

蜂窝夹层声衬材料宽频吸声性能优化

罗靛 白鹤宇 叶卓然 顾轶卓

Optimization of broadband sound absorption performance of honeycomb sandwich sound liner

LUO Liang, BAI Heyu, YE Zhuoran, GU Yizhuo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230817.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载蜂窝夹层结构固面天线反射器的热变形

Thermal distortion for honeycomb sandwich construction rigid reflector of satellite antenna

复合材料学报. 2018, 35(8): 2065–2073 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171020.001>

磁性聚氨酯泡沫的微观形貌及低频吸声性能

Micro topography and low frequency sound absorption performance of magnetic polyurethane foam

复合材料学报. 2018, 35(1): 24–29 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170417.003>

柔性吸声隔音降噪纺织复合材料

Sound-absorbing and sound insulation soft composite materials of textile for noise reduction

复合材料学报. 2018, 35(8): 1983–1993 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180410.002>

基于多尺度方法的蜂窝夹层复合材料结构轴向压缩稳定性

Stability of honeycomb sandwich composite structure under axial compression based on multi-scale method

复合材料学报. 2020, 37(3): 601–608 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190918.001>

结构参数对CFRP蒙皮-铝蜂窝夹层板低速冲击性能的影响

Effect of structural parameters on the low-velocity impact performance of aluminum honeycomb sandwich plate with CFRP face sheets

复合材料学报. 2020, 37(6): 1352–1363 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190815.001>

Nomex蜂窝夹层结构弯曲刚度温度相关性的力学建模

Mechanical modeling on the bending stiffness temperature dependence of Nomex honeycomb sandwich structure

复合材料学报. 2020, 37(2): 376–381 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190328.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

蜂窝夹层声衬材料宽频吸声性能优化

罗靚^{*1,2}, 白鹤宇¹, 叶卓然², 顾轶卓³

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京北航天宇长鹰无人机科技有限公司, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院, 北京 100191)



分享本文

摘要: 针对目前大涵道比涡扇发动机宽频随机的噪声特点, 对传统单自由度蜂窝夹层声衬材料进行了结构优化, 提升其吸声性能。在保持声衬单自由度蜂窝夹层结构基本形式不变的前提下, 为拓宽吸声频谱、达到两个甚至两个以上的特征频率, 在单层蜂窝芯内部特定位置复合碳纳米管薄膜, 同时为了提高吸声效果, 通过快捷的工艺组装, 在多孔板和蜂窝芯之间引入金属丝网和柔性多孔材料, 并探究了引入材料的放置位置和参数对于声衬材料吸声性能的影响。实验结果显示, 孔径 37 μm 的金属丝网置于多孔面板后、15 mm 厚的三聚氰胺海绵放置在多孔面板和蜂窝之间、开孔率为 2% 和 4% 的碳纳米管薄膜放置在蜂窝夹层结构内近中间位置的吸声性能最好。基于该结果制备的声衬吸声性能优异, 在 800 Hz 到 4 500 Hz 范围内表现出良好的吸声性能, 两个特征频率的峰值吸声系数分别达到 0.98 和 0.99, 平均吸声系数达到 0.89, 相比优化前提升 61.8%, 同时半峰宽度能够完全覆盖测试的 800 Hz 到 4 500 Hz 频率范围, 具有良好的宽频降噪特性。

关键词: 蜂窝夹层结构; 吸声材料; 声衬; 吸声系数; 发动机噪声

中图分类号: TB34; TB333; V231.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)03-1290-10

Optimization of broadband sound absorption performance of honeycomb sandwich sound liner

LUO Liang^{*1,2}, BAI Heyu¹, YE Zhuoran², GU Yizhuo³

(1. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beihang Changying UAS Technology CO., LTD., Beijing 100191, China; 3. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In view of the wide frequency noise characteristics of turbofan engine with large bypass ratio at present, traditional single-degree-of-freedom honeycomb sandwich acoustic lining material was optimized to improve its sound absorption performance. Under the premise of keeping the basic form of single-degree-of-freedom honeycomb structure of sound liner unchanged, in order to broaden the sound absorption spectrum and reach two or more characteristic frequencies, carbon nanotube film was compounded at a specific position inside the single-layer honeycomb core. At the same time, in order to improve the sound absorption effect, metal wire mesh and flexible porous materials were introduced between perforated plate and honeycomb core, and they were assembled through a rapid process. The influences of placement position and parameters of the introduced material on the sound absorption performance of the sound absorption composite were also investigated. The experimental results show that the structure with the best sound absorption performance is the introduction of 37 μm hole diameter wire mesh placed behind the porous panel, the placement of 15 mm thick melamine sponge between the porous panel and the honeycomb, and the placement of carbon nanotube film with a porosity of 2% and 4% in the middle of the

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-07-13; 录用日期: 2023-08-09; 网络首发时间: 2023-08-18 10:56:22

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230817.005>

基金项目: 基础加强计划技术领域基金项目 (2019-JCJQ-JJ-255)

Foundation Strengthening Plan Technology Field Fund Project (2019-JCJQ-JJ-255)

通信作者: 罗靚, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为航空航天领域材料 E-mail: luoliang@buaa.edu.cn

引用格式: 罗靚, 白鹤宇, 叶卓然, 等. 蜂窝夹层声衬材料宽频吸声性能优化 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1290-1299.

LUO Liang, BAI Heyu, YE Zhuoran, et al. Optimization of broadband sound absorption performance of honeycomb sandwich sound liner[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1290-1299(in Chinese).

honeycomb sandwich structure. The sound liner prepared based on this result has excellent sound absorption performance, and shows good sound absorption performance in the range of 800 Hz to 4 500 Hz. The peak sound absorption coefficients of the two characteristic frequencies reach 0.98 and 0.99, respectively, and the average sound absorption coefficient reaches 0.89, which is 61.8% higher than that before optimization. At the same time, the half-peak width can fully cover the frequency range of 800 Hz to 4 500 Hz tested, which indicates good broadband noise reduction characteristics.

Keywords: honeycomb sandwich structure; sound absorption material; acoustic backing; acoustic absorptivity; engine noise

安全性、经济性、舒适性和环保性是民用飞机的 4 大基本属性^[1-2], 飞机飞行时的噪音问题是影响舒适性和环保性的重要因素之一, 引起众多研究者的广泛关注。此外, 随着军事技术的发展, 航空运输工具的要求也在不断提高, 军用飞机的噪声辐射会影响到飞机的隐身和结构声疲劳等重要性能^[3], 在日常训练中也易对地面生活区造成噪声污染, 因此对军用飞机的降噪也是亟待解决的问题。

发动机是飞机飞行过程中噪声的主要来源^[4-6], 当前大型民用飞机和各类军用机中应用最广的发动机为大涵道比涡扇发动机^[7-10], 具备推动力大、重量轻、耗油量低和噪声低等优势^[11-13]。与早期的涡轮喷气发动机和低涵道比涡扇发动机相比, 大涵道比涡扇发动机的喷流噪声大大降低, 涡轮噪声及风扇噪声的比重较大^[14-15], 存在发动机内部周期性旋转的叶轮机和气流周期性干涉产生的单频噪声、发动机内部气流的强烈湍流脉动引起的随机宽频噪声^[3]。涡轮噪声是大涵道比涡扇发动机最主要的噪声源, 噪声频率主要分布在 2 500 Hz 以上的高频范围^[16], 与涡轮转速成正比, 具备频段范围宽、分布随机的特性。大涵道比涡扇发动机的另一主要噪声源为风扇噪声, 分布在 1 000 Hz 以下的频段范围, 属于低频噪声。

根据降噪方式的不同, 航空发动机降噪技术可以分为两类: 声源控制和传播途径控制。声源控制是指在源头处控制噪声的产生, 通过对发动机结构的设计来减小气动噪声源的强度; 传播途径控制是指在噪声的传播过程中, 通过在短舱进气道、风扇进口机匣、外涵通道以及尾喷管处与气流接触的表面装设夹芯结构的吸声衬套, 即声衬, 将吸收的声波振动转化为热能, 以降低噪声^[17-18]。目前主流的航空发动机声衬为以蜂窝夹层结构为吸声主体的复合材料。

传统的单自由度蜂窝夹层声衬材料为多孔板-蜂窝芯-刚性背板, 这种声衬结构和制备工艺简单, 但存在吸声频率范围较窄的不足^[19], 无法适应大

涵道比涡扇发动机噪声随机性强、宽频的特性。若要拓宽噪声吸收带宽, 则需要加大蜂窝芯的厚度, 会导致声衬的厚度和体积大大提高。为此, 国内外有研究将两层蜂窝芯通过中间的一层微穿孔板复合在一起, 形成多孔板-蜂窝芯-微穿孔板-蜂窝芯-刚性背板的双自由度夹层结构, 在不过分加大声衬厚度的前提下尽可能拓宽噪声吸收带宽^[20-23]。同样的声源测试条件下, 与单自由度声衬相比, 双自由度吸声系数在 0.8 以上的频率宽度提升约 50%, 但峰值吸声系数有所下降^[24]。此外, 双自由度声衬目前尚不成熟, 国内应用较少, 且存在增加结构复杂性和工艺难度的不足。

本文在保持声衬单自由度蜂窝结构基本形式不变的前提下, 为拓宽吸声带宽、达到两个甚至两个以上的特征频率, 同时提高峰值吸声系数, 选择了具备高阻尼和声激发弹性性能的柔性聚合物(芳纶纸蜂窝)作为蜂窝芯^[25], 设计了一种仿多自由度蜂窝夹层声衬材料, 在多孔板-芳纶纸蜂窝芯-刚性背板的单自由度蜂窝夹层声衬材料中引入金属丝网、碳纳米管薄膜及柔性多孔材料^[26], 通过快捷的工艺组装。考虑实际试验测试条件和大涵道比涡扇发动机的低转速涡轮噪声为主、风扇噪声并存的特点, 为覆盖低频和高频噪声, 选取了 800 Hz 到 4 500 Hz 频率范围的噪声源进行测试。研究了金属丝网孔径、碳纳米管薄膜的开孔率、柔性多孔材料的种类和厚度以及 3 种材料的放置位置对吸声性能的影响, 并基于实验结果对蜂窝夹层声衬材料进行性能优化, 制备在宽频范围内有较高吸声系数的声衬材料。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

Nomex 蜂窝由北京航空材料研究院提供, 型号 NH-1-55-48; 碳纤维织物预浸料由江苏恒神股份有限公司提供; 碳纳米管薄膜由苏州捷迪纳米科技有限公司提供, 厚度 0.01 mm; 碳纳米管海

绵由苏州捷迪纳米科技有限公司提供；三聚氰胺海绵由上海优倍建材提供；聚酯海绵由中城建筑材料科技(广州)有限公司提供；聚氨酯海绵由深圳亚鹰科技提供，容重分别为 25 kg/m³ 和 55 kg/m³ (分别标记为 #25 和 #55)；聚甲基丙烯酰亚胺 (Polymethacrylimide, PMI) 泡沫由中航复合材料公司提供，型号 ACCPMI71；金属丝网的孔径分别为 74 μm、37 μm 和 20 μm；E51 环氧树脂及固化剂由南通星辰合成材料有限公司提供；带胶聚四氟乙烯布、无孔隔离膜、真空袋、聚四氟乙烯布等由美国 Airtech 公司提供。

1.2 蜂窝夹层声衬材料的制备及性能优化

在图 1(a) 所示的模具上充分涂抹脱模剂，在热风枪的辅助下将浸润树脂的碳纤维织物预浸料软化，随后直接在铺层上放置裁剪好的蜂窝芯，在蜂窝芯上放置成型夹层结构的背板，之后铺上四氟布、无孔隔离膜、透气毡等辅助材料，附上

均压板之后打真空袋，最后放入烘箱中进行固化，直接成型多孔面板-蜂窝芯-刚性背板的夹层结构，过程如图 1(b) 所示，蜂窝夹层材料的参数见表 1，标记为对照组。通过同样的制备流程，在对照组的

不同位置引入金属丝网、碳纳米管薄膜和柔性多孔材料，具体测试参数见表 2，并在实验中分别与对照组的结果进行对比。

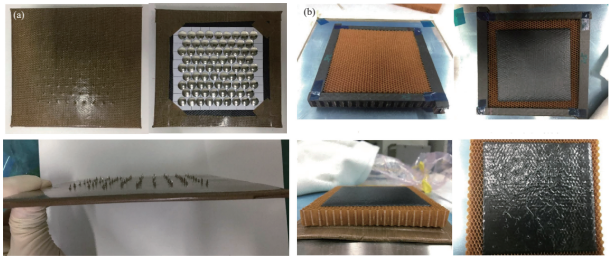


图 1 使用带孔模具和真空袋工艺直接成型的蜂窝夹层声衬

Fig. 1 Honeycomb sandwich structure composites directly formed by using a mold with holes and a vacuum bag process

表 1 蜂窝夹层声衬材料(对照组) 参数

Table 1 Parameters of honeycomb sandwich structure sound absorbing material (Control)

Thickness of perforated plate/mm	Hole diameter of perforated plate/mm	Porosity of perforated plate/%	Thickness of honeycomb core/mm	Side length of honeycomb core cell/mm
0.50	2.00	9.33	30.00	5.50

表 2 不同优化材料的参数

Table 2 Parameters for different optimized materials

Wire mesh		Carbon nanotube film		Flexible porous material		
Position	Hole diameter/μm	Depth	Porosity/%	Position	Thickness/mm	Material
In front of perforated plate	74	10	2	In front of honeycomb core	5	#25 polyurethane sponge
Behind perforated plate	37	14	3	In honeycomb core	10	#55 polyurethane sponge
	20	20	4	Behind honeycomb core	15	Melamine sponge
						Polyester cotton
						Carbon nanotube sponge
						Polymethacrylimide (PMI) foam

1.3 吸声性能测试

蜂窝夹层声衬的吸声性能实验使用传递函数法，测量阻抗管中吸声系数，阻抗管结构示意图如图 2(a) 所示，按图 2(b) 所示方式连接。实际测试时，利用标准声源 (1 000 Hz, 94 dB) 对两个传声器进行校准，保证测试数据的准确性，并测试试验台的刚壁反射系数及开口反射系数，与理论值进行对比，在误差允许范围内满足测试要求方可进行后续的测试。测试实物如图 3 所示。

2 结果与讨论

2.1 金属丝网对吸声性能的影响

美国 Goodrich oodrich 公司提出并研究了名为 DynaRohr 的声衬^[27]，它独特的结构是蜂窝夹层结构中的一层金属丝网，相比传统声衬具备更优良的吸声特性。本节改变多孔板蜂窝夹层结构中金属丝网的孔径和放置位置，通过测试优化后声衬的吸声性能，得到在传统蜂窝夹层声衬材料中引入金属丝网对吸声性能优化的影响规律。

分别选择 74 μm、37 μm 和 20 μm 这 3 种孔径

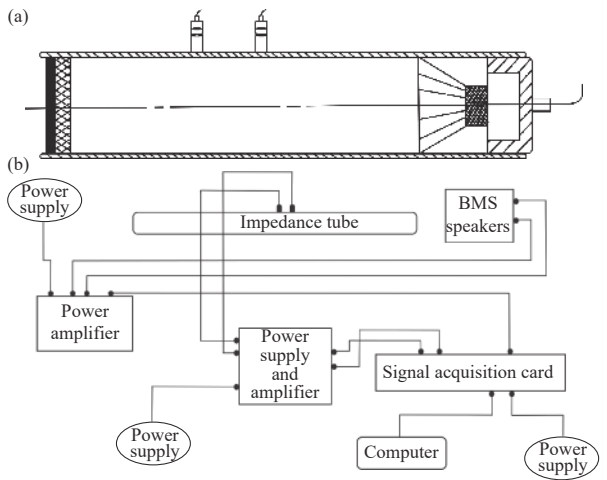


图2 阻抗管结构示意图 (a) 和测试系统设备连接图 (b)

Fig.2 Structure diagram (a) and connection diagram (b) of test system equipment of impedance tube



图3 装配测试样品及夹具的阻抗管实物图

Fig.3 Physical drawing of impedance tube for assembling test sample and fixture

的斜纹不锈钢金属丝网引入蜂窝夹层声衬材料,与未放置金属丝网的对照组的吸声性能对比如图 4(a) 和表 3 所示。可以看出,金属丝网的引入对传统单自由度蜂窝夹层结构声衬材料的吸声系数影响较为显著,吸声系数在测试频段范围内比未引入金属丝网的对照组均有明显提升。这是由于引入金属丝网的声衬具备更多可供声波摩擦损

耗的小孔,将更多的声能转换为了热能,进而增大了结构的声阻。半峰宽度、峰值吸声系数和平均吸声系数均为引入 37 μm 孔径的金属丝网的声衬材料提升最大,分别提高 15.5%、36.3% 和 32.7%。

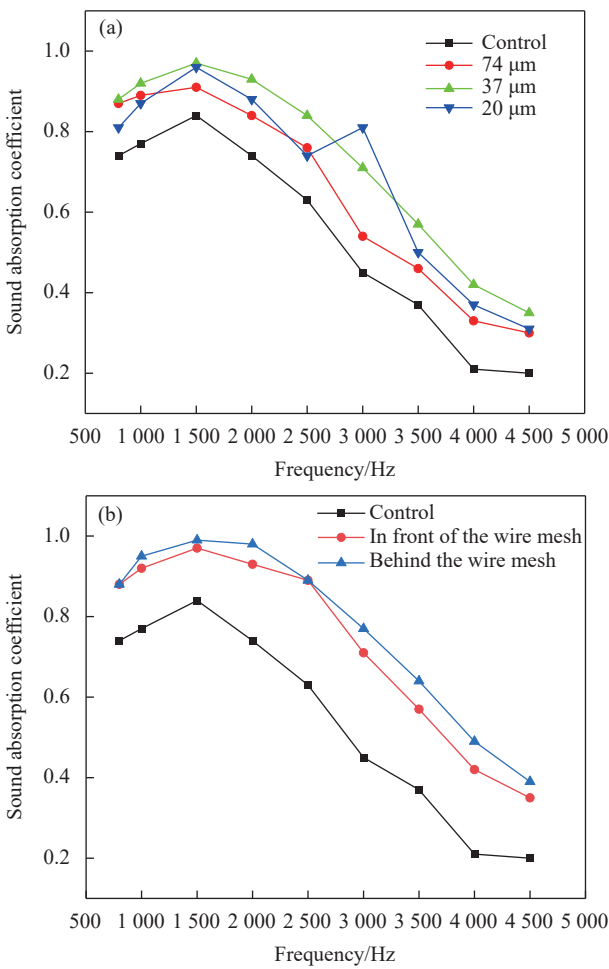


图4 引入不同孔径 (a) 和放置位置 (b) 金属丝网的蜂窝夹层声衬材料的频率-吸声系数曲线

Fig.4 Frequency-absorption coefficient curves of honeycomb sandwich sound-absorbing materials with different bore diameters (a) and placement positions (b)

表 3 金属丝网孔径对蜂窝夹层声衬材料吸声性能的影响

Table 3 Effect of hole diameter of wire mesh on sound absorption properties of honeycomb sandwich structure				
Subject	Characteristic frequency/Hz	Half peak width/Hz	Peak absorption coefficient	Average absorption coefficient
Control	1 500	2 200	0.84	0.55
74 μm	1 500	2 700	0.91	0.66
37 μm	1 500	3 000	0.97	0.73
20 μm	1 500	2 800	0.96	0.69

将吸声效果最好的 37 μm 孔径的金属丝网分别放置在蜂窝夹层声衬材料的多孔面板前、后,并与对照组的吸声系数进行对比,如图 4(b) 和

表 4 所示。与对照组相比,在多孔面板前、后分别引入 37 μm 孔径的金属丝网的声衬材料的特征频率未发生改变,半峰宽度从 2 200 Hz 分别提升至

表 4 金属丝网放置位置对蜂窝夹层声衬材料吸声性能的影响

Table 4 Effect of position of wire mesh on sound absorption performance of honeycomb sandwich structure

Subject	Characteristic frequency/Hz	Half peak width/Hz	Peak absorption coefficient	Average absorption coefficient
Control	1 500	2 200	0.84	0.55
In front of perforated plate	1 500	3 000	0.97	0.73
Behind perforated plate	1 500	3 200	0.99	0.78

3 000 Hz 和 3 200 Hz，提高 36.3% 和 45.5%；峰值吸声系数由 0.84 分别提升至 0.97 和 0.99，提高 15.5% 和 17.9%；平均吸声系数由 0.55 分别提升至 0.73 和 0.78，提高 32.7% 和 41.8%。可以看出，金属丝网的引入使声衬材料的吸声性能获得明显提升，将金属丝网放置在多孔面板后的提升效果更好。

2.2 碳纳米管薄膜对吸声性能的影响

多自由度蜂窝夹层声衬结构复杂，现代制造技术的局限性和机舱几何形状限制了其腔深度，进而限制了多自由度声衬的应用。多自由度声衬的结构特征是将单层的蜂窝芯分为两层，并在两层之间设置一层多孔透声结构，会额外增加声衬的厚度以及成型的工艺复杂性。本文将碳纳米管薄膜剪裁成与蜂窝芯内部大小相同的隔板，引入单层蜂窝芯的内部，使用热固型树脂进行粘接，模拟多自由蜂窝夹层吸声材料的结构，使更多声波被反射并留在蜂窝芯内部，通过反复摩擦转化为热能，最终达到吸声的效果，其中碳纳米管薄膜起到反射大量声波以及透过少量声波的作用。

通过改变碳纳米管薄膜的放置位置(蜂窝芯内放置深度)和开孔率测试声衬的吸声性能，得到在传统多孔板蜂窝夹层结构声衬材料中引入碳纳米管薄膜的不同方式对优化结构吸声性能的影响规律。碳纳米管薄膜在蜂窝芯内放置深度的实验共 3 组，分别为 10 mm、14 mm 和 20 mm (从迎接声波面测量)，与对照组的吸声性能对比如图 5(a) 和表 5 所示，可以看出碳纳米管薄膜放置在近中间位置(深度 14 mm)时整体吸声性能最好。将不同开孔率的碳纳米管薄膜放置在蜂窝芯深度 14 mm 的位置，与对照组的吸声性能对比见图 5(b) 和表 6，引入开孔率 2% 的碳纳米管薄膜的声衬平均吸声系数最高，但仅存在 1 500 Hz 处的单特征频率，在 3 500~4 500 Hz 的高频范围内没有明显特征峰，而引入开孔率 4% 的碳纳米管薄膜的声衬在低频的吸声性能较差，高频时吸声性能较好，存在 1 500 Hz 和 3 500 Hz 的双特征频率。

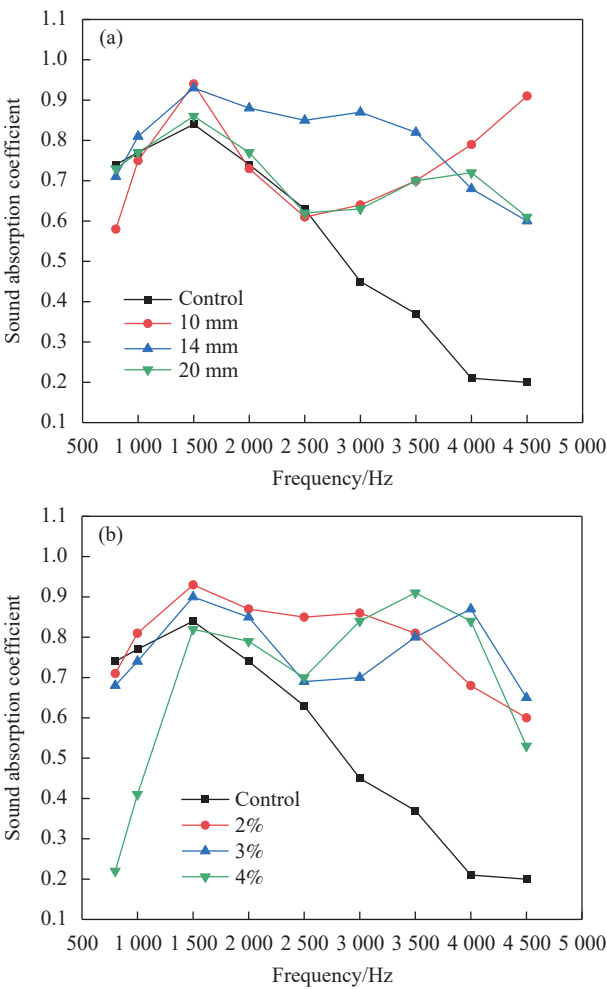


图 5 引入不同放置深度 (a) 和开孔率 (b) 碳纳米管薄膜的蜂窝夹层声衬材料的频率-吸声系数曲线

Fig. 5 Frequency-absorption coefficient curves of honeycomb sandwich sound-absorbing materials with carbon nanotube films of different placement depths (a) and porosities (b)

2.3 柔性多孔材料对吸声性能的影响

柔性多孔材料的特征是内部具有大量贯通的微孔，其吸声作用主要来自两个方面：其一是声波穿过材料时引起的空气振荡并与材料内部的孔隙筋络等发生摩擦，使空气的动能转化为热能；另一种是由于热传导作用，空气与材料间的热交换使得声能不断转化为热能。本节探究了柔性多孔材料的放置位置、厚度及种类对蜂窝夹层声衬

表 5 碳纳米管薄膜放置深度对蜂窝夹层声衬材料吸声性能的影响

Table 5 Effect of placement depth of carbon nanotube films on sound absorption properties of honeycomb sandwich structure sound absorbing materials

Subject	Characteristic frequency/Hz	Half peak width/Hz	Peak absorption coefficient	Average absorption coefficient
Control	1 500	2 200	0.84	0.55
10 mm	—	—	0.94	0.74
14 mm	1 500	>3 700	0.93	0.79
20 mm	1 500	>3 700	0.86	0.71

表 6 碳纳米管薄膜开孔率对蜂窝夹层声衬材料吸声性能的影响

Table 6 Effect of porosity of carbon nanotube films on sound absorption properties of honeycomb sandwich sound absorbing materials

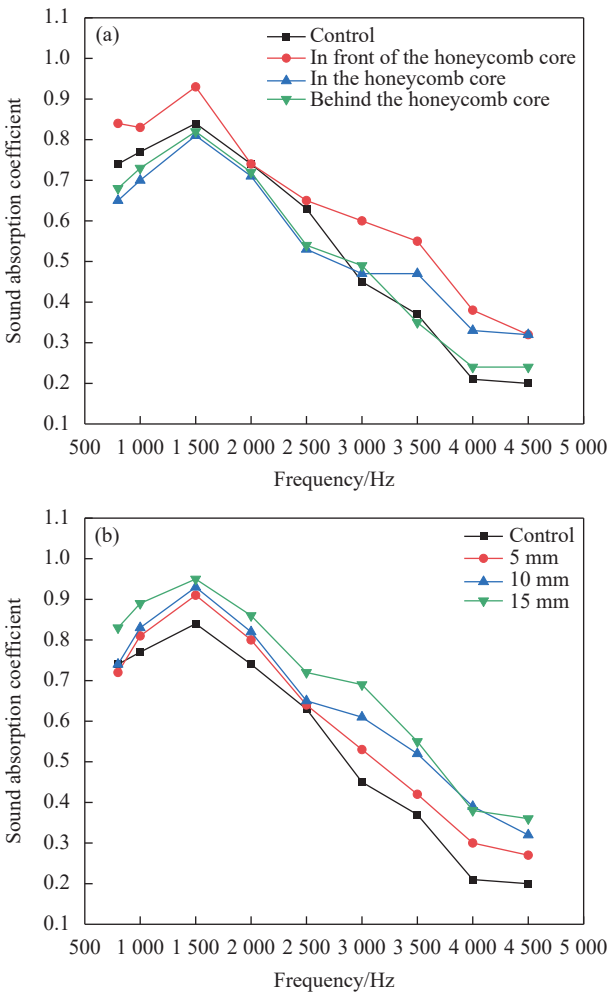
Subject	Characteristic frequency/Hz	Half peak width/Hz	Peak absorption coefficient	Average absorption coefficient
Control	1 500	2 200	0.84	0.55
2%	1 500	>3 700	0.93	0.79
3%	—	—	0.90	0.76
4%	—	—	0.91	0.67

材料吸声性能的影响规律。

本文以#25 聚氨酯海绵为例,研究了柔性多孔材料放置在蜂窝芯前(即多孔面板与蜂窝芯之间)、蜂窝芯内部及蜂窝芯后(蜂窝芯与刚性背板之间)对声衬吸声性能的影响,3 种不同放置位置与对照组的吸声性能对比见图 6(a) 和表 7。可以看出, #25 聚氨酯海绵的放置位置对蜂窝夹层声衬材料的特征频率没有影响,均为 1 500 Hz。对于峰值吸声系数、平均吸声系数及半峰宽度,仅将#25 聚氨酯海绵放置在蜂窝芯前的实验组数据均有提高,另外两种放置位置对吸声性能的提升不明显,甚至还会产生负影响,仅在高频时才表现出引入柔性多孔材料的优越性。

基于上述结果,将#25 聚氨酯海绵置于蜂窝芯前,改变其厚度,测试对吸声性能的影响。图 6(b) 和表 8 可以看出,随着#25 聚氨酯海绵厚度的增加,蜂窝夹层声衬材料的特征吸声频率不发生改变,整体吸声性能同步提升。因此,将引入的柔性多孔材料厚度固定为 15 mm,放置于蜂窝芯前,选择#25 聚氨酯海绵、#55 聚氨酯海绵、三聚氰胺海绵、聚酯纤维棉、碳纳米管海绵和 PMI 泡沫等多种材料进行实验,与对照组的吸声性能对比见图 6(c) 和表 9。除碳纳米管海绵及 PMI 泡沫外,其他柔性多孔材料的引入都会提高蜂窝夹层声衬材料的吸声性能,这是由于多孔吸声材料的吸声机制需要使声波进入材料内部,在贯通的孔隙中反复传播,在与空气及材料本身的孔壁摩擦的过程中不断将声能转化为热能。虽然碳纳米管海绵密度很低,内部有很多相互贯通的微孔,但是这

种材料的表层却十分致密,声波遇到碳纳米管海绵表面主要以反射为主,无法通过内部的贯通孔使声能转化为热能; PMI 泡沫内部则绝大部分都是闭孔,声波无法顺利进入、传播,因此引入这



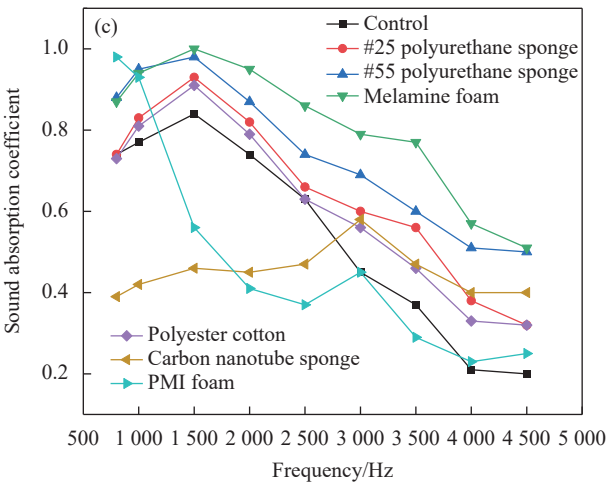


图6 引入不同放置位置(a)、厚度(b)和材料(c)的柔性多孔材料的蜂窝夹层声衬材料的频率-吸声系数曲线

Fig. 6 Frequency-absorption coefficient curves of honeycomb sandwich sound-absorbing materials with flexible porous materials with different placement positions (a), thicknesses (b) and materials (c)

两种柔性多孔材料无法达到良好的吸声效果。

除上述两种材料，其余柔性多孔材料内部均有较多相互贯通的开放孔隙，因此具备良好的吸

声性能。三聚氰胺海绵的孔隙率高，内表面积大，因此吸声效果最好，引入三聚氰胺海绵的蜂窝夹层声衬材料的峰值吸声系数达到了近1.0，平均吸声系数达到0.81，半峰宽度超过3 700 Hz(超出实验测试频率范围)，相比空白对照组分别提高了19.0%、68.2%、47.3%。

2.4 优化的蜂窝夹层声衬复合材料

上述实验结果可知，金属丝网及柔性多孔材料在多孔面板之后放置可以有效提高蜂窝夹层声衬材料的吸声性能，在不改变特征频率的基础上提高声衬的吸声系数，拓宽吸声带宽，在本文研究范围内，37 μm孔径的金属丝网和三聚氰胺海绵的效果最好。碳纳米管薄膜的引入可以有效拓宽声衬的吸声带宽，并获得与双自由度声衬相似的双特征频率，与结构和制备工艺较为复杂的双自由度声衬相比，在单自由度声衬的蜂窝芯内部引入碳纳米管薄膜可以减轻整体结构的复杂度和重量。2%和4%开孔率的碳纳米管薄膜对于蜂窝夹层声衬的吸声性能优化各有优劣，因此选择在间隔的蜂窝芯中依次设置两种不同开孔率的碳纳

表7 #25 聚氨酯海绵放置位置对蜂窝夹层声衬材料吸声性能的影响

Table 7 Influence of #25 polyurethane sponge placement on sound absorption performance of honeycomb sandwich structuree				
Subject	Characteristic frequency/Hz	Half peak width/Hz	Peak absorption coefficient	Average absorption coefficient
Control	1 500	2 200	0.84	0.55
In front of honeycomb core	1 500	3 000	0.93	0.65
In honeycomb core	1 500	2 800	0.81	0.55
Behind honeycomb core	1 500	2 500	0.82	0.53

表8 #25 聚氨酯海绵厚度对蜂窝夹层声衬材料吸声性能的影响

Table 8 Influence of thickness of #25 polyurethane sponge on sound absorption properties of honeycomb sandwich structure				
Subject	Characteristic frequency/Hz	Half peak width/Hz	Peak absorption coefficient	Average absorption coefficient
Control	1 500	2 200	0.84	0.55
5 mm	1 500	2 600	0.91	0.60
10 mm	1 500	3 000	0.93	0.65
15 mm	1 500	2 900	0.95	0.69

表9 柔性多孔材料类型对蜂窝夹层声衬材料吸声性能的影响

Table 9 Effect of type of flexible porous materials on sound absorption properties of honeycomb sandwich structure sound absorption material				
Subject	Characteristic frequency/Hz	Half peak width/Hz	Peak absorption coefficient	Average absorption coefficient
Control	1 500	2 200	0.84	0.55
#25 polyurethane sponge	1 500	3 000	0.93	0.65
#55 polyurethane sponge	1 500	3 200	0.98	0.75
Melamine foam	1 500	>3 700	1.00	0.81
Polyester cotton	1 500	2 700	0.91	0.62
Carbon nanotube sponge	—	—	0.57	0.45
PMI foam	—	—	0.98	0.50

米管薄膜,总数量各半。

基于此,优化的蜂窝夹层声衬材料结构和参数如图7和表10所示。优化后的声衬具备较高的吸声性能,与优化前的对照组相比见图8,特征频率变为两个,峰值吸声系数由0.84提高到0.98和0.99,最高提升17.9%;半峰宽度超过3 700 Hz,提升超过68%;平均吸声系数由0.55提高到0.89,提升61.8%;满足宽频降噪结构的频率特点。

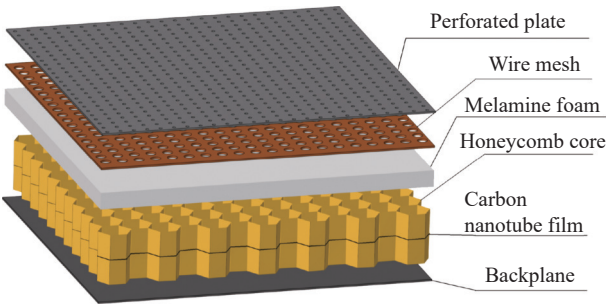


图7 优化的蜂窝夹层声衬复合材料
Fig. 7 Optimized honeycomb sandwich structure sound absorbing composites

表10 优化的蜂窝夹层声衬复合材料结构参数

Table 10 Structural parameters of optimized honeycomb sandwich structure sound absorbing composites

Material	Structural parameters	Specifications
Perforated plate	Thickness	0.5 mm
	Porosity	9.33%
Wire mesh	Hole diameter	37 μm
Melamine foam	Thickness	15 mm
Honeycomb core	Thickness	30 mm
Carbon nanotube film	Thickness	0.01 mm
	Porosity	2%/4%
	Depth	14 mm
Backplane	Thickness	1 mm

3 结论

(1)金属网管的引入可以有效提高蜂窝夹层声衬材料的吸声性能,在本文研究范围内,37 μm 孔径的金属丝网放置在多孔面板后对于吸声性能的增强效果最好。

(2)碳纳米管薄膜复合在蜂窝芯内可以有效提高吸声材料的吸声频率宽度,并得到类似双自由度蜂窝夹层声衬材料的双特征频率,碳纳米管薄膜复合在蜂窝芯厚度方向近中的位置时吸声性能提升最明显,开孔率2%时吸声系数均值最高,开孔率4%时低频吸声性能较差,但高频吸声性能较好,同时存在1 500 Hz和3 500 Hz两个特征

频率。

(3)柔性多孔材料放置在中孔面板和蜂窝芯之间可以有效提高蜂窝夹层声衬材料的吸声性能,厚度越大提升效果越明显,在本文研究范围内,引入三聚氰胺海绵对声衬材料在宽频范围内的吸声性能整体提升效果最好。

(4)基于实验结果,在传统单自由度多孔板-蜂窝芯-刚性背板的内部引入金属丝网、三聚氰胺海绵和碳纳米管薄膜,组装成型方法简单。优化后的声衬在800 Hz到4 500 Hz范围内表现出良好的吸声性能,两个特征频率的峰值吸声系数分别达到0.98和0.99,平均吸声系数达到0.89,相比优化前提升61.8%,同时半峰宽度能够完全覆盖测试的800 Hz到4 500 Hz频率范围,具备良好的宽频降噪特性。

(5)采用本文研究成果,可按照实际需要调整蜂窝夹层声衬的结构参数,配合适当验证,设计具备特定吸声性能的声衬材料。

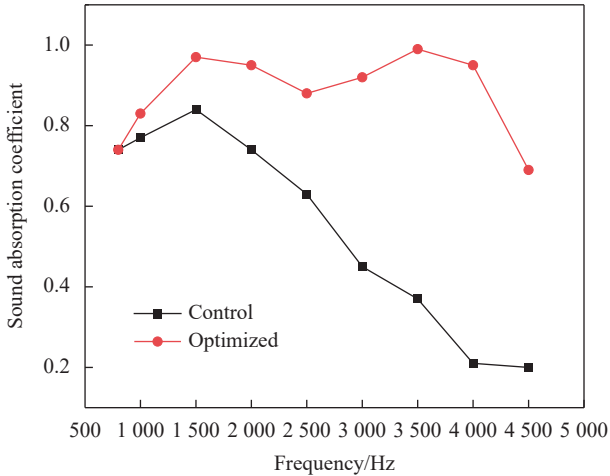


图8 优化前后的蜂窝夹层声衬材料的频率-吸声系数曲线对比
Fig. 8 Comparison of frequency-absorbing coefficient curves of honeycomb sandwich sound liner materials before and after optimization

参考文献:

[1] 宋笔锋,张彬乾,韩忠华.大型客机总体设计准则与概念创新[J].航空学报,2008(3):583-595.
SONG Bifeng, ZHANG Binqian, HAN Zhonghua. The study of concept design criteria for large-scale passenger aircraft with new technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008(3): 583-595(in Chinese).

[2] 赵鲲,梁俊彪, BELYAEV Ivan,等.民用飞机起落架噪声及其控制技术研究进展综述[J].航空学报,2022(8):137-173.
ZHAO Kun, LIANG Junbiao, BELYAEV Ivan, et al. Review of

- civil airplane landing gear noise study and its control approaches[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022(8): 137-173(in Chinese).
- [3] 乔渭阳. 航空发动机气动声学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010, 10-20.
- QIAO Weiyang. Aeroengine aeroacoustics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010, 10-20(in Chinese).
- [4] 乔渭阳, 王良锋, 段文华, 等. 航空发动机气动声学设计的理论、模型和方法[J]. 推进技术, 2021, 42(1): 10-38.
- QIAO Weiyang, WANG Liangfeng, DUAN Wenhua, et al. Theory, model and method of aeroacoustic design for aero-engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(1): 10-38(in Chinese).
- [5] 伍赛特. 航空发动机环境污染现象及解决措施研究[J]. 能源与节能, 2021(1): 80-82.
- WU Saite. Study on phenomenon of aero engine environmental pollution and its solutions[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2021(1): 80-82(in Chinese).
- [6] 伍赛特. 航空发动机燃烧室设计研发过程研究综述[J]. 上海节能, 2019(7): 584-588.
- WU Saite. Summary of research on aero engine combustion chamber design and development process[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2019(7): 584-588(in Chinese).
- [7] 张晨东, 唐庆如, 赵军, 等. GE90大涵道比涡扇发动机动态性能研究[J]. 西安航空学院学报, 2021, 41(1): 28-33.
- ZHANG Chendong, TANG Qingru, ZHAO Jun, et al. Research of dynamic performance of GE90 high bypass ratio turbofan engine[J]. *Journal of Xi'an Aeronautical University*, 2021, 41(1): 28-33(in Chinese).
- [8] 蔡常鹏, 郑前钢, 颜秋英, 等. 军用小涵道比涡扇发动机最大状态控制计划鲁棒性分析[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 315-322.
- CAI Changpeng, ZHENG Qiangang, YAN Qiuying, et al. Robustness analysis of maximum state control plan for military small bypass ratio turbofan engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5): 315-322(in Chinese).
- [9] 赖安卿, 付尧明, 闫锋. 民航涡扇发动机高原启动失效机制试验研究[J]. 机械设计与制造, 2020(1): 101-104.
- LAI Anqing, FU Yaoming, YAN Feng. Experimental research on starting failure of civil aviation turbofan engine at high plateau[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(1): 101-104(in Chinese).
- [10] 张丹玲, 郝勇, 王德友, 等. 中国大涵道比涡扇发动机适航技术初步研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 58-62.
- ZHANG Danling, HAO Yong, WANG Deyou, et al. Preliminary investigation of airworthiness technologies for high bypass ratio turbofan engine in China[J]. *Aeroengine*, 2011, 37(4): 58-62(in Chinese).
- [11] 陈光. 用于波音787客机的GENx发动机设计特点[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 1-6.
- CHEN Guang. Design characteristics of GENx engine for B787[J]. *Aeroengine*, 2010, 36(1): 1-6(in Chinese).
- [12] 陈光. 大涵道比涡扇发动机的发展[J]. 航空动力, 2019(3): 56-61.
- CHEN Guang. The development of civil high-bypass turbofans[J]. *Aerospace Power*, 2019(3): 56-61(in Chinese).
- [13] 陈光. 大涵道比涡扇发动机风扇叶片的变迁[J]. 航空动力, 2018(5): 26-30.
- CHEN Guang. Changes of fan blades of high-bypass-ratio turbofans[J]. *Aerospace Power*, 2018(5): 26-30(in Chinese).
- [14] 陈玲, 夏语, 纪良. 民用飞机发动机噪声辐射特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(4): 78-82.
- CHEN Ling, XIA Yu, JI Liang. Study on characteristics noise radiation of civil aircraft engine[J]. *Noise and Vibration Control*, 2012, 32(4): 78-82(in Chinese).
- [15] 李旦望, 夏烨. 大涵道比涡扇发动机风扇转静干涉降噪研究[J]. 中国设备工程, 2019(13): 61-63.
- LI Danwang, XIA Ye. Research on noise reduction of turbofan fan with large bypass ratio by rotor stator interference[J]. *China Plant Engineering*, 2019(13): 61-63(in Chinese).
- [16] 聂平. 涡扇发动机核心机静态噪声数据预测方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- NIE Ping. Research on prediction method of static noise data of turbofan engine core engine[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017(in Chinese).
- [17] AZIMI M, OMMI F, ALSHTI N J. Using acoustic liner for fan noise reduction in modern turbofan engines[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2014, 15(1): 97-101.
- [18] 段翠云, 崔光, 刘培生. 多孔吸声材料的研究现状与展望[J]. 金属功能材料, 2011, 18(1): 60-65.
- DUAN Cuiyun, CUI Guang, LIU Peisheng. Present research and prospect of porous absorption materials[J]. *Metallic Functional Materials*, 2011, 18(1): 60-65(in Chinese).
- [19] BECK B S, SCHILLER N H, JONES M G. Impedance assessment of a dual-resonance acoustic liner[J]. *Applied Acoustics*, 2015, 93: 15-22.
- [20] 龚倩, 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 Zhiping, HUANG Jianping, et al. Review of sound-absorbing honeycomb material and the application on helicopter[J]. *Hi-Tech Fiber and Application*, 2020, 45(5): 1-7(in Chinese).
- [21] 李文智, 陈忱, 黄建萍, 等. 内嵌式多自由度吸声蜂窝结构降噪

性能影响因素研究[J]. [高科技纤维与应用](#), 2022, 47(3): 24-29.

LI Wenzhi, CHEN Chen, HUANG Jianping, et al. Study on the influence factors of noise reduction performance of embedded multi degree of freedom acoustic honeycomb structure[J]. [Hi-Tech Fiber and Application](#), 2022, 47(3): 24-29(in Chinese).

[22] 纪双英, 郝巍, 史湘宁, 等. 内嵌式多自由度共振吸声结构研究[J]. [纤维复合材料](#), 2018, 35(3): 38-41.

Ji Shuangying, HAO Wei, Shi Xiangning, et al. Study on sound absorption structure of embedded multi degree of freedom resonance[J]. [Fiber Composites](#), 2018, 35(3): 38-41(in Chinese).

[23] MA X Q, SU Z T. Development of acoustic liner in aero engine: A review[J]. [Science China Technological Sciences](#), 2020, 63(12): 2491-2504.

[24] 杨嘉丰, 薛东文, 李卓瀚, 等. 切向流条件下短舱单/双自由度声衬实验[J]. [航空学报](#), 2020, 41(11): 337-347.

YANG Jiafeng, XUE Dongwen, LI Zhuohan, et al. Single and double degree-of-freedom acoustic liners under grazing flow: Experiment[J]. [Acta Aeronautica et Astronautica Sinica](#), 2020, 41(11): 337-347(in Chinese).

[25] DANNEMANN M, KUCHER M, KUNZE E, et al. Experimental study of advanced helmholtz resonator liners with increased acoustic performance by utilising material damping effects[J]. [Applied Sciences](#), 2018, 8(10): 1923.

[26] SUN G H, ZHANG J H, ZHANG H, et al. Research on acoustic absorption properties of aramid honeycomb composite material reinforced by polyimide foam[J]. [Advanced Engineering Materials](#), 2022, 24(3): 2101158.

[27] KWAN H W, YU J, ABEYSINGHE A. A review of acoustic treatment design for aircraft engine noise reduction[C]// 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, INTER-NOISE 2006. Washington: Institute of Noise Control Engineering, 2006, 2: 990-999.