

引用格式: 刘强, 康钟绪, 宋瑞祥, 等. 分布式通风隔声罩的设计和效果研究[J]. 声学技术, 2023, 42(1): 75-80. [LIU Qiang, KANG Zhongxu, SONG Ruixiang, et al. Design and effect analysis of the distributed ventilation and sound insulation shield[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(1): 75-80.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.01.013

分布式通风隔声罩的设计和效果研究

刘 强, 康钟绪, 宋瑞祥, 张慧娟, 杨 洁

(北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所, 北京 100054)

摘要: 针对动力设备同时满足降噪和散热的需求, 提出一种周期分布式结构的通风隔声罩。隔声罩的罩壁内嵌通风消声单元, 声波衰减的同时, 气流可顺利通过罩壁进行耗散。介绍了分布式通风隔声罩的设计, 并对其隔声性能进行了理论计算。通过分布式通风隔声罩对三种不同设备的插入损失分别进行了实际测量和分析。研究表明, 在通过频率以上, 隔声罩插入损失的计算值和实测值吻合较好, 分布式通风隔声罩在其通过频率以上具有良好的隔声效果。该分布式通风隔声罩的有效降噪频率可根据不同声源的频率特性进行专一设计, 适用于各种需要通风散热的设备的隔声。

关键词: 周期结构; 通风隔声罩; 隔声设计; 声学超材料

中图分类号: TB535

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-01-0075-06

Design and effect analysis of the distributed ventilation and sound insulation shield

LIU Qiang, KANG Zhongxu, SONG Ruixiang, ZHANG Huijuan, YANG Jie

(Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100054, China)

Abstract: In order to meet the requirements of noise reduction and heat dissipation for power equipment, a ventilated sound insulation shield with a periodic distributed structure is proposed. Many ventilation and noise elimination units are embedded in the plate of the sound insulation shield. While sound wave attenuates, the airflow can be dissipated smoothly through the shield plate. The design of the distributed ventilation sound insulation shield is introduced, and its sound insulation performance is analyzed by theory. The inserted sound losses of the distributed ventilation and sound insulation shield for three different devices are calculated and measured, and the results show that the calculated values are in good agreement with the measured values. The distributed ventilation and sound insulation shield has a good sound insulation effect at the frequencies above its passing frequency, and the effective noise reduction frequency can be specially designed according to the frequency characteristics of different sound sources. It is suitable for sound insulation of various devices requiring ventilation and heat dissipation.

Key words: periodic structure; ventilation and sound insulation shield; sound insulation design; acoustic metamaterial

0 引言

隔声是在声源与接收者之间设置障碍物以阻隔噪声传播和干扰的技术措施, 隔声罩是较为常见的一种结构形式, 广泛用于噪声控制领域, 尤其是各类设备的噪声控制。隔声罩包括全封闭型、半封闭型、固定型、活动型等, 实际工程应用中, 可根据

项目特点、设备类型、噪声特性等多种因素设计不同的形式。

隔声罩的隔声性能与隔声构件的结构、材质、形状、刚度和吸声等参数直接相关。付常佳等^[1]基于有限元分析方法, 通过提取隔声罩的振动模态, 分析了厚度和阻尼对隔声罩效果的影响。郑辉等^[2]基于传递矩阵法对阻尼复合隔声板的性能进行了研究。

在实际生产活动中, 设备在产生噪声的同时, 会散发热量, 因此, 在对其采用隔声罩进行降噪的同时, 必须考虑通风散热结构的设计。毛万红等^[3]结合户外箱式变压器的降噪需求, 研究分析了以自然通风为主, 机械通风进行辅助的通风隔声罩的性能。吕东方等^[4]基于有限元法, 对开孔型隔声罩排

收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2021-09-28

基金项目: 北京市科学技术研究院改革发展项目(BJAST-RD-BMILP202102)、创新工程(PXM2021_178304_000005)资助。

作者简介: 刘强(1985—), 男, 北京人, 硕士, 研究方向为噪声与振动控制。

通信作者: 康钟绪, E-mail: kzx@bnilp.com

气孔处的封盖结构进行了研究,改善散热的同时,提高隔声罩的降噪性能。郑洁等^[5]针对交通噪声的影响,设计新型通风隔声窗,通过数值仿真方式对其性能进行分析,验证了中高频段具有良好的隔声效果。

传统的通风隔声罩的设计,往往需要占用很大的空间,而在实际工程中,并没有足够的空间用于隔声罩的安装,令降噪措施难以实施。因此,以声学超材料为代表的人工周期性结构,由于同时满足隔声和通风散热需求,并且几乎不受安装空间限制,逐渐被引入到通风隔声结构的设计当中。俞悟周等^[6]设计了一种基于透明双层微穿孔结构的通风隔声窗,得到了较好的隔声性能和通风效果。Kushwaha等^[7]提出了一个周期性弹性复合材料的全能带结构。陈琳等^[8]基于局域共振机理,设计一种带瓣型结构的声学超材料,通过有限元方式针对低频噪声衰减进行了带隙特性研究。陈琪琪等^[9]设计了一种复合局域共振型声子晶体,通过仿真方式对带隙上下边界的调控机制进行了研究。李志宽等^[10]基于夹层板理论,设计了圆形孔蜂窝的隔声结构,通过理论模型和计算,分析了层芯胞元半径、层芯壁厚等因素对隔声性能的影响。高亮等^[11]基于“降噪-散热”平衡的需求,设计了一种新型的双层周期结构用于隔声罩,并通过有限元法和实验室法对传递损失进行了分析和验证。袁伟等^[12]对薄膜声学超材料的低频隔声进行了研究,通过调整薄膜尺寸,提高隔声效果的同时增加了隔声带宽。崔洪宇等^[13]对不同形状质量块的声学超材料结构的隔声特性进行了研究,设计了新的超材料蜂窝夹层板结构。

综上所述,针对通风隔声结构,一部分研究仍然针对如何通过降低隔声罩散热通道的传声能力来提高整体隔声量,另一部分研究集中于以声学超材料为主的新型通风隔声结构。对于传统方式隔声罩的通风通道,由于需要安装消声装置,占地面积较大,往往受空间所限而无法实施。而当前对新型通风隔声结构的研究主要是以理论研究为主,通过仿真模型和理论计算方式对消声和隔声机理进行分析研究。并且,设计研究的新颖通风隔声结构存在系统复杂、通风面积小、生产工艺难度大、成本高、难以落地应用等问题。

鉴于此,本文提出一种新型隔声罩结构,将消声单元结构分布式嵌入隔声罩罩壁,利用罩壁结构的通风、消声能力,既能实现气流顺利通过,又能有效阻隔噪声的传播。通过理论计算和实验室测量对其性能进行了研究,并针对三种设备开展了实际

测试,验证了分布式通风隔声罩的隔声效果。

1 隔声罩的降噪理论

工程实践中,通常以插入损失 L_i 来表征隔声罩的实际降噪效果,定义为隔声罩设置前后,同一接收点的声压级之差。对于全封闭的隔声罩,其插入损失计算公式为

$$L_i = 10 \lg(1 + \alpha 10^{0.1L_T}) \quad (1)$$

式中: L_T 为罩体的隔声量,单位dB, α 为罩体内部的吸声系数。

对于无规则入射情况,隔声罩罩壁的隔声量 L_T 的计算公式为

$$L_T = 18 \lg(m) + 18 \lg(f) - 44 \quad (2)$$

其中: m 为罩壁的面密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, f 为频率,单位为Hz。此外,罩体内部的吸声系数以及罩壁的隔声量也可通过实验室测量获得。

2 通风隔声罩的设计和性能计算

2.1 通风隔声罩的设计

区别于传统的隔声罩通风结构设计,不在罩壁的位置单独设计进、排风消声器,而是在隔声罩的罩壁上直接开孔,解决由于空间限制而无法安装隔声罩的实际困难。但开孔必然导致声音泄漏,使得隔声罩的整体性能降低。因此,为保证隔声罩既有良好的隔声效果,又同时兼具通风散热的功能,设计一种新型双层隔声孔板模型,其结构基本模型如图1所示。

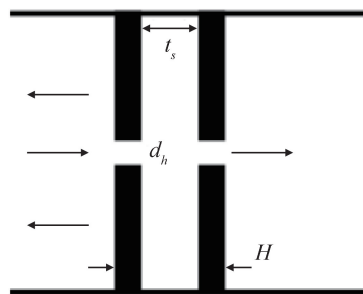


图1 双层隔声孔板模型

Fig.1 Basic model of double-layer sound insulation perforated plate

隔声罩罩壁采用内外双层隔声板结构,每层板均设置开孔,供气流流通。双层板之间设置消声膨胀结构,单个此结构为一个消声单元,在罩壁上均匀分布若干消声单元,来代替普通开孔。

每个通风消声单元均由内、外穿孔板和中间的消声膨胀结构共同构成。当声波由隔声罩内部向外

部传播时，一部分声波被罩壁隔声板阻挡发生反射，另一部分声波则经过消声单元衰减后继续向外传播。此结构实现了隔声罩既能通风散热，又能提升整体隔声性能的目的。由于罩壁上均匀分布有众多的通风消声单元，因此，称此隔声罩为分布式通风隔声罩。

分布式通风隔声罩的降噪幅值、有效频率带宽等性能与罩壁的通风隔声板的穿孔直径 d_h 、双层板的间距(消声膨胀结构宽度) t_s 、双层板总厚度 H 等因素直接相关。可根据实际需要，针对不同频率特性的设备，通过改变消声单元的结构参数进行设计。

分布式通风隔声罩的样件设计和加工为可拆卸式，便于实际使用，同时对其关键连接位置的密封性进行了专门设计。隔声罩样件的外形尺寸长×宽×高设计为800 mm×800 mm×800 mm，罩壁总厚度 H 为35 mm、穿孔直径 d_h 为10 mm、双层板的间距 t_s 为25 mm，穿孔间距为40 mm，膨胀腔内部长度 L 为37 mm。

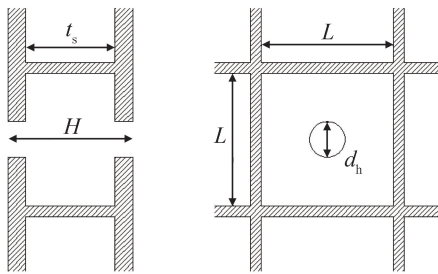


图2 隔声罩罩壁的单位结构

Fig.2 The unit structure of the sound insulation shield plate

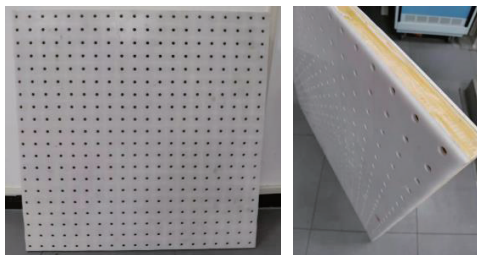


图3 分布式通风隔声罩的罩壁样件

Fig.3 Sample of the distributed ventilation and sound insulation shield plate

2.2 通风隔声罩的性能计算

由上述可知，隔声罩的隔声性能以插入损失 L_i 进行评价，并且可通过式(1)计算得到。隔声罩内部的吸声系数 α 通过混响室法测量得到，结果如图4所示。

依据吸声系数曲线，由于分布式通风隔声板表面较为光滑，因此其吸声系数性能较差。

分布式通风隔声罩罩壁(分布式通风隔声板)的隔声量 L_T 则由隔声室法测量得到，如图5、6所示。

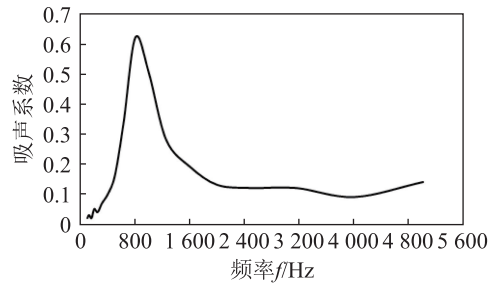


图4 隔声罩内壁的吸声系数

Fig.4 Sound absorption coefficient of the inner wall of sound insulation plate



图5 通风隔声板的本体隔声量测试

Fig.5 Sound insulation test of the ventilated sound insulation plate

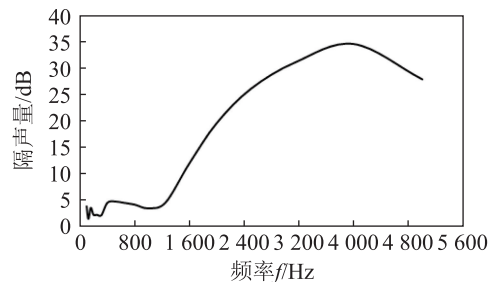


图6 通风隔声板的隔声性能

Fig.6 Sound insulation performance of the ventilated sound insulation plate

由式(1)结合隔声罩内壁吸声系数 α 以及隔声罩罩壁的隔声量 L_T ，可计算得到分布式通风隔声罩的插入损失，其性能曲线如图7所示。由图7中的隔声罩的插入损失的理论计算曲线可知，分布式通风隔声罩的通过频率在1 250 Hz附近，在1 250 Hz以上的频率范围，分布式通风隔声罩隔声性能的隔声性能较好。

3 通风隔声罩性能的实际测量

通过对空气压缩机、空气净化器、数据采集器这三种不同类型的设备分别进行测试，对分布式通风隔声罩的实际隔声效果进行研究和分析。为避免外界

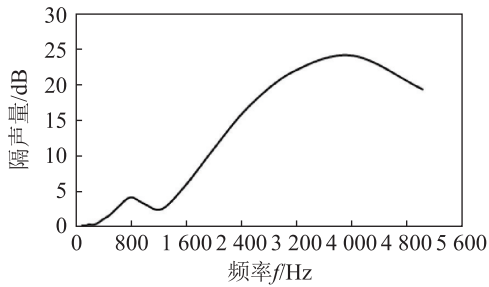


图7 分布式通风隔声罩插入损失的计算值
Fig.7 The calculated insertion loss curve of the distributed ventilation and sound insulation shield

环境对测试数据的影响,在半消声室开展相关测试。

半消声室的几何尺寸为 $7.6\text{ m}\times 6.9\text{ m}\times 4.9\text{ m}$, 下限截止频率为 70 Hz , 自由场半径为 3 m , 背景噪声 L_A 为 16.5 dB(A) 。

3.1 噪声源设备频率特性

将空气压缩机、空气净化器和数据采集器三种设备分别置于半消声室进行噪声特性测试,其噪声频率特性曲线如图8所示。

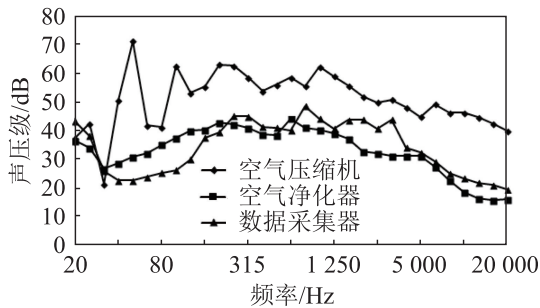


图8 三种设备的噪声频率特性曲线
Fig.8 Noise frequency characteristic curves of three devices

由图8中的特性曲线可看出,空气压缩机和空气净化器的噪声,中低频特性较为明显,而数据采集器噪声频率呈宽频特性,主要的噪声频率范围为 $250\sim 3150\text{ Hz}$ 。

3.2 隔声罩效果测试

以上述三种设备运行时实际产生的噪声作为声源分别开展隔声测试,以插入损失作为分布式隔声罩的隔声性能的评价量。在分布式通风隔声罩的内、外部分别设置声学传感器,其中,外部传感器在隔声罩的侧向和顶部分别布置,传感器与隔声罩外表面的距离为 0.5 m ,各测点的编号如表1所示。分布式通风隔声罩性能测试的现场布设如图9所示。

经过测试和分析,三种不同设备及不同噪声测点的噪声特性,如图10~12所示。

三种设备的测试结果表明,安装分布式通风隔声罩后, 1250 Hz 以上频率的噪声明显减小,低于 1250 Hz 的个别频率处的噪声也得到一定的降低。

表1 对三种设备进行隔声测试的测点编号布设

Table 1 Placement of the test points for sound insulation tests of the three devices

设备名称	测点位置	测点编号
压缩机	侧面 0.5 m	测点1
	顶部 0.5 m	测点2
净化器	侧面 0.5 m	测点3
	顶部 0.5 m	测点4
采集器	侧面 0.5 m	测点5
	顶部 0.5 m	测点6

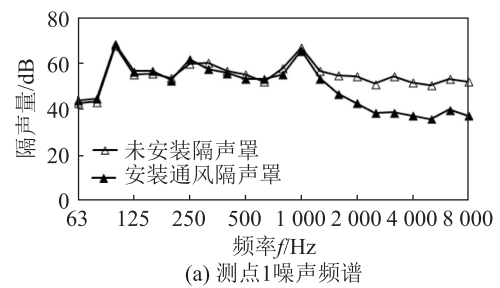


图9 分布式通风隔声罩性能测试的现场布设
Fig.9 Site layout for the performance test of the distributed ventilation and sound insulation shield

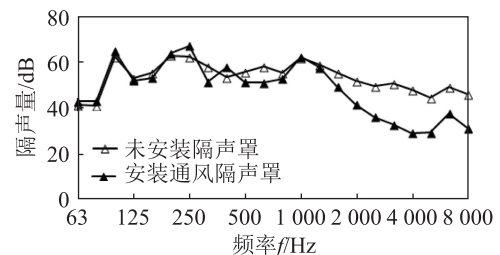
由实际测试可知,隔声罩的通过频率约为 1250 Hz ,与理论计算的通过频率保持一致。

三种设备安装分布式通风隔声罩插入损失的频谱曲线如图13所示。

对比图7和图13,即分布式通风隔声罩隔声性能的理论计算曲线与实际测量曲线可知,分布式通风隔声罩隔声性能的实际测量结果与理论计算的隔声性能在频率趋势上保持一致,有明显隔声作用的频率范围均为通过频率 1250 Hz 以上。实际测试的



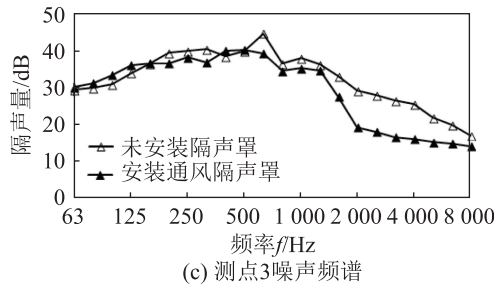
(a) 测点1噪声频谱



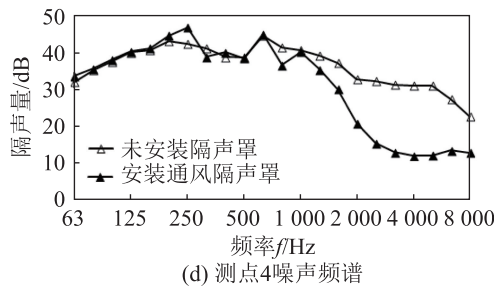
(b) 测点2噪声频谱

图10 压缩机加分布式通风隔声罩前后的隔声特性

Fig.10 Sound insulation performances of the compressor before and after adding the distributed ventilation and sound insulation shield



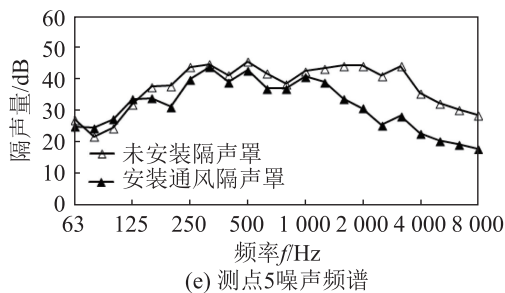
(c) 测点3噪声频谱



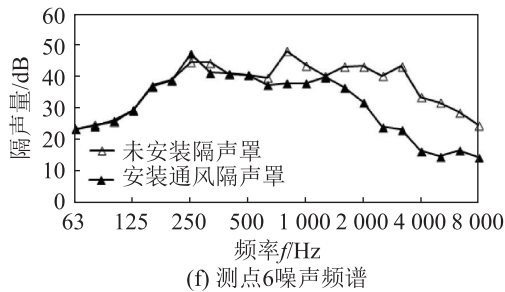
(d) 测点4噪声频谱

图11 净化器加分布式通风隔声罩前后的隔声特性

Fig.11 Sound insulation performances of the purifier before and after adding the distributed ventilation and sound insulation shield



(e) 测点5噪声频谱



(f) 测点6噪声频谱

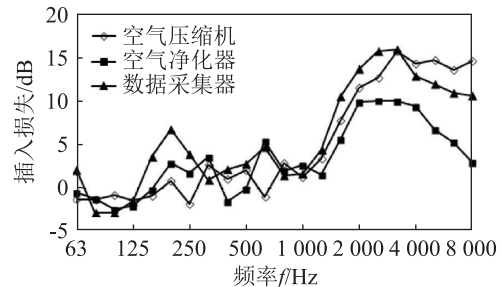
图12 采集器加分布式通风隔声罩前后的隔声特性

Fig.12 Sound insulation performances of the acquisition device before and after adding the distributed ventilation and sound insulation shield

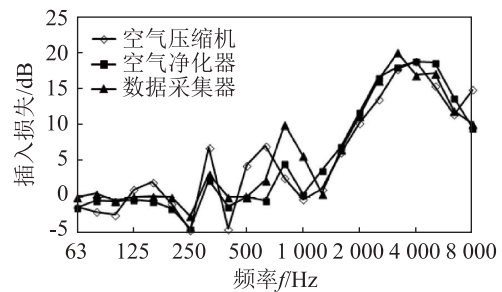
隔声量最大值约为 20 dB，整体实测隔声量稍低于理论计算结果，造成此种情况的主要原因如下：

(1) 实际测试时，设备安装隔声罩后，声源处于相对密闭的有限空间内，并且由于内壁吸声性能较差，使得隔声罩内的声压级大于未安装隔声罩时的声压级，对隔声罩的实际隔声效果产生影响。

(2) 当前隔声罩壁板与固定框架的连接位置、隔声罩壁板上预留的线缆孔会造成一定的透声，对实测结果产生了影响。



(a) 侧面测点插入损失



(b) 顶部测点噪声频谱

图13 分布式通风隔声罩对三种设备的插入损失

Fig.13 Inserted sound losses of the distributed ventilation and sound insulation shield for the three devices

4 结论

本文提出了一种分布式通风隔声罩结构，采用了在双层板结构上分布式内嵌消声单元的方式。本文还提出了一种允许气流均匀通过但能有效衰减声波的隔声罩罩壁。通过理论计算和实际测量，验证了通风隔声罩的隔声性能，获得了以下结论：

(1) 通过理论计算可较好地预测分布式通风隔声罩在通过频率以上的隔声性能，其计算结果与实际结果在趋势上吻合较好。

(2) 分布式通风隔声罩在通过频率以上具有良好的隔声性能。在当前内部无吸声的设置情况下，最大隔声量可达 20 dB，改善内部吸声后，隔声罩的隔声性能将会进一步得到增强。

(3) 分布式通风隔声罩兼具通风、散热功能和较好的降噪性能，具备可设计特性，形式简单、应用方便，受安装空间限制的影响较小，具有一定的应用价值。

当前分布式通风隔声罩的通风面积较小，阻力损失较大，应用具有局限性，其通风性能的研究和完善在下一步工作中继续开展。

参 考 文 献

[1] 付常佳, 陈长征. 隔声罩阻力和隔声层对其降噪效果影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(5): 113-115, 124.
FU Changjia, CHEN Changzheng. Analysis of influence of thickness and damping of sound insulation cover on its noise

- reducing effect[J]. *Noise and Vibration Control*, 2010, **30**(5): 113-115, 124.
- [2] 郑辉, 陈端石. 阻尼复合板的隔声性能研究[J]. *应用声学*, 1996, **15**(2): 1-6, 23.
ZHENG Hui, CHEN Duanshi. Literature review of the study on the sound insulation properties of layered damping panels [J]. *Applied Acoustics*, 1996, **15**(2): 1-6, 23.
- [3] 毛万红, 沈履刚, 徐立, 等. 户外箱式配电变压器自然通风式隔声罩设计研究[J]. *噪声与振动控制*, 2010, **30**(3): 148-152.
MAO Wanhong, SHENG Lugang, XU Li, et al. Design of acoustic enclosure for outside box-switchboard transformer with natural ventilation[J]. *Noise and Vibration Control*, 2010, **30**(3): 148-152.
- [4] 吕东方, 刘一鸣, 靳国永, 等. 开孔型隔声罩封盖结构声学设计[C]//2019中国西部声学学术交流会议论文集.
- [5] 郑洁, 谢柱维, 田亚军, 等. 一种新型隔音通风装置的性能分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, **52**(4): 195-200.
ZHENG Jie, XIE Zhuwei, TIAN Yajun, et al. Performance analysis of a new sound insulation ventilation device[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, **52**(4): 195-200.
- [6] 俞悟周, 王佐民. 一种新型高效自然通风隔声窗的设计与试验[J]. *环境工程*, 2008, **26**(3): 96-99, 6.
YU Wuzhou, WANG Zuomin. The design and experiment on a new type natural ventilation window with high sound insulation[J]. *Environmental Engineering*, 2008, **26**(3): 96-99, 6.
- [7] KUSHWAHA M S, HALEVI P, DOBRZYNSKI L, et al. Acoustic band structure of periodic elastic composites[J]. *Physical Review Letters*, 1993, **71**(13): 2022-2025.
- [8] 陈琳, 吴卫国, 周榕. 一种基于局域共振的低频超宽带隙瓣状声学超材料[J]. *声学技术*, 2016, **35**(3): 222-227.
CHEN Lin, WU Weiguo, ZHOU Rong. A petal-like acoustic metamaterial structure based on local resonance with ultra-wide sonic band gap in low frequency range[J]. *Technical Acoustics*, 2016, **35**(3): 222-227.
- [9] 陈琪琪, 张波, 白玉田, 等. 一种新型复合局域共振型声子晶体带隙特性[J]. *声学技术*, 2021, **40**(2): 157-166.
CHEN Qiqi, ZHANG Bo, BAI Yutian, et al. Band gap characteristics of a new type of compound local resonance phononic crystal[J]. *Technical Acoustics*, 2021, **40**(2): 157-166.
- [10] 李志宽, 吴锦武, 田文昊, 等. 基于夹层板理论的圆形孔蜂窝结构隔声量研究[J]. *声学技术*, 2019, **38**(2): 194-199.
LI Zhikuan, WU Jinwu, TIAN Wenhao, et al. Study of the sound insulation of circular honeycomb structure based on sandwich plate theory[J]. *Technical Acoustics*, 2019, **38**(2): 194-199.
- [11] 高亮, 雷博, 郑辉. 工程机械动力舱罩的隔声性能分析[J]. *噪声与振动控制*, 2020, **40**(6): 239-244.
GAO Liang, LEI Bo, ZHENG Hui. Analysis of sound insulation performance of a power system enclosure for construction machinery[J]. *Noise and Vibration Control*, 2020, **40**(6): 239-244.
- [12] 袁伟, 胡超楠, 林国昌, 等. 薄膜声学超材料低频隔声研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2021, **50**(3): 113-117.
YUAN Wei, HU Chaonan, LIN Guochang, et al. Research on low frequency sound insulation of thin film acoustic metamaterials[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2021, **50**(3): 113-117.
- [13] 崔洪宇, 杜艳梅, 王海关. 不同形状质量块的声学超材料结构隔声特性研究[J]. *舰船科学技术*, 2021, **43**(3): 33-36.
CUI Hongyu, DU Yanmei, WANG Haiguan. Analysis of sound insulation characteristics of acoustic metamaterial structures with different shaped masses[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, **43**(3): 33-36.