

Micro-Perforated Sound Absorber and Application in Honeycomb Sandwich

Xiang Zhang^{1,2}, Jinwu Wu^{1,2}, Xiangyu Ding¹

¹Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

²Jiangxi Key Laboratory of Micro Aeroengine, Nanchang Jiangxi

Email: wujinwu@nchu.edu.cn, zhang_xiang0630@163.com

Received: Oct. 30th, 2019; accepted: Nov. 14th, 2019; published: Nov. 21st, 2019

Abstract

The development history of honeycomb sandwich panel structure is briefly introduced. The detailed exploration and use of different layers, different stiffness and new micro-perforated sound absorber structures and their active sound absorption are summarized. On this basis, the advantages and disadvantages of different operation methods are summarized and analyzed for various design ideas of existing honeycomb panel-micro-perforated panel composite structures. Suggestions and prospects for the future honeycomb-micro-perforated composite structure design are proposed, and more in-depth research is needed to reduce the structural weight and have better adaptive performance.

Keywords

Micro-Perforated Panel, Honeycomb Sandwich Panel, Sound Absorption

微穿孔吸声体及其在蜂窝夹层结构中的应用

张翔^{1,2}, 吴锦武^{1,2}, 丁相玉¹

¹南昌航空大学, 江西 南昌

²江西省微小航空发动机重点实验室, 江西 南昌

Email: wujinwu@nchu.edu.cn, zhang_xiang0630@163.com

收稿日期: 2019年10月30日; 录用日期: 2019年11月14日; 发布日期: 2019年11月21日

摘要

摘要介绍了蜂窝夹层板结构的发展历程。详细地从不同层数、不同刚柔度以及新型微穿孔板吸声体结构

和其在主动吸声中的探索和使用进行了总结。在此基础上针对现有的蜂窝板-微穿孔板复合结构的各种设计思路,列举、总结和分析了不同操作方法的优缺点。并提出了对于未来的蜂窝-微穿孔板复合结构设计的建议和展望:在减轻结构重量以及具备更好的自适应性能上还需要进行更深入的研究。

关键词

微穿孔板, 蜂窝夹层板结构, 吸声

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代科学技术的高速发展和人们生活环境的日益优化,具有较轻重量却能实现较高效全面性能的材料得到了工程人员和专家学者的一再关注。本文就工程应用较为广泛的蜂窝夹层结构和微穿孔吸声体以及两者的结合产物进行相关的阐述,并总结提出现有技术和产品存在的一些不足以及可能发展的方向。

2. 蜂窝夹层板结构

早在上世纪四十年代,科学家就发现蜂窝结构是一种在保留了物理强度的同时又能减轻重量的结构,并由英国的 Hill 首先应用于航空事业中,之后美国又将木单片蜂窝芯粘接在铝蒙皮上形成“铝木蜂窝夹层结构”,到了二战快结束时完全由铝镁合金制成的蜂窝夹层结构已经在飞机上得到了广泛的应用,到了五十年代又出现了玻璃蜂窝结构。国内直到九十年代才开始在建筑行业中优先应用蜂窝结构[1],并在之后开始被越来越多的行业所应用和推崇[2] [3] [4] [5]。

自蜂窝结构问世以来,专家学者对于这种在保持了强度的同时又拥有着轻质特性的材料进行了大量的研究。并分别从刚度[6]、固有频率[7]、隔热[8]、强度[9]、隔声[10]等方面对蜂窝夹层结构进行了丰富的研究。

研究表明,蜂窝夹层板由于含有垂直于面板方向的蜂窝芯壁,比同等质量、同等尺寸的其他结构拥有更为优越的物理性能。同时由于具有两层板结构和一个空腔,也被作为轻质的隔声部件来使用。

3. 微穿孔板吸声体结构

3.1. 微穿孔板理论建立及发展

所谓微穿孔板,字面理解即为穿以一定数量和大小的微孔的薄板,结构示意图如图 1 所示,结构起初是为了应对高温、高湿环境下的降噪问题而设计的,理论模型最先由马大猷先生于 1975 年发表的论文中提出并进行详细的推导[11],推导过程使用声电类比法[12]得到如图 2 所示的等效电路图,进而推导出结构的电学方程,将复杂的声学问题转化为较简单的电学问题,综合了 Rayleigh [13]对于微管中声波的分析方法以及 Crandall [14]的简化推导,同时使用了声质量、声阻抗等概念推导出微穿孔板吸声体的理论和设计方法,并且推广到双层和漫入射时的情况[11]。随后马大猷又对微穿孔结构的吸声理论进行了精确推导验证,同时对其吸声极限进行了理论推导和说明[15] [16]。

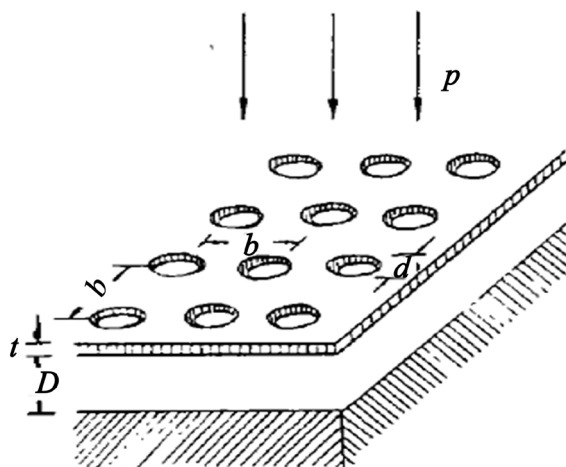


Figure 1. Structural sketch of micro-perforated sound absorber [15]
图 1. 微穿孔吸声体结构简图[15]

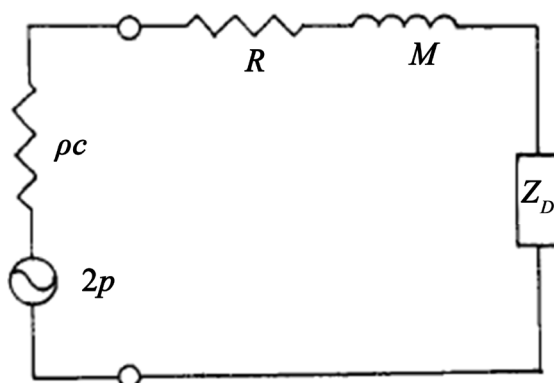


Figure 2. Equivalent circuit diagram of acoustoelectric analogy for micro-perforated sound absorber [15]
图 2. 微穿孔吸声体的声电类比等效电路图[15]

在理论推导过程中，大多使用理想的边界条件——无穷大薄板，在这一条件下微穿孔板相较一般的薄板多了一定数量一定排布的微孔。用来表征微穿孔板吸声体的参数由单一薄板的板厚 t ，新增了对应穿孔的穿孔孔径 d 、孔间距 b ，由于微孔有不同的排布方式，一般使用穿孔率 p 来表征由孔距 b 、孔径 d 和排布方式确定的微穿孔板的特征，而空腔的存在又新增一参数空腔深度 D 。马氏理论中对微穿孔板进行了声电类比，其中微穿孔板被等效为一个电感和一个电阻，对应声质量与声阻，空腔等效为一个电容，对应空腔声阻抗，那么对于微穿孔板吸声体的研究，就逃不出对孔径 d 、板厚 t 、穿孔率 p 以及空腔深度 D 四个参数的控制和改变。

自微穿孔板诞生之日起由于结构可大大降低吸声部件的重量，在实际工程应用中早已被广泛使用 [17]-[22]。对于微穿孔板吸声性能的计算，业界大多以马氏理论为基础，针对具体问题分别使用解析近似以及传递矩阵的方法进行求解。当设计目标为单层微穿孔板结构的时候，使用 MATLAB 计算得到的理论结果如图 3 所示，可以观察到使用声电类比与传递矩阵法求解得到的结果具有较好的一致性，其中共振吸声峰频率有着非常好的匹配，只在吸声峰峰值上略微有一些差距，其中使用到的微穿孔板结构参数为：微穿孔板板厚 1 mm，孔径 0.5 mm，穿孔率 3%，空腔深 60 mm；而当使用相同的结构参数考虑双层微穿孔板串联结构时，如图 4 所示，声电类比法较传递矩阵法得到的计算结果就会出现一较大的误差，这种误差不仅仅表现在峰值大小上，对于共振峰值频率也有着明显的不匹配现象，这一点赵晓丹 [23] 在其

论文中也对此进行了对比讨论, 得出了当空腔尺寸并非很小的情况下, 使用声电类比忽略空腔的声质量会对吸声系数计算结果带来较大的误差, 而使用传递矩阵法则较好得保留了空腔部分的声阻抗。

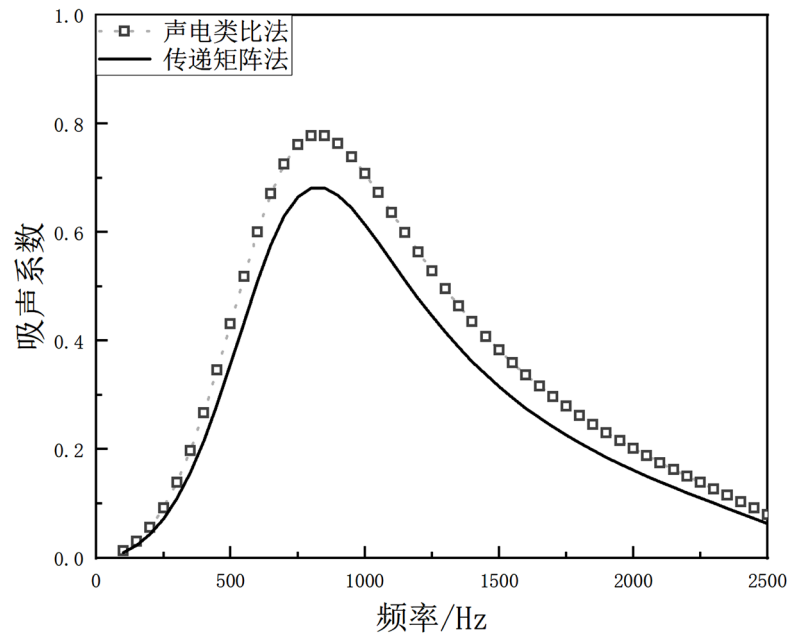


Figure 3. Two methods for calculating sound absorption of single-layer micro-perforated panel structure with same parameters
图 3. 两种方法计算相同参数单层微穿孔板结构吸声

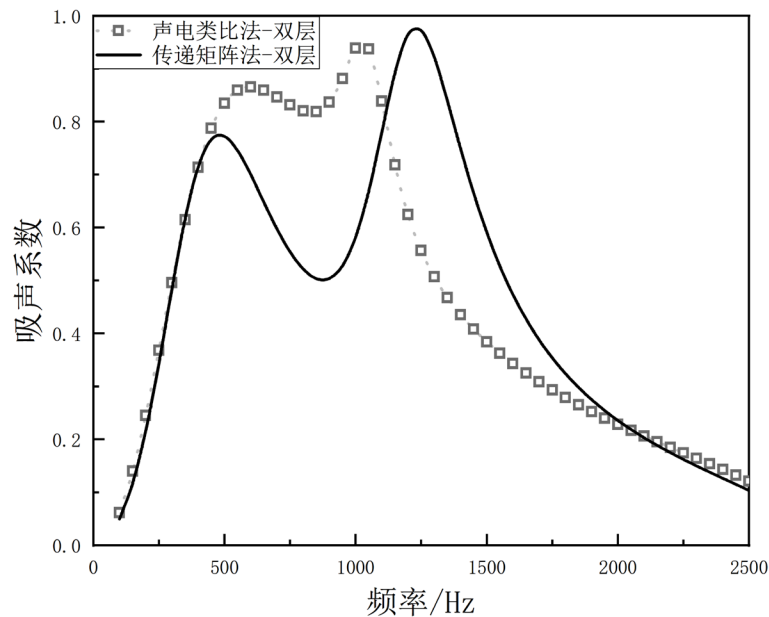


Figure 4. Two methods for calculating sound absorption of double-layer micro-perforated panel structure with same parameters
图 4. 两种方法计算相同参数双层微穿孔板结构吸声

除了上述两种常用的方法外, Masahiro Toyoda [24]另辟蹊径使用时域有限差分(FDTD)法来对微穿孔板吸声体吸声性能进行预测, 即通过时域计算, 去除了马氏理论中的频率依赖关系, 并基于回归分析, 对微穿孔吸声体中的孔的传输阻抗进行了近似计算。此外, 还利用状态转移方程导出了包括微穿孔板边

界在内的一维声场和三维声场的稳定性条件，并通过比较吸收系数和转移阻抗的数值计算结果，验证了一维例子的正确性。但由于板的高刚度而不能忽略微穿孔吸声体元件之间的相互作用的情况下，局部边界并不能得到准确地反映。

3.2. 微穿孔吸声体吸声性能的研究

从微穿孔吸声体结构被广泛应用开始，专家学者就如何拓宽微穿孔吸声体的吸声频带、增强吸声体的吸声性能展开了大量的理论、仿真以及实验研究。由于单层刚性微穿孔板吸声体具有吸声频带和吸声性能不可兼得的缺点，发展多层微穿孔板成为了必然的趋势。

其中张晓杰[25]使用马大猷先生给出的方法，详细计算了单双层刚性微穿孔板结构的吸声系数，同时对三层以及四层串联的刚性微穿孔板也进行了相应的研究，并制作实物，将理论和实验结果进行了对比，同时使用遗传算法对微穿孔板各参数进行优化并得到了较好的结果。Bucciarelli [26]将微穿孔吸声体串联结构提升到了六层，其研究表明，六层微穿孔吸声体串联结构的吸声系数在实验中可在 400~2000 Hz 的频率范围内保持高于 90% 的吸收率。通过多层串联的手段虽然规避了单层微穿孔板吸声频带狭窄的缺点，但同时带来较大的结构重量，对于需要尽可能减轻重量的航空、车辆等领域的应用来说，依旧存在着一定的矛盾。

对此专家学者将目光放到了微穿孔板吸声体的并联使用上，其中钱玉洁[27]提出了使用非单一孔径的穿孔布局，来达到拓宽单层微穿孔板吸声频带的目的。同时还进行了超微穿孔即穿孔直径小于 0.1 毫米的微穿孔板的实验研究，验证了马大猷提出的吸声带宽极限的理论预测[16]，并且提出了一种超微穿孔加工方法。同样对微穿孔板吸声体结构采取了并联排布的 Ali Ibrahim Mosa [28]，使用了一种非均匀分布的方式，即同时使用不同穿孔率以及不同空腔深度的微穿孔板吸声体结构，以求获得比传统只改变穿孔率或只改变空腔更好的吸声效果。实验结果表明这种非均匀的分布在使用较少种类的微穿孔体的时候能得到较宽的吸声频带。

对微穿孔板进行串联的组装，在新增了吸收峰的基础上，结构整体的吸收峰也由于不同层微穿孔板之间的耦合现象出现了向低频段的漂移，而并联的组装方式，则只是简单的吸收作用的叠加。如果不考虑系统整体重量的情况下，只要添加够一定数量的参数不同的微穿孔吸声体，并使用串、并联以及混联的组装方式，就能达到对于目标频域有效的吸声。

以往对于微穿孔板的理论和实验研究都是使用刚性微穿孔板进行的，而 Hyun-Sil Kim [29]进行了单层弹性微穿孔板吸声的理论推导，并且与刚性微穿孔板做了对比，并进一步研究了多层弹性微穿孔板设计时的位置分布以及穿孔率对于结构吸声的影响。Teresa Bravo [30]则针对双层柔性微穿孔薄膜进行了理论推导，分析了因柔性薄膜振动带来的在微孔附近的空气分子相对薄膜的速度存在不一致的现象，并针对该现象提出需要在微穿孔吸声体结构中引入额外的阻抗的结论。

由于微穿孔板吸声体结构中，主要由微孔提供结构的声阻，即声波通过微孔时，微孔内的空气由于空气层沿孔壁方向的层间粘滞作用，产生了能量的损耗。理论上可以通过增加板厚来达到加长作用距离的目的，但是增加微穿孔板厚度同样也会大大增加结构重量，于是吕亚东使用微孔后接柔性管束来增加空气柱共振效果思路，来达到增强空气粘滞效果引起的热能转换，进而提升结构吸收的声能量[31]。对此 Dengke Li [32]使用在微孔后加装长度不一的短管的方式，变相的在增加了微孔等效长度的同时又分割出了额外的空气腔室，产生了附加的等效阻抗，带来了更好的吸声性能。Fabio Auriemma [33]则提出了一种将传统微穿孔吸声结构进行了拆分和重组的微槽结构，相当于将传统的微孔进行了扭曲，变相增长了微孔长度，使得该部分的声阻得到了提升。

为了达到提高微穿孔的吸声性能的目的，专家学者的眼光开始不仅仅关注于微穿孔自身参数的优化

和研究, 转而向着吸声体结构的物理原理——提高与空气的特性阻抗的匹配程度这一思路展开了研究。任树伟[34]在柔性微穿孔板表面额外添加一定质量的弹簧振子作为亚波长局部谐振器, 将入射声波作为激励源的情况下引起的自身柔性微穿孔板的振动考虑在内, 成功改善了弯曲波阻带行为引起的声表面阻抗, 进而达到进一步增强吸声性能和拓宽吸声频带的目的。类似的思路也被赵晓丹[35]使用在微穿孔吸声体空腔下方的刚性后壁上。如图 5 即为其在传统的微穿孔吸声体的空腔下方将原有的刚性下板替换为一个并联机械阻抗装置, 该装置由固定在铝板上的两个小铁块用粘弹性材料固定到大板上, 再用同种粘弹性材料固定到空腔后端侧壁与原有刚性下板相连的位置。将传递矩阵数值计算以及实验测量结果进行对比, 得到如图 6 所示的吸声系数图, 可以发现结构在低频引入了三个额外的吸收峰, 但由于三个机械阻抗之间的耦合作用, 峰值所显示的共振频率都略微偏离理论计算。

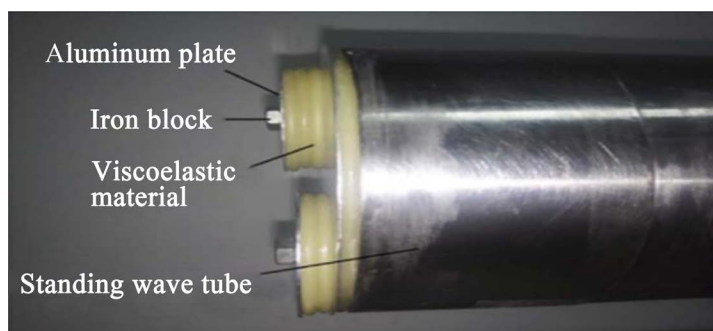


Figure 5. Schematic diagram of parallel mechanical impedance device [35]
图 5. 并联机械阻抗装置示意图[35]

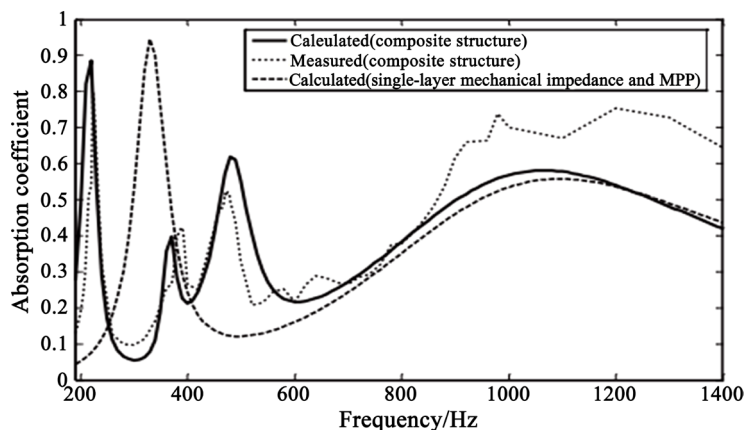


Figure 6. Comparison of theoretical calculation and experimental data of micro-perforated sound absorber with parallel mechanical impedance device [35]
图 6. 加装并联机械阻抗装置的微穿孔吸声体理论计算与实验数据对比图[35]

另一方面, 基于微穿孔板吸声体结构的物理原理和结构设计方法, Zhengqing Liu [36]将一般的微穿孔板进行拓宽得到三维微穿孔板, 其使用的方法就是在穿孔板后紧贴安装一定厚度的纤维材料, 由于纤维材料是一种多孔介质, 声波在通过了微孔之后进入多孔材料继续进行消耗, 结构的吸声性能得以提高。而使用多孔材料来作为吸声部件的方法已经屡见不鲜了, 材料的种类也是多种多样[37] [38] [39], 但是这种做法大大增加了结构重量, 与微穿孔板吸声体结构的发明初衷不相匹配。

除此之外, 微穿孔吸声结构在声学超材料的应用中, 也有着相应的研究价值。Yi Fang [40]利用相位梯度法对衍射波进行处理, 提出了一种具有刚性壁支撑的周期结构声表面波吸声方法。该系统由四个狭

缝组成, 其中填充有金属基纤维材料, 在一个周期内狭缝具有不同的厚度, 从而实现反射波的线性相位梯度, 对入射声波进行操纵。

3.3. 微穿孔板在主动吸声中的使用

不只是被动吸声, 近年来使用 PVDF (聚偏氟乙烯)等电力性能良好的材料所制成的微穿孔主动吸声体受到了各地学者的追捧以及研究。段秀华[41] [42]的思路是利用 PVDF 压电薄膜的逆压电特性, 在 PVDF 薄膜上穿以一定微孔, 通过外接一定电压而使得薄膜材料自身发生形变, 导致穿孔孔径发生变化。同时针对 PVDF 薄膜受到声压激励带来的薄膜振动能量, 外加并联协调电路对其进行消耗。整个结构就可以通过麦克风采集到的噪声信号, 调节穿孔率大小使吸声系数随入射频率的变化达到实时最优。

安君[43]则通过给空腔后壁设置可往复运动的曲柄连杆结构, 并通过外接的自适应算法达到系统在 390 Hz~800 Hz 的自适应降噪, 但是由于外接曲柄连杆结构驱动器体积相对较大, 对于工业实用来说, 还需要进一步设计研制出体积更小, 鲁棒性更高的驱动控制系统。

由于微穿孔板吸声体吸声性能的主动控制来源于对结构参数的实时调节, 就涉及到对于使用材料的物理性能的高要求以及实时反馈技术的应用, 对于主动吸声的研究既是热门, 也是难点。

4. 蜂窝 - 微穿孔板复合结构

由于上述蜂窝结构以及微穿孔分别在隔声和吸声方面的优点, 所以将其结合以达到更广泛的应用是势在必行的。Christina Naify [44]研究过在蜂窝内部分别添加一层以及两层“声网帽”, 以及改变“声网帽”在蜂窝内的安装位置, 来起到增强蜂窝板隔吸声性能的作用。刘海[45]也讨论验证了蜂窝微穿孔的隔吸声复合结构在降噪方面的优良能力。

与微穿孔板的研究相似, 在蜂窝芯内添加的微穿孔板不仅仅局限于使用刚性材料, Akira Sanada [46]在腔体中间添加一个柔性板, 并将上表面穿孔的蜂窝夹层板结构的单芯看作为一个 Helmholtz 共振腔进行理论推导, 并针对影响结构吸声的参数: 柔性板的厚度、柔性板在共振腔中的位置等进行了理论的推导、数值计算以及实验的验证, 提出了扩大 Helmholtz 共振腔有效吸声频率范围的实用方法。此外, 还在后腔中安装吸声材料以增强其吸声效果。但是在后腔内额外加装的吸声材料无疑增加了较大的结构重量, 这和结构能带来的吸声性能的增加并不成比例, 不能满足对于蜂窝板这种轻质材料的使用的初衷。

张丰辉[47]提出了一种兼顾力学承载与吸声降噪的微穿孔蜂窝-波纹的复合结构, 在蜂窝中添加波浪形的挡板, 以及在单芯处各穿一个孔形成微穿孔蜂窝的结构, 将被波纹板分隔开的蜂窝芯内空间等效为一定尺寸的规则深度的空腔进行理论推导并仿真得到结构的吸声系数。由于波纹微穿孔板的添加能改善与空气的声阻抗的匹配情况, 使蜂窝板结构的中低频吸声性能大大增加。

Meng H. [48]则着眼于不同芯格形状的蜂窝结构, 对比了相同穿孔情况下的正三角形、正四边形以及正六边形蜂窝芯的蜂窝-微穿孔板复合结构的传声损失和吸声系数, 为不同蜂窝芯形状的选取使用提供了研究基础。

5. 结论

对于蜂窝 - 微穿孔板复合结构来说, 前人已经解决了如何对结构进行理论建模的问题, 不管是使用声电类比的方法, 亦或是使用传递矩阵、时域有限差分法, 对于理想状态下的蜂窝 - 微穿孔板复合结构的数值计算已经有着相当的精确性。而伴随着现代计算机技术的发展和推广, 对于基于有限元以及边界元法的仿真软件的应用, 也使得对于复杂环境中复杂问题的科学研究更加的方便快捷。而针对蜂窝 - 微穿孔板复合结构这样一种拥有较好的吸隔声能力和较轻的结构重量的新型结构, 对于其的优化使用, 有

以下几点建议和畅想:

1) 更加轻质化。轻质化是蜂窝夹层结构被提出的初衷,也是工程应用的必然需要。而针对蜂窝夹层结构的优化,不仅仅应该从现有结构的优化上下功夫,也应该将目光放在新结构、新材料的拓宽上,不能拘泥于现有工业生产所能达到的量产化范围。

2) 环境适应性。现有的蜂窝-微穿孔板结构大多有着固定的吸隔声频率范围,而已有的对于具有环境适应性的蜂窝-微穿孔板结构的讨论又有着比较严格的实验室条件,并不能达到工程实际应用的要求。如何在更宽的吸隔声频率范围内设计几种可以实现量产和应用的产品,是当下研究人员需要着重讨论的一个话题。

笔者在研究了现有资料的基础上,对于蜂窝夹层板结构、微穿孔板结构以及蜂窝-微穿孔板复合结构的发展概况进行了相关分析和讨论,并对未来蜂窝-微穿孔板复合结构的研究提出了建议和畅想,为该结构的吸隔声一体化以及自适应性能的研究做好相关铺垫。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51965041)。

参考文献

- [1] 王正忠. 轻质蜂窝夹层结构复合隔声材料[J]. 噪声与振动控制, 1993(3): 23-25.
- [2] 郑百哲. 蜂窝包装材料及其构件[J]. 包装世界, 1994(1): 36-77.
- [3] 孙义坤. 阻燃蜂窝板原纸的研制[C]//中国造纸学会. 中国造纸学会第八届学术年会论文集(下). 中国造纸学会: 中国造纸学会, 1997: 7.
- [4] 伊藤泰永, 蔡千华, 姚懋许. 铝合金钎焊蜂窝板及其应用[J]. 国外机车车辆工艺, 2000(5): 21-25.
- [5] 贾光辉, 黄海. 蜂窝夹层板超高速撞击 SPH 仿真初探[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(4): 145-147.
- [6] 刘群利, 韩兰, 关世伟. 胶粘剂在蜂窝板局部变形中作用的模拟研究[J]. 材料科学与工艺, 1999, 7(3): 89-92+96.
- [7] 程改霞, 郑晓亚, 张铎, 姜晋庆. 蜂窝夹层结构等效板力学特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(5): 568-570+573.
- [8] 樊卓志, 孙勇, 段永华, 郭中正, 饶帅. 金属蜂窝板参数对其传热性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(8): 147-151.
- [9] 赵丽, 童国权, 王琦, 陈峰. 高温合金蜂窝板弯曲性能[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(3): 148-152.
- [10] 李志宽. 密排圆形蜂窝夹层结构的隔吸声设计研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [11] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975(1): 38-50.
- [12] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 116-157.
- [13] Rayleigh, L. (1929) The Theory of Sound. MacMillan, London.
- [14] Crandall, I.B. (1926) Theory of Vibrating System and Sound. Van Norstrand, New York.
- [15] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 22(5): 385-393.
- [16] 马大猷. 微穿孔板的实际极限[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 481-484.
- [17] 卞仁寰. 微穿孔板在电动机消声器上的应用[J]. 化工环保, 1982(6): 43-44.
- [18] 王英斌. 潜艇住室吸隔声结构研究[J]. 舰船科学技术, 1992(2): 21-25+33.
- [19] 王占学, 乔渭阳, 李文兰. 微穿孔板消声器在 MA60 飞机 APU 排气管的应用[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 331-335.
- [20] 张立强, 侯宏, 杨建华, 余虎, 刘训谦. 微穿孔导流罩用于油烟机的噪声控制[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1021-1024.
- [21] 樊超, 聂京凯, 肖伟民, 陈新, 韩钰, 耿慧君. 变电站降噪用吸声材料的研究[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 144-147.
- [22] 陈晓筱. 微穿孔吸声板在道路交通中的应用[J]. 电子测试, 2016(17): 170+168.

- [23] 赵晓丹, 赵燕燕. 微穿孔板传递矩阵计算方法的改进及实验[J]. 声学技术, 2009, 28(2): 164-166.
- [24] Toyoda, M. and Eto, D. (2019) Prediction of Microperforated Panel Absorbers Using the Finite-Difference Time-Domain Method. *Wave Motion*, **86**, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2019.01.006>
- [25] 张晓杰. 多层微穿孔板的优化设计及应用[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- [26] Bucciarelli, F., Malfense Fierro, G.P. and Meo, M. (2019) A Multilayer Microperforated Panel Prototype for Broad-band Sound Absorption at Low Frequencies. *Applied Acoustics*, **146**, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.014>
- [27] 钱玉洁. 宽频带单层微穿孔板吸声体的研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [28] Mosa, A.I., Putra, A., Ramlan, R., Prasetyo, I. and Esraa, A.-A. (2019) Theoretical Model of Absorption Coefficient of an Inhomogeneous MPP Absorber with Multi-Cavity Depths. *Applied Acoustics*, **146**, 409-419. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.002>
- [29] Kim, H.-S., Ma, P.-S., Kim, S.-R., Lee, S.-H. and Seo, Y.-H. (2018) A Model for the Sound Absorption Coefficient of Multi-Layered Elastic Micro-Perforated Plates. *Journal of Sound and Vibration*, **430**, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.05.036>
- [30] Teresa, B., Cédric, M. and Cédric, P. (2013) Enhancing Sound Absorption and Transmission through Flexible Multi-Layer Micro-Perforated Structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **134**, 3663-3673. <https://doi.org/10.1121/1.4821215>
- [31] 吕亚东. 一种新型吸声结构——柔性管束穿孔板共振吸声结构[C]/中国声学学会. 中国声学学会 2002 年全国声学学术会议论文集. 2002: 3.
- [32] Li, D.K., Chang, D.Q. and Liu, B.L. (2016) Enhancing the Low Frequency Sound Absorption of a Perforated Panel by Parallel-Arranged Extended Tubes. *Applied Acoustics*, **102**, 126-132. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.10.001>
- [33] Auriemma, F. (2017) Acoustic Performance of Micro-Grooved Elements. *Applied Acoustics*, **122**, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.02.019>
- [34] Ren, S.W., Van Belle, L., Claeys, C., Xin, F.X., Lu, T.J., Deckers, E. and Desmet, W. (2019) Improvement of the Sound Absorption of Flexible Micro-Perforated Panels by Local Resonances. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **117**, 138-156. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.07.046>
- [35] Zhao, X.-D., Wang, X. and Yu, Y.-J. (2018) Enhancing Low-Frequency Sound Absorption of Micro-Perforated Panel Absorbers by Combining Parallel Mechanical Impedance. *Applied Acoustics*, **130**, 300-304. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.10.001>
- [36] Liu, Z.Q., Zhan, J.X., Fard, M. and Davy, J.L. (2017) Acoustic Properties of Multilayer Sound Absorbers with a 3D Printed Micro-Perforated Panel. *Applied Acoustics*, **121**, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.032>
- [37] 孟晗, 辛锋先, 卢天健. 多孔纤维吸声材料填充蜂窝结构的声学性能[J]. 中国科学: 物理学·力学·天文学, 2014, 44(6): 599-609.
- [38] Lu, T.J., Hess, A. and Ashby, M.F. (1999) Sound Absorption in Metallic Foams. *Journal of Applied Physics*, **85**, 7528-7539. <https://doi.org/10.1063/1.370550>
- [39] Yang, Y., Li, B.B., Chen, Z.F., et al. (2016) Acoustic Properties of Glass Fiber Assembly-Filled Honeycomb Sandwich Panels. *Composites Part B Engineering*, **96**, 281-286. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.046>
- [40] Fang, Y., Zhang, X. and Zhou, J. (2018) Acoustic Porous Metasurface for Excellent Sound Absorption Based on Wave Manipulation. *Journal of Sound and Vibration*, **434**, 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.003>
- [41] 段秀华, 王焕钦, 钱玉洁, 孔德义. PVDF 压电薄膜新型微穿孔板主动吸声方法的仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 24-27.
- [42] Duan, X.H., Wang, H.Q., Li, Z.B., Zhu, L.K., Chen, R., Kong, D.Y. and Zhao, Z. (2015) Sound Absorption of a Flexible Micro-Perforated Panel Absorber Based on PVDF Piezoelectric Film. *Applied Acoustics*, **88**, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.08.009>
- [43] 安君, 吕海峰, 陈鹏, 袁晓红. 亥姆霍兹消声器自适应控制方法研究[J]. 声学技术, 2019, 38(2): 188-193.
- [44] Naify, C., Sneddon, M. and Nutt, S. (2009) Noise Reduction of Honeycomb Sandwich Panels with Acoustic Mesh Caps. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, **8**, 065002. <https://doi.org/10.1121/1.3274775>
- [45] 刘海. 隔吸声复合式蜂窝夹层板结构的设计与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [46] Sanada, A. and Tanaka, N. (2013) Extension of the Frequency Range of Resonant Sound Absorbers Using Two-Degree-of-Freedom Helmholtz-Based Resonators with a Flexible Panel. *Applied Acoustics*, **74**, 509-516. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.09.012>

- [47] 张丰辉, 唐宇帆, 辛锋先, 卢天健. 微穿孔蜂窝-波纹复合声学超材料吸声行为[J]. 物理学报, 2018, 67(23): 120-130.
- [48] Meng, H., Galland, M.A., Ichchou, M., Xin, F.X. and Lu, T.J. (2019) On the Low Frequency Acoustic Properties of Novel Multifunctional Honeycomb Sandwich Panels with Micro-Perforated Faceplates. *Applied Acoustics*, **152**, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.028>