

## 柱状和声学表面结构的压电超声换能器\*

林基艳<sup>1)2)</sup> 李耀<sup>3)</sup> 陈诚<sup>2)</sup> 林书玉<sup>2)†</sup> 郭林伟<sup>1)</sup> 徐洁<sup>1)</sup>

1) (榆林学院, 榆林市大数据与智能决策重点实验室, 榆林 719000)

2) (陕西师范大学, 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119)

3) (长庆油田分公司第二采气厂, 榆林 719000)

(2025年7月9日收到; 2025年7月31日收到修改稿)

圆孔型声子晶体, 因结构简单、制作方便, 被广泛应用于换能器的性能优化研究. 研究发现, 圆孔型声子晶体结构的孔隙越大, 弹性波的能量局域化效果越好. 但是高孔隙度意味着圆孔间的距离较窄, 会大幅降低结构的机械强度. 柱状声子晶体结构的提出, 解决了圆孔型声子晶体结构需要高孔隙度, 对结构尺寸精度要求高的问题, 为压电超声换能器的性能优化提供了新思路. 利用在换能器的前、后盖板上加工的柱状和声学表面结构, 操控声波的传输行为和路径, 从而实现对接能器中耦合振动的有效控制, 不仅解决了换能器因振动能量不能均匀传递而导致的辐射面振幅分布不均匀的问题, 还使其辐射面的位移振幅得到了显著提升, 提高了换能器的工作效率. 仿真计算结果揭示了柱状和声学表面结构的配置对接能器性能的影响规律, 实验结果证明柱状和声学表面结构可以有效提升压电超声换能器的性能, 研究可以为换能器的工程计算及优化提供系统的设计理论证明.

**关键词:** 孔型声子晶体, 柱状和声学表面结构, 压电超声换能器, 性能优化**PACS:** 43.40.+s, 43.35.+d, 43.38.+n, 63.20.D-**DOI:** 10.7498/aps.74.20250901**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250901

## 1 引言

压电超声换能器的应用领域不同, 对其性能指标的要求也不同, 因此, 需要根据换能器的具体应用场景, 对其进行合理设计. 在超声塑料焊接加工中, 为了确保超声能量能够高效、稳定地传递输出, 不仅要求换能器辐射面上具有均匀的位移振幅分布, 而且要求输出的位移振幅较大, 从而提高焊接效率以达到焊接加工高效性和可靠性的要求. 为此, 超声技术工作者们进行了大量的研究探索<sup>[1-7]</sup>. 声子晶体结构的带隙、局域化和波导特性为其在换能器领域的应用提供了广阔的可能性, 因此一些研究<sup>[8-13]</sup>将声子晶体结构引入到换能器的优化设计

中, 尤其是圆孔型声子晶体结构<sup>[14-18]</sup>, 因具有结构简单、制作方便等特性, 成为换能器优化领域的研究热点.

将圆孔型声子晶体结构<sup>[19-23]</sup>引入到压电超声换能器中, 通过改变结构的几何参数可以有效调控带隙和弹性波的传播特性, 从而达到优化换能器辐射面的位移振幅和振幅分布均匀度的目的. 然而, 圆孔型声子晶体结构存在着明显的缺陷——在低孔隙度情况下, 其带隙调控能力不佳. 但高孔隙度则意味着圆孔之间的距离较窄, 会大幅降低结构的机械强度. 相比于圆孔型声子晶体结构, 柱状声子晶体结构带隙的形成不需要高的孔隙度, 且对结构的尺寸精度要求更低, 结构稳定性更高, 为压电超声换能器的性能优化提供了新思路. 另外, 研究表

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12174240, 12364057)、第二批榆林“科技之光”中青年科技领军人才项目 (批准号: 2024-KJZG-ZQNLJ-003) 和博士科研启动基金 (批准号: 22GK26) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sylin@snnu.edu.cn

明, 声学表面结构<sup>[24-27]</sup>可以激发弹性波的强局域化效应, 实现声学反常透射. 基于此, 本文提出了柱状和声学表面结构的压电超声换能器的研究, 旨在利用柱状和声学表面结构, 有效提升压电超声换能器的性能.

## 2 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的设计

以大尺寸夹心式纵振压电超声换能器作为研究对象, 工作频率为 21.2 kHz, 辐射面的位移振幅平均值  $A_{\text{ave}} = 0.1963 \times 10^{-3}$  mm, 位移振幅分布均匀度  $D_u = 23.04\%$ .  $A_{\text{ave}}$  和  $D_u$  根据 (1) 式、(2) 式求得:

$$A_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad (1)$$

$$D_u = \left\{ 1 - \frac{\max(A) - \min(A)}{\text{average}(A)} \right\} \times 100\%. \quad (2)$$

其中  $A$  表示辐射面位移振幅. 换能器的详细参数如表 1 所列, 结构和振动特性如图 1 和图 2 所示.

从图 1 和图 2 可以看出, 大尺寸振动体的耦合振动不仅导致换能器辐射面的位移振幅较小, 且分布非常不均匀. 因此, 利用柱状和声学表面结构对大尺寸换能器的耦合振动进行有效控制, 改善换能器的性能, 是十分有必要的.

在大尺寸换能器的前盖板表面, 加工 3 个 46.2 mm(外圆半径)×44.2 mm(外圆半径)×3 mm

(高度)、42.4 mm(外圆半径)×40.4 mm(外圆半径)×3 mm(高度)、38.6 mm(外圆半径)×36.6 mm(外圆半径)×3 mm(高度)的表面环槽, 8 个半径为 2.2 mm 的圆柱体孔; 在前盖板的上表面中心, 半径为 28 mm 的圆柱体上加工高度为 18 mm, 边长为 4 mm 的柱状结构, 优化后的前盖板结构如图 3 和图 4 所示.

在大尺寸换能器的后盖板表面上, 加工 4 个 3 mm(宽度)×0.5 mm(深度)×30 mm(高度)的凹槽结构, 优化后的后盖板的结构如图 5 所示.

优化后的柱状和声学表面结构的压电超声换能器如图 6 所示. 在 COMSOL Multiphysics 中建立换能器模型, 计算其振动特性, 结果如图 6 所示. 计算柱状和声学表面结构的压电超声换能器的辐射面的位移振幅, 并与未优化的换能器进行比较, 结果如图 7 所示.

从两种换能器的辐射面位移振幅对比图(图 7)可以看出, 柱状和声学表面结构的换能器的辐射面位移振幅和振幅分布均匀度得到了大幅度的提升. 根据 (1) 式和 (2) 式, 可求得柱状和声学表面结构换能器的辐射面位移振幅平均值  $A_{\text{ave}} = 0.3084 \times 10^{-3}$  mm、位移振幅分布均匀度  $D_u = 93.78\%$ . 即

$$\frac{(A_{\text{ave}})_{\text{柱状和声学表面}}}{(A_{\text{ave}})_{\text{未优化}}} = \frac{0.3084}{0.1963} = 1.571,$$

$$\frac{(D_u)_{\text{柱状和声学表面}}}{(D_u)_{\text{未优化}}} = \frac{93.78\%}{23.04\%} = 4.070.$$

表 1 大尺寸换能器的详细参数

Table 1. Detailed parameters of large-sized transducer.

组件名称	材料	形状	上底半径/mm	下底半径/mm	高度/mm
后盖板	Steel AISI 4340 钢	等截面圆柱	31	31	30
前盖板	Aluminium 6063-T83	圆台	31	50	35
压电陶瓷圆环(2片)	PZT-4	等截面圆环	内径7/外径30	内径7/外径30	8

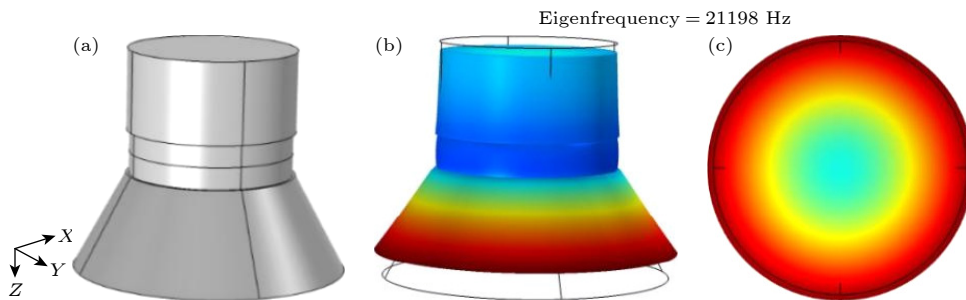


图 1 大尺寸换能器的结构和振型图 (a) 结构图; (b) 振型图; (c) 辐射面位移分布图

Fig. 1. Structure and vibration mode diagram of large-sized transducer: (a) Structural diagram; (b) vibration mode diagram; (c) displacement distribution diagram of radiation surface.

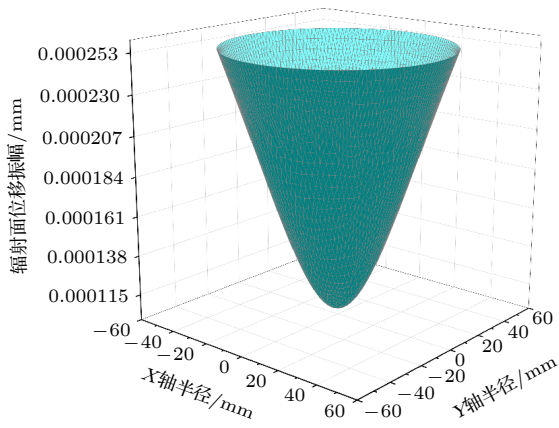


图2 大尺寸换能器的辐射面位移振幅

Fig. 2. Radiation surface displacement amplitude of large-sized transducer.

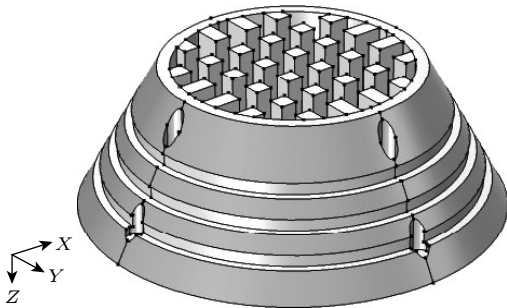


图3 柱状和声学表面结构的前盖板的结构示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the front cover plate with columnar and acoustic surface structures.

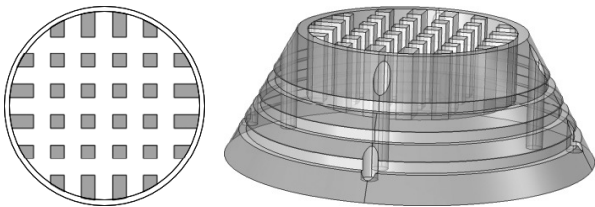


图4 柱状和声学表面结构的前盖板的俯视图和侧视图

Fig. 4. Top and side views of the front cover plate with columnar and acoustic surface structures.

### 3 柱状和声学表面结构的压电超声换能器性能评价模型

通过设计柱状和声学表面结构的几何结构、尺寸、材料等参数可以对换能器的弹性波传输进行控制,从而实现灵活设计换能器的目的.但灵活设计也带来了一定的弊端.因为此时换能器的性能受到大量设计参数影响,并且这些参数间存在相互关联,不仅增加了设计的复杂性,还导致换能器在研

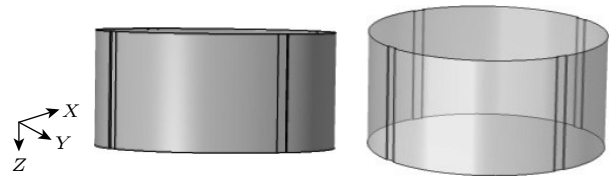


图5 柱状和声学表面结构换能器的后盖板的结构示意图

Fig. 5. Structural schematic diagram of optimized rear cover plate.

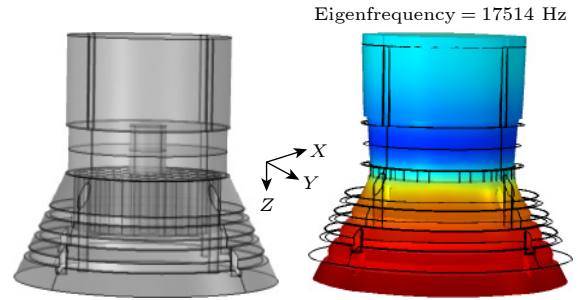


图6 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的结构和振型图

Fig. 6. Structural and vibration mode diagrams of piezoelectric ultrasonic transducer with columnar and acoustic surface structure.

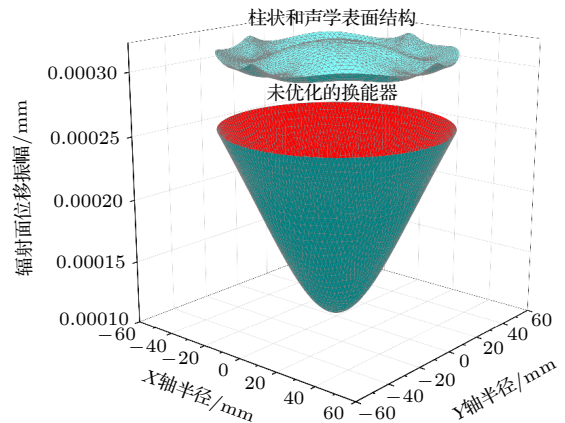


图7 辐射面位移振幅对比

Fig. 7. Comparison of displacement amplitude of radiation surface.

发过程中面临着设计约束多、迭代周期长等问题.因此,构建换能器性能评价模型,分析柱状和声学表面结构的几何、尺寸等参数对换能器频率特性、振幅位移、位移分布均匀度等的影响规律,揭示柱状和声学表面结构对换能器性能的调控机理,是十分必要的.

利用 COMSOL 构建由不同设计参数组成的换能器模型,并使用 SPSS 软件分析柱状结构的高度和边长、圆孔结构的半径、环槽结构的高度、

表面凹槽结构的厚度对换能器性能的影响规律 (如图 8—图 11 所示), 建立柱状和声学表面结构的压电超声换能器性能评价模型, 如 (3) 式—(6) 式所示:

$$f = A + Bx + Cx^2 + Dx^3, \quad (3)$$

其中,  $f$  为频率;  $A, B, C, D$  为常数;  $x$  代表柱高、柱边长、孔半径、环槽高度、凹槽厚度。

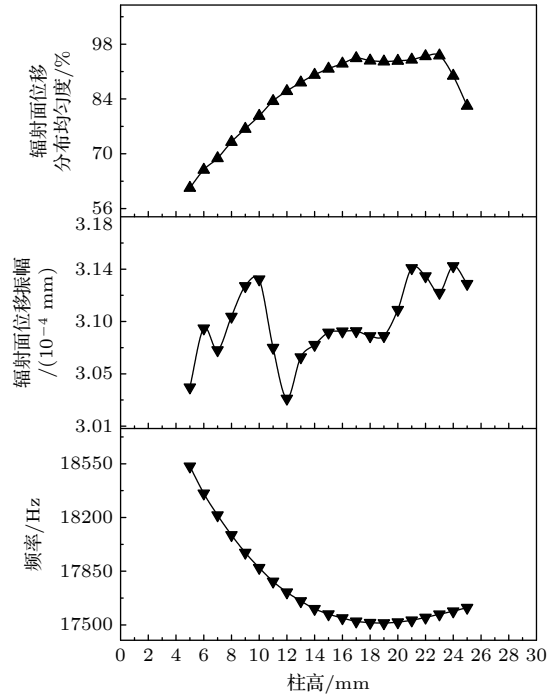
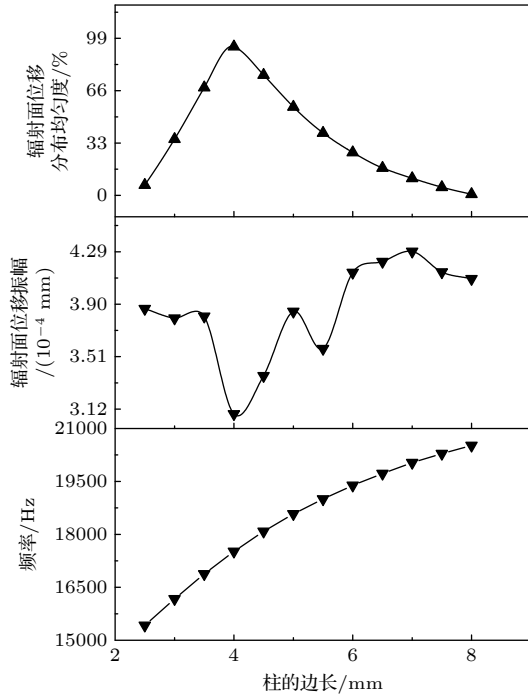


图 8 柱状结构的边长和高度对换能器性能的影响

Fig. 8. Influences of the side length and height of columnar structures on the performance of transducers.

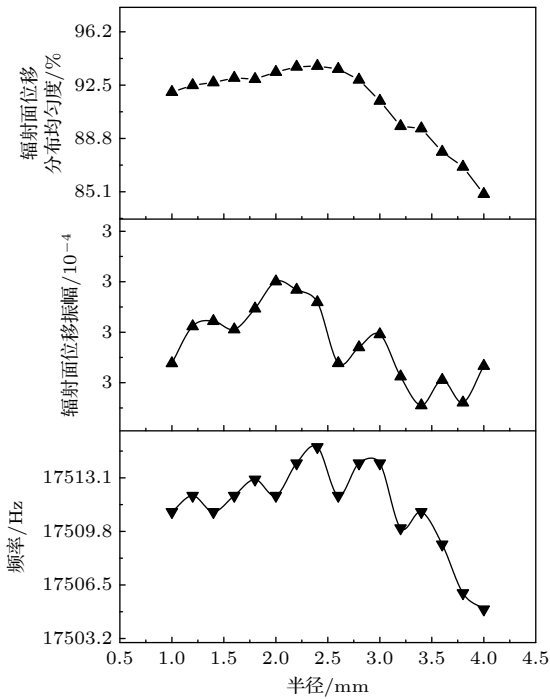


图 9 圆柱体孔的半径对换能器性能的影响

Fig. 9. Influence of the radius of the cylindrical hole on the performance of the transducer.

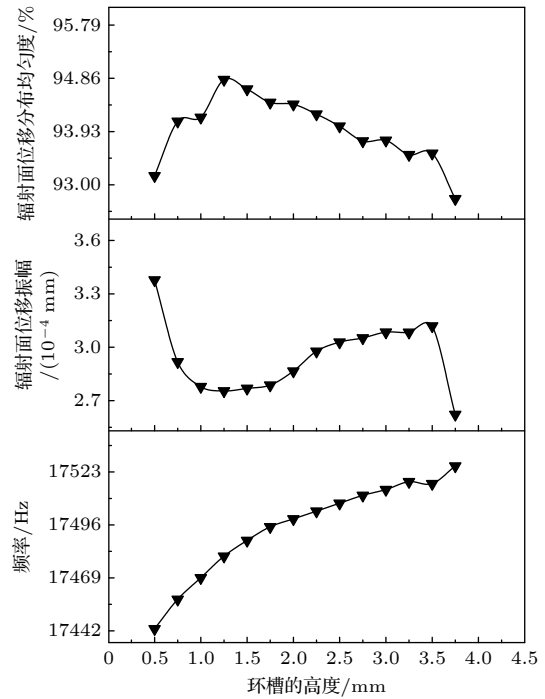


图 10 环槽的高度对换能器性能的影响

Fig. 10. Influence of the height of the ring groove on the performance of the transducer.

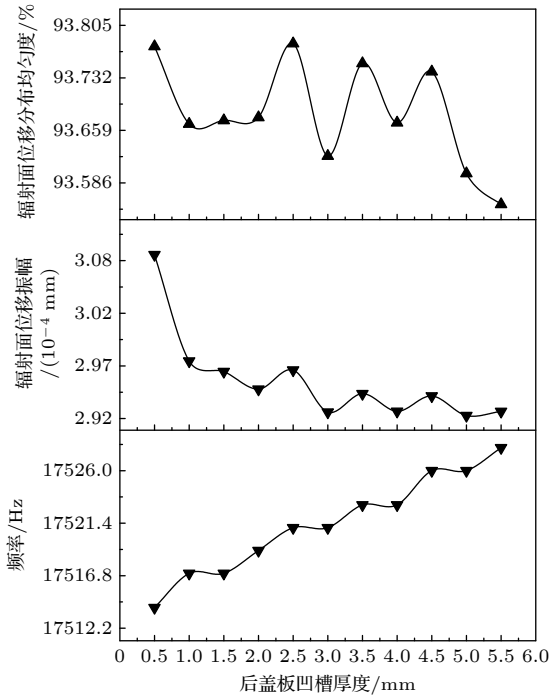


图 11 表面凹槽的厚度对换能器性能的影响

Fig. 11. Influence of the thickness of surface grooves on the performance of transducers.

$$A_{\text{ave}} = A + By + Cy^2 + Dy^3, \quad (4)$$

其中,  $A, B, C, D$  为常数;  $y$  代表孔半径、环槽高度.

$$A_{\text{ave}} = A + B/y_1, \quad (5)$$

其中,  $A, B$  为常数;  $y_1$  代表凹槽厚度.

$$D_u = A + Bz + Cz^2 + Dz^3, \quad (6)$$

其中,  $D_u$  为位移振幅分布均匀度;  $A, B, C, D$  为常数;  $z$  代表柱高、柱边长、孔半径、环槽高度.

表 2 所列为 (3) 式—(6) 式中, 当变量表示不同参数时,  $A, B, C, D$  的取值情况.

表 2 (3)—(6) 式中各常数取值  
Table 2. Values of the constants in Eqs. (3)–(6).

		$A$	$B$	$C$	$D$
(3)式	$x$ 为柱高	19651.327	-277.955	11.400	-0.142
	$x$ 为柱边长	10141.232	2616.509	-221.630	7.083
	$x$ 为圆柱体孔半径	17511.585	-3.807	4.071	-0.893
	$x$ 为环槽高度	17405.221	88.233	-26.829	3.145
	$x$ 为凹槽厚度	17512.152	4.646	-0.732	$0.746 \times 10^{-1}$
(4)式	$y$ 为圆柱体孔半径	17511.585	-3.807	4.071	-0.893
	$y$ 为环槽高度	17405.221	88.233	-26.829	3.145
(5)式	$y_1$ 为表面凹槽厚度	$2.909 \times 10^{-4}$	$8.421 \times 10^{-6}$	—	—
(6)式	$z$ 为柱高	41.422	4.051	0.022	$-0.454 \times 10^{-2}$
	$z$ 为柱边长	-572.671	386.836	-72.945	4.206
	$z$ 为圆柱体孔半径	87.149	5.651	-0.866	-0.174
	$z$ 为环槽的高度	91.649	4.283	-1.871	0.221

从图 8—图 11 可以看出, 柱状结构的边长和高度、圆柱体孔的半径、环槽的高度、表面凹槽的厚度均可以对换能器的纵向谐振频率  $f$ 、辐射面位移分布均匀度  $D_u$ 、辐射面位移振幅平均值  $A_{\text{ave}}$  产生影响, 考虑多变量约束下的均衡最优, 本文给出了各参数的推荐取值范围: 柱状结构边长为 3.5—4.5 mm, 柱状结构的高度为 16—23 mm、圆孔结构的半径为 1—2.8 mm、环槽结构的高度为 2.5—3.5 mm、表面凹槽结构的厚度为 0.5—1.5 mm 时, 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的性能较为理想.

#### 4 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的实验测试

加工完成的柱状和声学表面结构的压电超声换能器的实物图如图 12 所示. 在实验室中, 利用 6500B 精密阻抗分析仪、PSV-400 全场扫描式激光测振仪分别对超声换能器的输入电阻抗、辐射面位移振幅及其分布进行测量.

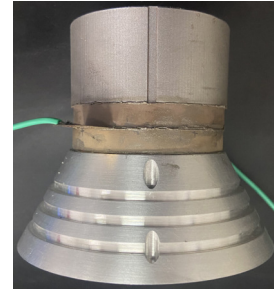


图 12 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的实物图  
Fig. 12. Physical image of piezoelectric ultrasonic transducer with columnar and acoustic surface structure.

阻抗分析仪对柱状和声学表面结构的压电超声换能器的阻抗特性测试如图 13 所示. 分析仪测量的柱状和声学表面结构的压电超声换能器的纵向谐振频率为 16.579 kHz (如图 14(a) 所示), COMSOL 仿真软件计算所得的柱状和声学表面结构的压电超声换能器的纵向谐振频率为 17.514 kHz (如图 14(b) 所示). 即纵向谐振频率的仪器测量值和仿真计算结果的误差为 5.640%. 误差在可接受的范围内, 表明仿真模型和实验设计都相对准确.

同时, 利用 PSV-400 全场扫描式激光测振仪

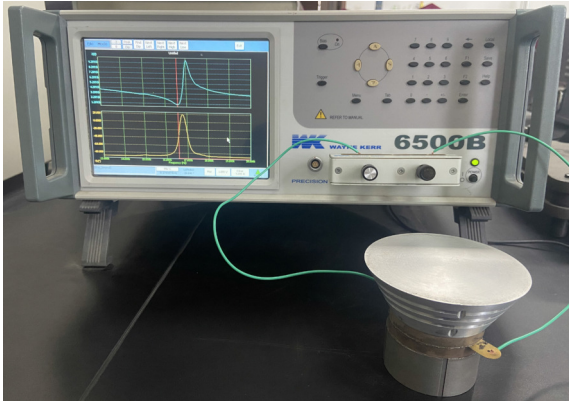


图 13 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的阻抗特性测量过程图

Fig. 13. Measurement process diagram of impedance characteristics of piezoelectric ultrasonic transducers with columnar and acoustic surface structures.

对柱状和声学表面结构的压电超声换能器的表面振速及位移分布及变化情况进行测量, 换能器使用额定电压 1 V 的电信号进行激励, 测量过程如图 15(a) 和图 15(b) 所示, 测量所得的柱状和声学表面结构的压电超声换能器的振动信息如图 15(c) 所示, 未优化的换能器的振动信息如图 15(d) 所示.

由图 15 可知: 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的位移共振峰所对应的频率为 16.633 kHz, 与阻抗分析仪的测量结果基本一致; 扫描获得的辐射面振动信息也与仿真结果保持一致. 对比图 15(c) 和图 15(d) 可以看出, 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的辐射面的位移振幅和振幅分布均匀度都获得了大幅提升. 仿真结果与实验的数据验证了设计理论的准确性, 证明柱状和声学表面结构对压电超声换能器的性能优化是有效的.

## 5 结论

本文利用柱状和声学表面结构对压电超声换能器进行了优化设计, 并对设计的换能器进行了仿真和实验测试, 得到以下结论:

1) 柱状和声学表面结构的压电超声换能器辐射面的位移振幅是未优化换能器的 1.57 倍, 位移振幅分布均匀度是未优化换能器的 4.07 倍, 性能得到有效提升.

2) 借助数据分析软件分析了柱状结构的边长

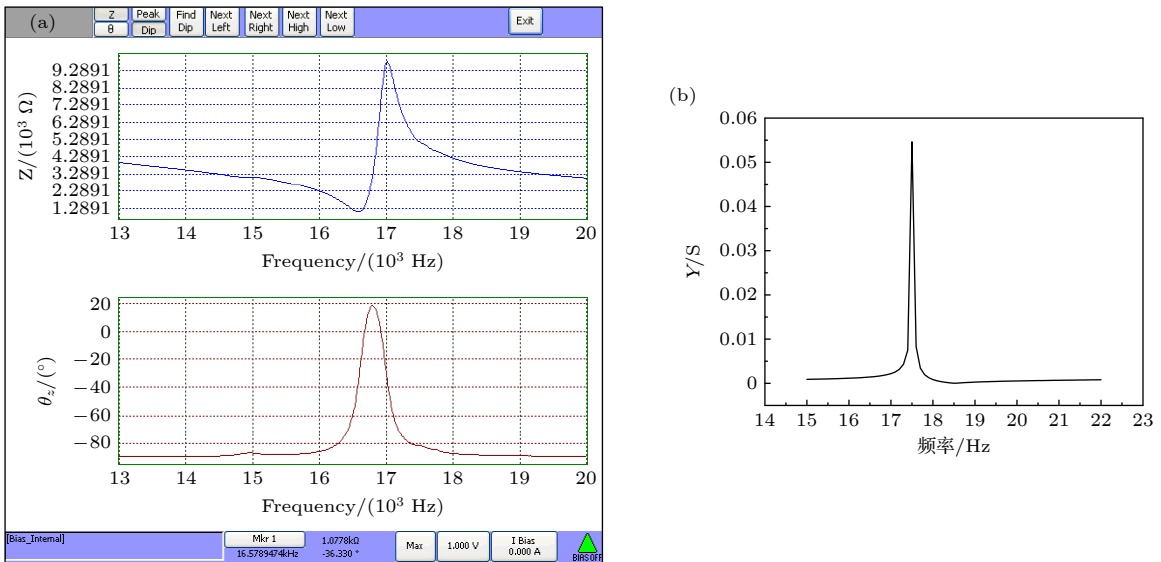


图 14 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的输入电阻抗与谐振频率的测量 (a) 测量结果; (b) 仿真导纳曲线图

Fig. 14. Measurement of input impedance and resonant frequency of piezoelectric ultrasonic transducers with columnar and acoustic surface structures: (a) Measurement results; (b) simulation admittance curve.

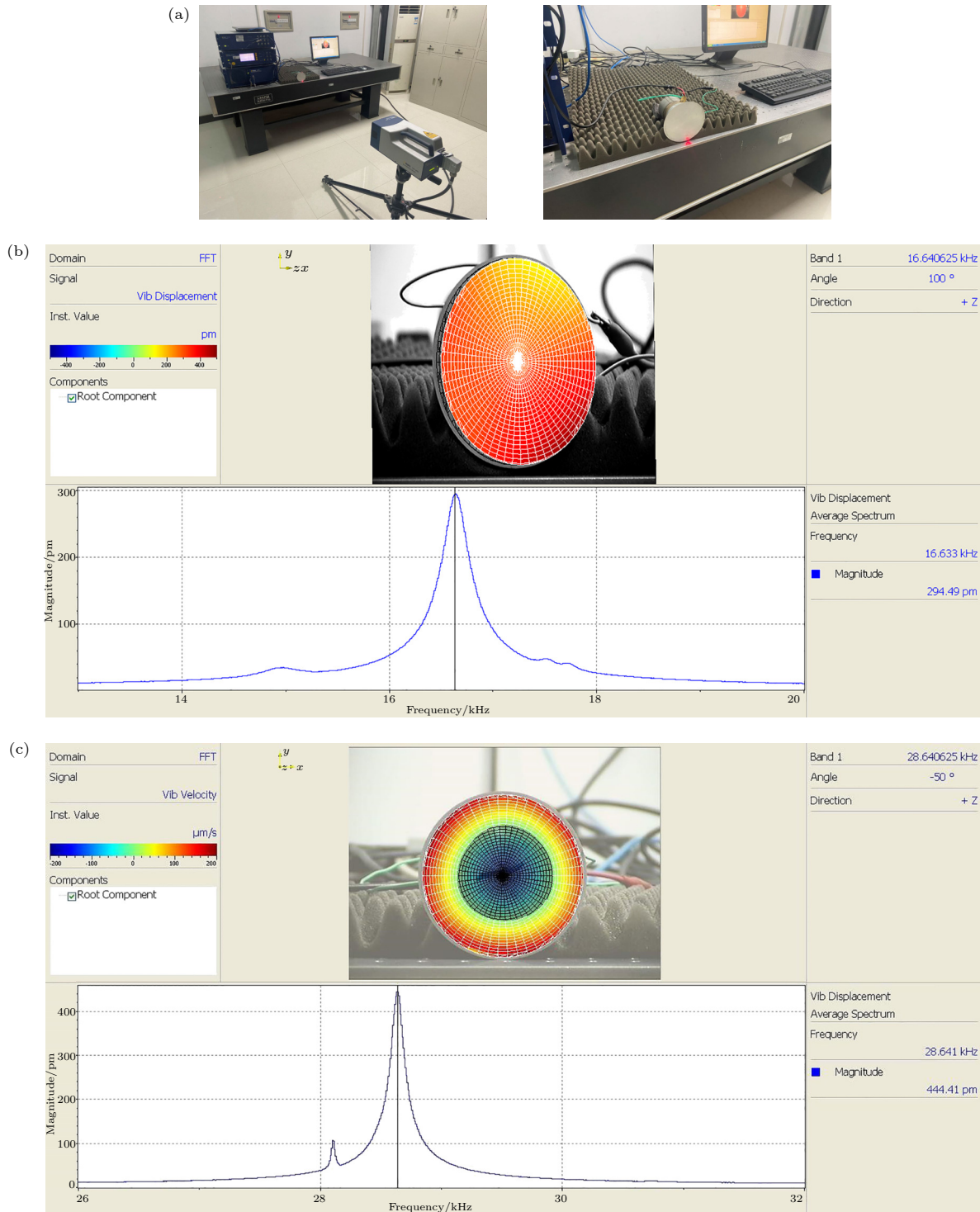


图 15 换能器的辐射面位移振幅分布的实验测量 (a) 测试图; (b) 柱状和声学表面结构的压电超声换能器的测量结果; (c) 未优化换能器的测量结果

Fig. 15. Experimental measurement of the displacement amplitude distribution of the radiation surface of the transducer: (a) Test chart; (b) measurement results of piezoelectric ultrasonic transducers with columnar and acoustic surface structures; (c) measurement results of the transducer that have not been optimized.

和高度、圆柱体孔的半径、环槽的高度、表面凹槽的厚度对换能器的纵向谐振频率、辐射面位移分布均匀度、辐射面位移振幅平均值的影响规律, 建立

了柱状和声学表面结构的压电超声换能器的性能预测模型, 最终得到使得柱状和声学表面结构换能器的性能较为理想的各结构参数的最佳取值范围.

3) 使用 PSV-400 全场扫描式激光测振仪和 6500B 精密阻抗分析仪对加工的柱状和声学表面结构的换能器进行测试, 仿真和实验结果基本一致, 进一步验证了论文优化方案的可行性.

### 参考文献

- [1] Fu J F, Lin B, Sui T Y, Dong B K 2025 *Ultrasonics* **148** 107533
- [2] Takeda K, Tanaka H, Tsuchiya T, Kaneko S 1998 *Ultrasonics* **36** 75
- [3] Kengo N, Watanabe Y 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 4812
- [4] Bendikiene R, Kavaliauskiene L, Borkys M 2021 *CIRP J. Manu. Sci. Tech.* **35** 872
- [5] Peters D 1996 *J. Mater. Chem.* **6** 1605
- [6] An D, Huang Y K, Li J G, Huang W Q 2025 *Inter. J. Prec. Eng. Manu.* **26** 559
- [7] Li Y X, Ye S Y, Long Z L, Ju J Z, Zhao H 2025 *Sensor. Actuat. A: Phys.* **381** 116037
- [8] Wang J H, Ji H W, Anqi Q, Liu Y, Lin L M, Wu X, Ni J 2023 *Materials* **16** 5812
- [9] Ronda S, Montero de Espinosa F 2018 *Adv. Appl. Ceram.* **117** 177
- [10] Li Z X 2022 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [李照希 2022 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [11] Qin Z J 2023 *M. S. Thesis* (Taiyuan: North University of China) (in Chinese) [秦振杰 2023 硕士学位论文 (太原: 中北大学)]
- [12] Zhang L J 2022 *M. S. Thesis* (Zhenjiang: Jiangsu University) (in Chinese) [张利娟 2022 硕士学位论文 (镇江: 江苏大学)]
- [13] Song M X 2020 *M. S. Thesis* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [宋明鑫 2020 硕士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [14] Wang Y P 2023 *M. S. Thesis* (Guangzhou: Guangdong University of Technology) (in Chinese) [王燕萍 2023 硕士学位论文 (广州: 广东工业大学)]
- [15] Lin J Y, Lin S Y, Wang S, Li Y 2021 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **51** 094311 (in Chinese) [林基艳, 林书玉, 王升, 李耀 2021 中国科学: 物理学 力学 天文学 **51** 094311]
- [16] Li J 2021 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: North University of China) (in Chinese) [李婧 2021 博士学位论文 (太原: 中北大学)]
- [17] Wang S, Chen C, Hu L Q, Lin S Y 2022 *J. Acoust. Soc. Am.* **152** 193
- [18] Wang S, Shan J J, Lin S Y 2022 *Ultrasonics* **120** 106640
- [19] Sun X Y, Yan Q, Guo X Y 2021 *J. Synt. Cryst.* **50** 1378 (in Chinese) [孙向洋, 燕群, 郭翔鹰 2021 人工晶体学报 **50** 1378]
- [20] Chen X R 2021 *M. S. Thesis* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [程晓茹 2021 硕士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [21] Yu L L 2023 *M. S. Thesis* (Taiyuan: North University of China) (in Chinese) [尉浪浪 2023 硕士学位论文 (太原: 中北大学)]
- [22] Tan Z H 2021 *M. S. Thesis* (Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University) (in Chinese) [谭自豪 2021 硕士学位论文 (兰州: 兰州交通大学)]
- [23] Zhang M, Wen X D, Sun X W, Liu X X, Song T, Liu Z J 2024 *Nois. Vibr. Cont.* **44** 96 (in Chinese) [张敏, 温晓东, 孙小伟, 刘禧萱, 宋婷, 刘子江 2024 噪声与振动控制 **44** 96]
- [24] Qin Z J, Wang H L, Zhang H Q, Ding Q, Huang X, Zhu J J, Ren R, Sun X L 2023 *Trans. Inst. Meas. Cont.* **45** 674
- [25] Hu F B, Cheng L N, Fan S Y, Xue X F, Liang Y, Lu M H, Wang W 2022 *Sens. Actu. A: Phys.* **333** 113298
- [26] Dryburgh P, Smith J R, Marrow P, Laine S, Sharples S, Clark M, Li W Q 2020 *Ultrasonics* **108** 106171
- [27] Zhang Q Z, Guo J Q, Qin P, Tang G B, Zhang B F, Hashimoto K, Han T, Li P, Wen Y M 2018 *Ultrasonics* **88** 131

# Piezoelectric ultrasonic transducers with columnar and acoustic surface structures<sup>\*</sup>

LIN Jiyan<sup>1)2)</sup> LI Yao<sup>3)</sup> CHEN Cheng<sup>2)</sup> LIN Shuyu<sup>2)†</sup>  
GUO Linwei<sup>1)</sup> XU Jie<sup>1)</sup>

1) (*Yulin Key Laboratory of Big Data and Intelligent Decision, Yulin University, Yulin 719000, China*)

2) (*Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

3) (*The Second Gas Production Plant of Changqing Oilfield Branch, Yulin 719000, China*)

( Received 9 July 2025; revised manuscript received 31 July 2025 )

## Abstract

The band gap, localization, and waveguide characteristics of phononic crystal structures offer extensive potential applications in transducer field, particularly for circular-hole phononic crystals, which are extensively utilized in research on performance optimization of transducers due to their straightforward structure and easy fabrication. Nonetheless, studies have revealed that the bandgap width of circular-hole phononic crystal structures is directly proportional to their porosity. Typically, a higher porosity leads to enhanced energy localization of elastic waves. However, high porosity implies a narrower distance between circular holes, greatly reducing the mechanical strength of the structure. The introduction of columnar phononic crystal structures solves the problems of high porosity and strict dimensional accuracy requirements in circular-hole phononic crystal structures, providing a new approach for enhancing the performance of piezoelectric ultrasonic transducers.

This study employs cylindrical and acoustic surface structures fabricated on the front and rear cover plates of piezoelectric ultrasonic transducers to manipulate the transmission behavior and pathway of sound waves, thereby achieving effective control over coupled vibrations within the transducer. This approach not only solves the problem of uneven amplitude distribution on the radiation surface due to uneven vibration energy transmission but also markedly enhances the displacement amplitude of the transducer's radiation surface, ultimately enhancing its operational efficiency. The simulation results elucidate the influences of the configuration of these cylindrical and acoustic surface structures on transducer performance. Experimental findings further validate that these structures can effectively improve the performance of piezoelectric ultrasonic transducers. This study provides systematic design theory support for the engineering calculation and optimization of transducers.

**Keywords:** porous phononic crystals, columnar and acoustic surface structures, piezoelectric ultrasonic transducers, performance optimization

**PACS:** 43.40.+s, 43.35.+d, 43.38.+n, 63.20.D-

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250901](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250901)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250901](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250901)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174240, 12364057), the Second Batch of "Light of Science and Technology" Young and Middle Aged Science and Technology Leading Talents Program of Yulin, China (Grant No. 2024-KJZG-ZQNLJ-003), and the Doctoral Research Start up Fund, China (Grant No. 22GK26).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [sylin@snnu.edu.cn](mailto:sylin@snnu.edu.cn)

## 柱状和声学表面结构的压电超声换能器

林基艳 李耀 陈诚 林书玉 郭林伟 徐洁

### Piezoelectric ultrasonic transducers with columnar and acoustic surface structures

LIN Jiyan LI Yao CHEN Cheng LIN Shuyu GUO Linwei XU Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 214304 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250901

CSTR: 32037.14.aps.74.20250901

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 表面与缺陷调控型大功率压电超声换能器

Surface and defect controlled high power piezoelectric ultrasonic transducers

物理学报. 2025, 74(9): 094301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250047>

#### 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸压电超声换能器

Large-scale piezoelectric ultrasonic transducers with tubular near-period phononic crystal point defect structure

物理学报. 2023, 72(9): 094301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230195>

#### 纵弯正交耦合压电超声振动系统的设计及振动性能

Design and vibration performance study of longitudinal-bending orthogonal coupled piezoelectric ultrasonic vibration system

物理学报. 2025, 74(13): 134301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250294>

#### 声表面和拓扑缺陷结构对换能器耦合振动系统的声波调控

Research on acoustic control of coupled vibration system of transducers using acoustic surface and topological defect structures

物理学报. 2024, 73(22): 224301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241199>

#### 声黑洞楔形结构振动模式转换超声换能器

An ultrasonic transducer for vibration mode conversion of wedge-shaped structure of acoustic black hole

物理学报. 2025, 74(4): 044303 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241326>

#### 基于传输矩阵法的任意变厚度环型压电超声换能器

Arbitrary variable thickness annular piezoelectric ultrasonic transducer based on transfer matrix method

物理学报. 2023, 72(5): 054304 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222110>