文章编号:1004-2474(2022)02-0273-05

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2022.02.025

不同匹配层阵列式换能器的有限元仿真

孙裕后,王甫霖,董杰,靳丽,王锋华,董帅

(上海交通大学 轻合金精密成型国家工程研究中心,上海 200240)

摘 要:匹配层材料及结构对于提高阵列式换能器的带宽、灵敏度及轴向分辨率有重要作用。为了探究不同 匹配层材料对阵列式换能器性能的影响,该文通过有限元法模拟了包括高分子材料、0-3 复合材料及镁合金等多种 匹配层材料的阵列式换能器,综合比较了各自的频域特性及时域特性。仿真结果表明,使用 AZ31B 镁合金作为第 一匹配层、Epo-Tek 301 环氧树脂作为第二匹配层的阵列式换能器模型具有最佳的综合性能,从而为高性能阵列式 压电超声换能器的开发、研究提供了新的匹配层设计参考方案。

关键词:阵列式换能器;有限元法(FEM);频域分析;时域分析;声阻抗匹配层;镁合金 中图分类号:TN64;TB552 文献标志码:A

Finite Element Simulation of Array Transducer with Different Matching Layer Materials

SUN Yuhou, WANG Fulin, DONG Jie, JIN Li, WANG Fenghua, DONG Shuai

(National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The matching layer material and structure play an important role in improving the bandwidth, sensitivity and axial resolution of the array transducer. To investigate the effects of different matching layer materials on the performance of array transducers, this paper simulated array transducers with different matching layer materials including polymer, 0-3 composite materials and magnesium alloy through finite element method. The frequency domain and time domain characteristics of each transducer models were compared. The simulation results show that the array transducer model using AZ31B magnesium alloy as the first matching layer and Epo-Tek 301 epoxy as the second matching layer has the best performance, providing a new matching layer design scheme for developing highperformance array piezoelectric ultrasonic transducers.

Key words: array transducer; finite element method(FEM); frequency domain analysis; time domain analysis; acoustic impedance matching layer; magnesium alloy

0 引言

作为医学超声检测系统的关键部件,阵列式压 电换能器能够激发多个压电阵元来进行探测,从而 显示出细小的物体结构,提供精细的超声图像。阵 列式压电换能器的主要结构包括压电材料、匹配层、 背衬及连接电路4部分,其中匹配层用于提高超声 波的能量传输效率,减小声波在不同界面处的反射 损失,对于换能器的性能优化起到重要作用。

目前换能器制备过程中常使用高分子聚合物及 高聚物/金属氧化物组成的 0-3 复合材料作为匹配 层^[1]。其中高分子聚合物声阻抗值较低,通常作为 单层匹配层或双层匹配层结构中第二匹配层。0-3 复合材料声阻抗值较高,可作为双层匹配层结构中 的第一匹配层。但 0-3 复合材料匹配层存在材料制 备难度大,材料均一性难以保证,纵波声速低及声衰 减效应严重等问题,制约了阵列式换能器的工作 性能^[2]。

已有研究表明,镁合金具有较大的声速(纵波声 速约5800m/s),较小的声衰减系数(7.5 MHz下仅 为0.02 dB/mm)及适宜的声特性阻抗(10⁷ Pa•s/ m,接近克里姆霍尔兹(KLM)等效电路模型对于第 一匹配层声阻抗的要求),是一种理想的换能器匹配 层材料^[3]。因此,本文将单相材料镁合金引入阵列 式换能器设计中,通过有限元法(FEM)模拟镁合金

收稿日期:2021-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52071208);山西省重点研发计划基金资助项目(201903D421036)

作者简介:孙裕后(1996-),男,广东省惠州市人,硕士生,主要从事镁合金的声学应用及阵列式换能器制备的研究。通信作者:王甫霖 (1987-),男,河南省郑州市人,副教授,博士生导师,主要从事高性能镁合金及其强韧化机制方面的研究。

匹配层及高分子聚合物匹配层、0-3 复合材料匹配 层阵列式换能器,并对其模拟性能进行比较,从而为 高性能阵列式换能器匹配层材料的选择提供参考。

1 不同匹配层材料换能器建模

为了提高运算效率,本文采用二维模型(见图 1)对具有不同匹配层结构和材料的5 MHz 阵列式 换能器进行建模,得到换能器的各项模拟性能并进 行了比较。



图 1 阵列式换能器有限元模型示意图

在相控阵换能器设计中,通常要求压电阵元的 尺寸满足以下要求^[4]:

 1) 阵元中心距应小于 0.5 λ_w(λ_w为工作频率下 声波在水中的波长)。

2) 阵元宽度应小于 0.5 λ_w。

 3) 阵元高度应等于 0.5 λ_p(λ_p为工作频率下声 波在压电材料中的波长)。

4) 阵元宽度与高度之比应小于 0.6。

本文选用 PZT-5H 作为压电层,建立包含 32 个 压电阵元的换能器模型。根据上述 4 点要求,对于 工作频率为 5 MHz 的换能器,设计 PZT-5H 压电阵 元的阵元厚为 0.4 mm,宽为 0.1 mm,中心距为 0.15 mm,切缝宽为 0.05 mm。

背衬主要用于抑制压电阵元的余振及吸收换能器后端的声波。本文选取密度为3781 kg/m³、声速为2400 m/s的钨粉-树脂-玻璃球材料作为背衬。 模型中背衬厚为4 mm,宽为4.75 mm(即压电层的总宽度)。

压电材料与人体组织间存在严重的声阻抗失配 现象,需引入匹配层来提高声波的传输效率。KLM 模型指出,若在压电层与待测介质间引入一层匹配 层,则匹配层厚满足λ/4(λ为波长)原则,即匹配层 厚等于声波在匹配层材料中波长的 1/4,声阻抗 值为

$$Z_{\rm m} = (Z_{\rm p}^{\rm 1} Z_{\rm l}^{\rm 3})^{1/3} \tag{1}$$

式中 Z_p、Z_m、Z₁分别为压电元件、匹配层和待测介质的声阻抗。

随着匹配层层数的增加,换能器的带宽提升。 因此,在换能器设计中常用双层匹配层结构。此时 两层匹配层厚仍满足 λ/4 原则,而声阻抗值分别为

$$Z_{\rm m1} = (Z_{\rm p}^4 Z_{\rm 1}^3)^{1/7} \tag{2}$$

$$Z_{\rm m2} = (Z_{\rm p}^1 Z_{\rm l}^6)^{1/7} \tag{3}$$

式中 Zm1, Zm2 分别为第一、二匹配层的声阻抗值。

若取压电元件声阻抗为 35 MRayl(1 MRayl= 10⁶ Pa • s/m),待测介质的声阻抗为 1.5 MRayl,则 单层匹配层的理想声阻抗为 4.29 MRayl。对于双 层匹配层,第一、二匹配层的理想声阻抗分别为 9.07 MRayl、2.35 MRayl。在换能器设计与制备过 程中,应尽可能使匹配层材料的声阻抗接近理想声 阻抗值。

根据单、双匹配层结构的理想声阻抗值,本文选 取高分子聚合物、0-3 复合材料及镁合金作为匹配 层引入模型研究中。表1为不同匹配层材料的物理 性质。表中,Araldite、Parylene 和 HYSOL-10%氧 化铝环氧树脂复合材料3种材料用于建立单匹配层 换能器模型。HYSOL-40%氧化铝复合材料、氧化 铜-DER332-DEH24树脂复合材料、AZ31B镁合金 的声阻抗值接近第一匹配层材料的理想声阻抗值; Versamid-DER332-DEH24复合材料和 Epo-Tek 301环氧树脂的声阻抗值接近第二匹配层材料的理 想声阻抗值,因此将分别建立 HYSOL-40%氧化铝 复合材料/Epo-Tek 301树脂、氧化铜-DER332-DEH24复合材料/Versamid-DER332-DEH24复合 材料及 AZ31B镁合金/Epo-Tek 301作为双匹配层 的换能器模型。

表1 不同匹配层材料的物理性质

	纵波声	横波声	密度/	声阻
匹配层材料	速/(m・速/(m・		(kg•	抗/
	s^{-1})	s^{-1})	m^{-3})	MRayl
Araldite	3 276	1 613	1 340	4.39
Parylene ^[5]	2 437	995	1 400	3.41
HYSOL-10% 氧化铝复合材料	2 720	1 279	1 450	3.94
HYSOL-40% 氧化铝复合材料	3 139	1 685	2 260	7.10
氧化铜-DER332-DEH24 树脂复合材料 ^[6]	2 479	1 753	3 290	8.16
AZ31B 镁合金	5 760	3 043	1 780	10.25
Versamid-DER332-DEH24 树脂复合材料 ^[6]	2 488	1 759	1 118	2.78
Epo-Tek 301 ^[7]	2 650	1 230	1 150	3.05

建立换能器模型后,在换能器的发射面上设置 水域以模拟声波传播过程,水域深度等于换能器的 焦距。然后按照以下步骤进行建模与计算:

1) 在材料库中选取水、PZT-5H、背衬及匹配层 材料,依次将材料属性导入对应的几何结构中。

2)设置物理场条件。将水域的边界设置为完美匹配层。在固体力学场中设置低反射边界,并为换能器各层结构添加阻尼因子。在静电场中设置压电层上底面接地,下底面为终端。

3)网格剖分。采用自由三角形网格对模型进行划分,注意网格尺寸不超过 λ/6^[8]。对于压电层及匹配层可适当加密网格。

4)添加研究及结果处理。对于频域研究,本文 选择 2~9 MHz 的扫描区间,步长为 0.05 MHz;对 于时域研究,选择 0~24 μ s 的扫描区间,步长为 3.33 ns。计算完成后,可导出换能器的频域和时域 特性。

对于实际换能器,使换能器具备最佳性能的匹 配层厚度会偏离 λ/4。为便于不同匹配层材料换能 器模型间进行比较,需对匹配层厚度进行优化,以达 到最佳的换能器性能。本文针对表1中各类匹配层 建立了相应的换能器模型,改变匹配层厚度,从而选 择模拟带宽性能最好的匹配层厚度组合,优化后的 匹配层厚度如表2所示。

表	2	优化	后	的	匹	配	层	厚	度	值

匹配层材料	第一匹配 层厚/mm	第二匹配 层厚/mm
Araldite	0.19	_
Parylene	0.15	—
HYSOL-10%氧化铝	0.22	—
HYSOL-40%氧化铝/Epo-Tek 301	0.22	0.10
氧化铜-环氧树脂/Versamid-环氧树脂	0.18	0.10
AZ31B/Epo-Tek 301	0.32	0.125

2 仿真结果与讨论

2.1 频域特性研究

通过对不同匹配层材料换能器进行频域模拟, 可得各个换能器模型的模拟阻抗谱,如图2所示。





设换能器焦距为 20 mm,各个阵元的相位延时 信号为

$$\tau_n = \frac{2\pi f \cdot (F - \sqrt{x_n^2 + F^2})}{c} + \tau_0 \tag{4}$$

式中: τ_n 为第n个阵元的相位差;f为工作频率; x_n 为第n个阵元到换能器中心的距离;F为焦距;c为介质中声速; τ_0 是为了避免出现负的延时而设计的补偿参数。

对换能器模型中压电阵元施加带有相位延时的 电压信号,可得换能器的模拟声束特性。换能器的 模拟电学性能及声束特性如表 3 所示。

表 3 不同匹配层材料阵列式换能器的模拟频域特性

匹配层材料	谐振频率/	反谐振频	有效机电	焦点处声	声焦距/	焦区深度/	波束宽度/
	MHz	率/MHz	耦合系数	压级/dB	mm	mm	mm
Araldite	4.20	5.25	0.6	224.79	14.0	22.28	1.18
Parylene	3.45	4.95	0.72	222.94	14.0	22.15	1.20
HYSOL-10%氧化铝	4.10	5.25	0.62	221.43	13.5	21.50	1.18
HYSOL-40%氧化铝/Epo-Tek 301	3.80	5.15	0.67	223.76	13.9	22.16	1.18
氧化铜-树脂/Versamid-树脂	3.95	5.25	0.66	224.26	14.0	21.60	1.15
AZ31B 镁合金/Epo-Tek 301	4.30	5.65	0.65	225.12	14.6	24.75	1.25

 $K_{\rm eff} = \sqrt{1 - f_r^2 / f_a^2}$ (5)

式中:fr为谐振频率;fa为反谐振频率。

声焦距是指换能器轴线方向上声压级出现最大 值时对应的距离。以声压级最大值为基准,把声压 级相对于最大值降低3dB所对应的轴线方向上长 度定义为焦区深度,而在声压级最大值位置截取与 轴线相垂直的平面,称为焦平面。以最大值为基准, 把焦平面上横向声压级降低6dB的宽度定义为波 束宽度。

根据换能器电学性能的模拟结果, Parylene 单 匹配层换能器具有最高的有效机电耦合系数, 但 谐振频率偏低; Araldite 匹配层换能器和 HYSOL-10%氧化铝换能器出现了双谐振峰现象, 有效机 电耦合系数较小; HYSOL-40%氧化铝/Epo-Tek 301匹配层换能器和氧化铜-树脂/Versamid-树脂 匹配层换能器的反谐振频率接近 5 MHz 的设计频 率, 换能器工作性能偏低; 而镁合金/Epo-Tek 301 匹配层换能器的有效机电耦合系数为 0.65, 反谐 振频率为 5.65 MHz。在相同设计频率下电阻抗 为 636 Ω, 换能器工作时电学损耗小, 综合来看其 具有最优的模拟电学性能。

根据表 3 中给出的声束特性模拟结果,在 6 种 匹配层材料换能器模型中,AZ31B 镁合金/Epo-Tek 301 树脂双匹配层换能器具有最大的焦点处 声压级、声焦距和焦区深度,因此,焦点处声场能 量最集中,成像焦深最好。不同匹配层材料换能 器的波束宽度差异不大,其中氧化铜-树脂/Versamid-树脂双匹配层换能器有最小的波束宽度,但 与镁合金/301 树脂匹配层换能器的波束宽度相差 仅 0.1 mm,小于声波波长,对换能器声束指向性影响不大。综上可知, AZ31B 镁合金/Epo-Tek 301 环氧树脂作为匹配层的换能器具有最佳的模拟声束特性。

2.2 时域特性研究

通过高斯脉冲信号对换能器进行激励,并进行 仿真计算,可得换能器的脉冲-回波响应。不同匹配 层材料换能器的模拟脉冲-回波波形如图 3 所示,对 应的中心频率和带宽如表 4 所示。



图 3 不同匹配层材料换能器的模拟脉冲-回波响应

匹配层材料	中心频率/MHz	−6 dB帯宽/%	最近邻阵元串扰/dB	次近邻阵元串扰/dB
Araldite	4.71	55.52	-9.36	-13.37
Parylene	4.69	50.30	-12.22	-13.70
HYSOL-10%氧化铝复合材料	4.84	43.22	-11.93	-14.54
HYSOL-40%氧化铝/Epo-Tek 301	4.24	69.38	-11.37	-14.80
氧化铜-环氧树脂/Versamid-环氧树脂	4.43	64.68	-11.87	-15.33
AZ31B 镁合金/Epo-Tek 301	4.82	71.13	-12.69	-21.29

表 4 不同匹配层材料阵列式换能器的模拟时域特性

阵列式换能器中各个阵元在工作时不是完全独 立的,一个阵元的振动会通过波的形式传递到相邻 的阵元上,称为阵元串扰。阵元串扰会影响声波信 号的脉冲宽度,甚至使超声成像测试中出现伪像,不 利于换能器的稳定工作,因此在换能器的研究和制

备中常希望能够减弱阵元串扰。

本文采用幅值1V、频率为换能器模型中心频 率的三周期正弦脉冲串信号对压电阵元进行激励, 通过时域计算可得到不同匹配层材料换能器的阵元 串扰波形,如图4所示。



图4 不同匹配层材料换能器的模拟阵元串扰 研究中常采用串扰级 C_L 衡量阵元串扰:

 $C_{\rm L} = 20\log(V_{\rm adj}/V_{\rm act}) \tag{6}$

式中:V_{act}为在激发阵元上施加的电脉冲信号的幅值;V_{act}为在非激发阵元上检测到的信号幅值。

C_L越大,阵元串扰越大,阵元间横向振动的耦 合效应越明显。表4给出了不同匹配层换能器的串 扰级,其中最近邻和次近邻串扰级分别衡量了与激 发阵元距离最近和次近的2个阵元的串扰效应。

由表 4 可以看出,单层匹配层换能器的带宽低 于双层匹配层换能器的带宽;而 AZ31B 镁合金/301 树脂匹配层换能器在 6 种换能器模型中具有最高的 带宽(为 71.13%)。AZ31B 镁合金/环氧树脂作为 双匹配层的换能器模型,具有最小的最近邻阵元串 扰和次近邻阵元串扰,串扰级分别为-12.69 dB 和 -21.29 dB,其中次近邻阵元串扰远小于其他换能 器模型。综上可知,AZ31B 镁合金作为第一匹配层 的阵列式换能器具有最佳的模拟时域特性。

3 结束语

本文选取高分子聚合物、金属氧化物/环氧树脂 0-3复合材料以及镁合金作为匹配层材料,利用有 限元法对具有不同匹配层材料的5 MHz 阵列式换 能器进行性能模拟和比较。仿真结果表明,镁合金 匹配层换能器模型的有效机电耦合系数为 0.65,在 5 MHz 下电阻抗仅为 636 Ω。与高分子聚合物匹配 层、金属氧化物/环氧树脂复合材料匹配层换能器相 比,镁合金作为第一匹配层的换能器具有最大焦点 处声压级(225.12 dB),最大焦区深度(24.75 mm), 最高的-6 dB带宽(71.13%)及最小的最近邻/次 近邻阵元互扰(-12.69 dB/-21.29 dB)。因此, AZ31B镁合金/Epo-Tek 301 环氧树脂匹配层换能 器模型具有最佳的综合性能。研究表明,镁合金作 为第一匹配层应用于阵列式换能器的研究开发具有 较好的应用前景。

参考文献:

[1] 刘鹏波,简小华,韩志乐,等. 高频医用超声换能器 材料声匹配特性研究[J]. 压电与声光,2016,38(3): 450-453.

LIU Pengbo, JIAN Xiaohua, HAN Zhile, et al. Study on the acoustic matching properties of high frequency medical ultrasound transducers materials[J]. Piezoelectircs & Acoustooptics, 2016, 38(3): 450-453

- [2] FANG H J,CHEN Y,WONG C M, et al. Anodic aluminum oxide-epoxy composite acoustic matching layers for ultrasonic transducer application [J]. Ultrasonics, 2016,70:29-33.
- [3] WANG Yulei, TAO Jingya, GUO Feifei, et al. Magnesium alloy matching layer for high-performance transducer appli-cations[J]. Sensors, 2018, 18(12):4424.
- [4] YANG H C. Development of novel 1-3 piezocom-posites for low-crosstalk high frequency ultrasound array transducers [D]. Los Angeles, USA: University of Southern California, 2012.
- [5] CELMER M, OPIELINSKI K J, DOPIERAŁA M. Structural model of standard ultrasonic transducer array developed for FEM analysis of mechanical crosstalk [J]. Ultrasonics, 2018, 83, 114-119.
- [6] CHA J H, CHANG J H. Development of 15 MHz 2-2 piezo-composite ultrasound linear array transducers for ophthalmic imaging [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 217: 39-48.
- [7] SHUNG K K. Diagnosticultrasound-imaging and blood flow measurements [M]. 2nd ed. Los Angeles, USA: CRC Press, 2014:39-101.
- [8] 王巍,周杨春,王方,等.基于 COMSOL 的声表面波器 件二维等效模型设计[J]. 压电与声光,2021,43(5): 605-608.

WANG Wei, ZHOU Yangchun, WANG Fang, et al. Design of two-dimensional equivalent model of surface acoustic wave device based on COMSOL[J]. Piezoelectires & Acoustooptics, 2021, 43(5):605-608.