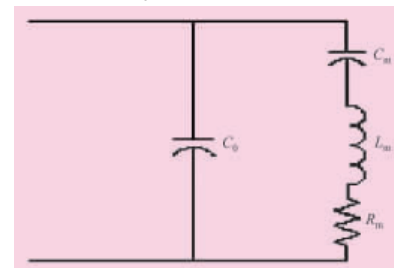


图8 超声换能器工作在谐振频率附近的等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit of ultrasonic transducer at resonance frequency

4 换能器的性能测试

用研制的20 MHz超声换能器在水中检测铝板,表面一次

回波波形如图 9 所示。从波形图上可以看出,回波几乎只有一个周期,且一次回波峰峰值很高,性能优良,达到了宽带窄脉冲的设计要求,能有效地用于超声显微镜成像系统。由于背衬以及匹配层的影响,换能器的中心频率略低于 20 MHz。

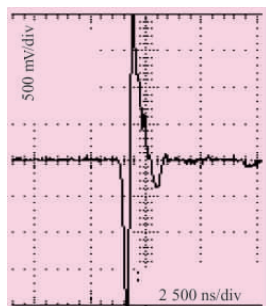


图 9 20 MHz 探头的延迟块底面回波放大图
Fig. 9 Backward wave amplifier graph of 20 MHz probe on delay block

5 换能器在超声成像中的应用

样品为层状薄板如图 10(a),其厚度是 2 mm,板中有两个结合层,距上表面分别为 0.6 mm 和 1.4 mm。板中存在的主要缺陷是分层,该缺陷可能发生在上、下结合层处,要求检测分层并给出分层的深度。针对该检测要求,制作的样品中包含有 3 个上表面分层和 3 个下表面分层缺陷,最小的缺陷直径是 $\phi 1.2$ mm。采用研制的换能器,设置扫描尺寸为 100 mm $\times$ 20 mm,扫描速度 50 mm/s,扫描间距 0.2 mm,检测结果如图 10(b)所示。

由图 10(b)的人工样品深度图像可知,大片正常的上表面回波信号幅值较高,其间可以非常清楚地看到 6 个等间距的缺陷,红色缺陷表示上结合层缺陷,黄色缺陷表示下结合层缺陷,绿色背景表示底波的深度,除 6 个等间距缺陷外,还有几个较小的斑点,经仔细检查确认为材料加工过程中造成

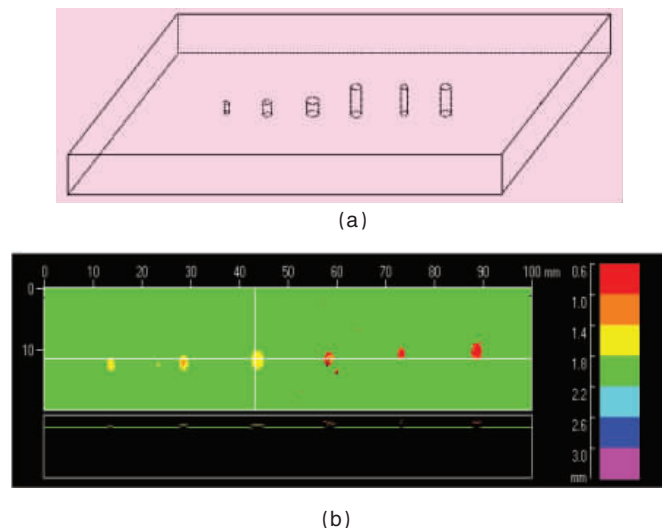


图 10 人工样品缺陷示意图(a)和检测结果(b)
Fig. 10 Sketch of sample with defects (a) and testing results (b)

的表面缺陷。

由以上检测结果可知,所研制的超声显微镜成像检测系统的检测分辨率可达 0.4 mm,能够对样品进行无损检测,并且检测结果正确地反映了样品的各种缺陷信息。

6 结论

超声换能器是超声显微镜成像检测系统最重要的一个组成部分,因此设计高性能的超声换能器是提高整个检测系统精度的关键,针对检测特殊复合层状薄板而设计的 20 MHz 水浸式自聚焦有源既发又收超声换能器,用 Mason 等效电路法进行了理论分析,用 Matlab 对圆形平面换能器和球面聚焦换能器的模拟声场分布进行了比较,介绍了其设计和制作工艺,其回波仅有一个波形,使超声显微镜成像检测系统可检测出达 0.4 mm 当量的缺陷,并且已成功应用于某工业领域。

参考文献 (References)

- [1] Cannata J M, Ritter T A, Silverman R H, et al. Design of efficient, broadband single-element(20~80MHz) ultrasonic transducers for medical imaging applications[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2003, 50(11): 1548-1557.
- [2] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 109-132,139-162.
- [3] Ying Chongfu. Ultrasonics [M]. Beijing: Science Press, 1990: 109-132, 139-162.
- [4] 张福学, 王丽坤. 现代压电学中册[M]. 北京: 科学出版社, 2002:67.
- [5] Zhang Fuxue, Wang Likun. Modern piezoelectrics [M]. Vol.2, Beijing: Science Press, 2002: 67.
- [6] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科技出版社, 2003: 207-262.
- [7] Lin Shuyu. Principle and design of ultrasonic transducer [M]. Beijing: Science & Technology Press, 2003: 207-262.
- [8] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 371-387.
- [9] Li Jiawei, Chen Jimao. NDT manual [M]. Beijing: Mechanical & Industry Press, 2004: 371-387.
- [10] 诸国桢, 杨勇, 卢克安. 10 MHz 短脉冲超声聚焦换能器的工艺及效果 [J]. *声学技术*, 2001, 20(3): 122-124.
- [11] Zhu Guozhen, Yang Yong, Lu Kean. *Technical Acoustics*, 2001, 20(3): 122-124.
- [12] 陈以方, 骆魏, 陈玉宝. 复合材料的特征扫描声成像检测[J]. *无损检测*, 2001, 23(10): 427-431.
- [13] Chen Yifang, Luo Wei, Chen Yubao. *Nondestructive Testing*, 2001, 23 (10): 427-431.
- [14] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和压电换能器阵[M]. 下册. 北京: 北京大学出版社, 1990: 85-116.
- [15] Luan Guidong, Zhang Jinduo, Wang Renqian. Piezoelectric transducers and piezoelectric transducer array [M]. Vol.3, Beijing: Beijing University Press, 1990: 85-116.
- [16] Fenster A, Downey D B. 3-D ultrasound imaging: a review [J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1996, 15(6): 11-12.
- [17] Holland S D, Chimenti D E. High contrast air-coupled acoustic imaging with zero group velocity lamb models [C]//Proceeding of Ultrasonics Intersonics International 2003, Spain, 2004, 42: 957-960.
- [18] 刘晓宙, 叶式公, 龚秀芬, 等. 压电薄膜超声换能器的特性研究[J]. *声学学报*, 1999, 24(4): 429-437.
- [19] Liu Xiaoyu, Ye Shigong, Gong Xiufen, et al. *Acoustic Journal*, 1999, 24 (4): 429-437.

(责任编辑 代丽)