

基于 1-3 型压电单晶复合材料的高频宽带发射换能器

白 玮¹, 王佳荣¹, 王 婷², 杜红亮², 李 飞², 徐 卓², 许欣然¹, 郑震宇¹

(1. 杭州应用声学研究所, 声纳技术重点实验室, 杭州 310023;

2. 西安交通大学, 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710054)

摘 要: 1-3 型压电单晶复合材料结合弛豫铁电单晶与复合材料的优势, 具有压电常数高、机电耦合系数极大、声阻抗低等特点, 是理想的高频发射换能器压电元件。基于 1-3 型压电单晶复合材料设计并研制了高频宽带发射换能器, 根据理论计算分析了压电单晶复合材料的性能特点, 利用有限元建模仿真优化了换能器结构, 研制的 1-3 型压电单晶复合材料发射换能器在 250~410 kHz 范围内发送电压起伏不超过 3 dB, 工作带宽达到 160 kHz, 最大发送电压响应达 178.4 dB, 性能大大优于同尺寸结构的 1-3 型压电陶瓷复合材料高频换能器。运用 1-3 型压电单晶复合材料制作高频发射换能器可有效拓宽工作频带, 提高水下声发射能力。

关键词: 1-3 型压电单晶复合材料; 高频发射换能器; 宽频带; 水声

中图分类号: O427 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)03-0556-07

网络出版时间: 2022-01-24



A High-frequency Wideband Transmitting Transducer Based on 1-3 Piezoelectric Single Crystal Composite

BAI Wei¹, WANG Jiarong¹, WANG Ting², DU Hongliang², LI Fei², XU Zhuo², XU Xinran¹, ZHENG Zhenyu¹

(1. Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310023, China;

2. Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: 1-3 piezoelectric single crystal composites with relaxor ferroelectric single crystals and composites as ideal piezoelectric elements in high-frequency transmitting transducers possess the superior characteristics including high piezoelectric constants, ultrahigh electromechanical coupling factors, and low acoustic impedance. A high-frequency wideband transmitting transducer based on 1-3 piezoelectric single crystal composite was designed and manufactured. The properties of piezoelectric single crystal composites were analyzed theoretically, and the transducer structure was optimized *via* simulation by finite element method. The 1-3 piezoelectric single crystal composite transducer produced has a bandwidth of 160 kHz, while the ripple of the transmitting voltage response does not exceed 3 dB in the frequency range from 250 kHz to 410 kHz. The maximum transmitting voltage response is 178.4 dB. The underwater transmitting performances of the single crystal composite transducer are superior to those of the ceramic composite transducer with the same structure and size. Fabricating high-frequency transmitting transducers using 1-3 piezoelectric single crystal composites can broaden the operating bandwidth effectively, and improve the ability of acoustic emission underwater.

Keywords: 1-3 Piezoelectric single crystal composite; high-frequency transmitting transducer; wideband; underwater acoustics

1-3 型压电复合材料由压电材料和聚合物填充材料按一定体积分数复合而成^[1], 其中聚合物材料充当连续相, 锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷等压电材料作为非连续相。此类压电复合材料具有密度小、声阻抗低、机械 Q 值低、机电耦合系数大等

特点, 在水下探测、医疗超声等领域有巨大应用价值^[2-4]。

基于 1-3 型压电复合材料的发射换能器易于共形设计、有效机电耦合系数高、工作频带宽, 尤其在高频发射换能器设计中具有优势。Howarth 等研

收稿日期: 2021-09-01。 修订日期: 2021-09-14。

第一作者: 白 玮(1990—), 男, 博士, 高级工程师。

Received date: 2021-09-01. Revised date: 2021-09-14.

Corresponding author: BAI Wei (1990—), male, Ph.D., Senior Engineer.

E-mail: baiwei_hz715@aliyun.com

制了基于 1-3 型压电复合材料的大面积发射换能器, 其发送电压响应在 1~100 kHz 范围内线性增大^[5]。Elmash 等在 1-3 型压电复合材料上制备了匹配层, 研制了用于水声通信的宽带宽波束换能器^[6]。耿学仓等面向超声检测应用研制了基于 1-3 型压电复合材料的横波和纵波换能器^[7]。刘殿峰等研究了 1-3 型压电复合材料换能器辐射面振动模态及相位与压电相分布间的关系, 研制了非均匀振动的复合材料换能器^[8]。张凯等利用厚度振动和一阶横向振动模态耦合实现了 1-3 型压电复合材料换能器的带宽拓展^[9], 在此工作基础上张凯等设计了金属-树脂复合材料双匹配层高频换能器, 发送电压响应在 ± 3 dB 内起伏的工作带宽为 43~155 kHz^[10]。李莉等设计并研制由 1-3-2 型压电复合材料元件排布组成的圆柱形水声换能器阵, 谐振频率为 72 kHz, -3 dB 带宽为 7 kHz^[11]。杜海波等在 1-1-3 型压电复合材料声辐射端引入梯形匹配层结构, 增大辐射面积, 研制了谐振频率为 360 kHz、最大发送电压响应为 169.4 dB、接收灵敏度为 -190 dB 的收发两用水声换能器^[12]。

目前大部分用于水声换能器研究的压电复合材料以压电陶瓷为压电相, 研究者们引入了匹配层设计, 通过阻抗匹配及振动模态耦合, 来实现拓宽高频发射换能器工作频带的目的, 然而匹配层材料的长时稳定性对换能器的服役特性产生一定负面影响。除匹配层设计外, 换能器发射频带拓展策略还有第 2 条路线, 即优化压电复合材料性能, 提高其机电耦合系数, 进一步降低机械 Q 值。近年来, 高性能弛豫铁电单晶的迅速发展为第 2 条路线带来了可能。

自 20 世纪 50 年代以来, 多种具有更好机电表现的人工含铅钙钛矿结构单晶被生长出来, 这类材料被称为弛豫铁电单晶。常见的弛豫铁电单晶, 如二元系的铌镁酸铅-钛酸铅 [$x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3$, PMN-PT] 和三元系的铌钽酸铅-铌镁酸铅-钛酸铅 [$x\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-y\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-z\text{PbTiO}_3$, PIN-PMN-PT], 压电常数 d_{33} 可达到 2 500 pC/N, 机电耦合系数 K_t 甚至超过 90%^[13-17], 其 33 方向的压电系数和机电耦合系数分别是传统的 PZT 压电陶瓷的 4 倍左右和 1.2 倍以上, 性能优越。将弛豫铁电单晶制备成 1-3 型压电单晶复合材料, 这些性能参数的优势得以保留, 同时可有效降低单晶的声阻抗, 保障机电耦合系数, 制成发射换能器后可同时实现高发送电压响应与宽工作频带。

本工作提出了基于 1-3 型压电单晶复合材料的高频宽带发射换能器设计方法, 利用有限元仿真方法对换能器性能进行了优化, 并研制了基于三元弛豫铁电单晶 PIN-PMN-PT 复合材料的高频宽带换能器, 测试验证了换能器的水下声发射性能, 并与压电陶瓷复合材料换能器进行了性能比对。

1 仿真与实验方法

1.1 仿真设计

有限元 (FEM) 仿真设计运用 COMSOL Multiphysics 软件, 建立 1-3 型压电单晶复合材料换能器的结构模型。通过在压电材料上添加电压参数模拟水域中声场分布情况, 评估换能器性能, 并进行结构与性能优化设计。

1.2 实验测试

1-3 型压电单晶复合材料以 PIN-PMN-PT 为压电相, 环氧树脂为聚合物相。1-3 型压电单晶复合材料的阻抗/导纳曲线由阻抗分析仪测得。

换能器的声发射性能在消声水池中运用脉冲法测得。发送电压响应 (TVR) 的计算公式为:

$$S_V = V_0 \frac{d}{M_0 V} \quad (1)$$

式中: V_0 为标准水听器开路电压; d 为换能器与水听器距离; M_0 为标准水听器灵敏度; V 为待测换能器激励电压。

2 结果与讨论

2.1 1-3 型压电单晶复合材料参数分析

压电单晶复合材料以高性能弛豫铁电单晶作为压电相。以传统压电复合材料的等效参数理论为基础, 综合考虑弛豫铁电单晶与聚合物材料的贡献, 分析 1-3 型压电单晶复合材料的性能参数。遵循压电复合材料等效参数模型^[1,18-19]得到的压电复合材料本构方程, 结合 PIN-PMN-PT 和环氧树脂的材料参数, 可计算复合材料的等效性能参数。根据以下公式计算厚度振动模态下的等效密度、机电耦合系数、声阻抗:

$$\bar{\rho} = v\rho^{\text{sc}} + (1-v)\rho^{\text{p}} \quad (2)$$

$$\bar{K}_t = \bar{e}_{33} / (\bar{c}_{33}^{\text{D}} \bar{e}_{33}^{\text{S}})^{1/2} \quad (3)$$

$$\bar{Z}_a = (\bar{c}_{33}^{\text{D}} \bar{\rho})^{1/2} \quad (4)$$

式中: v 为单晶的体积分数; ρ^{sc} 为单晶密度; ρ^{p} 为聚合物填充相密度; $\bar{e}_{33}$ 为 33 方向等效压电应力常数; $\bar{c}_{33}^{\text{D}}$ 为 33 方向等效弹性系数; $\bar{e}_{33}^{\text{S}}$ 为 33 方向等

效介电常数。上述等效参数由压电复合材料本构方程求得。

PIN-PMN-PT 与环氧树脂的材料参数分别见表 1 与表 2。将其代入等效参数模型和式(1)~式(4)，推算 1-3 型压电单晶复合材料的等效性能参数，与分别以压电陶瓷 PZT-4 和 PZT-5A 为压电相的 1-3 型压电陶瓷复合材料的等效性能参数进行对比，理论计算的等效参数规律见图 1。

表 1 PIN-PMN-PT 材料参数

Table 1 Material properties of PIN-PMN-PT

ρ^{sc} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\varepsilon_{11,\text{r}}^{\text{S}}$	$\varepsilon_{33,\text{r}}^{\text{S}}$	$e/(\text{C}\cdot\text{m}^{-2})$			c^{E}/GPa					
			e_{31}	e_{33}	e_{15}	c_{11}^{E}	c_{12}^{E}	c_{13}^{E}	c_{33}^{E}	c_{44}^{E}	c_{66}^{E}
8 196	734	647	-4.4	18.1	6.9	116.1	102.4	104.6	117.7	65.1	64.8

ρ^{sc} is density; $\varepsilon_{\text{r}}^{\text{S}}$ is relative permittivity, $\varepsilon_{\text{r}}^{\text{S}} = \varepsilon^{\text{S}} / \varepsilon_0$; e is piezoelectric stress constant; c^{E} is elastic coefficient.

表 2 环氧树脂材料参数

Table 2 Material properties of epoxy resin

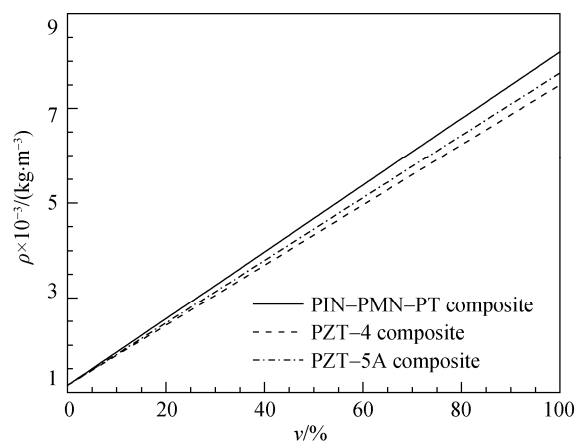
$\rho^{\text{p}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	Poisson's ratio	$\varepsilon_{\text{r}}^{\text{p}}$
1 150	30	0.38	4

ρ^{p} is density; E is Young's modulus; $\varepsilon_{\text{r}}^{\text{p}}$ is relative permittivity.

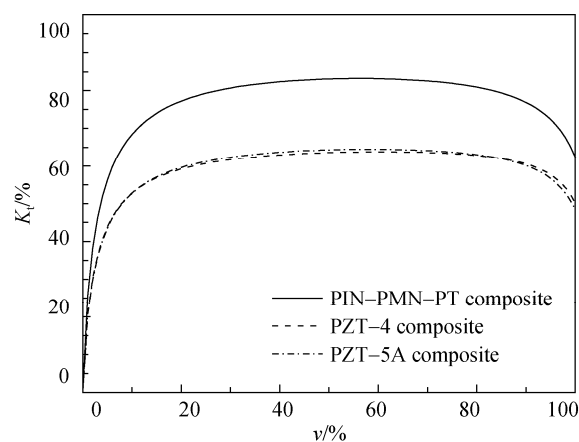
由图 1 可知，压电相为 PIN-PMN-PT 的 1-3 型压电单晶复合材料的等效密度和等效声阻抗随压电相分数增加而线性或近似线性提高，等效机电耦合系数则在一定范围内呈稳定状态，其机电耦合系数远超过压电相为 PZT-4 和 PZT-5A 的复合材料。压电相体积分数过低，压电单晶柱受到聚合物相弹性边界载荷影响机电耦合系数急剧降低；压电相体积分数过高，聚合物相对单晶柱的侧向夹持作用强烈，厚度振动模式的 K_{t} 减小。考虑水下应用时面临的水的低声阻抗(约为 1.5 MRayl)，综合选择压电相体积分数，可在声阻抗匹配和高机电耦合系数间找到平衡。

2.2 1-3 型压电单晶复合材料换能器仿真设计

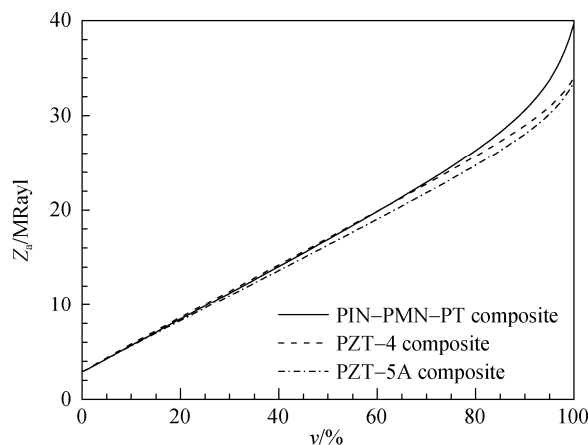
运用有限元建模仿真手段分析基于 1-3 型压电单晶复合材料的高频换能器的性能。由于 1-3 型压电单晶复合材料的压电相小柱与聚合物相间存在大量界面，在有限元建模时面临网格划分困难和运算规模巨大的问题。鉴于压电单晶复合材料周期分布特点，通过分析 1-3 型压电复合材料中有代表性的部分来预测整体结构的性能可以起到简化有限元模型的目的^[10,20]。在发射换能器中，除压电单晶复合材料边缘处的周期单元外，其他单元负载基本相同，因此分析其中的一个单元可估计整个换能器性能。



(a) Effective density



(b) Effective electromechanical coupling factor



(c) Effective acoustic impedance

图 1 压电复合材料等效性能参数随压电相体积分数变化规律曲线

Fig. 1 Effective coefficient curves of the piezoelectric composites in accordance with various volume fractions of the piezoelectric domains

利用 COMSOL 软件建立 1-3 型压电复合材料的有限元模型。压电相用 PIN-PMN-PT，聚合物用环氧树脂，压电柱取长方柱形(截面为正方形)。这

里只建立 25%周期单元的有限元模型,如图 2 所示。换能器中用于灌注与水密的弹性体材料为声透射材料,在仿真中忽略,辐射面外设水域。

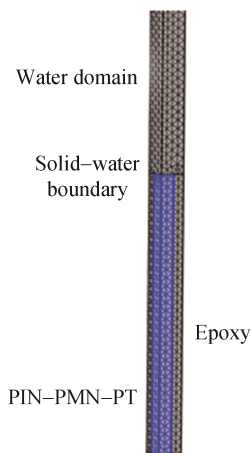


图 2 1-3 型压电单晶复合材料换能器的 1/4 周期单元有限元模型

Fig. 2 Quarter-unit FEM model of the 1-3 piezoelectric single crystal based transducer

分别针对模型中的复合材料厚度、压电相体积百分数、单晶宽度尺寸等进行参数化扫描,分析参数变化对声发射特性的影响趋势,如图 3 所示。

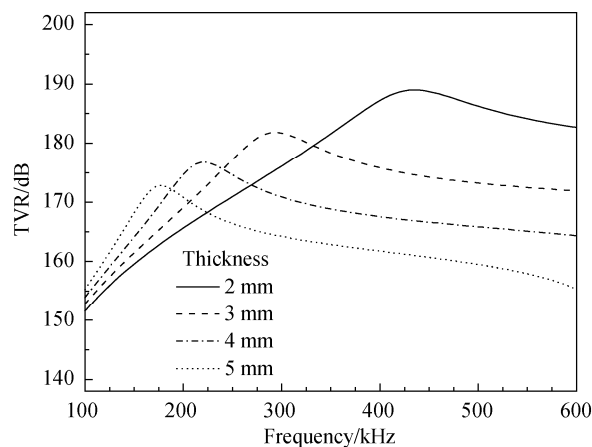
由图 3a 可知,随复合材料厚度增加,换能器发送电压响应最大值向低频移动,对应复合材料厚度振动模态的谐振频率下降。由图 3b 可见,随压电相体积分数比升高,最大发送电压响应对应的工作频率向低频方向微小变化,发送电压响应呈明显提升趋势,同时发送电压响应峰变得尖锐,带宽略微收窄。由图 3c 可见,压电相体积百分比不变时,压电单晶柱宽度变化对厚度振动谐振和发送电压响应影响不大。

为研制宽带发射的高频换能器,复合材料压电相体积分数比不宜过高,厚度选择受换能器工作频率选择影响。作为对照,进行了基于 PZT-4 的 1-3 型压电陶瓷复合材料换能器的性能仿真, -3 dB 带宽也明显较单晶复合材料换能器窄。

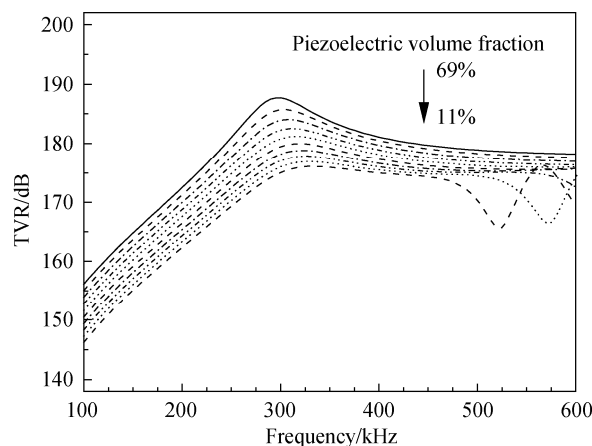
2.3 1-3 型压电单晶复合材料换能器研制与测试

2.3.1 1-3 型压电单晶复合材料阻抗分析 1-3 型压电单晶材料根据理论分析与有限元仿真优化的要求进行设计。传统上,1-3 型压电复合材料采用排列-浇注法或切割-填充法制备,最近一种 3D 打印辅助的切割-插入制备技术被提出,制作大面积压电单晶复合材料,可通过筛选压电单晶柱性能,实现复合材料的性能优化^[21]。基于此技术制备了以 PIN-PMN-PT 单晶为压电相的 1-3 型压电单晶复合

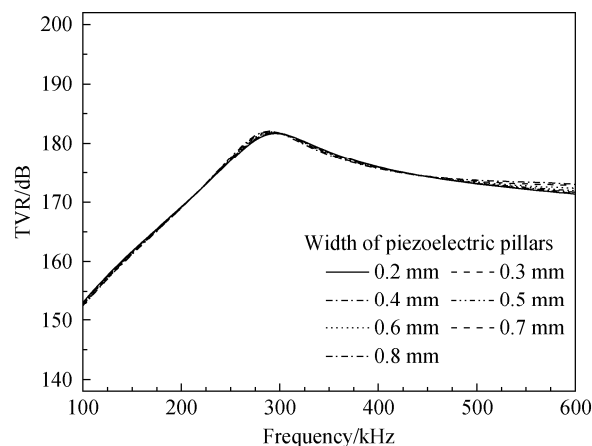
材料 (PIN-PMN-PT-based composite, 记为 PIMNTC-1), $\phi 50$ mm, 压电相含量为 30%(质量分数), 厚度 2.8 mm。复合材料样品如图 4 所示。



(a) Composite thickness



(b) Volume fraction of piezoelectric domains



(c) Width of single crystal pillars

图 3 1-3 型压电单晶复合材料换能器发送电压响应随复合材料结构参数变化规律仿真结果

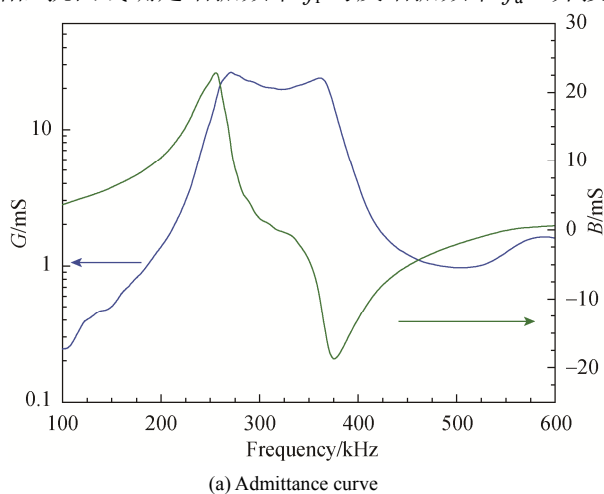
Fig. 3 Simulation results of transmitting voltage responses of 1-3 piezoelectric single crystal composite based transducer in accordance with various structure values



图4 1-3型压电单晶复合材料 PIMNTC-1 实物图

Fig. 4 Image of 1-3 piezoelectric single crystal composite PIMNTC-1

对复合材料 PIMNTC-1 进行压电常数测试和阻抗分析, 其空气中导纳曲线与阻抗曲线见图 5。根据阻抗曲线确定谐振频率 f_r 与反谐振频率 f_a , 并按



(a) Admittance curve

式(5)~式(6)计算厚度振动模态的机电耦合系数 $\bar{K}_t$ 和声阻抗 $\bar{Z}_a$

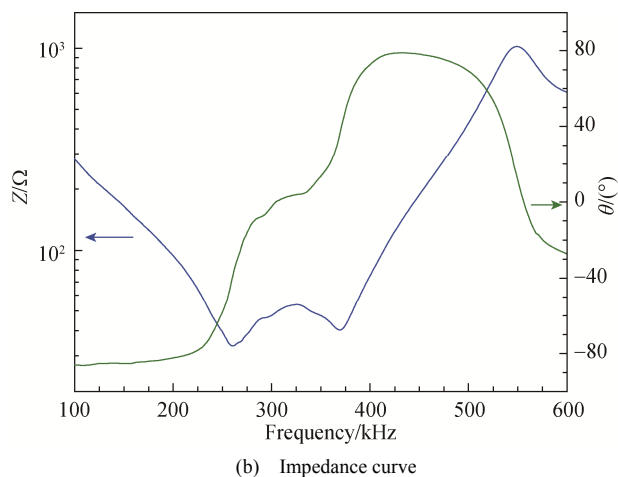
$$\bar{K}_t = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_a - f_r}{f_a}\right)} \quad (5)$$

$$\bar{Z}_a = \bar{\rho}c = 2\bar{\rho}f_a t \quad (6)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为等效密度; t 为复合材料厚度。

由图 5 可知, PIMNTC-1 的厚度振动方向的谐振与反谐振频率差别较大, 体现宽带特点。谐振峰出现一定程度畸变, 体现 2 个谐振峰, 分别出现在 258 kHz 和 372 kHz 附近, 反谐振频率出现在 548 kHz 附近。

表 3 为 PIMNTC-1 和谐振频率接近的 1-3 型压电陶瓷复合材料(PZT4C-1)的相关等效性能参数。



(b) Impedance curve

图5 压电单晶复合材料 PIMNTC-1 的导纳曲线与阻抗曲线

Fig. 5 Admittance curve and impedance curve of PIMNTC-1

表3 1-3型压电复合材料相关性能参数测试结果

Table 3 Related property results of 1-3 piezoelectric composites

Composite type	$d_{33}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	C_p/nF	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	f_r/kHz	f_a/kHz	$\bar{K}_t/\%$
PIMNTC-1	1 188	6.39	1 029	258	548	84.3
PZT4C-1	264	0.89	256	299	349	55.5

1-3 型压电单晶复合材料 PIMNTC-1 体现出明显优于 1-3 型压电陶瓷复合材料 PZT4C-1 的材料性能。PIMNTC-1 的压电常数、介电常数、机电耦合系数分别是 PZT4C-1 的 4.5、5.8 倍和 1.5 倍。材料的压电常数与发射换能器的发送电压直接相关, 机电耦合系数越高则换能器的发射带宽越宽, 有利于提升换能器性能, 因此具有更突出材料性能参数的 PIMNTC-1 用于高频发射换能器时将提升其发送电压响应并拓宽频带。复合材料的谐振与反谐振频率结果也印证了这一点。

2.3.2 压电单晶复合材料高频发射换能器性能分析根据仿真设计制作基于 1-3 型压电单晶复合材

料的高频宽带换能器(PIMNTC-1-T), 如图 6 所示。换能器中, PIMNTC-1 作为压电元件, 元件后设置硬质泡沫背衬, 辐射面一侧灌注聚氨酯水密, 换能器尺寸为 $\phi 70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。作为对照, 运用 PZT4C-1 制作了相同尺寸结构的高频换能器 PZT4C-1-T。

图 7 为 1-3 型压电单晶复合材料换能器在空气中和水中的导纳曲线。空气介质中, PIMNTC-1-T 的导纳曲线与图 5a 中 PIMNTC-1 的情形有所区别。这是由于换能器结构中, 电激励下 PIMNTC-1 元件与水密灌注层聚氨酯间存在较强的耦合作用, 元件的模量相对较低, 低于 1-3 型陶瓷复合材料, 换能器的厚度振动谐振附近出现较多横向振动与厚



图 6 基于 1-3 型压电单晶复合材料的高频发射换能器 PIMNTC-1-T 实物图

Fig. 6 Image of high-frequency transmitting transducer PIMNTC-1-T based on 1-3 piezoelectric single crystal composite

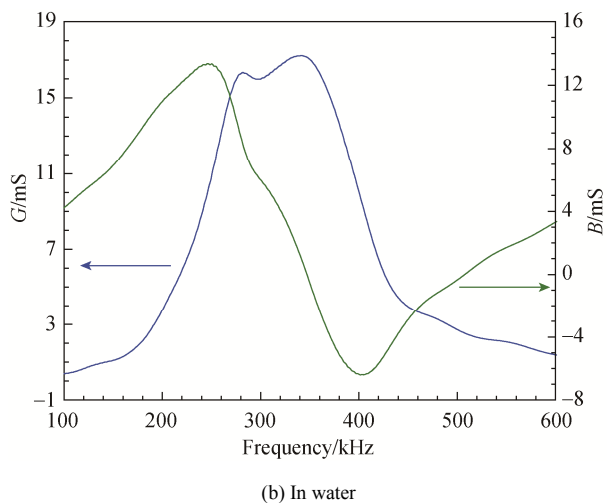
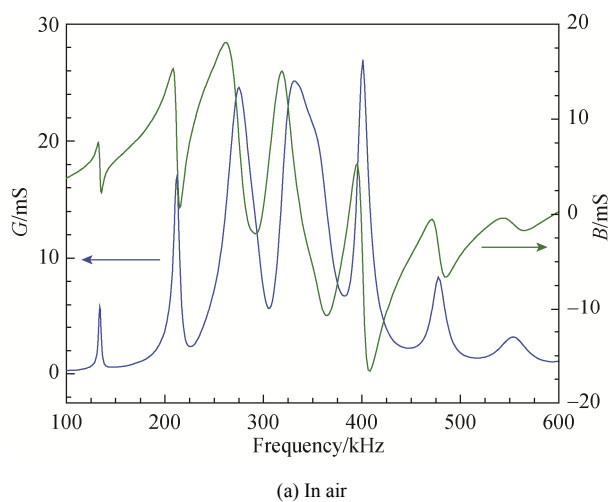
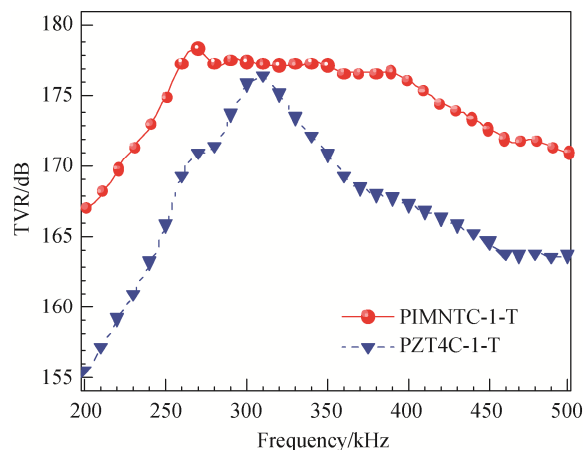


图 7 换能器 PIMNTC-1-T 在空气和水中的导纳曲线
Fig. 7 Admittance curve of the transducer PIMNTC-1-T in air and in water, respectively

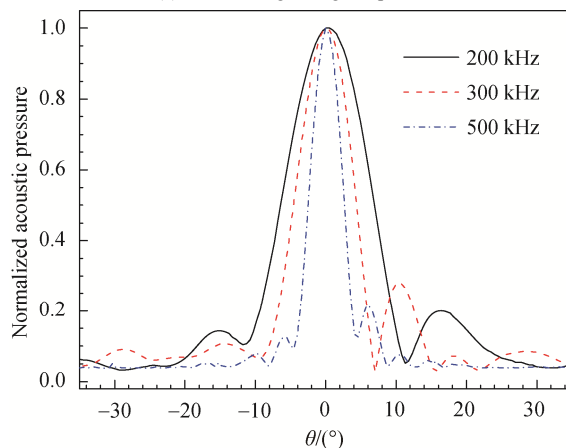
度振动耦合的振动模态, 因此在 213、275、330、402 kHz 处体现谐振, 电导峰值分别为 16.9、24.6、25.1、26.9 mS, 其中, 330 kHz 处厚度振动模态纯净度高。换能器进入水中, 水介质加大了复合材料元件的负载, 横向振动模态受到抑制, 图

7b 中体现的谐振模态, 只在 280~344 kHz 间出现较宽的双峰, 电导峰值分别为 16.3 mS 和 17.2 mS, 在宽频带内电导起伏较小。

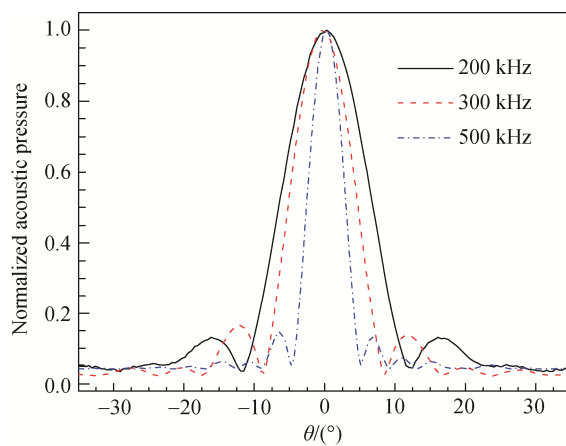
在消声水池中测试了 1-3 型压电单晶复合材料高频宽带换能器的发送电压响应, 与 1-3 型压电陶瓷复合材料高频换能器的发送电压响应进行对比, 结果见图 8a。PIMNTC-1-T 体现水下超宽带发射



(a) Transmitting voltage response



(b) Transmitting directivity of PIMNTC-1-T



(c) Transmitting directivity of PZT4C-1-T

图 8 换能器在水中的发送电压响应及发射指向性测试结果
Fig. 8 Transmitting voltage response and transmitting directivity results of transducers in water

的优势, 在 250~410 kHz 范围内发送电压响应起伏不超过 3 dB, 工作带宽达到 160 kHz, 最大发送电压响应为 178.4 dB。与 1-3 型压电陶瓷复合材料高频换能器 PZT4C-1-T 相比, -3 dB 工作带宽提高约 120 kHz, 最大发送电压响应提高约 2 dB。

图 8b 和图 8c 分别为 1-3 型压电单晶复合材料高频换能器 PIMNTC-1-T 和压电陶瓷复合材料换能器 PZT4C-1-T 在不同发射频率下的指向性。PIMNTC-T 在 300 kHz 处的指向性指数 $2\theta_{-3dB}$ 为 6.5°, 最大旁瓣级为 -11.1 dB。PZT4C-T 在 300 kHz 频率的指向性指数 $2\theta_{-3dB}$ 为 7.3°, 最大旁瓣级为 -15.7 dB。两换能器指向性差别较小。

换能器水下声性能实测结果与有限元仿真结果具有一致性, 但存在一定偏差。偏差的主要来源包括: 1) 有限元模型简化忽略了聚氨酯水密灌注层对换能器性能的影响; 2) 1-3 型压电单晶复合材料可能引入压电柱及界面缺陷, 产生谐振峰的变形, 对换能器性能产生影响。

3 结论

对基于 1-3 型压电单晶复合材料的高频宽带发射换能器进行了研究, 运用理论计算分析了压电单晶复合材料的等效性能参数, 并用有限元建模仿真优化了用于换能器的复合材料结构参数, 研制的高频发射换能器在 250 kHz~410 kHz 范围内发送电压起伏不超过 3 dB, 工作带宽达到 160 kHz, 最大发送电压响应达 178.4 dB, 性能优于同尺寸结构的 1-3 型压电陶瓷复合材料高频换能器。

1-3 型压电单晶复合材料因其出色的压电常数、机电耦合系数等, 非常适用于高频宽带发射换能器的研发。

参考文献:

- [1] NEWNHAM R E, SKINNER D P, CROSS L E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites[J]. *Mater Res Bull*, 1978, 13(5): 525–536.
- [2] GURURAJA T R, SCHULZE W A, CROSS L E, et al. Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites[J]. *IEEE Trans Son Ultrason*, 1985, 32(4): 481–498.
- [3] 王冬梅, 吴孟强, 张树人. 超声和水声用压电复合材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2009, 23(12): 56–60.
WANG Dongmei, WU Mengqiang, ZHANG Shuren. *Mater Rep* (in Chinese), 2009, 23(12): 56–60.
- [4] SHUNG K K, CANNATA J M, ZHOU Q F. Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: A review[J]. *J Electroceram*, 2007, 19(1): 141–147.
- [5] HOWARTH T R, TING R Y. Electroacoustic evaluations of 1-3 piezocomposite sonopanel materials[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2000, 47(4): 886–894.
- [6] ELMASH I C, KOYMEN H. A wideband and a wide-beamwidth acoustic transducer design for underwater acoustic communications[C] // *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, Singapore, 2007: 1–5.
- [7] 耿学仓, 李明轩. 检测超声换能器用 1-3 型压电环氧复合材料及换能器的研究[J]. *应用声学*, 1991, 10(5): 10–14.
GENG Xuecang, LI Mingxuan. *J Appl Acoust* (in Chinese), 1991, 10(5): 10–14.
- [8] 刘殿锋, 李明轩. 1-3 型压电复合材料非均匀振动换能器的研究[J]. *应用声学*, 1998, 17(1): 11–14, 42.
LIU Dianfeng, LI Mingxuan. *J Appl Acoust* (in Chinese), 1998, 17(1): 11–14, 42.
- [9] 张凯, 蓝宇, 李琪. 1-3 型压电复合材料宽带水声换能器研究[J]. *声学学报*, 2011, 36(6): 631–637.
ZHANG Kai, LAN Yu, LI Qi. *Acta Acust* (in Chinese), 2011, 36(6): 631–637.
- [10] 张凯, 唐义政, 仲林建, 等. 双匹配层高频宽带换能器研究[J]. *声学技术*, 2017, 36(4): 86–88.
ZHANG Kai, TANG Yizheng, ZHONG Linjian, et al. *Technic Acousti* (in Chinese), 2017, 36(4): 86–88.
- [11] 李莉, 王丽坤, 秦雷. 有限元法分析 1-3 型压电复合材料换能器[J]. *压电与声光*, 2015, 37(3): 441–445.
LI Li, WANG Likun, QIN Lei. *Piezoelectr Acoustoopt* (in Chinese), 2015, 37(3): 441–445.
- [12] 杜海波, 秦雷, 仲超, 等. 基于 1-1-3 型压电复合材料水声换能器性能分析[J]. *西北工业大学学报*, 2019, 37(2): 386–392.
DU Haibo, QIN Lei, ZHONG Chao, et al. *J Northwestern Polytech Univ* (in Chinese), 2019, 37(2): 386–392.
- [13] ZHANG S, LI F. High performance ferroelectric relaxor-PbTiO₃ single crystals: status and perspective[J]. *Appl Phys Rev*, 2012, 11(3): 031301.
- [14] 许桂生, 罗豪甦, 齐振一, 等. 弛豫型铁电单晶 Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ 电畴结构与铁电特性的关系[J]. *硅酸盐学报*, 2000, 28(6): 560–565.
XU Guisheng, LUO Haosu, QI Zhenyi, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2000, 28(6): 560–565.
- [15] LI X, LUO H. The growth and properties of relaxor-based ferroelectric single crystals [J]. *J Am Ceram Soc*, 2010, 93(10): 2915–2928.
- [16] 陈春天, 张景云, 吴丰民, 等. 单斜相弛豫铁电单晶 0.24PIN-0.43PMN-0.33PT 的电光性能[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(11): 1592–1596.
CHEN Chuntian, ZHANG Jingyun, WU Fengmin, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2015, 43(11): 1592–1596.
- [17] 李飞, 张树君, 徐卓. 压电效应——百岁铁电的守护者[J]. *物理学报*, 2020, 69(21): 73–85.
LI Fei, ZHANG Shujun, XU Zhuo. *Acta Phys Sin* (in Chinese), 2020, 69(21): 73–85.
- [18] SMITH W A, AULD B A. Modeling 1-3 composite piezoelectrics: Thickness-mode oscillations[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 1991, 38(1): 40–47.
- [19] CHAN H L W, UNSWORTH J. Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1-3 composites used in ultrasonic transducer applications[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 1989, 36(4): 434–441.
- [20] BAI W, WANG J R, XU X R, et al. FEM simulation of 1-3 piezoelectric composites based on relaxor ferroelectric single crystals and their properties as under water transducers[C] // *The 14th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, Shijiazhuang, 2019: 1–5.
- [21] WANG T, ZHAO X D, DU H L, et al. Large-area piezoelectric single crystal composites via 3D-printing assisted dice-and-insert technology for hydrophone applications[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2021, 68(10): 3241–3248.