# 声学黑洞在减振降噪中的研究进展

赵艳彪,李奕霆,高南沙,潘光

西北工业大学,陕西西安 710072

**摘 要:**声学黑洞结构作为一种轻质、高效、宽频弹性波调控手段,在减振降噪领域具备广阔的应用前景。本文基于声学黑洞效应,以轻质高效宽频减振降噪材料用于解决工程声振问题为目的,介绍了单层/双层声学黑洞梁和附加声学黑洞吸振梁、声学黑洞压痕板和内雕板、声学黑洞圆柱壳,以及声学黑洞管道减振降噪的研究进展。结合当前声学黑洞减振降噪研究和应用过程中存在的不足,对声学黑洞减振降噪领域存在的问题和未来的研究方向进行预判,为声学黑洞减振降噪研究和应用提供一些参考。

关键词:弹性波; 声学黑洞; 轻质结构; 工程结构; 减振降噪

#### 中图分类号:TB535

#### 文献标识码:A

在科技日益发展的21世纪,振动和噪声依旧在各个 领域影响着人们的生产和生活,减振降噪问题仍然是重 要的研究课题。振动和噪声的本质是结构中的弹性波传 播,以及结构中的弹性波与周围介质相互耦合产生的声 辐射,因此减振降噪的根本问题是如何调控结构中的弹 性波及其与周围介质的相互作用。传统弹性波调控手段 是在结构中引入阻尼材料,弹性波在阻尼材料中进行声 能耗散,达到减振降噪效果。可是在实际应用中,为达到 减振降噪效果往往需要较厚的阻尼材料,因而结构附加 质量变得很大,与追求结构轻质化的目标相悖。因此,探 索新的弹性波调控机理、实现轻质高效减振降噪便非常 具有挑战性。

近年来,利用声子晶体、声学超材料和声学黑洞进行 弹性波调控,为减振降噪开辟了新的路径。声子晶体和声 学超材料是在亚波长尺度下,利用人工周期性结构/材料 的布拉格(Bragg)散射特征和局域共振特性,在一定频段 范围形成负有效质量、负弹性模量等特性,产生奇异色散 特征,实现对结构中的弹性波的调控。目前,声子晶体和 声学超材料在减振降噪中的应用探索有了长足的发展,先 后提出了局域共振型声子晶体<sup>[1]</sup>、Bragg散射型声子晶 体<sup>[2]</sup>、薄膜型超材料<sup>[3-4]</sup>、共振型超材料<sup>[5-7]</sup>、多孔型超材 料<sup>[8-9]</sup>、水下吸声超材料<sup>[10]</sup>、局域共振杆<sup>[11-12]</sup>、局域共振梁<sup>[13]</sup>

#### DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.05.001

和局域共振板<sup>[14-15]</sup>等。基于声子晶体和声学超材料进行 结构中的弹性波调控实现在减振降噪应用的探索正在进 行,而声学黑洞作为一种全新的弹性波调控手段,也引起 了大量研究人员的兴趣。

Pekeris<sup>116</sup>研究发现,声波在非均匀介质中传播时,声波 随着介质深度的减小而波速降低,形成声学黑洞现象,而这 一特殊现象使得声波在该区域不发生反射。Mironov<sup>117</sup>在 研究楔形薄板结构声波调控时发现,当结构的厚度按照一 定的幂指数减小时,弯曲波的波速随着厚度的减小而减小, 在理想情况下,波速可减小为零,此时声波不再反射,这种 薄壁厚度按幂律减小的楔形结构称为声学黑洞结构。声学 黑洞结构<sup>118-19</sup>主要是通过薄壁结构厚度的改变实现结构阻 抗逐渐变化,从而使得结构中弯曲波传播的相速度和群速 度发生变化,在结构局部区域实现波的聚集和操控。相较 于声子晶体和声学超材料,声学黑洞结构具有结构简单轻 质、灵活调控和宽频减振等特点。声学黑洞结构作为一种 轻质高效宽频弹性波调控手段,在减振降噪领域具备广阔 的应用前景,如图1所示。

本文基于声学黑洞结构的减振降噪研究进行综述,介 绍单层/双层声学黑洞梁<sup>[20-36]</sup>和附加声学黑洞吸振梁<sup>[37-41]</sup>、 声学黑洞压痕板<sup>[42-74]</sup>和内雕板<sup>[75-80]</sup>、声学黑洞圆柱壳<sup>[81-82]</sup>, 以及声学黑洞管道<sup>[83-91]</sup>减振降噪工作研究进展。

收稿日期: 2023-09-21; 退修日期: 2024-01-31; 录用日期: 2024-02-28 基金项目: 航空科学基金(20181553015)



引用格式: Zhao Yanbiao, Li Yiting, Gao Nansha, et al. Research progress of acoustic black hole in vibration and noise reduction [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(05):1-14. 赵艳彪, 李奕霆, 高南沙, 等. 声学黑洞在减振降噪中的研究进展[J]. 航空科 学技术, 2024, 35(05):1-14.



图 1 声学黑洞减振降噪应用场景 Fig.1 Application scene of acoustic black hole in vibration and noise reduction

## 1 声学黑洞梁研究进展

在求解半无限长单层声学黑洞梁振动问题中,通常采 用几何声学方法进行计算,而在分析有限长单层声学黑洞 梁时,几何声学方法完全不适用,为此很多研究人员提出了 一些理论计算方法,推导有限长单层声学黑洞梁的解。 Tang Liling等<sup>[20-21]</sup>开发了一种小波分解半解析模型来分析 欧拉-伯努利(Euler-Bernoulli)声学黑洞梁及表面覆盖有阻 尼层的结构,发现其理论解、数值模拟和试验结果总体一 致,该小波分解半解析模型特别适用于计算有限长单层声 学黑洞结构中波长的剧烈波动。此外,利用小波分解半解 析模型还分析了具有修正幂律剖面和扩展等厚平台的



(a) 具有修正幂律剖面和扩展等厚平台的Euler-Bernouclli单层声学黑洞梁试验



Euler-Bernoulli声学黑洞梁问题,如图2(a)和图2(b)所示, 结果表明,改进后的Euler-Bernoulli声学黑洞梁在中高频 段声学黑洞效应更加显著,频段进一步拓展。Lee 等[22]将 Euler-Bernoulli声学黑洞梁方程转化为m>2的广义超几何 微分方程形式,利用广义超几何函数导出了在任意 m 均为 线性无关的精确解,通过计算 Euler-Bernoulli 声学黑洞梁 方程的位移和反射系数,证明了利用广义超几何函数导出 的精确解具有适用性。瑞利-里兹(Rayleigh-Ritz)方法作 为经典的半解析法在求解周期结构振动问题时很难找到满 足问题边界条件的合适基函数,为此,Deng Jie 等<sup>[23]</sup>提出了 一种波和Rayleigh-Ritz方法,即将系统响应扩展为定义系 统周期条件的矩阵的零空间基的叠加完成计算,据此方法 计算了带阻尼层的无限周期单层声学黑洞梁的复色散曲 线,与数值模拟计算结果基本一致,论证了波和Rayleigh-Ritz方法的适用性,进一步扩大了Rayleigh-Ritz方法的适 用范围。此外, Ouisse<sup>[24]</sup>提出在单层声学黑洞梁末端添加 黏弹性层,并通过改变材料的温度来控制其力学性能,从而 获得了可调阻尼的单层声学黑洞梁,可调阻尼单层声学黑 洞梁的优势在于可以根据实际应用需求调节温度实现在特 定频段下的减振性能。Chen Xu等<sup>[25]</sup>提出了一种结合单层 声学黑洞和负刚度单元的梁,计算其均方振速级和模态损 耗因子参数,表明该结构在不损耗中高频声学黑洞效应的 前提下,在低频段有着显著减振效果。









Fig.2 Analysis on single-layer and double-layer acoustic black hole beam structure and performance of vibration and noise reduction

单层声学黑洞梁通过在均匀梁表面构造厚度呈幂律变 化的结构实现了声学黑洞效应,但难以保证结构表面的完 整性,在承载能力上具有结构刚度和强度相对弱的特点。 Huang Wei 等[26]利用3D打印技术设计了轴向和厚度渐变的 两种双层声学黑洞功能梯度梁,利用数值模拟研究了声波 在声学黑洞梯度梁的传播、衰减和反射,发现相较于添加阻 尼层的单层声学黑洞梁,声波反射能力减弱,声学黑洞效应 更明显。Yao Bowen等<sup>[27]</sup>采用Riccati传递矩阵法计算双层 声学黑洞梁振动问题时发现,相较于有限元法,Riccati传递 矩阵法在收敛速度和计算效率均有显著提高,如图2(c)所 示。Du Xiaofei 等<sup>[29]</sup>研究了自由边界条件下双层声学黑洞 梁的减振效果,分析了阻尼层参数、中间层材料和厚度对双 层声学黑洞梁振动加速度响应的影响,发现阻尼层厚度对 双层声学黑洞梁在中高频加速度响应峰值的影响非常明 显,如图2(d)所示。声学黑洞效应在中高频率范围内具有 优良的减振效果,但在低频段减振不理想。Zhou Tong 等<sup>[31]</sup> 在单层声学黑洞梁的基础上提出了一种贴敷阻尼的双层声 学黑洞梁,利用数值模拟研究了双层声学黑洞梁的静态和 动态特性,如图3(a)所示。结果表明,相较于单层声学黑洞 梁,双层声学黑洞梁在增强阻尼和抑制振动上具有更强的 优势,在结构刚度和强度方面具有更好的静态特性,还发现 在声学黑洞定制面的顶部使用延伸平台,可以进一步提高



图3 双层复合声学黑洞梁和声学黑洞吸振器结构

Fig.3 Double-layer composite acoustic black hole beam and acoustic black hole vibration absorber structure

结构阻尼,提高结构强度,但一定程度上降低了结构刚度,因 此需要在实际应用中适当取舍。Gao Nansha等<sup>[32]</sup>设计了一 种含有乙烯醋酸乙烯酯夹层的双层声学黑洞梁,如图3(b)所 示,能带结构分析表明,这种结构不仅可以实现声学黑洞现 象在低频段产生效应,而且乙烯醋酸乙烯酯夹层的引入并没 有造成双层声学黑洞梁产生低局部刚度和高应力集中问题, 分析其振动模态发现,弯曲波的衰减依旧依赖于声学黑洞。 Ma Li 等<sup>[33]</sup>将黏弹性材料填充到双层声学黑洞梁, 数值模拟 和试验研究发现,这种双层声学黑洞复合梁在保持中高频段 减振效果的同时,在低频段可以具备良好的减振效果,其物 理机理是低频段时阻尼材料的剪切效应和中高频段的声学 黑洞效应,但阻尼材料和声学黑洞结构参数的洗择存在相互 影响,即两者参数取舍失衡时,减振效果会变差,因此需要合 理洗取以确保参数平衡。Gao Nansha等<sup>[34]</sup>设计了一种双层 声学黑洞V形折叠梁,数值模拟表明,双层声学黑洞V形折 叠梁的构型使得出现更多的纵波和弯曲波的转换,在1kHz 以下呈现出超宽的完全带隙。此外,V形折叠梁易于制造, 尺寸紧凑,在低频减振方面具有广阔的应用前景。Tang Liling 等<sup>130</sup>设计了一种双页双层声学黑洞梁,经过有限元分 析了其能带结构及其产生机理,结果表明,结合局部共振效 应和连接压痕两个分支的强化螺柱产生的Bragg散射效应, 实现了超宽带隙,研究结构相关参数发现,增加螺柱的长度

或减少压痕的残余厚度可进一步扩大带隙。试验证明,采用 三个双页双层声学黑洞梁可以实现包括低频范围在内的超 宽频率范围内具有优良的减振效果。

Zhou Tong 等<sup>[37]</sup>将声学黑洞效应引入吸振器设计中,报 道了一种可以显著降低结构多次共振的附加声学黑洞吸振 梁,经过数值模拟和试验证明发现,其可以显著减振背后的 物理机理是结构相互作用、阻尼增强以及它们的组合。此 外,与传统吸振梁相比,附加声学黑洞可以带来丰富的系统 动力学和增强的宽带阻尼。Li Meiyu等[38]提出了一种集成 声学黑洞用以梁结构减振,集成声学黑洞即在均匀梁中间 除了保留必要的支撑平面外,梁按厚度幂率曲线减小,截断 处下表面粘贴阻尼层,整体结构呈对称状,集成声学黑洞通 过螺栓或者焊接在均匀梁底部。数值研究表明,集成声学 黑洞有效降低了均匀梁的振动,支撑平台越小、截断厚度越 小和集成声学黑洞结构越长,减振效果越显著。Deng Jie 等[39-40]将声学黑洞柱分布在均匀梁表面构造了一种具有丰 富振型和高阻尼特性的吸振梁,如图3(c)所示,对其复色散 曲线研究表明,在整个目标频率范围内存在多个局部共振 和Bragg散射带隙,由于阻尼效应的合并带隙机制,形成非 常宽的衰减带,对其关键结构参数分析发现,伴随着晶格常 数变大和声学黑洞长度变长,会出现更多的衰减带,衰减能



力越强。此外,他们还将声学黑洞柱按照梯度分布在均匀 梁表面,如图3(d)所示,对复色散曲线研究表明,柱子的组 合一定程度上会产生一些破坏带,但可以选取适当的晶格 常数进行弥补,相较于均匀分布来讲,梯度分布具有更好的 减振效果。Sheng Hui等[41]把声学黑洞效应和失谐效应相 结合提出了一种多声学黑洞动力吸振复合梁结构,采用动 态刚度法建立了多声学黑洞动力吸振复合梁精确解模型, 研究了失谐对系统减振效果的影响,经数值模拟发现,附加 的声学黑洞结构相当于引入了多自由度局域谐振器,使得 结构产生多个局域共振带隙,加上失谐效应使得衰减带宽 大大加宽,梁的减振能力大大增强。

## 2 声学黑洞板研究进展

在声学黑洞压痕板的研究中,以嵌入圆形压痕为代表 的声学黑洞压痕板引起了学者的广泛兴趣。O'Boy等[42-43] 提出了一种计算幂律型锥形中心孔圆板挠度的数值方法, 通过计算压痕中心覆盖有阻尼层圆板的点和交叉迁移率, 并进行试验测试验证,结果证明,阻尼层的引入使得共振峰 被明显抑制,结构具有明显的声学黑洞效应。此外,他们还 就含有幂律轮廓的锥形压痕的矩形板进行了振动测量,如 图4(a)所示,试验发现,中心孔非常小或者没有中心孔的幂



Study on damping performance of progressive acoustic black hole plate and full-band acoustic black hole composite plate Fig.4

律压痕由于有效吸收面积较小,阻尼效能相对较差,对矩形 板的共振峰抑制效果很差,因此需要增加压痕中心孔的尺 寸增大阻尼从而加强减振效果。Conlon等[47]讨论了嵌入渐 进式圆形压痕声学黑洞板的减振效果,如图4(b)所示,结果 显示,当达到一定的声学黑洞最小阻尼值时,声学黑洞处理 可以提高板的减振能力。Deng Jie 等<sup>[50]</sup>在经典的嵌入圆形 压痕声学黑洞板基础上,构造了一种环形声学黑洞压痕板, 用以包裹振动激励区,不让其外泄,采用二维高斯函数近似 板挠曲位移场的Rayleigh-Ritz半解析法对该声学黑洞压痕 板的性能分析,发现环形声学黑洞压痕板在整个频率范围 内具有良好的隔振效果。Conlon等[51-52]为了改善板的低频 减振性能,讨论了在板中嵌入圆形压痕声学黑洞分布对振 动和结构声辐射的影响,通过采用有限元和边界元模型比 较了几种嵌入圆形压痕的声学黑洞压痕板和均匀板的振动 响应和辐射声功率,发现嵌入圆形压痕的声学黑洞压痕板 在低频段的性能得到了很大程度改善。Bao Yue 等[53]研究 了单个嵌入圆形压痕的声学黑洞压痕板和嵌入圆形压痕的 声学黑洞阵列压痕板动态减振性能,结果显示,嵌入圆形压 痕的声学黑洞阵列可有效提高板的模态密度和模态损失因 子,在宽频段上具有良好的减振效果,通过对附加阻尼层的 嵌入圆形压痕的声学黑洞压痕板进行参数化研究发现,系 统的模态损失因子不仅与阻尼材料性能有关,还和阻尼层 所覆盖的模态动能有关。另外,还就非均匀阵列和均匀阵 列的嵌入圆形压痕的声学黑洞压痕板性能进行对比发现, 非均匀阵列具有更好的动态性能。Deng Jie等<sup>[55-56]</sup>为了解 决嵌入圆形压痕的声学黑洞压痕板在低频段效果不佳的问 题,将局域谐振器所带来的低频带隙现象和声学黑洞中高 频减振效应相结合设计了一种全频带减振板,如图4(c)和 图4(d)所示,利用数值模拟分析了该板的声功率级和辐射 效率,结果显示,在低频段,由于带隙的形成与空气的低频 重合效应变得有益,在中高频段,进入声学黑洞的超声速弯 曲波减速,在通过跨声速边界就变成亚声速,辐射效率大幅 下降,因此在全频段范围内,减振效果十分显著。此外,他 们还研究了嵌入圆形压痕的声学黑洞压痕板在水下声辐射 现象,发现在截止频率和临界频率之间的减振效果明显,而 在较高频率上,抑制声功率的效果不明显。

除了就嵌入圆形压痕为代表的声学黑洞压痕板进行 探索外,研究人员还提出了其他构型的声学黑洞压痕板。 O'Boy等<sup>[60]</sup>提出了一种幂律型轮廓压痕的声学黑洞压痕 板,如图5(a)所示,采用Rayleigh-Ritz能量变分法准确测算 了幂律型轮廓压痕的声学黑洞压痕板的固有频率,幂律型 轮廓压痕的引入使得减振效果更显著,随着内轮廓尺寸的 增大,固有频率发生变化,即先减小后增大。随着截断位置 的增加(增加板中心的孔洞),固有频率随着整体刚度的减



Fig.5 Analysis on vibration and noise reduction performance of acoustic black hole plate

小而减小。Bowyer 等<sup>[61]</sup>研究了一种幂律型轮廓压痕的声 学黑洞压痕复合板,如图5(b)所示,经过试验表明,复合板 在不需要阻尼层的情况下便可以达到与增加吸收层的钢板 相当的减振效果,这是由复合材料的损耗因子比较大造成 的,另外,改变复合板的几何形状可以进一步增加减振效 果。Ma Li等<sup>[62]</sup>提出了一种二维半解析法用于计算幂律型 轮廓压痕的声学黑洞压痕板的减振效果,在Rayleigh-Ritz 方法框架下,选用Daubechies小波尺度函数作为容许函数, 对具有沿板材某一方向厚度变化的声学黑洞压痕板的横向 位移进行分解。通过振型分析和强迫振动分析,并与数值 模拟计算对照,结果发现半解析法能够准确分析振动现象, 可以真实地描述声学黑洞现象,此外,在压痕区域内还发现 了局域共振现象,这十分有利于低频振动的抑制。Yang Chuanmeng等<sup>[64]</sup>将声学黑洞压痕板引入板的耦合系统,即 在两块均匀板的中间通过弹簧耦合连接了一块声学黑洞压 痕板,计算了自由振动、强迫振动和瞬态振动条件下的不同 声学黑洞结构参数下的声学黑洞效应,表现出良好的振动 抑制和轻量化设计要求。Jeon等[65-66]为了克服声学黑洞压 痕板在实际应用中占据较大空间的局限性,设计了一种阿 基米德螺线紧凑型声学黑洞板,数值模拟表明,与声学黑洞 压痕板相比,该薄板几何形状中的曲率不会改变中高频段 的阻尼特性,阿基米德螺线的引入使得共振频率发生较大 的移动,可能在不需要的频率范围内引起共振,而可以控制 间隙距离来改变板的共振频率。在尖端添加阻尼材料可进 一步抑制振动,阻尼材料的厚度比其长度的改变具有更好 的效果,在同等条件下,阿基米德螺线紧凑型声学黑洞板和 声学黑洞压痕板的辐射声功率相同。此外,采用试验研究 了曲率对驱动点迁移率的影响,验证了阿基米德螺线紧凑 型声学黑洞板的阻尼性能。

此外,研究人员进行了声学黑洞压痕板减振降噪工程 应用初步探索研究。Bowyer等<sup>[67]</sup>将声学黑洞压痕板粘贴 到汽车发动机盖上,比较了有无声学黑洞压痕板的汽车发 动机盖在怠速状态下的声压,结果显示,在30~300Hz和 600~1400Hz范围内共振峰值显著降低,特别是在190Hz 时,峰值降低9.7dB,比较了有无声学黑洞压痕板的汽车发动 机盖在发动机2100r/min工作状态下的声压,结果表明,在 70~1400Hz范围内出现0~10dB噪声衰减,在369Hz和442Hz 处衰减可达10dB,与没有声学黑洞压痕板的汽车发动机盖相 比,噪声平均降低6.5dB。Bowyer等<sup>[68]</sup>将声学黑洞现象应用 到了飞机涡扇叶片减振工作中,把涡扇叶片后缘加入幂律型 楔形以及附加的阻尼层,构造了声学黑洞压痕板,实现了叶

片弯曲振动的有效抑制。以NACA 1307 翼型作为试验样机 的基础模型,设计了4个非发动机特定型号风扇叶片样本,为 了更加逼真贴近实际,将其中两个叶片进行了扭曲。对4个 样本及传统叶片进行激振试验,测量了相应的频响函数,结 果显示,声学黑洞的引入使得叶片的谐振峰大大减小。Ji Hongli 等[69-72]利用声学黑洞压痕板实现了腔体内振动抑制和 噪声衰减。首先,建立了多个声学黑洞压痕柔性板组成的腔 体,在柔性板处通过点激励产生振动并与腔体耦合形成内部 声场,仿真和试验表明,声学黑洞压痕柔性板可以在较宽的 频率范围内显著降低腔内噪声。减振降噪背后的机理来自 声学黑洞效应使得柔性板的振动减弱和柔性板与腔体的耦 合强度降低。声学黑洞薄板的刚度和强度较低,承载性差, 无法直接作为系统结构的主要部分,在实际工程应用中受到 了很大限制。为此,他们提出了声学黑洞压痕双层加筋板结 构,如图5(c)和图5(d)所示,进行了点激励条件下腔体减振 效果测试,发现在截止频率以上腔体的宽频噪声可降低1.5~ 8dB。此外,最引人注意的是,研究了声学黑洞效应在直升机 驾驶舱减振降噪工作,如图6(a)所示,设计了内嵌式和附加 式两种声学黑洞压痕板减振降噪方案,数值模拟和试验均说 明,内嵌式声学黑洞压痕板可以有效降低舱室的中高频噪 声,而对低频噪声抑制能力不足,附加式声学黑洞压痕板在 保持中高频降噪能力的基础上可以实现低频噪声的衰减。 通过结合内嵌式和附加式两种声学黑洞压痕板减振降噪方 案,能够在不增加总质量的情况下,舱室平均噪声水平在1/3 倍频程内降低3~10dB。赵楠等<sup>[74]</sup>提出一种分布式声学黑洞 压痕板用于提高浮筏系统隔振性能,首先提出了将单一声学 黑洞分解为4个小尺寸声学黑洞的分布式声学黑洞压痕板设 计方案,建立了分布式声学黑洞压痕板浮筏隔振系统有限元 模型,分析了分布式声学黑洞压痕板浮筏隔振系统的隔振性 能和对船舶舱段机械噪声的影响,如图6(b)所示,结果表明, 相较于普通浮筏,分布式声学黑洞压痕板浮筏具有更好的隔 振性能,能够有效降低舱段的机械噪声。

声学黑洞压痕板结构在实际减振降噪应用中往往存在 结构刚度和强度不足的问题。因此,声学黑洞内雕板的相 关研究也吸引了学者的兴趣。Tang Liling<sup>[75-76]</sup>提出了一种 在板的内部雕刻有对称双叶声学黑洞轮廓的周期性声学黑 洞内雕板,对其能带结构和模式状态研究发现,声学黑洞内 雕板的局域共振效应会使得带隙产生,为了进一步拓宽带 隙,在对称双叶声学黑洞轮廓的对称线位置引入加强螺柱 连接,使得其与声学黑洞轮廓剩余厚度存在较大的阻抗不 匹配,因而产生了Bragg散射。在两种效应的结合下,弯曲



Fig.6 Study on the application of acoustic black hole structure and analysis on vibration and noise reduction performance of carved plate in double-leaf acoustic black hole

波在周期性声学黑洞内雕板中传播产生了很宽的带隙。数 值模拟和试验验证表明,在只有三个对称双叶声学黑洞单 元的有限板中,可以实现较好的减振性能。此外,他们还分 析了含有4个对称双叶声学黑洞轮廓和加强螺柱连接的周 期性声学黑洞内雕板的振动和声辐射,结果表明,不仅在高 频下会产生声学黑洞效应,而且在远低于结构特征频率的 低频范围内也具有良好的振动抑制和较小的声辐射效果。 Tang Liling 等<sup>[77]</sup>设计了一种周期性缠绕的双叶声学黑洞内 雕板,如图6(c)和图6(d)所示,通过将声学黑洞效应与亚 波长带隙相结合,该厚板在远远低于截止频率的超宽频率 范围内可以实现声辐射的显著降低,这是由于其单元独特 的缠绕结构,扩大了声学黑洞的实际尺寸,降低了其起始频 率,并通过产生慢波降低了声辐射效率。Zhao Liuxian<sup>[78]</sup>将 声学黑洞板作为夹芯制造了一种三明治复合厚板结构,利 用理论和数值模拟方法研究了其减振性能,发现相较于普 通夹心层,声学黑洞夹心层具有更好的黏弹性损耗系数,在 所研究的工作频率范围内振动衰减能力更强,具有优越的 振动抑制特性。He Mengxin等<sup>[79]</sup>将声学黑洞和超材料的设 计理念相结合,设计了一种交叉声学黑洞板,分析了该声学 黑洞板结构的振动特性和权衡设计,研究了结构参数对带

隙的影响,发现由于声学黑洞效应和带隙的影响,声学黑洞板的振动有明显的衰减。Lyu Xiaofei等<sup>[80]</sup>开发了一种将声学黑洞内雕板作为微结构单元集成为轻量化迷宫结构的卫星隔振系统,数值模拟研究了简化二维结构的能带结构和传输特性,发现相较于参考隔振系统,声学黑洞作为微结构单元的隔振系统在20kHz以内的带隙得到了很大扩展。此外,还制造了基于声学黑洞内雕板的环状隔振系统和参考隔振系统,并与模拟卫星进行组装,进行了锤击试验和跌落试验,试验结果表明,基于声学黑洞内雕板的环状隔振系统

### 3 声学黑洞圆柱壳研究进展

Deng Jie 等<sup>[81]</sup>提出了一种周期性加强筋环形声学黑洞圆柱壳,首先分析了理想周期性简支环形无限长声学黑洞圆柱壳的频率通带,计算了10个周期性简支环形声学黑洞 单胞构成的圆柱壳的振动传递率,发现环形声学黑洞的引入使得圆柱壳的振动大大减弱。为了克服环形声学黑洞圆 柱壳刚度不足的问题,进一步开发了加强筋环形声学黑洞 圆柱壳,讨论了加强筋的宽度和数目参数的影响,结果表明,适当的加强筋组合有助于能量聚集在声学黑洞结构附 近被消耗,增强了声学黑洞效应。此外,为了论证实际应用 的可能性,利用有限元计算了具有封闭末端和周期性支撑 的声学黑洞圆柱壳结构的减振降噪性能。李兵等<sup>[82]</sup>计算了 内嵌不同周期声学黑洞圆柱壳散射特性,如图7(a)和图7 (b)所示,得到了不同周期声学黑洞圆柱壳的背向形态函 数,结果表明,当声学黑洞正对入射波时,声学黑洞区域弹 性散射和圆柱壳刚性散射的耦合相消,声学黑洞最薄区域 弹性振动剧烈,形成弹性辐射亮点,背向散射形态函数下降 较大,敷设阻尼层使得声学黑洞最薄区域振动衰减,辐射亮 点减弱,敷设阻尼层相较于没有敷设情况下,背向散射形态 函数下降更大,当平面波分别以45°和30°入射在内嵌4周 和6周期声学黑洞时,声学黑洞区域形成的辐射亮点与几 何亮点产生共振叠,使形态函数呈现周期性分布。

## 4 声学黑洞管道研究进展

Guasch等<sup>[83]</sup>在管道末端放置一组刚性环实现声学黑 洞效应,随着管道末端的接近,内半径和间距减小到零。 利用传递矩阵法研究了刚性环的参数对声学黑洞管道的

反射系数的影响。Zhang Xiaoqi等<sup>[86]</sup>设计了一种内嵌微穿 孔板的声学黑洞管道降噪装置,实现了在亚波长尺度下低 频超宽带高效吸声。利用有限元模拟计算了该结构的吸 声系数,并通过阻抗管进行验证,结果表明,由于声学黑洞 效应引起的波速变化,能量俘获和背腔式微穿孔板的空间 梯度局域共振的共同作用,在200~3000Hz范围内实现了 完美吸声,具有极大的应用潜力。Liang Xiao 等[88]为了进 一步改善和拓宽声学黑洞管道的吸声性能,提出了一种嵌 入多谐振腔单元的微穿孔板的声学黑洞管道,如图7(c)和 图7(d)所示,在50~6000Hz频段范围内平均吸声系数均高 于0.5。采用二维轴对称有限元模型分析了结构的吸声机 理,结果表明,声介质流速的梯度变化会导致结构内部的 声能损失,讨论了不同频率下的声流效应,发现谐振腔和 微穿孔板对低频吸声性能贡献较大,声学黑洞效应在中高 频段更显著。Chua Junwei等<sup>[89]</sup>在声学黑洞管道中填充桁 架晶格,构造了一种慢声晶格声学黑洞管道,如图8(a)和 图 8(b) 所示。讨论了4 种桁架晶格填充下声学黑洞管道 的吸声性能,发现在1000~6300Hz的宽带范围内吸声性能



Fig.7 Acoustics black hole cylindrical shell and acoustic black hole pipe structure and performance analysis on vibration and noise reduction

显著提升。研究表明,声波在慢声晶格声学黑洞管道中传 播过程中不仅具有声学黑洞时间相关声速延迟效应,而且 表现了晶格吸声体的频率相关谐振单元机制。Umnova 等[99]揭示了有耗声学黑洞的多重共振现象,设计了一个由 薄金属圆板组成,每个圆板都有一个中心穿孔,由环形气 腔隔开,每个板中的穿孔半径随着从板到前表面的距离逐 渐减小,形成具有阶梯半径轮廓的中心通道的吸振器,如 图8(c)所示。建立了半解析等效流体模型,计算了吸声系 数,发现在从几百赫[兹]甚至更低频率开始到很宽的频率 范围内可以实现近乎完美的吸声效果。在低频时,沿着结 构长度的整体共振,是声波衰减的关键。在较高频率下, 侧向空腔的局部共振起着关键作用。此外,前环形板的共 振频率决定了吸声频率范围的上限。庄秋阳等[91]提出了 一种可应用于管道结构的附加式环状螺旋声学黑洞吸振 器,如图8(d)所示。通过将声学黑洞区域设计成螺线结 构,增加了吸振器的模态密度,与管道结构耦合强度增加, 数值模拟和试验均表明,附加环状螺旋声学黑洞吸振器的 管道结构在20~5000Hz频率范围内可以实现振动抑制,且

当管道边界条件和温度变化时,该吸振器依旧具有良好的 宽频减振特性。

## 5 结论

在几十年的发展历程中,声学黑洞减振降噪研究已经 取得显著成果。本文对声学黑洞减振降噪研究的发展趋势 进行预测,特别关注其在航空领域可能的潜在应用。

#### 5.1 未来发展的预测

(1)低频振动抑制的瓶颈。声学黑洞效应目前主要应用于中高频振动问题的解决,对低频振动的抑制仍然是亟待突破的难题。未来的发展需要深入探索声学黑洞全频段减振机制,可能通过结合局域共振型声学超材料的低频共振优势与声学黑洞效应,实现全频带高效减振降噪。

(2)圆柱壳和管道应用的紧迫性。针对声学黑洞梁、板 的减振降噪研究已取得一定进展,但对于声学黑洞在圆柱壳 和管道中的应用研究相对较少。在航空航天、汽车制造和船 舶行业中,存在大量的管道振动问题,因此加速推进声学黑 洞效应在圆柱壳和管道减振降噪应用工作显得十分紧迫。



(3)特定频段振动抑制的挑战。当前的研究主要集中 在实现在更宽的频段上发挥减振降噪性能,然而在实际噪 声和振动控制中,往往需要针对某些特定频段进行精准的 振动抑制。未来的工作可以通过机器学习和神经网络等方 法进行逆向学习,以缩短构型选择时间,最大程度节约设计 成本,加速实际应用。

(4)水下结构的研究不足。目前的声学黑洞研究主要 基于空气介质进行结构减振性能评价,而针对水下结构的 声学黑洞效应研究相对较少。未来需要深入开展声学黑洞 在水下环境中,特别是在梁、板、圆柱壳和管道中的减振降 噪相关工作。

#### 5.2在航空领域的潜在应用

(1)飞机结构设计噪声控制。引入声学黑洞杆/梁构型 于飞机起落架结构,提高结构的噪声控制性能。在飞机增 生装置上设计附加声学黑洞吸振器,有望实现振动能量耗 散,改善增生装置振动环境。

(2)航空发动机振动噪声控制。对涡扇和螺旋桨叶片 采用声学黑洞板构型设计,实现叶片弯曲振动的有效控制。 声学黑洞减振基座的设计可实现减材减振。

(3)舱内噪声控制。针对飞机夹层结构,设计类声学黑洞管道,在全频段内实现高效吸声效果。附加式声学黑洞粘贴于舱内壁面振动强烈的位置,可以有效降低壁面振动,改善舱内噪声环境。

以上展示了声学黑洞减振降噪在航空领域的广泛适用 性,为飞机的振动和噪声问题提供了创新性的解决方案。

**AST** 

#### 参考文献

- Liu Zhengyou, Zhang Xixiang, Mao Yiwei, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [2] Kushwaha M S, Halevi P. Band-gap engineering in periodic elastic composites[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(9): 1085-1087.
- [3] Mei Jun, Ma Guancong, Yang Min, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound[J]. Nature Communications, 2012, 3: 756.
- [4] Zhou Guojian, Wu Jiuhui, Lu Kuan, et al. Broadband lowfrequency membrane-type acoustic metamaterials with multistate anti-resonances[J]. Applied Acoustics, 2020, 159: 107078.
- [5] Lee S H, Park C M, Seo Y M, et al. Reversed Doppler effect in double negative metamaterials[J]. Physical Review B, 2010, 81

(24): 241102.

- [6] 丁昌林,史剑兵,董仪宝,等.一种双频和宽频超表面材料的 探索研究[J].航空科学技术,2022,33(5):76-81.
  Ding Changlin, Shi Jianbing, Dong Yibao, et al. Exploratory research on a dual-band and broadband metasurface materials
  [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(5):76-81. (in Chinese)
- [7] 赵瑞,严昊,席柯,等. 声学超表面抑制第一模态研究[J]. 航空科学技术,2020,31 (11):104-112.
  Zhao Rui, Yan Hao, Xi Ke, et al. Research on acoustic metasurfaces for the suppression of the first mode[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31 (11): 104-112. (in Chinese)
- [8] Gao Nansha, Wu Jiuhui, Lu Kuan, et al. Hybrid composite meta-porous structure for improving and broadening sound absorption[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 154: 107504.
- [9] Yuan Tianyue, Song Xiang, Xu Jinglian, et al. Tunable acoustic composite metasurface based porous material for broadband sound absorption[J]. Composite Structures, 2022, 298: 116014.
- [10] Gao Nansha, Lu Kuan. An underwater metamaterial for broadband acoustic absorption at low frequency[J]. Applied Acoustics, 2020, 169: 107500.
- [11] Wang Gang, Yu Dianlong, Wen Jihong, et al. One-dimensional phononic crystals with locally resonant structures[J]. Physics Letters A, 2004, 327(5-6): 512-521.
- [12] Xiao Yong, Wen Jihong, Wen Xisen. Longitudinal wave band gaps in metamaterial-based elastic rods containing multidegree-of-freedom resonators[J]. New Journal of Physics, 2012, 14(3): 033042.
- [13] Pai P F, Peng Hao, Jiang Shuyi. Acoustic metamaterial beams based on multi-frequency vibration absorbers[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 79: 195-205.
- [14] Pennec Y, Djafari-Rouhani B, Larabi H, et al. Low-frequency gaps in a phononic crystal constituted of cylindrical dots deposited on a thin homogeneous plate[J]. Physical Review B, 2008, 78(10): 104105.
- [15] Lu Kuan, Zhou Guojian, Gao Nansha, et al. Flexural vibration bandgaps of the multiple local resonance elastic metamaterial plates with irregular resonators[J]. Applied Acoustics, 2020,

159: 107115.

- [16] Pekeris C L. Theory of propagation of sound in a half-space of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1946, 18(2): 295-315.
- [17] Mironov M A. Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval[J]. Soviet Physics Acoustics-USSR, 1988, 34(3): 318-319.
- [18] Nansha Gao, Jie Deng. Dynamic equivalent study of acoustic matematerials[M]. Berlin: Springer Press, 2022.
- [19] Deng Jie, Gao Nansha. Acoustic emission: New perspectives and applications[M]. Washington: BoD-Books on Demand Ltd., 2022.
- [20] Tang Liling, Cheng Li, Ji Hongli, et al. Characterization of acoustic black hole effect using a one-dimensional fullycoupled and wavelet-decomposed semi-analytical model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 374: 172-184.
- [21] Tang Liling, Cheng Li. Loss of acoustic black hole effect in a structure of finite size[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109 (1): 014102.
- [22] Lee J Y, Jeon W. Exact solution of Euler-Bernoulli equation for acoustic black holes via generalized hypergeometric differential equation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 452: 191-204.
- [23] Deng Jie, Xu Yuxin, Guasch O, et al. A wave and Rayleigh Ritz method to compute complex dispersion curves in periodic lossy acoustic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 546: 117449.
- [24] Ouisse M, Renault D, Butaud P, et al. Damping control for improvement of acoustic black hole effect[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 454: 63-72.
- [25] Chen Xu, Zhao Jinglei, Deng Jie, et al. Low-frequency enhancement of acoustic black holes via negative stiffness supporting[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 241: 107921.
- [26] Huang Wei, Zhang Hui, Inman D J, et al. Low reflection effect by 3D printed functionally graded acoustic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 450: 96-108.
- [27] Yao Bowen, Zhang Yanni, Zhou Qinbo, et al. Vibration isolation by a periodic beam with embedded acoustic black

holes based on a hybrid dynamics method[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2023, 13: 146134.

- [28] McCormick C A, Shepherd M R. Optimization of an acoustic black hole vibration absorber at the end of a cantilever beam
   [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(6): 593-597.
- [29] Du Xiaofei, Huang Dacheng, Zhang Jianrun. Dynamic property investigation of sandwich acoustic black hole beam with clamped-free boundary condition[J]. Shock and Vibration, 2019(1):1-14.
- [30] Zeng Pengyun, Zheng Ling, Deng Jie, et al. Flexural wave concentration in tapered cylindrical beams and wedge-like rectangular beams with power-law thickness[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 452: 82-96.
- [31] Zhou Tong, Tang Liling, Ji Hongli, et al. Dynamic and static properties of double-layered compound acoustic black hole structures[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2017, 9(5): 1750074.
- [32] Gao Nansha, Wei Zhengyu, Zhang Ruihao, et al. Lowfrequency elastic wave attenuation in a composite acoustic black hole beam[J]. Applied Acoustics, 2019, 154: 68-76.
- [33] Ma Li, Zhou Tong, Cheng Li. Acoustic black hole effects in thin-walled structures: Realization and mechanisms[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 525: 116785.
- [34] Gao Nansha, Wei Zhengyu, Hou Hong, et al. Design and experimental investigation of V-folded beams with acoustic black hole indentations[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(1): 79-83.
- [35] Gao Nansha, Guo Xinyu, Cheng Baozhu, et al. Elastic wave modulation in hollow metamaterial beam with acoustic black hole[J]. IEEE Access, 2019, 7: 124141-124146.
- [36] Tang Liling, Cheng Li. Ultrawide band gaps in beams with double-leaf acoustic black hole indentations[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(5): 2802-2807.
- [37] Zhou Tong, Cheng Li. A resonant beam damper tailored with acoustic black hole features for broadband vibration reduction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 430: 174-184.
- [38] Li Meiyu, Deng Jie, Zheng Ling, et al. Vibration mitigation via integrated acoustic black holes[J]. Applied Acoustics, 2022,

198: 109001.

- [39] Deng Jie, Gao Nansha, Chen Xu, et al. Evanescent waves in a metabeam attached with lossy acoustic black hole pillars[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 191: 110182.
- [40] Deng Jie, Gao Nansha, Chen Xu. Ultrawide attenuation bands in gradient metabeams with acoustic black hole pillars[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 184: 110459.
- [41] Sheng Hui, He Mengxin, Ding Qian. Vibration suppression by mistuning acoustic black hole dynamic vibration absorbers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 542: 117370.
- [42] O' Boy D J, Krylov V V. Damping of flexural vibrations in circular plates with tapered central holes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(10): 2220-2236.
- [43] O' Boy D J, Bowyer E P, Krylov V V. Point mobility of a cylindrical plate incorporating a tapered hole of power-law profile[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(6): 3475-3482.
- [44] Bowyer E P. Experimental investigation of damping structural vibrations using the acoustic black hole effect[D]. Loughborough: Loughborough University, 2012.
- [45] Feurtado P A, Conlon S C. Wavenumber transform analysis for acoustic black hole design[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 140(1): 718-727.
- [46] Feurtado P A, Conlon S C. Transmission loss of plates with embedded acoustic black holes[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(3): 1390-1398.
- [47] Conlon S C, Feurtado P A. Progressive phase trends in plates with embedded acoustic black holes[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(2): 921-930.
- [48] Georgiev V B, Cuenca J, Gautier F, et al. Damping of structural vibrations in beams and elliptical plates using the acoustic black hole effect[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(11): 2497-2508.
- [49] Climente A, Torrent D, Sánchez-Dehesa J. Omnidirectional broadband insulating device for flexural waves in thin plates
   [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(21): 214903.
- [50] Deng Jie, Guasch O, Zheng Ling. Ring-shaped acoustic black holes for broadband vibration isolation in plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 458: 109-122.
- [51] Conlon S C, Fahnline J B, Semperlotti F, et al. Enhancing the

low frequency vibration reduction performance of plates with embedded acoustic black holes[C]. Inter-noise and Noise-con Congress and Conference Proceedings, 2014.

- [52] Conlon S C, Fahnline J B, Semperlotti F. Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black holes[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(1): 447-457.
- [53] Bao Yue, Liu Xiandong, Yao Zhengcheng, et al. Damping evolution mechanism of panel embedded with heterogeneous acoustic black hole array[J]. Acta Mechanica Sinica, 2023, 39 (3): 522270.
- [54] Zhu Hongfei, Semperlotti F. Phononic thin plates with embedded acoustic black holes[J]. Physical Review B, 2015, 91 (10): 104304.
- [55] Deng Jie, Guasch O, Maxit L, et al. Sound radiation and nonnegative intensity of a metaplate consisting of an acoustic black hole plus local resonators[J]. Composite Structures, 2023, 304: 116423.
- [56] Deng Jie, Gao Nansha, Chen Xu, et al. Underwater sound radiation from a Mindlin plate with an acoustic black hole[J]. Ocean Engineering, 2023, 278: 114376.
- [57] Krylov V V. Laminated plates of variable thickness as effective absorbers for flexural vibrations[C]//Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, 2001.
- [58] Krylov V V, Tilman F. Acoustic "black holes" for flexural waves as effective vibration dampers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 274(3-5): 605-619.
- [59] Krylov V V, Winward R. Experimental investigation of the acoustic black hole effect for flexural waves in tapered plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300(1-2): 43-49.
- [60] O'Boy D J, Krylov V V. Vibration of a rectangular plate with a central power-law profiled groove by the Rayleigh Ritz method[J]. Applied Acoustics, 2016, 104: 24-32.
- [61] Bowyer E P, Krylov V V. Slots of power-law profile as acoustic black holes for flexural waves in metallic and composite plates [J].Structures. Elsevier, 2016, 6: 48-58.
- [62] Ma Li, Zhang Su, Cheng Li. A 2D Daubechies wavelet model on the vibration of rectangular plates containing strip indentations with a parabolic thickness profile[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 429: 130-146.

- [63] Li Lixia, Su Kun, Liu Haixia, et al. Elastic metasurface for flexural wave refraction based on acoustic black hole[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133(10): 105103.
- [64] Yang Chuanmeng, Ye Tiangui, Qiu Ming, et al. A semianalytical framework for comprehensive vibration analysis of segment-coupled plates with embedded acoustic black holes[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 184: 110517.
- [65] Lee J Y, Jeon W. Vibration damping using a spiral acoustic black hole[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(3): 1437-1445.
- [66] Park S, Kim M, Jeon W. Experimental validation of vibration dam ping using an Archimedean spiral acoustic black hole[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 459: 114838.
- [67] Bowyer E P, Krylov V V. A review of experimental investigations into the acoustic black hole effect and its applications for reduction of flexural vibrations and structure-borne sound[C]. International Conference "InterNoise 2015", 2015.
- [68] Bowyer E, Lister J, Krylov V, et al. Experimental study of damping flexural vibrations in tapered turbofan blades[C]. Acoustics 2012,2012.
- [69] Ji Hongli, Wang Xiaodong, Qiu Jinhao, et al. Noise reduction inside a cavity coupled to a flexible plate with embedded 2D acoustic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 455: 324-338.
- [70] Wang Xiaodong, Ji Hongli, Qiu Jinhao, et al. Wavenumber domain analyses of vibro-acoustic decoupling and noise attenuation in a plate-cavity system enclosed by an acoustic black hole plate[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 146(1): 72-84.
- [71] 王小东,季宏丽,裘进浩. 声学黑洞原理的双层加筋板-腔系 统降噪研究[J]. 振动工程学报, 2022, 35(2): 503-513.
  Wang Xiaodong, Ji Hongli, Qiu Jinhao. Noise reduction of a double-layer stiffened plate-cavity system based on acoustic black hole principle[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(2): 503-513.(in Chinese)
- [72] 王小东,秦一凡,季宏丽.基于声学黑洞效应的直升机驾驶舱 宽带降噪[J]. 航空学报, 2020, 10(10): 228-238.

Wang Xiaodong, Qin Yifan, Ji Hongli. Broadband noise reduction inside helicopter cockpit with acoustic black hole effect[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 10 (10): 228-238.(in Chinese)

- [73] Bowyer E P, Krylov V V. Experimental investigation of damping flexural vibrations in glass fibre composite plates containing one-and two-dimensional acoustic black holes[J]. Composite Structures, 2014, 107: 406-415.
- [74] 赵楠, 王禹, 陈林. 分布式声学黑洞浮筏系统隔振性能研究
  [J]. 振动与冲击, 2022, 41(13): 75-80.
  Zhao Nan, Wang Yu, Chen Lin. Vibration isolation performance of distributed acoustic black hole floating raft system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(13): 75-80. (in Chinese)
- [75] Tang Liling, Cheng Li. Periodic plates with tunneled acousticblack-holes for directional band gap generation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133: 106257.
- [76] Tang Liling, Cheng Li. Impaired sound radiation in plates with periodic tunneled Acoustic Black Holes[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135: 106410.
- [77] Tang Liling, Gao Nansha, Xu Jiali, et al. A light-weight periodic plate with embedded acoustic black holes and bandgaps for broadband sound radiation reduction[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 150(5): 3532-3543.
- [78] Zhao Liuxian. Low-frequency vibration reduction using a sandwich plate with periodically embedded acoustic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 441: 165-171.
- [79] He Mengxin, Ding Qian. Dynamic analysis and design of metamaterial plates with crossed acoustic black holes for vibration control[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2023, 145(1): 011013.
- [80] Lyu Xiaofei, Sheng Hui, He Mengxin, et al. Satellite vibration isolation using periodic acoustic black hole structures with ultrawide bandgap[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2023, 145(1): 014501.
- [81] Deng Jie, Guasch O, Maxit L, et al. Reduction of Bloch-Floquet bending waves via annular acoustic black holes in periodically supported cylindrical shell structures[J]. Applied Acoustics, 2020, 169: 107424.
- [82] 李兵, 范军, 王斌, 等. 内嵌声学黑洞的二维无限长圆柱壳散 射特性研究[C]. 第18 届船舶水下噪声学术讨论会, 2021.
   Li Bing, Fan Jun, Wang Bin, et al. Scattering properties of two-

dimensional infinitely long cylindrical shells with embedded acoustic black holes[C].18th Symposium on Underwater Noise of Ships, 2021. (in Chinese)

- [83] Guasch O, Arnela M, Sanchez-Martin P. Transfer matrices to characterize linear and quadratic acoustic black holes in duct terminations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 395: 65-79.
- [84] Hollkamp J P, Semperlotti F. Application of fractional order operators to the simulation of ducts with acoustic black hole terminations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 465: 115035.
- [85] Guasch O, Sánchez-Martín P, Ghilardi D. Application of the transfer matrix approximation for wave propagation in a metafluid representing an acoustic black hole duct termination [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 77: 1881-1893.
- [86] Zhang Xiaoqi, Cheng Li. Broadband and low frequency sound absorption by Sonic black holes with Micro-perforated boundaries[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 512: 116401.
- [87] Mi Yongzhen, Cheng Li, Zhai Wei, et al. Broadband low-

frequency sound attenuation in duct with embedded periodic sonic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 536: 117138.

- [88] Liang Xiao, Liang Haofeng, Chu Jiaming, et al. A modified sonic black hole structure for improving and broadening sound absorption[J]. Applied Acoustics, 2023, 210: 109440.
- [89] Chua Junwei, Li Xinwei, Yu Xiang, et al. Novel slow-sound lattice absorbers based on the sonic black hole[J]. Composite Structures, 2023, 304: 116434.
- [90] Umnova O, Brooke D, Leclaire P, et al. Multiple resonances in lossy acoustic black holes-theory and experiment[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 543: 117377.
- [91] 庄秋阳,季宏丽,邹宇琪,等.基于环状螺旋声学黑洞的管道结构振动抑制研究[J/OL].振动工程学报:1-12.(2023-05-16).
  www.20230221.1745.010.html.
  Zhuang Qiuyang, Ji Hongli, Zou Yuqi, et al. Vibration suppression of pipeline structure based on circular spiral acoustic black hole[J/OL].Journal of Vibration Engineering:1-12.(2023-05-16).

## Research Progress of Acoustic Black Hole in Vibration and Noise Reduction

Zhao Yanbiao, Li Yiting, Gao Nansha, Pan Guang Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

**Abstract:** Acoustic black hole structure, as a lightweight, efficient and wide-band elastic wave control method, has a broad application prospect in the field of vibration and noise reduction. Based on the acoustic black hole effect, the purpose of this paper is to use lightweight and high efficient broadband vibration and noise reduction materials to solve the engineering sound and vibration problems. This paper introduces the research progress of single-layer and double-layer acoustic black hole beam and additional acoustic black hole vibration absorption beam, acoustic black hole indentation plate and inner engraved plate, acoustic black hole cylindrical shell and acoustic black hole pipeline. Combined with the shortcomings in the current research and application of acoustic black hole vibration and noise reduction and the future research direction are predicted, which provides some reference for the research and application of acoustic black hole vibration and noise reduction.

Key Words: elastic wave; acoustic black hole; lightweight structures; engineering structure; vibration and noise reduction

Received: 2023-09-21; Revised: 2024-01-31; Accepted: 2024-02-28 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20181553015)