

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.019

共形阻抗膜的制备及对复合材料力学与隐身性能的影响

赵勇^{1,2}, 李昊阳^{1,2}, 邵潇庆^{1,2}, 周涵^{1,2}, 王继刚^{1,2}

(1. 中国航空工业集团公司济南特种结构研究所, 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023;

2. 电磁功能结构技术创新中心, 济南 250023)

摘要:采用印制板电路蚀刻与丝网印刷工艺, 制备了一种可集成于树脂基复合材料中的阻抗膜, 研究了加载位置对一体化功能结构力学与雷达隐身性能的影响。该阻抗膜的方阻沿设计方向由 $2\,500\,\Omega/\square$ 至 $0\,\Omega/\square$ 连续渐变, 与理论值的偏差小于10%。加载位置显著影响力学性能, 位于层压板中层时, 层间剪切强度降低26.3%, 但弯曲强度提升14.9%; 位于次表层时, 拉伸、压缩、弯曲强度分别下降8.15%、8.41%和8.64%, 拉伸应力-应变曲线呈现“二次失效”特征, 表明阻抗膜为力学“弱链路”。失效模式为碳浆层的内聚破坏, 断口呈现光滑片状与弥散颗粒的组合形貌, 归因于片状石墨(1~20 μm)与球状活性炭(30~120 nm)从环氧基体中的脱粘。加载位置对隐身性能无显著影响, 在 $-90^\circ\sim-30^\circ$ 角域内, P、L、X波段的平均雷达散射截面的缩减值分别超过9.0、22.0、13.0 dBsm, 表明该阻抗膜在宽频带、大角度入射条件下具有优异的行波抑制能力。

关键词:阻抗膜; 功能结构; 力学性能; 内聚破坏; 雷达散射截面缩减值

中图分类号:TB332 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)07-0166-12

Preparation of a conformal impedance membrane and its influence on mechanical and stealth performance of composites

ZHAO Yong^{1,2}, LI Haoyang^{1,2}, SHAO Xiaoqing^{1,2}, ZHOU Han^{1,2}, WANG Jigang^{1,2}

(1. Aviation Key Lab of Science and Technology on High Performance Electromagnetic Windows, AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Jinan 250023, China; 2. Innovation Center for Electromagnetic Functional Structures, Jinan 250023, China)

Abstract: An integrated impedance membrane suitable for use in resin matrix composites was fabricated using printed circuit board etching and screen printing. The effects of placement position on the mechanical property and stealth performance for radar of the integrated structure were investigated. The sheet resistance of the membrane continuously decreases from $2\,500\,\Omega/\square$ to $0\,\Omega/\square$ along the designed direction, with a deviation from the theoretical of less than 10%. Placement position significantly influences mechanical performance: when positioned in the mid-layer, interlaminar shear strength decreases by 26.3% while flexural strength increases by 14.9%. When positioned in the sub-surface layer, tensile, compressive and flexural strengths decrease by 8.15%, 8.41% and 8.64% respectively, with the tensile stress-strain curves exhibiting two failure characteristics, confirming that the impedance membrane area has a weak connection. The dominant failure mode is cohesive failure within the carbon paste layer, with a combined morphology of smooth facets and dispersed particles on the fracture surfaces, attributed to the debonding of flake graphite with particle size of 1–20 μm and spherical activated carbon with particle size of 30–120 nm from epoxy matrix. Placement position shows no significant effect on stealth performance. Within the -90° to -30° angular domain, the average reductions of radar cross section exceed 9.0, 22.0 and 13.0 dBsm for P, L and X bands, demonstrating excellent traveling wave suppression capability across a wide frequency range under large angle incidence conditions.

Keywords: conformal impedance membrane; multifunctional structure; mechanical properties; cohesive failure; RCS reduction

通信作者: 赵勇, 高级工程师, 主要从事功能复合材料技术研究

收稿日期: 2026-05-05

引用格式: 赵勇, 李昊阳, 邵潇庆, 等. 共形阻抗膜的制备及对复合材料力学与隐身性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 166–177.

ZHAO Yong, LI Haoyang, SHAO Xiaoqing, et al. Preparation of a conformal impedance membrane and its influence on mechanical and stealth performance of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 166–177.

随着航空航天装备对速度、机动性与可探测性要求的不断提高,其蒙皮材料所承受的力学、热学及电磁环境日益严苛,传统“蒙皮+涂层”的被动防护模式已难以满足下一代装备对轻量化、多功能与高可靠的集成需求^[1-2]。在此背景下,结构/功能一体化复合材料应运而生,成为解决这一矛盾的关键途径^[2-3]。这类材料旨在赋予主承力结构以额外的物理或化学功能^[4-5],如隐身、透波、防雷击、健康监测以及导电功能等,从而通过“一材多用”在保持轻质高强特性的同时实现系统功能集成。研究表明^[1],在航空航天领域,先进复合材料的应用可实现高达25%~30%的减重,对提升飞行器效能具有决定性意义。在众多功能需求中,雷达隐身性能对提升飞行器生存力尤为关键,已成为结构/功能一体化复合材料的重要发展方向^[6]。当前,该领域的前沿正从单一的功能附加,迈向智能化与自适应化,致力于创造能实时感知环境并作出响应的“智能皮肤”系统^[7]。

实现雷达隐身技术主要分为涂层型^[8]与结构型^[9-10]两大类。传统隐身涂层虽技术成熟,但其与基底的力学性能差异导致附着力、耐候性及抗冲刷性不足,且在严苛服役环境下易老化、剥落,从而增加维护负担。相比之下,结构型隐身复合材料通过将吸波/透波功能单元(如蜂窝夹芯、频率选择表面等)直接设计进承载结构中,从根本上避免了涂层界面问题,具有更高的耐久性和可靠性^[11]。然而,这类材料也面临显著挑战,设计过程需要协同优化力学承载与电磁性能,二者往往相互制约;复杂的内部结构给制造工艺带来了巨大困难,并可能对材料的原始力学性能(特别是层间性能)产生不利影响^[12];此外,在有限的厚度和质量约束下实现宽频、强吸收,仍是长期面临的技术瓶颈。

实现宽频高效吸波的关键在于电磁波阻抗的渐变匹配^[13-14]。其核心原理是,通过在金属反射背板与自由空间之间构造一个波阻抗从零到空气阻抗连续(或逐层)变化的过渡层,使入射电磁波能够平缓进入材料内部而非被剧烈反射,能量通过介电损耗、磁损耗或干涉相消等机制被逐步耗散,实现行波匹配与反射抑制。基于此原理,梯度功能材料^[15]和超材料/超表面^[13,16]成为研究热点。值得注意的是,对于大型飞机蒙皮结构,除垂直入射的雷达波外,沿表面爬行的行波散射同样是重要的雷达散

射截面(RCS)贡献源^[17-18]。行波在传播过程中若遭遇阻抗不连续界面,将产生显著的后向散射。因此,通过表面阻抗的渐变设计,不仅可以实现垂直入射波的阻抗匹配吸收,更重要的是能够抑制行波沿表面的传播与散射,该机制是实现宽角域、宽频带隐身的关键技术途径。针对行波抑制的需求,研究者从材料和结构两个层面开展了系统探索。在材料层面,通过沿厚度方向梯度掺杂磁性或介电吸波剂,可构建介电常数与磁导率连续变化的阻抗渐变层,实现宽频吸收^[11,14]。在结构层面,基于超材料/超表面的设计展现出强大的调控能力。例如,通过灵活的组分梯度与结构几何设计,可以突破传统带宽限制。如Fu等^[19]设计的柔性编码超表面,在6.65~19.40 GHz的宽频带内实现了超过-10 dB的RCS缩减,相对带宽高达97.89%。此外,仿生结构设计也展现出巨大潜力。Li等^[20]模仿珊瑚的多尺度结构,成功制备了兼具太赫兹-红外多频谱隐身与应变感知功能一体化的电子皮肤,为多功能集成隐身提供了新思路。上述研究表明,灵活的材料组分梯度设计与结构几何渐变调控,是突破带宽与厚度限制、实现高效行波抑制的有效技术路径。

尽管上述研究在阻抗匹配吸收方面取得了显著成果,但针对行波抑制这一影响飞机侧向及后向RCS的核心问题,特别是将高性能阻抗渐变层与航空航天主承力复合材料进行轻质、共形、可设计的深度融合,仍存在诸多空白。现有技术或侧重于厚重的独立吸波结构,或难以与复杂曲面机身共形贴合,或无法在集成后保持复合材料的优异力学性能。特别是,鲜有研究系统探讨一种柔性薄膜式阻抗渐变功能层,将其作为标准化的“功能插层”嵌入复合材料表层或层间,并全面评估其对结构力学性能的影响和隐身性能的贡献。鉴于此,本文提出一种基于印制版图形化蚀刻与丝网印刷的阻抗膜制备方法,系统研究了加载位置对一体化复合材料结构力学性能与雷达隐身性能的影响,并分析了其作用机理与位置鲁棒性。本研究为发展兼具承载与隐身功能的结构一体化复合材料提供了一种技术途径与设计依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

覆铜箔层压板(CCL):MMF-DB-5718,名义厚度76 μm ,基底为聚酰亚胺(PI)薄膜,单侧表面为厚

度 18 μm 的高延展电解铜箔,四川米木凡科技有限公司;

导电碳浆:DZ-200D 低阻碳浆和 DZ-600D 高阻碳浆,其方阻分别为 15 $\Omega/\square$ 、3 000 $\Omega/\square$,基料为改性环氧树脂,四川米木凡科技有限公司;

石英纤维增强/双马来酰亚胺树脂预浸料:QW280/5429,中国复材(北京)科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电子式万能试验机:CMT-10,济南联工测试技术有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):GeminiSEM 300,德国蔡司公司;

能量色散 X 射线能谱(EDS)仪:ULTIM MAX40,英国牛津仪器公司;

纳米压痕测试仪:Anton Paar NHT³,奥地利安东帕公司;

四探针电阻测试仪:Loresta-FX MCP-T380,日本 NITTOSEIKO 日东精工公司。

1.3 试样制备

1.3.1 阻抗膜设计

基于行波抑制原理,设计了图 1 所示阻抗膜结构,最上层为导电碳浆层,黑色区域为碳浆覆盖区,白色区域为碳浆镂空区;中间层为铜箔层,为金属贴片结构;最下层为匀质连续的 PI 基膜。沿 X 方向,阻抗膜分为 I 区和 II 区,其中, I 区由上层的图形化碳浆层与下层的 PI 基膜构成, II 区由上层匀质碳浆、中间层图形化金属网格和下层的 PI 基膜构成。

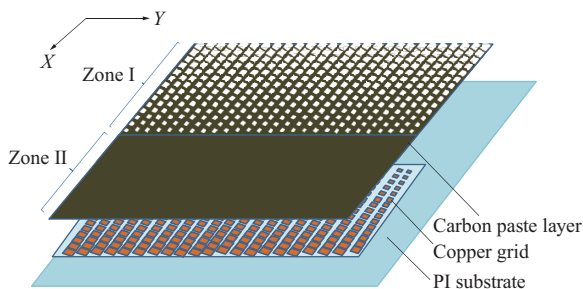


图 1 阻抗膜多层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multilayer structure of impedance membrane

在该复合结构中,匀质导电碳浆层提供固定的方阻 $R_{s-\text{carbon}}$,在此基础上通过碳浆图形设计可调控 I 区方阻,而 II 区为固定碳浆层和不连续金属渐变图形的并联结构,可通过调控铜箔贴片的大小实现阻抗渐变。该渐变结构的局部有效方阻 $R_{s-\text{carbon}}(x, y)$

和 $R_{s-\text{metal}}(x, y)$ 均为空间位置的函数。在不考虑感应电阻的前提下,阻抗膜等效方阻为 I 区和 II 区的串联值,等效方阻表达式见式(1)和式(2)。

$$R_{s-\text{total}} = R_{s-\text{zone I}} + R_{s-\text{zone II}} \quad (1)$$

其中, I 区方阻的表达式见式(2)。

$$R_{s-\text{zone I}} = R_{s-\text{carbon}}(x, y) \quad (2)$$

I 区方阻通过调控上层导电碳浆的占空比(即碳浆镂空区的线宽与间距的比率),实现 $R_{s-\text{carbon}}(x, y)$ 在空间上梯度渐变,即在需要高阻抗的区域通过增加碳浆镂空面积,设计低占空比的稀疏网格以获得高 $R_{s-\text{carbon}}(x, y)$ 值,在需要低阻抗的区域设计高占空比的致密网格以获得低 $R_{s-\text{carbon}}(x, y)$ 值。

II 区方阻的表达式见式(3)。

$$R_{s-\text{zone II}} = \frac{R_{s-\text{metal}}(x, y) \times R_{s-\text{carbon}}}{R_{s-\text{metal}}(x, y) + R_{s-\text{carbon}}} \quad (3)$$

根据公式(3),复合方阻 $R_{s-\text{zone II}}$ 始终由两层中阻值较低的一方主导,通过精确设计中间层金属图案的占空比(即金属线条宽度与间距的比率),在空间上调整 $R_{s-\text{metal}}(x, y)$ 的梯度分布,可实现对 $R_{s-\text{zone II}}$ 从 $R_{s-\text{carbon}}$ 到趋近于 0 $\Omega/\square$ 的连续调控。

上述设计方案将复杂的阻抗空间分布调控转化为对不同导电层图形的几何设计,在宏观上实现从介质阻抗到金属阻抗的匹配。

1.3.2 阻抗膜制备

(1) 图形化金属蚀刻。

以 CCL 为基材,通过光刻工艺实现金属层的图形化。采用负性光刻胶,利用预先设计的数字光掩模进行曝光,曝光能量为 120 mJ/cm^2 。该掩模图案为二维线性渐变网格,通过局部金属占空比的空间变化实现阻抗梯度。具体而言,CCL 的横向(TD)为图 1 所示 X 方向,沿该方向保留正方形金属贴片,贴片边长由 4.0 mm 递减至 0.2 mm,贴片中心距不变;纵向(MD)为图 1 所示 Y 方向,本研究中沿该方向参数保持不变。经过清洗、涂胶、紫外曝光与显影,完成金属层图形向光刻胶掩模的转移。随后,采用三氯化铁溶液在 35 $^{\circ}\text{C}$ 下进行化学蚀刻,精准去除未保护的金属层。最终,经去膜清理后,在柔性基板上获得具有精确渐变图形的金属-PI 柔性基板。

(2) 导电碳浆丝网印刷与固化。

以方阻分别为 15 $\Omega/\square$ 和 3 000 $\Omega/\square$ 的环氧碳浆为原料,按质量比 1:4.5 进行复配。混合时加入占总质量 3%~5% 的环氧活性稀释剂,于行星搅拌

机中以 1 500 r/min 高速分散 30 min,随后真空脱泡并熟化 2 h 以上,得到均匀稳定的复合碳浆,其目标方阻值为 $200 \pm 10 \Omega/\square$ 。

完成碳浆调配后,采用高精度丝网印刷工艺制备碳浆层。首先,选用目数为 300 目的聚酯丝网制作网版。印刷前,将已完成图形化蚀刻并清洁的柔性基板平整固定于印刷台上,金属面朝上,碳浆渐变方向为 TD 方向。设定印刷刮板压力为 8.0 kg/cm^2 ,印刷速度为 25 cm/s ,在刮板的均匀推动下,将碳浆透过网版开口区域精准转移到柔性膜表面。沿 TD 方向,碳浆图案为线宽渐变的正方形网格,线宽由 0.2 mm 线性递增至 4.0 mm ,镂空图形中心距保持 4.0 mm 不变;形成覆盖于 PI 基膜表面的碳浆渐变网格和附着于金属层表面的连续湿膜。

印刷完成后,将样品立即转移入洁净的隧道式固化炉中进行阶梯升温固化,固化工艺为:先在 80°C 下预处理 10 min,以挥发大部分有机溶剂,防止膜层起泡或开裂;随后将温度升至 210°C ,在该温度下保持 30 min,确保环氧树脂基体完全交联,碳导电网络充分形成并稳定。固化结束后,样品随炉冷却至室温。

(3) 阻抗膜后处理

在固化后的阻抗膜表面,使用精密激光以 8.0 mm 间隔打设通孔阵列,单孔直径 0.5 mm 。该处理可确保在与复合材料共固化过程中,基体树脂能通过微孔形成有效“铆钉”结构增强界面强度。

1.3.3 一体化复合材料结构成型

采用热压罐工艺将处理后的阻抗膜与 QW280/5429 预浸料进行一体化成型。为验证阻抗膜加载位置对复合材料结构的性能影响,制备表层加载试样(阻抗膜位于铺层次外层)、中层加载试样(阻抗膜位于铺层正中间)以及基准试样(未加载阻抗膜)三种样件,进行对比测试。预浸料铺层顺序为 $[45^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ]_2$,样件完成铺层后,将其放置入热压罐中,以 $0.5 \sim 1.5^\circ\text{C/min}$ 的速率从室温升至 150°C ,保温 60 min 进行预固化;随后继续以相同速率升温至 205°C ,在 0.3 MPa 罐压下保温 720 min;固化结束后,以不大于 1.0°C/min 的速度降温至 60°C 以下,开罐取出制件。

1.4 测试与表征

1.4.1 理化特性表征

方阻测试:使用四探针电阻测试仪沿阻抗膜 TD 方向测量方阻,始点距离功能层边缘不小于 10 mm ,

测量间隔为 8 mm 。沿 MD 方向,平行等距依次测量 5 组数据,间距不小于 100 mm ,统计同站位的方阻均值。

弹性模量测试:①阻抗膜拉伸弹性模量参照 ASTM D882-25 进行测试,试样经蚀刻去除铜箔后,印刷方阻 $200 \Omega/\square$ 的导电碳浆,将固化后的样件在 23°C 、50% 相对湿度下调节 24 h,用壁纸刀将试样剪裁为宽 12.7 mm 、长 150 mm 的条状,长度方向沿板材 TD 方向。使用电子式万能试验机,配合非接触式视频引伸计,以 5 mm/min 拉伸速率进行应变测量;通过记录应力-应变曲线,取线性弹性段的斜率计算得出拉伸弹性模量。②依据 GB/T 21838.1-2019,采用纳米压痕测试仪及 Berkovich 金刚石压头,对已固化、厚度约 $10 \mu\text{m}$ 的碳浆层进行纳米压痕弹性模量测试。试样制备同①一致,尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,测试前对试样表面进行清洁。采用 Oliver-Pharr 法,在最大压深 1000 nm 的参数下,对每个试样进行至少 15 个有效点的测量,最终结果取各区域数据的平均值。

形貌观察及成分分析:使用 SEM 和能谱仪观察一体化结构样件断口形貌。为获得清晰导电的观察表面,试样在观察前进行喷铂处理(溅射镀铂,厚度 $5 \sim 10 \text{ nm}$)。结合能谱仪对典型微区进行成分分析,以确定断裂机理。

1.4.2 力学性能测试

采用上述设计的阻抗膜成型一体化复合材料结构,制备表层加载试样、中层加载试样和基准试样三种样件。按照 ASTM D2344M-22、ASTM D3039M-17、ASTM D6641M-23 和 ASTM D7264M-21 标准,使用电子万能试验机,分别进行层间剪切强度、拉伸性能、压缩性能和弯曲性能测试。通过对比分析,验证加载阻抗膜对一体化复合材料结构的力学性能影响。样件加工取向及尺寸如图 2 所示。

1.4.3 电磁响应特性仿真

采用 ANSYS HFSS 构建三维全波电磁仿真模型,模拟一体化复合材料结构在行波激励下的电磁散射特性,提取 RCS 仿真曲线,分析频率和阻抗膜加载位置对隐身性能的影响。

为定量评估阻抗膜的行波抑制效能,统计各频点的 RCS 缩减值,该缩减值定义见式(4)。

$$\Delta\sigma(\varphi) = \sigma_{\text{ref}}(\varphi) - \sigma_{\text{load}}(\varphi) \quad (4)$$

式中: σ_{ref} 为基准试样的 RCS; σ_{load} 为加载阻抗

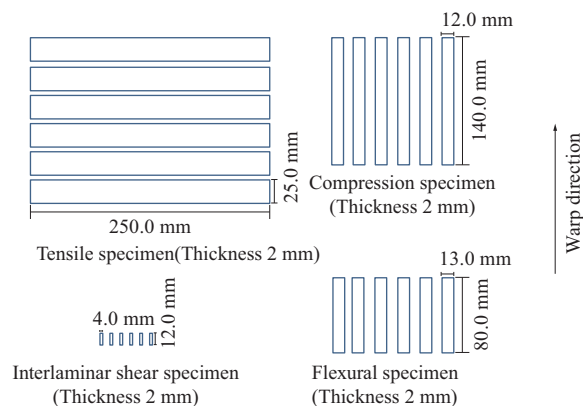


图2 力学性能测试试样加工示意图

Fig. 2 Schematic diagram of specimen preparation for mechanical testing

膜试样的RCS; φ 为电磁波入射方向与金属载体端面法线之间的夹角, 定义为行波传播方向与 0° 参考方向的角度, 而 0° 为阻抗膜面内阻抗递增方向(图1所示 $-X$ 方向), 该方向与金属载体端面法线方向一致。

为量化行波抑制效能, 统计 $-90^\circ \sim -30^\circ$ 角域(行波沿表面传播的主要路径范围)内各频点的RCS缩减值, 取该角域内的算术平均值作为该频点的平均RCS缩减值 $\overline{\Delta\sigma}$, 见式(5)。

$$\overline{\Delta\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{\theta=-90^\circ}^{-30^\circ} \Delta\sigma(\varphi) \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 阻抗膜形貌和电学特性分析

图3为阻抗膜实物形貌。观察可见, 该膜具有优良的柔韧性, 呈自然卷曲状态, 膜表面均匀覆盖有黑色导电碳浆层。沿TD方向可清晰辨识I区与II区的过渡界面: 在下部I区, 碳浆层呈现线宽渐变的网格图案, 线宽随位置升高而递减, 至I/II区交界处碳浆层转变为连续覆盖; 进入上部II区后,

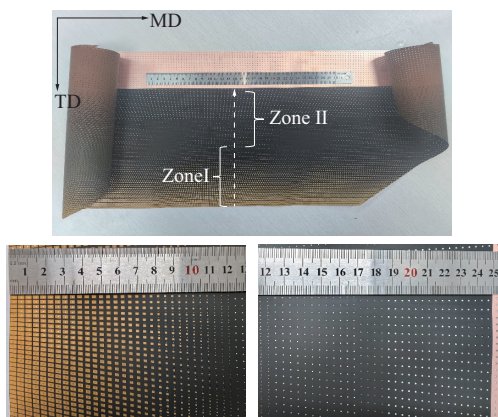


图3 阻抗膜形貌

Fig. 3 Morphology of impedance membrane

透过半透明的碳浆层可观察到下层边长线性递增的正方形金属贴片阵列, 该贴片在膜上边缘处演变为连续金属层。阻抗膜形貌特征表明, 通过图形化蚀刻与丝网印刷工艺可实现设计图案的精确复制。

图4对比了阻抗膜方阻沿TD方向的仿真值与实测值分布。基于传输线理论与无反射匹配条件, 采用ANSYS HFSS软件设计了切比雪夫最优渐变型阻抗分布, 并将其转化为方阻的梯度函数。对比曲线显示, 方阻在TD方向250 mm长度范围内由 $2500 \Omega/\square$ 梯度连续递减至 $0 \Omega/\square$, 实测值与理论设计值的相对偏差小于10%, 验证了制备工艺的精确性与阻抗调控方法的有效性。但实测值普遍高于理论值, 分析认为, 探针与碳浆之间的接触电阻以及碳浆层镂空引起的边缘效应是导致实测值偏高的主要原因。

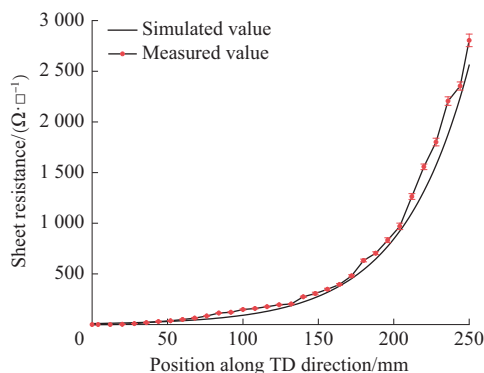


图4 方阻沿TD方向的仿真值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured sheet resistance values

2.2 一体化复合材料结构力学性能与失效机理分析

2.2.1 层间剪切性能

短梁剪切试验用于评估层间性能。阻抗膜的引入, 实质是在原本连续的树脂层间插入了一个由PI/金属网格/碳浆构成的非均匀“夹芯”界面。图5对比了三种试样的层间剪切强度, 分析可知, 中层加载试样的层间剪切强度最低, 较基准试样降低26.3%, 表层加载试样层间剪切强度略高于基准试样。这一现象与层间剪切应力的厚度分布规律直接相关。根据复合材料层压板理论^[12], 短梁剪切试样中的层间剪切应力沿厚度方向呈抛物线分布, 最大值位于中性面(即厚度中心), 而在上下表面处层间剪切应力为零。中层加载试样的阻抗膜恰好位于中性面, 即层间剪切应力最大位置, 因此成为最薄弱环节; 表层加载试样的阻抗膜位于次表层, 处

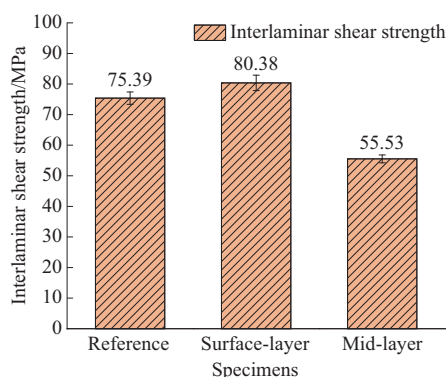


图5 加载位置对层间剪切强度的影响

Fig. 5 Effect of membrane placement position on interlaminar shear strength

于低剪切应力区,故对层间剪切强度的影响较小。

图6为三种试样的层间剪切断口形貌。观察可见,加载阻抗膜的两种试样的失效模式均为阻抗膜破坏,且表现为碳浆层的内聚破坏,而非阻抗膜与复合材料基体的界面脱粘。这一现象可通过模量匹配性分析解释。

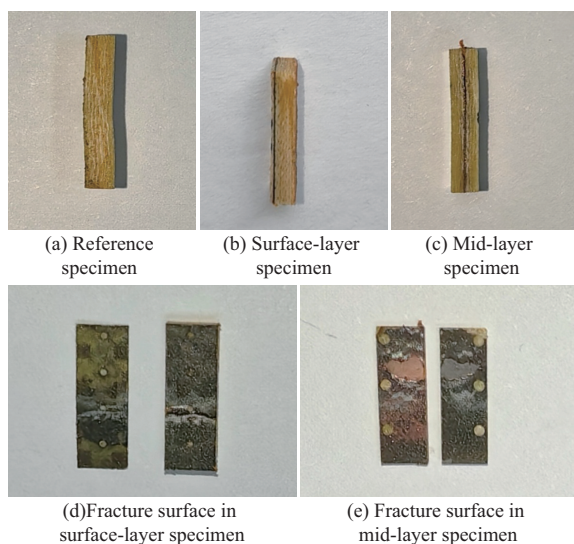


图6 层间剪切试样失效形貌

Fig. 6 Failure morphology of interlaminar shear specimens

表1列出了碳浆层的纳米压痕弹性模量和阻抗膜的整体拉伸弹性模量。分析表明,碳浆层的弹性模量范围为3.0~5.26 GPa。在考虑纳米压痕法与传统静态拉伸/弯曲法所得模量之间存在系统性偏差^[21]的前提下,可以认为碳浆层模量与双马来酰亚胺树脂基体的典型模量(3.0~5.0 GPa)处于同一量级^[22]。这表明功能层与树脂基体具有良好的微观模量匹配性,这正是失效模式表现为碳浆层内聚破坏而非界面脱粘的关键原因。阻抗膜的拉伸弹性模量均值为4.04 GPa,该值与碳浆层模量基本相当,但

远低于石英纤维/双马复合材料整体的宏观模量(20~25 GPa)。这种显著的宏观模量失配导致功能层在整体结构中成为一个相对柔性的夹层,当其位于非中性面位置时,会引起中性轴向其移动,改变整个截面的应力分布。针对表层加载试样,阻抗膜的存在使中性面附近的剪切应力降低,同时增加外层的弯曲应力,因此按剪切公式计算的表观强度略高于基准试样。

表1 碳浆层和阻抗膜的弹性模量

Tab. 1 Elastic modulus of carbon paste layer and impedance

membrane		
Specimen type	Specimen No.	Modulus/GPa
Carbon paste layer (Nanoindentation)	1 [#]	3.00
	2 [#]	4.02
	3 [#]	3.41
	4 [#]	4.00
	5 [#]	5.26
	Mean	3.94
Impedance membrane (Tensile)	Variance	0.85
	1 [#]	3.92
	2 [#]	4.12
	3 [#]	3.99
	4 [#]	4.09
	5 [#]	4.10
	Mean	4.04
	Variance	0.08

2.2.2 拉伸和压缩性能

图7对比了三种试样的拉伸性能。由图7b可见,中层加载试样的拉伸强度和拉伸弹性模量与基准试样基本持平,而表层加载试样的拉伸性能明显低于基准试样:拉伸强度下降8.15%,拉伸弹性模量下降6.49%。图7a所示的拉伸应力-应变曲线揭示了一个重要特征:当表层加载试样的拉伸应变达到约4.7%时,其应力发生陡降(约10 MPa),随后应力再次上升直至最终断裂,曲线呈现明显的“二次失效”现象。该现象表明,阻抗膜的引入在拉伸载荷下触发了阶段性失效机制。

图8展示了拉伸试样的典型断口形貌。观察可见,基准试样的拉伸断口呈45°倾斜断面,呈现典型的剪切主导的断裂模式;而加载阻抗膜的两种试样,除存在蒙皮剪切断裂外,其阻抗膜层出现明显的贯穿开裂。图8d和图8e分别为表层加载试样的阻抗膜开裂后的上、下面形貌,分析可知,阻抗膜的失效始于碳浆层,在轴向拉应力作用下,脆性碳浆层微裂纹萌生并迅速开裂,进而引发试样整体分层。碳浆层由炭黑和片状石墨填充环氧树脂构成,

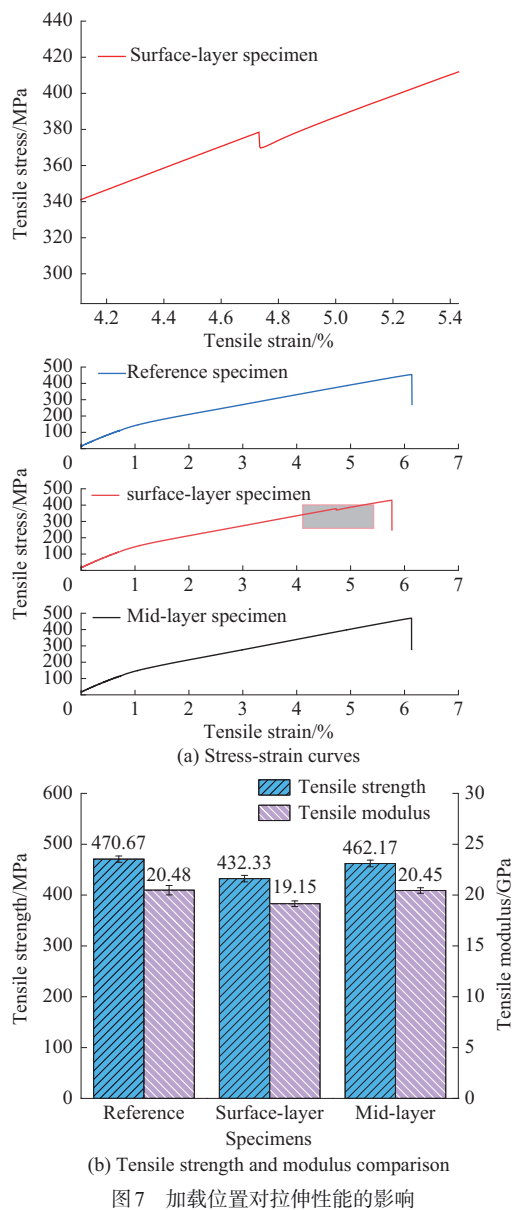


图7 加载位置对拉伸性能的影响

其基体固化后呈脆性,断裂应变远低于石英纤维增强复合材料。当整体应变达到碳浆层的临界断裂应变时,碳浆层首先开裂,对应应力-应变曲线上的第一次载荷骤降,此时碳浆层瞬间丧失承载能力。然而,具有较高韧性的PI/金属网格及主要承载的纤维层尚未破坏,它们对裂纹起到桥接作用,使曲线得以二次上升。随着位移增加,应力在功能层/复合材料界面重新分布并集中。对于表层加载试样,碳浆层开裂后,阻抗膜上面的薄层层压板有效拉伸长度增加,导致该层截面拉应力降低,而阻抗膜下面的厚层层压板局部拉应力增大,率先发生断裂,故表层加载试样的整体拉伸强度下降,而上面的薄层层压板保持完好。对于中层加载试样,阻抗膜位于

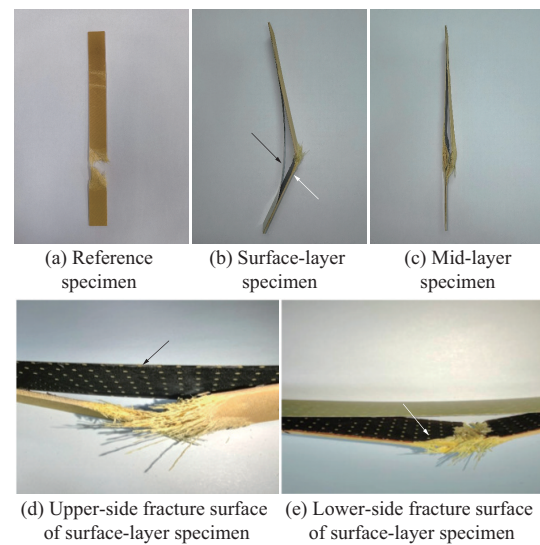


图8 拉伸试样失效形貌

Fig. 8 Failure morphology of tensile specimens

层压板正中间,碳浆层开裂后,上下层厚度一致,拉应力仍均匀分布,故上下层均发生断裂,其拉伸性能与基准试样基本一致。

图9对比了三种试样的压缩性能,其变化规律与拉伸性能高度一致:中层加载试样的压缩强度与模量接近基准试样;表层加载试样性能显著降低,压缩强度下降8.41%,压缩模量下降6.14%。

压缩失效与屈曲失稳密切相关。置于层间的低模量功能层构成了一个“柔性夹层”,削弱了层压板的整体抗屈曲稳定性。图10为试样压缩后的失稳形貌。在较低压缩载荷下,相邻石英纤维层可能以功能层为支点发生局部微屈曲,诱发碳浆层剪切开裂。层压板失稳后,应力重新分布。对于表层加载试样,开裂后的最外层蒙皮在后续加载中丧失承载能力,导致整体压缩性能下降;而对于中层加载试样,碳浆层开裂后,上下层仍维持均匀应力分布,压缩性能与基准试样相当。

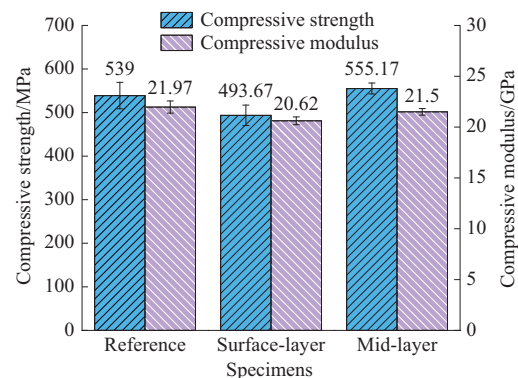


图9 加载位置对压缩性能的影响

Fig. 9 Effect of membrane placement position on compressive properties

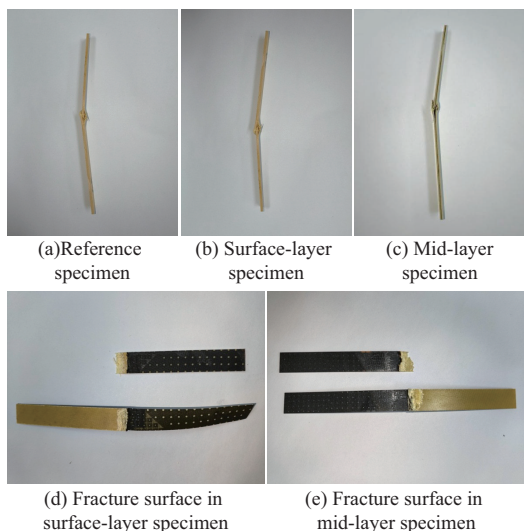


图 10 压缩试样失效形貌

Fig. 10 Failure morphology of compressive specimens

2.2.3 弯曲性能

图 11 对比了三种试样的弯曲性能,分析可知,表层加载试样的弯曲强度较基准试样下降 8.64%,弯曲模量下降 9.39%;而中层加载试样的弯曲强度则提升了 14.90%,弯曲模量与基准试样基本一致。

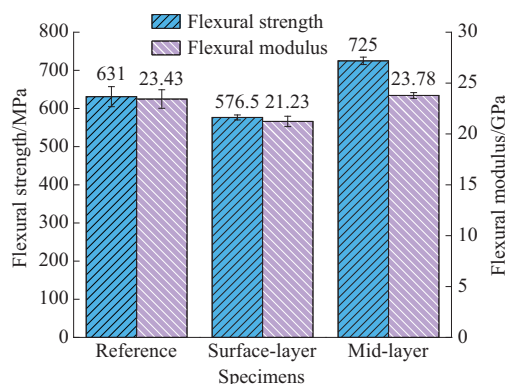


图 11 加载位置对弯曲性能的影响

Fig. 11 Effect of membrane placement position on flexural properties

三点弯曲载荷下,弯曲正应力沿厚度方向线性分布,最大值位于上下表面。表层加载试样的阻抗膜位于次表层(高应力区),脆性碳浆层率先开裂并引发界面分层,有效承载截面削弱,导致弯曲性能下降。值得注意的是,中层加载试样的弯曲强度显著提升,而前文 2.2.1 节中层加载试样的层间剪切强度却明显下降,这一现象揭示了功能层在不同应力状态下的双重作用机制。在三点弯曲载荷下,失效模式为分层、纤维断裂、基体开裂等多种机制的竞争。阻抗膜中的铜网格与 PI 基板作为韧性单元,能够有效抑制分层裂纹的萌生与扩展,迫使破坏转向更高承载能力的纤维断裂模式,从而表现出弯曲强

度增益。然而,在短梁剪切测试所强制的、近乎纯粹的 II 型层间剪切应力场中,阻抗膜内部的异质界面(尤其是碳浆层较低的内聚强度)成为预先存在的薄弱路径,导致剪切破坏优先沿此发生,造成层间剪切强度损失。

图 12 所示的失效形貌验证了上述机制:基准试样和中层加载试样的断口处存在明显的纤维断裂被拔出现象,表现为纤维断裂主导;而表层加载试样的断口除可见纤维断裂外,还存在明显的阻抗膜分层现象。这一形貌差异进一步证实了阻抗膜加载位置对力学性能影响的模式依赖性。

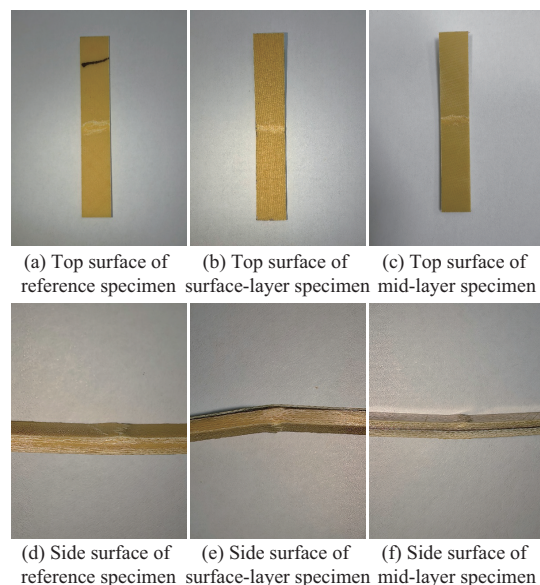


图 12 弯曲试样失效形貌

Fig. 12 Failure morphology of flexural specimens

2.2.4 失效机理分析

上述力学性能数据表明,碳浆层的内聚破坏是一体化结构力学性能退化的主要原因,碳浆层成为力学链路上的最薄弱环节。

图 13 展示了短梁剪切试样断口的微观形貌及 EDS 元素分析结果。分析可知,阻抗膜断口中存在三种典型微区结构:图 13b 中的谱图 1 为 C、O 含量分别为 86.4% 和 13.6% 的区域,该区域表面粗糙,弥散分布颗粒状物,结合形貌与元素组成判断,主要成分为环氧树脂基体与球状活性炭(30~120 nm)的混合物,由于活性炭尺寸细小且被树脂完全包覆,故谱图呈现树脂基体的特征;图 13b 中的谱图 2 为 C、O 含量分别为 88.3% 和 11.7% 的区域,呈相对平坦的片状形貌,应为片状石墨拔出后在树脂基体中留下的印痕,故判断其主要成分亦为树脂基体与球

状活性炭的混合物;图13b中的谱图3为C、O含量分别为95.8%和4.2%的区域,呈现典型的光滑解理面形貌,为片状石墨本身发生解理断裂后的新鲜断面。

根据复合材料细观力学理论^[23],颗粒增强复合材料的强度可由修正的混合法则描述,见式(6)。

$$\sigma_c = \sigma_m(1 - V_p) + k\sigma_p V_p \quad (6)$$

式中: σ_c 为复合材料强度; σ_m 为基体强度; σ_p 为填料强度; V_p 为填料体积分; k 为界面结合效率因子($0 \leq k \leq 1$)。

在本研究中,导电碳浆为达到200 $\Omega/\square$ 的目标方阻而采用了高填料含量,导致填料-基体界面强化难度增大, k 值远小于1。因此,填料无法有效承担载荷,反而成为应力集中源,这是碳浆层呈现脆性内聚破坏的根本原因。

图13a、图13b所示的断口形貌反映了上述失效机制。图中可见多片光滑平整的解理面,为片状石墨(1~20 μm)自身发生脆性解理断裂所致,且该解理面的取向各异,当石墨片层平行于断裂面时,断裂沿片层内部扩展,形成平坦光滑的解理面;当片层垂直于断裂面时,则表现为片层的拔出与剥离。这一现象与文献[24]报道的石墨/环氧复合材料断裂特征一致。断口中同时存在弥散分布的细小凹坑与凸起,表面粗糙,为纳米级炭黑脱粘后留下的形貌。此外,断口中还可观察到大量微孔洞及少量因混合不均产生的气泡微孔,这些孔洞在应力作用下进一步导致局部应力集中,成为裂纹优先萌生的位置。在石墨片层与树脂基体的界面处,可见清晰的脱粘痕迹,部分区域石墨已被完全拔出,留下光滑的印

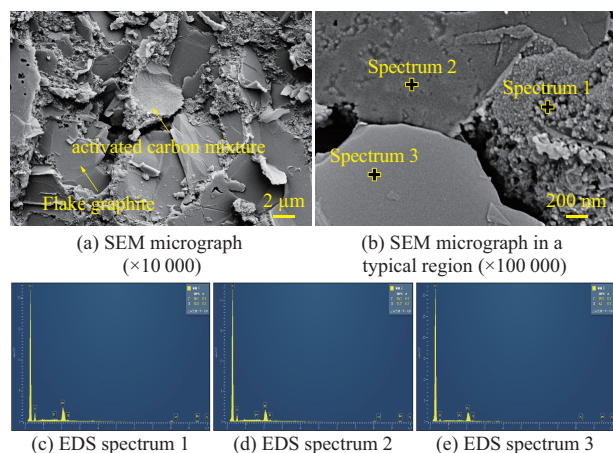


图13 短梁剪切试样断口微观形貌及EDS元素分析

Fig. 13 Microscopic fracture morphology and EDS elemental analysis of short-beam shear specimens

痕;部分区域石墨尚未完全脱粘,但已出现界面裂纹。这种界面脱粘是碳浆层内聚破坏的主要形式之一,其发生于填料与基体之间界面结合强度不足。

综上所述,碳浆层断口呈现的光滑解理面、弥散颗粒、微孔洞及界面脱粘等多种形貌特征,共同揭示了其脆性内聚破坏的微观机制:在载荷作用下,裂纹优先在填料-基体弱界面处萌生,沿界面扩展并贯穿基体,同时部分片状石墨自身发生解理断裂。这一失效模式证实了碳浆层作为力学薄弱环节的本质,为后续优化提供了明确的微观依据,需通过更充分的填料表面改性、基体增韧及界面结构优化,提升碳浆层的本征力学性能。

上述力学性能分析表明,阻抗膜的引入对复合材料层压板的力学性能产生了显著影响,其效应具有明确的模式依赖性:位于层间中性面时主要削弱层间剪切强度,而位于次表面时则影响拉压弯性能。在此基础上,需进一步验证不同位置加载的阻抗膜对电磁隐身功能的贡献是否存在差异,以综合评估结构功能一体化设计的可行性。因此,下文将重点分析阻抗膜加载位置对一体化结构RCS的影响。

2.3 一体化复合材料结构的电磁响应

采用ANSYS HFSS构建三维全波电磁仿真模型(图14)。该模型基于飞行器蒙皮的实际应用场景设计,当电磁波入射至机体表面后,会在蒙皮-空气界面激励起沿表面传播的行波,而行波在传播至结构边缘或阻抗不连续处时会产生后向散射,构成RCS的重要贡献。为准确评估阻抗膜对行波的抑制效果,仿真中设置金属载体端面作为行波激励源,电磁波自载体(-90°)向样件(0°)传播,模拟行波沿表面的爬行过程。行波在样件表面传播时,与阻抗膜相互作用,部分能量被吸收耗散,从而降低了后向散射强度。该模型具体构成如下。

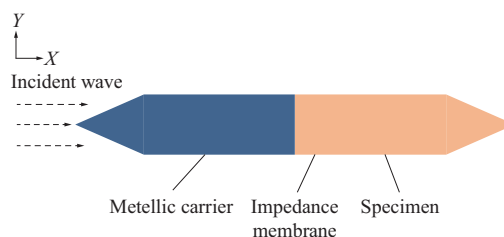


图14 一体化结构电磁仿真模型示意图

Fig. 14 Schematic diagram of electromagnetic simulation model for integrated structure

(1)结构与材料。

样件包括阻抗膜表层加载、中层加载和基准试样三种状态,介质材料为QW280/5429预浸料,相对介电常数 $\varepsilon_r=3.2$,损耗角正切 $\tan\delta=0.008$,阻抗膜方阻按图4仿真值,载体与样件的对缝按理想电连通设置。

载体模拟一体化结构的连接接口,在仿真中视为理想电导体。针对阻抗膜不同加载位置,将载体的导电平面对应设置为与阻抗膜共面。

(2)仿真配置与参数。

电磁波自载体至样件方向入射,在HH极化下作用于金属载体表面形成行波激励,行波进入样件后在阻抗膜作用下衰减。阻抗膜被设置为主从边界条件,沿电磁波传播方向的两端端口则设置

Floquet端口,用于激励和吸收电磁能。

图15为一体化结构不同频率下的RCS仿真曲线及缩减值。分析表明,RCS在不同频率下具有不同的响应特性,但在同一频率下表层加载和中层加载的响应规律基本一致。图15f统计了 $-90^\circ\sim-30^\circ$ 角域内各频点的平均RCS缩减值,可以看出,加载阻抗膜对一体化结构产生明显的RCS缩减效果,不同加载位置的RCS缩减值无显著差异,频率对RCS缩减具有明显影响,RCS缩减值随频率增加呈先增后减趋势,L波段(1.0 GHz和2.0 GHz)的平均缩减值超过22.0 dBsm,X波段(8.0 GHz和12.0 GHz)的平均缩减值超过13.0 dBsm,而P波段(0.5 GHz)缩减值相对较低,但仍达9.0 dBsm以上,这表明该阻抗膜在宽频带范围内具有有效的行波抑制能力

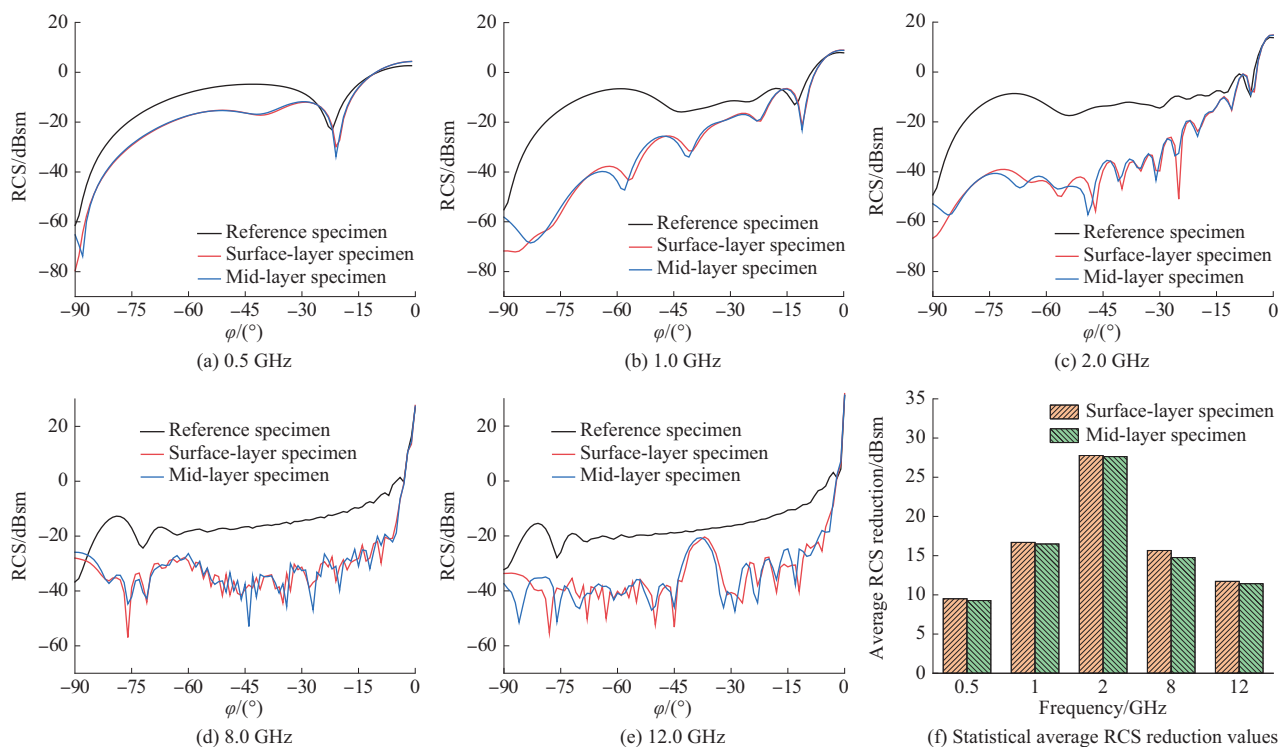


图15 不同频率下的RCS仿真曲线及平均缩减值

Fig. 15 Simulated RCS curves and average reduction values at different frequencies

综合一体化结构的力学和隐身性能分析可以得知,阻抗功能层的引入,在电磁设计上是成功的,但在力学上相当于引入了一个预设的“弱链路”,这揭示了结构功能一体化设计中的核心挑战,即功能性与力学鲁棒性的权衡。本研究结果显示,当前的功能层材料体系与界面处理工艺虽能实现电磁隐身功能,但对其承力结构的力学代价约为8%~26%。这为后续优化提供了明确方向:首先,提升功能层自身力学性能,如采用韧性更好的基体树脂或增强

碳浆;其次,革新界面强化技术,例如,开发专用的界面偶联剂或构建三维互锁界面结构等,对导电填料进行有效的表面改性处理,以强化填料-基体界面,从而在保障电学功能的同时,提升功能层的本征力学性能及其与复合材料整体的界面韧性;最后,根据产品结构特征优化功能层在铺层中的位置以规避高应力区。

3 结论

(1)建立了一种基于印制板图形化蚀刻与丝网

印刷的阻抗膜制备方法。通过Ⅰ区碳浆图形渐变与Ⅱ区碳浆-金属并联结构的协同设计,实现了方阻沿设计方向 $2\,500\,\Omega/\square$ 至 $0\,\Omega/\square$ 精确梯度调控,实测值与理论设计值的相对偏差小于10%,验证了制备工艺的可行性与阻抗调控方法的有效性。

(2)阻抗膜加载位置对一体化结构的力学性能具有显著影响,呈现明确的模式依赖性:中层加载时,层间剪切强度下降26.3%,但弯曲强度提升14.9%,表明功能层在特定载荷模式下可作为韧性夹层抑制分层;表层加载时,拉伸强度、压缩强度、弯曲强度分别下降8.15%、8.41%和8.64%,拉伸应力-应变曲线呈现“二次失效”特征,表明阻抗膜为力学链路上的薄弱环节。

(3)一体化结构的力学失效源于碳浆层的内聚破坏。断口形貌呈现光滑片状与弥散颗粒的组合特征,归因于片状石墨($1\sim 20\,\mu\text{m}$)的脆性解理断裂以及片状石墨、球状活性炭($30\sim 120\,\text{nm}$)与环氧树脂基体的界面脱粘。

(4)阻抗膜加载位置对RCS缩减性能无显著影响,表明其电磁功能具有位置鲁棒性。在 $-90^\circ\sim -30^\circ$ 关键角域内,P波段($0.5\,\text{GHz}$)、L波段($1.0\sim 2.0\,\text{GHz}$)、X波段($8.0\sim 12.0\,\text{GHz}$)的平均RCS缩减值分别达到 $9.0\,\text{dBsm}$ 、 $22.0\,\text{dBsm}$ 和 $13.0\,\text{dBsm}$ 以上,验证了该功能膜在宽频带、大角度入射条件下的行波抑制能力。

(5)本研究定量揭示了结构-功能一体化设计中的力学权衡关系,后续优化应聚焦于:①对导电填料进行硅烷偶联剂表面改性;②采用增韧树脂体系;③构建三维互锁界面结构。

参考文献

- [1] 邢丽英,李亚锋,陈祥宝.先进复合材料在航空装备发展中的地位与作用[J].复合材料学报,2022,39(9):4 179-4 186.
XING Liying, LI Yafeng, CHEN Xiangbao. Status and role of the advanced composite materials in the development of aviation equipment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 179 - 4 186.
- [2] ALI K M K, MUJAHID Y, ALAHMED N, et al. A review of multifunctional hybrid fiber-reinforced polymer (HFRP) composites for aerospace applications[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2026, 9(2). DOI:10.1007/s42114-026-01626-9.
- [3] 吴林志,熊健,马力,等.轻质夹层多功能结构一体化设计[J].力学与实践,2012,34(4):8-18.
WU Linzhi, XIONG Jian, MA Li, et al. Integrated design of lightweight multifunctional sandwich structures[J]. Mechanics and Engineering, 2012, 34(4):8-18.
- [4] ZHANG Y H, DONG H Y, YU C, et al. Metastucture based broadband structural stealth with material-structure-function integration[J]. Composites Science and Technology, 2024, 253. DOI:10.1016/j.compscitech.2024.110661.
- [5] 张雪,彭坚,王铁霖,等.共固化电加热膜材料对夹芯结构性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(2):100-105.
ZHANG Xue, PENG Jian, WANG Tielin, et al. Impact of co-curing electric heating membrane materials on performance of sandwich structures[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 100-105.
- [6] 周鹏飞,朱洪立,李明俊,等.超材料在军用隐身中的应用研究[J].材料工程,2024,52(2):112-121.
ZHOU Pengfei, ZHU Hongli, LI Mingjun, et al. Application research in metamaterials for military stealth[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(2):112-121.
- [7] BEZIUK G, KRAJEWSKI A, BAUM T C, et al. Electromagnetic and electronic aerospace conformal load-bearing smart skins: A review[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2024, 4(1):13-42.
- [8] SHIRKE N, GHASE V, JAMDAR V. Recent advances in stealth coating[J]. Polymer Bulletin, 2024, 81(11):9 389-9 418.
- [9] XIAN Y X, YANG J S, LI H Z, et al. A novel frequency-selective surface-enhanced composite honeycomb absorber with excellent microwave absorption[J]. Polymers, 2024, 16(23). DOI: 10.3390/polym16233312.
- [10] HUANG S L, WEN K, LIU Y C, et al. Optimized design, fabrication, and enhanced performance of honeycomb sandwich structure for excellent impact resistance and broadband microwave absorption[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 681: 365-375.
- [11] LI D M, ZHENG X, GU H, et al. Gradient honeycomb metastructure with broadband microwave absorption and effective mechanical resistance[J]. Nano Materials Science, 2024, 6(4):456-466.
- [12] JONES R M. Mechanics of composite materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 1975.
- [13] MA Z, LIU Y Q, JIANG C. Strong and wide microwave absorption of multilayered metastructure enhanced by impedance matching mechanism[J]. Results in Physics, 2024, 56. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107280.
- [14] QUAN B, WANG Y, CHEN Y, et al. A rational design of multiple-layer films with continuous impedance gradient variation for enhanced microwave absorption[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(7):3 625-3 631.
- [15] 王超,李绣峰,张生俊,等.基于遗传算法的宽带渐变电阻膜超材料吸波器设计[J].物理学报,2024,73(7):152-162.
WANG Chao, LI Xiufeng, ZHANG Shengjun, et al. Design of broadband gradient resistive film metamaterial absorber based on

- genetic algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(7):152–162.
- [16] 孟真,李广德,崔光振,等. 基于超材料的红外/雷达兼容隐身材料研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(21):1–8.
MENG Zhen, LI Guangde, CUI Guangzhen, et al. Research progress of infrared/radar compatible stealth materials based on metamaterials[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(21):1–8.
- [17] SI K X, WAN D Y, WU Y H, et al. Surface impedance modulation of FSS composite absorber for RCS reduction at normal and grazing incidence[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(11):8 915–8 920.
- [18] 包家昕,钟小丹,崔浩. 面向表面行波散射抑制的阻抗调制变量分析[J]. *电子元件与材料*, 2025, 44(1):9–14.
BAO Jiabin, ZHONG Xiaodan, CUI Hao. Analysis of impedance modulation variables for surface travelling wave scattering suppression[J]. *Electronic Components & Materials*, 2025, 44(1): 9–14.
- [19] FU C F, ZHANG X H, LIU X B, et al. RCS reduction of composite transparent flexible coding metasurface combined phase cancellation and absorption[J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 27 365–27 380.
- [20] LI S J, PAN K C, DU J, et al. Coral-inspired terahertz-infrared bi-stealth electronic skin[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(26). DOI:10.1002/anie.202406177.
- [21] HARDIMAN M, VAUGHAN T J, MCCARTHY C T. The effects of pile-up, viscoelasticity and hydrostatic stress on polymer matrix nanoindentation[J]. *Polymer Testing*, 2016, 52:157–166.
- [22] 陈平,熊需海. 特种双马来酰亚胺树脂[M]. 北京:化学工业出版社, 2023.
CHEN Ping, XIONG Xuhai. Special bismaleimide resins[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2023.
- [23] TORQUATO S. Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties[M]. New York:Springer, 2002.
- [24] BORAH L N, DAS S, CHOUDHURY P, et al. Milled graphitic nanoparticle toughened epoxy composites via increased resistance to in-plane crack propagation[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 314. DOI:10.1016/j.matchemphys.2024.128894.