



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

## 《国防科技大学学报》网络首发论文

题目：层合结构复合材料电磁结构铺层优化设计  
作者：尉涑, 吴楠, 邢素丽, 赵一鸣, 张鉴炜, 尹昌平  
收稿日期：2024-11-04  
网络首发日期：2024-12-06  
引用格式：尉涑, 吴楠, 邢素丽, 赵一鸣, 张鉴炜, 尹昌平. 层合结构复合材料电磁结构铺层优化设计[J/OL]. 国防科技大学学报.  
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20241206.1056.002>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 层合结构复合材料电磁结构铺层优化设计

尉 涑, 吴 楠\*, 邢素丽, 赵一鸣, 张鉴炜, 尹昌平

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为了提升层合结构复合材料的电磁波吸收效能, 探究其电磁结构对吸波性能的影响。采用模压工艺制备了含磁性电磁波吸收剂的树脂基复合材料。利用同轴法测试复合材料的电磁参数, 通过弓形架测量法对复合材料的反射率进行测定。实验结果证实了以电磁参数为输入进行复合材料吸波性能仿真计算的可行性; 针对复合材料的电磁结构进行铺层设计优化, 通过仿真计算筛选出综合吸波性能最佳的设计方案, 并制备相应的复合材料进行反射率测试, 证明了铺层设计对吸波性能的有效优化。结果表明, 单一吸收剂含量的复合材料吸波性能不佳, 而经过铺层设计后复合材料的有效吸收带宽可达 9.65 GHz, 针对复合材料电磁结构的优化设计能够显著提升其吸波性能。

**关键词:** 电磁波吸收材料; 复合材料; 反射率; 铺层设计

中图分类号: TB34 文献标识码: A

## Optimized design of electromagnetic structural lay-ups for laminated structural composites

WEI Lai, WU Nan\*, XING Suli, ZHAO Yiming, ZHANG Jianwei, YIN Changping

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to enhance the electromagnetic wave absorption efficiency of composite materials with laminated structure and to investigate the effect of electromagnetic structure on wave absorption performance, resin matrix composites containing magnetic electromagnetic wave absorbents were prepared by molding process. The electromagnetic parameters of the composites were analyzed using coaxial method, while the reflectance was tested by the bow-frame measurement method. The experimental results proved that the simulation calculation of the wave absorption properties of composites using electromagnetic parameters as inputs is feasible. Then the electromagnetic structures of composites are optimized for lay-up design. The design solution with the best wave absorption performance is selected by simulation calculations, and the reflectance testing of the composites demonstrated the effective optimization of the lay-up design. The results indicate that the composites with a single absorbent content have poor absorption performance, but the effective absorption bandwidth can reach 9.65 GHz after the lay-up design. The optimization of the electromagnetic structure of the composites can significantly improve its wave absorption performance.

**Keywords:** electromagnetic wave absorbing materials; composite materials; reflectivity; lay-up design

智能化时代下科技的发展日新月异, 电磁环境日趋复杂。电磁波吸收材料能够吸收或大幅衰减电磁波, 将电磁能转换为热能等形式的能量; 其在强化电磁防护和减弱电子元件相互干扰等方面有着重要作用<sup>[1-3]</sup>。

当前电磁环境复杂多变, 对吸波材料提出了薄、轻、宽、强的性能要求, 即材料厚度薄、整体质量轻、作用频段宽、吸波性能强。这意味着吸波材料需要向着结构功能一体化的方向发展, 吸波复合材料具有满足上述性能需求的潜质<sup>[4-5]</sup>。树脂基复合材料综合性能优异, 具备制备成本低、

可设计性高、工艺性简便的优点, 并且能够通过调控吸收剂的种类、含量和分布等参数对吸波性能进行有效优化<sup>[6-8]</sup>。

树脂基吸波复合材料的基体材料主要由树脂基体和纤维增强体组成。若要具备优异的吸波性能, 则基体材料必须具备适当的阻抗匹配和损耗衰减性能。另外, 吸波材料在吸收电磁波能量时通常会产热, 其工作环境也普遍为高温环境, 这表明基体材料还需具备较好的耐温性能。调研发现, 聚酰亚胺树脂和石英纤维具有良好的介电性能, 耐热性能优异, 并且各自的力学性能均较

\* 收稿日期: 2024-11-04

基金项目: 国防科技大学自主创新科学基金 (22-ZZCX-076)

第一作者: 尉涑 (2000—), 男, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, E-mail: 2861706757@qq.com;

\* 通信作者: 吴楠 (1989—), 男, 山东威海人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: lierenwn@nudt.edu.cn

高,能够满足作为吸波材料基体的性能需求<sup>[9-10]</sup>。董洁等采用模压法制备了石英纤维增强聚酰亚胺树脂基复合材料,对模压工艺参数进行了优化<sup>[11]</sup>;并且利用不同比例的炭黑掺入石英玻璃纤维增强聚酰亚胺复合材料,制备了在 X 和 Ku 波段能够发挥效能的吸波材料<sup>[12]</sup>。

吸波材料的核心关键是吸收剂,其承担着发挥吸波性能的重要作用。根据电磁波损耗原理,可以将其分为介电损耗型和磁损耗型<sup>[13-14]</sup>。介电型吸收剂主要依靠电导损耗和极化损耗来吸收电磁波能量,但其损耗机制较为单一。磁损耗型吸收剂主要利用共振效应、涡流损耗和磁滞损耗等机制发挥吸波作用,具有优异的可设计性和多样化的形貌结构,是理想的电磁波吸收剂,并且其居里温度较高,能够应用于多种复杂环境。

磁性吸收剂主要包括铁氧体、磁性金属材料等。但铁氧体存在着密度较大,高温下会丧失磁损耗能力的缺点。 $\text{Co}_3\text{Fe}_7$ 是一种磁性合金,由 Fe、Co 等磁性元素组成,是典型的磁性金属材料。当 Fe、Co 的元素比为 7:3,且形貌结构为薄片状时,磁性能为同系材料中最佳,具有优异的电磁波损耗衰减能力。相关研究表明,ZnO 能够改善  $\text{Co}_3\text{Fe}_7$  的阻抗匹配性能,从而提升其吸波性能<sup>[15-17]</sup>。

吸收剂在复合材料中的含量、分布和状态等因素均影响着复合材料的吸波性能。探究吸收剂对复合材料的吸波性能影响,验证吸波复合材料的应用性具有重要意义。以 ZnO 包覆的  $\text{Co}_3\text{Fe}_7$  为吸收剂,简称为  $\text{Co}_3\text{Fe}_7/\text{ZnO}$ 。聚酰亚胺树脂和石英纤维为基体材料,采用模压成型的方法制备了层合结构的树脂基复合材料。通过仿真与实验对比分析的方法,探究了吸收剂含量对复合材料吸波性能的影响规律,研究了电磁结构铺层方式与复合材料吸波性能的构效关系。

## 1 实验

### 1.1 复合材料的制备

首先,利用涂膜设备将聚酰亚胺树脂与石英纤维制备成预浸料,以此作为基体材料。而后将聚酰亚胺树脂分别与不同含量的  $\text{Co}_3\text{Fe}_7/\text{ZnO}$  吸收剂均匀混合,在涂膜机上压制为含吸收剂的树脂基电磁膜; $\text{Co}_3\text{Fe}_7/\text{ZnO}$  在电磁膜中的质量分数分别为 0 wt%、40 wt%、60 wt%、80 wt%。然后将预浸料与上述电磁膜分别按照交替铺层的方式,通过模压成型的方法制备为层合结构的复合材料。如图 1 所示,层合板的几何尺寸为  $300\text{ mm} \times 300$

mm,厚度为 3 mm。由于各个层合板分别使用了不同吸收剂含量的电磁膜,故以吸收剂含量为划分依据,将层合板分别命名为 0#、40#、60#和 80#。

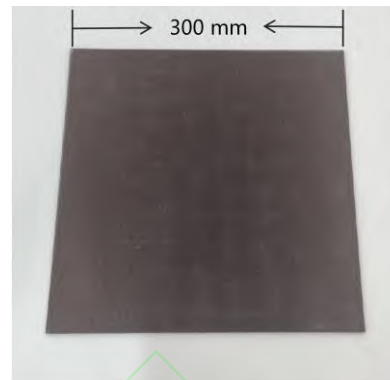


图 1 层合结构复合材料的光学照片

Fig.1 The optical photo of laminated structural composites

### 1.2 复合材料吸波性能测试

#### 1.2.1 电磁参数测试

通过水射流切割技术将复合材料切制成外径为 7 mm、内径 3 mm、厚度为 2 mm 的同轴环,如图 2 所示。采用 Agilent 8720B 型矢量网络分析仪测定其在 2~18 GHz 频率范围内的介电常数和磁导率。根据所得电磁参数,采用 CST Studio Suite 仿真计算出复合材料在 2~18 GHz 内的吸波性能。

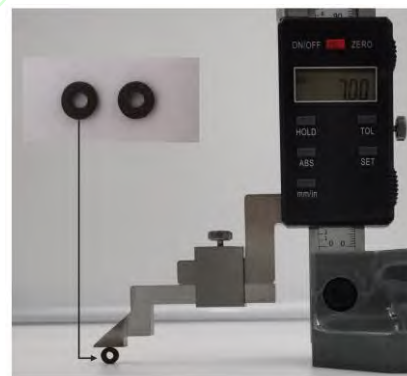


图 2 复合材料同轴环的光学照片

Fig.2 The optical photo of composite coaxial ring

#### 1.2.2 反射率测试

参照 GJB2038A-2011,采用弓形架测量法对复合材料层合板的反射率进行测试。该方法在 20 世纪 40 年代由美国海军实验室发明,也是当前应用最广泛的吸波材料反射率测试方法<sup>[18]</sup>。整个测试系统由半圆形天线架和收发天线组成,该系统能够测试 -20 dB 以上的反射率数据,且精度最高可达 1.2 dB。如图 3 所示为弓形架反射率测试系统示意图。

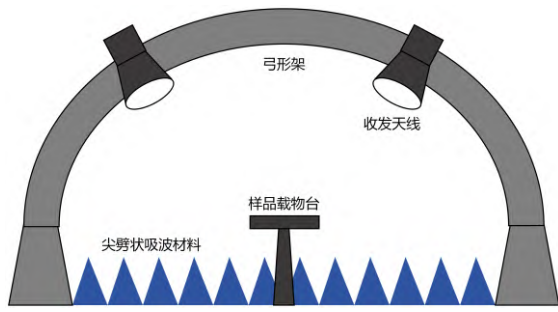


图3 弓形架测量法示意图

Fig.3 The schematic diagram of the bow-frame test method

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸波材料的吸波机理

根据传输线理论，通常采用反射损耗系数（reflection loss, RL）来表示吸波材料的电磁波吸收性能，如式 1 所示。当  $RL < -10$  dB 时说明电磁波能量的 90% 能够被吸波材料有效吸收。随着电磁波频率的变化，材料的 RL 值也会发生改变，在电磁波频率范围内的最佳反射损耗（the minimum reflection loss,  $RL_{\min}$ ）代表了材料对电磁波能量的最强吸收性能。若某一频段内的 RL 值均能达到 -10 dB 以下，将该频段称为有效吸收频段，其频段宽度称为有效吸收带宽（effective absorption bandwidth, EAB）<sup>[7]</sup>。

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

式中， $Z_{in}$  为材料的输入阻抗， $Z_0$  为自由空间阻抗。

理想的吸波材料必须同时具备良好的阻抗匹配与损耗衰减性能。阻抗匹配是指电磁波能够顺利入射进入吸波材料，即自由空间阻抗与吸波材料输入阻抗完全匹配，但只有当介电常数与磁导率相等时，才能达到完全匹配，而没有材料能够具备该性质，因此只能尽量让二者数值接近，提升阻抗匹配性能。损耗衰减则是表征材料对入射电磁波能量损耗与吸收的能力，材料电磁参数的虚部越大，对电磁波的损耗衰减性能越强<sup>[14]</sup>。

可以看出，吸波材料的阻抗匹配和损耗衰减性能是其吸波性能的决定性因素，但两者对材料本征参数的要求是相悖的；因此，通过调控吸波材料的电磁结构来优化其吸波性能是十分必要的。

### 2.2 层合结构复合材料吸波性能

利用矢量网络分析仪对不同层合板的同轴环

进行测试，根据所得电磁参数，通过 CST 仿真计算其吸波性能，结果如图 4 所示。

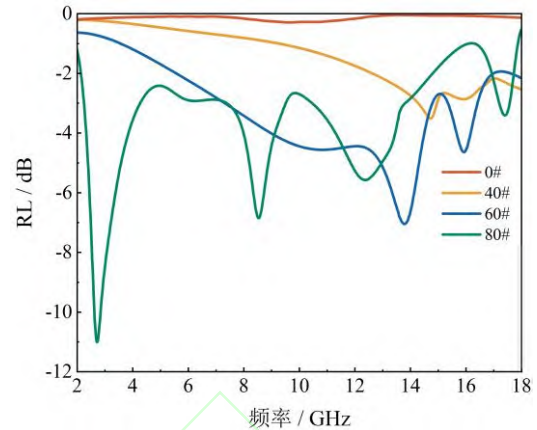


图4 不同吸收剂含量的复合材料吸波性能对比图

Fig.4 The comparison of wave absorption properties of composites with different absorbent contents

由图 4 可知，在 14.6 GHz 的频带宽度（2~15.2 GHz 和 16.6~18 GHz）内 60# 的吸波性能优于 40#；在 9.4 GHz 的频带宽度（2~12.9 GHz、11.5~12.9 GHz 和 16.8~17.7 GHz）内 80# 的吸波性能优于 60#，在 12.7 GHz 的频带宽度（2~14.1 GHz 和 17.0~17.6 GHz）内 80# 的吸波性能优于 40#，并且 80# 的  $RL_{\min}$  值可达 -11.02 dB。这说明随着吸收剂含量在层合板中逐渐增加，复合材料的吸波性能逐渐增强。另外，80# 出现了多个吸收峰值，多吸收峰的存在有望拓宽复合材料的有效吸收带宽。

上述含有  $Co_3Fe_7/ZnO$  吸收剂的层合板  $RL_{\min}$  与 EAB 值的仿真计算结果如表 1 所示。分析可知，随着复合材料中吸收剂含量的增加，层合板的最佳反射损耗值逐渐提升，有效吸收带宽在较高含量（80 wt%）时能够达到 -10 dB 以下，具备了良好的吸波性能，但带宽值仅为 0.21 GHz，仍有较大优化空间。

表 1 不同吸收剂含量的复合材料吸波性能的仿真结果  
Tab.1 The simulation results of wave absorption properties of composites with different absorbent contents

复合材料	$RL_{\min}$ / dB	EAB / GHz
40#	-3.51	0
60#	-7.05	0
80#	-11.02	0.21

### 2.3 复合材料吸波性能的测试及仿真数值验证

根据电磁参数与仿真计算所得的复合材料吸

波性能属于仿真结果，其与复合材料真实的反射率数据仍有一定差异<sup>[11,19-22]</sup>。导致这种差异的原因主要有三点：

1) 电磁参数的测试样品是通过水射流切割得到的同轴环，但水射流产生的剧烈冲击力，必然会对同轴环的层间状态产生影响，这种复合材料内部结构的变化很可能导致所测同轴环的电磁参数与层合板的实际电磁参数出现差异。为了避免该类差异，在进行复合材料电磁参数测试时，通常测量多个同轴环样品的电磁参数，将具有异常数据波动的样品排除，选取数据稳定的样品作为电磁参数的输入。

2) 提供吸波性能的  $\text{Co}_3\text{Fe}_7/\text{ZnO}$  吸收剂是以电磁膜的形式与复合材料相结合，在复合材料制备的过程中，电磁膜与预浸料中的聚酰胺树脂在固化时粘度会随着温度的升高而不断变化，此时吸收剂在各层的分布必然会受到影 响，无法完全均匀的分布在复合材料之中，因此同轴环的电磁参数难以完全准确的表征吸收剂在复合材料中的分布状态。电磁膜中吸收剂的含量越多，其在复合材料层间的分布状态则越复杂，因此，该类差异会随着吸收剂含量的增加而逐渐加剧。

3) 反射率测试方法采用了弓形架法，该法是通过弓形架弧面上的收发天线来发射与接收电磁波，但实际上弓形架的收发天线无法完全重合（如图 3 所示），这导致在实际的反射率测试过程中会存在一个约  $7^\circ\sim 10^\circ$  的测试入射角。而为了探究层合结构复合材料的吸波性能变化规律，在仿真设计中通常采用同一端口进行收发电磁波（即  $0^\circ$  收发）。电磁波的入射角影响着其极化状态以及传播特性（如相位角、衰减常数等），进而影响吸波材料的阻抗匹配性能与损耗衰减性能。因此，仿真数据与实测数据的反射损耗系数峰值位置及其强度会不可避免的存在一个固有误差。

综上所述，需要对复合材料的反射率进行测试，对比仿真与实测的结果，证明同轴环测试电磁参数的可信性以及仿真计算吸波性能的准确性。

通过弓形架测量法对复合材料的反射率进行测试，图 5 为 40#吸波性能的仿真结果与实测结果对比。分析可知，仿真数据与实测数据整体趋势类似，均呈现出随着频率增加，RL 的绝对值逐渐增大，在较高频范围内达到最佳反射损耗值。仿真数据的  $\text{RL}_{\min}$  值位于 15 GHz 附近，实测数据的  $\text{RL}_{\min}$  值位于 16 GHz 附近，由于仿真模拟会忽略材料制备、测试等诸多因素的影响，考虑到电磁性能测试的特殊性，造成这种峰值偏移的原因

是多方面的，但观察数据的整体趋势，可以认为仿真与实验结果具有一定的对应性。

另外，由于 40#中吸收剂的含量不足，导致 40#的吸波性能表现不佳，实测的  $\text{RL}_{\min}$  值仅为 -2.53 dB。

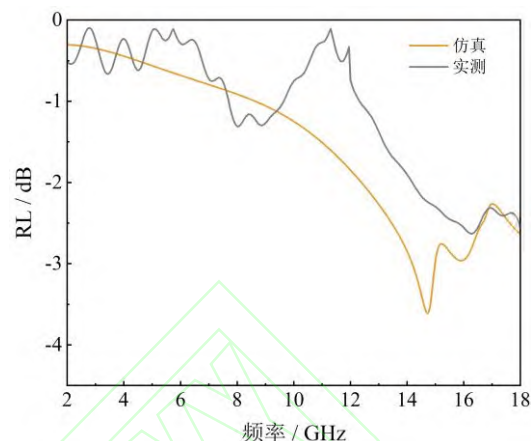


图 5 40#吸波性能的仿真与实测对比图

Fig.5 Comparison between simulation and measurement of 40# absorbing performance

60#吸波性能的仿真结果与实测结果对比如图 6 所示。分析可知，仿真与实测数据 RL 曲线的整体变化趋势基本对应， $\text{RL}_{\min}$  值均位于 14~15 GHz 范围内，说明了仿真结果具有可信性。其中，位于 6~12 GHz 频段范围内的仿真与实验数据在数值上有所差距，除了同轴法测试电磁参数与复合材料实际电磁参数存在的差异外，也可能是材料制备过程中的尺寸误差及反射率测试的固有误差所导致的。

另外，60#的吸波性能也不理想，实测  $\text{RL}_{\min}$  的数值仍未达到 -10 dB 以下，无法获得有效的吸收频段。

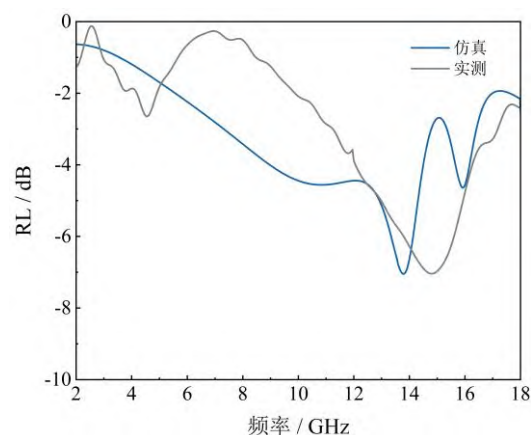


图 6 60#吸波性能的仿真与实测对比图

Fig.6 Comparison between simulation and measurement of 60# absorbing performance

80#吸波性能的仿真结果与实测结果对比如

图 7 所示。分析可知，80#在 2~18 GHz 频段内拥有多个吸收峰，分别位于 2 GHz、8 GHz 和 14 GHz 附近，其在较高频范围内的  $RL$  值未能达到与仿真数据的准确对应，但在整个 2-18 GHz 频率范围内，两者变化趋势基本一致，说明了仿真结果的具有一定的正确性。

另外，80#的实测  $RL_{\min}$  值为 -11.3 dB，虽然达到了有效吸收的要求，但  $EAB$  值仍较低，距离理想的吸波性能有较大差距。

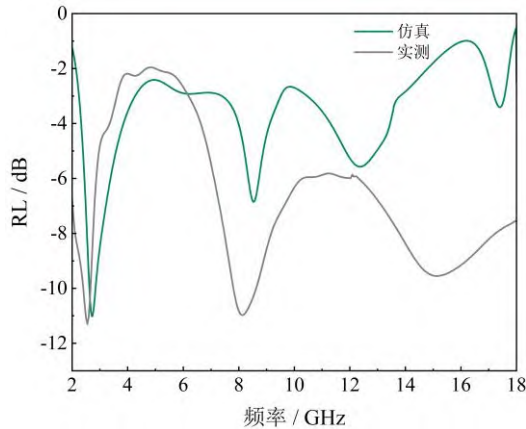


图 7 80#吸波性能的仿真与实测对比图

Fig.7 Comparison between simulation and measurement of 60# absorbing performance

综上所述，复合材料的吸波性能随着吸收剂含量的增加而有所提高。仿真与实测的对比结果表明根据同轴环电磁参数仿真计算的吸波性能与复合材料的实际吸波性能基本相似，但在个别频段仍会有所差异，这种差异来自于材料制备及测试等多方面，难以完全消除。另外，两者间的差异随着复合材料中吸收剂含量的增加而逐渐明显。

性能优异的吸波材料需要同时满足良好的阻抗匹配和损耗衰减性能。而这两种性能对材料电磁参数的要求又相互矛盾，上述实验结果也表明仅仅依靠单一的吸收剂含量，复合材料必然难以同时满足阻抗匹配与损耗衰减的性能需求，因此必须对复合材料的电磁结构进行优化设计来提升其吸波性能。

## 2.4 电磁结构设计对吸波性能的影响

通过仿真与实测数据的对比，已证明了同轴法对复合材料电磁参数的准确测定。为了进一步优化复合材料的吸波性能，以复合材料同轴环的电磁参数为输入，仿真模拟具有多种吸收剂含量的层合结构复合材料，分析不同电磁结构铺层方案下吸波性能的变化规律，并按仿真计算所得的优势方案制备对应的复合材料，进行反射率测试，

验证所得结论的准确性与适用性。

为了进行铺层设计，将不同吸收剂含量的 0#、40#、60#和 80#作为单层单元。含有 4 种吸收剂含量的复合材料进行叠层时共有 24 种排列方式。如表 2 所示，仿真计算了所有排列方式下复合材料的吸波性能。命名方式为：名称的由左至右代表在仿真时铺层顺序的由左至右，如图 8 所示，左侧的深红色面板为仿真时电磁波的入射方向，即在图 8 中电磁波由左至右的方向以平行正入射的方式发射至吸波材料表面。

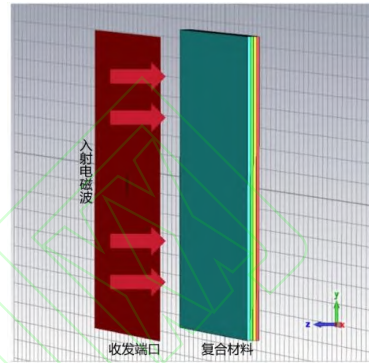


图 8 复合材料的电磁结构设计仿真示意图

Fig.8 Simulation diagram of electromagnetic structure design of composite materials

表 2 电磁结构铺层设计方案及其吸波性能仿真结果

Tab.2 The design scheme of electromagnetic structure lay-out and the simulation result of absorbing performance

铺层方案	$RL_{\min}$ / dB	$EAB$ / GHz	铺层方案	$RL_{\min}$ / dB	$EAB$ / GHz
0-40-	-20.72	6.38	60-40-	-44.55	6.77
60-80	-18.89	4.24	0-80	-37.71	4.02
0-40-	-26.85	5.97	60-40-	-16.19	5.74
80-60	-19.79	3.89	60-80-	-17.35	5.65
0-60-	-21.38	0.35	40-0	-26.45	7.29
40-80	-23.94	0.34	60-0-	-19.80	3.44
0-60-	-19.97	6.70	80-40	-13.47	0.14
80-40	-16.94	3.8	80-0-	-12.79	0.11
0-80-	-50.87	5.76	40-60	-8.59	\
40-60-	-18.65	3.34	80-40-	-13.62	0.14
80-0	-24.61	5.76	60-0	-12.42	0.13
40-80-	-29.98	6.16	80-60-	-20.08	0.08
0-60			0-40		
40-80-			80-60-		
60-0			40-0		

分析可知, 当 80#为铺层设计的第一层时, 复合材料的吸波性能均相对较差, 说明较高的吸收剂含量虽然会有益于损耗衰减性能, 但对阻抗匹配性能将产生不利影响; 当吸收剂含量过高时, 阻抗匹配性能变差, 导致综合吸波性能的显著下降。根据理想吸波材料“薄、轻、宽、强”的性能需求, 以有效吸收带宽较宽、最佳反射损耗值较大以及吸收峰较多为依据, 筛选出了 6 种优势方案, 分别为: 0-40-60-80、0-60-40-80、40-0-60-80、40-80-60-0、60-40-0-80、60-0-40-80。

由表 2 中数据能够发现, 经过铺层设计后复合材料吸波性能得到了明显提升, 尤其是 EAB 值能够得到显著拓宽。为了确保对铺层设计规律探究的准确性, 根据上述 6 种优势铺层方案制备了对应的层合结构复合材料, 采用弓形架测量法对复合材料的反射率进行测试, 如图 9 所示为仿真数据与实测数据的结果对比。

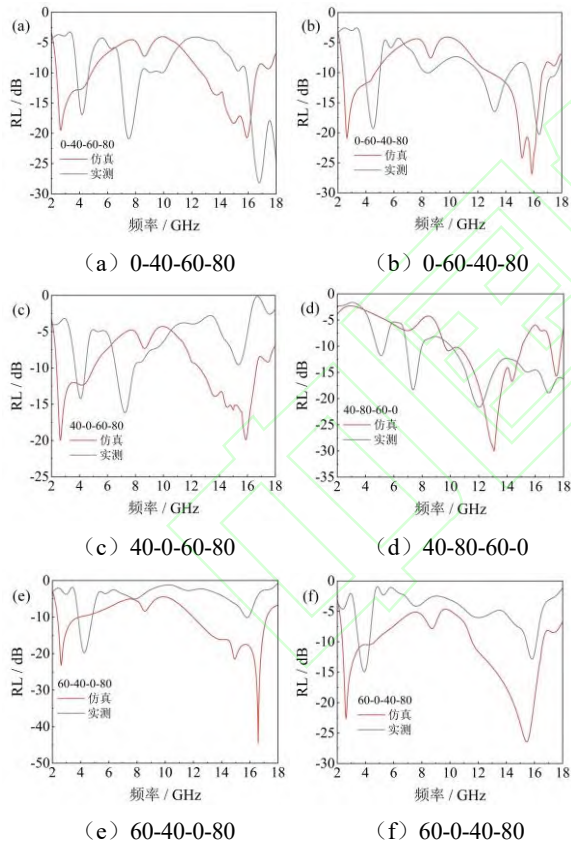


图 9 电磁结构设计方案仿真与实测对比图

Fig.9 The comparison of simulated and measured of electromagnetic structural lay-up design

由图 9 可知, 在上述优势方案的对比中, 仿真与实测的结果在 RL 曲线的变化趋势上基本保持一致, 各个吸收峰的频段位置均相差较小, 说明仿真模拟结果具有良好的可信性。但仿真结果的  $RL_{\min}$  值较实测结果通常偏大, 这一方面是由

于水射流切割时同轴环的层间受到巨大冲击力而导致发生小变形, 使得同轴环的层间结构与复合材料的实际结构有所差异。另一方面也可能是由弓形架测试法的角度误差而造成的。

综合来看, 针对电磁结构设计的仿真模拟具有相对较好的准确性, 能够快速筛选出优势的铺层方案, 无需对每种方案对应的复合材料进行实际制备, 有助于对复合材料吸波性能变化规律的探究。

为了展示优势铺层方案的实际吸波性能, 根据 6 种优势铺层方案制备的复合材料层合板反射率实测结果如表 3 所示。结果表明, 电磁结构的铺层设计确实能够显著提升复合材料的吸波性能。其中, 0-40-60-80 铺层方案的  $RL_{\min}$  值最佳, 说明吸收剂含量逐层递增的设计, 有利于逐层对电磁波能量进行损耗衰减, 提升了复合材料的损耗衰减性能, 因此, 对层合板  $RL_{\min}$  值的优化效果更明显。而当第一层的吸收剂含量过高时, 比如以 60#作为首层的铺层方案, 则会出现有效吸收频段变窄的现象, 其根本原因是首层的吸收剂含量过高, 导致复合材料的阻抗匹配性能变差。

值得注意的是, 40-80-60-0 铺层方案的有效吸收带宽达到了 9.65 GHz。40#作为铺层设计的第一层, 其吸收剂含量相对适中, 能够创造出良好的阻抗匹配电磁环境与损耗衰减效能, 而且整体复合材料的铺层设计为吸收剂含量高低交替时, 能够使层间的阻抗匹配与各层的损耗衰减性能得到优化, 从而大幅拓宽了有效吸收带宽。

表 3 经过电磁结构铺层设计后复合材料的吸波性能  
Tab.3 The wave absorption properties of composites after electromagnetic structural lay-up design

铺层方案	$RL_{\min}$ / dB	EAB / GHz
0-40-60-80	-28.16	4.44
0-60-40-80	-20.29	5.24
40-0-60-80	-16.18	2.06
40-80-60-0	-21.64	9.65
60-40-0-80	-19.79	1.14
60-0-40-80	-14.93	1.48

综上所述, 复合材料的吸波性能经过电磁结构优化设计后有明显提升, 最佳反射损耗值得到显著优化, 有效吸收带宽得到大幅拓宽, 实现了宽频域的电磁波吸收。

### 3 结论

本研究通过仿真与实验的对比验证,研究了加入磁性吸收剂后复合材料的吸波性能,采用仿真优化和反射率测试的方法,探究了磁性吸收剂含量对树脂基复合材料吸波性能的影响以及电磁结构铺层设计对层合结构复合材料的作用规律,得到了以下结论:

1)对复合材料的同轴环电磁参数进行仿真计算,其结果能够有效反应出真实复合材料的吸波性能变化规律。有助于对复合材料吸波性能进行优化设计。

2)随着吸收剂含量的增加,复合材料的吸波性能随之增强,但单一含量的吸收剂无法为复合材料提供优异的吸波性能,难以达到阻抗匹配性能与损耗衰减性能的同时提升。

3)针对复合材料的电磁结构进行铺层设计,依据仿真结果优化筛选铺层方案。实际测试结果表明,铺层设计后层合结构复合材料的有效吸收带宽最高可达 9.65 GHz,而且多种铺层方案均体现出了良好的综合吸波性能。

本研究探究了含吸收剂的树脂基复合材料吸波性能变化规律及其电磁结构的铺层优化设计,对复合材料的吸波性能提升具有重要意义,为层合结构吸波复合材料的制备与设计提供了有效参考,有望推动吸波材料向着“薄、轻、宽、强”的高性能目标持续发展和进步。

### 参考文献(References)

- [1] 王一帆,朱琳,韩露,等.电磁吸波材料的研究现状与发展趋势[J].复合材料学报,2023,40(1):1-12.  
WANG Y F, ZHU L, HAN L, et al. Research status and development trend of electromagnetic absorbing materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1): 1-12.(in Chinese)
- [2] YUAN Z F, ZHAO H, ZHOU J. Design and preparation of the epoxy resin based sandwich composite with broad-band wave-absorbing properties in C-band[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(11): 3782-3789.
- [3] 王江涛,陈帅,沈承,等.吸波材料/结构及吸波-承载功能一体化结构研究进展[J].复合材料学报,2024,41(8):3866-3882.  
WANG J T, CHEN S, SHEN C, et al. Progress of wave-absorbing materials/structures and wave absorbing-load bearing multifunctional structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 3866-3882.(in Chinese)
- [4] ZHAO H, ZHU Z H, XU Y H, et al. Design and preparation of an epoxy resin matrix composite structure with broadband wave-absorbing properties[J]. Results in Physics, 2024, 57: 107353.
- [5] 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):235-244.  
WU Z C, NI A Q, CHEN J L, et al. Study on the comprehensive properties of absorbing prepreg resin and its composite[J]. Materials Reports, 2024, 38(10): 235-244.(in Chinese)
- [6] 张德印,路天宇,张嘉迅,等.聚合物基吸波导热复合材料的进展[J/OL].复合材料学报.(2024-09-18)[2024-11-01].  
<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240918.003>.  
ZHANG D Y, LU T Y, ZHANG J X, et al. Research progress of polymer-based wave-absorbing and heat-conducting composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, (2024-09-18)[2024-11-01].  
<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240918.003>.
- [7] 王昕阳,魏世丞,梁义,等.微波吸收复合材料体系及其计算机辅助设计的研究进展[J].材料导报,2023,37(11):67-76.  
WANG X Y, WEI S C, LIANG Y, et al. Research progress of microwave absorbing composite material system and computer-aided design[J]. Materials Reports, 2023, 37(11): 67-76.(in Chinese)
- [8] 胡婉欣,尹洪峰,袁蝴蝶,等.纤维增强树脂基吸波复合材料的研究进展[J].中国塑料,2022,36(10):178-189.  
HU W X, YIN H F, YUAN H D, et al. Research progress in fiber-reinforced-resin matrix microwave absorbing composites[J]. China Plastics, 2022, 36(10): 178-189.(in Chinese)
- [9] 肖沅谕,高龙飞,陈博,等.石英纤维/聚酰亚胺复合材料的制备与性能[J].复合材料学报,2020,37(10):2394-2400.  
XIAO Y Y, GAO L F, CHEN B, et al. Preparation and performance of quartz fiber/polyimide composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10): 2394-2400.(in Chinese)
- [10] 王婕,周万城,罗发,等.石英纤维增强聚酰亚胺树脂基复合材料的疲劳特性[J].功能材料,2019,50(6):6079-6082.  
WANG J, ZHOU W C, LUO F, et al. Fatigue performance of quartz fiber/polyimide composite at elevated temperature[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(6): 6079-6082.(in Chinese)
- [11] 董洁.纤维增强吸波复合材料的制备与性能研究[D].西安:西北工业大学,2019.

- DONG J. Preparation and properties of fiber reinforced microwave absorbing composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019. (in Chinese)
- [12] DONG J, ZHOU W C, DUAN S C, et al. Mechanical, dielectric and microwave absorption properties of carbon black (CB) incorporated SiO<sub>2</sub>/PI composites[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(4): 17100-17107.
- [13] ZHANG S J, LAN D, CHEN X L, et al. Three-dimensional macroscopic absorbers: from synergistic effects to advanced multifunctionalities[J]. *Nano Research*, 2024, 17(3): 1952-1983.
- [14] 王岩. FeCo 基磁性吸波材料研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.  
WANG Y. Study on FeCo based magnetic microwave absorbing materials[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020. (in Chinese)
- [15] BAO X K, WANG X L, ZHOU X N, et al. Excellent microwave absorption of FeCo/ZnO composites with defects in ZnO for regulating the impedance matching[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 769: 512-520.
- [16] PENG K S, LIU C Y, WU Y H, et al. Understanding the efficient microwave absorption for FeCo@ZnO flakes at elevated temperatures a combined experimental and theoretical approach[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 125: 212-221.
- [17] 燕绍九. 介电层包覆铁磁金属微纳米颗粒的结构与电磁性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
YAN S J. Structures and electromagnetic properties of dielectric shell coated ferromagnetic metal micro-and nano-particles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [18] 邢丽英. 高性能微波辐射调控复合材料技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
XING L Y. High performance microwave radiation control composite technology[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [19] JIANG Q, DUAN J M, UDDIN A, et al. A waffle structured composite for RCS reduction via absorption and scattering mechanisms[J]. *Materials & Design*, 2023, 226: 111650.
- [20] ZHAO Y M, XING S L, JIN Q F, et al. Excellent angular and electrical performance damage tolerance of wave-absorbing laminate via gradient A-T-a design[J]. *Composites Communications*, 2024, 46: 101838.
- [21] HUANG Y X, SONG W L, WANG C X, et al. Multi-scale design of electromagnetic composite metamaterials for broadband microwave absorption[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 162: 206-214.
- [22] LIANG L, LIN Y Y, HUANG Y X, et al. Broadband stealth composite metastructure with high penetration protection[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 160: 107069.