

# 嵌入局域共振单元宽频减振降噪 蜂窝夹层结构研究进展

陈洋<sup>1</sup>, 吴永鹏<sup>2</sup>, 李忠盛<sup>2</sup>, 黄安畏<sup>2</sup>, 李晓晖<sup>2</sup>, 吴道勋<sup>2</sup>,  
舒露<sup>2</sup>, 花泽荟<sup>2</sup>, 董玲抒<sup>2</sup>, 孙彩云<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻广州地区军事代表局, 广州 510300; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 针对传统蜂窝夹层结构对中低、低频声波的作用效果较差的问题, 近年来将传统蜂窝夹层结构与局域共振机理相结合, 开发出了嵌入局域共振单元具有宽频减振降噪能力的新型蜂窝夹层结构。该结构在利用空气介质产生声热转换和粘滞耗散外, 同时利用局域共振单元的共振吸声机理对低频声波进行衰减。同时, 当在局域共振单元上引入微孔后, 其中、低频段声学性能进一步提高; 该微孔薄膜与蜂窝芯密闭腔体将构成亥姆霍兹共振吸声器对低频声波进一步进行吸收。嵌入局域共振单元的蜂窝夹层结构具有优异的宽频声学性能, 其在武器装备上具有广泛的应用前景。

**关键词:** 蜂窝夹层结构; 局域共振; 微孔; 宽频

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.015

**中图分类号:** TB535      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)11-0096-07

## Research Progress on Broadband Vibration and Noise Reduction Honeycomb Sandwich Structure Embedded with Local Resonance Unit

CHEN Yang<sup>1</sup>, WU Yong-peng<sup>2</sup>, LI Zhong-sheng<sup>2</sup>, HUANG An-wei<sup>2</sup>, LI Xiao-hui<sup>2</sup>, WU Dao-xun<sup>2</sup>,  
SHU Lu<sup>2</sup>, HUA Ze-hui<sup>2</sup>, DONG Ling-shu<sup>2</sup>, SUN Cai-yun<sup>2</sup>

(1. Military Representative Bureau of Naval equipment Department in Guangzhou, Guangzhou 510300, China;  
2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** In view of the poor effect of traditional honeycomb sandwich structure on middle and low frequency sound waves, a new honeycomb sandwich structure with broadband vibration and noise reduction capability embedded with local resonance unit has been developed in recent years by combining traditional honeycomb sandwich structure with local resonance mechanism. This structure not only uses air medium to generate acoustic-thermal conversion and viscous dissipation, but also adopts the resonance sound absorption mechanism of local resonance unit to attenuate low-frequency sound waves. At the same time, when micro-holes are introduced into the local resonance unit, the acoustic performance of the structure in the middle and low-frequency bands is further improved. The closed cavity of the micro-hole film and honeycomb core will form Helmholtz resonance sound absorber to further absorb low-frequency sound waves. Honeycomb sandwich structure embedded with local resonance unit has excellent broadband acoustic performance, and a wide application prospect in weapons and equipment.

收稿日期: 2020-09-18; 修订日期: 2020-10-09

Received: 2020-09-18; Revised: 2020-10-09

作者简介: 陈洋(1977—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为装备监造。

**Biography:** CHEN Yang (1977—), Male, Master, Engineer, Research focus: equipment manufacturing supervision.

**KEY WORDS:** honeycomb sandwich structure; local resonance; micro-hole; broadband

蜂窝夹层结构由上、下面板通过胶黏剂与蜂窝芯复合而成。其中，蜂窝芯本身不具备吸/隔声性能，当蜂窝芯与上下面板复合成夹层结构时，蜂窝芯腔体与上下面板构成密闭空腔，空腔中的气体介质在声波作用下将产生热转换和粘滞耗散吸收声能。同时，蜂窝芯与上面板构成的蜂窝夹层结构具有较高的刚度，使得其具有较好的隔声性能。

传统蜂窝夹层结构在声波中高、高频阶段具有优异的声学性能，但其对频率小于 600 Hz 的中低、低频声波的作用效果较差。针对该问题，近年来，国内外学者对具有宽频降噪性能的蜂窝夹层结构开展了大量研究，其中具有代表性的有在蜂窝芯中复合弹性薄膜构成的蜂窝夹层结构，以及在蜂窝芯中嵌入多孔尼龙薄膜复合而成的蜂窝夹层结构。这两种结构在中、低频段的吸/隔声性能明显提升。文中主要阐述了传统降噪蜂窝夹层结构研究及应用现状，嵌入局域共振单元新型蜂窝夹层结构的结构组成及其降噪机理，并对其制造工艺进行了探究。

### 1 蜂窝夹层结构研究现状

蜂窝夹层结构中依据蜂窝芯的结构类型，分为正六边形、正方形、菱形等蜂窝夹层结构，其中六边形蜂窝夹层结构应用最多。依据材料类型，蜂窝芯材质主要有纸、玻璃布、铝合金、芳纶纸 (Nomex) 等，上、下面板主要有胶合板、纤维板、铝合金板、玻璃钢板、碳纤维板等。

蜂窝夹层结构中蜂窝芯本身不具备吸/隔声性能，当蜂窝芯与上下面板复合成夹层结构时，在声波通过蜂窝芯中的密闭空腔过程中，空腔中的空气介质将产生交替压缩和膨胀，压缩区域的体积变小，温度升高，而膨胀区域的体积变大，温度降低，热量将从高温区向低温区流动，从而产生热交换作用，将声能转化为热能。同时，空气介质振动时，由于其相邻两个质点的运动速度不同而产生相对运动发生内摩擦 (也称为粘滞力)，使得相当一部分声能耗散<sup>[1-2]</sup>。

经测试，单层芯复合蜂窝夹层结构板，当声波频率大于 600 Hz 时，其隔声量随频率的提高而增加，但其对声波频率小于 600 Hz 声波的作用效果较差。为进一步提升蜂窝夹层结构的降噪性能，国内外相关学者对各种类型的蜂窝夹层结构进行了研究。其中，大连交通大学采用阻尼减振性能更佳的镁合金制造出了蜂窝夹层板，并对其隔声性能进行了研究。所采用的镁合金阻尼减振性能比铝合金高 5~100 倍，比钢高 3 个数量级。蜂窝芯材壁厚 0.04 mm，蜂窝芯边长为 8 mm/4 mm，蜂窝芯高度为 18 mm，与厚度为 1 mm 的上下面板复合而成的蜂窝夹层结构的隔声量曲线

如图 1 所示。可以看出，镁合金蜂窝夹层板在中、高频段的平均隔声量大于 30 dB，而其对中、低频声波的隔声性能依旧不理想，隔声量小于 15 dB<sup>[3-4]</sup>。

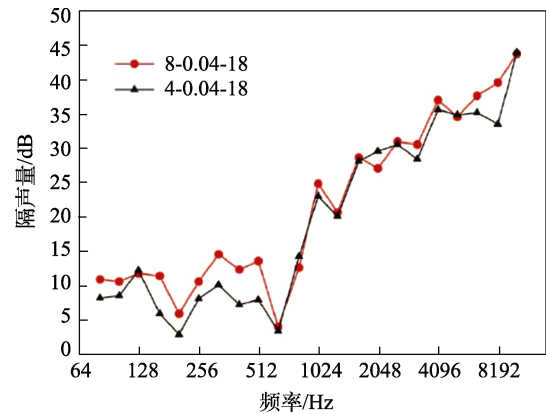
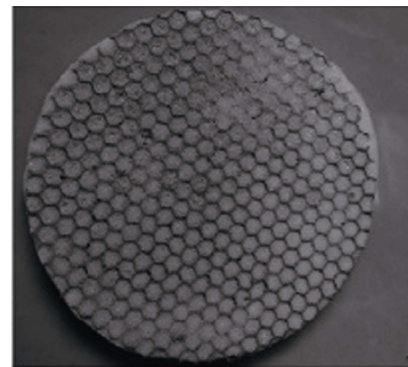
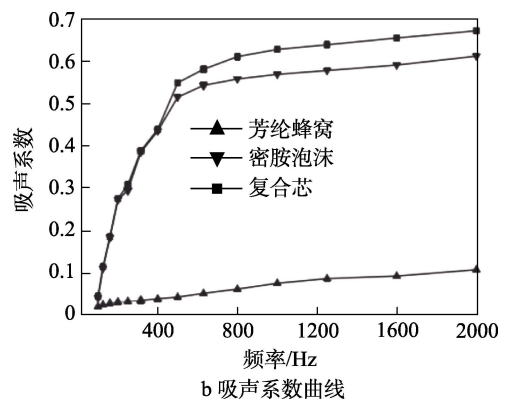


图 1 镁合金蜂窝夹层板隔声性能  
Fig.1 Sound insulation performance of magnesium alloy honeycomb sandwich panel

采用在蜂窝芯中填充多孔吸声材料可进一步提升蜂窝夹层结构的降噪性能。株洲时代新材料科技股份有限公司采用蜜胺泡沫填充芳纶蜂窝芯样品如图 2a 所示。蜜胺泡沫是具有轻质、开孔率高、耐高温性能



a 样品



b 吸声系数曲线

图 2 蜜胺泡沫填充芳纶蜂窝芯及其吸声系数曲线  
Fig.2 Honeycomb core filled with melamine foam and its sound absorption coefficient curve:  
a) sample; b) sound absorption coefficient curve

好、阻燃的新型吸声泡沫塑料,其吸声性能测试曲线如图 2b 所示。可以看出,填充蜜胺泡沫的芳纶蜂窝芯吸声系数在中、高频有一定提高,但在中、低段的提升有限<sup>[5-6]</sup>。

依据马大猷院士的“微穿孔板共振吸声理论”,开发出了各类型微穿孔蜂窝夹层结构板。其中,南京常荣噪声控制环保工程有限公司在上下面板为 0.5 mm、总厚度为 20 mm 的铝蜂窝夹层结构上面板,制备出了穿孔孔径为 0.25 mm、孔间距为 2 mm 的超微孔吸声蜂窝夹层结构。其吸声系数曲线如图 3 所示,平均吸声系数达到 0.98<sup>[7-12]</sup>,但其在低频的吸声性能依旧不够理想。

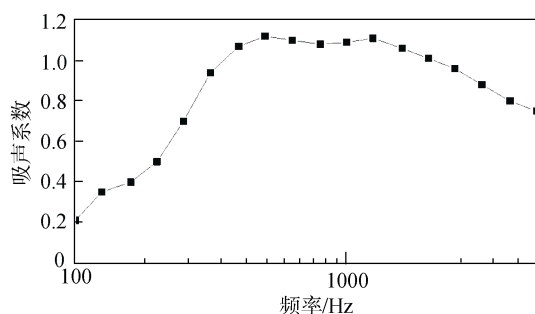


图 3 超微孔蜂窝夹层结构吸声系数曲线  
Fig.3 Sound absorption coefficient curve of super microporous honeycomb sandwich structure

## 2 蜂窝夹层结构应用情况

蜂窝夹层结构具有轻质、高强、抗弯性能优异、吸/隔声性能、隔热、电磁屏蔽等优点,同时其各种性能具有很宽的可设计性,可通过调整其结构参数、填充增强材料等方式达到优化匹配设计<sup>[13-15]</sup>。蜂窝夹层结构作为结构功能一体化材料,已广泛应用于武器装备的次承力结构件以及内饰等非承力件,如飞机的机翼、进气道、雷达罩、地板、内饰板等,火箭的安定面,导弹的隔热板、天线罩、整流罩,卫星、飞船、航天飞机的舱盖、整流罩等。国外部分机型中蜂窝材料的应用情况见表 1。其中,Boeing 747 蜂窝夹层结构用量达 4000 m<sup>2</sup>,Boeing 787 蜂窝夹层结构复合材料的质量分数达到 50%。蜂窝夹层结构在航空航天领域的广泛应用,促进了其在其他各领域的渗透,如高铁、地铁、汽车内饰、隔声板、隔热板等,同时应用于制作赛艇、游船、滑板、冲浪板和滑雪板等,蜂窝夹层结构因其优异的吸/隔声性能作为建筑幕墙板应用于剧院、电影院、大型会议厅/室等<sup>[16-18]</sup>。

## 3 嵌入局域共振单元宽频降噪蜂窝夹层结构研究进展

针对传统蜂窝夹层结构对中、低频声波声学性能

较差的问题,近年来,国内外学者对具有宽频降噪性能的蜂窝夹层结构开展了大量研究。其中具有代表性的主要有:在蜂窝芯中复合弹性薄膜构成的蜂窝夹层结构,以及在蜂窝芯中嵌入多孔尼龙薄膜复合而成的蜂窝夹层结构。研究发现,该两种结构在中、低频段的吸/隔声性能明显提升。

表 1 国外部分机型中蜂窝材料应用情况  
Tab.1 Application of honeycomb materials in some foreign models

机型	应用部位	蜂窝材料类型
F-15	机翼前缘、襟、副翼、垂尾、平尾	铝蜂窝
F-16	平尾	铝蜂窝
F/A-18E/F	方向舵、平尾	铝蜂窝
F-35	襟、副翼、平尾前缘、垂尾前缘、方向舵	Kevlar
A 340	方向舵、襟翼导轨整流罩、腹部整流罩等	Nomex
A 380	襟、副翼、机翼滑轨整流罩、地板内饰等	Nomex
B 787	升降舵、方向舵、发动机整流罩、机翼翼尖等	Nomex
Beech Starship	机翼、机身	Nomex
Hawker4000	机身	Nomex
RQ-4	鼻锥整流罩、机翼前后缘	Nomex
MQ-1	机翼、机身	Nomex
ARH-70	桨叶、前机身、发动机整流罩	Nomex、铝蜂窝

其中, Ni Sui, Xiang Yan 等将厚度约为 0.25 mm 的橡胶薄膜与边长为 3.65 mm、厚度为 25 mm 的蜂窝芯直接复合形成蜂窝夹层结构。声波与该结构作用时,除蜂窝芯被薄膜分离的两个密闭空腔中的介质对声能产生声热转换和粘滞耗散外,弹性薄膜作为局域共振单元,当声波激励频率与弹性薄膜结构的共振频率一致时,弹性薄膜将发生共振而产生形变,形变过程中弹性薄膜将消耗声能,起到吸收声波能量的作用。由于共振薄膜刚度通常较小,其共振频率处于声波的中、低频段,从而对中、低频声波产生吸声作用<sup>[2]</sup>。

对比测试表明,在 50~1600 Hz 频率范围,与未引入弹性薄膜的常规蜂窝夹层结构相比,平均传声损失增加了 9 dB,该结构及隔声测试曲线如图 4 所示<sup>[19]</sup>。该材料已在飞机机舱的地板和天花板等部位进行了试用。

Naify 等将厚度约为 0.077 mm、孔格大小为 0.01 mm,孔格面积占比为 30%的柔性开孔尼龙薄膜嵌入厚度为 20 mm、蜂窝孔格大小为 9.5 mm 的蜂窝芯材中,再与 1 mm 厚的玻璃钢板材复合成蜂窝夹层结构。复合多孔尼龙薄膜蜂窝夹层结构如图 5 所示。

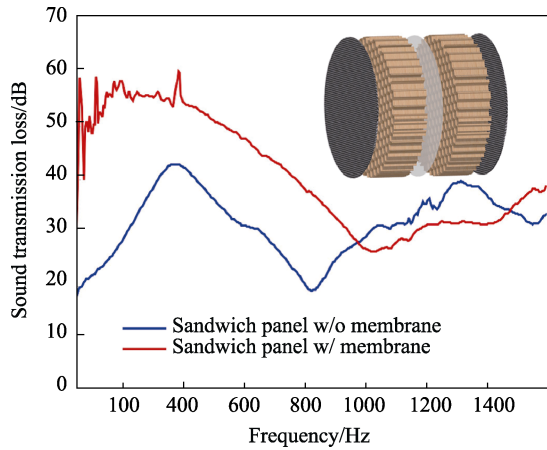


图 4 嵌入局域共振薄膜的蜂窝夹层结构及隔声曲线  
Fig.4 Honeycomb sandwich structure embedded with local resonance film and sound insulation curve

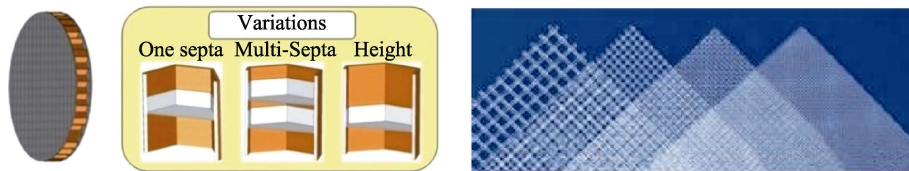


图 5 蜂窝复合多孔尼龙薄膜共振吸声结构  
Fig.5 Resonance sound absorption structure of honeycomb composite porous nylon film

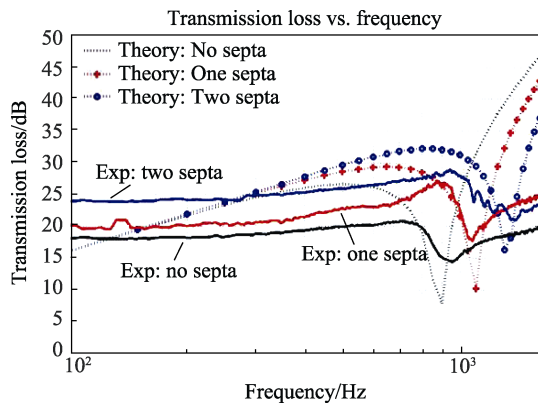


图 6 蜂窝复合多孔尼龙薄膜共振吸声结构隔声曲线  
Fig.6 Sound insulation curve of honeycomb composite porous nylon film resonance sound absorption structure

研究表明,当共振薄膜上的开孔直径小于  $300\ \mu\text{m}$  时,微孔共振薄膜蜂窝夹层结构的吸声性能可以在保留原共振吸声结构优越的声学性能的基础上,吸声系数和吸声频带宽度进一步提高。同时,可通过调节密闭空腔高度和薄膜的穿孔率来实现对结构吸声频段的调节。适当降低共振薄膜厚度可以改善吸声带宽,降低结构整体质量。

## 4 蜂窝夹层结构嵌入局域共振薄膜及微开孔工艺探究

### 4.1 蜂窝夹层结构嵌入局域共振薄膜

蜂窝夹层结构制造过程中常选用环氧胶膜。该

该结构除了利用密闭腔体声热耗散、粘滞耗散以及薄膜共振消耗声能的原理外,同时利用了“亥姆霍兹共振吸声器”原理。当声波入射到微孔共振薄膜表面时,薄膜微孔中的气体在声波作用下做往返活塞运动,由于气体具有一定质量,其将产生声热转换和粘滞耗散,将声能转换为热能,从而消耗部分声能。同时声波进入微孔时,由于孔颈壁的摩擦和阻尼,使一部分声能转化为热能消耗掉,或是转化为振动能沿微穿孔板(结构)传递转移,声能转化为热能<sup>[20-22]</sup>。

经测试,在  $50\sim 1600\ \text{Hz}$  频率范围内,安装一层和两层柔性开孔尼龙薄膜的蜂窝夹层结构吸声系数分别增加 2.5 倍和 1.5 倍,传声损失分别增加 3 dB 和 7 dB,在低频段的降噪性能明显提升。该结构的隔声测试及理论计算曲线如图 6 所示<sup>[23-24]</sup>。

胶膜粘结能力强,固化后收缩率、蠕变性低,具有耐潮、耐热、耐腐蚀性能,且厚度均匀,施胶量准确,施工工艺简单,但环氧胶膜固化后脆性大、韧性较差,无法作为弹性薄膜引入蜂窝共振夹层结构。

国内近年研制的端环氧基丁腈橡胶(主增韧剂)和聚芳醚酮(辅助增韧剂)增韧环氧树脂弹性胶膜具有良好的粘接强度和较高的弹性,其应力-应变曲线如图 7 所示。其在常温下的剪切强度大于  $20\ \text{MPa}$ ,常温断裂伸长率达到了  $26.48\%$ 。该胶膜同时具有良好的耐热性能, $150\ ^\circ\text{C}$  下其剪切强度大于  $8\ \text{MPa}$ ,其 5% 热失重时的温度达到了  $349.5\ ^\circ\text{C}$ <sup>[25-28]</sup>。

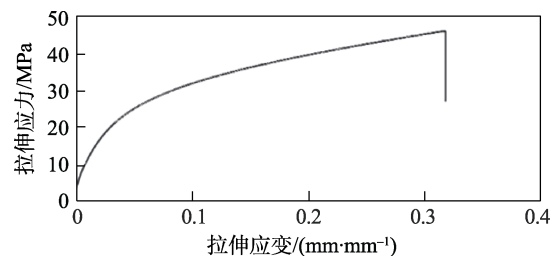


图 7 弹性胶膜应力-应变曲线  
Fig.7 Stress strain curve of elastic film

该型胶膜的黏-温曲线如图 8 所示。其最低点黏度大于  $2500\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ ,远大于环氧结构胶膜( $200\sim 500\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ )的最低点黏度。该型胶膜在上下蜂窝芯粘结过程中,胶膜不会产生延流塌陷现象,固化后能保持薄膜结构完整。



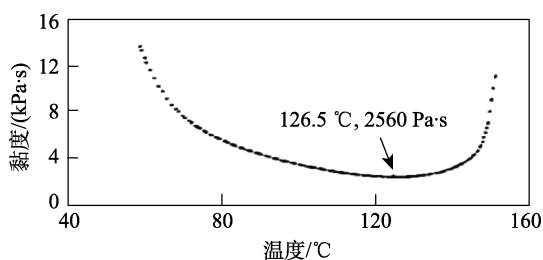


图8 弹性胶膜黏-温曲线

Fig.8 Viscosity temperature curve of elastic film

## 4.2 局域共振薄膜微开孔工艺

局域共振薄膜微开孔过程中,在保证开孔均匀的

同时,需要开孔过程对薄膜不造成损害。由于开孔直径需小于  $300\ \mu\text{m}$ ,传统的机械开孔方式已无法适用。激光加工技术已广泛应用于激光薄膜切割、激光薄膜打孔、激光薄膜热封等,激光可在金属、陶瓷、半导体、纸张、皮革、高分子,甚至细胞膜上打孔。激光打孔相比其他打孔工艺的优势主要体现在:激光打孔的孔径小,可开微孔孔径范围为  $20\sim 300\ \mu\text{m}$ ;开孔边缘光滑无残留物质;激光打孔不会使薄膜破裂,甚至由于微孔具有熔化边缘可防止微孔破裂;开孔孔径可通过调节激光功率和打孔时间进行调节;开孔速度快,精度高,可适用于工业生产。高分子薄膜激光打孔效果如图9所示<sup>[29-32]</sup>。

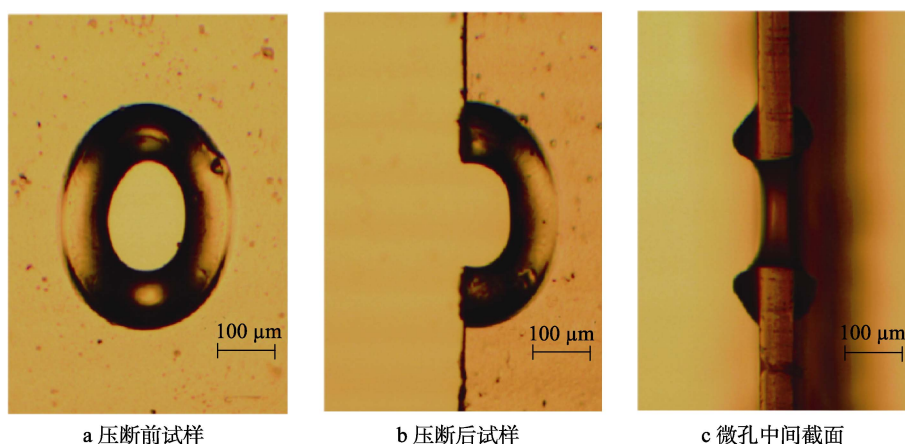


图9 高分子薄膜激光打孔效果

Fig.9 Laser drilling effect of polymer film: a) sample before fracture; b) sample after crushing; c) micro-hole cross section

激光打孔采用传统的  $\text{CO}_2$  激光器,因为局域共振薄膜为高分子材料,其红外吸收谱含有若干个尖峰,激光波长的微小变化将会对薄膜的激光吸收系数产生巨大影响,因此需要对激光器的波长进行选择。当激光波长与共振薄膜材料的红外吸收光谱的尖峰所对应的波长相同时,会极大提高打孔速度。

## 5 结语

针对传统蜂窝夹层结构在中、低频段声学性能较差的问题,近年来开发出的嵌入局域共振弹性薄膜蜂窝夹层结构能有效地提高其在中、低频段吸/隔声性能。同时研究发现,通过在局域共振弹性薄膜上引入微孔,使该微孔与蜂窝芯中的密闭空腔形成亥姆霍兹共振吸声器,可进一步提升其在中、低频段的吸声带宽以及吸声性能。国内最近开发出的端环氧基丁腈橡胶和聚芳醚酮增韧环氧树脂弹性胶膜,因其具有较大的最低点黏度以及固化后具有良好的弹性,可用于制备蜂窝芯复合共振弹性薄膜结构。同时,可采用  $\text{CO}_2$  激光器在局域共振薄膜上引入微孔,最终成型复合微孔局域共振弹性薄膜蜂窝

夹层结构。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 谷秀娥,权高峰,石琳. 镁合金蜂窝板隔声性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2011(8): 165-168.  
GU Xiu-e, QUAN Gao-feng, SHI Lin. Sound Insulation Performance Analysis of Magnesium Honeycomb Panel[J]. Noise and Vibration Control, 2011(8): 165-168.
- [4] 权高峰,严峰,刘赵铭. 镁合金与轨道交通装备轻量

- 化[J]. 中国镁业, 2008(2): 15.  
QUAN Gao-feng, YAN Feng, LIU Zhao-ming. Magnesium Alloy and Lightweight Rail Transit Equipment[J]. China Magnesium Association, 2008(2): 15.
- [5] 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(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(12): 39-41.
- [6] 杨丑伟, 王执乾, 白翰林. 三聚氰胺泡沫生产工艺与应用研究进展[J]. 化工中间体, 2013(10): 1-3.  
YANG Chou-wei, WANG Zhi-qian, BAI Han-lin. The Research on Technology and Application Progress for Melamine Foam Production[J]. Fine Chemical Intermediates, 2013(10): 1-3.
- [7] 闻小明, 张华, 钟昊, 等. 超微孔蜂窝吸声结构在声学装饰材料中的运用[J]. 环境工程, 2014(5): 181-184.  
WEN Xiao-ming, ZHANG Hua, ZHONG Hao, et al. Application of Ultra-micropore Cellular Sound-absorption Structure in Acoustic Decoration Materials Purification[J]. Environmental Engineering, 2014(5): 181-184.
- [8] 刘克, 田静, 焦风雷, 等. 微穿孔板吸声体的研究进展[J]. 声学学报, 2005, 30(6): 498-505.  
LIU Ke, TIAN Jing, JIAO Feng-lei, et al. Advances in Micro-perforated Panel Absorbers[J]. Acta Acustica, 2005, 30(6): 498-505.
- [9] 张德满, 李舜酩, 沈岷, 等. 微穿孔板吸声结构的研究进展[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(11): 1526-1529.  
ZHANG De-man, LI Shun-ming, SHEN Huan, et al. Research and Development of a Micro-perforated Panel Structure[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(11): 1526-1529.
- [10] DUPONT T, PAVIC G, LAULAGNET B. Acoustic Properties of Lightweight Micro-perforated Plate Systems[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2003, 89(2): 201-212.
- [11] KANG J, BROCKLESBY M W. Feasibility of Applying Micro-perforated Absorbers in Acoustic Window Systems[J]. Applied Acoustics, 2005, 66(6): 669-689.
- [12] 栾海霞, 盛美萍, 刘志宏. 双层串联微穿孔板吸声体设计理论及应用研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(11): 1343-1345.  
LUAN Hai-xia, SHENG Mei-ping, LIU Zhi-hong. On Design of a Double Microperforated Panel Absorber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(11): 1343-1345.
- [13] 张广平, 戴干策. 复合材料蜂窝夹芯板及其应用[J]. 纤维复合材料, 2000(2): 25-27.  
ZHANG Guang-ping, DAI Gan-ce. Honeycomb Sandwich Panels Panels of Composites and Their Application[J]. Fiber Composites, 2000(2): 25-27.
- [14] LEE C, KONDO K. Noise Transmission Loss of Sandwich Plates with Viscoelastic Core[C]// 40th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Louis, MO, USA, 1999.
- [15] 肖加余, 王兴业, 杨孚标, 等. 夹层结构复合材料设计原理及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
XIAO Jia-yu, WANG Xing-ye, YANG Fu-biao, et al. Design Principle and Application of Sandwich Structure Composite Material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [16] 程文礼, 袁超, 邱启艳, 等. 航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J]. 航空制造技术, 2015(7): 94-98.  
CHENG Wen-li, YUAN Chao, QIU Qi-yan, et al. Honeycomb Sandwich Structure and Manufacturing Process in Aviation Industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(7): 94-98.
- [17] 台雪琰. 蜂窝材料的工程应用及发展[J]. 工程与建设, 2014, 26(4): 518-520.  
TAI Xue-yan. Engineering Application and Development of Honeycomb Materials[J]. Engineering and Construction, 2014, 26(4): 518-520.
- [18] 辜小安, 王澜. 高速铁路高架车站候车厅声学环境要求的研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 120-125.  
GU Xiao-an, WANG Lan. Research on the Requirement of Acoustical Environment in the Waiting Hall of High-speed Railway Elevated Station[J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 120-125.
- [19] SUI Ni, YAN Xiang, HUANG Tai-yun, et al. A Lightweight Yet Sound-proof Honeycomb Acoustic Metamaterial[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106: 171905.
- [20] 马大猷. 微穿孔板结构的设计[J]. 声学学报, 1988, 13(3): 174-180.  
MA Da-you. Design of Microperforated Panel Constructions[J]. Acta Acustica, 1988, 13(3): 174-180.
- [21] 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.  
MA Da-you. General Theory and Design of Microperforated-panel Absorbers[J]. Acta Acustica, 1997, 22(5): 385-393.
- [22] 栾海霞, 盛美萍, 刘志宏. 双层串联微穿孔板吸声体设计理论及应用研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(11): 1343-1345.  
LUAN Hai-xia, SHENG Mei-ping, LIU Zhi-hong. On Design of a Double Microperforated Panel Absorber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(11): 1343-1345.
- [23] CHRISTINA N, MATT S, STEVE N. Noise Reduction of Honeycomb Sandwich Panels with Acoustic Mesh Caps[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(4): 2281.
- [24] LEE C M, XU Y. A Modified Transfer Matrix Method for Prediction of Transmission Loss of Multilayer Acoustic Materials[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326: 290-301.
- [25] 冯浩, 王德志, 曲春艳, 等. 一种高弹性环氧基胶粘剂材料的制备[J]. 中国胶粘剂, 2018(11): 9-11.

- FENG Hao, WANG De-zhi, QU Chun-yan, et al. The Preparation of Elastomeric Epoxy-based Adhesive Film Material[J]. *China Adhesives*, 2018(11): 9-11.
- [26] 宿凯, 刘长威, 曲春艳, 等. 一种耐高温纸蜂窝节点胶黏剂的研制[J]. *化学与黏合*, 2018(6): 401-403.
- SU Kai, LIU Chang-wei, QU Chun-yan, et al. Study on a High Temperature Resistant Node Adhesive for Paper Honeycomb[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2018(6): 401-403.
- [27] 鲁玉娇, 彭奇均. 端羧基丁腈橡胶和柔性聚醚胺增韧EP胶粘剂的研究[J]. *中国胶粘剂*, 2015(1): 21-24.
- LU Yu-jiao, PENG Qi-jun. Study on Epoxy Resin Adhesive Toughened by CTBN and Flexible Amine-Terminated Polyether[J]. *China Adhesives*, 2015(1): 21-24.
- [28] 王伊珺, 朱喻麟, 韩果, 等. 室温固化高柔韧性环氧体系的制备及性能[J]. *热固性树脂*, 2015(5): 63-66.
- WANG Yi-jun, ZHU Yu-lin, HAN Guo, et al. Preparation and Properties of Room Temperature Curing Epoxy Systems with High Flexibility[J]. *Thermosetting Resin*, 2015(5): 63-66.
- [29] 陈鹤鸣, 赵新彦. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- CHEN He-ming, ZHAO Xin-yan. *Laser Principle and Application*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [30] 张铎, 卢立新, 周丹. CO<sub>2</sub>激光加工微孔膜关键加工参数[J]. *包装工程*, 2017, 38(4): 125-129.
- ZHANG Duo, LU Li-xin, ZHOU Dan. The Key Parameters for Processing Microporous Film by CO<sub>2</sub> Laser[J]. *Packaging engineering*, 2017, 38(4): 125-129.
- [31] 梁晓轩, 王晶, 张镇西. 纳米尺度激光紧聚焦光穿孔技术[J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(10): 107-115.
- LIANG Xiao-xuan, WANG Jing, ZHANG Zhen-xi. Nano-scale Photoporation by Tightly Focused Lasers: A Survey[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(10): 107-115.
- [32] TONY H, BILL D. Improvements to Laser Processing of Thin Polymer Films[C]// ANTEC 2004 Plastics: Annual Technical Conference. Chicago, 2004.