

基于双层吸波结构设计的芳纶/环氧基宽频预浸料的制备及性能研究

李琪¹,任建楠²,苑成策²,邱文荟¹,朱明伟¹,卢少微¹

(1. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110036; 2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110850)

摘要: 研究将吸波剂复配与预浸料成型工艺结合,通过阶梯固化工艺制备芳纶/环氧基的双层吸波层合板。通过片状羰基铁与球形铁粉的复配改善吸波剂的电磁参数和低频吸收性能。基于CST电磁仿真平台建立双层阻抗匹配优化模型。在总厚度仅为3.0 mm的条件下成功研制出兼具宽频(有效吸收带宽7.88 GHz)与强吸收(反射率 ≤ -17.87 dB)特性的双层吸波复合材料。通过“理论分析-仿真模拟-实验验证”的系统研究方法揭示结构型吸波复合材料“微观形貌-电磁特性-宏观性能”的耦合作用机制。研究为新一代隐身复合材料的设计和工程应用提供重要的材料设计方法与工艺实现路径。

关键词: 结构功能一体化;预浸料;电磁仿真;吸波结构

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0166-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.031

Preparation and Performance Study of Aramid/Epoxy-based Broadband Prepreg with Dual-layer Wave-absorbing Structure Design

LI Qi¹, REN Jiannan², YUAN Chengce², QIU Wenhui¹, ZHU Mingwei¹, LU Shaowei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110036, China;

2. Shenyang Aircraft Industrial Group Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

Abstract: The study integrated the compounding of microwave-absorbing agents with the prepreg molding process to fabricate a double-layer microwave-absorbing laminate based on aramid/epoxy. By combining flake carbonyl iron with spherical iron powder, the electromagnetic parameters and low-frequency absorption performance of the microwave-absorbing agents were improved. A double-layer impedance matching optimization model was established based on the CST electromagnetic simulation platform. Under the condition of a total thickness of only 3.0 mm, a double-layer microwave-absorbing composite with both broadband (effective absorption bandwidth of 7.88 GHz) and strong absorption (reflection loss ≤ -17.87 dB) characteristics was successfully developed. Through a systematic research approach of "theoretical analysis-simulation-experimental verification", the coupling mechanism of "microstructure-electromagnetic properties-macroscopic performance" in structural microwave-absorbing composites was revealed. The study provided important material design methods and technological pathways for the design and engineering application of the next generation of stealth composites.

Keywords: Structure function integration; Prepreg; Electromagnetic simulation; Wave-absorbing structure

面对日益完善的雷达探测系统以及愈发激烈的国际竞争,如何使军事装备有效躲避雷达探测、实现隐身功能,

已成为当下的研究热点^[1]。为了降低装备在使用过程中被探测到的风险,通常采用等离子体隐身技术、改变装备外

收稿日期 Submitted date 2025-03-25; 修回日期 Revised date 2025-04-19; 录用日期 Accepted date 2025-05-20

基金项目: 沈阳市重大科技专项(22-301-1-01)

联系人, 13014084415@163.com

引用本文: 李琪,任建楠,苑成策,等. 基于双层吸波结构设计的芳纶/环氧基宽频预浸料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 166-171.

Citation: LI Q, REN J N, YUAN C C, et al. Preparation and performance study of aramid/epoxy-based broadband prepreg with dual-layer wave-absorbing structure design[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 166-171.

形设计以及吸波材料设计这3种方法^[2]。等离子体隐身技术虽能实现动态可调隐身,但其电离层稳定性易受大气密度、温湿度等环境参数影响;而改变装备外形设计则可能引发武器机动能力降低、稳定性变差等风险。相较之下,吸波材料不受速度、温度、气压等外界条件限制,无须对气动外形或结构进行复杂调整,从材料本身出发,既可通过电磁损耗机制实现高效隐身,又可作为承力构件维持装备性能,展现出显著的工程应用优势。根据承载能力的不同,吸波材料可分为涂覆型和结构型两类。与结构型吸波复合材料相比,涂覆型吸波材料具有制造便利、成本低等优点,但其吸波频带窄、涂覆厚度均一可控性差、易脱落等缺点限制其在恶劣环境下的应用^[3]。这促使学术界将研究重点转向结构功能一体化材料,其核心是实现“宽、薄、轻、强”的多目标优化。结构型吸波材料的优化需协同考虑载体与吸波剂体系。在吸波载体方面,载体系统需兼顾力学支撑与电磁调控功能。预浸料成型工艺因其优异的孔隙率控制能力和铺层设计灵活性,已成为主流的制备方案^[4-5]。

在吸波剂体系构建方面,应遵循电磁损耗机制互补原则。传统吸波材料通常由基体材料和吸收剂组成,根据其电磁波损耗衰减机制的不同,可分为电阻损耗型、电介质损耗型和磁损耗型吸波材料^[6]。然而,单一吸波体系存在频带响应受限、阻抗匹配困难等瓶颈^[7]。尤其在低频段设计方面,根据1/4波长理论,低频有效吸收需满足特定厚度要求,但过大的结构厚度会导致器件体积与质量显著增加,从而严重制约其工程应用。低频段吸波剂的调控和结构设计对实现预浸料的宽频吸收至关重要。在有限厚度约束下,提升低频吸波性能的关键在于增强材料的双损耗机制(介电损耗与磁损耗),而材料的微观形貌(如颗粒尺寸、形状、层状排列等)对损耗特性具有显著调控作用^[8]。因此,通过“形貌调控+梯度复配”的设计方案,采用多层结构设计实现阻抗渐变以拓宽吸收频宽,并结合形貌设计改善低频吸收,有望实现增大吸波频宽和提高吸收峰值的目标。

本研究基于自研中温固化芳纶预浸料体系,通过球形铁粉与片状羰基铁粉的形貌复配及吸收频率调控,系统研究吸波剂形貌、成分与性能间的构效关系。结合传输线理论,采用CST电磁仿真软件对吸波层进行梯度结构优化,重点针对低频吸收特性开展层间阻抗匹配设计,构建具有宽频吸收能力的双层复合结构。研究旨在突破传统吸波材料低频吸收性能与薄厚度难以协同优化的技术瓶颈,通过梯度设计探索结构型吸波复合材料的新型构建方法。

1 实验部分

1.1 主要原料

预浸料体系采用环氧树脂,E-51、E-20,南通星辰合成材料有限公司;聚砜(PSU),P160S,华昌聚合物有限公司;

固化剂改性双氰胺,Dyhard Fluid 222,东莞豪盛新材料有限公司;羰基铁粉,WH,武汉理工大学;铁粉,NPE,长沙伊科新材料有限公司;增强体采用芳纶纤维布,克重65 g/m²,鞍山鑫明阳科技有限公司。

1.2 仪器与设备

双辊混炼机,BL61175AL,宝轮精密检测仪器有限公司;液压压机,YT-LH22A1,东莞仪通检测设备科技有限公司;场发射扫描电子显微镜(SEM),JEOL JSM-7800F,日本电子株式会社;振动量子磁强计(VSM),7404,美国Lake Shore公司;矢量网络分析仪(VAN),E5054D,德国安捷伦有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 环氧胶料的制备

量取E-51环氧树脂100 g放于杯中,采用油浴加热升温至180 °C,开启搅拌装置后,分批加入18 g PSU和20 g E-20环氧树脂。待体系均匀后以5 °C/min速率降温至100 °C。加入7 g改性双氰胺固化剂,继续搅拌至体系均一透明后转移至离型纸,经室温自然冷却24 h后获得环氧胶料。

1.3.2 吸波预浸料的制备

吸波剂以NPE为例,进行NPE/芳纶/环氧预浸料的制备及预浸料层合板的固化,图1为NPE/芳纶/环氧预浸料复合板的制备路径。按NPE、环氧树脂质量比65:35进行双辊混炼,经24 h脱泡后压延成膜。裁剪180 mm×180 mm统一尺寸的胶膜与芳纶贴合,双辊热压(温度60 °C)实现芳纶布双面浸润,制备0.25 mm厚预浸料。按0°/90°正交铺层12层后,采用阶梯固化制度(130 °C/1 h→140 °C/20 min)模压成型3 mm层合板。将NPE吸波剂质量分数为65%的复合板命名为NPE65。WH吸波剂质量分数为70%时以相同工艺制得3 mm复合板,命名为WH70。

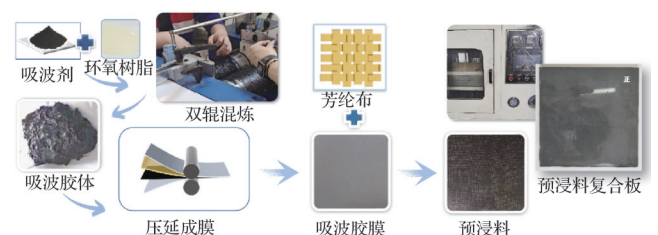


图1 NPE/芳纶/环氧预浸料复合板的制备路径
Fig.1 Preparation path of NPE/aramid/epoxy prepreg composite plates

1.3.3 吸波剂复配

基于吸波剂WH(低频)与NPE(高频)的电磁特性差异,设计3组不同配比的实验方案(N1、N2、N3)。在控制方案中环氧树脂质量分数皆为30%情况下,N1中吸波剂WH、NPE质量比为6:1,N2中吸波剂WH、NPE质量比为5:2,N3中吸波剂WH、NPE质量比为4:3。按照不同配比将两

种吸波剂放入杯中,加入适量丙酮溶液进行超声处理 30 min,至两种吸波剂混匀。上述溶液烘干后研磨 10 min 倒出,即得到不同配比吸波剂,参照 1.3.2 制备 3 种厚度为 2 mm 的单层板(N1~N3)。

1.3.4 双层结构设计及模拟计算

图 2 为 CST 建立的有限元模型。基于 CST 软件建立总厚度 3.0 mm 的双层有限元模型(图 2a),设置理想电导体(PEC)、边界条件(图 2b),使用四面体网格进行模型划分(图 2c)。将 N1~N3、WH70、NPE65 的等效电磁参数带入模型,通过 CST 仿真低频成分变化时(N1、N2、N3、WH70,厚度固定 1.0 mm)和低频 N1 在不同厚度下(1.0、1.5、2.0 mm)的双层板反射率,获得成分和厚度的最优方案。

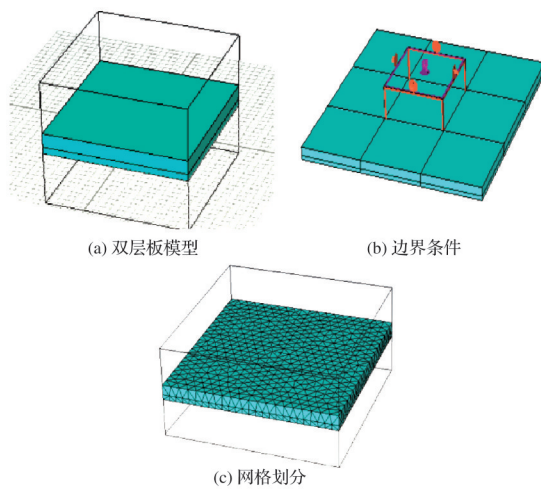


图 2 CST 建立的有限元模型

Fig.2 Finite element model established by CST

1.4 性能测试与表征

SEM 测试:扫描电镜放大 2 000 倍成像,室温。

VSM 测试:采用振动量子磁强计表征粉体的磁滞回线,在室温+2T 范围内。

VAN 测试:采用波导法、弓形梁法测试 2~18 GHz 的等效电磁参数,室温。

2 结果与讨论

2.1 WH 和 NPE 吸波剂微观形貌分析

WH 吸波剂(羰基铁)与 NPE 吸波剂(铁粉)颗粒在微观形貌及电磁特性方面展现出显著差异性,这种结构差异直接影响其电磁波吸收性能的发挥机制。通过场发射扫描电镜表征两种吸波剂,图 3 为两种吸波剂的 SEM 照片。

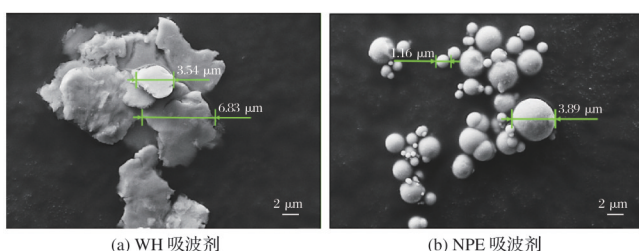


图 3 两种吸波剂的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of two types of wave-absorbers

从图 3a 可以看出,羰基铁粉体呈典型的片状多级结构,其直径分布为 3.54~6.83 μm ,厚度经截面分析测得介于 0.32~0.50 μm 。片状羰基铁比表面积较大,同时具有高磁导率和高介电常数,这种在三维空间内形成的层间堆垛结构有效延长了电磁波传输路径,增加电磁波的散射现象^[8-9]。从图 3b 可以看出,NPE 铁粉颗粒表现为表面光滑的规则球形,粒径分布范围显著收窄(1.00~3.89 μm),其中部分小粒径颗粒通过表面吸附作用作为钉扎点阻碍大颗粒磁畴壁运动,促进多重磁滞损耗现象发生。

2.2 吸波预浸料的电磁性能研究

电磁参数是决定材料吸收能力的重要因素^[10]。随着吸波剂体积分数增加,预浸料体系的等效介电常数呈增长趋势。有研究表明,当体积分数大于 50% 时,体系内逾渗效应显著增强,多重散射与界面极化协同作用使材料磁损耗性能大幅提升^[11]。但当填料含量超过临界值(体积分数大于 70%)时,环氧树脂基体内将出现明显的颗粒团聚现象,随着填料加入量增加,粒子容易团聚而引起应力集中,导致了复合材料的力学性能下降^[12]。但由于 NPE 吸波剂密度较小,在树脂中最大分散质量分数低于 70%,因此分析 WH 吸波剂质量分数为 70%(WH70),NPE 吸波剂质量分数为 65%(NPE65)时各材料电磁参数。图 4 为单一和复配吸波剂方案的电磁性能。图 4a~图 4b、图 4d~图 4f 中电磁参数为测得的各材料复介电常数与复磁导率的数值汇总,其中 ϵ' 和 ϵ'' 分别为复介电常数的实部和虚部, μ' 与 μ'' 分别为复磁导率的实部和虚部。

从图 4a~图 4b 可以看出,单组分体系对比显示 WH70 复合板介电常数与磁导率明显高于 NPE65 复合板。具体而言,WH70 在低频区(1~6 GHz)表现出更高的 ϵ' 值,表明其具有更强的界面极化储能能力。同时,其磁损耗特性与介电损耗形成协同效应,显著增强材料对电磁能的整体耗散^[13]。相比之下,NPE65 体系 ϵ' 与 μ' 的比值更接近自由空间阻抗,表现出更优的阻抗匹配特性。在高频段(12~18 GHz),NPE65 的 ϵ'' 呈现显著上升趋势,这与其高频介电损耗增强的特性相吻合。

从图 4c 可以看出,WH 吸波剂(羰基铁粉)与 NPE 吸波剂(铁粉)两种吸波剂粉体的磁滞回线均表现出软磁材料的典型特征:磁滞回线窄、剩磁低和矫顽力小。除此之外,软磁材料还具有磁导率高、易于磁化及退磁等特点^[14]。磁滞回线斜率反映材料的磁导率,WH 吸波剂的斜率显著高于 NPE,表明其具有更强的磁场响应能力。这一结果与电磁参数测试中 WH70 复合板(图 4a) μ'' 更高的现象相印证,推测源于 WH 吸波剂材料内部更低的磁各向异性能量,使磁矩在外场作用下更易实现协同转向。结合电磁参数分析,WH 吸波剂较高的矫顽力(31.60 Oe)表明其磁畴翻转需要克服更大能量势垒,这种特性有利于通过磁滞损耗机制在低频段实现有效吸波。而 NPE 吸波剂的矫顽力仅为 11.60 Oe,其磁畴壁移动和磁矩旋转所

需能量较低。材料可快速响应高频交变磁场,更适用于 高频的电磁波吸收。

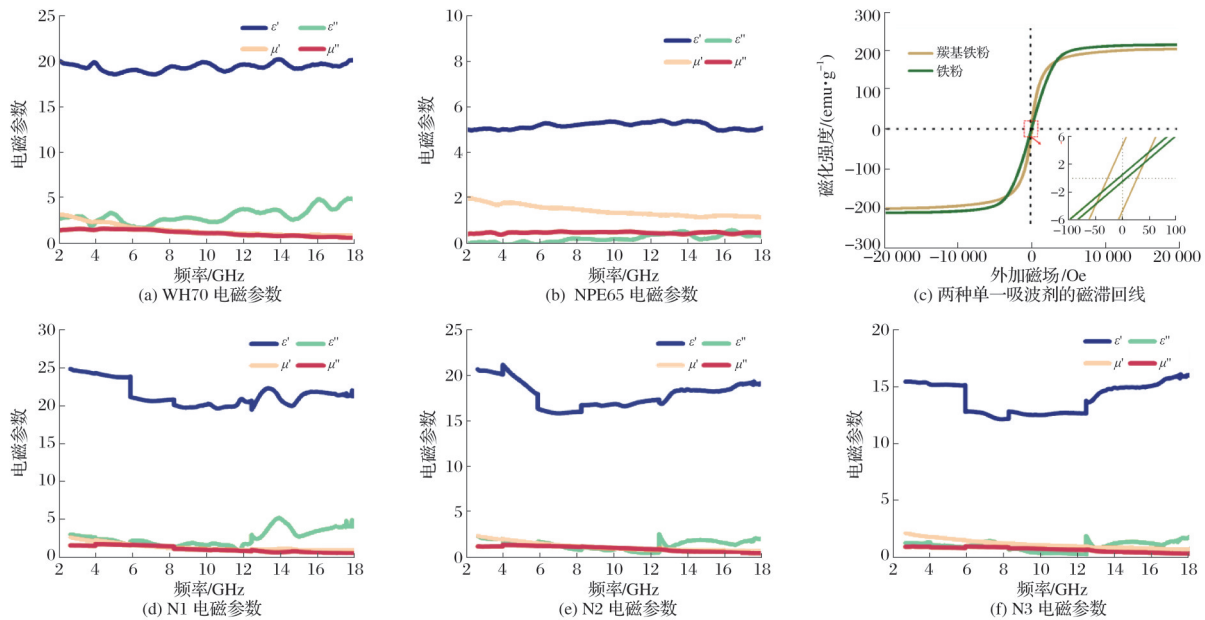


图4 单一和复配吸波剂方案的电磁性能

Fig.4 Electromagnetic properties of single and compound wave-absorbers schemes

多层吸波材料的吸波性能与各层的电磁常数、介电常数、厚度等参数有关^[7]。从电磁损耗机制角度深入分析,羰基铁的片状结构赋予其独特的多模耗散能力。首先,较高的长径比和晶面各向异性使其在基体中形成逾渗网络,通过构建非连续导电通路显著增强了电磁波的多次内反射和界面散射效应^[15]。同时,其几何各向异性有利于形成强涡流损耗^[16],导致材料具备高介电常数特性。材料在较薄厚度内就能够对电磁波进行强介电损耗,因此片状结构在2~6 GHz频段的电磁波损耗能力较球形颗粒提升数倍。球形NPE铁粉的均匀形貌具有几何对称性,有利于降低磁各向异性场,进而通过动态磁化过程提升自然共振频率。若将二者混合,球形颗粒的引入可有效调控材料体系的介电极化强度,提升总体电磁参数^[17]。但球形掺杂量过高,则会导致材料阻抗匹配降低,影响吸收性能。

从图4d~图4f可以看出,N1复合板对应介电常数和磁导率最大,N3最小。随着NPE吸波剂含量增加,复合材料呈现显著参数演化: ϵ' 从19.49~22.31(N1)降至12.19~15.46(N3), μ' 从0.94~2.52降至0.81~2.16。这种现象主要归因于两方面机制:(1)WH吸波剂中羰基铁颗粒有利于形成不连续网络,增加对入射微波的漫反射,还可以带来更多的界面电荷极化,从而增强对电磁波的吸收强度^[18]。(2)过量NPE吸波剂引发的团聚效应会破坏连续导电网络,导致 ϵ'' 降低。N1体系因保留较高的WH质量分数,其兼具高介电损耗($\epsilon''=12.19\sim 15.46$)和磁损耗($\mu''=0.41\sim 1.04$),这种双损耗协同机制使其在薄厚度下即可实现对低频电磁波的高效衰减^[19]。低频电磁波波波长较长,需要材料在有限厚度内实现强衰减,而N1的高损耗特性在薄层中即可有效耗散能量。

2.3 预浸料吸波与雷达散射截面(RCS)模拟结果

通过CST仿真平台开展双层吸波结构参数优化研究。图5为电介质和厚度对反射率的影响。图5a为固定高频NPE65厚度为2.0 mm时,不同低频介质方案的双层板反射率对比。从图5a可以看出,选择N1介质(厚度1.0 mm)时,由于上下层电磁参数差异显著成功实现双峰耦合机制。而采用WH70、N2、N3时,谐振峰间距消失,虽然单峰吸收深度提升,但其有效带宽无法满足超宽带设计要求。图5b为固定上层高频介质为NPE65、下层低频介质为N1时,系统模拟了3组不同厚度组合的反射特性。从图5b可以看出,当NPE65厚度为2.0 mm、N1厚度为1.0 mm时,2~18 GHz频段内呈现出明显的双谐振峰特征。NPE吸波剂作为磁损耗型材料,涡流损耗效应会随频率升高而增强,足够的厚度既遵循1/4波长谐振原理,又可以保证高频电磁波经历多次反射衰减和能量转化过程。而当NPE65厚度减薄时(1.0、1.5 mm),其高频谐振峰向18 GHz以上频段偏移,原设计频段出现阻抗失配,导致有效工作带宽缩减。合适的厚度(2.0 mm)可以让两谐振峰之间区域产生叠加效应,高低频间过渡更平滑实现宽频匹配。综合上述研究结果,确定NPE65(2.0 mm)/N1(1.0 mm)为最优组合方案。

图6为双层板模拟实测对比及雷达反射仿真。从图6可以看出,将实测双层板与模拟值曲线进行对比,两曲线大致走向与峰位置相似,多处出现重合,实验曲线与仿真结果在峰位偏移量、吸收带展宽等方面呈现良好一致性。最终优化方案显示,该复配结构在3 mm总厚度下实现双吸收峰特性:低频峰(6.76 GHz, -17.53 dB)和 高频峰(15.50 GHz, -15.56 dB)。在4.30~18.00 GHz宽频范围内反

射率均低于-6 dB,有效吸收带宽(EAB,反射率 ≤ -10 dB)达7.88 GHz(5.29~8.00 GHz, 12.83~18.00 GHz)。

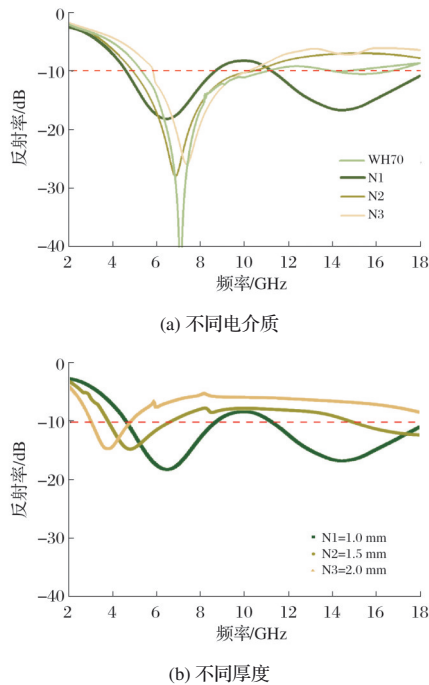
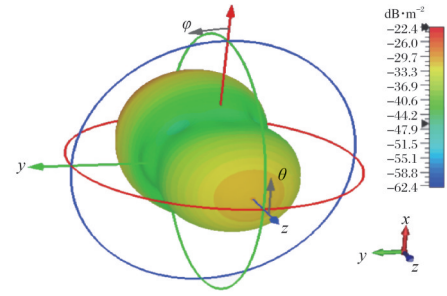
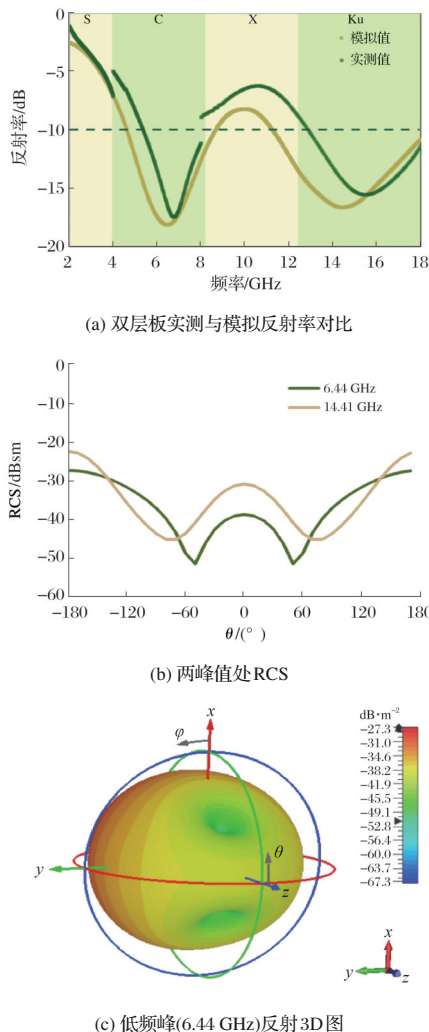


图5 电介质和厚度对反射率的影响

Fig.5 Effect of dielectric and thickness on reflectivity



(d) 高频峰(14.41 GHz)反射3D图

图6 双层板模拟实测对比及雷达反射仿真

Fig.6 Simulation and actual measurement comparison of double-layer board simulation and radar reflection

表1为纤维增强树脂预浸料吸波研究现状。从表1可以看出,本研究设计的双层复合吸波结构在保持合理厚度的前提下展现出显著的带宽优势。当复合板总厚度控制为3 mm时,本方案的有效吸收带宽达到7.88 GHz,较文献[25]的4.32 GHz提升82.4%。更值得注意的是,文献[27]通过将总厚度增加62.5%(由3.00 mm增至4.88 mm)仅实现2.12 GHz的带宽增益,而本研究在维持3 mm厚度的条件下已实现更优的宽带吸收性能。这为宽频吸波材料的结构设计提供了新思路。

表1 纤维增强树脂预浸料吸波研究现状

Tab.1 Research status of wave-absorbing in fiber-reinforced resin prepreg

材料	带宽/ GHz	最低反射率/ dB	厚度/ mm	文献来源
石墨烯/玻璃纤维	1.45	-11.8	1.700	文湘隆等 ^[20]
石墨烯/芳纶纤维	3.40	-48.4	1.900	阮彦辉 ^[21]
钴纳米粒子掺杂 氮碳纳米管	5.28	-21.0	2.000	ZENG等 ^[22]
羰基铁粉/玻璃纤维	2.10	-56.3	2.200	张雪霏等 ^[23]
二氧化铈/多壁碳 纳米管	3.40	-51.5	2.600	WU等 ^[24]
碳纳米管/四氧化 三铁	4.32	-51.1	3.000	REN等 ^[25]
钴/碳纳米纤维	3.30	-35.9	4.500	魏武超等 ^[26]
碳纤维层压板	10.00	-43.6	4.875	纪正江等 ^[27]
羰基铁粉/芳纶纤维	7.88	-17.53	3.000	本研究

在方位角(φ)为0时,对俯仰角(θ)角度 $\pm 180^\circ$ 的双层设计 RCS 进行全角度仿真分析。结果表明:材料在低频(6.44 GHz,图6c)与高频(14.41 GHz,图6d)的散射特性呈现显著差异。图6c中 RCS 三维分布呈现高度对称的球形特征,表明材料在此频段对电磁波的散射各向同性较强。在X轴正负方向($\theta=0^\circ$ 与 180°)及Z轴夹角区域($\theta=\pm 90^\circ$ 附近)观测到两处零陷区域,其RCS值低于-40 dBsm。通过雷达射界面与俯仰角的二维曲线图(图6b)分析发现,材料在 $\pm 60^\circ$ 方位角处的RCS达到最低峰值(-45.25 dBsm),与三

维零陷位置吻合。此现象可归因于低频波长较长,吸波材料与基体结构的谐振效应导致特定方向相消干涉增强。高频(图6d)RCS三维分布由球形转变为非对称“葫芦型”结构, X 轴与轴向(Y/Z 轴)方向出现显著凹陷,表明高频电磁波阻抗匹配作用增强。对应的曲线(图6b)显示,电磁波在 $\pm 65^\circ$ 方向被有效吸收,最低峰值降至-50.12 dBsm。这一模拟特性与高频表面波抑制及多层吸波结构的宽带阻抗匹配优化相关。

3 结论

本研究将吸波剂复配与预浸料成型工艺结合,通过阶梯固化工艺($130^\circ\text{C}/1\text{h}\rightarrow 140^\circ\text{C}/20\text{min}$)制备芳纶/环氧基的双层吸波层合板。通过片状羰基铁与球形铁粉的复配,改善吸波剂的电磁参数和低频吸收性能,实现吸波剂在2~8 GHz频段内的优异吸波性能。基于CST电磁仿真平台,建立了双层阻抗匹配优化模型。主要研究结论如下:

NPE吸波剂形貌特征与电磁损耗机制存在显著关联规律。片状羰基铁的高长径比和比表面积产生多重散射效应,结合结构各向异性诱导的强涡流效应,使其在2~6 GHz低频段呈现优异吸波性能。

利用分频吸收进行叠层设计,所得双层预浸料板材的电磁波反射率能够满足宽频吸波需求。当低频层(N1)厚度为1.0 mm、高频层(NPE65)厚度为2.0 mm时,双层板结构可实现宽频域的阻抗渐变匹配,所得板材的有效吸收带宽为7.88 GHz,最低反射率-17.53 dB。研究为高性能吸波材料的开发和工程应用提供了设计思路。

参考文献

- [1] SONG S J, XIONG C, YIN J H, et al. Design of multifunctional polymethacrylimide foam sandwich with excellent radar absorption capability and compressive performance[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2024, 26(6): 812-830.
- [2] 刘晓明, 华宇晨, 傅远翔, 等. 雷达吸波材料研究进展[J]. *中国材料进展*, 2023, 42(9): 685-698.
- [3] 张明伟, 曲冠达, 庞梦瑶, 等. 电磁屏蔽机理及涂敷/结构型吸波复合材料研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(增刊1): 62-70.
- [4] 蔡海硕. 纤维增强环氧树脂吸波复合材料的电磁性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [5] LIU S, QIN S H, JIANG Y, et al. Lightweight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 145: 106376.
- [6] 韩敏阳, 韦国科, 周明, 等. 低频雷达吸波材料的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1363-77.
- [7] 马觅洋, 张西军, 曾一兵. 多层结构设计在吸波材料中的应用[J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(4): 8-13.
- [8] 卢明明, 刘甲, 宫元勋, 等. 不同形貌羰基铁的复合对电磁特性及吸波性能的影响[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 95-99.
- [9] HASSAN M H. A mini review on manufacturing defects and performance assessments of complex shape prepreg-based composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(11/12): 1-16.
- [10] ZHOU Q, YIN X W, YE F, et al. A novel two-layer periodic stepped structure for effective broadband radar electromagnetic absorption[J]. *Materials & Design*, 2017, 123: 46-53.
- [11] DU L F, SHI T T, ZHOU Q, et al. A multi-layer square frustum metamaterial for ultra-broadband electromagnetic absorption based on carbonyl iron powder/carbon fiber composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 950: 169917.
- [12] 郭志超, 倪爱清, 陈俊磊, 等. 吸波预浸料树脂及其复合材料的综合性能研究[J]. *材料导报*, 2024, 38(10): 231-240.
- [13] 孔祥林, 刘佳琪, 赵雷, 等. 一种基于多机制协同设计的低频超宽带吸波体[J]. *中国科学:信息科学*, 2024, 54(12): 2868-2880.
- [14] CHEN L Y, DUAN Y P, LIU L D, et al. Influence of SiO_2 fillers on microwave absorption properties of carbonyl iron/carbon black double-layer coatings[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(2): 570-574.
- [15] 朱佩, 代波, 任勇, 等. 碳纤维/镍复合材料的制备与电磁屏蔽效能[J]. *电子工艺技术*, 2024, 45(3): 50-53.
- [16] ZHANG J L, QU X H, YIN J H, et al. Controllable synthesis of core-shell $\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$ composite abrasives for chemical mechanical polishing of EMC-Si-Cu multi-heterointerfaces[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2025, 334: 130509.
- [17] ZHENG J J, HE W W, HANG T Y, et al. Flower-like bimetal-organic framework derived composites with tunable structures for high-efficiency electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 628: 261-270.
- [18] 刘毅, 刘一璇, 张森, 等. 包覆铜粉的制备及其电磁吸波性能[J]. *西安工程大学学报*, 2023, 37(3): 36-43.
- [19] YANG Z N, WANG J, YANG Z H, et al. Enhancing the microwave absorption performance of graphite/ Al_2O_3 composites through manipulating sheet resistance[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2024, 107(8): 5473-5481.
- [20] 文湘隆, 廖思凡, 陈凯, 等. 环氧树脂/玻璃纤维/石墨烯复合材料的电磁吸波性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3): 126-131.
- [21] 阮彦辉. 芳纶纤维/铁基材料复合气凝胶的高频电磁性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [22] ZENG B, ZHANG P, LI H J, et al. Flammulina velutipes-like $\text{Co}@\text{NCNTs}$ enhancing the electromagnetic wave absorption performance[J]. *Results in Physics*, 2021, 29: 104751.
- [23] 张雪霏, 周金堂, 姚正军, 等. CIP/GF/CF/EP吸波复合材料的制备及力学性能[J]. *材料工程*, 2019, 47(10): 141-147.
- [24] WU Y, SHU R W, ZHANG J B, et al. Oxygen vacancy defects enhanced electromagnetic wave absorption properties of 3D net-like multi-walled carbon nanotubes/cerium oxide nanocomposites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 616-626.
- [25] REN M M, LI F X, WANG B H, et al. Preparation and electromagnetic wave absorption properties of carbon nanotubes loaded Fe_3O_4 composites[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 513: 167259.
- [26] 魏武超, 梁亮亮, 张子强, 等. 钴/碳纳米纤维复合材料的制备及吸波性能研究[J]. *中国材料进展*, 2021, 40(6): 432-440.
- [27] 纪正江, 程琳豪, 郑锡涛, 等. 基于碳纤维的层合结构双极化电磁吸波及其弯曲性能设计[J]. *应用数学和力学*, 2024, 45(8): 1096-1105.