

蜂窝夹层结构及其在直升机噪声控制上的应用

张体磊¹, 李睿¹, 董玲抒², 李忠盛², 黄安畏², 孙彩云²,
丛大龙², 吴永鹏²

(1.陆装驻哈尔滨地区空军代室, 哈尔滨 150060; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要:介绍了传统蜂窝夹层结构, 它是由蜂窝芯材耦合面板/薄膜组合而成, 具有优异的降噪特性。为进一步提升蜂窝夹层结构的降噪性能, 结合多孔吸声原理及“吸/隔声结构功能一体化”概念, 将多孔吸声材料填充至蜂窝芯中, 形成了基于多孔吸声的蜂窝夹层结构, 但中、低频降噪性能较差。结合微穿孔板、亥姆霍兹共振理论, 开发了基于共振吸声的单自由度蜂窝夹层结构, 由蜂窝芯材耦合穿孔面板/薄膜组合而成, 提升了中、低频降噪特性, 但是依旧存在降噪频带过窄的问题, 只能在某段特定频率范围内表现出良好的降噪特性。为此, 研发了基于共振吸声的多自由度蜂窝夹层结构, 利用各层穿孔面板/薄膜和蜂窝结构特性, 实现了不同频率噪声控制。最后总结了蜂窝夹层结构在国内外直升机被动噪声控制上的应用情况, 展望了新型蜂窝夹层结构的发展趋势。

关键词:蜂窝夹层结构; 多孔吸声; 共振吸声; 单自由度; 多自由度; 直升机; 被动噪声控制

中图分类号: V214.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)05-0119-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.017

Honeycomb Sandwich Structure and Its Application in Helicopter Noise Control

ZHANG Ti-lei¹, LI Rui¹, DONG Ling-shu², LI Zhong-sheng², HUANG An-wei²,
SUN Cai-yun², CONG Da-long², WU Yong-peng²

(1. Harbin Regional Aviation Military Office, Harbin 150060, China;

2. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the traditional honeycomb sandwich structure, which is composed of honeycomb core material coupled panel/film and has excellent noise reduction characteristics. In order to further improve the noise reduction performance of the honeycomb sandwich structure, the porous sound absorption materials was filled into the honeycomb core combined with the principle of porous sound absorption and the concept of "integration of sound absorption/insulation structure function", forming a honeycomb sandwich structure based on porous sound absorption, but the noise reduction performance at middle and low frequencies was poor. Combined with the micro-perforated plate and Helmholtz resonance theory, the single-degree-of-freedom honeycomb sandwich structure based on resonant sound absorption was developed, which was composed of honeycomb core material coupled with the perforated panel/film, and improved the noise reduction characteristics at medium

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-04-28

Received: 2023-03-28; Revised: 2023-04-28

作者简介: 张体磊(1984—), 男, 硕士。

Biography: ZHANG Ti-lei (1984-), Male, Master.

通讯作者: 董玲抒(1992—), 女, 硕士。

Corresponding author: DONG Ling-shu (1992-), Female, Master.

引文格式: 张体磊, 李睿, 董玲抒, 等. 蜂窝夹层结构及其在直升机噪声控制上的应用[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 119-127.

ZHANG Ti-lei, LI Rui, DONG Ling-shu, et al. Honeycomb Sandwich Structure and Its Application in Helicopter Noise Control[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 119-127.

and low frequencies. However, the noise reduction frequency band was still too narrow, which could only show good noise reduction characteristics within a certain frequency range. Therefore, the multi-degree-of-freedom honeycomb sandwich structure based on resonant sound absorption was developed. The perforated panels/films of each layer and the characteristics of honeycomb structure were used to achieve noise control at different frequencies. The application of honeycomb sandwich structure in passive noise control of helicopters in China and abroad is summarized, and the development trend of new honeycomb sandwich structure is prospected.

KEY WORDS: honeycomb sandwich structure; porous sound absorption; resonant sound absorption; single-degree-of-freedom; multi-degree-of-freedom; helicopter; passive noise control

直升机以其独特的飞行能力，用于执行部队运输、战场救护，为地面部队提供火力支援及后勤保障任务。随着直升机朝着高速、重型等方向发展，舱室噪声问题越发突出。研究显示，我国自主研发的某直升机在驾驶舱未安装吸/隔声材料时，舱内噪声水平在 100 dB 以上，超过 GJBz 20355—1996《直升机噪声限值》中的设计最大限值。强烈的噪声水平不仅危害驾乘人员的身心健康，影响工作效率，其诱发的结构振动与声疲劳，还会严重影响直升机的安全性^[1-2]。因此，大量直升机使用吸/隔声材料进行被动噪声控制，其中蜂窝夹层结构使用最广泛。本文介绍了直升机噪声来源，蜂窝夹层结构的研制进展，以及蜂窝夹层结构在直升机噪声控制的应用情况。

1 直升机噪声来源

尾桨、旋翼、发动机、主减速器及传动系统等(如图 1 所示)是直升机舱内噪声主要来源，包括气动噪声和机械噪声。空气声传递和结构声传递是噪声主要传递路径。旋翼、尾桨、主减速器等噪声源所产生的噪声，通过壁板、风挡、舱门等结构传递进入舱室的传递方式被称为空气声传递。主减速器、发动机、旋翼及尾桨等部件的振动，通过主支撑杆等连接件传递到舱室壁板，引起壁板振动并向舱内辐射噪声的传递方式被称为结构声传递^[3-5]。

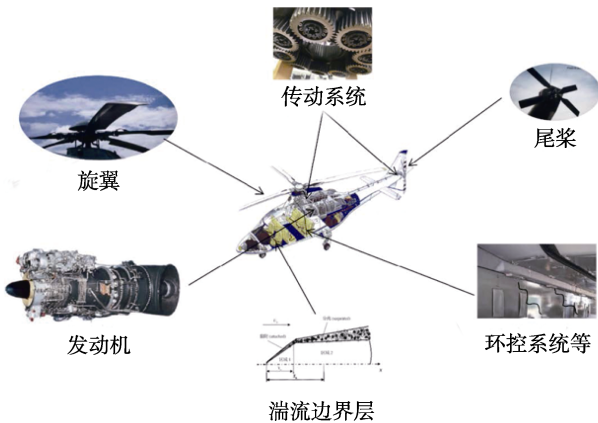


图 1 直升机舱内主要噪声源
Fig.1 Main noise sources in the helicopter cabin

通过在舱内安装吸/隔声材料是直升机上最常见的被动降噪手段，可有效减少噪声透射。其中蜂窝夹层结构因具有优异的隔声减振性能、轻质量、较高的比强度和比刚度，被大量用于飞机舱内降噪。

2 蜂窝夹层结构研究进展

2.1 传统蜂窝夹层结构

蜂窝夹层结构由上至下分别是面板、蜂窝芯、面板，通过粘复合而成“三明治结构”(如图 2 所示^[6])。蜂窝芯材料主要包括芳纶纸蜂窝、铝合金蜂窝及玻璃布蜂窝等；面板材料主要包括铝合金、玻璃钢及碳纤维复合材料等；结构胶粘剂主要包括环氧类、酸马来酰亚胺类、氰酸酯类、聚酰亚胺等^[7]。

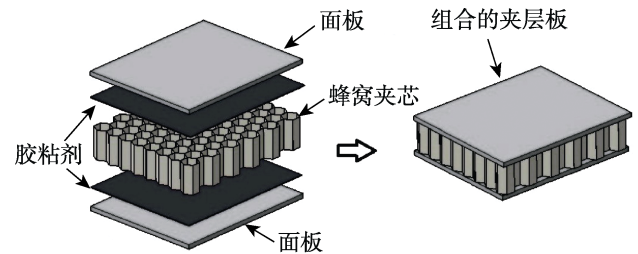


图 2 传统蜂窝夹层结构^[6]
Fig.2 Traditional honeycomb sandwich structure^[6]

蜂窝夹层结构的降噪机理是当蜂窝芯与面板合成夹层结构时，蜂窝芯中形成了多密闭空腔，声波到达密闭空腔时，空气将会交替压缩和膨胀，产生热交换，将声能转化为热能。同时，由于空气介质振动的时候，相邻 2 个质点的运动速度不一样，从而发生相对运动，产生内摩擦，耗散掉部分声能^[8-10]。

1970 年以来，国外对蜂窝夹层结构及其隔声性能进行了深入的研究，Ng 等^[11]设计了高刚度芳纶蜂窝夹层结构，并通过理论、模态分析和实验结合的方法，证明该结构在 100~250 Hz 比传统隔声结构的降噪性能更好。为了降低壁板到舱内的传声性能，2004 年，Simon 等^[12-13]对直升机的蜂窝夹层内饰板进行了优化设计，并在 EC155 机身上进行了模拟测试。测试结果表明，在 85%旋翼扭矩加载情况下，优化后的

内饰板在不同谐波频率处产生不同的降噪效果, 舱内整体降噪可达到 6.5 dB。2012 年, Eurocopter 公司为降低舱内噪声, 通过近场全息技术进行耦合测量建立了舱室模型, 分析了直升机座舱内主要噪声来源, 之后采用双层玻璃和蜂窝夹层隔声板, 使得 EC155 直升机舱内整体声压级降低 7 dB。国内对蜂窝夹层结构声学性能的研究相对较晚, 1990 年, 黄文超^[14]最早将蜂窝夹层结构应用于螺旋桨飞机的座舱降噪中, 研究了蜂窝结构的声透射机理, 试验对比了处理前后的传声损失结果, 结果显示, 使用蜂窝夹层结构提高了机身侧壁板低频传声损失。

相关研究表明, 蜂窝夹层结构降噪性能优于传统隔声板, 但在中、低频段隔声性能较差, 国内某公司研制的厚度约 10 mm 的玻璃钢面板/空心芳纶蜂窝夹层结构 (蜂窝边长为 3 mm) 在 100~4 000 Hz 的平均传声损失达到 30 dB 以上, 但在 250 Hz 的传声损失存在波谷, 比平均传声损失低 6 dB 左右 (如图 3 所示)。因此, 研究者开始研究新型蜂窝夹层结构。

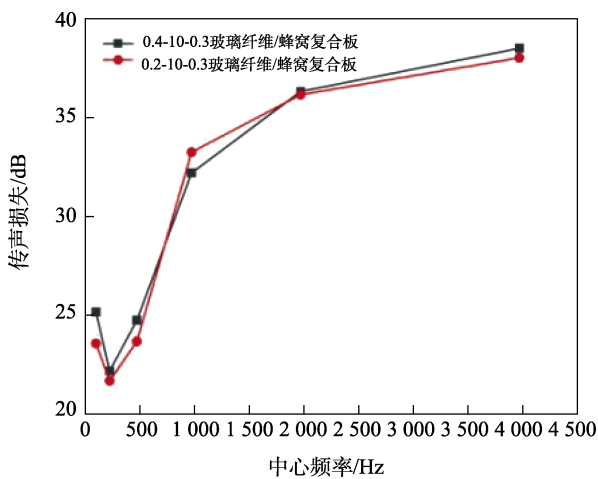


图 3 传统蜂窝夹层结构传声损失曲线

Fig.3 Sound transmission loss curve of traditional honeycomb sandwich structure

2.2 基于多孔吸声的蜂窝夹层结构

为进一步提高蜂窝夹层结构的降噪性能, 结合多孔吸声原理及“吸/隔声结构功能一体化”概念, 研究者将多孔吸声材料填充至蜂窝芯中, 形成了带多孔吸声材料的蜂窝夹层结构。多孔吸声材料主要采用吸音棉、三聚氰胺泡沫、聚酰亚胺泡、聚氨酯泡沫及气凝胶泡沫等。

填充多孔吸声材料的蜂窝夹层结构的降噪机理是, 声波入射到复合芯的细孔中, 可引起多孔材料内部结构的振动, 以及多孔材料与蜂窝芯的界面摩擦, 声波可转化为热能耗散。同时, 与蜂窝芯复合的面板材料密实无孔隙, 能将大部分入射声波反射掉, 吸隔声的同时, 使声波到达材料的底部时, 能量大部分被耗损, 表现出优异的降噪效果^[15]。

国外某型直升机采用了多孔材料填充蜂窝的降噪结构, 面板为玻纤增强复合材料玻璃, 芯材为填充有吸音棉的六边形纸蜂窝, 在 125~4 000 Hz 的平均传声损失比未填充吸音棉结构明显提高。贾金荣等^[15]研发出了三聚氰胺泡沫填充芳纶蜂窝复合芯, 在 100~2 000 Hz, 厚度为 20 mm 的样品的平均吸声系数可达到 0.61 (如图 4 所示), 吸声性能好于芳纶蜂窝和泡沫。Mario 等^[16]研究出了氧化石墨烯和聚乙烯醇混合气凝胶泡沫, 将其嵌入蜂窝芯中 (如图 5 所示), 在 500~1 500 Hz 的吸声系数明显提高, 平均吸声系数最高达到 0.79。将填充多孔吸声材料的复合芯应用于蜂窝夹层结构中, 平均隔声性能明显提高, 但是填充多孔吸声材料的蜂窝夹层结构在中、低频段隔声性能依然较差。

2.3 基于共振吸声的蜂窝夹层结构

由于传统蜂窝夹层结构在中、低频段的隔声效果较差, 结合微穿孔、亥姆霍兹共振理论^[17-18], 研究者开发出了单自由度微穿孔蜂窝夹层结构 (如图 6 所示)。这类结构是由具有一定厚度的蜂窝芯材耦合多

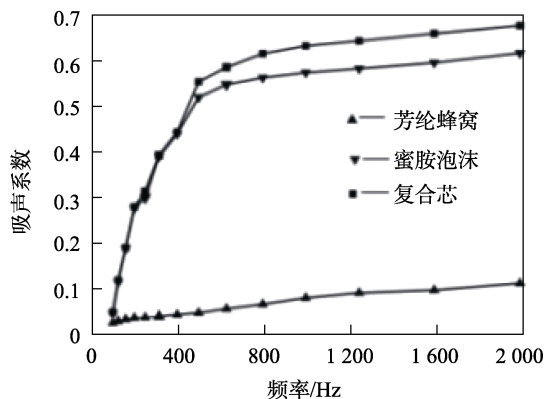
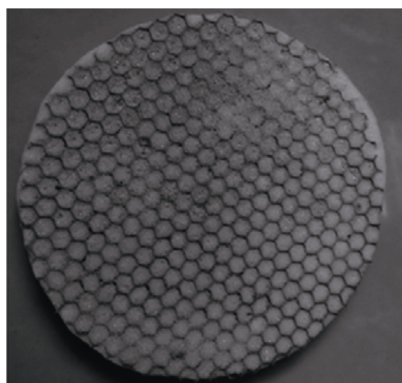


图 4 填充三聚氰胺泡沫的蜂窝复合芯及其吸声系数曲线^[15]

Fig.4 Honeycomb composite core filled with melamine foam and its sound absorption coefficient curve^[15]

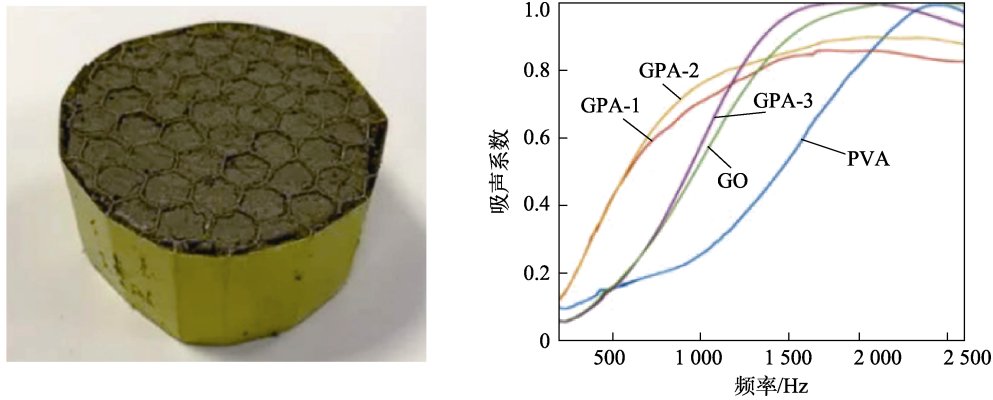


图5 填充氧化石墨烯和聚乙烯醇混合气凝胶泡沫的蜂窝复合芯及其吸声系数曲线^[16]
 Fig.5 Honeycomb composite core filled with GO and polyvinyl alcohol aerogel foam and its sound absorption coefficient curve^[16]

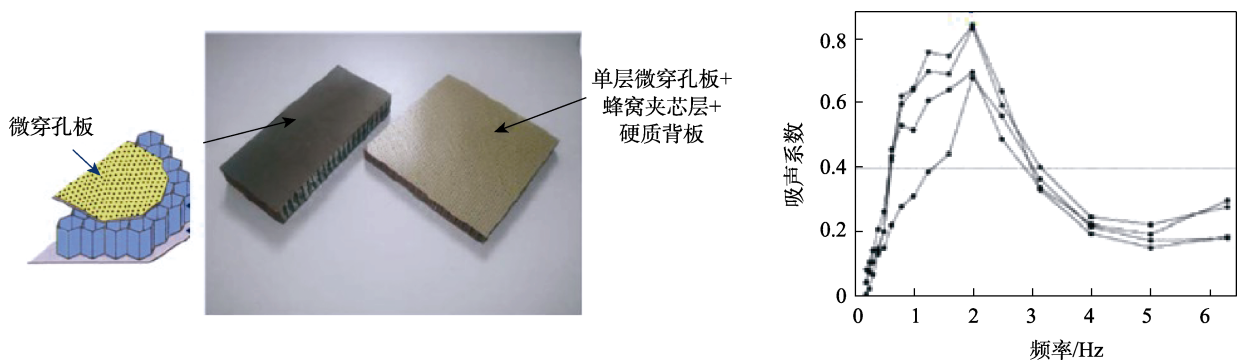


图6 典型单自由度蜂窝夹层结构及其吸声系数曲线

Fig.6 Typical single-degree-of-freedom honeycomb sandwich structure and its sound absorption coefficient curve

孔上面板/薄膜和无孔下面板/薄膜组合而成,利用每一个蜂窝孔格的赫姆霍兹共振机制可实现降噪,吸声性能如图6所示。该结构可有效提高在中低、低频段的吸声性能^[19-23],但是依旧存在吸声频带过窄的问题,只能在某段特定频率范围内表现出良好的吸声特性。

为进一步拓宽吸声频带,研究者提出了双自由度

及多自由度蜂窝夹层结构^[24]。这类结构(如图7所示)利用各层穿孔面板/薄膜和蜂窝结构特性,设计了针对不同频率噪声的多层结构,吸声性能如图7所示。该结构吸声频带明显拓宽,能在多段频率范围内表现出良好的吸声特性。

Sui等^[25]在双层蜂窝芯中铺设一层厚度约为0.25 mm的橡胶薄膜,复合形成了双自由度蜂窝夹层

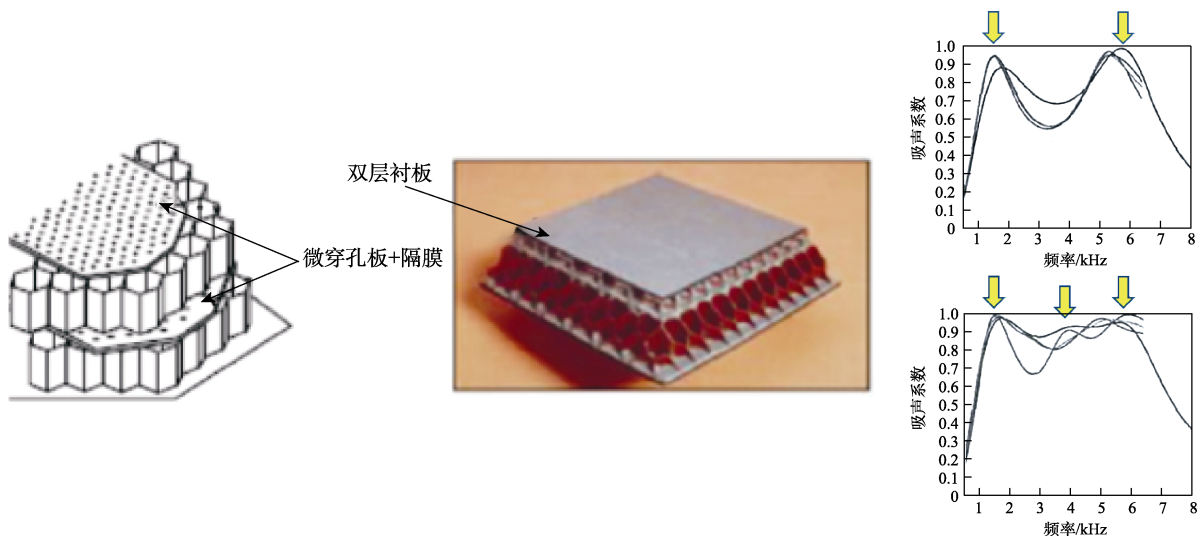


图7 典型双自由度蜂窝夹层结构及其吸声系数曲线^[24]

Fig.7 Typical double-degree-of-freedom honeycomb sandwich structure and its sound absorption coefficient curve^[24]

结构 (如图 8 所示)。采用仿真计算及隔声测试对比分析发现, 在 50~1 600 Hz 频段, 双自由度结构降噪性能明显优于单自由度结构, 双自由度结构平均传声损失为 40 dB, 单自由度结构的平均传声损失为 31 dB, 在低于 500 Hz 频段内, 双自由度结构的平均传声损失大于 50 dB。王达等^[26]研制了一种双自由度 Nomex 蜂窝夹层结构 (如图 9 所示), 该结构在中、低频的吸声系数较高, 且通过调整表面微穿孔薄膜的

孔径, 可提高结构的平均吸声系数。

为提高多自由度蜂窝夹层结构的力学性能, 研究者提出了内嵌式多自由度蜂窝夹层结构 (如图 10 所示)。这种结构是在单层蜂窝夹层结构的蜂窝芯内部嵌入隔膜板或微穿孔薄膜板, 然后以胶接的形式固定在蜂窝芯中间, 通过调控隔膜板或微穿孔薄膜板的数量、位置及声阻抗特性, 提高平均吸声系数和传声损失, 实现构件承载、维形与降噪功能的一体化^[27]。

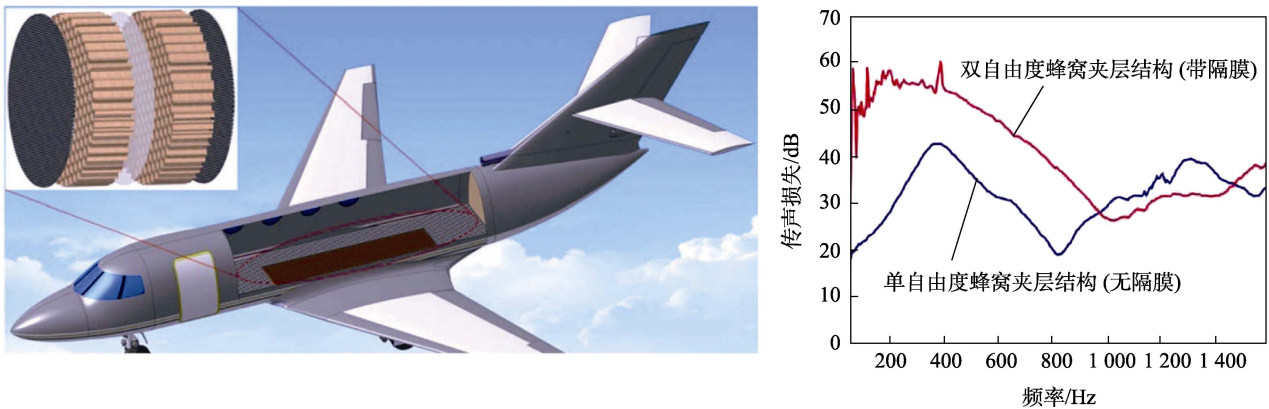


图 8 橡胶薄膜/纸蜂窝双自由度夹层结构及其传声损失曲线^[25]

Fig.8 Rubber film/paper honeycomb sandwich structure with double-degree-of-freedom and its sound transmission loss curve^[25]

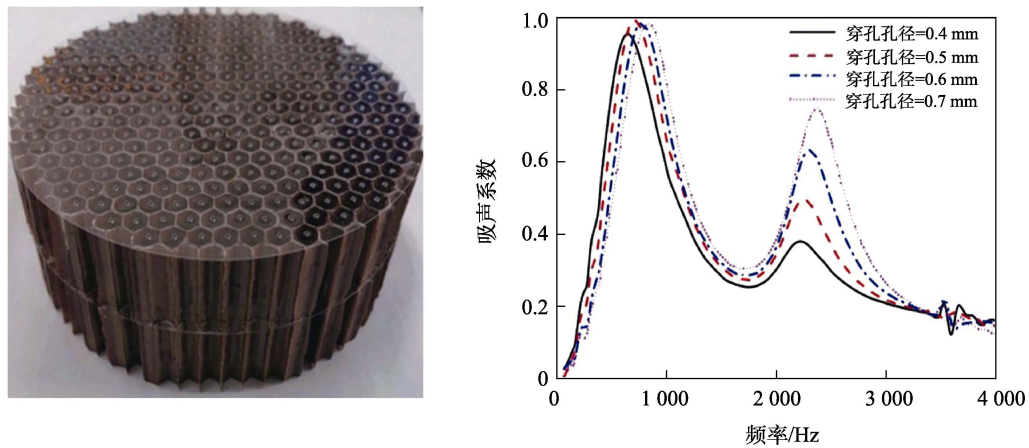


图 9 穿孔薄膜/芳纶蜂窝双自由度夹层结构及其吸声系数曲线^[26]

Fig.9 Perforated film/aramid honeycomb sandwich structure with double-degree-of-freedom and its sound absorption coefficient curve^[26]

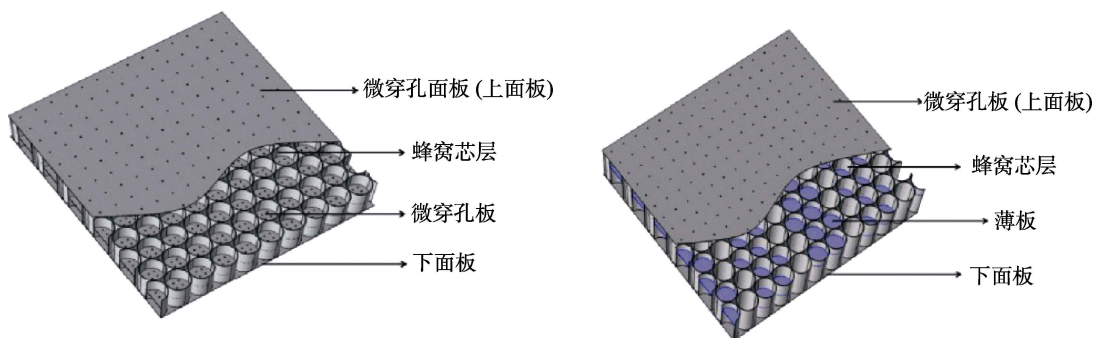


图 10 典型内嵌式多自由度蜂窝夹层结构^[27]

Fig.10 Typical embedded honeycomb sandwich structure with multiple-degree-of-freedom^[27]

Naify 等^[28]在芳纶蜂窝芯中内嵌了厚度为 $7.7 \mu\text{m}$ 且中心开有 $\phi 10 \mu\text{m}$ 小孔的尼龙薄膜, 再将厚度为 1 mm 的玻璃纤维增强环氧树脂面板与复合蜂窝芯组成蜂窝夹层结构 (如图 11 所示)。经验证, 在 $50\sim 1\,600 \text{ Hz}$ 频段, 安装 1 层和 2 层薄膜结构的传声损失比未安装尼龙薄膜分别增加 2、4 dB。赫氏公司通过

内嵌薄膜形式, 已经实现了单自由度、双自由度以及多自由度降噪蜂窝的研制与应用 (如图 12 所示)^[29-30]。中航复材研制了内嵌隔板式、内嵌消声帽式双自由度蜂窝结构 (如图 13 所示), 在 $500\sim 6\,300 \text{ Hz}$ 频段, 吸声系数范围为 $0.69\sim 0.82$, 平均传声损失达到 30.80 dB ^[19]。

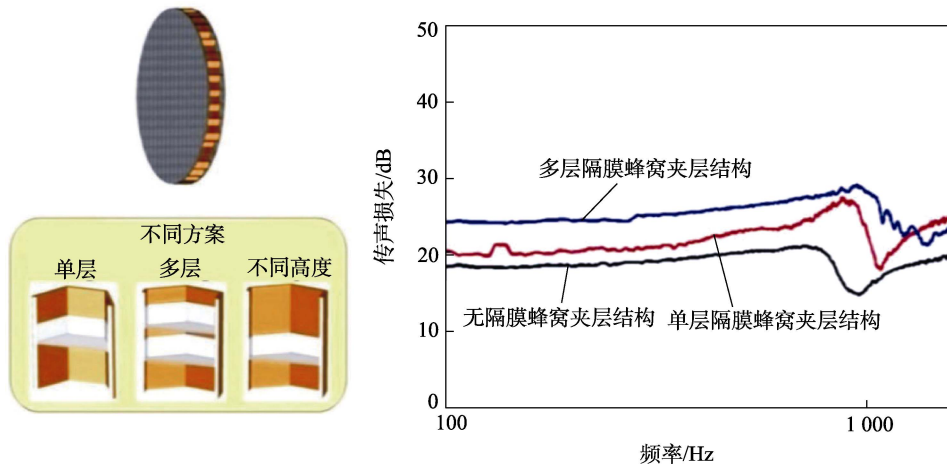


图 11 内嵌薄膜共振吸声蜂窝结构及其传声损失曲线^[28]
Fig.11 Resonant honeycomb structure of embedded film and its sound transmission loss curve^[28]

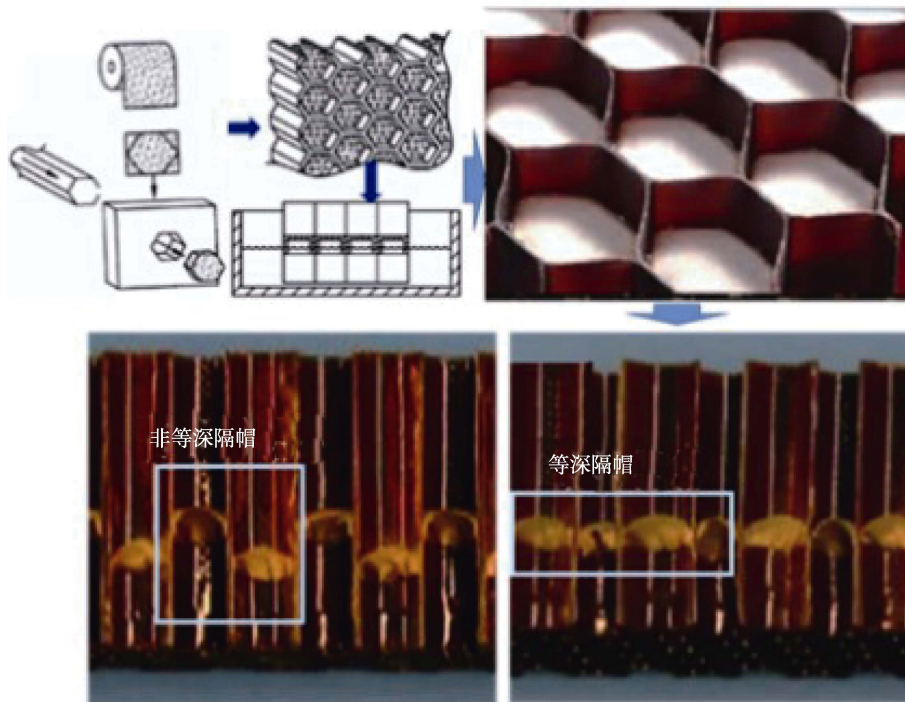


图 12 赫氏公司内嵌隔帽式蜂窝芯^[29]
Fig.12 Embedded cap honeycomb core of Hexcel Company^[29]

近年来, 随着声子晶体和声学超材料等新概念的出现, 具有声子晶体带隙特性的蜂窝夹层结构也逐渐成为国内外的研究热点, 虽缺乏系统研究, 成熟度也较低, 但明显的宽频降噪效果让研究人员趋之若鹜。张玉光等^[31]以薄膜附加集中质量作为局域共振单元, 研究了薄膜型局域共振型声学超材料的吸声特性。郁

殿龙等^[32]对二维 Bragg 散射型声子晶体薄板的振动特性进行了深入的研究和探讨。肖勇等^[33]以周期附加局域共振单元薄板为研究对象, 揭示了其带隙特性。这些研究为新型蜂窝夹层结构的发展奠定了基础。崔洪宇等^[34]基于夹层板和声学超材料结构, 提出了一种具有声子晶体带隙特性的蜂窝夹层结构 (如图 14 所

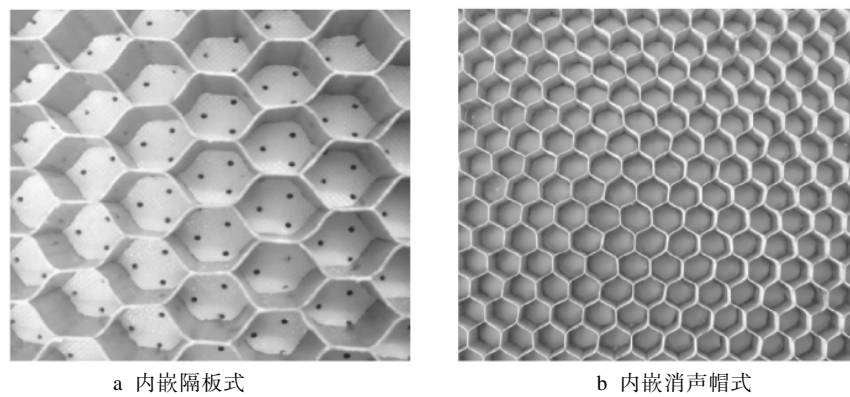


图 13 中航复材内嵌式多自由度消声蜂窝芯^[19]

Fig.13 Embedded multi-degree-of-freedom silencing composite honeycomb core of AVIC^[19]: a) embedded partition type; b) embedded silencing cap type

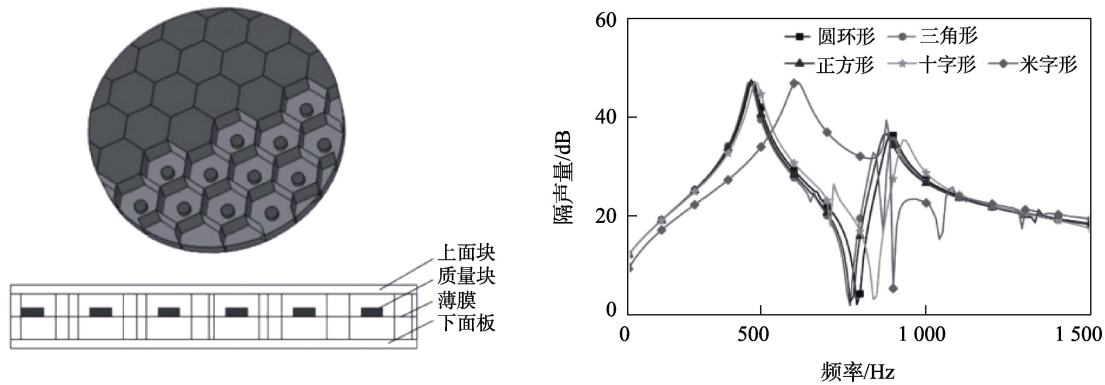


图 14 具有声子晶体带隙特性的蜂窝夹层结构及传声损失曲线^[34]

Fig.14 Honeycomb sandwich structure with band gap characteristics of phononic crystal and its sound transmission loss curve^[34]

示), 针对不同形状质量块, 对薄膜型声学超材料隔声性能的影响进行了分析研究。测试结果证明, 在质量增加不明显的前提下, 具有声子晶体带隙特性的蜂窝夹层结构比传统蜂窝结构平均传声损失低, 且有利于实现低频隔声。

3 在直升机噪声控制上的应用

国内外直升机被动噪声控制方案中, 大量采用了传统蜂窝夹层结构, 一般用于发动机及其短舱的后部结构、尾喷口、反推力装置, 驾驶舱地板、内饰、顶棚, 客舱地板、舱门, 动力舱罩、尾梁筒体及机身整流罩等部位, 取得了一定的降噪效果。

国外直升机对新型吸声蜂窝夹层结构的使用早于国内^[35], EC145 直升机发动机驾驶舱内饰、短舱进气道、核心机匣、反推力装置及风扇涵道等部位应用了新型吸声蜂窝夹层结构, 实现了吸声降噪。空直公司的 H160 民用直升机驾驶舱内饰采用了新型吸声蜂窝夹层结构, 结合机体减振降噪设计, 使舱内噪声控制在规定范围内。

国内直升机也开始逐渐使用新型吸声蜂窝夹层

结构, 某型直升机的驾驶舱内饰使用了新型吸声蜂窝夹层结构, 减少了舱内噪声。若通过进一步设计, 将新型吸声蜂窝夹层结构应用于直升机的动力舱罩、尾梁筒体及机身整流罩等部位, 在噪声传播路径中吸收、阻隔噪声, 可进一步降低直升机舱内噪声水平。

4 结语

为进一步提升军用直升机的战场声隐蔽能力, 同时提高民用直升机的舒适性, 并降低其带来的噪声污染, 大量直升机使用吸/隔声材料进行被动噪声控制, 其中蜂窝夹层结构使用最广泛。近年来, 虽然开展了新型吸声蜂窝夹层结构的研究, 也取得了一定成果, 但是工程化应用进程缓慢, 未大量在直升机上实现相关应用。需进一步加强新型吸声降噪材料及结构的研究, 加快工程化应用进程, 提升直升机舱内噪声控制水平, 有力支撑了我国先进直升机的快速发展。

参考文献:

[1] 王阳, 招启军, 徐国华. 直升机总噪声中旋翼和尾桨噪

- 声的分辨与提取方法[C]//第二十三届全国直升机年会论文集. 成都: 中国航空学会, 2007.
- WANG Yang, ZHAO Qi-jun, XU Guo-hua, The Differentiation and Extraction for the Rotor/Tail Noise from the Whole Helicopter Noise[C]//Proceedings of the 23rd National Helicopter Annual Conference. Chengdu: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [2] 刘孝辉, 徐新喜, 白松, 等. 军用直升机振动与噪声控制技术[J]. 直升机技术, 2013(1): 67-72.
- LIU Xiao-hui, XU Xin-xi, BAI Song, et al. Vibration and Noise Control Technology on Military Helicopters[J]. Helicopter Technique, 2013(1): 67-72.
- [3] EDWARDS B, COX C. Revolutionary Concepts for Helicopter Noise Reduction: SILENT Program[M]. Texas: Bell Helicopter Textron Inc, 2002.
- [4] 虞汉文, 孙东红, 李明强, 等. 直升机舱内降噪技术研究[J]. 直升机技术, 2012(4): 38-44.
- YU Han-wen, SUN Dong-hong, LI Ming-qiang, et al. Cabin Noise Control Process of a Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2012(4): 38-44.
- [5] 宋玉宝, 李征初, 黄奔, 等. 周期隔振设计用于直升机舱内噪声抑制的研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4): 764-771.
- SONG Yu-bao, LI Zheng-chu, HUANG Ben, et al. Reduction of Helicopter Cabin Noise Using Periodic Isolation Design[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4): 764-771.
- [6] 陈静, 邱启艳. 蜂窝夹层结构在飞机上的应用及发展[J]. 新材料产业, 2018(7): 63-67.
- CHEN Jing, QIU Qi-yan. Application and Development of Honeycomb Sandwich Structure in Aircraft[J]. Advanced Materials Industry, 2018(7): 63-67.
- [7] 吴廷洋. 蜂窝夹层板隔声特性研究与低噪声结构设计[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- WU Ting-yang. Study on Sound Insulation Characteristics and low noise structure design of Honeycomb Sandwich Panels[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [8] 辛锋先, 张钱城, 卢天健. 轻质夹层材料的制备和振动声学性能[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 375-399.
- XIN Feng-xian, ZHANG Qian-cheng, LU Tian-jian. Advances in Lightweight Sandwich Materials and Structures: Manufacture and Vibroacoustic Performances[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 375-399.
- [9] 王盛春, 邓兆祥, 王攀, 等. 蜂窝夹层板封闭声腔的结构-声耦合特性分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2761-2764.
- WANG Sheng-chun, DENG Zhao-xiang, WANG Pan, et al. Analysis of Structural-Acoustic Coupling of an Enclosure Surrounded by Honeycomb Sandwich Panel[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(22): 2761-2764.
- [10] 陈洋, 吴永鹏, 李忠盛, 等. 嵌入局域共振单元宽频减振降噪蜂窝夹层结构研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 96-102.
- CHEN Yang, WU Yong-peng, LI Zhong-sheng, et al. Research Progress on Broadband Vibration and Noise Reduction Honeycomb Sandwich Structure Embedded with Local Resonance Unit[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 96-102.
- [11] NG C F, HUI C K. Low Frequency Sound Insulation Using Stiffness Control with Honeycomb Panels[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(4): 293-301.
- [12] SIMON F, HAASE T, UNRUH O, et al. Activities of European Research Laboratories Regarding Helicopter Internal Noise[J]. Aerospace Lab, 2014 (7): 1-14.
- [13] SIMON F, PAUZIN S, BIRON D. Optimisation of Sandwich Trim Panels for Reducing Helicopter Internal Noise[C]//30th European Rotorcraft Forum, [s. l.]: [s. n.], 2004.
- [14] 黄文超. 声处理蜂窝夹层结构在飞机座舱降噪设计中的应用[J]. 航空学报, 1990, 11(11): 584-588.
- HUANG Wen-chao. Application of Acoustically Treated Honeycomb Sandwich Panels in Noise Control of Aircraft Cabin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11(11): 584-588.
- [15] 贾金荣, 汤海涛, 陈磊, 等. 填充蜜胺泡沫芳纶蜂窝复合芯吸声性能研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(12): 39-41.
- JIA Jin-rong, TANG Hai-tao, CHEN Lei, et al. Absorbing Property of Aramide Honeycomb Filled with Melamine Foam[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(12): 39-41.
- [16] RAPISARDA M, MALFENSE FIERRO G P, MEO M. Ultralight Graphene Oxide/Polyvinyl Alcohol Aerogel for Broadband and Tuneable Acoustic Properties[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 10572.
- [17] 马大猷. 微穿孔板的实际极限[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 481-484.
- MA Da-you. Practical Absorption Limits of MPP Absorbers[J]. Acta Acustica, 2006, 31(6): 481-484.
- [18] COX T J, D'ANTONIO P. Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application[M]. London: Spon Press, 2004.
- [19] 龚情, 何志平, 黄建萍, 等. 吸声蜂窝结构材料及其在直升机上的应用展望[J]. 高科技纤维与应用, 2020, 45(5): 1-7.
- GONG Qing, HE Zhi-ping, HUANG Jian-ping, et al. Review of Sound-Absorbing Honeycomb Material and the Application on Helicopter[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2020, 45(5): 1-7.
- [20] XIE Su-chao, WANG Da, FENG Zhe-jun, et al. Sound Absorption Performance of Microperforated Honeycomb Metasurface Panels with a Combination of Multiple Orifice Diameters[J]. Applied Acoustics, 2020, 158: 107046.
- [21] ZHANG Xiang, WU Jin-wu, MAO Qi-bo, et al. Design of a Honeycomb-Microperforated Panel with an Adjustable Sound Absorption Frequency[J]. Applied Acoustics, 2020, 164: 107246.

- [22] LIU J, HUA X, HERRIN D W. Estimation of Effective Parameters for Microperforated Panel Absorbers and Applications[J]. *Applied Acoustics*, 2014, 75: 86-93.
- [23] 彭若龙, 杨涛. 中低频高吸声性能的复合穿孔板设计[J]. *声学技术*, 2011, 30(6): 229-230.
PENG Ruo-long, YANG Tao. Design of High Sound-Absorbing Performance with Complex Perforated Panels[J]. *Technical Acoustics*, 2011, 30(6): 229-230.
- [24] JONES M, PARROTT T. Assessment of Bulk Absorber Properties for Multi-Layer Perforates in Porous Honeycomb Liners[C]//12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Cambridge: AIAA, 2006.
- [25] SUI Ni, YAN Xiang, HUANG Tai-yun, et al. A Light-weight yet Sound-Proof Honeycomb Acoustic Metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(17): 171905.
- [26] WANG Da, XIE Su-chao, YANG Shi-chen, et al. Sound Absorption Performance of Acoustic Metamaterials Composed of Double-Layer Honeycomb Structure[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(9): 2947-2960.
- [27] 田文昊. 内置声阻尼的蜂窝夹层复合结构吸声性能分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
TIAN Wen-hao. Analysis on Sound Absorption Performance of Honeycomb Sandwich Structure with Built-in Acoustic Damping[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [28] NAIIFY C, NUTT S. Noise Reduction of Honeycomb Sandwich Panels with Acoustic Mesh Caps[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 126(4): 2281.
- [29] CASALINO D. Aeroacoustics Research in Europe: The CEAS-ASC Report on 2009 Highlights[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(22): 4810-4828.
- [30] HERKES W, OLSEN R, UELLENBERG S. The Quiet Technology Demonstrator Program: Flight Validation of Airplane Noise-Reduction Concepts[C]//12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Cambridge: AIAA, 2006: 2720.
- [31] ZHANG Yu-guang, WEN Ji-hong, XIAO Yong, et al. Theoretical Investigation of the Sound Attenuation of Membrane-Type Acoustic Metamaterials[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1489-1494.
- [32] 郁殿龙, 刘耀宗, 王刚, 等. 二维声子晶体薄板的振动特性[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(2): 150-154.
YU Dian-long, LIU Yao-zong, WANG Gang, et al. Vibration Property of Two Dimension Phononic Crystals Thin Plate[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(2): 150-154.
- [33] XIAO Yong, WEN Ji-hong, WEN Xi-sen. Flexural Wave Band Gaps in Locally Resonant Thin Plates with Periodically Attached Spring-Mass Resonators[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(19): 195401.
- [34] 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(5): 33-36.
CUI Hong-yu, DU Yan-mei, WANG Hai-guan. Analysis of Sound Insulation Characteristics of Acoustic Metamaterial Structures with Different Shaped Masses[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(5): 33-36.
- [35] 黄安畏, 吴永鹏, 李忠盛, 等. 局域共振声学超材料技术进展及应用展望[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(8): 45-50.
HUANG An-wei, WU Yong-peng, LI Zhong-sheng, et al. Technical Progress and Application Prospect of Locally Resonant Sonic Metamaterials[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(8): 45-50.

责任编辑: 刘世忠