

引用格式: 朱国松, 陈伊, 胡悦, 等. 多元纤维复合吸波材料设计及电磁性能研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(4): 1-13.  
ZHU Guosong, CHEN Yi, HU Yue, et al. Research progress of multi-fiber wave-absorbing material design and electromagnetic properties[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(4): 1-13.

## 多元纤维复合吸波材料设计及电磁性能研究进展

朱国松<sup>1</sup>, 陈伊<sup>1</sup>, 胡悦<sup>2\*</sup>, 张钦钊<sup>1</sup>, 黄佳<sup>3</sup>,  
周伟<sup>4</sup>, 罗衡<sup>5</sup>, 李杨<sup>1\*</sup>

(1. 中南大学粉末冶金全国重点实验室, 长沙 410083; 2. 中国航发北京航空材料研究院隐身材料重点实验室, 北京 100095; 3. 中南大学航空航天技术研究院, 长沙 410083; 4. 长沙学院环境光催化应用技术湖南省重点实验室, 长沙 410022; 5. 中南大学电子信息学院, 长沙 410004)

**摘要:** 随着信息安全、目标隐身与电磁防护等需求的升级, 亟需研发高效吸波材料。本文简述吸波材料工作原理, 并梳理涂覆型与结构型吸波材料研究进展, 最终聚焦纤维混杂吸波复合材料的发展: 纤维排列、组分调控及界面设计可协同提升电磁性能与力学性能。通过多元纤维协同设计与多尺度结构优化, 纤维混杂吸波复合材料能够实现阻抗匹配与损耗机制的耦合优化, 兼具宽频吸收与力学承载特性, 推动吸波材料向结构与功能一体化方向发展。最后, 总结通过多元纤维混杂体系拓展吸波频带的技术突破并对未来围绕纤维混杂机制深化、多尺度结构设计、环境适应性提升、多功能集成、纤维取向与入射角协同调控、高温陶瓷基吸波材料等方向开发兼具宽频吸收、轻质高强特性的新一代军民两用吸波材料进行展望。

**关键词:** 涂覆型与结构型吸波材料; 纤维混杂复合材料; 电磁损耗; 结构与功能一体化

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000034

中图分类号: V259; TQ34

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)04-0001-13

## Research progress of multi-fiber wave-absorbing material design and electromagnetic properties

ZHU Guosong<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>1</sup>, HU Yue<sup>2\*</sup>, ZHANG Qinzha<sup>1</sup>, HUANG Jia<sup>3</sup>,  
ZHOU Wei<sup>4</sup>, LUO Heng<sup>5</sup>, LI Yang<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Stealth Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Research Institute of Aerospace Technology, Central South University, Changsha 410083, China; 4. Hunan Key Laboratory of Applied Environmental Photocatalysis, Changsha University, Changsha 410022, China; 5. School of Electronic Information, Central South University, Changsha 410004, China)

**Abstract:** With the upgrading of information security, target stealth and electromagnetic protection, the urgent development of highly efficient wave-absorbing materials is imperative. This paper briefly describes the working principle of wave-absorbing materials, and comprehends the research progress of coated and structural wave-absorbing materials, and finally focuses on the development of fiber hybrid wave-absorbing composites: the fiber arrangement, component regulation and interface design can synergistically enhance the electromagnetic and mechanical properties. Through multi-fiber synergistic design and multi-scale structural optimization, fiber hybrid wave-absorbing composites can realize the coupling optimization of impedance matching and loss mechanism, and have both broadband absorption and mechanical loading characteristics, which promote the development of wave-absorbing materials in the direction of structural and functional integration. Finally, the technological breakthrough of expanding the wave-absorbing frequency band through multi-fiber blending system is summarized, and the future development of a

new generation of dual-use wave-absorbing materials with broadband absorption, lightweight and high-strength characteristics around the deepening of the fiber blending mechanism, multi-scale structural design, improvement of the environmental adaptability, multi-functional integration, synergistic control of the fiber orientation and angle of incidence, and the development of high-temperature ceramic-based wave-absorbing materials are prospected.

**Key words:** radar absorbing coating and structural radar absorbing material; fiber hybrid composite; electromagnetic loss; integration of structure and function

随着雷达先进探测与精确制导技术的发展,雷达隐身技术逐渐成为影响国防安全的关键技术<sup>[1-2]</sup>,但以有源相位抵消技术、等离子体隐身技术等为代表的主动式雷达隐身技术存在实时宽带隐身困难、技术复杂、成本高昂等实际应用壁垒<sup>[2-4]</sup>。雷达吸波材料通过电磁能量吸收衰减雷达回波、降低目标可探测性的高效特性,成为其隐身性能提升的核心技术手段<sup>[5-8]</sup>。与此同时,随着5G/6G通信技术与微电子技术的突破性发展,智能终端设备与物联网基础设施的规模化部署正推动智慧城市、工业互联网等领域发生系统性变革,显著提升了社会生产效率和民生便利性<sup>[9-11]</sup>。然而,电子设备激增带来的电磁干扰问题日益加剧,复杂的电磁干扰环境会影响高度集成的电子信息传输系统的稳定性和可靠性,导致设备出现信息误判和误动作<sup>[12-16]</sup>,造成巨大损失,另外,重要电子信息设备的电磁辐射还会引起信息泄露问题,威胁信息安全<sup>[17-18]</sup>。因此,开发兼具优异吸收电磁波性能与轻量化优势的新型电磁波吸收材料,不仅是保障电子通信、航空航天及军事安全领域的基础需求,更是推动微电子技术进步与智能社会可持续发展的重要途径,具有重要的研究意义和社会价值。

吸波材料根据服役环境和使用情况,按其制备工艺和承载性能可以分为涂覆型吸波材料和结构型吸波材料。涂覆型吸波材料凭借制备工艺简单、维护成本低等优势,广泛应用于隐身飞机复杂曲面和局部强反射区域,是国防领域最早实现工程化应用的吸波体系。结构型吸波材料则通过融合涂覆技术与复合材料特性,在保留轻质高强优点的同时,解决了传统涂覆材料增重显著、高速气流下易脱落的问题,其核心创新在于力学与电磁学的协同设计:力学层面通过铺层优化和结构设计提升承载能力,电磁层面借助吸收剂、纤维/树脂体系的精准配比及电结构调控实现高效吸波,现已成为隐身装备主承力部件的主流发展方向。其中纤维混杂吸波材料通过碳纤维( $C_f$ )、碳化硅纤维( $SiC_f$ )及其他陶瓷纤维等以多尺度方式混杂编织而成,在应对航

空航天热端部件等极端环境时,展现出显著的结构性能与电磁波吸收性能优势——不仅通过梯度化界面缓解了“吸波-承载”性能冲突,更通过纤维取向与排布设计实现了电磁波的多路径损耗。吸波材料在军事隐身、高频通信、精密仪器等领域的差异化应用,标志着电磁吸波技术从“被动屏蔽”向“主动调控”的跨越,其协同发展将持续推动电磁兼容、目标隐身和新能源装备等领域的革新进程。本文系统综述了涂覆型与结构型吸波材料的研究进展,重点阐述纤维混杂吸波材料通过梯度阻抗界面构建与多路径电磁波损耗机制协同作用突破宽频高效吸波性能的核心进展,为结构功能一体化发展提供关键支撑。在此基础上,进一步展望了其在隐身与电磁防护领域的未来发展趋势。

## 1 吸波材料概述及机理

### 1.1 吸波材料概述

吸波材料是指能够通过电磁损耗机制将投射在其表面的电磁波能量转化或耗散成热能或其他能量形式,实现电磁波吸收的功能材料<sup>[19]</sup>。吸波材料的工作原理如图1所示,当电磁波入射到吸波材料表面时,将有部分电磁波因材料表面和自由空间的阻抗差异而发生反射,其余部分则可以进入吸波材料内部被衰减和吸收,但仍可能存在剩余的电磁波能量透过吸波材料形成透射波<sup>[20-22]</sup>。因此,吸波

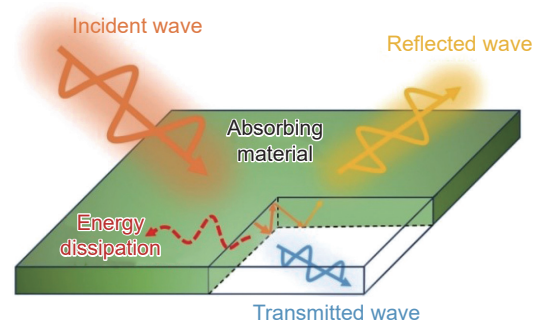


图1 吸波材料工作机理

Fig. 1 Principle of absorbing materials

材料的总体设计原则是尽可能地匹配材料表面与自由空间的阻抗,减小反射波的强度,让更多的电磁波进入材料内部,并通过增强材料的电磁损耗能力,最大限度地转化和吸收电磁能量,即需要满足阻抗匹配和吸收衰减双重原则<sup>[23]</sup>。然而,阻抗匹配的满足和电磁损耗能力的增强通常是相悖的<sup>[24]</sup>。一般来说,较大的复介电常数和复磁导率能够提高材料的电磁损耗能力,但同时也导致材料表面与自由空间的阻抗失配<sup>[25]</sup>。因此,如何平衡阻抗匹配和电磁损耗是吸波材料性能设计的关键考量。

## 1.2 微波损耗机理

吸波材料的微波损耗机理主要包括介质损耗和电磁相消干涉两大类。

介质损耗根据材料特性分为介电损耗、磁损耗和电导损耗<sup>[26]</sup>。介电材料在微波范围内主要有电子极化、原子极化和偶极子极化行为<sup>[27-28]</sup>。其中,电子极化和原子极化相比偶极子极化在微波频段所产生的损耗很微弱,损耗主要由偶极子极化和弛豫极化所主导<sup>[29]</sup>。此外,在外场极化作用下,两相材料的分界面处会聚集电荷,电荷的移动和重新排列需要外场能量的维持,以此消耗电磁能量<sup>[30]</sup>。

磁性材料在微波频段的磁损耗主要由涡流损耗和自然共振损耗构成<sup>[31]</sup>。在外加交变磁场作用下,导电性良好的材料在内部会产生垂直于外加磁通量的环形感应电流(涡电流),并激励一个相反的感应磁场抵抗外场变化,导致材料内部的等效总磁场落后于外加磁场变化。此时,随着频率增加或电阻率降低,涡电流增强,感应磁场与外磁场抵消加剧,致使材料内部磁场强度急剧下降,形成显著的趋肤效应。而根据焦耳定律,涡电流会在材料中产生焦耳热,消耗电磁能量的现象称为涡流损耗。因此,涡流损耗虽是磁损耗,但不是专属于磁性材料,如导电性较好的碳纤维也可以产生涡流损耗。此外,磁性材料由于存在磁晶各向异性等效场,在没有外加恒定磁场的情况下发生一种特殊的铁磁共振,出现复数磁化率或磁导率存在极大值的状况称为自然共振现象<sup>[32]</sup>。微波频段的自然共振很大程度上影响了磁性材料的磁导率频谱和损耗。

电导损耗是最常见的电磁波能量耗散机制之一,其本质在于:在外加电场作用下,材料内部的极性电荷发生定向移动,形成极化或磁化响应过程中,会伴随一定程度的传导电流。该传导电流在材料内部产生焦耳热,从而将电磁场能量以热能形式转化并耗散,导致电磁波能量的损失<sup>[33]</sup>。

除上述三项主要电磁损耗机制外,还存在一些

由材料尺寸形状所诱导的特殊损耗。当材料尺寸接近电磁波在材料中传播波长的1/2及其整数倍时,电磁波会在材料内形成驻波,材料内的电场强度和磁场强度提高,出现尺寸共振现象。由材料尺寸所决定的电磁损耗称为尺寸共振损耗。此外,一些特殊的材料形状能够激发电磁共振损耗,其通过电磁共振,形成局部的强电场或磁场区域,进而吸收和衰减电磁能量,例如开口环结构等<sup>[34-35]</sup>。因此,电磁吸收超材料通常采用电磁共振损耗机制设计材料的结构和组成。

电磁相消干涉主要受材料折射率和结构厚度等影响,与介质损耗无关,其形成原因是入射电磁波到达材料表面时,部分电磁波因界面处的阻抗失配而直接发生反射。根据菲涅尔定律,该部分反射波发生半波损失,与入射波相差半个周期的相位,而进入材料内的电磁波经过底部金属背板的反射,落后表面反射波两个1/4波长周期,最终在分界面处与表面反射波相抵消<sup>[36]</sup>。

## 2 传统吸波材料类型

### 2.1 涂覆型吸波材料

涂覆型吸波材料由吸波剂和黏结剂组成,通过涂覆或喷涂的方式在目标物体表面形成吸波功能涂层,不具备承载能力,根据吸波剂的电磁损耗机制,大致分为介电损耗涂层、电导损耗涂层和磁损耗涂层三类。由于涂覆型吸波材料是通过调控黏结剂与吸波剂的组成和含量配比以及涂层厚度来优化吸波涂层的电磁参数,提高涂层的吸波性能,所以涂覆型吸波材料虽然具有工艺简单、性能易于调控、对目标物体外形适应性好等优点,但是其缺点也是显而易见的,吸波涂层与目标物体的黏结性需要着重考虑,可能存在易剥离脱落的问题,同时其作为表面材料也存在吸收频段窄、耐候性差、大比重、不耐高温等问题<sup>[37-38]</sup>。

### 2.2 结构型吸波材料

结构型吸波材料是兼具吸波性能和力学承载性能的材料,大致可以分为层板结构型吸波材料、夹层结构型吸波材料和周期结构型吸波材料三种,其优缺点如表1所示。

#### 2.2.1 层板结构型吸波材料

层板结构型吸波材料根据阻抗匹配原则,电磁参数最接近空气的材料作为透波层置于最上层,使电磁波尽可能进入材料内部,随后按电磁参数大小叠放吸波层和反射层材料,最终使电磁波在内部被

表 1 不同的结构型吸波材料比较  
Table 1 Comparison of different structural wave absorbing materials

Category	Advantage	Disadvantage
Laminated electromagnetic wave-absorbing material	The structure is simple, with absorption layers and reflection layers stacked in order according to the magnitude of electromagnetic parameters, producing strong absorption peaks with interference enhancement at multiple frequency points, thereby achieving broadband electromagnetic wave-absorption	This structure typically has issues with thickness and weight, making it difficult to meet the performance requirements for high-performance absorptive materials
Sandwich-structured electromagnetic wave-absorbing material	The structure is complex and can achieve excellent comprehensive electromagnetic wave-absorption performance	Limitations in terms of electromagnetic wave absorption bandwidth and intensity
Periodic structure electromagnetic wave-absorbing material	The structure is adjustable and has a variety of patterns, achieving broadband absorption. The three-dimensional structure extends the thickness, improving space utilization and wave-absorption performance, and stimulating more loss mechanisms	Production and manufacturing are relatively difficult

吸收和损耗。为实现宽带吸收,层板结构吸波材料的电阻率从下到上逐层增加,形成多频点干涉强吸收峰,拓宽吸收频段,但与此同时由于材料的叠加,使其具有较大的厚度和质量的缺陷。采取有耗介质层是层板结构吸波材料在较小厚度下实现宽频吸波性能的有效途径,但寻找合适电磁响应特性频段的有耗介质层材料难度较大。因此,研究者常采用逐层阻抗渐变的有耗介质层组合设计来降低宽频吸收性能对材料电磁参数的要求。Yang 等<sup>[39]</sup>构建了微纳非均相界面和宏观双层阻抗匹配结构,双层结构  $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiOC}$  复合材料在 X 波段的有效吸收带宽为 4.2 GHz,最小反射率为 -56.9 dB。中南大学李杨团队<sup>[40]</sup>通过将纤维层( $\text{C}_f$ 、 $\text{SiC}_f$ 、氮化硅纤维( $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ ))嵌入环氧树脂制备了纤维层铺树脂基复合材料,研究其在不同极化方式下的介电响应特性及吸波性能,研究表明, $\text{C}_f$ 层铺复合材料和  $\text{SiC}_f$ 层铺复合材料表现出显著的介电各向异性,且在轴向极化作用下具有介电频散特性, $\text{C}_f$ 层铺复合材料在轴向极化作用下表现出类似金属的强反射特性,吸波能力微弱;但在径向极化作用下,在一定频段范围内具有良好的阻抗匹配特性和损耗能力,表现出较强的单峰吸波性能,在厚度为 5 mm、9.46 GHz 处反射损耗能够达到 -39.5 dB,在厚度为 4 mm 时有效吸收带宽为 5.8 GHz,但有效吸收带宽仍较窄,而  $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ 层铺复合材料具有类似  $\text{C}_f$ 层铺复合材料的各向异性吸波特点,但其衰减常数相对较小,导致其吸波性能较差; $\text{C}_f$ 和  $\text{SiC}_f$ 的本征介电常数仍表现为显著的各向异性和轴向极化作用下的频散特性, $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ 本征介电常数仍表现出微弱的各向异性和频散特性。该成果揭示了  $\text{C}_f$ 、 $\text{SiC}_f$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ 分别适用于构筑吸波衰减层、阻抗过渡层和透波层材料的功能定位,为基于多元纤维混杂编织

的吸波结构设计提供了关键的性能参数依据。

### 2.2.2 夹层结构型吸波材料

由于层板结构型吸波材料结构较为简单,难以满足对高效吸波性能的需求,因此发展出了结构更为复杂、吸波机制更为丰富且综合吸波性能优异的夹层结构型吸波材料。该材料在传统层板结构型吸波材料的基础上,增加了一层透波介质层,并引入一层薄薄的电阻型材料作为损耗层,从而显著提升了其吸波效果。刘海韬等<sup>[41-42]</sup>采用两层透波电介质层和方阻在 100~160  $\Omega \cdot \text{cm}$  范围内连续可调的  $\text{SiC}_f$ 布制备了三明治型的夹层结构型吸波材料。与相同电磁参数的 Salisbury 屏吸收结构相比,该夹层结构具有更好的宽带吸收特性,有效吸收带宽达到 11.6 GHz,是 Salisbury 屏吸收结构的两倍。Mo 等<sup>[43]</sup>通过多尺度结构设计制备了夹层结构的  $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4$  复合材料,该复合材料在高温下兼具良好的力学性能和吸波性能。此外,通过将中间损耗层设计成复杂几何拓扑结构(如波纹板结构、角锥结构、蜂窝结构等),并在夹层结构中填充吸波材料,可以进一步提高吸波效能<sup>[44-45]</sup>。

传统的单层导电性纤维增强复合材料在电磁波吸收带宽和强度方面存在局限性。中南大学李杨团队<sup>[46]</sup>依次将  $\text{C}_f$ 、 $\text{SiC}_f$ 和  $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ 堆叠结合,通过逐层注入树脂并固化的工艺,制备了多种新型  $\text{C}_f/\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ 分层复合材料(multifiber layered composites, MFLCs),如图 2 所示,同时在表 2 中列出了各种 MFLCs 各层纤维的比例,该复合材料通过纤维排列与组合,充分利用了  $\text{C}_f$ 、 $\text{SiC}_f$ 和  $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ 的不同导电率来解决这些局限性。研究表明,在多纤维层状复合材料中添加  $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ 匹配层可优化复合材料的导电性和阻抗匹配,从而使电磁波显著渗透到复合材料内部,并将反射降至最低。导电  $\text{C}_f$

层和  $\text{SiC}_f$  层通过传导损耗导致大量能量耗散。电场模拟结果表明, 匹配层 ( $\text{Si}_3\text{N}_{4f}$ ) 的加入调节了复合材料的电导率, 从而促进了阻抗匹配的优化。进入内部的电磁波在吸收层中不断发生反射和散射, 此时, 吸收层具备适宜的导电率水平, 可通过传导损耗将进入材料内部的电磁波转化为热能, 实现能量的耗散。MFLCs 在 X-Ku 波段的最小反射损耗为  $-68.52$  dB, 有效吸收带宽为 8.23 GHz。作为一种新型的轻质、高效、宽带的电磁波吸收体, MFLCs 前景极为广阔, MFLCs 为复杂夹层结构型吸波材料的前沿设计提供了一种新的思路。

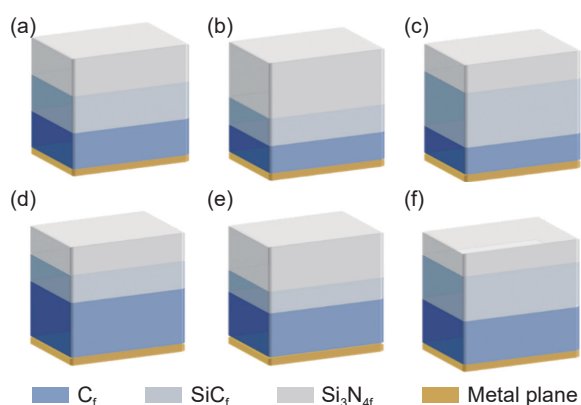


图2 夹层结构型吸波材料 MFLCs 不同比例示意图<sup>[46]</sup>  
(a)C1S1N1; (b)C1S1N2; (c)C1S2N1; (d)C2S1N1;  
(e)C2S1N2; (f)C2S2N1

Fig. 2 Schematic illustration of MFLCs with different ratios of sandwich structure absorptive materials<sup>[46]</sup>  
(a)C1S1N1; (b)C1S1N2; (c)C1S2N1; (d)C2S1N1;  
(e)C2S1N2; (f)C2S2N1

表2 不同 MFLCs 样品的纤维比率<sup>[46]</sup>  
Table 2 Fiber ratio of different MFLCs samples<sup>[46]</sup>

Name	Mass of $\text{C}_f/\text{g}$	Mass of $\text{SiC}_f/\text{g}$	Mass of $\text{Si}_3\text{N}_{4f}/\text{g}$
C1S1N1	0.05	0.05	0.5
C1S1N2	0.05	0.05	0.1
C1S2N1	0.05	0.1	0.05
C2S1N1	0.1	0.05	0.05
C2S1N2	0.1	0.05	0.1
C2S2N1	0.1	0.1	0.05

### 2.2.3 周期结构型吸波材料

周期结构型吸波材料是由周期性亚波长尺度的人工微结构组成, 具有形状、大小和结构相同的组成单元周期性排列特征, 以及特定电磁响应的材料<sup>[47-48]</sup>。自 Landy<sup>[49]</sup> 首次提出基于电磁谐振的完美超材料吸波体, 大量的新兴电磁吸收超材料研究被报道<sup>[50-63]</sup>。其中, 由金属材料制成的单元所组成

的超材料利用稀疏金属阵列结构产生较强的谐振响应获得强吸收<sup>[54]</sup>。然而, 由于金属的低电阻特性, 窄带吸收结果难以避免<sup>[55]</sup>。因此, 其他一些材料也被考虑用于构建微波吸波单元, 如氧化铟锡 (ITO) 膜、纤维复合材料等<sup>[56-57]</sup>。此外, 周期结构吸波材料根据周期单元的维度可以分为两类: 表面周期结构型吸波材料和三维周期结构型吸波材料。

表面周期结构型吸波材料由介质基板和人工设计的含有亚波长尺度周期单元的表面复合组成。采用金属薄片设计的表面周期性结构吸波材料通常在入射电磁波作用下表现出特定频率电磁波的透射和反射, 因此也被称为频率选择表面 (frequency selective surface, FSS)。研究表明<sup>[58]</sup>, FSS 属于典型谐振式的窄带吸波材料类型, 通常不具有宽频吸波性能, 但引入复杂的周期单元图案和种类 (如 Minkowski 分形结构<sup>[59]</sup>、开口双环形结构<sup>[60]</sup>等) 可以显著改善 FSS 的电磁吸收带宽。Sujatha 等<sup>[61]</sup> 设计了由两种形状周期单元组合而成的 FSS, 该结构具有良好的宽频吸收特性。此外, 以导电油墨、氧化铟锡薄膜等材料为代表的电阻膜型表面周期结构吸波材料是目前研究较多的宽频吸波材料。以导电油墨为例, 电阻率宽范围的可调性和稳定性以及单元图案设计的多样性赋予了其潜在的宽频带吸波性能。

三维周期结构型吸波材料是在表面周期结构的基础上对厚度方向进行延展设计。三个维度的协同设计可以充分利用电介质的物理空间, 引入和激发更多的电磁损耗机制, 充分挖掘宽频吸收潜能。Li 等<sup>[62]</sup> 采用磁性材料制备了多层台阶型的周期结构, 该结构在仅 3.7 mm 的厚度下实现了 36 GHz 的超宽带有效吸收。Jiang 等<sup>[63]</sup> 设计了一种三维鱼骨状的周期结构吸波材料。该材料具有优异的微波吸收性能和力学性能, 且可以通过调制结构参数来定制吸收频带, 具有灵活的应用适应性。Zhou 等<sup>[64]</sup> 通过多尺度设计, 制备了一种周期台阶型  $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4$  吸波复合材料。该周期台阶型  $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4$  吸波复合材料通过纳观、微观与介观等多尺度视角的协同设计产生多尺度效应, 具有 8~18 GHz 高低频电磁波强协同吸收特点, 同时展现了良好且稳定的高温吸波性能。

## 3 纤维混杂复合材料

### 3.1 纤维混杂复合材料

纤维混杂复合材料由多种纤维作为增强体, 通

过特定方式与基体结合而成。纤维混杂复合材料由于其组分和结构高度自由的可设计性,可以在低成本条件下充分发挥多种纤维的优点,展现出了独特的混杂效应优势,拓宽了多功能纤维的集成和应用领域。

纤维混杂复合材料根据纤维排列和编织方式可以分为一体编织型结构和叠层编织型结构<sup>[40,65]</sup>。一体编织型结构包括三维四向、三维五向、跨层交联等立体编织结构,叠层编织型结构通常由几层介电常数不同的材料构成,这种多层结构的层间排列顺序是决定材料吸波性能的关键。两种编织结构各有优劣。一体编织型结构在力学性能方面表现优越,能够在各个方向上均匀承载外力,整体结构稳定性更高,然而,其制备工艺较为复杂,加工难度大,且制造成本较高。相比之下,叠层编织型结构虽然在叠层方向上的承载能力较弱,力学性能存在一定局限,但其工艺流程较为简便,易于加工与实现,同时结构设计相对灵活,制造成本较低。此外,叠层编织型结构的多层结构能够更好地实现“阻抗匹配”和“吸收衰减”的平衡,从而有效改善复合材料吸波性能,是目前广泛研究的一类吸波用纤维编织结构复合材料。

纤维混杂复合材料通过多纤维协同效应不仅显著提升了力学性能,其独特的结构可设计性也为电磁波吸收性能的优化提供了重要基础。纤维层间混编顺序与编织方式对阻抗匹配和电磁损耗的调控作用,揭示了力学性能与吸波性能的内在关联性,因此,合理选择导电型与透波型纤维的混杂组合,可同步实现结构承载与电磁能量耗散的双重功能,基于此,纤维混杂复合材料的研究逐渐从单一力学增强向结构-功能一体化方向拓展,为吸波性能的突破奠定了理论和实践基础。

### 3.2 纤维混杂吸波复合材料

中南大学李杨团队<sup>[40,46,66]</sup>对多元纤维混编结构吸波材料进行了深入研究,结果表明,纤维混编结构参数包括纤维层间混编顺序、纤维层内混编参数和编织方式等是影响多元纤维混编结构吸波性能的关键因素,纤维层间混编排列顺序决定多元纤维混编结构整体的吸收-频率特性;在确定的层间混编参数基础上,纤维层内混编的改变对吸收-频率特性改变不显著,但会主导局域频段的吸收强度;此外编织方式也将显著影响其吸波性能,叠层编织结构与一体编织结构的吸波特点有较大差别。因此,合适的混杂纤维种类、混杂方式和混杂比例对纤维混杂复合材料整体性能的改善有着重

要作用。Mo等<sup>[67]</sup>研究了一种通过调控电导率与界面结合强度实现电磁波吸收与力学性能协同优化的SiC<sub>f</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合材料,在X波段反射损耗低于-7.2 dB,弯曲强度达380 MPa,断裂韧度达12.9 MPa·m<sup>1/2</sup>,有效兼顾了优异的电磁波吸收性能与力学性能。郝露等<sup>[68]</sup>以芳纶纤维和C<sub>f</sub>为研究对象,研究了混编的三维五向结构和混编的三维六向结构复合材料的力学性能。结果表明,混编的三维五向结构的纵向拉伸和弯曲性能更好,但横向性能则更差。Wan等<sup>[69]</sup>研究发现芳纶纤维和C<sub>f</sub>以2:3的比例混合制备的马来酰亚胺基复合材料具有较高的弯曲强度和模量。Koorosh等<sup>[70]</sup>发现采用C<sub>f</sub>、玻璃纤维和Kevlar纤维混合编织成的预制件比单独使用C<sub>f</sub>或玻璃纤维的抗冲击性能更好。杨治华等<sup>[71]</sup>发现采用C<sub>f</sub>和SiC<sub>f</sub>混编增强SiBCN基复合材料的烧蚀性能比单一纤维增强的复合材料更优异,因此混编纤维在力学和耐高温性能上具备较强的优势。

纤维混杂复合材料通过不同纤维合理组合搭配产生的正混杂效应不仅可以增强力学方面的性能,对平衡吸波材料的“阻抗匹配”和“吸收衰减”也有巨大优势<sup>[72]</sup>。目前根据纤维成分组成和电导性,纤维主要可以分为两类<sup>[73]</sup>:一类是可作为吸波剂的纤维,包括C<sub>f</sub>、金属纤维、石墨纤维、SiC<sub>f</sub>和导电高分子纤维等;另一类是具有透波特性的纤维,包括玻璃纤维、氧化铝纤维、Kevlar纤维、Si<sub>3</sub>N<sub>4f</sub>和硼纤维等。这些纤维通过合理混杂排列编织能够充分发挥各自的优势,产生协同效应,改善和提升材料的综合吸波性能。

纤维在综合力学性能以及吸波上的优势,使得设计和制造具有高性能电磁波吸收性能的纤维机织物越来越受到研究者的关注。然而单种纤维的介电色散较弱,吸收峰单一,表现出窄带吸收性能。基于此,中南大学李杨团队<sup>[40]</sup>以不同介电性能的C<sub>f</sub>、SiC<sub>f</sub>和Si<sub>3</sub>N<sub>4f</sub>等多纤维为设计单元,设计了一种超薄的宽带吸收多纤维混纺织物结构,如图3所示。通过有限元数值模拟揭示了所设计多层结构的宽带吸收机理,在这种结构中,反射波干涉效应、电磁波在纤维织物中的多重散射吸收以及相邻纤维间的强电磁共振吸收形成协同作用:其一,通过层间纤维混编顺序的优化设计,形成了良好的阻抗匹配特性,配合纤维编织结构对入射电磁波的多重散射效应,显著提升了宽频吸波能力;其二,具有高电磁损耗能力的纤维在电磁场中激发电磁共振与干涉相消机制,通过多频点强吸收峰的叠加效应

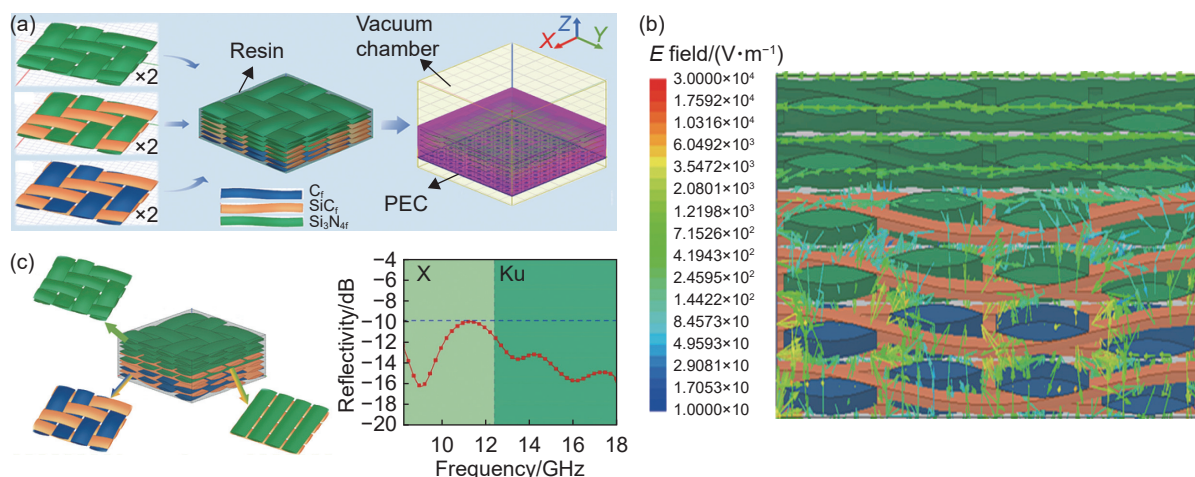


图3 宽带吸收多纤维混纺织物结构<sup>[40]</sup> (a)宽带吸收多纤维混纺织物结构设计; (b)电磁波在纤维编织结构中的多重散射; (c)优化后的多层混合织物结构与反射损耗曲线

Fig. 3 Structure of broadband absorbing multifiber blended fabric<sup>[40]</sup> (a) structural design of broadband absorbing multifiber blended fabric; (b) multiple scattering of electromagnetic waves in fiber woven structures; (c) optimized multi-layer hybrid fabric structure and reflection loss curve

有效拓宽吸收带宽, 最终实现了整个 X 和 Ku 波段反射损耗范围均小于 $-9$  dB 且具有优异的人射角不敏感性, 在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 入射范围内仍能维持反射损耗小于 $-8$  dB 的连续宽带吸收特性; 最后, 根据吸收机理和混合编织工艺进行了进一步定向优化, 优化后的多层结构使得局域电场强度增强并提升了电磁损耗效率, 在整个 X 和 Ku 波段均能实现小于 $-10$  dB 的有效吸收且对电磁波入射角度不敏感, 其独特的多层构造通过调控不同纤维的电磁响应特性, 在 $3.3$  mm 超薄厚度下实现了全 X 和 Ku 波段的宽带高效吸收, 展现出在电磁防护领域的重大应用潜力。

Jiang 等<sup>[74]</sup> 采用导电金属纤维以结构阵列形式与石英纤维混合编织形成华夫饼结构, 该结构在 $1.5$  mm 厚度下具有较好的吸收性能。周倩等<sup>[64]</sup> 设计了一种微结构与超结构多尺度协同设计的 $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4$  复合材料, 通过引入交叉槽纹超材料结构, 在仅 $5$  mm 厚度下实现了 $8$  GHz 和 $18$  GHz 处分别为 $-15.3$  dB 和 $-14.8$  dB 的优异反射损耗性能, 并在室温至 $500$  °C 范围内保持良好的高温吸收稳定性。Dai 等<sup>[75]</sup> 研究通过静电纺丝与热处理制备了三维交联结构的碳纤维, 发现以边界型石墨缺陷为主的碳纤维展现出优异的电磁波吸收性能, 且介电损耗型电磁波吸收材料在不添加磁性材料的情况下实现了磁损耗的能力。Yin 等<sup>[76]</sup> 提出了一种三维电磁波吸收织物的结构设计方法。所制备的双向角联锁织物以 S-2 玻璃纤维为匹配层、碳纤维为吸收层, 满足等效电磁参数设计。实验表明, 该织物具有宽频吸收特性和优异吸波性能(反射损耗

达 $-20$  dB)。

杨帆等<sup>[77]</sup> 采用手工缝合工艺在 $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维布上周期性地混杂了一定的 $\text{C}_f$ , 并采用 PIP 法制备了 $\text{C}_f\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiOC}$  复合材料。该复合材料具有较好的宽频吸波性能。阳海棠等<sup>[78]</sup> 采用高损耗纤维和透波型陶瓷纤维合理搭配并编织成特殊结构的预制体, 配合适当的陶瓷基体制备了混杂纤维增强陶瓷基复合材料, 大幅提升吸波性能, 同时实现力学性能协同。Lee 等<sup>[79]</sup> 在玻璃纤维织物中周期性地编入 $\text{C}_f$ , 制备了一种 $3.63$  mm 厚度的宽频雷达吸波结构材料, 有效吸收频带覆盖 X 和 Ku 波段。

尽管如此, 现有研究制备的耐高温吸波结构材料仍然存在厚度大等缺点, 吸波性能也有待进一步提升, 严重限制了实际应用。为此, 中南大学李杨团队<sup>[66]</sup> 设计了一种基于 $\text{SiC}_f$  和 $\text{C}_f$  协同吸收机制的复合纤维结构, 如图 4(a) 所示, 该结构通过 $\text{SiC}_f$  和 $\text{C}_f$  激发共振并增强电磁能量耗散, 可实现宽带高效电磁吸收。该结构采用极薄( $2.5$  mm) H 型单层设计在 $10.6\sim 18$  GHz 频率范围内实现了反射损耗小于 $-10$  dB 的高效吸收, 并具有优异的雷达散射截面(radar cross section, RCS)降低效果。H 型纤维复合阵列结构的宽频吸波机理在于 $\text{SiC}_f$  与 $\text{C}_f$  协同激发谐振模式并调控能量耗散, 在入射电场作用下,  $\text{SiC}_f$  能在宽频范围内激发磁共振, 显著增强 $\text{SiC}_f$  与介质基体的极化损耗和欧姆损耗, 同时,  $\text{C}_f$  表面产生较大涡流, 随着频率提高, 涡流损耗不断增强, 如图 4(b) 和(c) 所示。两种纤维截然不同的电磁响应特性产生不同的共振模式和损耗机制, 这些机制能够在宽频范围内互补和加强

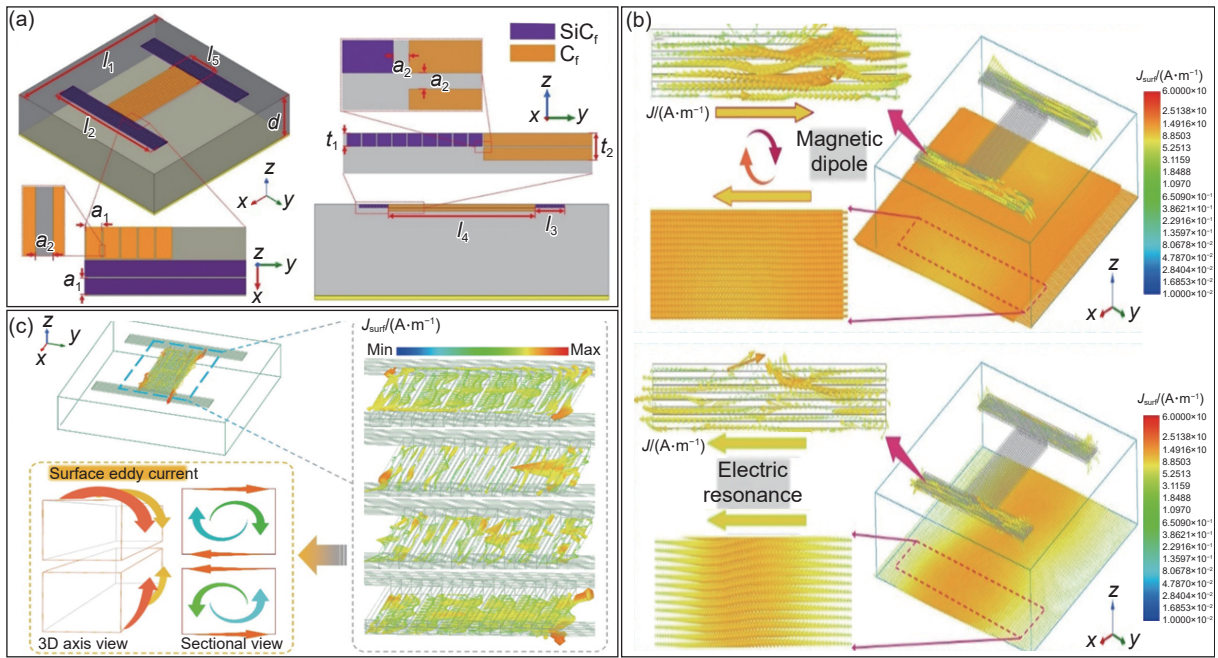


图 4 H 型纤维复合阵列结构<sup>[66]</sup> (a)H 型纤维复合阵列结构设计图; (b)复合纤维结构中 SiC<sub>f</sub> 和金属底板在吸收峰 (13.6 GHz) 处相位为 260° 和 0° 的电流分布; (c)复合纤维结构在峰值吸收频率 (13.6 GHz) 下的 C<sub>f</sub> 分布情况

Fig. 4 H-fiber composite array structures<sup>[66]</sup> (a)design diagrams of H-type fiber composite array structures; (b)current distribution of SiC<sub>f</sub> and metal substrate in composite fiber structure with phases of 260° and 0° at the absorption peak (13.6 GHz); (c) current distribution of C<sub>f</sub> in composite fiber structure at peak absorption (13.6 GHz)

能量耗散, 最终实现结构的宽频吸收性能。纤维复合阵列吸波材料的优化策略为合理调整阵列结构以增加共振密度, 提高吸波性能。H 型复合纤维结构具有结构简单、易于制备、外形尺寸小、质量轻、

宽带高效吸收等优势, 为电磁波吸收复合纤维结构的设计提供了一种新思路。

中南大学李杨团队<sup>[66]</sup>紧接着通过 C<sub>f</sub> 和 SiC<sub>f</sub> 复合构建十字型和 H 型阵列结构, 如图 5(a)所示,

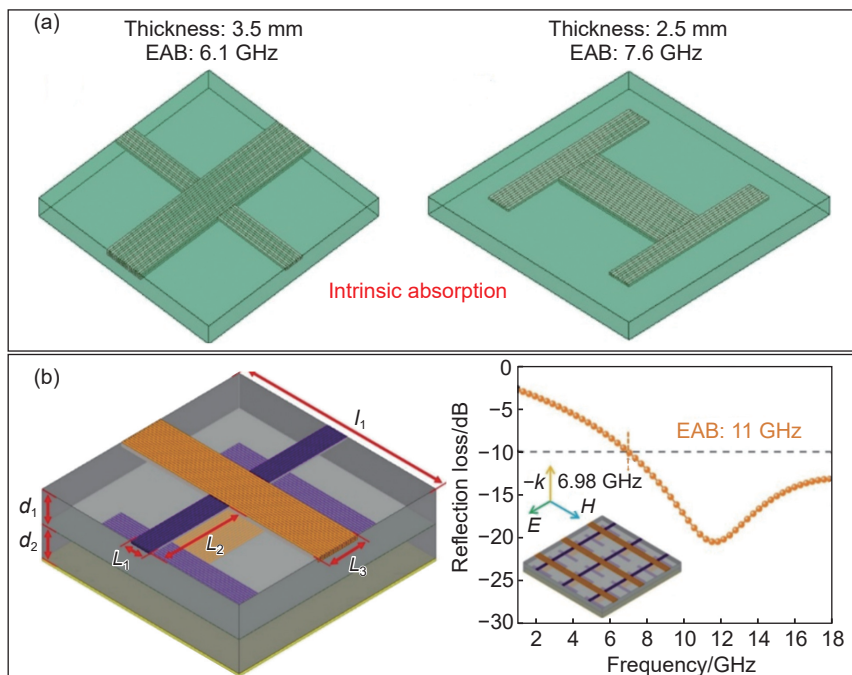


图 5 单层结构与复合纤维阵列双层结构设计<sup>[66]</sup> (a)十字型和 H 型纤维复合阵列结构示意图; (b)双层纤维复合阵列结构示意图及其反射损耗测试曲线

Fig. 5 Design of monostructured and composite fiber array bilayer structures<sup>[66]</sup> (a)schematic structures of cross and H-shaped fiber composite arrays; (b)schematic diagrams of the bilayer fiber composite array structures and its reflection loss test curves

研究发现两种结构都能够充分激发电磁共振,增强能量耗散,具有较好的吸波性能,分别在3 mm和2.5 mm厚度下达到了6.1、7.6 GHz的有效吸收带宽,因而进一步将十字型纤维结构和H字型纤维结构叠加形成双层纤维复合阵列结构,如图5(b)所示,实验和数值分析表明,在此结构中 $\text{SiC}_f$ 可以在更宽的频率范围内激发磁共振,并提高介质损耗。同时, $\text{C}_f$ 表面会产生显著的涡流,涡流损耗随频率不断增加。两种光纤截然不同的电磁响应特性产生了不同的共振模式和损耗机制,可以在宽带范围内互补并增强能量耗散,最终实现在3 mm厚度下达到了11 GHz的有效吸收带宽,表明其具有优异的吸波性能。此方案通过合理的材料选择和几何结构布局,充分利用了电介质的物理空间,实现了高效的吸收性能,并具有结构简单、轻薄等优点。因此,所设计的结构在吸波材料的功能复合设计中具有更大的应用价值。

综上所述,纤维混杂吸波复合材料作为结构-功能一体化材料的重要发展方向,近年来通过多维结构设计(如H型阵列、多层叠层、华夫饼编织等)与多纤维协同机制( $\text{C}_f$ 、 $\text{SiC}_f$ 、金属纤维等)的融合,通过优化纤维层间混编顺序、电磁参数梯度分布及阻抗匹配设计,结合多重散射、电磁共振与涡流损耗等机制,显著提升了吸波性能的宽频化与高效性,同时兼顾力学与耐高温性能(如 $\text{SiC}_f/\text{C}_f$ 增强陶瓷基复合材料)。然而,当前研究仍面临材料厚度与吸收效率的权衡、高温环境稳定性不足、复杂结构制备工艺成本高等挑战。未来发展趋势将聚焦于新型智能纤维开发(如可调介电性能纤维)、多尺度结构优化(纳米涂层与宏观编织协同)、动态阻抗匹配技术及耐极端环境复合材料体系构建,以推动其在航空航天隐身、5G通信屏蔽及高功率电子器件防护等领域的深度应用。此外,通过人工智能驱动的多目标优化设计与跨学科技术融合,有望实现吸波材料在宽频、超薄、轻量化及多功能集成上的突破,为新一代隐身与电磁防护材料提供创新解决方案。

## 4 结束语

吸波材料在民用和国防领域具有重要应用价值,不仅通过提升电子设备的电磁兼容性创造洁净的电磁环境,而且能够增强飞机等军事装备的隐身性能,而新一代高性能吸波材料需兼具宽频吸收、轻质化、强吸收能力以及力学承载等综合特性。在此背景下,涂覆型吸波材料虽然具有工艺简单、性

能可调和外形适应性强等优势,但其涂层易剥离脱落、吸收频段窄且不耐高温等问题显著制约了实际应用,相比之下,结构型吸波材料因其融合结构承载与吸波功能的双重优势备受关注,并凭借轻质高强、耐高温抗蚀的高度可设计性成为研究核心方向,其中纤维增强型结构吸波材料虽在极端工况下展现出优异综合性能,但现有技术多依赖单一纤维作为增强体与吸波剂,导致吸波频带狭窄,难以满足复杂需求。通过引入电学性质差异化的多元纤维构建混杂增强体系,可基于正混杂效应与协同效应显著拓宽吸波频带。然而,多元纤维混杂增强材料仍面临厚度过大与力学兼容性不足的挑战。尽管存在瓶颈,但相比多种吸波材料,纤维混杂吸波复合材料凭借性能可协同优化与强可设计性的特点,仍有望成为下一代隐身装备与电磁安全防护的核心材料,但其仍需突破技术瓶颈。未来研究可重点关注以下方向:

(1)纤维混杂机制深化:探索新型纤维组合(如MXene纤维、新型陶瓷纤维和石墨烯纤维等)及其界面效应,开发兼具宽频吸收、轻量化与高强度的复合材料。

(2)多尺度结构设计:结合电磁超材料与三维周期结构,通过仿生设计与智能算法优化电磁响应特性,突破传统吸波频带限制,同时从编织结构的复杂性考虑,通过编程设计循环寻优算法筛选出最优的混编结构参数,从而从多角度设计性能更加优异的混编纤维吸波结构。

(3)环境适应性提升:针对高温、腐蚀等极端环境和服役工况,开发高性能耐高温陶瓷基纤维混杂体系,并研究其动态电磁性能演变规律。

(4)多功能集成:融合隐身、传感、热管理等功能,推动吸波材料向智能化、自适应化方向发展,以适应产业化的需求。

(5)纤维取向与入射角协同调控:研究纤维拓扑排布与电磁波角度响应的耦合机制,开发多级异质编织结构及原位阻抗梯度设计,确保宽入射角范围内吸收性能的稳定性。

(6)高温陶瓷基吸波材料:基于多元纤维编织体,开发新型陶瓷基体实现复合材料内界面匹配与热应力匹配。

## 参考文献:

- [1] KOSTIS T G. The future of stealth military doctrine[J]. Joint Force Quarterly, 2025, 116(4): 132-140.
- [2] MUSHTAQ A, MAUSOLF T, MIESCH W, et al. TX to

- RX compact leakage cancellation impedance tuner for 60 GHz monostatic doppler radar[J]. *IEEE Journal of Microwaves*, 2025, 5(1): 84-95.
- [3] ZIKIDIS K, SKONDRAS A, TOKAS C. Low observable principles, stealth aircraft and anti-stealth technologies[J]. *Journal of Computations & Modelling*, 2014, 4(1): 129-165.
- [4] SU H, HU H, QIU Y, et al. Terahertz programmable metasurface based on solid-state plasma[J]. *Optics Express*, 2025, 33(2): 2338-2347.
- [5] SINGH D, KUMAR A, MEENA S, et al. Analysis of frequency selective surfaces for radar absorbing materials[J]. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2012, 38: 297-314.
- [6] PADHY S, SANYAL S, MEENA R S, et al. Characterization and performance evaluation of radar absorbing materials[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, 27(2): 191-204.
- [7] 董长军, 胡凌云, 管有勋. 聚焦隐身战机[M]. 北京: 蓝天出版社, 2005.  
DONG C J, HU L Y, GUAN Y X. Focus on stealth fighter [M]. Beijing: Blue Sky Press, 2005.
- [8] JAYALAKSHMI C G, INAMDAR A, ANAND A, et al. Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(14): 47241.
- [9] CHEN W, LIN X, LEE J, et al. 5G-advanced toward 6G: past, present, and future[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(6): 1592-1619.
- [10] CAO Y, ZHAO Z, ZENG X, et al. High-performance polyimide/polypyrrole-CNTs@PEG composites for integrated thermal management and enhanced electromagnetic wave absorption[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(1): 1-12.
- [11] YANG J, WANG H, ZHANG H, et al. Multistage microcellular waterborne polyurethane composite with optionally low-reflection behavior for ultra-efficient electromagnetic interference shielding[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 208: 132-140.
- [12] LI Q, ZHANG Z, QI L, et al. Toward the application of high frequency electromagnetic wave absorption by carbon nanostructures[J]. *Advanced Science*, 2019, 6(8): 1801057.
- [13] WU Z C, CHENG H W, JIN C, et al. Dimensional design and core-shell engineering of nanomaterials for electromagnetic wave absorption[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(11): 2107538.
- [14] ZHANG H W, ZHENG X Y, JIANG R J, et al. Research progress of functional composite electromagnetic shielding materials[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 185: 111825.
- [15] 陶松奎, 李末材, 陶钧炳, 等. 微波的危害及微波防护膜的研究[J]. *浙江科技学院学报*, 2023, 15(1): 27-32.  
TAO S L, LI M C, TAO J B, et al. Hazards of microwaves and research on microwave protective film[J]. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, 2023, 15(1): 27-32.
- [16] DU H, REN J, ZHANG D, et al. Facile fabrication Ni@SiO<sub>2</sub>/C derived from polysilsesquioxane as strong and broadband microwave absorbers with infrared stealth, flame retardant, and water resistant functions[J]. *Composites Part A*, 2024, 177: 107884.
- [17] LIANG J, WANG Y, HUANG Y, et al. Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites[J]. *Carbon*, 2009, 47(3): 922-925.
- [18] ANTIĆ V, PROTIĆ D, STANKOVIĆ M, et al. Protecting data at risk of unintentional electromagnetic emanation: TEMPEST profiling[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(11): 4830.
- [19] HOU Z L, GAO X, ZHANG J, et al. A perspective on impedance matching and resonance absorption mechanism for electromagnetic wave absorbing[J]. *Carbon*, 2024, 222: 118935.
- [20] ZHAO Y, HAO L, ZHANG X, et al. A novel strategy in electromagnetic wave absorbing and shielding materials design: multi-responsive field effect[J]. *Small Science*, 2022, 2(2): 2100077.
- [21] 吴宗远, 李凌宇, 朱睿, 等. 碳纳米管改性纤维吸波材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2024, 38(增刊2): 490-495.  
WU Z Y, LI L Y, ZHU R, et al. Research progress of carbon nanotube-modified fiber wave-absorbing materials [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(Suppl 2): 490-495.
- [22] ABBAS S M, CHANDRA M, VERMA A, et al. Complex permittivity and microwave absorption properties of a composite dielectric absorber[J]. *Composites Part A*, 2006, 37(11): 2148-2154.
- [23] ZHOU S, ZHANG G, NIE Z, et al. Recent advances in 3D printed structures for electromagnetic wave absorbing and shielding[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2022, 6(13): 1736-1751.
- [24] ZHANG X, WANG Q, TANG Y, et al. Decoration of conjugated polyacene quinone radical (PAQR) with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanospheres achieving improved impedance matching and electromagnetic wave absorption[J]. *Materials Today Physics*, 2024, 41: 101349.
- [25] PARK S H, AHN W K, KUM J S, et al. Electromagnetic properties of dielectric and magnetic composite material for antenna[J]. *Electronic Materials Letters*, 2009, 5: 67-71.
- [26] QIN M, ZHANG L, WU H. Dielectric loss mechanism in

- electromagnetic wave absorbing materials[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(10): 2105553.
- [27] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 西安: 机械工业出版社, 1982.  
CHEN J D, LIU Z Y. Dielectric physics[M]. Xi'an: Mechanical Industry Press, 1982.
- [28] 唐力, 严泽鑫, 黄家豪, 等. 考虑土壤时变性与频变性的接地体冲击特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(4): 106-113.  
TANG L, YAN Z X, HUANG J H, et al. Study on impact characteristics of grounding body considering time-varying and frequency-varying soil[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2024(4): 106-113.
- [29] LI M, LUK K M. Wideband magnetoelectric dipole antennas with dual polarization and circular polarization [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, 57(1): 110-119.
- [30] 张德印, 路天宇, 张嘉迅, 等. 聚合物基吸波导热复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(12): 6308-6322.  
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, 41(12): 6308-6322.
- [31] 姜寿亭, 李卫. 凝聚态磁性物理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
JIANG S T, LI W. Condensed matter magnetic physics [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [32] PETROV V, GAGULIN V. Microwave absorbing materials[J]. *Inorganic Materials*, 2001, 37(2): 93-98.
- [33] 殷之文. 电介质物理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
YIN Z W. Dielectric physics[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [34] ZHU B, WANG Z, YU Z, et al. Planar metamaterial microwave absorber for all wave polarizations[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(11): 114102.
- [35] XU H, WANG G, QI M, et al. Triple-band polarization-insensitive wide-angle ultra-miniature metamaterial transmission line absorber[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(20): 205104.
- [36] LEHMANN M, LICHTHE H. Electron waves, interference & coherence[J]. *Transmission Electron Microscopy*, 2016: 197-214.
- [37] 胡睿, 杨伟涛, 石先锐, 等. 涂覆型电磁吸波复合材料的研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2018, 27(10): 56-60.  
HU R, YANG W T, SHI X R, et al. Research progress of coated electromagnetic wave-absorbing composites[J]. *China Adhesives*, 2018, 27(10): 56-60.
- [38] 谷国强, 苏勋家, 侯根良, 等. 涂覆型吸波材料的研究现状及展望[J]. 飞航导弹, 2010(11): 85-89.  
GU G Q, SU X J, HOU G L, et al. Research status and prospect of coated wave-absorbing materials[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2010(11): 85-89.
- [39] YANG F, XUE J, MA Y, et al. Impedance matching optimization of  $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiOC}$  composites for excellent microwave absorption properties[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(2): 1889-1897.
- [40] ZHANG Q, ZHOU W, PANG L, et al. Design and numerical studies of microwave absorption structure based on hybrid weave of fibers with different dielectric properties[J]. *Composite Structures*, 2023, 323: 117460.
- [41] LIU H T, CHENG H F, TIAN H. Design, preparation and microwave absorbing properties of resin matrix composites reinforced by SiC fibers with different electrical properties[J]. *Materials Science and Engineering*, 2014, 179: 17-24.
- [42] 刘海韬, 程海峰, 王军, 等. 利用容性频率选择表面改善单层雷达吸波材料吸波性能[J]. 功能材料与器件学报, 2010, 16(2): 143-147.  
LIU H T, CHENG H F, WANG J, et al. Improving the absorption performance of single-layer radar absorbing materials using capacitive frequency-selective surfaces [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2010, 16(2): 143-147.
- [43] MO R, YE F, LIU X, et al. A high-temperature structural and wave-absorbing SiC fiber reinforced  $\text{Si}_3\text{N}_4$  matrix composites[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(6): 8191-8999.
- [44] BOLLEN P, QUIEVY N, HUYNEN I, et al. Multifunctional architecture materials for electromagnetic absorption[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68: 50-54.
- [45] YIN X, KONG L, ZHANG L, et al. Electromagnetic properties of Si—C—N based ceramics and composites [J]. *International Materials Reviews*, 2014, 59(6): 326-355.
- [46] ZHU H, HU Y, MEN X, et al. Design of  $\text{C}_f/\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4$  multifiber layered composite with enhanced electromagnetic wave absorption properties[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2025, 108(4): 20301.
- [47] FRENZEL T, KADIC M, WEGENER M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist[J]. *Science*, 2017, 358(6366): 1072-1074.
- [48] CHOI M, LEE S, KIM Y, et al. A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index[J]. *Nature*, 2011, 470(7334): 369-373.
- [49] LANDY N, SAJUYIGBE S, MOCK J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [50] KILDISHEV A, BOLTASSEVA A, SHALAEV V. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339

- (6125): 1232009.
- [51] LI W, CHEN M, ZENG Z, et al. Broadband composite radar absorbing structures with resistive frequency selective surface: optimal design, manufacturing and characterization[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 145: 10-14.
- [52] FAN H, LUO J. Research progress of reflectionless electromagnetic metasurfaces[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(9): 230147.
- [53] LI S, WU P, XU H, et al. Ultra-wideband and polarization-insensitive perfect absorber using multilayer metamaterials, lumped resistors, and strong coupling effects[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2018, 13(386): 2-13.
- [54] SHEN X, CUI T, ZHAO J, et al. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9401-9407.
- [55] QU S, SHENG P. Microwave and acoustic absorption metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 17(4): 047001.
- [56] ZHAO J, ZHANG C, CHENG Q, et al. An optically transparent metasurface for broadband microwave antireflection[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 073504.
- [57] LI C, JIANG D, ZENG J, et al. The use of cutting carbon fiber fabric/epoxy composites as band-pass frequency selective surfaces[J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(18): 2281-2288.
- [58] SARABANDI K, BEHDAD N. A frequency selective surface with miniaturized elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(5): 1239-1245.
- [59] CHENG Y, NIE Y, GONG R. Design of a wide-band metamaterial absorber based on fractal frequency selective surface and resistive films[J]. *Physica Scripta*, 2013, 88(4): 045703.
- [60] XU H, BIE S W, XU Y S, et al. Broad bandwidth of thin composite radar absorbing structures embedded with frequency selective surfaces[J]. *Composites Part A*, 2016, 80: 111-117.
- [61] SUJATHA M, VINOY K. Analysis of absorption characteristics of stacked patch arrays on moderately lossy dielectric layers[J]. *Applied Physics A*, 2015, 119(3): 1143-1148.
- [62] LI W, WU T, WANG W, et al. Broadband patterned magnetic microwave absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(4): 044110.
- [63] JIANG W, MA H, WANG J, et al. Spoof surface plasmon polaritons realized by unidirectional carbon fibers arrays and applications in structure/function integrated sandwich structure[J]. *Results in Physics*, 2020, 17: 103081.
- [64] ZHOU Q, YIN X, YE F, et al. Multiscale designed SiC<sub>p</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite for low and high frequency cooperative electromagnetic absorption[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, 101(12): 5552-5563.
- [65] 赖高惠. 高级复合陶瓷材料开发现状[J]. *化工新型材料*, 1989(2): 22-23.
- LAI G H. Development of advanced composite ceramic materials[J]. *New Chemical Materials*, 1989(2): 22-23.
- [66] ZHANG Q, HU Y, ZHOU W, et al. Microwave absorption structure of carbon fiber co-silicon carbide fiber arrays and efficient electromagnetic dissipation mechanism[J]. *Composite Structures*, 2025, 351: 118587.
- [67] MO R, YIN X, YE F, et al. Electromagnetic wave absorption and mechanical properties of silicon carbide fibers reinforced silicon nitride matrix composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(4): 743-754.
- [68] 郝露, 孙颖, 张鹤江, 等. 芳纶/炭混编三维编织复合材料力学性能实验[J]. *固体火箭技术*, 2014, 38(5): 727-731.
- HAO L, SUN Y, ZHANG H J, et al. Experiments on mechanical properties of aramid/carbon hybrid three-dimensional braided composites[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014, 38(5): 727-731.
- [69] WAN Y, WANG Y, HE F, et al. Mechanical performance of hybrid bismaleimide composites reinforced with three-dimensional braided carbon and Kevlar fabrics[J]. *Composites Part A*, 2007, 38(2): 495-504.
- [70] KOOROSH D, ALI S. The effect of stacking sequence on high-velocity impact resistance of hybrid woven reinforced composites: experimental study and numerical simulation[J]. *Fibers and Polymers*, 2022, 23(1): 184-195.
- [71] 杨治华, 贾德昌, 周玉. 新型 SiBCN 先驱体的合成及其陶瓷性能的研究进展[J]. *材料科学与工艺*, 2006, 14(3): 300-304.
- YANG Z H, JIA D C, ZHOU Y. Progress in the synthesis of novel SiBCN precursors and their ceramic properties[J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 14(3): 300-304.
- [72] 樊萍, 晏雄. 混杂纤维复合材料的研究进展[J]. *纺织科技进展*, 2008(1): 20-22.
- FAN P, YAN X. Research progress of hybrid fiber composites[J]. *Progress in Textile Science & Technology*, 2008(1): 20-22.
- [73] 樊威, 孟家光, 孙润军, 等. 混杂纤维增强结构隐身复合材料研究进展[J]. *纺织导报*, 2017(1): 66-68.
- FAN W, MENG J G, SUN R J, et al. Research progress

- of hybrid fiber reinforced structural stealth composites [J]. *China Textile Leader*, 2017(1): 66-68.
- [74] JIANG Q, DUAN J, UDDIN A, et al. A waffle structured composite for RCS reduction *via* absorption and scattering mechanisms[J]. *Materials & Design*, 2023, 226: 111650.
- [75] DAI B, LI J, LIU X, et al. Multiple synergistic losses in the absorption of electromagnetic waves by three-dimensional cross-linked carbon fiber[J]. *Carbon*, 2022, 195: 308-318.
- [76] YIN J, MA W, GAO Z, et al. A structural design method of 3D electromagnetic wave-absorbing woven fabrics[J]. *Polymers*, 2022, 14(13): 2635.
- [77] 杨帆, 薛继梅. 高温宽频吸波型  $\text{Al}_2\text{O}_3$  增强陶瓷基复合材料及一体化制备方法: CN202110283807.0[P]. 2021-06-01.
- YANG F, XUE J M. High-temperature and broadband wave-absorbing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reinforced ceramic matrix composites and integrated preparation method: CN202110283807.0 [P]. 2021-06-01.
- [78] 阳海棠, 罗衡. 一种耐高温吸波结构一体化陶瓷基复合材料及其制备方法: CN202110283807.0[P]. 2022-05-10.
- YANG H T, LUO H. A high temperature resistant wave-absorbing structurally integrated ceramic matrix composite material and its preparation method: CN202110283807.0[P]. 2022-05-10.
- [79] LEE S, LEE W, OH K, et al. Broadband all fiber-reinforced composite radar absorbing structure integrated by inductive frequency selective carbon fiber fabric and carbon-nanotube-loaded glass fabrics[J]. *Carbon*, 2016, 107: 564-572.

---

收稿日期: 2025-03-06; 录用日期: 2025-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52473340, 52471221); 湖南省自然科学基金(2025JJ20042); 粉末冶金国家重点实验室基金(2024-2025 SKLPM-ZZ-041); 航空科学基金(2022Z0560M4001)

通讯作者: 李杨(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为纤维复合材料, 联系地址: 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号中南大学粉末冶金研究院(410083), E-mail: [liyong16@csu.edu.cn](mailto:liyong16@csu.edu.cn); 胡悦(1991—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为陶瓷功能材料, 联系地址: 北京市81信箱9分箱(100095), E-mail: [huyue91@163.com](mailto:huyue91@163.com)

(本文责编: 高 磊)