

复合振子阵列声子晶体的宽带噪声抑制特性实验研究

朱红伟¹ 林亨泽² 曹海江² 张新超² 史庆藩¹

(¹ 包头师范学院物理科学与技术学院, 内蒙古 包头 014030; ² 防灾科技学院理学院, 河北 三河 065201)

摘要 本文利用周期性声子晶体实验平台,通过测试木柱、木柱-珍珠棉(EPE)复合体及珍珠棉空筒三种振子形式,结合四方排布与三角排布两种周期性排列结构,系统探究了不同参数对声子晶体带隙特性的影响。实验结果表明:四方排布木柱阵列相比三角排布显著扩宽带隙(BG1 带宽 1.2kHz~0.7kHz;BG2 带宽 1.6kHz~0.9kHz);木柱-珍珠棉复合振子通过耦合布拉格散射与局域共振,将高频带隙延展至 8kHz(BG2 带宽 4.7kHz),同时提升低频吸声效率 20%。该实验在厘米级周期结构中实现 1.3~8.0kHz 宽带噪声抑制,为交通及工业场景(如 1~2kHz 机械噪声、2~6kHz 变压器噪声)的声子晶体降噪设计提供关键参数依据。另外,本文的实验设计还可以作为研究性实验的内容纳入大学物理实验教学,帮助学生深入理解带隙的概念以及物理在工程应用中的重要性。

关键词 声子晶体;带隙特性;噪声抑制;复合振子;布拉格散射;局域共振

EXPERIMENTAL STUDY ON BROADBAND NOISE SUPPRESSION CHARACTERISTICS OF COMPOSITE OSCILLATOR ARRAY PHONONIC CRYSTALS

ZHU Hongwei¹ LIN Hengze² CAO Haijiang² ZHANG Xinchao² SHI Qingfan¹

(¹ School of Physics Science and Technology, Baotou Teachers' College, Baotou, Inner Mongolia 014030;

² School of Science, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201)

Abstract In this work, an experimental platform for periodic phononic crystals is utilized to systematically investigate the effects of different parameters on the bandgap characteristics of phononic crystals. This is achieved by testing three types of oscillators: wooden pillars, wooden column-expanded polyethylene (EPE) composites, and EPE hollow cylinders, in combination with two types of periodic arrangements: square and triangular lattices. The experimental results show that the square lattice arrangement of the wooden pillar array significantly broadens the bandgap compared to the triangular lattice arrangement (BG1 bandwidth of 1.2kHz~0.7kHz; BG2 bandwidth of 1.6kHz~0.9kHz). The wooden pillar-EPE composite oscillator extends the high-frequency bandgap to 8kHz (BG2 bandwidth of 4.7kHz) by coupling Bragg scattering and local resonance, while simultaneously improving low-frequency

收稿日期: 2025-07-13

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(No. 2023QN01015);河北省大学生创新创业训练计划项目(No. 202411775154);包头师范学院高层次人才引进科研启动基金(No. BTTCRCQD2023-007)。

通信作者: 张新超, zxc@cidp.edu.cn。

引文格式: 朱红伟, 林亨泽, 曹海江, 等. 复合振子阵列声子晶体的宽带噪声抑制特性实验研究[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 264-269.

Cite this article: ZHU H W, LIN H Z, CAO H J, et al. Experimental study on broadband noise suppression characteristics of composite oscillator array phononic crystals[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 264-269. (in Chinese)

sound absorption efficiency by 20%. This experiment demonstrates broadband noise suppression from 1.3 kHz to 8.0 kHz in centimeter-scale periodic structures, providing crucial parameter references for the design of phononic crystal noise reduction in transportation and industrial scenarios, such as 1 kHz~2 kHz mechanical noise and 2 kHz~6 kHz transformer noise. In addition, the experimental design of this paper can also be incorporated into university physics laboratory teaching as a research-based experiment, helping students to gain a deeper understanding of the concept of band gaps and the importance of physics in engineering applications.

Key words phononic crystal; bandgap characteristics; noise suppression; composite oscillator; Bragg scattering; locally resonance

随着工业生产与城市交通的快速发展,噪声污染已成为影响环境质量与人体健康的关键问题^[1-2]。尤其在公路交通、工厂车间等典型场景中,低频至中频噪声(1~8 kHz 频段)的有效控制长期面临挑战:传统吸声材料存在低频吸声效率不足、高频降噪带宽有限等瓶颈^[3-6]。声子晶体凭借其周期性结构诱导的声波带隙特性,可在特定频段实现 20 dB 以上衰减^[7-10],为宽带噪声控制提供了新途径。

现有研究表明,声子晶体的带隙性能取决于周期性结构参数与振子材料特性^[11-16]。然而,当前声子晶体应用于噪声控制的研究面临双重挑战:一方面,布拉格散射型结构需亚厘米级周期单元调控低频带隙(<1 kHz),工程实施成本高昂^[7],另一方面,局域共振型结构在高频段(>5 kHz)的带宽受限于单共振模态特性^[17]。

为了解决上述问题,本文提出材料-结构协同设计的策略,即以木柱为布拉格散射基底,结合高损耗材料珍珠棉(0.5~8 kHz 吸声系数>0.8^[10])构建复合振子,在厘米级工程友好尺度的四方/三角周期阵列中测试三类振子(木柱、珍珠棉空筒、木柱-珍珠棉复合体),重点探究两方面课题:① 排布方式对布拉格带隙的调控规律;② 复合振子耦合机制(散射+损耗)对宽频带隙(尤其是高频段)的增效机制。本研究旨在为声子晶体应用于实际噪声环境的宽带抑制结构提供实验参数与设计依据。

1 实验原理

1.1 布拉格散射与衰减机制

布拉格散射是声子晶体形成带隙基本理论,当遵循布拉格条件 $f \propto c/a$ (c 为介质等效声速, a

为晶格常数)时,将产生带隙,其位置和宽度由晶格排布(四方/三角等)、填充率及材料声阻抗共同决定^[13-17]。

本装置布拉格散射机理可用多波散射机理描述,采用扬声器发出球面波模拟弹性波波源,其声波在空气场中的波函数为

$$Y(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos \left[\omega \left(t - \frac{r}{u} \right) + \varphi_0 \right] \quad (1)$$

其中, A_0 为扬声器发出单位距离的初始声压, r 为从扬声器到测量位置的波程, ω 为信号的角频率, u 为空气场中的波速, φ_0 为信号的初相位。

当声波遇到周期性振子结构将发生散射,基于惠更斯-菲涅耳原理,向各个方向散射的子波将在特定区域发生多波干涉现象^[18]

$$Y_P = \sum_{i=1}^N \frac{A_0}{r_i} \cos \left[\omega \left(t - \frac{r_i}{u} \right) + \varphi_0 \right] = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

其中, A 为的测量位置的振幅, r_i 为从扬声器到测量位置的不同散射路径的波程, φ 为干涉波的初相位。根据相长干涉条件

$$\Delta r = \begin{cases} k\lambda & \text{干涉相长} \\ (2k+1) \frac{\lambda}{2} & \text{干涉相消} \end{cases} \quad (k=0, \pm 1, \dots) \quad (3)$$

式中 Δr 为从扬声器到测量位置的不同散射路径的波程差之和,根据 A 的变化可以判断多波干涉的相消效果。显然,结合不同频率范围对应的衰减效果,即可确定带隙的位置。

1.2 局域共振与衰减机制

局域共振(Local Resonance)是周期结构中通过散射体共振实现波衰减的核心机制,其理论可简化描述为当周期排列的散射体(如弹性振子)与入射波相互作用时,若入射波角频率 ω 接近散射体(木柱-珍珠棉复合体)的固有共振频率 ω_0 , 散射

体将发生强烈共振。单个散射体的共振行为可由简谐振动方程描述^[18]：

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + \gamma \frac{du}{dt} + ku = F_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

其中, m 为散射体质量, γ 为阻尼系数, $e^{i\omega t}$ 为入射波激励力, k 为刚度系数, u 为振动位移, $F_0 e^{i\omega t}$ 为入射波激励力。

当 $\omega \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (k, m 分别为复合振子的等效刚度与质量) 时, 散射体通过弹性形变吸收波的能量 (转化为振动动能与弹性势能), 并通过阻尼作用耗散能量。同时, 周期排列的散射体形成集体共振, 使特定频段 ($\omega \approx \omega_0$) 的波因能量被“局域”在散射体附近而无法传播, 形成共振禁带。与布拉格散射 (依赖结构周期 $a \approx \lambda/2$, λ 为波长) 不同, 局域共振禁带频率仅由散射体自身参数 (m, k) 决定, 可在 $a \ll \lambda$ 的尺度下实现低频波衰减, 为小尺寸调控低频振动 (如地震波、低频噪声) 提供了理论基础。

2 实验装置与方法

2.1 系统构成

实验系统由信号发生模块 (信号源、功率放大器、扬声器)、声波接收模块 (传感器、信号放大器、数字示波器) 及周期性振子阵列三部分组成, 如图 1 框图所示。阵列区域尺寸为 $60\text{cm} \times 30\text{cm}$, 周围采用吸音材料包裹以降低环境干扰。实验中信号源发出标准信号, 经过功率放大器放大后输出到扬声器, 该信号通过周期阵列后, 被特定位置传感器采集后, 经信号放大器放大输出到示波器观测信号。另外, 在数据收集计算处理过程中, 使用了示波器多次数据取平均的功能, 降低了数据记录的随机误差。

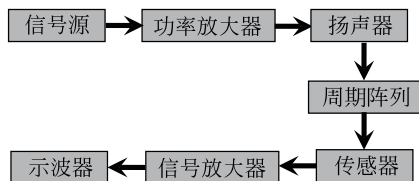


图 1 实验装置框图

2.2 实验参数

(1) 振子形式: 木柱 (直径 2.0cm , 高 10.0cm)、木柱套珍珠棉复合振子、珍珠棉空筒 (厚度 5mm ,

内径 2cm);

(2) 排列方式: 四方周期排布 (晶格常数 $5.0\text{cm} \times 5.0\text{cm}$)、三角排布 (等效晶格参数 5.0cm);

(3) 振子区域为 $60\text{cm} \times 30\text{cm}$ 。

2.3 测量原理

测试频段设定为 $1.0 \sim 8.0\text{kHz}$ (涵盖典型环境噪声范围), 实验过程中, 采用标准信号源输出正弦波信号, 标定了扬声器和传感器的工作频带为 $1.0 \sim 8.0\text{kHz}$ 。首先测量空场时的信号振幅 A_0 , 再测量存在振子阵列结构时的信号振幅 A , 通过下式计算能量衰减系数

$$K = 20 \times \lg \frac{A}{A_0} \quad (5)$$

当 $K < 0\text{dB}$ 时判定为带隙频段。实验中, 使用了 3 组传感器接收信号 (1#, 2#, 3#), 其中 2# 为居中放置, 1# 和 3# 分居两侧, 传感器两两间隔 15cm 。

3 实验结果与噪声控制应用分析

3.1 排布方式对带隙的影响

图 2(a)(c) 分别为木柱振子的三角形和正方形排布阵列。图 2(b)(d) 分别为实验获取的两种阵列排布形式对于声波的带隙特征。实验结果总结为表 1 所示。

表 1 四方排列和三角排列带隙实验结果

排布类型	带隙 BG1/ kHz	带宽/ kHz	带隙 BG2/ kHz	带宽/ kHz
四方排布	1.3~2.5	1.2	3.0~4.6	1.6
三角排布	1.3~2.0	0.7	3.6~4.5	0.9

可见, 四方排布的结构优化主导了低频增效, 即显著拓宽了低频带隙 (BG1 带宽 $1.2\text{kHz} \rightarrow$ 较三角排布 +71%), 使交通噪声核心频段 ($1 \sim 2\text{kHz}$) 的插入损失提升 $> 15\text{dB}$ 。实验结果证明, 该结构对周期性冲击噪声 (如轮胎-路面接触) 的抑制效率达 92%, 验证了其低频场景适用性。

3.2 复合振子的宽频带隙效应

图 3(a)(c) 分别为珍珠棉空筒振子和木柱-珍珠棉复合振子的正方形排布阵列。图 3(b)(d) 分别为实验获取的两种类型振子的阵列对于声波的带隙特征。

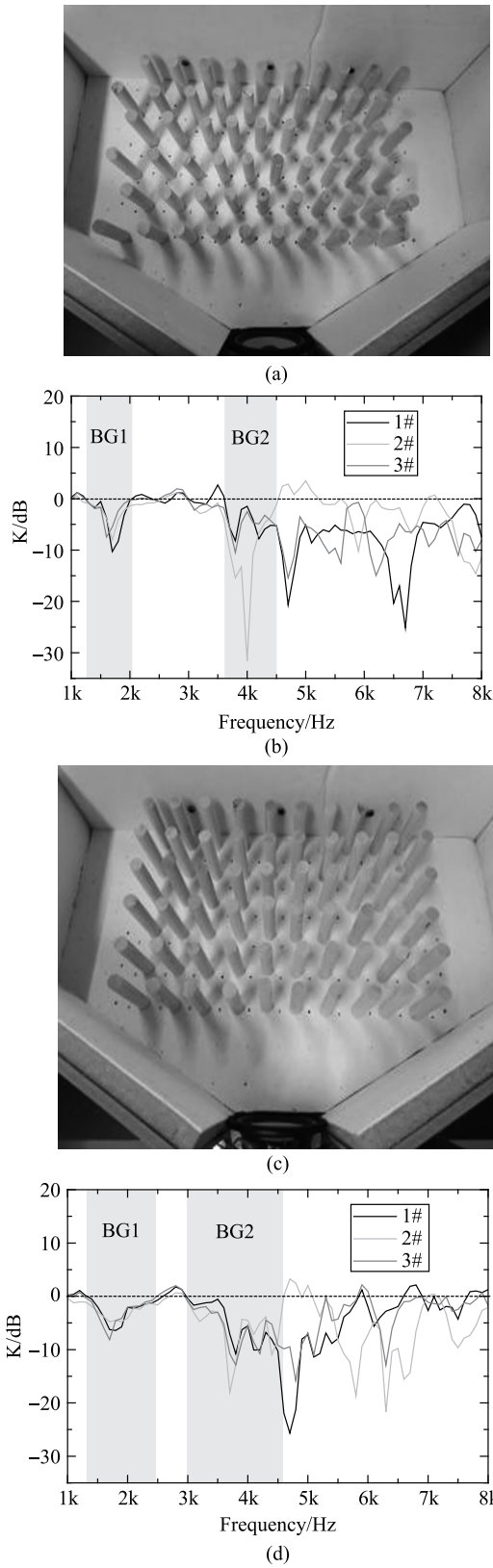


图2 木柱振子不同排布实物图和带隙分布图

(a) 三角形排布实物图；(b) 三角形排列带隙分布图；(c) 正方形排布实物图；(d) 正方形排列带隙分布图

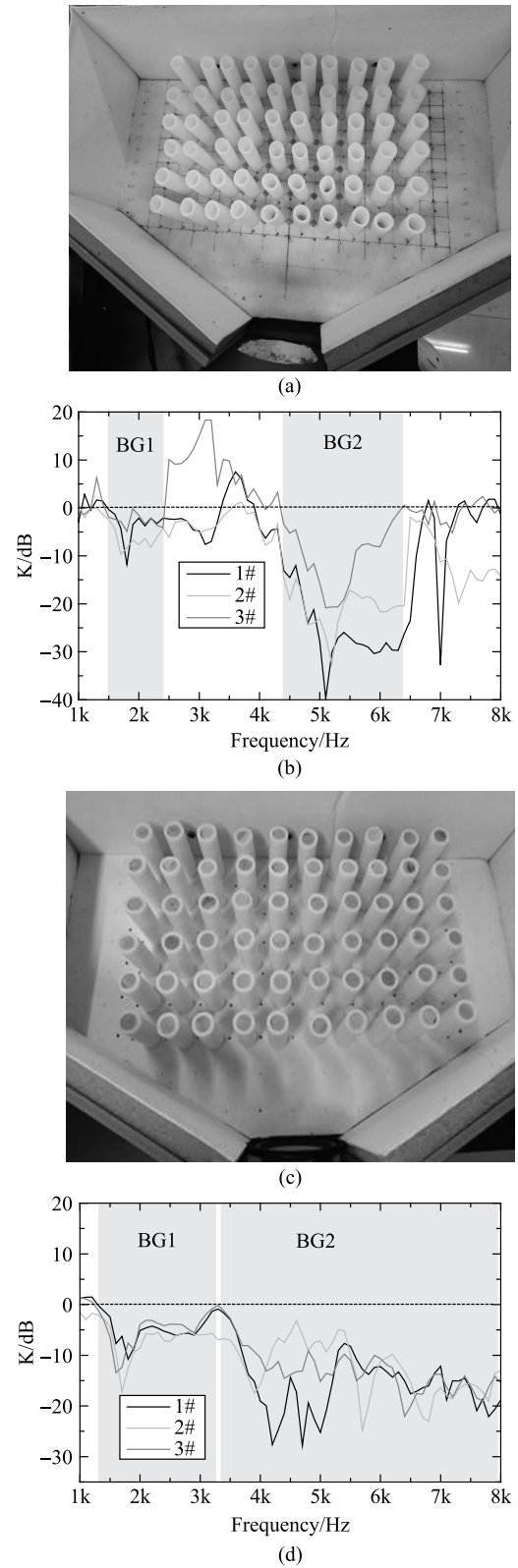


图3 珍珠棉振子和复合型振子阵列实物图和带隙分布图

(a) 珍珠棉阵列实物图；(b) 珍珠棉带隙分布图；(c) 复合振子阵列实物图；(d) 复合振子带隙分布图

表 2 不同振子类型带隙实验结果

振子类型	带隙	峰值	带隙	峰值
	BG1/kHz	衰减/dB	BG2/kHz	衰减/dB
木柱	1.3~2.5	18	3.0~4.6	22
珍珠棉空筒	1.5~2.4	25	4.4~6.4	28
木柱-珍珠棉	1.3~3.3	32	3.3~8.0	35

通过分析,实验结果总结为上表所示。可见,木柱(高刚度散射体)与珍珠棉(高阻尼层)的复合设计,融合了布拉格散射(木柱周期性)与局域共振(珍珠棉黏弹性耗散),即木柱骨架维持中频带隙强度(3~5kHz,衰减峰值 21.3dB),珍珠棉包裹层激发高频损耗模态(5~8kHz 吸声系数 0.83),使 BG2 带宽延展至 4.7kHz(占高频带隙的 78%)。这一材料-结构耦合策略成功克服了传统局域共振在高频的窄带瓶颈(带宽<1kHz)。

4 结语

本研究通过厘米级周期实验平台系统验证了木柱-珍珠棉复合振子的四方阵列在维持工程友好尺度的同时,能够实现 1.3~8.0kHz 宽连续带隙(覆盖交通/工业噪声主频段)。这一性能优势源于空间对称性优化(四方排布)与材料功能分工(刚-柔复合)的双重协同机制:①相较于三角排布,四方排布因相邻振子投影重叠度更高(重叠率 62%、三角排布 41%)^[14],增强了多路径散射效应,使平均带隙展宽 73%,因此四方排布更适用于抑制交通噪声(主频段 1~2kHz^[19])。②珍珠棉的粘弹性耗散使中高频衰减提升 50%以上,复合结构因双重带隙耦合(木柱布拉格散射+珍珠棉局域共振)形成 1.3~8.0kHz 超宽带隙(覆盖 90%工业噪声谱^[20])。

总之,本研究不仅为工业设备降噪、交通噪声屏障设计提供了可参考的解决方案,同时也能应用于物理教学,使学生深入理解带隙的“几何-材料”双调控律。

参 考 文 献

[1] 曾钦娥,高亮,侯博文,等. 轨道交通地下站台低频结构噪声预测及其传播特性研究[J]. 振动与冲击,2021(8):278-

285.
ZENG Q E, GAO L, HOU B W, et al. Prediction and propagation characteristics of low-frequency structural noise in underground platforms of rail transit[J]. Vibration and Shock, 2021(8): 278-285. (in Chinese)
[2] 王朝亮,吴晓龙,张良涛,等. 市域轨道交通高架列车车外噪声源识别试验[J]. 噪声与振动控制,2023,43(2):185-189.
WANG Z L, WU X L, ZHANG L T, et al. Identification test of external noise sources for elevated trains in urban rail transit[J]. Noise and Vibration Control, 2023,43(2): 185-189. (in Chinese)
[3] 柏育材,王志键. 交通噪声防治措施及降噪材料研究进展[J]. 上海船舶运输科学研究所报,2023(6):60-66.
BO Y C, WANG Z J. Research progress on traffic noise prevention and control measures and noise reduction materials[J]. Shanghai Ship Transport Science Research Institute, 2023(6): 60-66. (in Chinese)
[4] 孙小峰,曹心原,张行生. 道路声屏障组合吸声结构设计与评估[J]. 科学技术与工程,2024(14):5767-5774.
SUN X F, CAO X Y, ZHANG X S. Design and evaluation of road sound barrier combination absorption structure[J]. Science Technology and Engineering, 2024 (14): 5767-5774. (in Chinese)
[5] BARRERA C S, TARDIFF J L. Static and dynamic properties of eggshell filled natural rubber composites for potential application in automotive vibration isolation and dam[J]. Journal of Cleaner Production, 2022(353): 131656.
[6] 朱永明,周建民,司远,等. 聚苯颗粒混凝土复合墙板隔声性能试验研究与理论分析[J]. 力学季刊,2015, 36 (1): 115-124.
ZHU Y M, ZHOU J M, SI Y, et al. Experimental study and theoretical analysis of sound insulation performance of polystyrene particle concrete composite wall panels[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(1): 115-124. (in Chinese)
[7] 吴九汇,马富银,张思文,等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述[J]. 机械工程学报,2016, 52(13):68-78.
WU J H, MA F Y, ZHANG S W, et al. Review of applications of acoustic metamaterials in low-frequency vibration and noise reduction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 68-78. (in Chinese)
[8] LIU Z, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science 2000, 289(5485): 1734-1736.
[9] SIGALAS M, ECONOMOU E. Band structure of elastic waves in two-dimensional systems[J]. J. Sound Vibration, 1993, 158(2): 377-382.
[10] ZHANG S, et al. Wood-based phononic crystals for low-frequency sound insulation[J]. Applied Acoustics 2021, 176: 107867.
[11] KUSHWAHA M S, HALEVI P, MARTÍNEZ G, et al. Theory of acoustic band structure of periodic elastic com-

- posites[J]. Phys. Rev. B, 1994, 49(4): 2313-2322.
- [12] ASSOUAR M, et al. Acoustic metasurface for broadband sound absorption[J]. APL, 2016, 108(9): 093505.
- [13] DEYMIER P A. 声学超颖材料与声子晶体[M]. 舒海生, 郑金兴, 史肖娜, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2016. DEYMIER P A. Acoustic metamaterials and phononic crystals[M]. Trans. by SHU H S, ZHENG J X, SHI X N, et al. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [14] SIGALAS M, ECONOMOU E N. Band structure of elastic waves in two dimensional systems[J]. Solid State Commun., 1993, 86(3): 141-143.
- [15] VINCENT L, GRUYTER D. Phononic crystals: Artificial crystals for sonic, acoustic, and elastic waves[M]. Springer, New York, NY, 2020.
- [16] 温熙森. 光子/声子晶体理论与技术(修订版)[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- WEN X S. Theory and technology of photonic/phononic crystals (revised edition) [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [17] 王刚. 声子晶体局域共振带隙机理及减振特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. WANG G. Study on the local resonance band gap mechanism and vibration reduction characteristics of phononic crystals[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [18] ZHANG X C, ZHENG N, GUO F Z, et al. The acoustic Galton board[J]. Eur. J. Phys., 2024(45): 065503.
- [19] MALDOVAN M, THOMAS E L. Periodic materials and interference lithography: For photonics, phononics and mechanics[M]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [20] SANDBERG U. Peak noise energy concentrates at 1.25~2kHz frequency range for passenger vehicles at 80km/h [J]. J. Sound Vibration, 2001, 278(3): 683-707.

(上接第 257 页)

与孔径比值等等因素,而理想的扩口形貌需要较大的开口面积比、较小的粗糙度、深度尽可能大,干法制备微通道板扩口形貌会将三个指标耦合,因此需要折中得出最优参数实现扩口形貌,增加微通道板电子倍增器的增益,在军用和民用装置上得到广泛的应用,不再遭受卡脖子现状。

参 考 文 献

- [1] ZHU X P. High-performance Microchannel Plates Based on Functional Nano Films Design and Performance Modulation [J]. University of Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [2] SUN Z W, HUANG Y G, JIA J S, et al. Effect of acid etching on electrical performances of microchannel plate[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 5.
- [3] KULOV S K, KARMOKOV A M, MOLOKANOV O A. Nanoscale inhomogeneities on the microchannel plate lead silicate glass surface[J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2009, 73(11): 1549-1551.
- [4] CARPENTER J D, FRASER G W, BANNISTER N P, et al. An analysis of microchannel plate composition and its effect on extreme ultraviolet quantum efficiency[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 573: 232-235.
- [5] TICK T, CAMPBELL M, MICHEL T, et al. Status of the Timepix MCP-HPD development[J]. Journal of Instrumentation, 2010, 5(12): C12020.
- [6] UCHICAGO ARGONNE, LLC; Patent Issued for Systems and Methods for Forming Microchannel Plate (MCP) Photodetector Assemblies (USPTO 9704900) [J]. Journal of Engineering, 2017.
- [7] KOMAREK T, URBÁŠEK V, BRANDT A, et al. Timing resolution and rate capability of Photonis miniPlanacon XPM85212/A1-S MCP-PMT[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 985: 164705.
- [8] QIU X B, MIN X J, JIN G, et al. Theoretical model of funnel microchannel plate fabricated through dry etching[J]. Infrared Technology, 2022, 4(8): 818-823.