

典型结构功能一体化复合材料的设计与制备技术

蒋民强 胡东源 董晨昊 PIERCERobert RUDDChris 刘晓玲 益小苏

Design and fabrication techniques for typical structural-functional integrated composites

JIANG Minqiang, HU Dongyuan, DONG Chenhao, PIERCE Robert, RUDD Chris, LIU Xiaoling, YI Xiaosu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240731.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纤维复合材料结构锂离子电池研究综述

Study review on structure lithium-ion batteries of carbon fiber reinforced composites

复合材料学报. 2023, 40(3): 1263–1273 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220608.001>

基于多功能插层结构的高导热碳纤维复合材料制备与表征

Preparation and characterization on carbon fiber composites with high thermal conductivity based on multifunctional intercalation structures

复合材料学报. 2024, 41(8): 4096–4104 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240229.004>

复合材料结构超级电容器碳纤维电极的制备与改性方法研究进展

Recent progress in carbon fiber electrodes for structural supercapacitors composites

复合材料学报. 2023, 40(11): 6010–6028 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230601.001>

烧蚀型防热/吸波多功能一体化复合材料的制备及性能

Preparation and properties of multi-functional composite integrated with heat-shielding and radar-absorbing

复合材料学报. 2024, 41(1): 271–280 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230524.001>

基于RTM技术的碳纤维/聚酰亚胺复合材料舵面一体化制备与验证

Integration manufacturing and testing verification for RTMable carbon fiber/polyimide composite rudder

复合材料学报. 2020, 37(9): 2152–2162 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200429.002>

导电玻璃纤维及其功能复合材料研究进展

Recent research progress in conductive glass fiber and polymer-based functional composites

复合材料学报. 2021, 38(1): 36–44 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200825.004>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

典型结构功能一体化复合材料的设计与制备技术



分享本文

蒋民强¹, 胡东源², 董晨昊¹, PIERCE Robert³, RUDD Chris², 刘晓玲^{*1}, 益小苏^{*1,2}

(1. 宁波诺丁汉大学 理工学院, 宁波 315100; 2. 长三角碳纤维及复合材料技术创新中心, 常州 213126;

3. 丹麦技术大学 风力与能源系统学院, 科恩布林比 2800)

摘要: 在碳纤维增强树脂基复合材料轻量化与结构性能持续提高的前提下, 同时附加其特定的功能, 尤其是在不损失、甚至提升其层间断裂韧性的情况下, 不仅可以弥补结构复合材料天然的缺陷, 例如树脂基体的电绝缘性, 也可以使其满足特定产品的要求, 例如高刚度兼具一定的吸声降噪特性等。显然, 对于航空航天这样的尖端应用领域, 这种功能附加或结构功能一体化的复合材料技术对航空航天技术的未来发展至关重要。本文介绍了 4 种具有典型性的结构功能一体化复合材料的设计、制备与性能研究, 分别是基于层间功能化插层和基于内织导电纬纱的导电增韧一体化复合材料及多级孔碳化棉纤维填充蜂窝/微穿孔面板的夹芯复合材料结构和编织布/无纺纤维毡复合材料片材折叠成型的结构吸声一体化复合材料。前两种材料分别通过在复合材料富树脂的层间插入导电功能化插层和在复合材料内引入贯通整个材料的导电纬纱网络实现了复合材料的导电性能与层间韧性的同步提高, 而后两种材料则分别通过多级孔结构的碳化棉纤维材料填充蜂窝/微穿孔面板夹芯技术和编织布/无纺纤维毡复合材料片材的折叠技术实现了良好的吸声性能等, 以展示多尺度、多层次结构设计和制备技术在结构复合材料功能化集成和结构功能一体化方面的应用。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 多功能复合材料; 导电; 增韧; 吸声

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)09-4457-21

Design and fabrication techniques for typical structural-functional integrated composites

JIANG Minqiang¹, HU Dongyuan², DONG Chenhao¹, PIERCE Robert³, RUDD Chris²,
LIU Xiaoling^{*1}, YI Xiaosu^{*1,2}

(1. Faculty of Science and Engineering, University of Nottingham Ningbo China, Ningbo 315100, China; 2. Yangtze River Delta Carbon Fiber and Composite Technology Innovation Center, Changzhou 213126, China; 3. Department of Wind and Energy Systems, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby 2800, Danmark)

Abstract: Under the premise of continuous improvement of lightweight and structural performance of carbon fiber reinforced polymer matrix composites, enhancing specific functions, especially in the case of no loss, or even enhancement of their interlaminar fracture toughness, can not only compensate for the inherent shortcomings of structural composite materials, such as the electrical insulation of the resin matrix, but also enable them to meet the requirements of specific products, such as high stiffness and certain sound absorption and noise reduction properties. Obviously, for cutting-edge applications such as aerospace, such function-added or structure-function-integrated composites technology is crucial to the future development of aerospace technology. In this paper, the design, preparation, and performance studies of four typical function-integrated structural composites are presented, which are conductivity-toughening integrated laminate based on functionalized interlayer technology (FIT), and based on inter-woven conductive weft fabric (IWCWF); Sound absorption composite based on honey-

收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-07-08; 录用日期: 2024-07-20; 网络首发时间: 2024-08-02 08:44:14

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240731.001>

通信作者: 刘晓玲, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料 E-mail: xiaoling.liu@nottingham.edu.cn;

益小苏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料 E-mail: xiaosu.yi@nottingham.edu.cn

引用格式: 蒋民强, 胡东源, 董晨昊, 等. 典型结构功能一体化复合材料的设计与制备技术 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4457-4477.

JIANG Minqiang, HU Dongyuan, DONG Chenhao, et al. Design and fabrication techniques for typical structural-functional integrated composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4457-4477(in Chinese).

comb/micro-perforated panels sandwich structure filled with carbonized cotton fibers with hierarchical pores, and based on folded structures prepared from woven fabric/nonwoven mats. The first two materials achieved simultaneous improvement in the electrical conductivity and interlaminar toughness of composite materials by inserting conductive functional interlayers into the resin-rich layers and introducing a conductive weft network throughout the composite. The latter two materials demonstrated excellent sound absorption performance through the technology using honeycomb/micro-perforated panel sandwich filled with carbonized cotton fibers with hierarchical pores, and the folding technology of woven fabric/nonwoven fiber mats composite sheets. This showcases the application of multi-scale, multi-level structural design and fabrication techniques in the functional integration and structural-functional integration of structural composites.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer (CFRP); multifunctional composites; electrical conductivity; toughening; sound absorption

随着复合材料越来越多地应用在航空航天、新能源汽车、高铁、船舶等领域，仅仅高(力学)结构性能已越来越难以满足未来轻量化结构的功能需求。例如，在航空领域，树脂基复合材料由于其轻质、高强、高模、耐腐蚀、抗疲劳等特性而被广泛应用在以 B787、A350 为代表的民用飞机上，然而，它也面临多重挑战，其较低的树脂导电性能^[1-2]和较低的层间韧性^[3-4]就是两个十分突出的问题。

作为飞机结构材料，碳纤维增强树脂基复合材料的导电性能远远不及铝合金。尽管复合材料中的碳纤维具有一定的导电能力，但树脂基体、特别是富树脂的碳纤维复合材料层间基本就是绝缘的，因此碳纤维树脂基复合材料的整体导电能力十分有限，尤其是厚度方向的导电能力，通常仅有 10^{-4} S/m 至 1 S/m^[5-7]。而由于铝合金机身材料通常也作为飞机电回路系统的“零线”(地线)，因此相对于传统的全金属材料机身，碳纤维复合材料的介入显然破坏了传统飞机结构的电回路系统(图 1)，形成一定的安全隐患^[8]。为此，空客公司发布“空中客车目标指南 (Airbus targets specification, ATS)”文件，公开招标厚度方向导电率达 20 S/m 的碳纤维结构复合材料技术^[6]。

为了提高复合材料的导电性，出现了诸如添加导电填料^[7]、插入导电插层^[8]或者选用本征导电树脂基体^[9]等技术来改善复合材料的导电性能的方法。然而，这些改性方法往往在改善复合材料导电性能的同时，不可避免地对复合材料的力学性能、特别是层间韧性造成负面影响，而碳纤维增强的热固性树脂基复合材料面临的一个突出问题恰恰是其较差的层间韧性。这种较差的层间韧性的根源在于热固性树脂基体材料的固有脆性导致复合材料对冲击损伤十分敏感，在遇到低速冲击

时，容易产生严重的内部分层或断裂，导致冲击后压缩强度 (Compression after Impact, CAI) 很低(图 2)^[10-12]。因此，如何在保持碳纤维增强热固性树脂基复合材料现有结构性能的基础上，提升其导电性能、特别是度方向的导电率，是国内外航空复合材料技术领域面临的一个重大技术挑战。

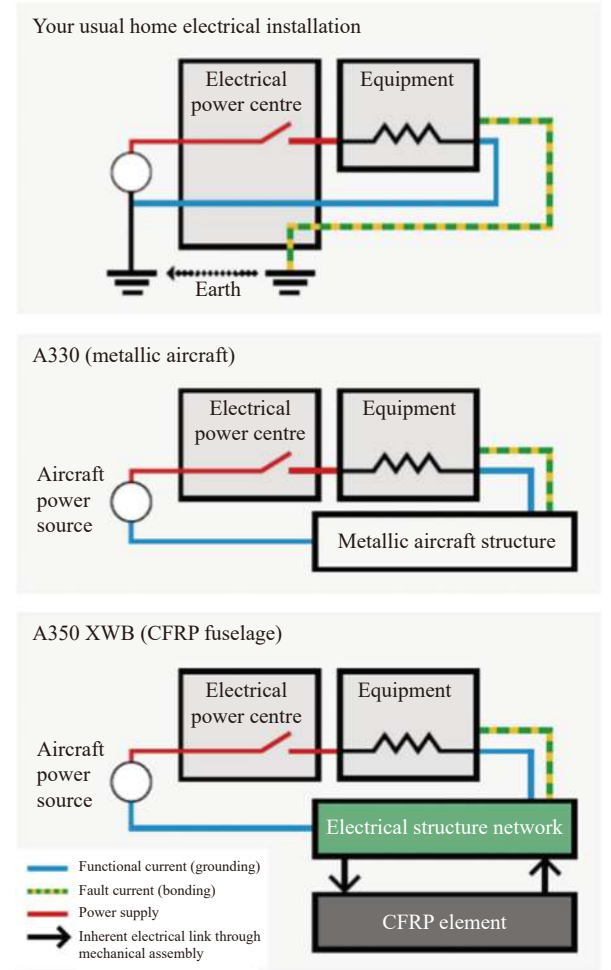


图 1 金属结构飞机机身与碳纤维增强复合材料 (CFRP) 飞机机身的电回路原理^[5]

Fig. 1 Electrical principle of electrical structure network applied to carbon fiber reinforced polymer (CFRP) fuselage^[5]

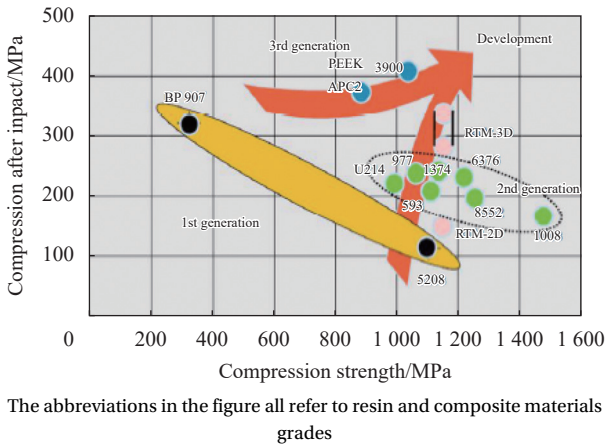


图2 航空复合材料压缩强度与冲击后压缩强度 (CAI) 的关系及发展趋势^[12]

Fig. 2 Relationship between compression strength and compression strength after impact (CAI) of aerospace composites, and its development trend^[12]

众所周知，噪声已经对现代社会产生了越来越严重的污染，严重影响身心健康^[13]。各类交通工具均会产生运行噪声，其主要来源，一是气体流动，二是结构振动，因此，在交通工具减振降噪方面，轻量化的结构吸声、结构隔声一体化的复合材料正在成为国内外复合材料技术领域的研发热点之一。

飞机噪声虽然早已被公众所熟知，但降低飞机噪声始终是航空工业的一个不懈追求的目标。据波音公司介绍^(图3)^[14]，通过引入轻量化的飞机结构复合材料技术，相对于早期的单位乘客里程油耗和噪声水平，目前飞机的油耗和二氧化碳排放水平已大幅下降了70%左右，噪声水平已下降了90%左右，这其中就包括了结构吸声一体化复合材料的贡献。

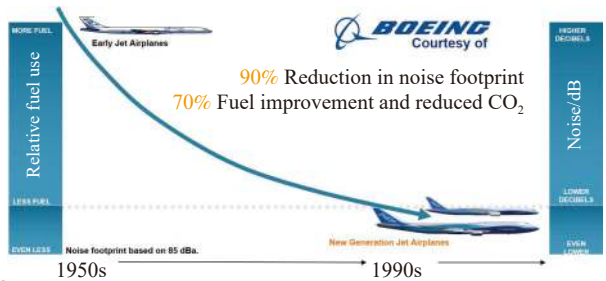


图3 飞机相对油耗及噪声下降的趋势^[14]

Fig. 3 Development trends of relative fuel consumption and noise reduction of commercial aircraft^[14]

目前常见的吸声材料技术包括微穿孔板和多孔材料两种^[15-18]。根据声学的吸声原理，穿孔板

和/或多孔材料尚需要集成一个空腔才能实现吸声效果。由于穿孔板和多孔材料本身均不具备承载能力，因此目前一种比较先进的应用方式是使用蜂窝作为芯材，制备面板为穿孔板和多孔材料的夹芯复合材料结构，以实现力学性能的兼顾^[19-21]，这方面最有代表性的技术应用成果也许就是航空发动机短舱中的声衬结构。

航空发动机的声衬结构主要由穿孔板、蜂窝夹芯层及背板等构成^(图4)，这里既包括材料技术，更是一种结构设计和制造技术。目前，声衬结构已广泛应用于民用发动机短舱，用来吸收风扇、涡轮及喷流噪声，但声衬结构的吸声技术仍在持续提升当中，例如多层声衬技术、多自由度声衬技术、蜂窝内填充吸声内衬技术等^[22-25]，其发展目标是更高的吸声效率和结构效率等。



图4 航空发动机短舱声衬^[25]

Fig. 4 Acoustic liner for aircraft engine nacelle^[25]

根据以上的技术发展现状分析，要在保持材料结构原有的、较优秀的性能基础上，附加特定的功能特性，特别是结构导电性或结构吸声/隔声特性，关键在于这种功能附加复合材料的尺度、多层次结构的设计及其材料与结构的制造技术。为此，本文以4种结构导电或结构吸声一体化复合材料为例，介绍结构功能一体化复合材料的功能与设计原理、材料制备及结构-功能效果的测试评价方法。

1 层间功能性插层的导电增韧一体化复合材料技术

我们之前研究了通过导电功能化的聚合物纤维无纺布插层，在复合材料层内构造出轻质高效的三维导电网络结构，使复合材料的导电性和层间断裂韧性均显著提高^[4]。由于这种复合材料电导性能提高的基本机制依赖于平面和厚度方向上

导电纤维之间的有效接触，因此，功能化插层复合材料导电性的提高程度与材料压实程度紧密相关。

1.1 压实度对功能化插层复合材料导电性能的影响

如前所述，既然碳纤维自身有一定的导电性，而导电介质间的导电机制就是电接触，其实就是简单的机械接触，因此，一个逻辑的推理就是研究碳纤维聚集体在没有树脂情况下呈现一种什么样的导电特性？为此，首先测试研究了干态单向碳纤维聚集态的导电情况^[26]。在这个试验中，测试基准是将未浸润树脂的干态单向碳纤维 0°/90° 层状化叠合，这组试样标记为“Control-D”，然后在万能材料试验机上逐渐压实，即以压力为自变量，记录其电阻随压实力的变化，即以碳纤维叠合物厚度方向的电阻 R_{tt} 为函数，试验中间变量为叠合层数，测试结果见图 5。其中，厚度方向电阻率记作 R_{tt} (下脚标 tt 代表 Through thickness)，

碳纤维 (CF) 体积分数记作 V_{CF} 。可见，随着压实力的提高，叠合物的厚度与电阻急剧减小，然后迅速趋向一个极限值。叠合层数越多，叠合物的厚度及其极限值越大，其电阻及其极限值越小。显然，这个电阻就是碳纤维叠合物中各碳纤维界面之间及 0°/90° 碳纤维铺层间的接触电阻之和，而完全排除了树脂材料的影响。

原理上，单向碳纤维铺层内的接触电阻应该大于 0°/90° 碳纤维铺层间的接触电阻，因此我们把注意力集中在 0°/90° 碳纤维的铺层间，并通过将一层薄薄的柔性导电纱^[4, 27] 铺设于 0°/90° 碳纤维铺层间，来观察接触电阻的变化情况。本文中，柔性导电纱标记为 NPV(Nickel-plated polyester veil)，而这组试样被标记为“FIT-D”(Function-alized interlayer technology, FIT)(图 5)。由图可见，在同样的碳纤维体积分数条件下，在 0°/90° 碳纤

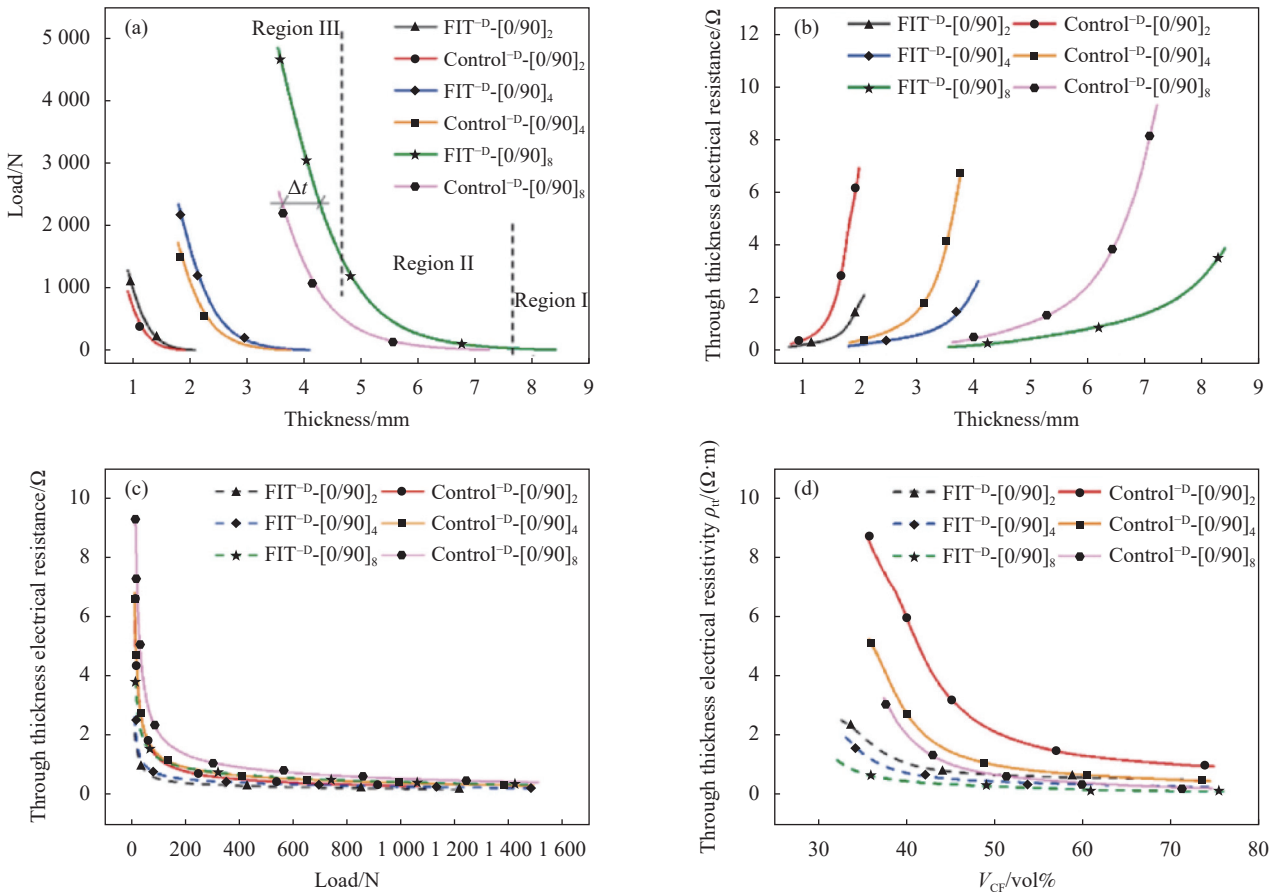


图 5 压实力对不同干态碳纤维 (CF)(无树脂) 正交铺层叠合物的影响: (a) 压实力-厚度曲线; (b) 垂直方向电阻 R_{tt} -厚度曲线; (c) R_{tt} -压实力曲线; (d) 垂直方向电阻率 ρ_{tt} -碳纤维体积分数 V_{CF} 关系曲线^[26]

Fig. 5 Effect of compaction on different dry cross-stacked carbon fiber (CF) fabrics: (a) Compression load-thickness curves; (b) Through thickness resistance R_{tt} -thickness curves; (c) Relationship between R_{tt} and compression load; (d) Relationship between through thickness electrical resistivity ρ_{tt} and carbon fiber volume fraction V_{CF} ^[26]

维铺层间引入柔性导电纱可以有效地减小层间电阻。当碳纤维叠层的厚度恒定时，对图 5 实验所获取的载荷-厚度- R_{tt} 曲线进行进一步的数据处理，得到 R_{tt} 与碳纤维铺层层数 (n) 的关系 (图 6)。该图显示， R_{tt} 在 250 N、500 N 和 1 000 N 恒定压实载荷下的层数- R_{tt} 的函数关系如下：

$$R_{tt} = kn + R_0 \tag{1}$$

其中： n 是层数； k 是斜率； R_0 是曲线截距。曲线的线性表明， R_{tt} - n 关系符合串联电阻模型，因此， R_{tt} 可以视作所有串联电阻的总和，而 R_0 可以视作碳纤维铺层的初始电阻 (即“零”层碳纤维铺层时的“虚拟”接触电阻)， k 可以视作该叠层体系的电阻率。

仔细观察并比较上述 R_0 和 k 的数值，可以明显地发现，每个 CF 叠合物体系的电阻率数值 ($k \approx 0.047$ 、 0.032 和 0.021) 大约比初始电阻值 ($R_0 \approx 0.46$ 、 0.32 和 0.22) 低一个数量级。含有 NPV 导电插层的叠层物的 R_{tt} 极低，其 k 和 R_0 的数值大约低于 CF 叠合物体系两个数量级，而 FIT^{-D} 试样的数值介于二者之间。上述关系不仅揭示了为什么插入 NPV 导电功能层可以提高碳纤维层压板的垂直导电性能，同时也说明了压实程度越高，叠合体系的电阻率和初始电阻值也就越小。

图 7 所示为公式 1 中 k 和 R_0 值在 100 N 到 2000 N 压力下的变化规律，由图可见，在任何给定的荷载压力下，FIT^{-D}s 的“虚拟”接触电阻始终低于其相对应的 Control^{-D}s，同时其差值随着压实情况的增大而减小。

事实上，叠合物体系的碳纤维空间架构包括层间和层内结构，其中，CF 层内结构依次由 CF 的束间结构和束内结构所组成。当施加荷载时，叠合物的层间结构首先被逐渐压实，其次是层内，最后才是束内。正是由于 NPV 填充了叠合物体系的层间空间，使 FIT^{-D}s 在较低压实度的情况下表现出比对照组更小的垂直电阻。

考虑到空气也是绝缘的，这个结果应该与同样铺层、同样纤维体积分数的树脂基复合材料的情况相似，但 k 值应当有所不同。图 8 所示为在 $[0/90]_4$ 铺层条件下，含有环氧树脂并固化后的叠合物 Control^{-E}、FIT^{-E} 和干态 (无树脂) 叠合物 Control^{-D}、FIT^{-D} 的垂直电阻率和碳纤维体积分数之间的关系曲线。相似地，Control^{-E} 的垂直电阻率始终远远高于 FIT^{-E}。

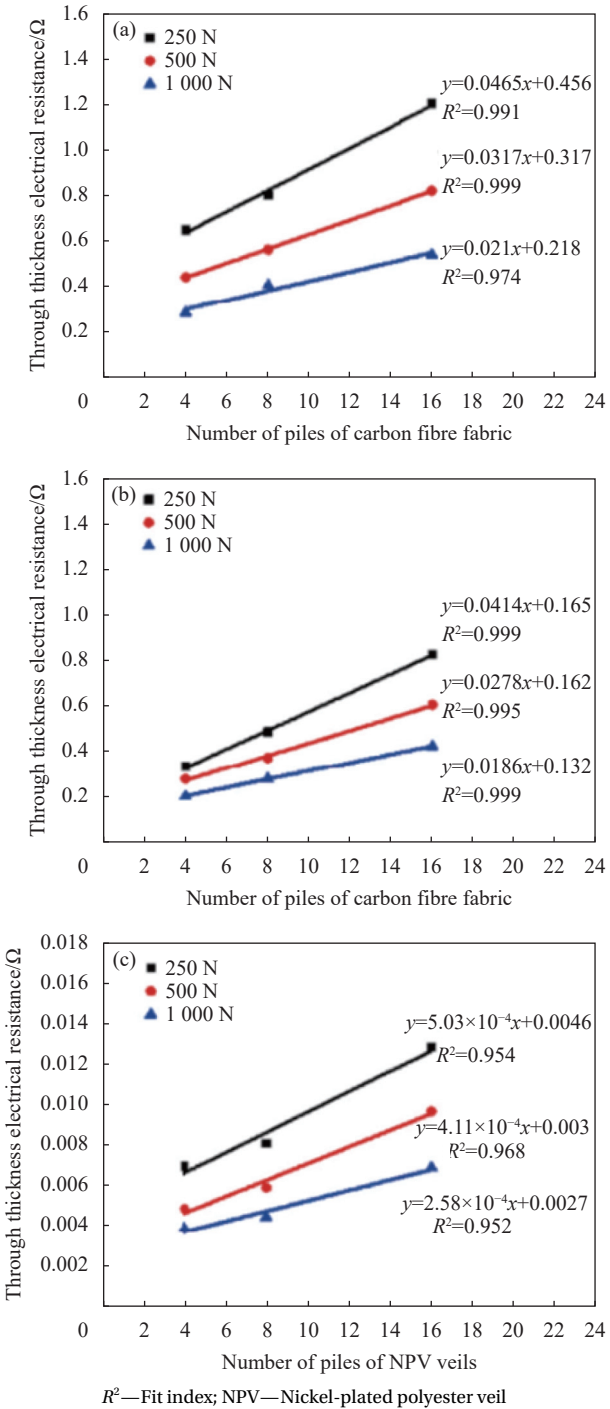


图 6 干态叠合物 (无树脂) 的垂直电阻 R_{tt} -铺层层数 n 曲线: (a) 正交叠合的碳纤维单向织物; (b) 正交叠合的碳纤维单向织物层间插入柔性导电纱 (NPV); (c) 纯 NPV 叠合物^[26]

Fig. 6 Relationship between R_{tt} and number of plies n for dry stacks: (a) Cross-stacked carbon fiber unidirectional fabrics; (b) Cross-stacked carbon fiber unidirectional fabrics interleaved with NPV; (c) Cross-stacked NPV^[26]

值得注意的是，对于 FIT^{-E} 和 FIT^{-D} 之间的垂直电阻率的差异并不明显。在更高的压实情况下，FIT^{-E} 的垂直方向电阻率 (ρ_{tt}) 甚至是所有研究样本

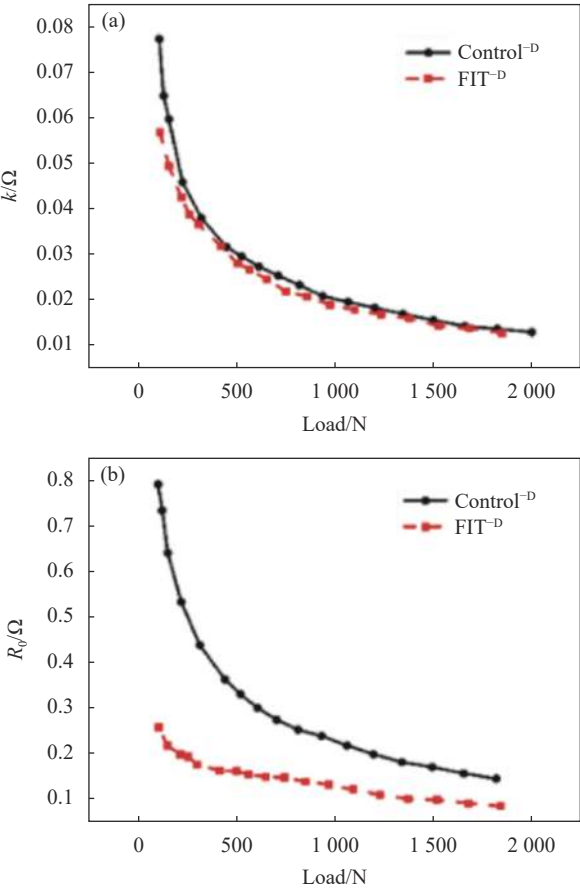


图7 叠合物体系电阻率 k 与压实力 (a) 及“虚拟”接触电阻 R_0 与压实力之间的关系 (b)^[26]

Fig. 7 Resistance of laminate system k (a), and virtual interfacial contact resistance (R_0) as a function of load for Control^{-D} and FIT^{-D} specimens (b)^[26]

中最低的 (图 8)。为了解释这一现象，我们研究了环氧树脂浸渍并固化后复合材料的有效树脂含量 (ω_{resin})，其定义为单位面积的树脂残余质量，如下式所示：

$$\omega_{\text{resin}} = M_T/A - n_1 m_{\text{CF}} - n_2 m_{\text{NPV}} \quad (2)$$

其中： m_{CF} 和 m_{NPV} 分别是 CF (200 g/m²) 和 NPV (42 g/m²) 的面重； n_1 和 n_2 分别是使用的 CF 层数和 NPV 的层数； A 是样品的面积 (m²)； M_T 是通过电子天平测得的样品的总质量。

如图 9 所示， ω_{resin} 随着碳纤维体积分数的增加而线性减小，Control^{-E} 和 FIT^{-E} 试样对应的两条曲线几乎平行。进一步地，FIT^{-E} 的树脂含量从约 700 g/m² 降至 300 g/m²，其对应于的 V_{CF} 从 55vol% 增加至 65vol%。而在相同 V_{CF} 的情况下，Control^{-E} 的树脂含量要高约 100 g/m² 至 150 g/m²。该结果表明，当 NPV 作为插层时，CF 层之间的树脂基体在压力下从层间中挤出，使 ω_{resin} 显著降低。换言之，具有一定柔性压缩性的 NPV 占据了原本

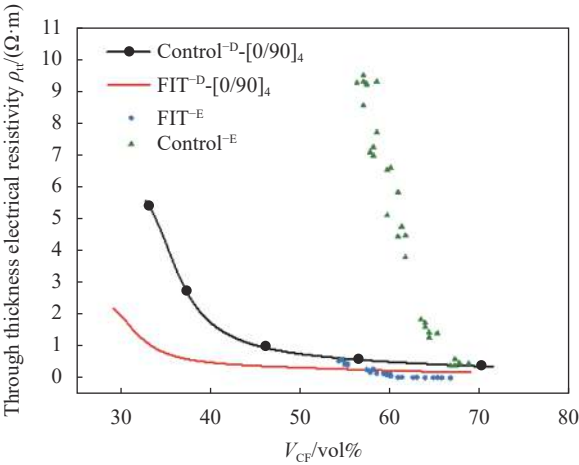


图8 厚度方向电阻率 ρ_{tt} 与碳纤维体积分数 V_{CF} 的关系 (其中，实线为无树脂的干态碳纤维叠合物试样，而散点为环氧树脂浸渍并固化后的叠合物试样)

Fig. 8 Through thickness electrical resistivity (ρ_{tt}) versus carbon fibre volume fraction (V_{CF}) for dry cross-stacked specimens (solid lines) and the resin impregnated and cured cross-ply specimens (scatters)

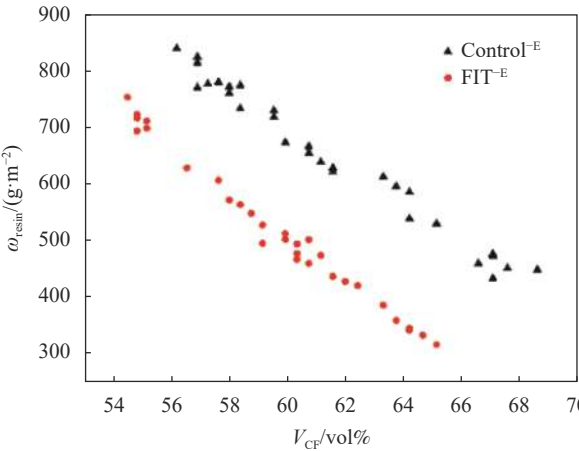


图9 树脂含量 (ω_{resin}) 与碳纤维体积分数 (V_{CF}) 之间的关系

Fig. 9 Relationship between resin content (ω_{resin}) and carbon fibre volume fraction (V_{CF})

富树脂的层间区域，从而在相邻 CF 层之间提供了更多的电通路。

随着压实度的增加，层间树脂渗出，随后，束间树脂也会渗出，实现更致密的机械接触。当 V_{CF} 约 68vol% 时，不同试样 (即 FIT^{-E}、FIT^{-D}、Control^{-E} 和 Control^{-D}) 的 ρ_{tt} 范围趋于狭窄，约为 0.016~0.4 $\Omega \cdot \text{m}$ ，它定义了这种复合材料试样的最高电导率 (图 5)。这就是层间功能化技术 (Functionalized interlayer technology, FIT) 复合材料具有最高全厚度电导率的结构机制，如图 10 所示。

鉴于已证明的串联电阻导电机理，FIT 复合材料的垂直电导率可通过改变 NPV 配置层数而进

行调整。图 11 显示了在相似碳纤维体积分数条件下选择性插入复合材料中的 NPV 层数与 ρ_{tt} 之间的关系。随着 NPV 插入层数的增加, 复合材料的垂直电阻率值 (ρ_{tt}) 逐渐非线性地收敛减少。

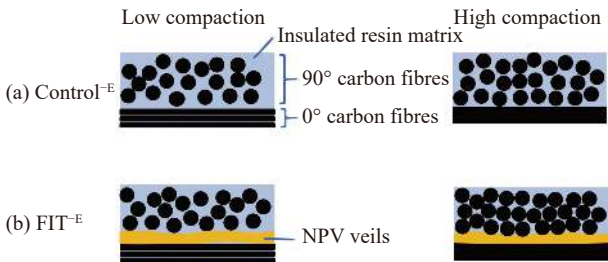


图 10 NPV 在低压实和高压实情况下的厚度方向导电示意图: (a) Control^{-E}; (b) FIT^{-E}

Fig. 10 Schematic illustration regarding the through thickness conductive contacts of NPV at low and high compaction: (a) Control^{-E}; (b) FIT^{-E}

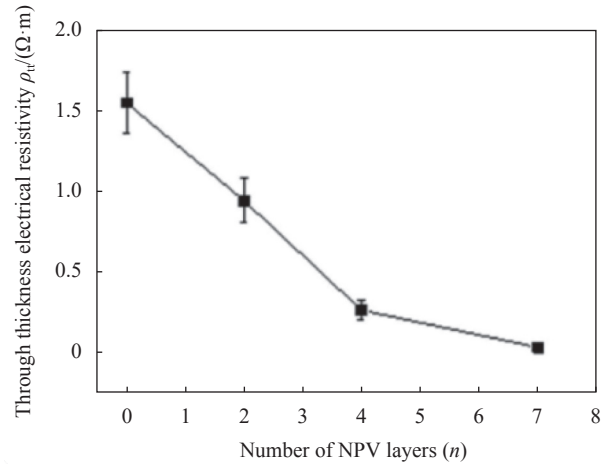


图 11 ρ_{tt} 与 NPV 插层层数的关系^[26]

Fig. 11 Effects of the number of NPV layers on ρ_{tt} ^[26]

1.2 层间导电性与层间增韧一体化技术

如前所述, 通过 FIT 已经证明可使碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 的导电性和韧性均显著提高。Guo 等的先期研究发现^[28], 使用表面负载纳米银线的尼龙无纺布作为功能化插层, CFRP 厚度方向电导率从 12 S/m 提高到 138 S/m, 同时 I 型和 II 型层间断裂韧性也分别提高了 118% 和 227%; 而我们上一节的研究发现^[4], 选择 NPV, CFRP 厚度方向的导电率可以提高到 529 S/m, 同时 I 型和 II 型层间断裂韧性也分别提高了 59% 和 31%, 下面进行详细介绍。

I 型层间断裂韧性测试中结果如图 12 所示, 可见在 I 型层间张开载荷下, 功能化插层试样 FIT^{-I} 具有的更高的极限载荷和更大的延展性及在

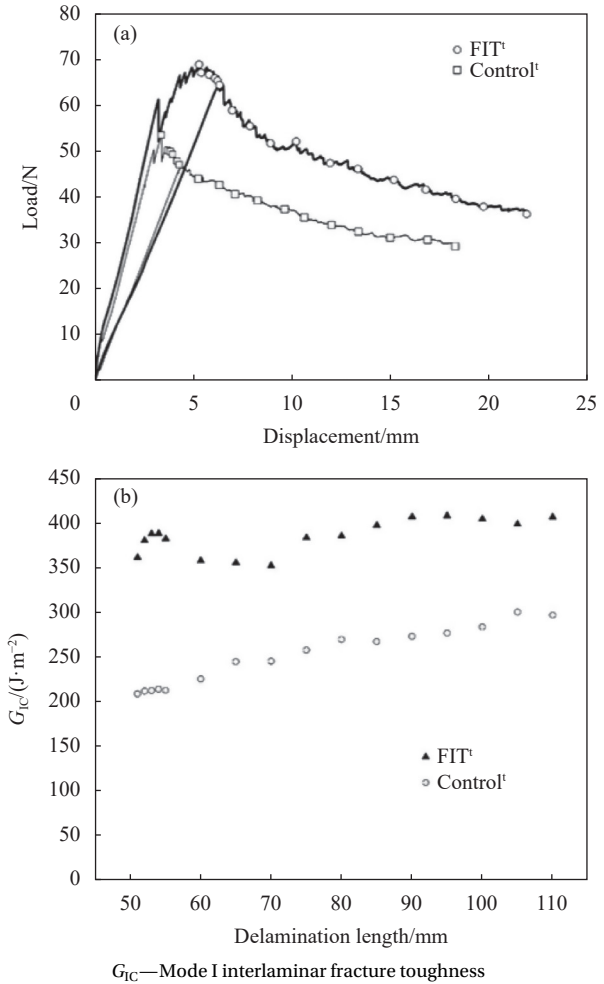


图 12 功能性导电插层试样 FIT^{-I} 与无插层对比试样 Control 的 I 型层间断裂韧性测试结果比较: (a) 载荷-位移曲线; (b) I 型层间断裂阻力 R 曲线^[4]

Fig. 12 Result and comparison of FIT^{-I} specimen and Control specimen in Mode I interlaminar fracture toughness test: (a) Typical load-displacement curves; (b) Typical R-curves of Mode I fracture toughness test^[4]

全部的张开裂纹扩展中, 具有更高的 I 型层间断裂韧性值, 即 G_{IC} 。

SEM 微观观察试样断口的断裂面两侧 (图 13), 发现分层明显发生在功能插层内, 表明功能性插层和碳纤维层之间的粘合强度高于功能性插层本身的张开强度。I 型层间断裂表面的 SEM 图像还观察到大量纤维拔出和纤维断裂, 这表明层间已建立了纤维桥接、裂纹尖端的钉扎机制和应力屏蔽效应等, 它们的共同作用提升了裂纹进一步扩展张开所需的阻力载荷。

II 型层间断裂韧性测试结果如图 14 所示, 这个结果与 I 型层间断裂韧性的测试结果 (图 12) 类似, 功能化插层试样 FIT^{-I} 具有的更高的层间剪

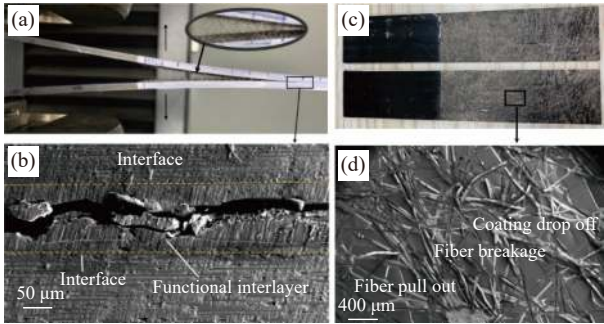


图 13 功能性导电插层试样 FIT[†] 的 I 型层间断口照片: (a) I 型断裂韧性测试照片; (b) 开裂处侧向电镜照片; (c) 断口整体形貌; (d) 断口局部放大照片^[4]

Fig. 13 Photograph of interleaved specimen FIT[†] in Mode I interlaminar fracture test: (a) Fracture open photograph; (b) SEM image at crack region; (c) Plane view of the fracture surface; (d) Zoom-in photograph of fracture surface of (c)^[4]

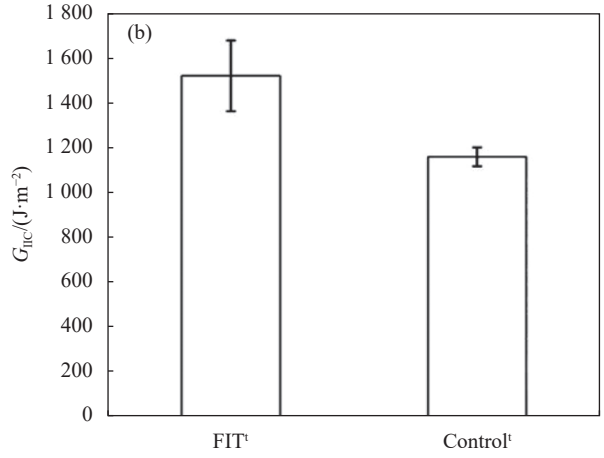
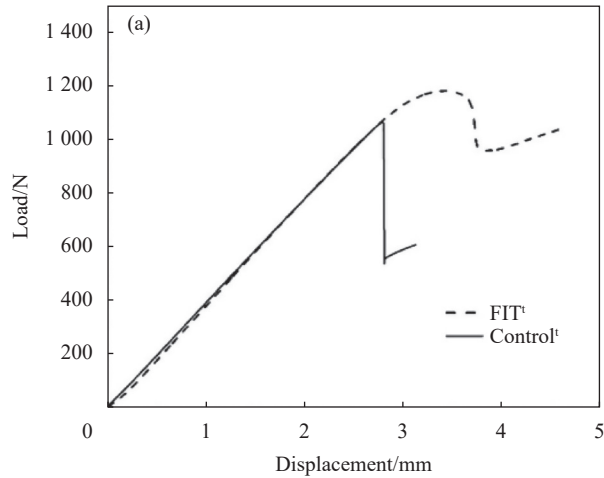


图 14 功能性导电插层试样 FIT[†] 与无插层对比试样 Control 的 II 型层间断裂韧性测试结果对比: (a) 典型载荷-位移曲线; (b) II 型层间断裂韧性 G_{IIc} 数值^[4]

Fig. 14 Result and comparison of FIT[†] specimen and control specimen in Mode II interlaminar fracture toughness test: (a) Typical load-displacement curves; (b) G_{IIc} values of Mode II interlaminar fracture toughness^[4]

切极限载荷和更大的延展性及在全部的剪切裂纹扩展中, 具有更高的 II 型层间剪切断裂韧性值 G_{IIc} 。

图 15 显示了 II 型断裂韧性测试中 CFRP 的侧视结果。根据裂纹区域横截面的 SEM 图像, 剪切裂纹主要产生在碳纤维层/功能性插层材料的界面上及在功能性插层内部。在功能插层中也观察到大量的功能化纤维拔出和断裂(图 5), 这表明 II 型剪切分层主要是由功能性插层材料本身的内聚破坏和插件的内外粘合破坏的综合作用所决定的。而典型的内聚破坏和界面破坏并存, 表明裂纹随机地从一个界面偏转到另一个界面, 并伴有许多微界面破坏和材料屈服。

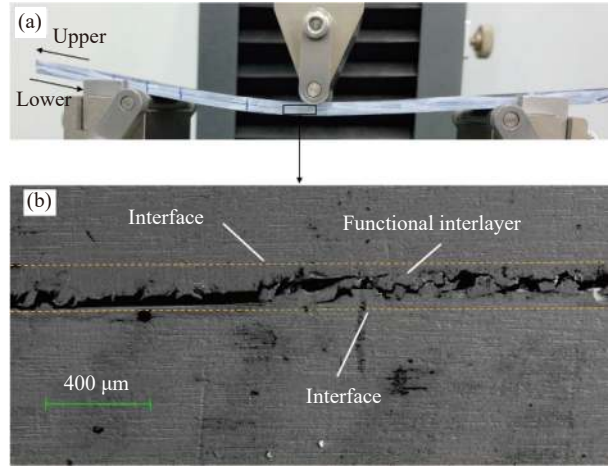


图 15 功能性导电插层试样 FIT[†] 的 II 型层间断裂韧性侧视图: (a) Mode II 试验中; (b) II 型裂纹的 SEM 图像^[4]

Fig. 15 Side view photograph of interleaved specimen FIT[†] in Mode II interlaminar fracture test: (a) Mode II test; (b) SEM images at crack region^[4]

使用 NPV 会在功能化层间产生内外两个固有的界面。参考 SEM 图像(图 13、图 16), 在 I 型和 II 型测试之后, 一些金属涂层从聚酯纤维上剥离, 表明聚酯纤维和金属涂层之间的界面相对较弱, 可能会限制整体增韧效率^[1,28]。同时, 在功能性插层层内断裂的地方, 功能性纤维的拔出和断裂较少, 特别是在 I 型张开载荷的情况下。

总结性地看, 功能性插层材料—本文中的 NPV 材料, 在碳纤维增强叠层复合材料层间的增韧作用类似于尼龙搭扣 (Velcro) 的机械性连接, 它主要是在碳纤维铺层的层间建立了一种机械性的、树脂与 NPV 互穿的双连续网络结构。

2 内织导电纬纱的导电增韧一体化复合材料技术

树脂基复合材料实现导电化的机制在于构建

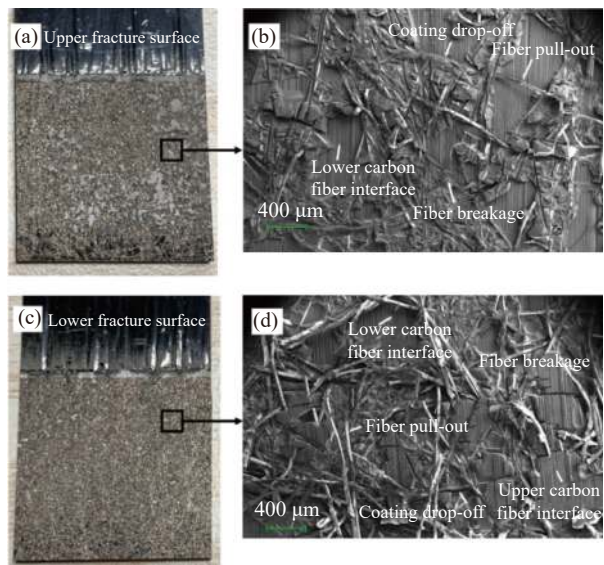


图 16 II 型层间断裂韧性表面形态：(a) 上表面；(b) 上表面电镜；
(c) 下表面；(d) 下表面电镜^[4]

Fig. 16 Plane view of Mode II fracture surface for interleaved specimen FIT: (a) Observation of upper fracture surface; (b) SEM image at upper fracture surface; (c) Observation of lower fracture surface; (d) SEM image at lower fracture surface^[4]

材料内部的空间导电网络，显然，这个导电网络的密度越大，其导电率越高。第 1 章介绍的碳纤维复合材料 FIT^[29] 是实现复合材料导电增韧结构一体化的可行方法之一，其关键就是在叠层复合材料中相邻两个碳纤维铺层之间的富树脂区建立起电联通，其所采用的层间富树脂区插入材料包括金属化碳纤维毡^[30]、非织造造纸^[31]或导电化处理的热塑性薄膜插层^[32]、银纳米线负载插层^[28, 33-34]等。然而，虽然上述方法可以有效提高复合材料层间的导电性能，但碳纤维层本身沿厚度方向的电导率却并没有得到提高。本节则介绍一种基于内织导电纬纱的导电增韧一体化复合材料技术^[35-36]，这种织造技术也称为内织导电纬纱技术 (Interwoven conductive weft fabric, IWCWF)，是一种借助导电纬纱织入，在复合材料的碳纤维铺层内构建起导电通路，从而直接提高作为增强体的碳纤维布的导电性能，进而在复合材料内部构建三维导电网络，提高复合材料整体导电性的技术，而不仅仅涉及复合材料内富树脂的层间的导电性。同时，导电纬纱的引入还改变了层间裂纹的扩展路径，提高了裂纹扩张阻力，对复合材料起到增韧作用。更重要地，还提出了一种随机叠层网络模型来预测内织导电纬纱复合材料在厚度方向上的导电性能，为内织导电纬纱复合材料导电性能

的设计提供理论预测和指导。

2.1 内织导电纬纱/连续碳纤维织物的设计与制备

内织导电纬纱织物的设计原理是在碳纤维织物中引入多功能的导电纬纱，以代替在传统单向碳纤维织物中仅发挥织物定型作用的普通纬线，这样，原本只起定型作用的单一功能纬纱在继续发挥其预制功能的基础上，还可以发挥导电与增韧的作用，从而赋予复合材料多功能性。

我们设计并制备了两种以碳纤维为经纱，导电镀银聚酯纱线为纬纱的 IWCWF 导电织物^[37]，其中，导电纱线有粗细两种。这种 IWCWF 内织导电纬纱的碳纤维织物的示意图如图 17 所示，含有粗细两种纬纱的导电织物的光学照片如图 18 所示。

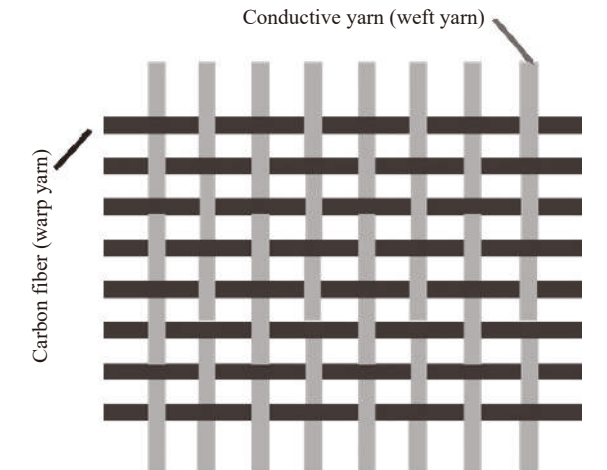


图 17 内织导电纬纱/连续碳纤维织物 (IWCWF) 的结构示意图

Fig. 17 Schematic illustration of the inter-woven conductive weft/continuous carbon fiber fabric (IWCWF)

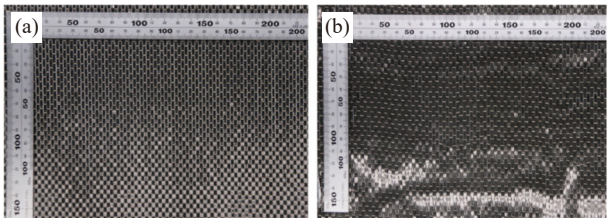


图 18 粗细两种 IWCWF 的光学照片：(a) 粗导电纬纱织物；
(b) 细导电纬纱织物^[35]

Fig. 18 Photographs of two sets of IWCWFs: (a) Thick conductive yarn fabric; (b) Fine conductive yarn fabric^[35]

粗细两种导电纬纱的显微截面照片 (SEM) 如图 19 所示。由图 19(a1) 和 19(a2) 可知，粗导电纱线由约 400 根镀银聚脂微纤维组成，每根微纤截面形状近似圆角三角形，其截面宽度约为 15 μm。每根微纤表面包裹着一层厚度约为 1 μm 的银镀层。如图 19(b1) 和 19(b2) 所示，单根细纬纱由约 100

根与粗纬纱相同的镀银聚脂纤维组成。

将上述两种 IWCWF 碳纤维织物正交铺层，采用树脂转移模塑成型 (RTM) 工艺制备成复合材料，即可获得基于导电纬纱织物的复合材料，其结构模型如图 20 所示。图中，椭圆截面粗纤维代表碳纤维经纱，圆截面细纤维代表导电纬纱。如图 20(b) 所示，导电纬纱在复合材料内部构建了一个三维导电网络，从而同时提高复合材料厚度方向和面内方向的电导率。

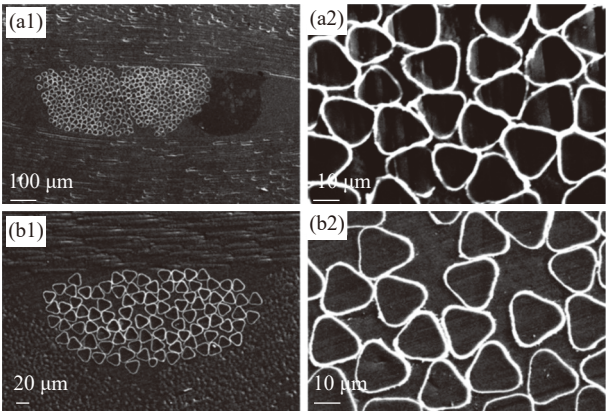


图 19 粗细两种导电纱线的 SEM 截面照片：(a) 粗纬纱导电织物；(b) 细纬纱导电织物^[35]

Fig. 19 SEM images of the cross-section of two kinds of conductive yarn: (a) Thick conductive yarn; (b) Fine conductive yarn^[35]

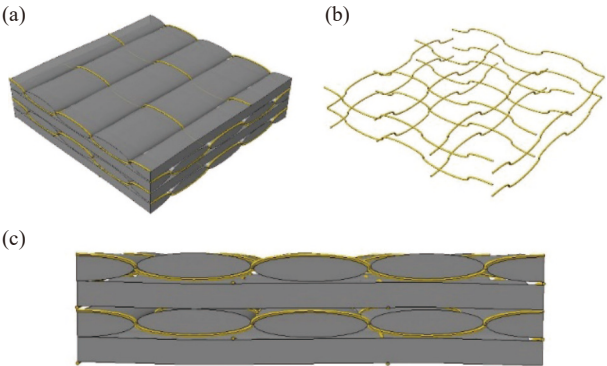


图 20 基于 IWCWF 的复合材料结构模型：(a) 包括碳纤维和导电纬纱的模型；(b) 仅显示导电纬纱的模型；(c) 导电纬纱复合材料模型的截面图

Fig. 20 Structural model of composite based on IWCWF: (a) Model including both carbon fibers and conductive weft yarns; (b) Model only including conductive weft yarns; (c) Cross-section image of the model

2.2 内织导电纬纱复合材料厚度方向导电结构建模

基于上述结构模型，提出一种随机叠层网络模型 (SONM)^[35] 来预测 IWCWF 导电织物复合材料的厚度方向电导率。该理论模型的核心思想是将每根导电纬纱视为具有固定电阻率的电导体。此外，模型还假设任意两根导电纬纱在相交处形成

理想的导电节点，并忽略碳纤维经纱的导电作用。基于上述假设，导电复合材料中由导电纬纱组成的导电网络可转化为由节点 (顶点) 和边组成的可计算的网络模型。如图 21 所示，在连通图形式的网络模型中，每条边代表一根导电纬纱的长度，每个节点表示相邻织物层中两根相交纬纱的接触点。通过多次生成导电纱线在空间中的随机布局情况，并转化为可计算模型，最终可以计算得出这种导电复合材料的厚度方向电导率。

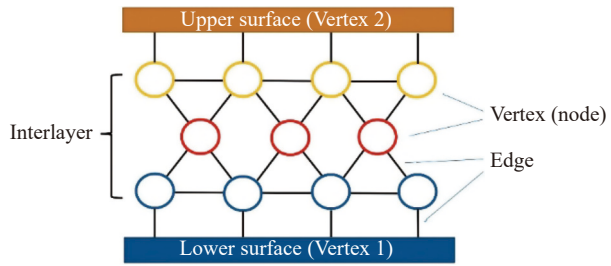


图 21 连通图形式的随机叠层网络模型^[35]

Fig. 21 A schematic of the stochastic overlap network model in connected graph form^[35]

基于随机叠层网络模型计算得出的导电织物复合材料的厚度方向电导率 (Through thickness electrical conductivity, TTEC) 值与实际测试得到的 TTEC 值如图 22 所示。结果表明，内织导电纬纱复合材料的 TTEC 实测值较普通纬纱定型的对照系复合材料提高了 2~3 个数量级，其中，细纬纱内织导电织物复合材料 (Fine conductive weft, fIC) 的垂直电导率达到 45.5 S/m，而粗纬纱内织导电织物复合材料 (Thick conductive weft, tIC) 的垂直电导

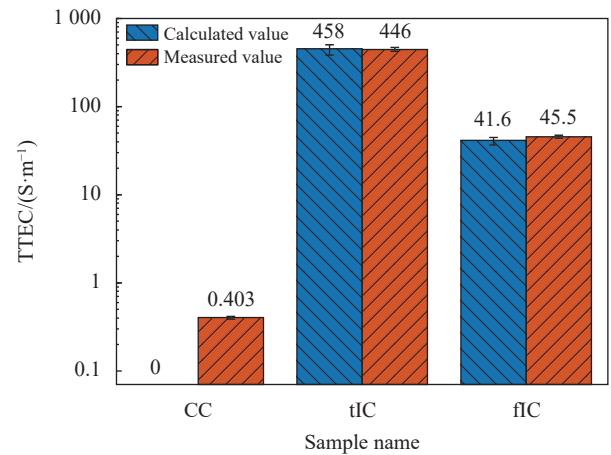


图 22 普通纬纱定型复合材料 (CC) 与粗导电纬纱 (tIC) 及细导电纬纱 (fIC) 导电复合材料的厚度方向电导率 (TTEC) 及其对比^[35]

Fig. 22 Through thickness electrical conductivity (TTEC) of common weft shaped composite (CC) and thick conductive weft (tIC) and fine conductive weft (fIC) conductive composite and their comparisons^[35]

率更是高达 446 S/m，这充分证实了采用内织导电纬纱技术提高复合材料厚度垂直方向电导率的可行性和技术优势，同时也表明导电纬纱的选择和设计是影响复合材料 TTEC 值的主要因素。

同时也可以看见，计算得到的 TTEC 值与实测值的结果相近，说明了这种随机叠层网络模型的预测准确度较好，为设计、预测和优化此类复合材料的导电性能提供了较可靠的理论方法，可以用来指导导电织物复合材料的设计与制备。

2.3 内织导电纬纱/连续碳纤维增强复合材料的层间断裂韧性

同上，继续采用普通纬纱定型的碳纤维织物和 fIC，分别制备了常规 (Common composite, CC) 和导电织物复合材料 (Conductive fabric composite, IC)，常规和导电织物复合材料的表面形貌和截面形貌如图 23 所示。图 23(b1) 和 23(b2) 中，可以观察到在复合材料表面规律分布的碳纤维和导电纬纱。在图 23(a3) 和 23(b3) 的复合材料截面图中，还可以清楚地观察到两种复合材料的正交铺层结构。截面中的深色部分是普通纬纱和导电纬纱，其形貌分别如图 23(a4) 和 23(b4) 所示。特别是在图 23(b4) 中观察到上下两根导电纬纱在复合材料中紧密接触，构成了导电织物复合材料中导电纬纱三维网络的节点。正如前面讨论的那样，正是这种在复合材料内部空间所建立的导电纬纱网络，大幅提升了这种碳纤维叠层复合材料 (复合材料层合板) 各个方向上的导电率。

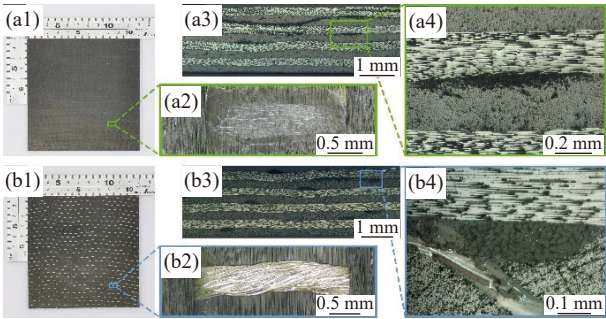


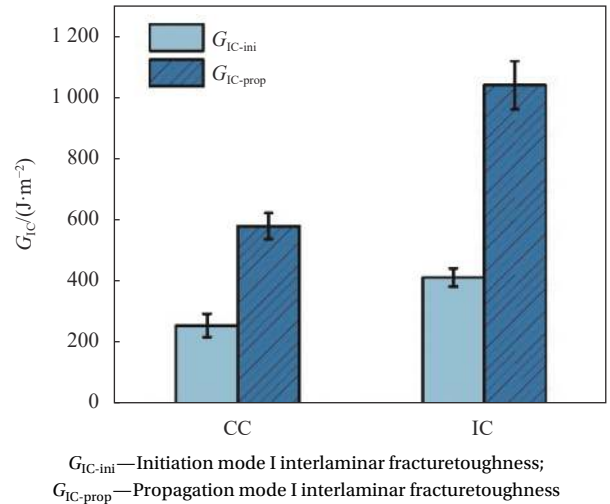
图 23 CC 和导电织物复合材料 (IC) 的表面和截面形貌: CC 表面形貌 ((a1), (a2))、CC 截面形貌 ((a3), (a4))、IC 表面形貌 ((b1), (b2))、IC 截面形貌 ((b3), (b4))^[36]

Fig. 23 Surface photographs and cross-section images of CC and conductive fabric composite (IC):

CC surfaces ((a1), (a2)), CC cross-sections ((a3), (a4)), IC surfaces ((b1), (b2)), IC cross-sections ((b3), (b4))^[36]

CC 和 IC 的 I 型断裂韧性测试结果如图 24 所示。测试结果表明，导电织物复合材料的平均初

始 I 型层间断裂韧性和扩展 I 型层间断裂韧性的值分别为 409 J/m² 和 1 038 J/m²，比常规复合材料提高了约 62% 和 80%。



$G_{IC-init}$ —Initiation mode I interlaminar fracture toughness;
 $G_{IC-prop}$ —Propagation mode I interlaminar fracture toughness
图 24 CC 和 IC 的 I 型层间断裂韧性测试结果^[36]

Fig. 24 Results of Mode I interlaminar fracture toughness tests of CC and IC^[36]

两种复合材料经过 I 型层间断裂韧性测试后的断口形貌如图 25 所示，其中图 25(a) 是层间裂纹的 SEM 侧视图。由图可见，常规复合材料中的普通纬纱展现出相对扁平的截面形貌，层间裂纹因此可以几乎不受影响地在层间区域扩展。相比之下 (图 25(b))，导电复合材料中导电纬纱的横截面呈现出近似椭圆的形状，裂纹的扩展需要绕过或穿过导电纬纱，这显然影响了裂纹扩展的路径，大大增加了层间裂纹扩展的阻力。同时，这一过程还可能导致导电纱线发生断裂，如图 25(b) 所示。

图 25(c1)~25(c4) 和图 25(d1)~25(d4) 分别展示了常规复合材料和导电复合材料 I 型层间断裂韧性双悬臂梁 (DCB) 样条内一处断裂面的表面形貌。在图 25(c1)~25(c4) 中可见，常规复合材料中普通纬纱 (如虚线箭头所指) 基本完好，表面平整，其在样条另一侧留下的压痕也同样平整 (如实线箭头所指)。相比之下，图 25(d1)~25(d4) 所示的导电复合材料样品中的导电纬纱则出现了明显的损伤，其中，加捻导电纬纱上有数根外侧微纤维单丝发生了断裂 (如左下方实线箭头所指)，并在对应一侧留下了留有导电纬纱纹路的印记 (如左上方虚线箭头所示)。这表明，在导电复合材料中产生了比常规复合材料中更多的层间断裂界面。另一根导电纬纱的损伤 (如右下方虚线箭头所指) 则更明显，一小束导电单丝从导电纬纱

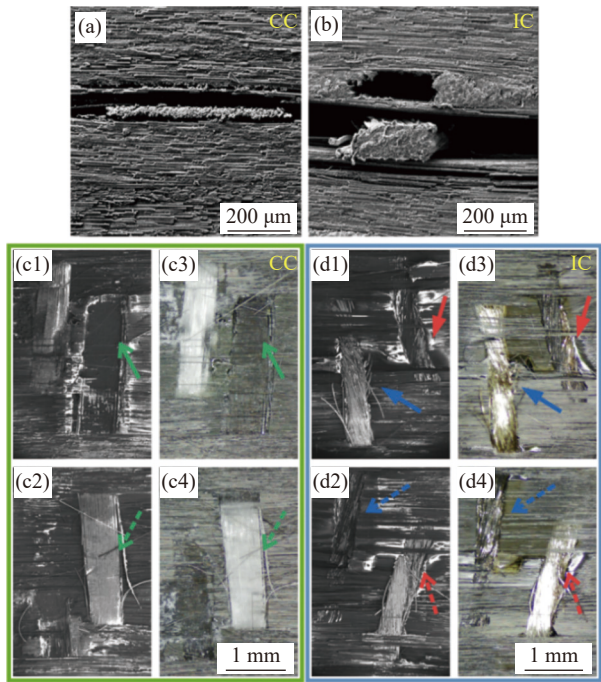


图 25 I 型层间断裂韧性测试后裂纹路径的典型 SEM 侧视图: (a) CC; (b) IC; I 型层间断裂韧性测试后相应断裂表面的典型 SEM 俯视图: 常规复合材料 ((c1), (c2)), 导电复合材料 ((d1), (d2)) 及其相应的光学显微镜图像: ((c3), (c4)) 常规复合材料; ((d3), (d4)) 导电复合材料^[36]

Fig. 25 Typical SEM side views of crack paths after the mode I tests: (a) CC; (b) IC; Typical SEM top views of matching fracture surface after the mode I tests: CC ((c1), (c2)), IC ((d1), (d2)) and their corresponding optical microscopy images: ((c3), (c4)) CC and ((d3), (d4)) IC^[36]

主体上被剥离了下来, 留在了断裂样条另一侧的凹坑内 (如右上方实线箭头所指)。这些不同的断裂形貌表明导电复合材料较于常规复合材料具有更丰富和复杂的裂纹扩展过程, 从而导致更多的层间断裂能量消耗, 因此, 设计并选用合适的导电纬纱材料是制备这种导电纬纱/连续碳纤维增强复合材料的材料学关键。

CC 和 IC 的 II 型层间断裂韧性测试结果如图 26 所示。测试结果表明, 导电复合材料的平均 II 型层间韧性 (G_{IIC}) 的值为 $1\,097\text{ J/m}^2$, 比常规复合材料提高了约 55%。图 27 是这两种复合材料中的典型裂纹扩展路径的 SEM 侧视图。由图 27 可知, 与常规复合材料相比, 导电复合材料中的裂纹扩展路径同样更曲折, 这是由于导电复合材料中的导电纬纱 (如图 27(b) 中箭头所指) 比常规复合材料 (如图 27(a) 中箭头所指) 中对应的普通纬纱占据了更大的空间体积。因此, 考虑到导电复合材料中的层间裂纹扩展需绕过或经过每根导电纱线, 需要更长的断裂扩展路径, 可以合理地推断, 导电纬纱复合材料中的层间断裂过程需要

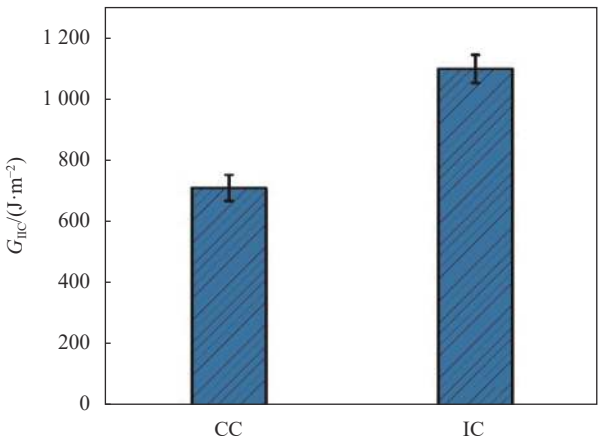


图 26 CC 和 IC 的 II 型层间断裂韧性 (G_{IIC}) 测试结果^[36]

Fig. 26 Results of Mode II interlaminar fracture toughness (G_{IIC}) tests of CC and IC^[36]

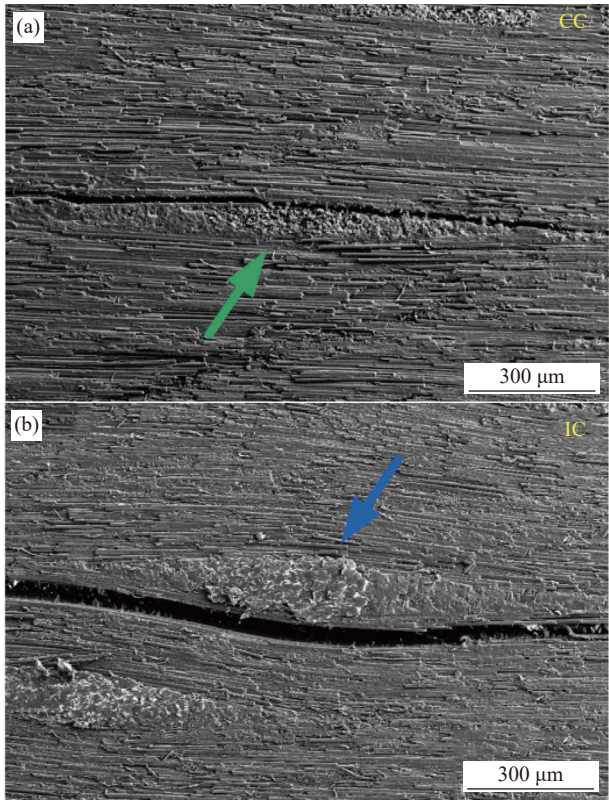


图 27 II 型层间断裂韧性测试后裂纹路径的典型 SEM 侧视图: (a) CC; (b) IC^[36]

Fig. 27 Typical SEM side views of crack paths after the Mode II tests: (a) CC; (b) IC^[36]

消耗更多的能量, 从而导致其具有更高的 G_{IIC} 。上述结果表明, 内织导电纬纱的 IWCWF 复合材料中的导电纬纱不仅可以提供导电通道, 从而大幅提高这种复合材料的导电性能, 同时还可以影响层间裂纹的扩展路径, 从而提高复合材料的 I 型和 II 型层间断裂韧性。本文的 IWCWF 复合

材料的面内导电率和厚度方向导电率分别达到了 22 386 S/m 和 107.5 S/m，相比与普通纬纱定型的常规复合材料，分别提高了 129% 和 133%，因此，IWCWF 复合材料技术提供了一条复合材料的导电增韧一体化技术，是一项具备可观前景的多功能复合材料技术。

3 多级孔填充蜂窝/微穿孔面板夹芯吸声复合材料技术

长久以来，低频噪声的吸收始终是一个挑战性的难题。为了有效地吸收数百赫兹的低频声波，或者用厚达 1m 的混凝土墙，代价不菲；或者用结构复杂的复合材料，造价昂贵。如何使材料实现低频、宽频吸声是目前吸声降噪复合材料技术的重要研究方向。

多孔材料^[38-40]和微穿孔板^[41]是目前吸声材料技术中的两个主要方式，然而这两种方式均存在一定限制。穿孔板难以实现宽频吸声，而多孔材料需要厚度超过噪音波长的 1/4 时才能有效吸声，这都大大限制了这类吸声复合材料技术的应用，而将吸声面板与芯材简单地复合，设计制备夹芯的吸声复合材料(图 28)^[42]，必然会增加吸声结构的结构质量。目前，国内外的研究开发仍难以实现高吸声特性和高力学性能(轻质和高强度)的结构统一。

目前多孔材料的研究主要包括 3 个方向：(1) 对不同种类的多孔材料的选取和测试^[43-45]；(2) 多孔材料的制备方式^[46-48]；(3) 多孔材料的纤维形态和吸声性能的关系^[49-51]。然而这些研究都无法解决多孔材料往往需要较大的厚度才能实现低频声波的吸收的问题。微穿孔板主要通过穿孔内空气与声波的共振实现吸声，这意味着微穿孔板只能在共振频率周围才能实现有效吸声。因此，将二者进行结合是目前吸声复合材料设计中的一种常见选择。

同时，对多孔材料的大量研究表明，在多孔材料中人为地添加另一种尺度的孔隙结构，使其与多孔材料本身的孔隙构成多级孔结构，可以有效地提升多孔材料的低频吸声性能^[52-59]，因此将微穿孔板、多孔材料及多级孔结构相结合，综合各结构吸声的特性与优势，可能实现夹芯结构的宽频吸声；而蜂窝结构可望在不影响结构吸声性能的同时，给予结构足够的力学性能。

3.1 多级孔填充蜂窝/微穿孔面板夹芯吸声复合材料的制备

本文的多级孔材料选择了碳化棉(图 29)^[60]，

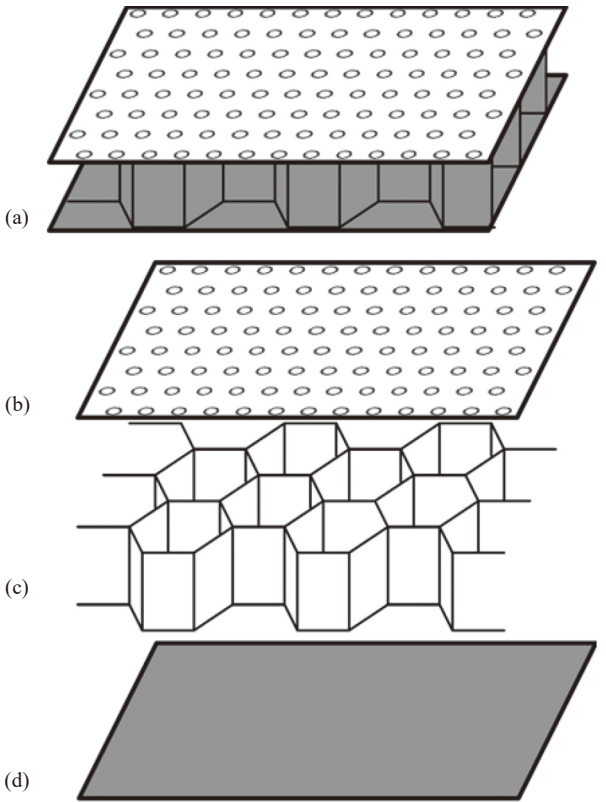


图 28 典型微穿孔板/蜂窝夹芯复合材料结构：(a) 整体结构；(b) 微穿孔板面板；(c) 蜂窝夹芯；(d) 固定底板^[42]

Fig. 28 Typical micro perforated-honeycomb structure: (a) Overall structure; (b) Micro perforated plate; (c) Honeycomb structure core; (d) Rigid bottom plate^[42]

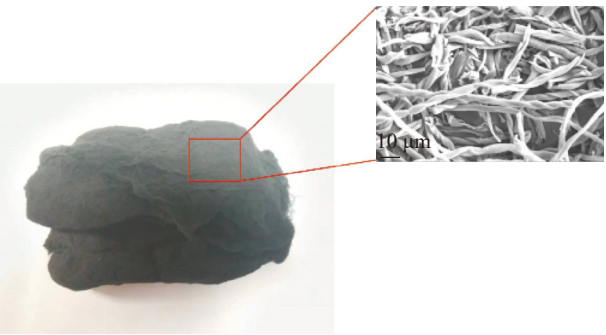


图 29 碳化棉形貌

Fig. 29 Morphology of carbonized cotton

其目的，一是由于碳化棉非常低的密度，可望部分抵消由其带来的复合材料增重；二是由于碳化棉自身的环境稳定性；三是想选择一种天然材料以展示材料技术的“绿色可持续”特性。

微穿孔面板/多级孔碳化棉填充蜂窝的夹芯吸声复合材料的制备流程如图 30 所示^[60]。首先，作为对照试样，将微穿孔面板与蜂窝粘接在一起，形成无填充的对照试验组；同时，在每个蜂窝孔

内填充固定质量的碳化棉，以制备碳化棉填充的试验件；最后，使用特定钢针组及其排布穿透碳化棉，在碳化棉内部形成固定大小的孔径，从而制备出含多级孔结构的填充物，获得第3组试验件。

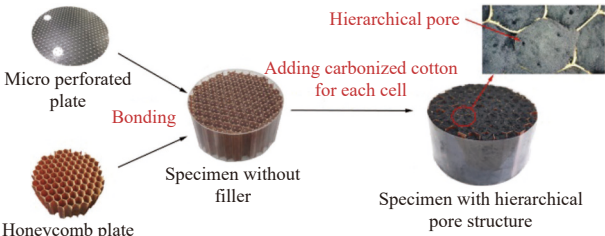


图 30 微穿孔面板/多级孔碳化棉填充蜂窝的夹芯吸声复合材料的制备流程^[60]

Fig. 30 Preparation of micro-perforated plate sound-absorbing composite with honeycomb-hierarchical structure^[60]

3.2 吸声性能测试

3 组夹芯吸声复合材料试样的吸声性能测试结果比较如图 31 所示。

为比较不同材料的吸声性能，通常会将材料在 125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz 和 4 000 Hz 下的吸声系数进行平均，得到平均吸声系数，然后进行比较^[18] (图 31(b))。在本文中，与无填充试验件相比，使用碳化棉填充的试验件有效地提升了复合材料的吸声性能，测试结果表明，材料的平均吸声系数从 (0.220±0.031) 提升至 (0.558±0.006)；而在蜂窝中填充碳化棉多级孔结构则进一步提升了材料的吸声性能，将平均系数由 (0.558±0.006) 提升至 (0.626±0.028)，提升效果明显，特别是在低频阶段。

观察图 31(a) 中吸声系数曲线还可以发现，无填充试验件分别在 1 500 Hz 和 4 000 Hz 有两个吸声峰，此时，整个吸声复合材料中仅存在微穿孔板作为吸声结构，因此吸声曲线展现出了明显的共振吸声特征，即仅能在共振频率附近实现吸声。而当在蜂窝内部填充了碳化棉后，结构整体都展现出了良好的吸声性能，但由于多孔材料的存在，低频吸声特性仍不太有效。最终，当在碳化棉内部制备了多级孔结构后，多级孔结构通过与内部空气的共振作用，在 400 Hz 处形成了一个新的吸声峰，从而显著增强了这种夹芯填充复合材料的低频吸声性能。然而，同样由于共振吸声的特性，当声波频率远离共振频率时，吸声系数迅速降低，在 750 Hz 处形成局部的谷值，并在 220 Hz 以下时吸声系数较仅碳化棉填充试验件更低。综合来看，

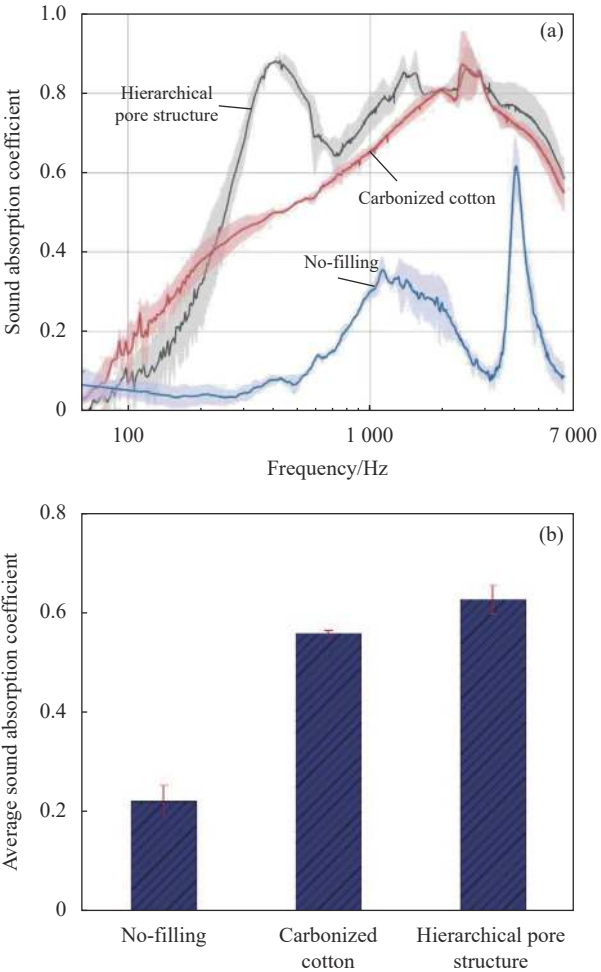


图 31 无填充的对照组、碳化棉填充蜂窝孔的试验组和含多级孔结构碳化棉填充物的试验组的吸声测试结果对比 (其中阴影部分表示不同样品间测试结果的标准差): (a) 吸声系数曲线; (b) 平均吸声系数

Fig. 31 Sound absorption performance test results of no-filling, carbonized cotton, and hierarchical pore structure samples (the shadow around the curves shows the standard deviation from the mean of three samples): (a) Sound absorption curve; (b) Average sound absorption coefficient

多级孔结构的碳化棉填充有效地提升了复合材料的低频吸声性能，并在 200~600 Hz 范围内实现低频段的宽频高吸声性能。

3.3 吸声结构建模分析

为分析微穿孔面板/多级孔结构填充蜂窝夹芯复合材料的吸声机制，特建立了一个理论模型：

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right| \tag{3}$$

其中： α 为吸声系数； Z_s 为材料特征声阻抗； ρ_0 和 c_0 为空气密度和声速。然而，当面对含有复杂结构的材料时，其特征声阻抗难以直接计算得到，因此首先需要对结构进行简化，如图 32 所示。

首先，通过取截面的方式将结构由三维模型转换为二维模型(图 32(a))，随后，将微穿孔板、多孔材料填充和多级孔填充结构进行分解(图 32(b))，其中，多级孔的孔结构与多孔材料为并联关系，微穿孔板与其余结构为串联关系。此时，分别计算 3 个部分的特征声阻抗，并按照串并联关系进行计算，即可得到结构整体的特征声阻抗。

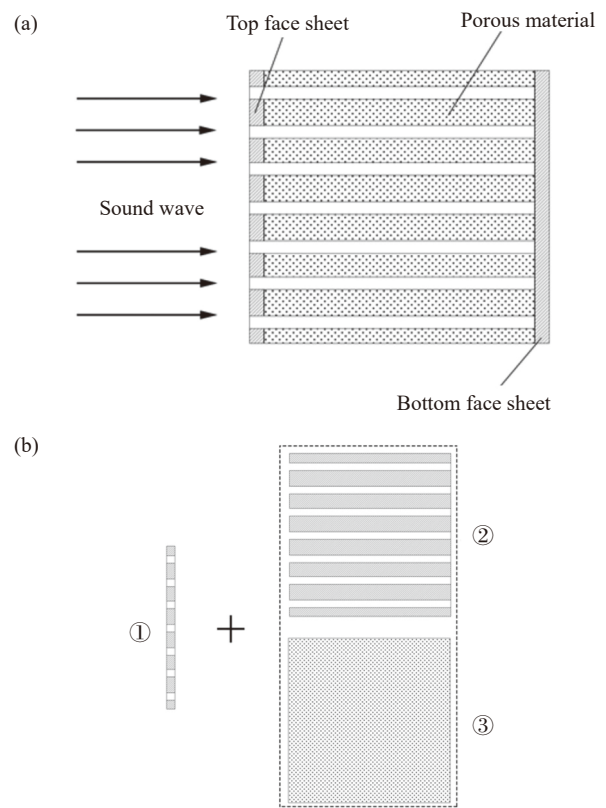


图 32 微穿孔面板/多级孔填充蜂窝结构的夹芯复合材料简化模型：
(a) 二维模型；(b) 分解模型^[60]

Fig. 32 Simplified model of the micro-perforated plate sound-absorbing composite with honeycomb-hierarchical structure: (a) 2D model; (b) Decomposition model^[60]

Ma^[41] 在 1975 年提出了一种微穿孔板的相关计算模型，而多孔材料同样有着相关计算公式，因此，在该结构中仅需得到多级孔结构的计算公式，即可计算出结构整体吸声性能。2003 年，Only 和 Boutin 提出了双孔隙多孔材料的计算公式^[61]，根据这个计算公式，此时，图 32(b) 中的多孔材料和多级孔结构需分别计算两种孔隙下材料的复值弹性模量 K_2 、 K_3 和复值密度 ρ_2 、 ρ_3 ，随后，根据式 (4)、(5) 进行合并。

$$\rho_{23} = \left[\frac{1}{\rho_2} + (1 - \Phi) \frac{1}{\rho_3} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$K_{23} = \left[\frac{1}{K_2} + (1 - \Phi) \frac{w_i}{K_3} \right]^{-1} \quad (5)$$

其中： Φ 是多级孔结构在多孔材料中的穿孔率； w_i 是多级孔结构中大孔与小孔的平均压力比(由于两者直径差远小于 100，此时 w_i 取 1)^[61]。最终，通过将计算得到的 K_{23} 、 ρ_{23} 带入多孔材料特征声阻抗公式，即可得到含多级孔结构填充的多孔材料特征声阻抗 Z_{23} ，将其与微穿孔面板特征声阻抗相加，即可得到复合材料特征声阻抗 Z_s 。最终，代入式 (3)，得到复合材料在各频率下吸声系数。

将上述公式及材料参数输入 MATLAB 进行计算，得到理论模型计算结果如图 33 所示，可以发现理论计算结果与实验结果吻合良好。碳化棉填充试验件和多级孔碳化棉填充的蜂窝夹芯复合材料试验件的平均吸声系数，计算结果分别为 0.556(误差 0.4%) 和 0.731(误差 16.8%)。可以发现，多级孔填充蜂窝夹芯复合材料的理论模型与实验结果有着更大的误差，这主要是由于在理论计算时，多级孔结构的穿孔直径以钢针的直径进行计算，但这一计算方式忽略了疏松的碳化棉自身弹性所导致的恢复作用，因此实际结构中穿孔直径会更小。此外，由于理论模型中忽略了结构自身的共振吸声，因此在 2 500 Hz 处的吸声峰在理论模型的计算中并未出现。

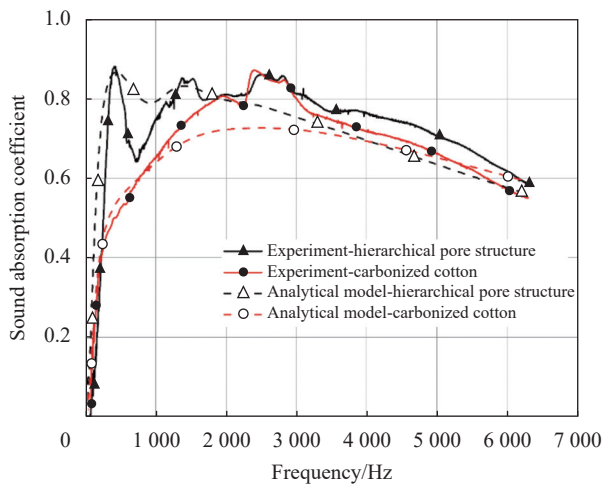


图 33 碳化棉填充试验件和含多级孔填充物试验件的理论模型
计算结果与实验结果对比^[60]

Fig. 33 Results of analytical modelling compared with experimental data for the carbon cotton and hierarchical pore structures^[60]

总结性地看，微穿孔面板/多级孔填充蜂窝的夹芯吸声复合材料具有良好的宽频、特别是低频吸声特性，其对应的夹芯复合材料结构力学性能

还需要开展进一步的研究, 可望开发成为一种轻量化的高效吸声结构一体化新型复合材料。

4 编织布/无纺纤维毡复合材料制备的折叠结构吸声性能研究

除微穿孔板和多孔材料外, 类折纸的折叠结构由于其优异的可设计性和易加工性已经被广泛应用于吸声结构设计^[62-70]。与传统的微穿孔面板/蜂窝夹芯复合材料结构相比, 折叠结构可以提供一个连续开放的空腔而非是封闭的单元, 因此可望作为一种新的芯材提供更高的声学潜力, 且兼顾夹芯复合材料的结构力学性能。另一方面, 目前的研究发现, 植物纤维编织布可以在降低质量的同时提供相近的吸声性能^[71], 因此, 使用植物纤维编织布预浸料与多孔的无纺纤维毡组合, 制备复合材料片材, 并进一步制备出复合材料折叠结构, 将可能成为一个降低质量并具有吸声效果的新型功能复合材料。

4.1 编织布/无纺纤维毡折叠吸声复合材料的制备

首先, 使用热压机将编织布预浸料—这里选用了苎麻纤维编织布预浸料, 与无纺纤维毡压在一起—这里选用了黄麻混杂纤维毡, 制备出编织布预浸料/无纺纤维毡复合材料片材^{[图 34]^[72]}, 试验件直径(Φ)为 100 mm。随后, 将这种复合材料片材根据^[图 35]和^[表 1]进行折叠, 得到折叠结构试验件如^[图 35(b)]所示。

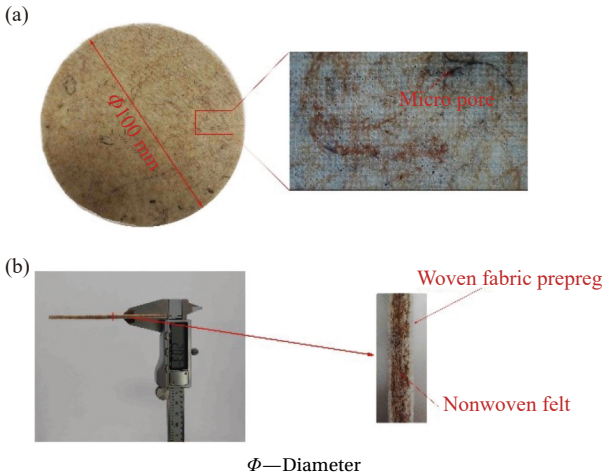


图 34 编织布/无纺纤维毡组合片材: (a) 俯视图及显微镜视图; (b) 侧视图及显微镜视图^[72]

Fig. 34 Woven/nonwoven fiber mat composite material: (a) Vertical view and microscopic view; (b) Front view and microscopic view^[72]

4.2 吸声性能测试

分别对纯编织布预浸料、编织布/无纺纤维毡

组合复合材料片材和折叠结构进行吸声性能测试, 其测试方式如^[图 36(b)]所示。为确保阻抗管中折叠结构存在完整单元, 将折叠结构高度(H)设置为 50 mm, 折叠角度(θ)为 55°, 折叠两边(a)和(s)分别为 30 mm 和 60 mm。在编织布预浸料和编织布/无纺纤维毡复合材料片材试验中, 在试验件背后留出 50 mm 的空腔以保证不同测试中试验件的高度相同。3 种试样的吸声测试结果及其比较如^[图 36(a)]所示, 左侧为声波源位置。

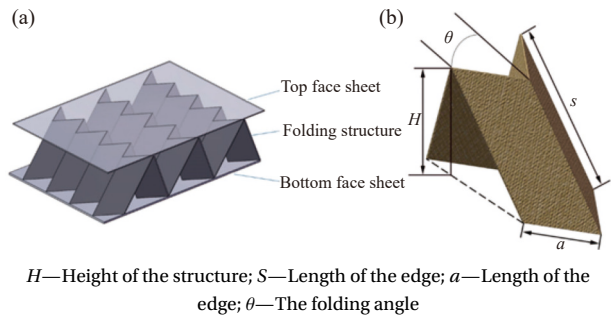


图 35 (a) 折叠结构造型; (b) 折叠单元结构尺寸^[72]
Fig. 35 (a) Folded structure theoretical model; (b) Geometric parameters of the folded structure unit cell^[72]

表 1 折叠结构建模尺寸数据	
Table 1 Geometric parameters of the folded structure unit cell	
Geometric parameter	Value
Height of the structure H/mm	50
Length of the edge S/mm	60
Length of the edge a/mm	30
The folding angle $\theta/(\text{°})$	55

根据计算, 纯编织布预浸料、编织布/无纺纤维毡组合复合材料片材和折叠结构的平均吸声系数分别为 0.360、0.562 和 0.491。对于编织布预浸料试验件而言, 其吸声系数曲线表现出了明显的微穿孔板特征, 吸声峰值为 0.78, 谷值为 0.02, 而编织布/无纺纤维毡组合的复合材料片材则明显地提升了吸声系数曲线的峰值, 最大吸声系数为 0.99, 但最小吸声系数仅提升至 0.07。根据计算结果, 尽管编织布/无纺纤维毡组合片材有着最高的吸声系数, 但根据图中曲线可以发现, 折叠结构在整体上吸声效果更好。折叠结构的吸声系数曲线中峰值虽然下降至 0.84, 但同时曲线谷值却提升至 0.43, 该特性变化其一是由于折叠结构使结构中微穿孔板层数增加形成多层微穿孔板结构, 另一方面是由于折叠结构内的无纺纤维毡为多孔材料, 保证了结构在中高频方位内的吸声性能,

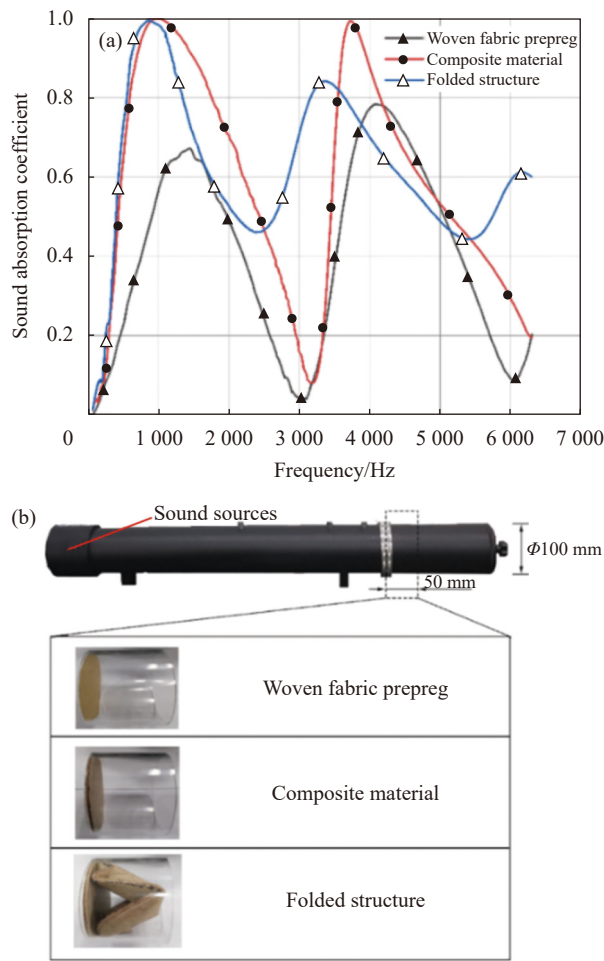


图 36 不同材料和结构对吸声性能的影响：(a) 吸声系数曲线；
(b) 实验安装示意图^[72]

Fig. 36 The influence of different materials and structures on sound absorption ability: (a) Sound absorption coefficient curves; (b) Experimental setup^[72]

使该折叠结构可以在 400~6 300 Hz 的范围内始终保持大于 0.4 吸声系数，实现了宽频吸声。编织布/无纺纤维毡组合片材试验件由于在计算平均吸声系数时，在所需的特定频率下的吸声性能表现更好，因而得到了更高的吸声系数。因此对于本实验而言，应当通过分析曲线峰值和谷值来判断其吸声效果。

4.3 折叠结构吸声建模分析

为便于分析编织布/无纺纤维毡组合复合材料片材折叠结构的声波传播过程，特取结构截面，将折叠结构由三维模型转换为二维模型，取单个单元进行分析(图 37)。

由于编织布/无纺纤维毡组合片材由上下表面的编织布预浸料和内部的无纺纤维毡组成，可将其视为由上下两层微穿孔板和内部多孔材料组成

的复合结构进行分析。为防止作为芯材的折叠复合材料结构发生倾斜，根据体积进行了转化，最终得到的分析模型如图 38 所示，转化公式为

$$D_2 = \frac{V_2}{S_2} \tag{6}$$

$$D_1 = D - D_2 - 2t_2 \tag{7}$$

其中： D 为结构整体高度； D_2 和 D_1 分别为等效模型中上半部分和下半部分的高度； S_2 为倾斜平板的面积； V_2 是下方空腔的体积； t_1 和 t_2 是复合材料的厚度。

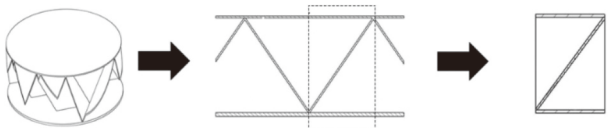


图 37 提取结构最小单元^[72]

Fig. 37 Extracting the minimum unit cell of the structure^[72]

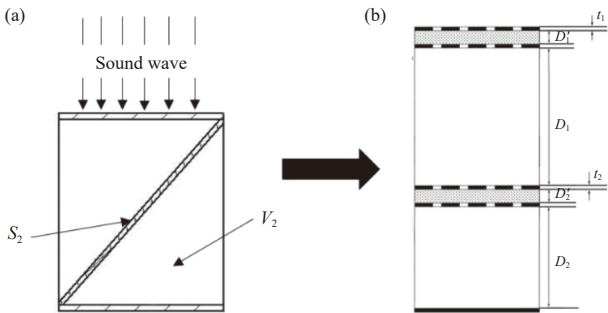


图 38 折叠结构简化模型：(a) 折叠结构最小单元；(b) 折叠结构等效模型^[72]

Fig. 38 Simplified model of the folded structure: (a) Minimum cell of the folded structure; (b) Equivalent model of the folded structure^[72]

可以发现，此时的等效模型实际上为多层微穿孔板结构，因此结构特征声阻抗传递函数为^[73]

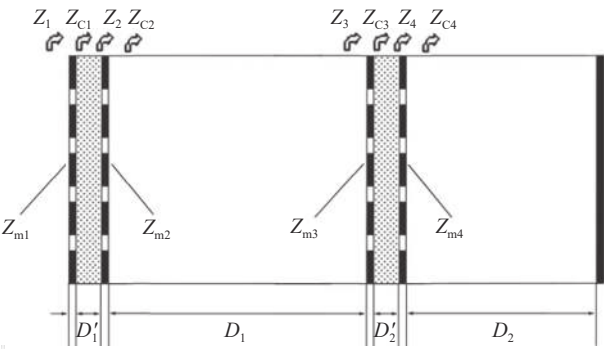
$$Z_{CN} = -jZ_0 \cot(kD_2) \tag{8}$$

$$Z_{Cn} = Z_0 \frac{Z_{n+1} \cos(kD_n) + jZ_0 \sin(kD_n)}{Z_0 \cos(kD_n) + jZ_{n+1} \sin(kD_n)} \tag{9}$$

$$Z_n = Z_{mn} + Z_{Cn} \tag{10}$$

其中： Z_{CN} 为下方空腔的特征声阻抗； j 代表复数虚部单位； Z_0 为空气特征声阻抗； Z_n 为传递函数计算到空腔处或多孔材料时结构整体特征声阻抗； Z_{Cn} 是用传递函数计算到微穿孔板处的结构整体的特征声阻抗(图 39)； Z_{mn} 为微穿孔板自身的特征声阻抗； D_n 为空腔高度。将最终计算得出的结构

整体特征声阻抗带入式 (3)，即可得到吸声系数计算结果。



$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_{C1}, Z_{C2}, Z_{C3}, Z_{C4}$ —The specific acoustic impedance of the locations; $Z_{m1}, Z_{m2}, Z_{m3}, Z_{m4}$ —The specific acoustic impedance of the microperforated plate

图 39 折叠结构等效模型分析示意图^[72]

Fig. 39 Analytical diagram of the equivalent model for the folded structure^[72]

编织布/无纺纤维毡组合片材折叠结构的理论模型计算结果及与实验对比如图 40 所示，在这个试验测试结果中，折叠结构的 3 个吸声峰分别为 874 Hz、3 390 Hz 和 6 156 Hz，理论模型计算结果为 1 040 Hz、3 340 Hz 和 6 156 Hz，误差分别为 19%、1.5% 和 1.7%。同时，前两个吸声峰值大小的误差均小于 1%，然而第 3 个吸声峰值的误差为 27%。

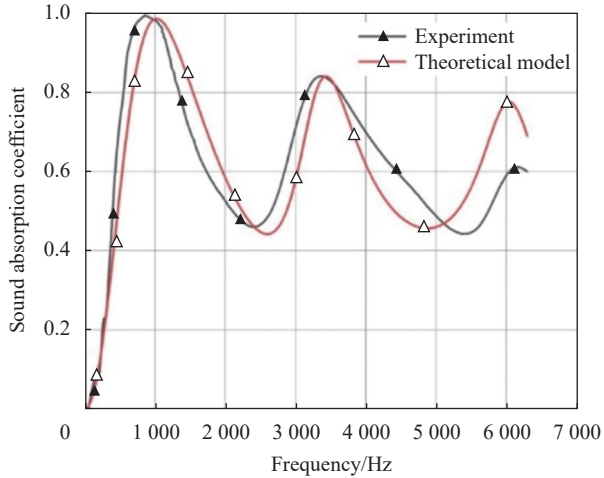


图 40 理论模型计算结果和试验结果对比^[72]

Fig. 40 Comparison of the theoretical model and experimental results^[72]

需要注意的是，建模计算的高频部分出现了较大的误差，这主要是由于在该理论模型中，我们将编织布预浸料视为微穿孔板，然而与传统的微穿孔板相比，编织布本身可以透过声波，这一现象会随着声波频率的增加越发明显，最终导致声波频率较高时理论模型与试验结果出现一定偏差。

总结性地看，编织布/无纺纤维毡复合材料片材折叠结构显示了一个新型、可行的夹芯复合材料吸声结构方案，与蜂窝夹芯复合材料结构相比，两者均利用了微穿孔板结构和多孔材料进行吸声，但这种芯材本身将两者融合在一起，这种芯材本身既是一个轻质、宽频的吸声结构，同时也是一个新型的结构芯材。当然，这个方向还有大量的工作需要去研究。

5 结论与展望

随着复合材料应用领域的不断扩展，仅提供高结构性能的所谓“高性能”复合材料已越来越难以满足航空航天、交通运输等高新技术领域对复合材料多功能性和结构功能一体化的需求。因此，通过多尺度、多层次的结构设计赋予复合材料各种功能性，构建结构功能一体化的复合材料正受到人们越来越多的关注。

本文主要通过 4 个案例分别介绍了几种典型的结构功能一体化复合材料技术：(1) 基于层间功能化插层技术 (Functionalized interlayer technology, FIT)；(2) 基于内织导电纬纱 (Inter-woven conductive weft fabric, IWCWF) 的导电增韧一体化复合材料；(3) 碳化棉纤维多级孔填充的微穿孔板/蜂窝夹芯；(4) 编织布/无纺纤维毡复合材料片材折叠结构的结构吸声一体化复合材料等。其中，前两种材料分别通过在复合材料富树脂的层间插入导电功能化插层和在复合材料的碳纤维铺层内引入贯通整个材料的导电纬纱网络，实现了复合材料的导电性能与层间韧性的同步提高，而后两种材料则分别通过碳化棉纤维多级孔材料填充蜂窝夹芯/微穿孔面板和编织布/无纺纤维毡复合材料片材折叠结构实现了良好的吸声性能。

当然，这里所选择的 4 个复合材料案例并不一定是这个方向具有最高性能、功能或潜力组合的复合材料，它们仅仅反映或代表了结构复合材料实现结构功能一体化的几种典型的技术路径，可望为传统结构复合材料的结构功能一体化转型升级提供借鉴。

参考文献：

[1] GUO M, YI X, RUDD C, et al. Preparation of highly electrically conductive carbon-fiber composites with high interlaminar fracture toughness by using silver-plated interleaves[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 176:

- 29-36.
- [2] GAZTELUMENDI I, CHAPARTEGUI M, SEDDON R, et al. Enhancement of electrical conductivity of composite structures by integration of carbon nanotubes via bulk resin and/or buckypaper films[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 122: 31-40.
- [3] CHENG C, ZHANG C, ZHOU J, et al. Improving the interlaminar toughness of the carbon fiber/epoxy composites via interleaved with polyethersulfone porous films[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 183: 107827.
- [4] HU D, YI X, JIANG M, et al. Development of highly electrically conductive composites for aeronautical applications utilizing bi-functional composite interleaves[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98: 105669.
- [5] Engineering Directorate. ATS airbus target specification, ATS05-0003[R]. Blagnac Cedex: AIRBUS, 2012.
- [6] LONJON A, DEMONT P, DANTRAS E, et al. Electrical conductivity improvement of aeronautical carbon fiber reinforced polyepoxy composites by insertion of carbon nanotubes[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, 358(15): 1859-1862.
- [7] ZHAO Z J, XIAN G J, YU J G, et al. Development of electrically conductive structural BMI based CFRPs for lightning strike protection[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 167: 555-562.
- [8] LOCHOT C, SLOMIANOWSKI D. A350 XWB electrical structure network[J]. Airbus Technical Magazine, 2014, 1: 20-25.
- [9] KUMAR V, YOKOZEKI T, OKADA T, et al. Effect of through-thickness electrical conductivity of CFRPs on lightning strike damages[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 114: 429-438.
- [10] HU D, ZHANG X, LIU X, et al. Study on toughness improvement of a rosin-sourced epoxy matrix composite for green aerospace application[J]. *Journal of Composites Science*, 2020, 4(4): 168.
- [11] TANG Y, YE L, ZHANG Z, et al. Interlaminar fracture toughness and CAI strength of fibre-reinforced composites with nanoparticles-A review[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 86: 26-37.
- [12] BAEKERS B. Composite technology at airbus[C]//International Symposium on Manufacturing for Composite Aircraft Structures. Braunschweig: German Aerospace Center, 2004.
- [13] HÄNNINEN O, KNOL A B, JANTUNEN M, et al. Environmental burden of disease in Europe: Assessing nine risk factors in six countries[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(5): 439-446.
- [14] DAVID R. Aviation: Diver for economic & social development [C]//Second meeting of the ICAO Asia/Pacific seamless ATM planning group (APSAPG/2). Tokyo: International Civil Aviation Organization, 2012.
- [15] LI X, YU X, ZHAI W. Additively manufactured deformation-recoverable and broadband sound-absorbing microlattice inspired by the concept of traditional perforated panels[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(44): 2104552.
- [16] REN Z, CHENG Y, CHEN M, et al. A compact multifunctional metastructure for low-frequency broadband sound absorption and crash energy dissipation[J]. *Materials & Design*, 2022, 215: 110462.
- [17] LIU Q, LIU X, ZHANG C, et al. A novel multiscale porous composite structure for sound absorption enhancement[J]. *Composite Structures*, 2021, 276: 114456.
- [18] 马大猷. 噪声控制学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 288-296. MA Dayou. Noise control [M]. Beijing: Science Press, 1987: 288-296(in Chinese).
- [19] TOYODA M, SAKAGAMI K, TAKAHASHI D, et al. Effect of a honeycomb on the sound absorption characteristics of panel-type absorbers[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 72(12): 943-948.
- [20] HOSHI K, HANYU T, OKUZONO T, et al. Implementation experiment of a honeycomb-backed MPP sound absorber in a meeting room[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 107000.
- [21] YAN S, WU J, CHEN J, et al. Optimization design and analysis of honeycomb micro-perforated plate broadband sound absorber[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 186: 108487.
- [22] GAUTAM A, CELIK A, AZARPEYVAND M. On the acoustic performance of double degree of freedom helmholtz resonator based acoustic liners[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 191: 108661.
- [23] ZHONG H, TIAN Y, GAO N, et al. Ultra-thin composite underwater honeycomb-type acoustic metamaterial with broadband sound insulation and high hydrostatic pressure resistance[J]. *Composite Structures*, 2021, 277: 114603.
- [24] SHEN L, ZHANG H, LEI Y, et al. Hierarchical pore structure based on cellulose nanofiber/melamine composite foam with enhanced sound absorption performance[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 255: 117405.
- [25] 王元元. 波音-NASA 新型短舱声衬设计超出预期 [N]. 中国航空报, 2018-09-18(5). WANG Yuanyuan. Boeing-NASA's new nacelle acoustic liner design exceeds expectations[N]. Chinese Aviation News, 2018-09-18(5)(in Chinese).
- [26] HU D, LIU X, LIU W, et al. The effects of compaction and interleaving on through-thickness electrical resistance and in-plane mechanical properties for CFRP laminates[J].

- Composites Science and Technology*, 2022, 223: 109441.
- [27] YI X S, GUO M C, LIU G, et al. Composite conductive sheet, fabricating method and application thereof: EP Patent, EP2687364B1 [P]. 2017-04-05.
 - [28] GUO M, YI X, LIU G, et al. Simultaneously increasing the electrical conductivity and fracture toughness of carbon-fiber composites by using silver nanowires-loaded interleaves[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 97: 27-33.
 - [29] LIN Y. Functionalized interleaf technology in carbon-fibre-reinforced composites for aircraft applications[J]. *National Science Review*, 2014, 1(1): 7-8.
 - [30] LIU H, GUO Y, ZHOU Y, et al. Multifunctional nickel-coated carbon fiber veil for improving both fracture toughness and electrical performance of carbon fiber/epoxy composite laminates[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(10): 5335-5347.
 - [31] XU F, YANG B, FENG L, et al. Improved interlaminar fracture toughness and electrical conductivity of CFRPs with non-woven carbon tissue interleaves composed of fibers with different lengths[J]. *Polymers*, 2020, 12(4): 803.
 - [32] LI W, XIANG D, WANG L, et al. Simultaneous enhancement of electrical conductivity and interlaminar fracture toughness of carbon fiber/epoxy composites using plasma-treated conductive thermoplastic film interleaves[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(47): 26910-26921.
 - [33] GUO M, YI X. The production of tough, electrically conductive carbon fiber composite laminates for use in airframes[J]. *Carbon*, 2013, 58: 241-244.
 - [34] GUO M, YI X. Effect of paper or silver nanowires-loaded paper interleaves on the electrical conductivity and interlaminar fracture toughness of composites[J]. *Aerospace*, 2018, 5(3): 77.
 - [35] JIANG M, CONG X, YI X, et al. A stochastic overlap network model of electrical properties for conductive weft yarn composites and their experimental study[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 217: 109075.
 - [36] JIANG M, HU Y, RUDD C, et al. Simultaneously improving electrical properties and interlaminar fracture toughness: A novel multifunctional composite based on inter-woven wire fabric[J]. *Composites Communications*, 2023, 39: 101563.
 - [37] 益小苏, 肖勇民, 陆明彦, 等. 厚度方向导电的层压复合材料及其制造方法: 中国, WO2019/227474A1 [P]. 2019-12-05.
YI X S, XIAO Y M, LU M Y, et al. Thickness direction conductive laminated composite material and manufacturing method therefor: CN Patent, WO2019/227474A1 [P]. 2019-12-05(in Chinese).
 - [38] WANG F, CHEN Z, WU C, et al. Prediction on sound insulation properties of ultrafine glass wool mats with artificial neural networks[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 146: 164-171.
 - [39] MISKINIS K, DIKAVICIUS V, BUSKA A, et al. Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: A case study[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 137: 62-68.
 - [40] MOHAMMADI B, ERSHAD-LANGROUDI A, MORADI G, et al. Mechanical and sound absorption properties of open-cell polyurethane foams modified with rock wool fiber[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48: 103872.
 - [41] MA D Y. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions[J]. *Scientia Sinica*, 1975, 18(1): 55-71.
 - [42] EPHRAMAC. Acoustic liner[EB/OL]. [2022-11-12]. https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_liner.
 - [43] TABAN E, KHAVANIN A, JAFARI A J, et al. Experimental and mathematical survey of sound absorption performance of date palm fibers[J]. *Heliyon*, 2019, 5(6): e01977.
 - [44] BHINGARE N H, PRAKASH S. An experimental and theoretical investigation of coconut coir material for sound absorption characteristics[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 43: 1545-1551.
 - [45] PRABHAKARAN S, KRISHNARAJ V, KUMAR M S, et al. Sound and vibration damping properties of flax fiber reinforced composites[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 573-581.
 - [46] TENG T, ELAMMARAN J, BAKRI M K B, et al. Effect of biomass ash mixture composite on sound absorption[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 29: 223-227.
 - [47] BAEK S H, KIM J H. Polyurethane composite foams including silicone-acrylic particles for enhanced sound absorption via increased damping and frictions of sound waves[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 198: 108325.
 - [48] KANG C W, KOLYA H, JANG E S, et al. Steam exploded wood cell walls reveals improved gas permeability and sound absorption capability[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 179: 108049.
 - [49] LIU R, HOU L, ZHOU W, et al. Design, fabrication and sound absorption performance investigation of porous copper fiber sintered sheets with rough surface[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 170: 107525.
 - [50] HIROSAWA K. Numerical study on the influence of fiber cross-sectional shapes on the sound absorption efficiency of fibrous porous materials[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 164: 107222.
 - [51] ATIÉNZAR-NAVARRO R, BONET-ARACIL M, GISBERT-PAYÁ J, et al. Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 164:

- 107285.
- [52] CAO L, YU X, YIN X, et al. Hierarchically maze-like structured nanofiber aerogels for effective low-frequency sound absorption[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 597: 21-28.
 - [53] CHEN S H, WANG J K, ZUO W Q, et al. Superhydrophobic cement with hierarchically tunable pore structure by additive manufacturing towards super sound absorption[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 96: 110433.
 - [54] CAI X, ZHANG Y, YANG J. Tunable ultra low and broad acoustic absorption by controllable pyrolysis of fiber materials[J]. *Materials Today Communications*, 2018, 16: 226-231.
 - [55] ZHANG H, LIU H, WU H, et al. Microwave absorbing property of gelcasting SiC-Si₃N₄ ceramics with hierarchical pore structures[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(4): 1249-1257.
 - [56] ZHOU P, ZHANG J, SONG Z, et al. Ordered mesoporous carbon with hierarchical pore structure for high-efficiency electromagnetic wave absorber under thin matching thickness[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 1560-1569.
 - [57] YANG L, CHUA J W, LI X, et al. Superior broadband sound absorption in hierarchical ultralight graphene oxide aerogels achieved through emulsion freeze-casting[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469: 143896.
 - [58] OH J H, LEE H R, UMRAO S, et al. Self-aligned and hierarchically porous graphene-polyurethane foams for acoustic wave absorption[J]. *Carbon*, 2019, 147: 510-518.
 - [59] XU P, FANG J, HE H, et al. In situ growth of globular MnO₂ nanoflowers inside hierarchical porous mangosteen shells-derived carbon for efficient electromagnetic wave absorber[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 903: 163826.
 - [60] DONG C, LIU Z, PIERCE R, et al. Sound absorption performance of a micro perforated sandwich panel with honeycomb-hierarchical pore structure core[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 203: 109200.
 - [61] OLNLY X, BOUTIN C. Acoustic wave propagation in double porosity media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 114: 73-89.
 - [62] MOUSANEZHAD D, KAMRAVA S, VAZIRI A. Origami-based building blocks for modular construction of foldable structures[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 14792.
 - [63] MA Q, REJAB R, SIREGAR J, et al. A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels[J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 55(18): 2513-2555.
 - [64] DU Y, SONG C, XIONG J, et al. Fabrication and mechanical behaviors of carbon fiber reinforced composite foldcore based on curved-crease origami[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 174: 94-105.
 - [65] JIN X, FANG H, YU X, et al. Reconfigurable origami-inspired window for tunable noise reduction and air ventilation[J]. *Building and Environment*, 2023, 227: 109802.
 - [66] JI J C, LUO Q, YE K. Vibration control based metamaterials and origami structures: A state-of-the-art review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 161: 107945.
 - [67] HAN H, SOROKIN V, TANG L, et al. Origami-based tunable mechanical memory metamaterial for vibration attenuation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 188: 110033.
 - [68] JIANG T, HAN Q, LI C. Topologically tunable local-resonant origami metamaterials for wave transmission and impact mitigation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 548: 117548.
 - [69] PRATAPA P P, SURYANARAYANA P, PAULINO G H. Bloch wave framework for structures with nonlocal interactions: Application to the design of origami acoustic metamaterials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 118: 115-132.
 - [70] WAN M, YU K, GU J, et al. 4D printed TMP origami metamaterials with programmable mechanical properties[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 250: 108275.
 - [71] LI H, ZHANG N, FAN X, et al. Investigation of effective factors of woven structure fabrics for acoustic absorption[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 161: 107081.
 - [72] DONG C, LIU Z, LIU X, et al. Sound absorption performance of folded structures prepared from woven prepreg and porous material composites[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 212: 109591.
 - [73] RUIZ H, COBO P, JACOBSEN F. Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 72(10): 772-776.