

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*

林基艳¹⁾²⁾ 林书玉^{2)†}

1) (榆林学院信息工程学院, 榆林 719000)

2) (陕西师范大学, 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119)

(2023年2月13日收到; 2023年3月3日收到修改稿)

大尺寸压电超声换能器的耦合振动会导致其辐射面纵向位移振幅的平均值较小, 振幅分布不均匀, 严重影响系统的性能和可靠性. 为了改善大尺寸超声振动系统性能, 可利用二维孔/槽型近周期声子晶体结构对横向振动进行抑制, 但在对横向振动抑制的同时, 该结构会对换能器机械强度和工作带宽等性能参数造成不利的影响. 针对这一问题, 本文提出利用管柱型近周期声子晶体点缺陷结构对大尺寸夹心式纵振压电陶瓷换能器进行优化的新思路. 该方法不仅可以利用构造的固/气二维近周期声子晶体结构的点缺陷模式, 获得极低的能量损耗, 有效提高系统辐射面的纵向位移振幅和振幅分布均匀度; 也可以利用管柱结构中的双环形孔增强声波的多重散射, 使得换能器在管柱柱高较低条件下产生禁带, 在有效抑制横向振动的同时, 大幅拓宽换能器系统的工作带宽, 增强系统的稳定性和机械强度, 降低加工成本. 仿真结果证明了优化的有效性.

关键词: 横向振动, 大尺寸压电超声换能器性能, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构

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

DOI: 10.7498/aps.72.20230195

1 引言

近周期声子晶体结构^[1](有限尺寸的周期性结构或者一些具有细小不完整性的周期性结构, 比如缺陷、层厚渐变和起伏等)是目前新材料发展前沿领域的研究热点. 该类结构最突出的特点是其功能的可设计性, 即通过求解声波在近周期声子晶体结构中的波动方程, 可以人为设计声子带隙^[2-9], 以实现带隙范围内特定声波的抑制. 通过在结构中有针对性地引入各种缺陷^[10-15](点缺陷、线缺陷或面缺陷等), 使得声波能量被局域在人为设计的缺陷处或者沿所设计的缺陷传播, 形成缺陷模式. 该模式通常具备极高的 Q 值(Q 为品质因数), 能量损耗较低且响应度高.

近周期声子晶体结构的带隙和缺陷特性使其在滤波器、声波导、减震隔振和功率超声等领域具有较高的应用价值. 例如, 在功率超声领域, 通常采用增大超声振动系统辐射面的面积来获得大功率超声, 但受泊松效应^[16-20]的影响, 大尺寸超声振动系统会产生严重的横向振动. 图1(a)为大尺寸夹心式纵振压电陶瓷超声换能器(超声能量沿图1所示的 Z 轴传播, 其结构尺寸和材料属性参数见表1), 利用仿真软件模拟其振动特性, 得到如图1(b)所示的振型图以及如图2所示的纵向位移振幅分布图(前辐射面上任一直径处).

从图1和图2可以看出, 受泊松效应的影响, 大尺寸压电换能器产生了强烈的耦合振动, 从而导致其前辐射面的振幅分布呈现出中心小边缘大的现象(纵向位移振幅绝对值变化范围为

* 国家自然科学基金(批准号: 12174240, 11964040)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

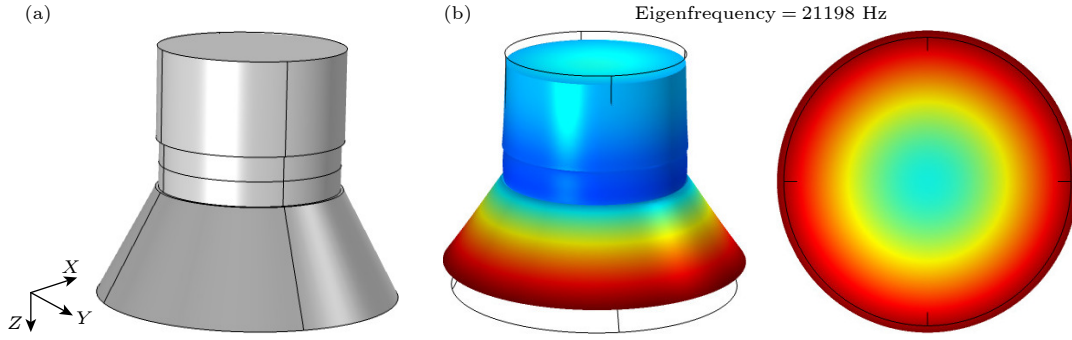


图 1 大尺寸夹心式纵振压电陶瓷超声换能器的结构 (a) 和振型图 (b)

Fig. 1. (a) Structure and (b) vibration mode diagram of large-dimension sandwich longitudinal vibration piezoelectric ceramic ultrasonic transducer.

表 1 换能器的结构尺寸和材料属性参数
Table 1. Structural size and material property parameters of the transducer.

部件	材料属性	形状	外/大端半径/mm	内/小端半径/mm	高度/mm
前盖板	Aluminum 6063-T83	圆锥	50	31	35
压电陶瓷片(两片)	PZT-4	等截面圆环	30	7	8
后盖板	Steel AISI 4340	等截面圆柱	31	31	30

0.1039—0.2423 μm). 根据

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

可求得大尺寸换能器辐射面的纵向位移振幅平均值 $A_{\text{ave}} = 0.1544 \mu\text{m}$. 根据

$$D_n = \left\{ 1 - \frac{\max(\text{amplitude}) - \min(\text{amplitude})}{\text{average}(\text{amplitude})} \right\} \times 100\%, \quad (2)$$

可求得换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度 $D_n = 10.38\%$.

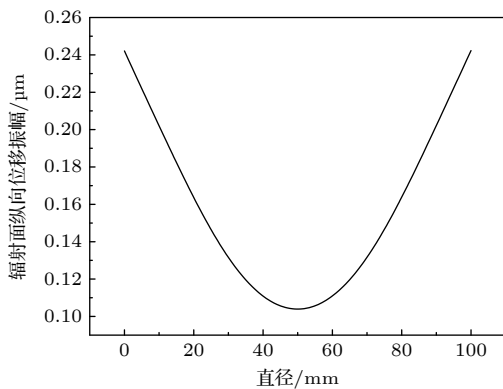


图 2 纵向位移振幅分布图

Fig. 2. Longitudinal displacement amplitude distribution diagram.

从计算结果可以明显看出, 大尺寸压电超声换能器的耦合振动不仅导致辐射面纵向位移振幅的

平均值较小, 且振幅分布非常不均匀, 严重影响系统的性能和可靠性, 因此, 必须对大尺寸超声振动系统中的横向振动进行有效抑制和衰减. 为了改善大尺寸超声振动系统性能, 研究人员利用二维孔/槽型近周期声子晶体结构^[21–29]的带隙特性对耦合振动进行抑制, 相关研究成果能在一定程度上抑制系统的横向振动, 提高系统辐射面的位移振幅分布均匀度, 但改善效果有限. 为了更好地提高系统辐射面的纵向位移振幅和振幅分布均匀度, 研究人员^[30]利用可以获得较高 Q 值的点缺陷结构对大尺寸超声振动系统进行了优化, 但研究结果^[31,32]证明, 二维孔/槽型结构的填充率 (散射体体积与基体体积之比) 越高, 对横向振动的抑制效果越好 (孔径/槽尺寸越大, 越有利于拓宽带隙宽度), 但是大的孔径/槽尺寸会大幅降低系统的机械强度. 另外, 由品质因数 Q 值为中心频率与带宽之比可知, 品质因数越高, 系统带宽反而降低, 如何在获得高 Q 值的同时, 拓宽系统的工作带宽, 是功率超声领域亟待解决的难点.

2 大尺寸夹心式纵振压电陶瓷超声换能器的优化设计

柱型声子晶体结构^[10,33–35]的提出, 解决了孔/槽型近周期声子晶体结构需要高的填充比, 对结构尺寸精度要求高的加工难题. 研究表明, 柱体越高,

越有利于拓宽柱型声子晶体结构的带宽,但是柱体的增高,容易导致柱式结构断裂,增加了柱型声子晶体结构的不稳定性.为了既具备孔/槽型结构材料组成单一,制作工艺简单,成本低的优点,又具备柱型结构设计灵活,对结构的尺寸精度要求较低的优点,研究人员提出利用管柱型^[36]近周期声子晶体点缺陷结构对大尺寸夹心式纵振压电陶瓷换能器进行优化的新思路.该方法不仅可以利用构造在 Aluminum 6063-T83/空气即固/气二维近周期声子晶体结构中的点缺陷模式,获得极低的能量损耗(由于固体基体材料和空气的声阻抗差异较大,声波能量反射率高,向空气的辐射小,尤其当声波为高频声波时,其能量损耗可以忽略不计),有效提高系统辐射面的纵向位移振幅和振幅分布均匀度;也可以利用管柱结构中的双环形孔增强声波的多重散射,使换能器在管柱较低的条件也能产生禁带,在有效抑制横向振动的同时,大幅拓宽换能器系统的工作带宽,增强系统的稳定性和机械强度,降低加工成本.

2.1 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸纵振压电超声换能器的设计

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的结构和材料属性参数与未优化的换能器保持相同,只是在图1所示的前盖板上,加工如图3所示的 Aluminum 6063-T83/空气管柱型近周期声子晶体结构(平行于Z轴、横截面在XY平面内).近周期声子晶体原胞呈正方晶格周期排列,晶格常数为 a ,管柱的内、外半径分别为 r_1 和 r_2 ,最外层空气圆柱孔的半径为 R .

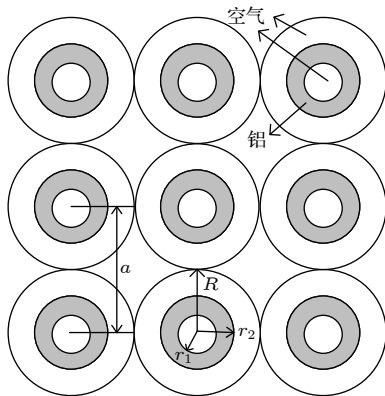


图3 管柱型近周期声子晶体结构几何模型

Fig. 3. Geometric model of tubular near-periodic phononic crystal structure.

为了获得具有较高品质因数的点缺陷模式,去除图3的中心原胞的铝质管柱结构,采用 3×3 的超原胞,晶格常数由 a 变化为 $3a$,其几何模型如图4所示.优化后的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的前盖板如图5所示, h 为基体的高度, h_1 为管柱和空气圆柱孔的高度.

图3—图5中,结构参数分别设为:单原胞晶格常数 $a = 14 \text{ mm}$,即超原胞晶格常数 $3a = 42 \text{ mm}$,管柱的内半径 $r_1 = 2.5 \text{ mm}$,外半径 $r_2 = 3 \text{ mm}$,最外层空气圆柱孔的半径 $R = 7 \text{ mm}$,前盖板的高度 $h = 35 \text{ mm}$,管柱和空气圆柱孔的高度 $h_1 = 20 \text{ mm}$.采用有限元分析软件对管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的带隙进行仿真计算(对于有限尺寸的近周期声子晶体结构,一般通过有限元法计算其激励和响应的加速度幅频响应曲线来获得结构的振动传输特性,进而判断结构是否存在带隙、带隙宽度及位置等属性),获得如图6所示的加速度幅频响应曲线,图中加速度幅值小于1的衰减区对应的频率范围,即管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的前盖板在横向的振动带隙.

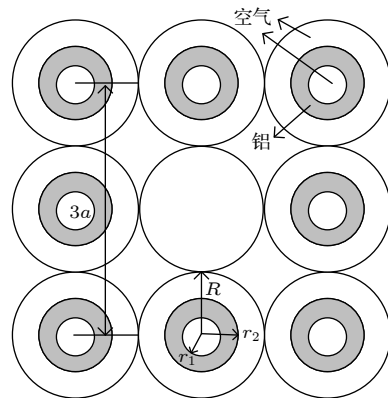


图4 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的几何模型

Fig. 4. Geometric model of point defect structure in tubular near-periodic phononic crystals.

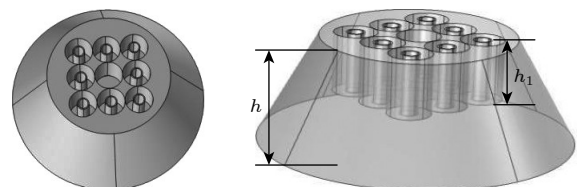


图5 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸压电超声换能器的前盖板

Fig. 5. Front cover plate of large-dimension piezoelectric ultrasonic transducer with tubular near-periodic phononic crystal point defect structure.

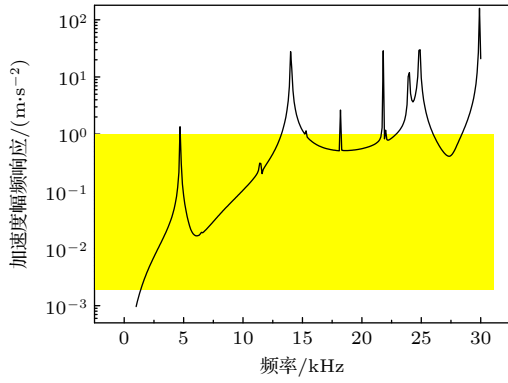


图 6 横向加速度幅频响应曲线

Fig. 6. Lateral acceleration amplitude frequency response curve.

从图 6 可以看出, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的前盖板在 4.8—13.2 kHz, 15.4—21.6 kHz, 22.1—22.8 kHz 等附近均存在横向带隙. 本设计所研究的换能器工作在 20 kHz 附近, 因此, 理论上可以实现对换能器谐振频率 20 kHz 附近横向振动的抑制, 使换能器的振动模态更加单一. 为验证本设计是否有效, 在有限元仿真软件中构建了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的模型, 进而分析模型的振动特性, 得到如图 7 所示的振型图和辐射面位移分布云图.

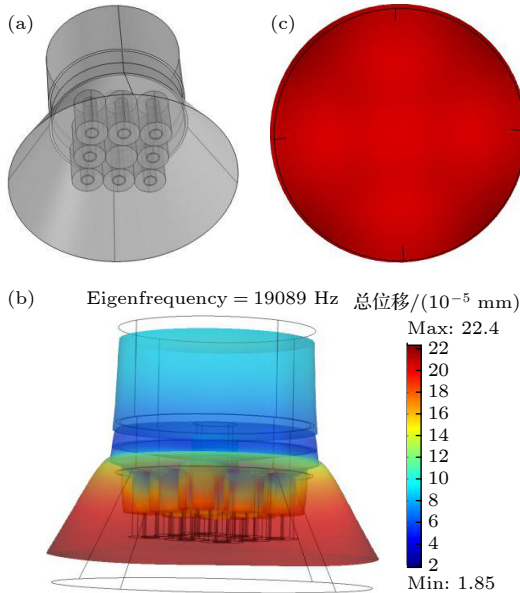


图 7 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸压电超声换能器的 (a) 结构示意图、(b) 振型图及 (c) 辐射面位移分布云图

Fig. 7. (a) Structure schematic, (b) vibration modal diagram, and (c) cloud diagram of displacement distribution of radiation surface of large-scale piezoelectric ultrasonic transducers with tubular near-period phononic crystal point defect structure.

为了更直观地观察到管柱型近周期声子晶体点缺陷结构对大尺寸压电超声换能器性能的改善程度, 针对未优化的换能器 (图 1) 和管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的换能器 (图 7), 计算二者前盖板辐射面上任意直径处的纵向位移振幅和振幅分布对比情况, 结果如图 8 所示.

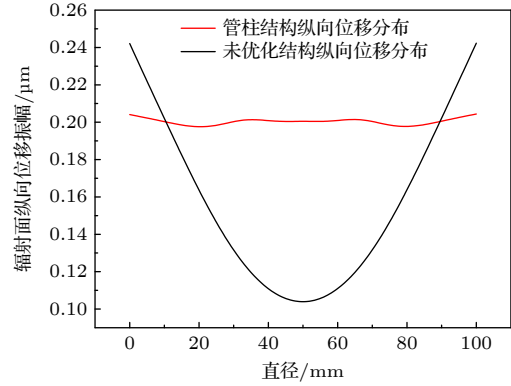


图 8 辐射面纵向位移振幅分布对比图

Fig. 8. Comparison diagram of longitudinal displacement amplitude distribution of radiation surface.

由图 8 可知, 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的前盖板辐射面上纵向位移振幅绝对值变化范围为 0.1976—0.2044 μm , 由 (1) 式和 (2) 式可求出, 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的辐射面的纵向位移振幅平均值 $A_{\text{ave管柱}} = 0.2003 \mu\text{m}$, 振幅分布均匀度 $D_{\text{n管柱}} = 96.60\%$. 由第 1 节可知, $A_{\text{ave未优化}} = 0.1544 \mu\text{m}$, 即 $A_{\text{ave管柱}}/A_{\text{ave未优化}} = 0.2003/0.1544 = 1.2973 \mu\text{m}$, $D_{\text{n未优化}} = 10.38\%$, 即 $D_{\text{n管柱}}/D_{\text{n未优化}} = 96.60\%/10.38\% = 9.3064$. 从上述计算结果可以明显看出, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构对大尺寸压电超声换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度和平均纵向位移振幅的改善极其有效. 即管柱型近周期声子晶体点缺陷结构实现了对横向振动的抑制, 使得换能器纵向振动模态更加单一, 保证了其纵向工作效率.

本设计利用管柱结构中的两重环形孔来增强声波的多重散射, 拓宽换能器的工作带宽. 为验证设计的有效性, 计算了管柱型结构和无管柱结构的换能器 (图 9) 的发射电压响应 (transmitting voltage response, TVR)(中心频率对应的发射电压响应下降 3 dB 时两频率之差即可求得换能器的工作带宽), 结果如图 10 所示.

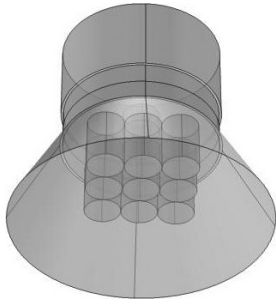


图 9 无管柱结构的换能器示意图

Fig. 9. Schematic diagram of transducer without tubular structure.

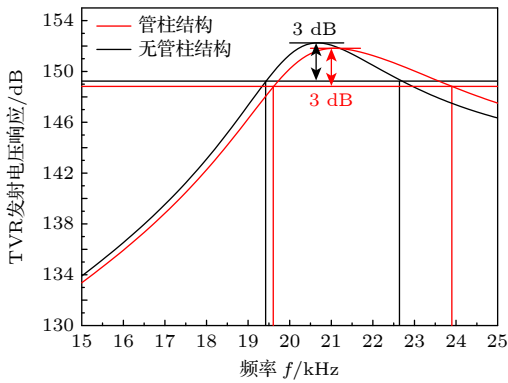


图 10 管柱和无管柱结构的发射电压响应曲线

Fig. 10. Emission voltage response curves of tubular and non-tubular structures.

从图 10 可以看出, 两重环形孔结构增强了声波的多重散射, 加强了局域模态耦合效应, 有利于拓宽带隙宽度. 因此, 与无管柱结构的换能器相比, 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的工作带宽得到了大幅拓宽, 在获得高 Q 值的同时, 克服了点缺陷模式工作频带过窄的局限性.

2.2 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构对换能器性能的影响规律

改变管柱形近周期声子晶体点缺陷结构的几何结构参数可以调节带隙宽度、缺陷态模式、局域化程度和振动模式等特性. 为了得到使大尺寸纵振压电超声换能器达到最佳性能的参数, 本文利用有限元分析软件研究了管柱的内半径 r_1 、管柱环的宽度 r (外半径 r_2 与内半径 r_1 之差)、最外层空气圆柱孔的半径 R 和管柱的高度 h_2 对换能器性能属性 (纵向谐振频率、辐射面的纵向位移振幅分布均匀度和平均纵向位移振幅) 的影响, 计算结果如图 11—图 14 所示.

图 11 显示了管柱的内半径 r_1 对大尺寸纵振压电超声换能器辐射面纵向位移振幅分布均匀度、平均纵向位移振幅以及换能器系统谐振频率的影响规律. 可以看出, 当其他几何结构参数保持不变时, 随着管柱内半径 r_1 的增大, 换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度先增大后减小. 当 $r_1 = 1.5\text{—}3.0\text{ mm}$ 时, 换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度较佳. 而随着管柱的内半径 r_1 的增大, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅整体呈现出增大—减小—增大—减小的趋势. 当 $r_1 = 2.0\text{—}2.5\text{ mm}$, $r_1 = 3.5\text{—}6.0\text{ mm}$ 时, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅较大. 随着管柱内半径 r_1 的增大, 换能器系统谐振频率逐渐变大. 综合考虑各个性能指标, 当管柱的内半径 $r_1 = 2.0\text{—}2.5\text{ mm}$ 时, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸纵振压电超声换能器的性能可达到较为理想的状态.

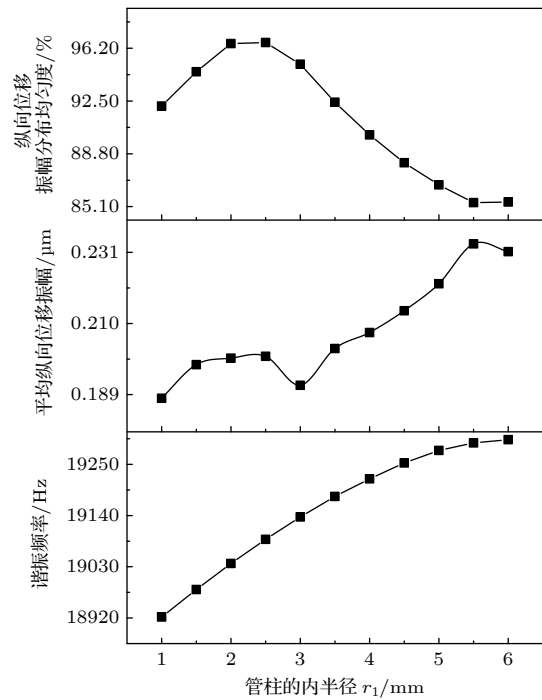


图 11 r_1 对换能器性能的影响

Fig. 11. Influence of the number of r_1 on the performance of the transducer.

图 12 显示了管柱环的宽度 r 对大尺寸纵振压电超声换能器辐射面纵向位移振幅分布均匀度、平均纵向位移振幅以及换能器系统谐振频率的影响规律. 从图 12 可以看出, 当其他几何结构参数保持不变时, 设定管柱的内半径 $r_1 = 2.5\text{ mm}$, 随着管柱环的宽度 r 逐渐增大, 换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度越来越小. 当 $r = 0.5\text{ mm}$ 时, 换

能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度最佳. 随着管柱环的宽度 r 逐渐增大, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅整体呈现出逐渐减小的趋势, 即当 $r = 0.5$ mm 时, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅最大. 随着管柱环的宽度 r 逐渐增大, 换能器系统谐振频率逐渐变大. 综合考虑机械强度、纵向位移振幅分布均匀度等各个性能指标, 当管柱环的宽度 $r = 0.5$ — 1.5 mm 时, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸纵振压电超声换能器的性能可达到较为理想的状态.

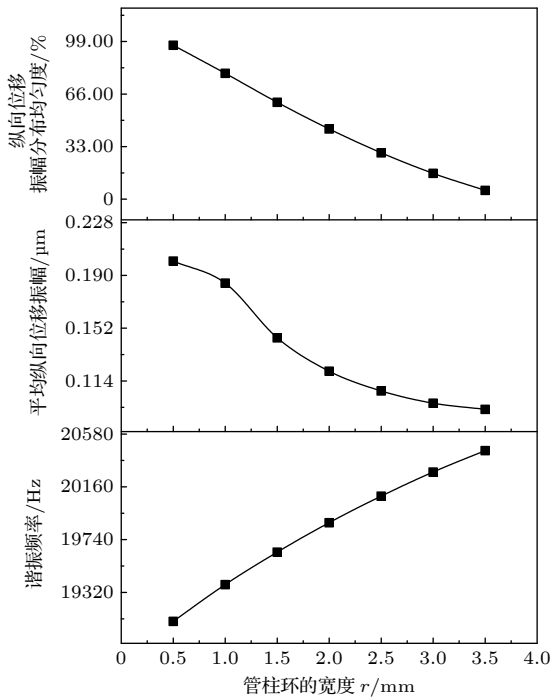


图 12 r 对换能器性能的影响

Fig. 12. Influence of the number of r on the performance of the transducer.

图 13 显示了最外层空气圆柱孔的半径 R 对大尺寸纵振压电超声换能器辐射面纵向位移振幅分布均匀度、平均纵向位移振幅以及换能器系统谐振频率的影响规律. 从图 13 可以看出, 当其他几何结构参数保持不变时, 设定管柱的内半径 $r_1 = 2.5$ mm, $r = 0.5$ mm, 随着最外层空气圆柱孔的半径 R 的增大, 换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度越来越大, 即当 $R = 7$ mm 时, 换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度最佳. 随着最外层空气圆柱孔的半径 R 的增大, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅整体呈现出减小—增大的趋势, 即当 $R = 3.5$ — 5.5 mm, $R = 7$ mm 时, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅较大. 随着最外层空气圆柱

孔的半径 R 的增大, 换能器系统谐振频率逐渐减小. 综合各个性能指标, 当最外层空气圆柱孔的半径 $R = 7$ mm 时, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸纵振压电超声换能器的性能可达到较为理想的状态.

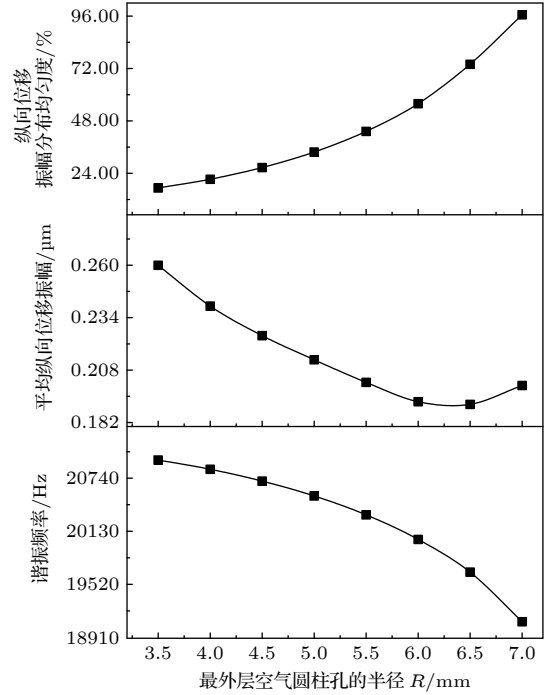


图 13 R 对换能器性能的影响

Fig. 13. Influence of the number of R on the performance of the transducer.

图 14 显示了管柱高度 h_2 对大尺寸纵振压电超声换能器辐射面纵向位移振幅分布均匀度、平均纵向位移振幅以及换能器系统谐振频率的影响规律. 从图 14 可看出, 当其他几何结构参数保持不变时, 设定管柱的内半径 $r_1 = 2.5$ mm, $r = 0.5$ mm, $R = 7$ mm, 随着管柱高度 h_2 的增大, 换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度先增大后减小, 当 $h_2 = 19$ — 21 mm 时, 换能器辐射面的纵向位移振幅分布均匀度较好. 随着管柱高度 h_2 的增大, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅整体呈现出增大—减小—增大的趋势, 当 $h_2 = 19$ — 26 mm 时, 换能器辐射面的平均纵向位移振幅较大. 随着管柱高度 h_2 的增大, 换能器系统谐振频率呈现逐渐减小的趋势. 综合各个性能指标, 当管柱高度 $h_2 = 19$ — 21 mm 时, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸纵振压电超声换能器的性能可达到较为理想的状态.

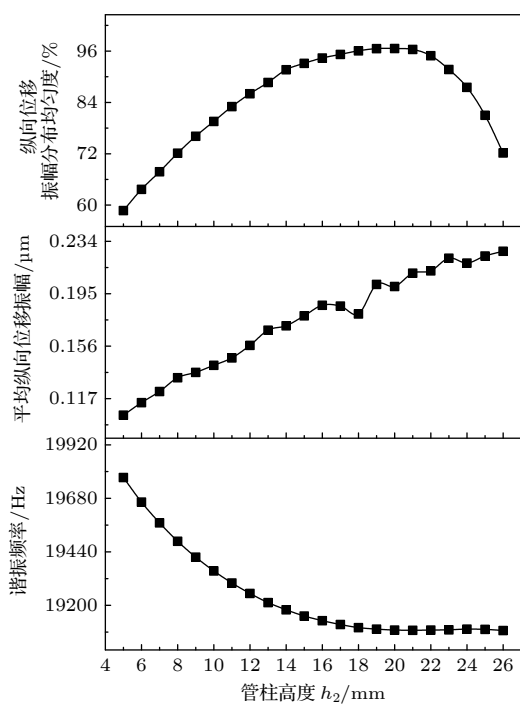
图 14 h_2 对换能器性能的影响

Fig. 14. Influence of the number of h_2 on the performance of the transducer.

总结以上分析得出: 管柱的内半径 r_1 、管柱环的宽度 r 、最外层空气圆柱孔的半径 R 、管柱的高度 h_2 均存在最佳的取值范围, 太小或者太大都会导致大尺寸纵振压电超声换能器辐射面纵向位移振幅分布均匀度较差, 平均纵向位移振幅较小. 当 $r_1 = 2.0\text{--}2.5\text{ mm}$, $r = 0.5\text{--}1.5\text{ mm}$, $R = 7\text{ mm}$, $h_2 = 19\text{--}21\text{ mm}$ 时, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸纵振压电超声换能器的性能可达到较为理想的状态.

3 结论

本文利用管柱型近周期声子晶体点缺陷结构对大尺寸纵振压电超声换能器进行了优化, 并分析了管柱的内半径 r_1 、管柱环的宽度 r 、最外层空气圆柱孔的半径 R 和管柱的高度 h_2 对换能器辐射面纵向位移振幅分布均匀度、平均纵向位移振幅以及换能器系统谐振频率的影响规律, 得到了能使换能器性能达到较为理想状态的参数取值范围. 仿真结果表明, 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构可以很好地改善大尺寸纵振压电超声换能器的性能.

参考文献

[1] Liu X H, Huang D M, Wang X J, Zhang C H, Zhu H J, Jiang

- Z M, Wang X 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 200 (in Chinese) [刘晓哈, 黄大鸣, 王兴军, 张春红, 朱海军, 蒋最敏, 王迅 1997 *物理学报* **46** 200]
- [2] Sigalas M M, Economou E N 1992 *J. Sound Vib.* **158** 377
- [3] Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2022
- [4] Adibi A, Lee R K 2002 *Elec. Lett.* **36** 1376
- [5] Wang Y F, Wang Y S 2013 *J. Vib. Acoust.* **135** 041009
- [6] Das S, Dwivedi K, Rajasekharan S G, Rao Y 2021 *J. Vib. Control* **27** 827
- [7] Yang S, Yu W D, Pan N 2011 *Physica B* **406** 963
- [8] Hsu J C, Wu T T 2006 *Phys. Rev. B* **74** 144303
- [9] Khelif A, Aoubiza B, Mohammadi S, Adibi A, Laude V 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046610
- [10] Benchabane S, Gaiffe O, Salut R, Ulliac G, Laude V, Kokkonen K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 081903
- [11] Ma T X, Fan Q S, Zhang C, Wang Y S 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 145104
- [12] Wu F, Hou Z, Liu Z, Liu Y 2001 *Phys. Lett. A* **292** 198
- [13] Miyashita T 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 4440
- [14] Li F, Liu J, Wu Y H 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 124907
- [15] Li Y G, Chen T N, Wang X, Ma T, Ping J 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 0249041
- [16] Lin S 2009 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **56** 1990
- [17] Lin S 1995 *Appl. Acoust.* **44** 249
- [18] Ren S C 1983 *Acta Acust.* **1** 152
- [19] Rani M R, Prakasan K, Rudramoorthy R 2014 *Inter. J. Desi. Eng.* **5** 344
- [20] Adachi K, Ueha S 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **87** 208
- [21] Wang S, Lin S Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 024303 (in Chinese) [王莎, 林书玉 2019 *物理学报* **68** 024303]
- [22] Wang S, Lin S 2019 *Ultra.* **99** 105954
- [23] Zhao T T, Lin S Y, Duan Y L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 224207 (in Chinese) [赵甜甜, 林书玉, 段祎林 2018 *物理学报* **67** 224207]
- [24] Zhao T T, Lin S Y 2019 *Acta Acust. United Acust.* **105** 953
- [25] Wang S, Lin S Y, Duan Y L 2018 *Appl. Acoust.* **37** 811 (in Chinese) [王莎, 林书玉, 段祎林 2018 *应用声学* **37** 811]
- [26] Hu L Q, Wang S, Lin S Y 2022 *Chin. Phys. B* **31** 054302
- [27] Lin J Y, Lin S Y 2022 *J. Shaanxi Norm. Uni. (Natural Science Edition)* **50** 117 (in Chinese) [林基艳, 林书玉 2022 *陕西师范大学学报(自然科学版)* **50** 117]
- [28] Hu L Q, Lin S Y 2021 *Appl. Acoust.* **40** 323 (in Chinese) [胡理情, 林书玉 2021 *应用声学* **40** 323]
- [29] Lin J Y, Lin S Y 2020 *Cryst.* **10** 21
- [30] 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]
- [31] Wei Q, Cheng Y, Liu X J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124301 (in Chinese) [魏琦, 程营, 刘晓峻 2011 *物理学报* **60** 124301]
- [32] Mohammadi S, Eftekhar A. A, Khelif A, Hunt W D, Adibi A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 221905
- [33] Wu T T, Huang Z G, Tsai T C, Wu T C 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 111902
- [34] Pennec Y, Djafari-Rouhani B, Larabi H, Vasseur J O, Hladky-Hennion A C 2008 *Phys. Rev. B* **78** 104105
- [35] Pourabolghasem R, Khelif A, Mohammadi S, Eftekhar A A, Adibi A A 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 013514
- [36] Shu F F 2016 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [舒凤凤 2016 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]

Large-scale piezoelectric ultrasonic transducers with tubular near-period phononic crystal point defect structure^{*}

Lin Ji-Yan¹⁾²⁾ Lin Shu-Yu^{2)†}1) (*School of Information Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China*)2) (*Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

(Received 13 February 2023; revised manuscript received 3 March 2023)

Abstract

The coupling vibration of large-scale piezoelectric ultrasonic transducer will make the average value of the longitudinal displacement amplitude of its radiation surface small and the amplitude distribution uneven, which seriously affects the performance and reliability of the system. In order to improve the performance of large-scale ultrasonic vibration system, a two-dimensional hole/slot near-periodic phononic crystal structure is used to suppress the transverse vibration, but the structure will in turn affect the mechanical strength of the transducer while achieving the suppression of the transverse vibration. The working bandwidth and other performance parameters have adverse effects. Based on this, a new idea of optimizing the large-scale sandwich longitudinal vibration piezoelectric ceramic transducer by using the tubular near-periodic phononic crystal point defect structure is proposed. This method can not only use the point defect mode of the constructed solid/gas two-dimensional near-periodic phononic crystal structure to obtain extremely low energy loss, but also effectively improve the longitudinal displacement amplitude and amplitude distribution uniformity of the radiation surface of the system. The double annular holes in the pipe string structure can also be used to enhance the multiple scattering of sound waves, so that the transducer can also produce a band gap under the low conditions of the pipe string, effectively suppressing the transverse vibration, at the same time, significantly broadening the working bandwidth of the transducer system, enhancing the stability and mechanical strength of the system, and reducing the processing cost. Simulation results and experimental processing test results also prove the effectiveness of the optimization.

In order to find the best parameters for the performance of the large-scale longitudinal vibration piezoelectric ultrasonic transducer, in the paper the finite element analysis software is used to study the influence of the inner radius r_1 of the pipe string, the width r of the pipe string ring, the radius R of the outermost air cylinder hole, and the height h_2 of the pipe string at the longitudinal resonance frequency of the transducer performance, the longitudinal displacement amplitude distribution uniformity of the radiation surface, and the average longitudinal displacement amplitude. In the research is finally found the range of parameters that can make the performance of the transducer reach a relatively ideal state. The simulation results show that the tubular near-periodic phononic crystal point defect structure can improve the performance of large-scale longitudinal vibration piezoelectric ultrasonic transducer.

Keywords: transverse vibration, performance of large-scale piezoelectric ultrasonic transducer, tubular near-periodic phononic crystal point defect structure

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

DOI: [10.7498/aps.72.20230195](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230195)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174240, 11964040) and the Doctoral Research Start-up Fund, China (Grant No. 22GK26).

[†] Corresponding author. E-mail: sylin@snnu.edu.cn



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

林基艳 林书玉

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

Lin Ji-Yan Lin Shu-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 094301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230195

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230195>

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

基于二维声子晶体的大尺寸夹心式换能器的优化设计

Optimal design of large-sized sandwich transducer based on two-dimensional phononic crystal

物理学报. 2019, 68(2): 024303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181955>

类声子晶体结构对超声塑料焊接工具横向振动的抑制

Suppression of lateral vibration in rectangular ultrasonic plastic welding tool based on phononic crystal structure

物理学报. 2018, 67(22): 224207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181150>

新型二维三组元压电声子晶体板的缺陷态及振动能量回收

Defect states and vibration energy recovery of novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal plate

物理学报. 2019, 68(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190260>

基于2-2型压电复合材料的新型宽频带径向振动超声换能器

A new broadband radial vibration ultrasonic transducer based on 2-2 piezoelectric composite material

物理学报. 2021, 70(1): 017701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201352>

基于声子晶体位错理论的二维超声塑料焊接系统

Two-dimensional ultrasonic plastic welding system based on phononic crystal dislocation theory

物理学报. 2020, 69(18): 184302 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200804>

新型二维压电声子晶体板带隙可调性研究

Tunable bandgaps in novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal slab

物理学报. 2018, 67(21): 214208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180611>