

一种高频宽带压电叠堆换能器元器件研究

张 军^{1,3*}, 罗福康², 王祥达¹

(1. 东莞东阳光研究院医疗器械研究所, 广东 东莞 523867; 2. 东莞东阳光药业研究院, 广东 东莞 523867; 3. 华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘 要:基于有限元模拟仿真技术, 对不同厚度压电陶瓷的品质因子 Q 、表面总声压、振型进行分析. 选取厚度为2.5 mm和5.0 mm的陶瓷片, 制备不同叠堆结构的2-2型多层压电复合材料. 通过测试电学性能及导纳曲线, 研究叠堆模型对换能器的阻抗($|Z|$)、谐振频率(f_s)和带宽的影响, 并首次系统比较阶梯型与交替叠堆结构对多模态耦合的影响. 结果表明, 不同厚度压电陶瓷阶梯型叠堆更易引起多模态耦合, 而交替叠堆多模耦合效果不明显. 此外, 树脂层厚度太大会形成阻尼, 引起谐振频率(f_s)降低, 阻抗($|Z|$)增大. 适当厚度的陶瓷片和环氧树脂胶阶梯型叠堆复合, 可以提高叠堆换能器的谐振频率, 并保持带宽不衰减. 当2.50 mm和5.00 mm厚的陶瓷片阶梯型叠堆复合, 树脂层厚度为0.15 mm时, 换能器的谐振频率提升至446.24 kHz, 带宽基本保持不变为7.27 kHz. 这为高频宽带水声换能器设计与制作提供一种参考.

关键词:有限元仿真; 叠堆模型; 压电复合材料; 高频; 宽带

中图分类号: TB552; TN384

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2026)05-0516-10

Research on high-frequency broadband piezoelectric stack transducer components

Zhang Jun^{1,3*}, Luo Fukang², Wang Xiangda¹

(1. Research Department of Medical Devices, Dongguan HEC Research Institute, Dongguan 523867, China; 2. Dongguan HEC Research Institute of Pharmaceutical Industry, Dongguan 523867, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on finite element simulation technology, the quality factor Q , total surface sound pressure and vibration mode of piezoelectric ceramics with different thicknesses were analyzed. Ceramic sheets with thicknesses of 2.50 mm and 5.00 mm were selected to fabricate 2-2 type multilayer piezoelectric composite with different stack structures. By testing electrical performance and admittance curve, the impact of the stack model on the impedance ($|Z|$), resonant frequency (f_s) and bandwidth of the transducer was studied. The impact of stepped and alternating stacked structures on multi-modal coupling was compared systematically for the first time. The results showed that stepped stacks of piezoelectric ceramics with different thicknesses were more likely to cause multi-mode coupling, while the multi-mode coupling effect of alternating stacks was not obvious. In addition, an excessively thick resin layer introduces damping, leading to a decrease in resonant frequency (f_s) and an increase in impedance ($|Z|$). The ladder-type stacking of ceramic sheets with appropriate thickness and epoxy resin glue would increase the resonant frequency of the stacked transducer and maintain the bandwidth without attenuation. When 2.50 mm and 5.00 mm

收稿日期: 2026-01-23

*通信作者, E-mail: 1052099473@qq.com

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(181003); 国家重点研发计划基金资助项目(2021YFB3702002)

引用格式: 张军, 罗福康, 王祥达. 一种高频宽带压电叠堆换能器元器件研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2026, 52(5): 516-525.

Zhang Jun, Luo Fukang, Wang Xiangda. Research on high-frequency broadband piezoelectric stack transducer components[J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2026, 52(5): 516-525.

thick ceramic sheets were stacked in a stepped manner and the resin layer thickness was 0.15 mm, the resonant frequency of the transducer increased to 446.24 kHz, and the bandwidth remained basically unchanged at 7.27 kHz. This provided a reference for the design and fabrication of high-frequency and broadband underwater acoustic transducers.

Keywords: finite element simulation; stacked model; piezoelectric composites; high-frequency; broadband

换能器是实现能量相互转换的重要部件,将声能与其他形式的能量,如机械能、电能、磁能等进行转换的装置^[1-3].它利用某些功能材料在电场或磁场作用下,发生压电效应或磁致伸缩效应,以实现不同形式的能量相互传输^[4-5].随着换能器技术的不断发展,研发高频宽带的换能器具有重要意义,用做水下声呐以获取更多信息和传输的精确性,用做医疗超声换能器可以提高分辨率,获得更清晰的图像^[6-10].

换能器的诸多重要性能,如指向性、发射声功率、接收灵敏度以及声场特性等直接受到工作频率的影响.然而,影响换能器工作频率的因素有:激励电信号的频率、换能器的结构与组装、换能元件自身的材料物理特性等^[11-13].目前,在进行工作频率的优化设计时,主要考虑以下三个方面:传声媒介对超声波能量的吸收而造成声衰减;检测物及缺陷对超声波的反射特性;传声介质的本底噪声以及辐射阻抗等^[14-17].一般而言,发射换能器在其谐振频率下工作时,能获得最大的电声转换效率和发射声功率.同样,在谐振频率条件下,作为接收换能器也能获得最佳的频率响应和接收灵敏度.因此,研制高频工作段的换能器,需将谐振频率提至更高频率,以达最佳的工作状态.

频率带宽是指换能器能够发送和接收的频率范围,它影响换能器的性能和应用范围.频带越宽,换能器的信息获取能力越强,信号传输的精度和可靠性越高.当前,拓宽换能器频率带宽的方法^[18-22]:一是采用有机聚合物材料复合压电晶体,改变敏感元件的结构以增大损耗,使机械品质因数降低,从而拓展工作频率带宽;二是增加匹配层设计,添加单个或多个匹配层;三是采取厚度振动模态和横向振动模态耦合的多耦合技术,使多个振动模态的频率相互靠近;四是背衬层设计,在敏感元件的背面粘贴高密度的吸声材料.然而,增加多层匹配层和粘贴吸声材料固然能显著扩展换能器的工作带宽,但随着时间的推移,换能器的性能有所退化,影响换能器的使用寿命.

目前,有科技人员对换能器的带宽拓展开展研究

工作,主要集中于横向叠堆、纵向“金字塔”叠堆、添加匹配层、复合树脂层等方法.例如,苏晋涛等^[23]人设计了一种“金字塔”结构的换能器敏感元件,研制出宽带高灵敏换能器样机.魏彤等^[24]人根据仿真结果优化复合材料的尺寸,通过特殊的制备工艺法,制作了工作频率处于高频范围的横向叠堆型换能器.朱棵^[25]采用梯度匹配层制备了1-3型复合单晶材料换能器,梯度匹配层使带宽达到170%以上,充分展现换能器的优异性能.孙瑛琦^[26]研究了有无匹配层及其厚度对1-3型压电换能器带宽的影响,在无匹配层时,电导带宽约为57 kHz,在有匹配层时,电导带宽约为390 kHz,增加匹配层后电导带宽提升了约7倍.田欣^[27]研究打孔对夹心式压电换能器的频带拓宽效果的影响,制得了打孔型宽频带换能器,其频带宽度拓展效果很明显.上述方法对拓宽换能器的频率带宽比较明显,但是也造成其他性能参数衰减,比如寿命、高温稳定性、谐振频率、反谐振频率、机电耦合系数等.如何在压电元件叠堆设计时,拓宽换能器的带宽,同时保证谐振频率不衰减,是换能器往高频宽带方向发展的难点.

为顺应工业用水声换能器的工作频率向高频(高于100 kHz)发展,同时保持较高的带宽,以获取更多水下信息.为此,本研究依据多模态耦合技术原理,以及有机聚合物复合压电晶体的方法,采用不同厚度的压电陶瓷圆片,制备不同叠堆结构的2-2型多层压电复合材料,试图扩宽换能器的频率带宽,进一步提高换能器的谐振频率,为高频宽带换能器设计与制作提供一种参考.

本研究采用不同厚度压电陶瓷片叠堆复合方案,基于COMSOL多物理场仿真技术,对不同厚度陶瓷片的品质因子 Q 、表面总声压、振型进行分析.基于仿真结果,优选陶瓷片厚度,并调整树脂层厚进行不同方式叠堆,构建一种多模态耦合与刚度/质量理想平衡的结构,以期达到提升换能器的谐振频率,并维持带宽基本不变的效果.

1 纵向堆叠型复合材料结构

本研究设计的纵向堆叠型压电复合材料元件,其结构由不同厚度的压电陶瓷晶片、环氧结构胶、导电银电极组成.纵向叠堆型换能器的性能由压电陶瓷敏感元件的振动模态决定,而敏感元件又由不同厚度的压电陶瓷圆片以纵向叠堆的方式组成.因此,对2-2型压电复合材料性能进行模拟仿真分析,是叠堆型换能器元件研制的基础.其中,2-2型压电复合材料元件如图1所示.

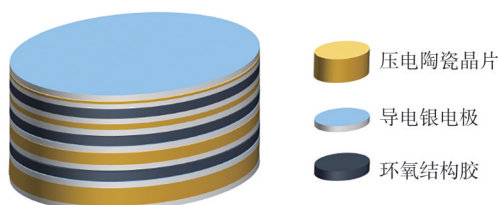


图1 2-2型压电复合材料元件结构

Fig. 1 2-2 type piezoelectric composite material component structure

由图1可知,该纵向堆叠型压电复合材料采用不同厚度压电陶瓷与环氧树脂交替排列而成.一方面,通过复合环氧树脂降低换能器元件的机电品质因数 Q_m ,进一步扩宽工作频率带宽;另一方面,通过不同厚度、相同直径压电陶瓷圆片的2-2型压电复合材料,产生不同频率的厚度振动模态,基于多模态耦合技术,合理设计压电陶瓷圆片厚度,使不同频率的振动模态相互耦合,达到拓宽换能器的工作带宽.

2 敏感元件尺寸设计

叠堆型换能器的压电陶瓷元件决定换能器的综合性能,而2-2型压电换能器敏感元件由厚度不同、直径相同的陶瓷圆片组成.因此,对2-2型复合材料进行仿真分析,探究品质因子 Q 、振型、总声压随结构尺寸、频率特性的变化规律,为纵向叠堆型换能器元件的设计与研制提供指导.

2.1 品质因子 Q 随厚度的变化

为了确定合适的压电陶瓷圆片厚度,经堆叠复合后具有更好的性能.利用COMSOL有限元分析软件对2-2型压电复合材料进行建模仿真,分析不同压电敏感元件厚度对2-2型压电复合材料品质因子的影响.

由于导电银层极薄,在仿真分析过程中忽略不计.依次对陶瓷圆片及环氧胶进行建模,并赋予各自材料属性.接着添加结构力学模块中的固体力学(solid),材料模型选择压电材料,并设置固定约束;添加声学模块中的压力声学(acpr),并在上下表面设置硬声场边界,在周围设置添加 1.01×10^5 Pa压力,随后对其网格划分.最后添加频域求解器来分析元件表面总声压及声压分布,添加特征频率求解器来分析元件在不同频率下工作时的品质因子 Q 值、位移分布(振型).

本研究设定陶瓷片直径为21.5 mm,使用材料为PMN-PZT+0.2%Nb₂O₅压电陶瓷^[28].对不同厚度陶瓷片在不同频率下工作的 Q 值进行模拟分析和谐响应求解. Q 值随特征频率变化如图2所示.

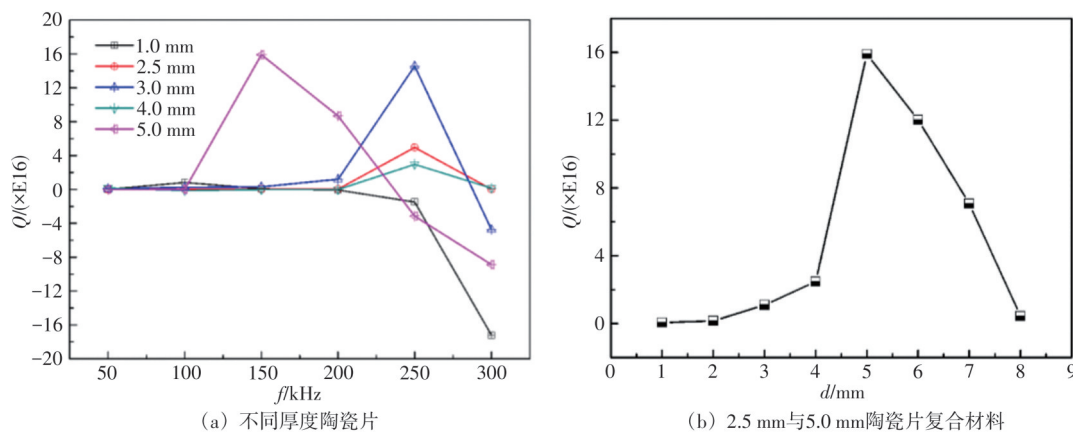


图2 不同厚度陶瓷片品质因子 Q 随特征频率变化曲线

Fig. 2 Variation curves of the quality factor Q of ceramic sheets with different thicknesses with characteristic frequency

由图2(a)看出,厚度小于4.0 mm的压电陶瓷片在200 kHz以下工作时,品质因子很小,当特征频率高于200 kHz时,陶瓷片的品质因子会先增大后减小,在250 kHz下工作时的品质因子相对更大;厚度为5.0 mm的压电陶瓷片在较低频率下工作时,其品质因子就会发生变化,在150 kHz下工作时的品质因子相对更大。

为了提高元件的品质因子及工作频率,尝试采用不同厚度陶瓷片复合.从图2(a)不同厚度陶瓷片品质因子随频率的变化规律分析,选取5.0 mm和2.5 mm陶瓷片堆叠复合.复合材料品质因子随特征频率

的变化曲线如图2(b)所示,可以看出,5.0 mm和2.5 mm陶瓷片复合后,在特征频率250 kHz处的品质因子最大,较未复合的陶瓷片提高几倍,且工作的特征频率较5.0 mm陶瓷片提高近100 kHz.

2.2 总声压随弧长的变化

为进一步分析厚度对压电陶瓷片性能的影响规律,以确定最佳复合方式,制备高性能压电元件.利用有限元分析软件对不同厚度压电陶瓷片进行建模仿真,分析压电圆片厚度对总声压的影响.最后,采用有限元仿真元件中数据处理工具对仿真结果进行绘图,如图3所示.

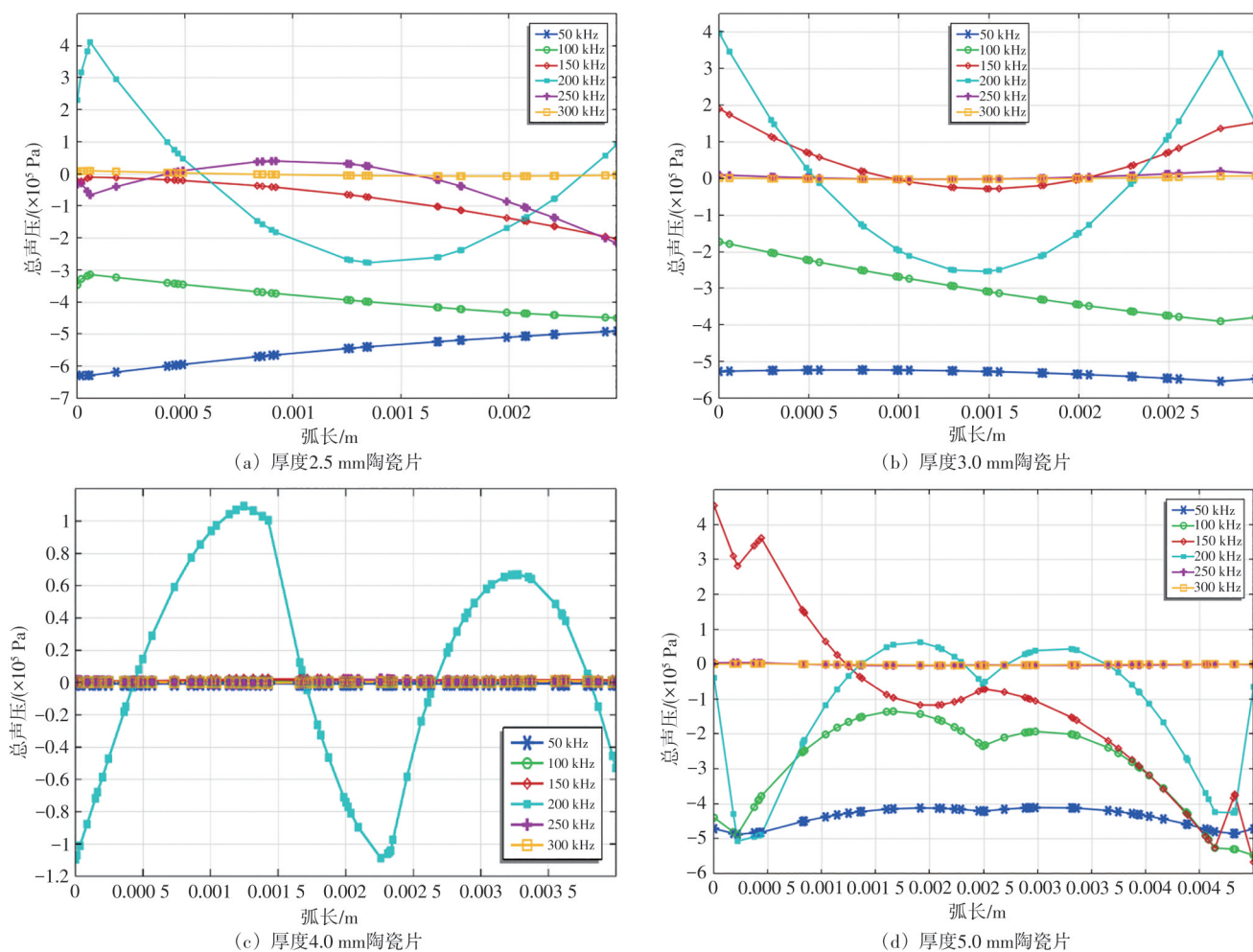


图3 不同厚度陶瓷片总声压随弧长变化曲线

Fig. 3 Total sound pressure variation with arc length for ceramic sheets of different thicknesses

图3为不同厚度陶瓷片在不同特征频率下工作时的总声压随弧长变化曲线.由图看出,随特征频率的增加,2.5 mm和3.0 mm陶瓷片的总声压随弧长变化逐渐变得平稳,工作频率为100 kHz、150 kHz时,总

声压在弧长范围内有所降低,在200 kHz下工作时,总声压变化幅度较大,且起伏比较规整,说明此时声辐射的均匀性较好.厚度4.0 mm的陶瓷片在200 kHz下工作时,总声压变化幅度较明显,均匀性稍差,在其余

特征频率(50~300 kHz)下工作时,总声压随弧长变化很平稳,总声压变化幅度较小.厚度 5.0 mm 的陶瓷片在 100 kHz、200 kHz 下工作时,总声压变化幅度较明显,且起伏较为规整.

图 4 为 2.5 mm 与 5.0 mm 陶瓷片复合材料在不同特征频率下的总声压随弧长变化曲线.由图看出,特征频率为 250 kHz~600 kHz 时,总声压随弧长变化幅

度较大,300~400 kHz 下的总声压变化起伏相对更规整,说明复合材料在特征频率 300~400 kHz 下工作,其声辐射的均匀性和指向性更好.特征频率为 250 kHz 以下时,总声压随弧长变化较平稳,总声压的变化幅度很小.特征频率在 400 kHz~1 000 kHz 时,随特征频率升高,总声压随弧长变化逐渐变得平稳,总声压变化幅度逐渐减小.

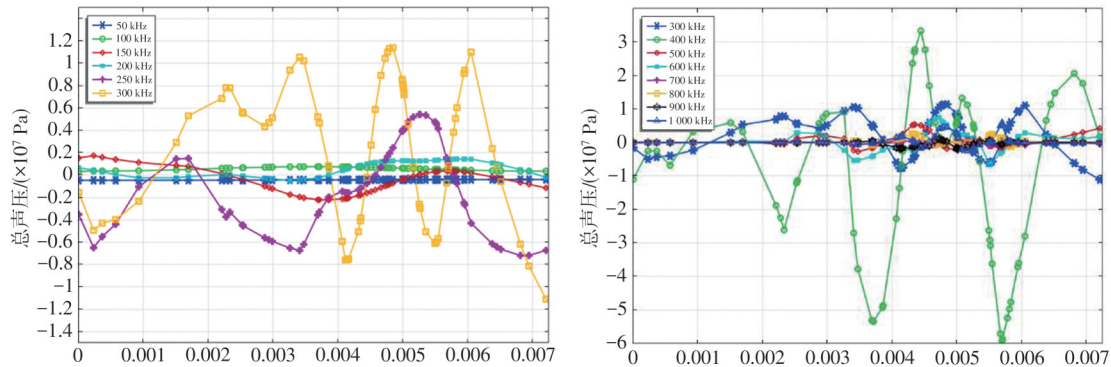


图 4 厚度 2.5 mm 与 5.0 mm 复合材料总声压随弧长变化曲线

Fig. 4 Total sound pressure variation curves with arc length for 2.5 mm and 5.0 mm composite materials

2.3 特征频率下陶瓷片及复合材料的振型

根据品质因子 Q 随陶瓷片厚度变化的仿真结果,及总声压随弧长的变化规律.选取 2.5 mm、5.0 mm 陶瓷片及其复合材料,采用 COMSOL 有限元仿真软件对其建模,分析最佳工作特征频率下的振动模型.

首先,依次对陶瓷圆片及环氧胶进行建模,并赋予各自材料属性.接着,添加结构力学模块中的固体力学(solid),材料模型选择压电材料,并设置固定约束.随后,选取自由四面体网格,并对其网格划分.最后,添加一个特征频率求解器来分析元件在特征频率下的位移分布.

图 5 为 2.5 mm、5.0 mm 陶瓷片及其复合材料在特征频率下的振动模态.可以看出,在周围设置固定约束后,特征频率为 200 kHz 时,2.5 mm 陶瓷片为厚度弯曲振动模式,其中心位移最大,位移分布主要集中于对称的两个区域,且在中心位置附近出现了弯曲;5.0 mm 陶瓷片为径向集中振动模式,位移分布均匀,且位移大小由中心至边缘先增大后减小.特征频率为 300 kHz 时,2.5 mm 与 5.0 mm 复合材料的振动模式为厚度弯曲振动,且最大位移点分布更广,弯曲变形面积更大.此时,电场方向与弹性波传播方向一致,形成纵向振动,在该振动模式下,压电陶

瓷在特定频率下展现出最佳的能量转换效率,有助于提高压电效应,实现机械能与电能的高效转换.特征频率为 500 kHz 时,2.5 mm 与 5.0 mm 复合材料的表面位移几乎为零,上下表面未发生形变.由此可见,换能器的机电转换效率不仅与振动模式有关,还与激励电场有关,过高频率的电场激励反而使能量转换效率更低.

3 敏感元件制作与测试

3.1 敏感元件制作

根据仿真分析结果,选取厚度为 2.5 mm 和 5.0 mm 的压电陶瓷片,其组分为 PMN-PZT+0.2%Nb₂O₅.^[28]首先,在陶瓷片上下表面印刷银电极,烘干后在 650 °C 下煅烧 10 min,待自然降至室温.然后,将其打磨防止短路,在高压极化装置硅油浴中 120 °C、30 kV/cm 直流电场下极化 20 min,取出洗净.随后,在极化后的陶瓷片表面均匀涂覆一定厚度的环氧树脂胶,逐片叠堆后用夹具加持,在 80 °C 下烘干 2 h,取出放置过夜.最后,采用激光焊焊上银层使其并联,并焊引极线,测试电学性能.树脂层厚度及元件堆叠形式如表 1 所示,陶瓷元件叠堆实物如图 6 所示.

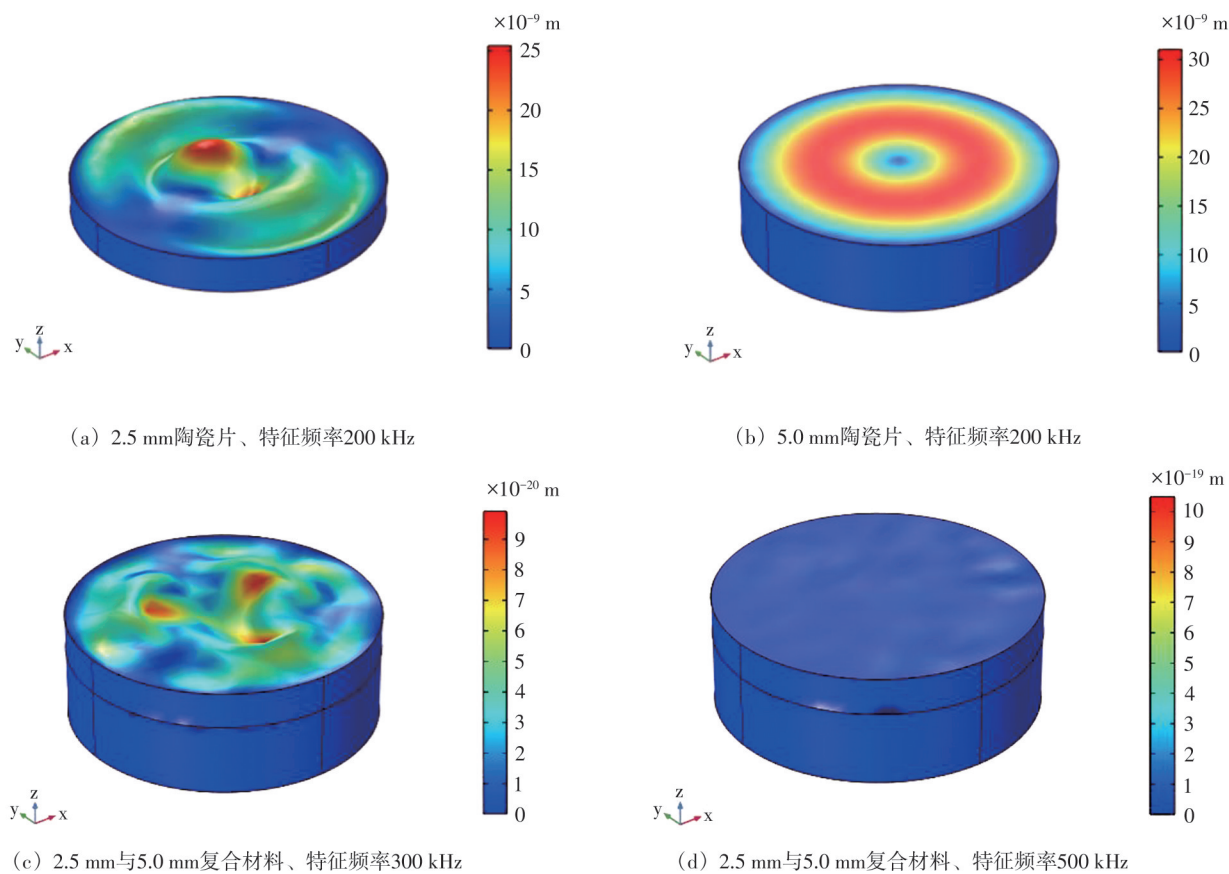


图 5 特征频率下陶瓷片及复合材料的振动模式

Fig. 5 Vibration modes of ceramic sheets and composite materials at characteristic frequencies

表 1 树脂层厚度及元件堆叠形式

Table 1 Resin layer thickness and component stacking form

名称	陶瓷片①厚度	陶瓷片②厚度	树脂层厚度	堆叠形式	叠堆结构类型
样品 1	2.5 mm	5.0 mm	0 mm	①	/
样品 2	2.5 mm	5.0 mm	0 mm	②	/
样品 3	2.5 mm	5.0 mm	0.15 mm	①/②	阶梯型
样品 4	2.5 mm	5.0 mm	0.16 mm	①/②/①	交替型
样品 5	2.5 mm	5.0 mm	0.14 mm	②/①/②	交替型
样品 6	2.5 mm	5.0 mm	1.01 mm	②/①	阶梯型

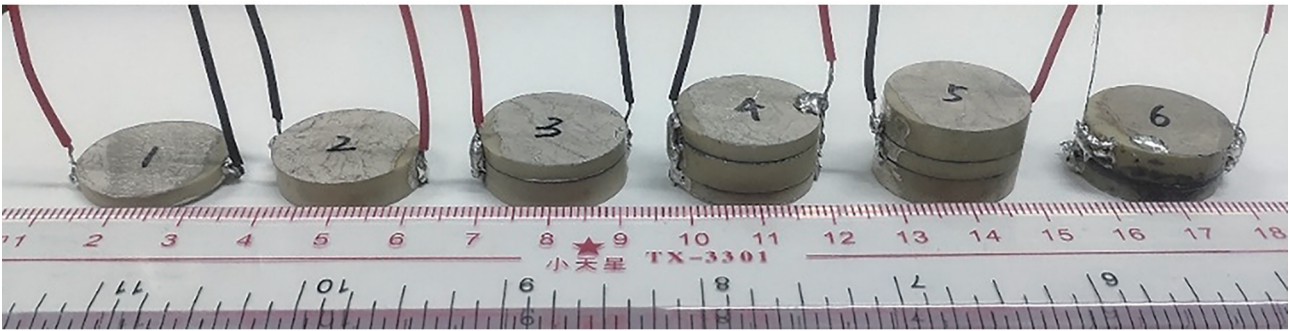


图 6 陶瓷元件封装实物

Fig. 6 Ceramic component packaging actual object

3.2 敏感元件测试

用 3D 轮廓测试仪(型号:基恩士 VR-5200)测试复合材料的树脂胶厚度(h);用超声波阻抗分析仪(型号:PV520 A)测试静电容(C_0)、电阻(R)、阻抗($|Z|$)和谐振频率(f_s)、反谐振频率(f_p);用阻抗分析仪(型号:是德科技 E4990A)测试相角(θ)和电导(G)、电纳(B),并根据公式(1)计算陶瓷片及复合材料的平面机电耦合系数(K_p).

$$K_p = \sqrt{\frac{2.51(f_p - f_s)}{f_s}}. \quad (1)$$

4 测试结果与讨论

表 2 为不同样品的主要电学性能. 可以看出,样

品厚度、堆叠方式及封装胶层对其电学性能有影响,陶瓷片的谐振频率、反谐振频率、阻抗与其厚度和叠堆方式有关. 当陶瓷片越厚时,谐振频率、反谐振频率变低,而阻抗相应的变大,因为变厚会增加陶瓷片的质量和惯性力,从而减小振动;越厚的陶瓷片的机械质量更大,需要施加更大的电压进行驱动,等效电路中的动态电感增大,导致阻抗增大. 不同厚度的陶瓷片粘接复合后对谐振频率、反谐振频率、阻抗有不同程度的影响,这主要是因为厚陶瓷片和薄陶瓷片粘接复合时,复合体的整体刚度低于其中任一陶瓷片的刚度,并且树脂层的剪切形变会显著降低厚度振动模式下的有效刚度,薄片和树脂层起到“软弹簧”的作用.

表 2 样品的主要电学性能

Table 2 Main electrical properties of the samples

名称	谐振频率(kHz)	反谐振频率(kHz)	静电容 C_0 (nF)	阻抗 $ Z $ (Ω)	平面机电耦合系数(K_p)
样品 1	362.34	394.41	1.49	36.96	0.47
样品 2	89.64	105.92	1.81	129.17	0.68
样品 3	446.24	458.72	3.12	40.12	0.26
样品 4	112.54	119.36	4.87	55.06	0.39
样品 5	72.13	87.68	5.02	18.78	0.73
样品 6	85.65	91.97	2.90	226.62	0.43

同时,由样品 1、2 和 3 的性能结果可知,厚度为 2.5 mm 和 5 mm 的压电陶瓷片叠堆复合后,谐振频率、反谐振频率有了明显的提高. 根据仿真结果选取 2.5 mm 和 5 mm 的压电陶瓷片叠堆,符合阶梯型叠堆模型,将整个叠堆分为两段不同厚度的陶瓷片组成,该非均匀结构的固有振动模态不再是整体同相伸缩,可能为“弯曲”或“非均匀”的应变分布模式,当电激励频率与该结构的某高阶纵向模态频率匹配时,电信号与高阶纵向模态发生谐振,而这个谐振频率远高于单一陶瓷片的基频. 由样品 3、4 和 5 的性能结果可知,复合树脂层数越多,谐振频率、反谐振频率越低,这是因为粘接的层数越多,降频效应越明显. 由样品 4、5 的性能结果可知,厚度为 2.5 mm 和 5 mm 的压电片交替叠堆复合后,谐振频率、反谐振频率没有提高,反而降低. 这是因为谐振频率由叠堆样品的系统刚度和质量的比值决定,不同厚度的压电片交替叠堆时,有效刚度显著降低,总质量增加^[29]. 另一方面,不同厚

度的压电片具有不同的固有频率,它们被机械耦合在一起时,振动能量在不同厚度压电片之间传递和重新分布,较厚片会削弱较薄片的振动响应,使得整体响应变慢,频率下降. 但是,同样由 2.5 mm 和 5 mm 的压电陶瓷片阶梯型叠堆,样品 6 的阻抗较样品 3 大很多,谐振频率、反谐振频率却小很多,这主要是样品 6 的树脂层厚度比样品 3 大很多,相当于在陶瓷片间添加一层较厚的阻尼材料^[30],树脂的刚度较低,使整体结构变得更“软”,从而获得更低的谐振频率和反谐振频率. 因此,样品 3 获得高谐振频率的原因是阶梯型堆叠,并且树脂层厚控制得当,实现叠堆模型与刚度/质量的理想平衡.

此外,由表 2 中静电容和阻抗的变化可以看出,不同厚度压电片叠堆后,静电容 C_0 变大,而阻抗 $|Z|$ 变小,这是由于不同厚度压电片叠堆为并联,总电容为单片电容之和,总电容会增加,导致低频容抗减小,整体阻抗幅值降低,这为调节叠堆的电声阻抗提供

一种参考,使其更容易与放大器输出阻抗匹配,减少信号反射和热损耗。压电叠堆的机电耦合效应与非均匀应力、电场分布、振动模式有关,在结构设计过程中,使应力有效地集中在机电耦合系数更高的区域,可以提高整体的耦合效果。由表2中可以看出,压电陶瓷片叠堆后机电耦合系数有不同程度的减小,这与采用树脂层粘接有关,树脂的柔性和损耗会吸收部分应变,降低整体能量转换效率。在陶瓷片

粘接堆叠过程中,也极有可能端面不平行或受压不均匀,内部出现非均匀应力场,导致部分区域应变降低。

超声换能器的频率带宽是指它能有效工作的频率范围,最常用的计算方法是-3 dB法,指从峰值 G_0 下降到 $G_0/\sqrt{2}$ (即-3 dB点)时所对应的两个频率 f_1 和 f_2 。图7为陶瓷元件样品的导纳曲线。可以看出,样品1、2的导纳峰 $\sqrt{2}/2$ 处的频率带宽分别为8.39 kHz、

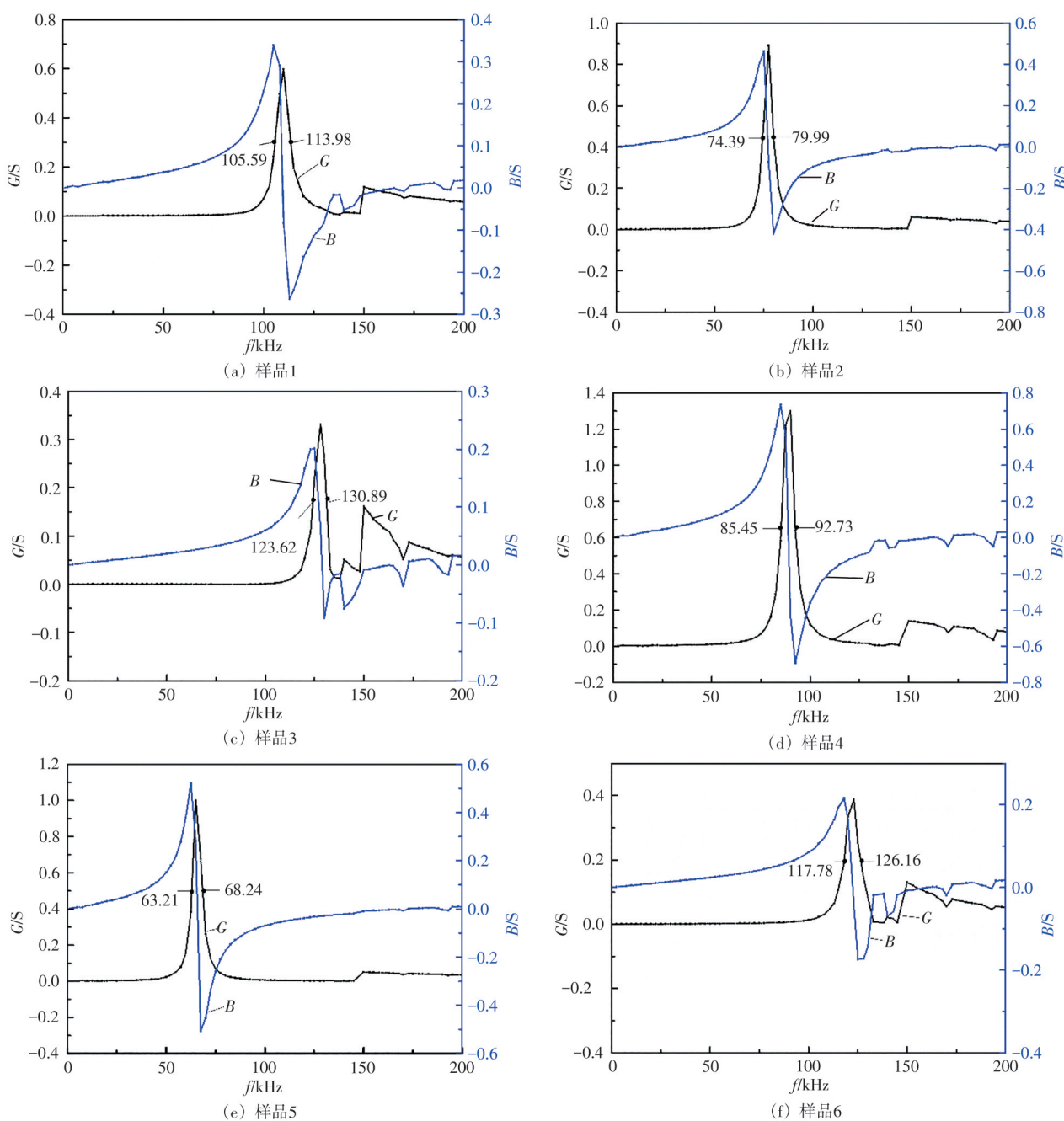


图7 陶瓷元件的导纳曲线

Fig. 7 Admittance curve of the ceramic component

5.6 kHz,说明压电陶瓷片越薄,不仅工作中心频率(谐振频率)向高频移动,其带宽也相应增加.样品3的导纳峰 $\sqrt{2/2}$ 处的频率带宽为7.27 kHz,且高于125 kHz时出现多个小峰,说明不同厚度样品经过阶梯叠堆,引起多模态耦合,而陶瓷片叠堆未造成谐振频率和带宽的明显降低,可能由于不同谐振频率的陶瓷片并联,产生了多模态耦合,形成多个谐振峰叠加的宽频响应.样品4的导纳峰 $\sqrt{2/2}$ 处的频率带宽为7.28 kHz,且高于100 kHz时出现多个小峰,这种结构没有导致带宽明显降低,说明不同厚度样品经过精心的交替叠堆设计,也会引起多模态耦合.样品5的导纳峰 $\sqrt{2/2}$ 处的频率带宽为5.03 kHz,且没有出现多个分裂峰,这种交替结构导致带宽明显降低,极有可能多模态耦合不够明显,说明造成明显的多模态耦合效果与陶瓷片叠堆结构有关,阶梯型叠堆容易引起多模态耦合,而交替叠堆不易引起多模态耦合或耦合效果不够明显.样品6的导纳峰 $\sqrt{2/2}$ 处的频率带宽为8.38 kHz,且高于125 kHz时出现多个小峰.结合表1中样品3、6的树脂层厚度分析,样品6的陶瓷片间添加了更厚的阻尼材料,且为阶梯型叠堆模型,有多模态耦合和阻尼材料的双重效应,导致样品6的带宽较样品3大.因此,样品获得高带宽的原因是阶梯型叠堆或交替叠堆引起多模态耦合,形成多个谐振峰叠加的宽频响应.

综合电学性能与导纳曲线分析,样品3获得高谐振频率,且保持高的频率带宽,是由于厚度为2.5 mm和5 mm的压电片经过薄树脂层粘接,实现阶梯型叠堆引起明显的多模态耦合,最终达到多模态耦合与刚度/质量的理想平衡.

5 结论

本文选取厚度为2.5 mm和5.0 mm的陶瓷片,制备不同叠堆结构的2-2型多层压电复合材料,通过测试相关的电学性能,对叠堆模型进行探究.结果表明,采用多模态耦合技术以及有机聚合物复合,能够很明显地优化叠堆换能器的工作频率及带宽.不同厚度陶瓷片阶梯型叠堆更易引起多模态耦合,而交替叠堆不易引起多模态耦合或耦

合效果不够明显.此外,树脂层厚度太大会形成阻尼,引起工作频率降低,阻抗增大.经过精心设计树脂层厚度,能达到多模态耦合和阻尼的双重效应,使带宽得到明显拓宽.选用适当厚度的陶瓷片,采用环氧树脂胶进行阶梯型叠堆复合,可以提高叠堆换能器的谐振频率,并保持带宽不衰减.

参考文献

- [1]毛宇宸,沈建东,刘涛,等.基于压电超声换能器的被动声学发展及应用综述[J].压电与声光,2024,46(5):617-633+643.
- [2]叶鲜艳,王雪菲,许博成,等.超声换能器微机电系统的研究现状及发展趋势[J].微纳电子技术,2026,63(1):30-39.
- [3]He Y S, Wan H T, Jiang X N, et al. Piezoelectric micromachined ultrasound transducer technology: Recent advances and applications[J]. Biosensors, 2023, 13(1): 55.
- [4]Birjis Y, Swaminathan S, Nazemi H, et al. Piezoelectric micromachined ultrasonic transducers (PMUTs): Performance metrics, advancements, and applications[J]. Sensors, 2022, 22(23): 9151.
- [5]Mishra A K, Janani Kavi Priya V S, Pradeep K, et al. Smart materials for ultrasonic piezoelectric composite transducer: A short review[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 2064-2069.
- [6]莫喜平.水声换能器发展中的技术创新[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2018,46(3):1-12.
- [7]桑永杰.低频宽带水声换能器研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [8]孔凡国,陈然然,段文科.高频医用超声换能器的研究现状及发展趋势[J].功能材料与器件学报,2015,21(5):133-138.
- [9]彭友霖,周艳红.医用超声换能器的现状与发展前景[J/OL].中华医学超声杂志(电子版),2009,6(1):87-91.
- [10]付丽媛,李发琪.高强度聚焦超声换能器[J].生物医学工程学杂志,2009,26(3):667-670.
- [11]张凯.高频宽带压电复合材料换能器研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [12]鲜晓军,林书玉,王登攀,等.基于1-3-2型压电复合宽频带水声换能器研究[J].压电与声光,2014,36(4):491-493+497.
- [13]黄启国.高频宽带指向性可控的圆柱阵换能器的研究[D].北京:北京信息科技大学,2021.
- [14]季博成.超宽带中高频换能器研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
- [15]纪跃波,杨宇恒,蒙晨琛,等.一种压电换能器的动态阻抗匹配方法与频率跟踪[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(3):111-117.
- [16]Lee D J, Kwak M S, Kang H Y. Design and development of a broad-

- band ultrasonic transducer operating over the frequency range of 40 to 75 kHz[J]. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 47(3): 292-301.
- [17] Ji B C, Hong L J, Lan Y. Ultra-wide operation band of the high-frequency underwater acoustic transducer realized by two-layer 1-3 piezoelectric composite[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 150(5): 3474-3484.
- [18] 魏博文. 基于声谐振超声的宽频激励技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- [19] 王颖颖. 基于弛豫铁电单晶的超宽带纵振动换能器平面阵研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [20] 臧柳菲. 弛豫铁电单晶水声发射换能器的带宽拓展研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [21] Brungart D S, Davidson A J. Transducer variability in speech-in-noise testing: Considerations related to stimulus bandwidth[J]. American Journal of Audiology, 2024, 33(3): 1070-1076.
- [22] Yang Y X, Zhu K, Sun E W, et al. Ultrabroad-bandwidth ultrasonic transducer based on Sm-doped PMN-PT ceramic/epoxy 1-3 composite[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 346: 113873.
- [23] 苏晋涛, 王宏伟. 宽带高灵敏水声换能器的研究[J]. 压电与声光, 2023, 45(5): 759-768.
- [24] 魏彤, 王宏伟, 苏晋涛. 一种高频宽带横向叠堆型换能器的研制[J]. 电子元件与材料, 2024, 43(4): 474-480.
- [25] 朱棵. 基于声阻抗梯度匹配层的宽带高灵敏度超声换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [26] 孙瑛琦. 匹配层对1-3型压电复合材料聚焦换能器带宽影响的研究[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2019.
- [27] 田欣. 打孔型宽频带换能器的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [28] 张军, 李向东, 任奕菲. PMN-PZT 压电陶瓷的制备与电学性能研究[J]. 湖北理工学院学报, 2022, 38(3): 28-34.
- [29] 王晨青, 马建敏. 大功率夹心式压电换能器结构参数计算分析及设计[J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 130-137+220.
- [30] 董尊成. 超声探伤用换能器中阻尼材料匹配的考虑[J]. 无损探伤, 1996, 20(1): 39-40.
- (责任编辑: 肖丽, 殷锋, 付强, 张阳, 和力新; 英文编辑: 郑玉才, 周序林)