

引用格式: 陈同飞, 董洁, 刘晋攀, 等. 柔性吸波材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2026, 45(5): 432-439.

CHEN T F, DONG J, LIU J Q, *et al.* Research Progress of Flexible Absorbing Materials[J]. Materials China, 2026, 45(5): 432-439.

柔性吸波材料的研究进展

陈同飞^{1,2}, 董洁^{1,2,3}, 刘晋攀^{1,2}, 康熙^{1,2}, 孙润军^{1,2}

(1. 西安工程大学纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

(2. 西安工程大学 功能纺织材料及制品教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

(3. 浙江宝旌炭材料有限公司, 浙江 绍兴 312073)

摘要: 柔性吸波材料是一种能够有效吸收电磁波且兼具柔韧性的功能材料, 在隐身技术、电磁防护和可穿戴电子等领域有重要应用价值, 其吸波机理包括介电损耗、磁损耗以及两者协同损耗机制。针对薄膜型、泡沫型和织物型3类柔性吸波材料的制备方法和研究现状进行详细阐述, 通过分析材料组分优化、结构设计和界面调控等策略探讨提升材料吸波性能、力学性能和柔性的有效途径, 同时总结了柔性吸波材料性能评价方法, 未来柔性吸波材料研究将朝着智能化响应、环境友好型和多功能集成方向发展。

关键词: 柔性吸波材料; 薄膜材料; 泡沫材料; 织物型材料; 智能化; 界面调控

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)05-0432-08

Research Progress of Flexible Absorbing Materials

CHEN Tongfei^{1,2}, DONG Jie^{1,2,3}, LIU Jinqian^{1,2}, KANG Xi^{1,2}, SUN Runjun^{1,2}

(1. College of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

(2. Key Laboratory of Functional Textile Materials and Products of the Ministry of Education, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

(3. Zhejiang Baojing Carbon Material Co., Ltd., Shaoxing 312073, China)

Abstract: Flexible absorbing materials, as a new type of functional material, possess excellent electromagnetic wave attenuation performance and mechanical flexibility, and have important application value in stealth technology, electromagnetic protection and wearable electronics. Its absorption mechanism mainly involves dielectric loss, magnetic loss and the synergistic effect of the two. In this paper, the preparation process and research progress of three types of flexible microwave absorbing materials, namely thin film type, foam type and fabric type, are systematically reviewed. The strategies to improve the microwave absorbing performance and flexibility of the materials, such as component optimization, structural design and interface regulation, are emphatically discussed. The key evaluation indicators, such as reflection loss and effective absorption bandwidth, are summarized. Future research will focus on intelligent responsiveness, environmental friendliness and multi-functional integration to meet new demands in areas such as communication and intelligent systems, achieving collaborative optimization of performance, sustainability and practicality.

Key words: flexible absorbing materials; thin film materials; foam materials; fabric type materials; intelligentization; interface regulation

收稿日期: 2025-06-26 修回日期: 2025-11-05

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52107024); 西安市科学技术协会青年人才托举计划项目(959202313056); 陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目(20230426); 中国纺织工业联合会科技指导性项目(2024025); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-034)

第一作者: 陈同飞, 男, 2000年生, 硕士研究生

通讯作者: 董洁, 女, 1990年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: dongjie619@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202506019

1 前言

随着信息技术以及电子设备快速发展, 电子设备的普及程度和应用范围持续拓展, 随之带来的电磁辐射问题变得日益严重^[1], 电磁辐射对人体健康存在潜在威胁, 还可干扰电子设备的正常运行, 对通信安全造成影响, 甚至致使关键信息出现泄露^[2], 为应对该问题, 研发有电磁波吸收功能的材料变得极为关键。吸波材料可以吸收电磁波, 降低电磁波的反射与透射, 起到减少辐射干

扰、保障通信安全以及保护环境的作用^[3,4]。

吸波材料在电磁波防护领域有着多元化的应用场景,如信息加密、电磁屏蔽、军事隐身、医疗防护以及测试环境构建等诸多方面,随着科技不断进步,对这类材料的性能指标提出了更高的标准^[5],在当前柔性电子技术快速发展的形势下,具有电磁波吸收特性与机械柔韧性的新型功能复合材料受到了广泛关注。这类材料在满足高效吸波、优异形变能力以及环境稳定性等要求的同时,适配可穿戴设备、军事伪装以及特殊环境应用等需求^[6]。

2 吸波材料的基本原理

当电磁波作用于材料界面时会产生3种基本物理过程^[7]:界面反射、介质吸收以及能量透射(图1),电磁波吸收体的核心作用机理是借助电磁-热能量转换效应,抑制反射波与透射波的强度,以此达成理想的电磁吸收效果。

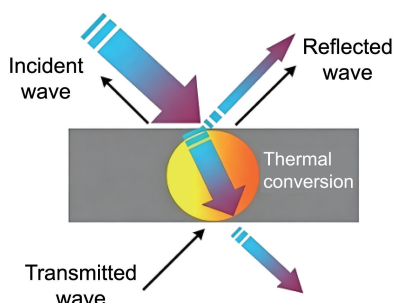


图1 电磁波传输机理

Fig.1 Electromagnetic wave transmission mechanism

电磁波本质上是由交变电场以及磁场相互耦合而形成的一种波动现象,而电磁波吸收材料是借助其和电场分量、磁场分量的作用或者由二者协同作用来实现对电磁波能量的衰减与吸收^[8],一般情况下,材料的吸波特性主要是依据其电磁参数,并运用传输线理论来进行定量计算的^[9,10]。从电磁参数体系方面来看,复介电常数($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)以及复磁导率($\mu = \mu' - j\mu''$)构成了用来表征材料电磁特性的核心指标,其中,复介电常数的实部(ϵ')可反映材料储存电荷的能力,虚部(ϵ'')可以表征其介电损耗特性;而复磁导率的实部(μ')可体现材料储存磁能的能力,虚部(μ'')则代表其磁损耗特性^[11],为了更加直观地评估材料的损耗性能,通常采用介电损耗角正切($\tan \delta_e = \epsilon''/\epsilon'$)和磁损耗角正切($\tan \delta_\mu = \mu''/\mu'$)当作量化指标,参数值越大,表明材料对电磁波的介电损耗或者磁损耗效应越明显。

在对吸波材料进行性能评估时,阻抗匹配特性和衰减系数是两个关键指标^[12],前者表征的是电磁波在材料

界面处的传输效率,匹配度数值越接近1,说明材料对电磁波的反射损耗越小;后者则是对材料内部电磁波的损耗机制予以量化,只有当这两个关键参数达到最佳协同匹配状态时,材料才能呈现出最为优异的电磁波吸收特性,这两个参数分别用式(1)和式(2)进行描述^[13]:

$$Z = \frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right]} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2} \pi f}{c} \times$$

$$\sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\mu'\epsilon'' + \mu''\epsilon')^2}} \quad (2)$$

其中, Z 是归一化阻抗, Z_{in} 是输入阻抗, Z_0 是自由空间阻抗, f 是频率, d 是材料厚度, c 为光速, μ_r 是相对磁导率, ϵ_r 是相对介电常数。在理想情形下,当 Z 值趋向于1时,意味着材料有优异的阻抗匹配特性,即电磁波可以尽可能多地进入材料中而不被反射。衰减常数(α)体现了材料对电磁波的损耗能力,其数值越大,表明材料的衰减性能越突出^[14]。若要实现理想的吸波效果,阻抗匹配特性与电磁波衰减能力两者缺一不可^[15],依据传输线理论,材料的吸波性能可借助反射损耗(reflection loss, RL)来进行定量表征,如式(3)所示:

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (3)$$

通常,当 $RL \leq -10$ dB时,意味着90%的电磁波被吸收,此时的频带宽度称为有效吸收带宽(effective absorption bandwidth, EAB)^[16]。

3 柔性吸波材料概述

柔性吸波材料作为一种同时拥有高效的电磁波吸收能力以及出色的机械柔韧性的特定功能材料^[17],其研究重点在于,当处于弯曲、折叠或者拉伸等形变时,依然可稳定地衰减电磁能量和降低反射率^[18],这类材料借助复合柔性基底与损耗介质实现功能化,且兼顾阻抗匹配与损耗机制的协同优化^[19];同时还可贴合在有复杂曲面的目标结构上,实现对不规则设备的电磁保护;此外利用良好的结构可设计性,便于借助调控材料组成、微观结构以及界面特性来优化电磁参数^[20]。

当前,柔性吸波材料体系主要囊括薄膜基吸波材料、泡沫基吸波材料以及织物基吸波材料,该领域的主要技术难题体现在柔韧性与吸波性能的平衡矛盾上:一方面,若过度追求柔性,就可能致使导电网络被破坏或者结构稳定性降低,另一方面,高负载吸波剂的加入容易引发材料脆化问题。针对这一矛盾,超薄多层梯度结构、动态交联网络或者仿生微结构设计是提升材料综合性能的有效途径,随着纳米技术与多功能复合技术不断迭代发

展, 柔性吸波材料在可穿戴电子设备、隐身蒙皮以及新一代通信技术 5G/6G 等场景呈现出应用潜力^[21]。

3.1 薄膜型柔性吸波材料

柔性薄膜吸波材料的主要特点是借助柔性基底和吸波填料的复合设计, 形成一种可弯曲、折叠的超薄层状结构, 这种结构可以适应复杂曲面贴合的要求, 还可借助介电损耗、磁损耗或者多重界面极化效应达成宽频电磁波吸收。柔性薄膜吸波材料以“柔性基底负载/复合吸波组分”为核心制备思路, 主要形成 3 类主流技术: 溶液成膜法(如旋涂、真空过滤等, 易于规模化且膜厚可控)、物理沉积法(如化学气相沉积、层层喷涂等, 适于制备超薄高取向薄膜)以及复合组装法(如原位聚合-热致相分离等, 侧重于界面调控)。此类材料的厚度多为微米至毫米级, 可通过调整填料配比与微观结构来优化阻抗匹配, 从而弥补传统刚性吸波材料在适应性及便携性方面的不足^[22]。

3.1.1 导电聚合物薄膜材料

导电聚合物薄膜材料可借助电导损耗以及介电弛豫机制, 实现电磁波能量的有效损耗, 依靠对电导率与介电常数加以调控, 可以实现不同频段电磁波的阻抗需求, 在柔性电子器件、轻薄化隐身涂层等场景中得到广泛应用^[23, 24]。牛芳芳^[25]采用原位氧化聚合法在石英基底上制备了聚吡咯薄膜, 通过十二烷基苯磺酸钠(SDBS)掺杂调控电导率, 利用电导损耗机制提升吸波性能, 电导率从 8.66 增加至 26.51 S/cm, 同时介电损耗性能也有所提高, 在 X 波段 8~13 GHz 内介电损耗角正切 $\tan \delta_e$ 峰值达到 0.25。Kulkarni 等^[26]通过原位化学氧化聚合法合成双重负特性(负介电常数与负磁导率)的聚噻吩(PTh)薄膜, 其多孔结构能有效调控纤维的电导率与介电常数, 从而协同优化了电导损耗与介电弛豫两种电磁波能量耗散机制。数据表明, 在 0.2 mol/L 噻吩浓度下沉积制备的 PTh 薄膜, 在 17.59 GHz 频率下最小反射损耗达 -44.24 dB (微波吸收率 99.9%)。

单一导电聚合物稳定性欠佳, 在环境突然发生变化时性能衰退速度较快, 但可以借助复合或者功能化改性来提高其稳定性。刘彦坚^[27]运用原位聚合法以及热致相分离法制备出了多孔聚酰亚胺(PI)复合薄膜, 复合后的镍锌铁氧体/聚苯胺/聚酰亚胺(NPPI)具有优异的热稳定性和拉伸性能, 复合后材料的吸波能力也有较好的提高, NPPI20 薄膜在 9.36 GHz 处呈现出 -30.01 dB 的最小反射损耗, 且有效吸收带宽覆盖 4.05 GHz 频段。Nermine 等^[28]依靠化学氧化聚合反应制备出 Fe_3O_4 @聚吡咯壳核结构纳米复合材料, 聚吡咯壳层与环氧基体协同作用, 有效抑制了 Fe_3O_4 核的氧化团聚行为, 呈现出优异的化

学稳定性与热稳定性, 该材料在 5~12 GHz 宽频范围内反射损耗一直低于 -20 dB, 平均反射损耗达 -33.8 dB, 呈现出优异的宽频吸波能力。

3.1.2 三维薄膜材料

相较于导电聚合物薄膜, 三维薄膜材料依靠其特有的立体多孔结构呈现出多种优势: 多级互通的孔隙网络可提供超高的比表面积, 实现电磁波的多重散射与反射, 还可用于引入磁性组分或者调控界面极化, 从而发挥介电损耗与磁损耗的协同作用, 打破导电聚合物单一介电损耗的局限, 达成更宽的吸收频段以及更强的吸收强度^[29, 30]。Yu 等^[31]通过溶剂蒸发成膜结合相变材料填充的方法, 制备出具有动态可调宏观结构和可变电磁场极化特性的高性能柔性微波吸收薄膜, 其正弦波状三维结构使电磁波在多孔骨架中产生多次反射与散射, 延长能量耗散路径。此外, 其通过石蜡相变特性, 使三维多孔结构在热刺激下实现孔隙率与孔径的可逆调节。该材料在 1.0 mm 厚度下可实现 4.56 GHz 的吸收带宽(RL<-5 dB)。Zhou 等^[32]设计了一种 5 层薄膜结构(片状-空心球形-片状-空心球形-片状), 相较于正常的纯片层 MXenx 薄膜, 这种 5 层薄膜结构的三维结构吸波性能有了明显提升。该研究通过机器学习来指导界面工程, 借助空气层以及微观结构的设计对界面极化加以调控, 使得介电损耗得以强化。层状与空心球的交替排列形成了阻抗梯度, 促使电磁波在材料内部进行多次反射与吸收, 提高了介电损耗能力, 该材料在 2.5 mm 厚度下实现了最小反射损耗为 -48.15 dB(5.84 GHz)。

3.1.3 碳基薄膜材料

碳基薄膜材料是一类电学性能(如电导率与介电常数)可高效调控的电磁损耗材料。在电磁波吸收应用中, 它主要通过可调的电阻损耗发挥核心作用, 同时辅以介电极化损耗, 共同实现宽频带、高效率的电磁能量衰减^[33]。Dai 等^[34]通过流延涂层与逐步热还原法, 制备出 CF10/rGO(碳纤维 10%(质量分数)/氧化石墨烯)全碳薄膜; CF 的引入适度调节了介电常数, 缓解了纯 rGO 高介电导致的阻抗失配问题, 从而改善了阻抗匹配。该薄膜厚度为 1.5 mm 时其在 Ku 波段(13.1 GHz)最小反射损耗达 -33.7 dB, 有效吸收带宽覆盖 S 波段部分频段及大部分 C、X 波段与 Ku 波段部分频段。Yang 等^[35]首次通过浮沉浸渍和化学还原方法制备了一种具有 Jaumann 结构的多层 rGO 薄膜; 多层交替结构构建的多共振腔强化了电磁波多腔共振与多重反射, 延长了能量耗散路径。该多层材料在仅几毫米的厚度和仅 3 层 rGO 薄膜的低填充率下, 同时实现了 13.75 GHz(4.25~18 GHz)的有效吸收带宽和 -47.69 dB 的强吸收。

薄膜基吸波材料因其纳米级导电填料的梯度分散与界面极化效应调控,在保持高分子基体柔韧性的同时,还实现了毫米至微米尺度下的电磁波能量高效损耗。然而在实际应用中仍面临双重技术瓶颈:一方面,超薄结构对电磁波在材料内部的多重反射路径形成了限制,致使单一薄膜难以契合宽频吸收的需求;另一方面,高度致密的组织结构使得轻量化与力学缓冲性能无法兼顾,在复杂载荷环境下容易出现结构失效。对此,泡沫型吸波材料凭借独特的多孔结构设计提供了一种有效的解决思路,三维贯通孔隙网络通过多重散射损耗与干涉相消效应这两种方式大幅延长了电磁波传播路径,其低密度骨架与孔隙率在航空航天轻量化隐身、移动电子设备抗电磁干扰等场景中呈现出不可替代的优势,下文会详细讲述泡沫材料怎样凭借泡孔梯度调控、吸波剂原位复合等方法在宽频吸收与结构功能协同方面取得突破。

3.2 泡沫型柔性吸波材料

泡沫塑料吸波材料的吸波原理主要基于其独特的多孔结构和物理特性,不同于三维薄膜的“层间孔隙散射”,泡沫材料的开孔泡孔网络形成“迷宫式电磁波耗散通道”,通过多重反射与干涉相消效应,将有效吸收路径延长至毫米级;同时通过调节发泡剂类型和工艺参数精确控制介电常数,实现与特定频段电磁波的阻抗匹配以提升吸收效率,其柔性特性还能通过阻尼效应将电磁能转化为热能进一步降低反射率^[36];其特点还包括轻质、高强,闭孔结构赋予其优异的抗压性,该体系性能可调、加工灵活且易于多功能集成。发泡材料的优势使得其在国内市场正在快速发展,主要研究热点有聚氨酯(PU)泡沫复合材料和聚酰亚胺泡沫复合材料。

3.2.1 聚氨酯泡沫材料

聚氨酯是一种由软段和硬段结构交替排列构成的嵌段聚合物,通常由多元醇和多异氰酸酯以及扩链剂发生聚合反应制得^[37]。聚氨酯泡沫虽然不具备导电导磁的能力,但是利用聚氨酯泡沫的多孔结构特性可以将吸波剂加入到聚氨酯泡沫基体赋予其优异的吸波性能^[38]。表 1 列举了一些以聚氨酯为基底、与石墨烯、金属氧化物复合的吸波材料的相关吸波性能参数。

表 1 以聚氨酯为基底的泡沫材料的吸波性能

Table 1 Microwave absorbing properties of foam based on polyurethane

Absorbent	Bandwidth/ GHz	Minimum reflection loss/dB	Ref.
GO/PU	4.10	-52.05	[39]
Fe ₃ O ₄ /BPUF	4.72	-19.96	[40]
CNT@Fe ₃ O ₄ /PU	4.37	-68.50	[41]
MWCNT/FCL/PU	5.7	-29.00	[42]

其中, Huang 等^[42]通过机械混合的方式制备出 MWCNTs/FCL/PU 复合泡沫材料。其优异的吸波能力源于两个方面:损耗机制方面,磁损耗和介电损耗呈现互补响应,依靠这种损耗机制可拓展有效吸收带宽。结构设计方面,三维多孔结构让电磁波在孔道中产生多重反射与散射,延长能量耗散路径,同时依靠孔隙与基体界面的极化效应提高介电损耗。

3.2.2 聚酰亚胺泡沫材料

聚酰亚胺是一种由芳香族二胺和芳香族二酐经缩聚反应合成的聚合物,以其优异的热稳定性、化学稳定性、力学性能及电绝缘性能而受到广泛关注^[43,44]。将其进一步制备为泡沫材料,不仅能利用三维多孔结构提升材料的柔韧性,还能借此实现吸波功能的集成:柔韧的多孔骨架便于材料加工与贴合复杂结构,而其固有的三维网络则为构建高效的介电损耗和磁损耗提供了理想平台,从而将聚酰亚胺的本体特性高效地赋能于电磁波吸收领域。王跃毅等^[45]通过冷冻干燥法制作了 CNT/PI 泡沫,其相互贯通的多级孔结构的三维骨架使得碳纳米管均匀分散在泡沫孔壁中形成了导电网络,让材料在最佳匹配厚度下达到-44.7 dB 的最小反射损耗,并实现 7.4 GHz 的有效吸收带宽,且反射损耗 ≤ -5 dB 的频带可覆盖整个 X 和 Ku 波段,兼具了轻质、耐高温及宽频吸收性能。

夹芯结构聚酰亚胺泡沫材料在吸波方面展现出显著优势,通过将聚酰亚胺泡沫(通常填充或复合吸波剂)作为芯层,并与面板构成“三明治”结构,实现了宽频带、强吸收和承载一体化。刘新超^[46]通过优化双层吸波层的电磁参数实现阻抗匹配,并将聚酰亚胺泡沫/炭黑吸波材料与蜂窝结构复合,显著拓宽了有效吸波带宽;最终获得的夹芯结构在 2~18 GHz 频率范围内的有效吸收带宽达到 13.66 GHz。Zhang 等^[47]以聚多巴胺(PDA)改性聚酰亚胺泡沫(PIF)为三维多孔骨架,以 TiCTMXene 为涂层,通过浸涂工艺成功构建了具有三维多孔夹芯结构的 Ti₃C₂T_x@PDA@PIF(TPP)复合泡沫。独特的多尺度多重反射(如图 2 所示),加上未损坏的 MXene 间电导率和 MXene/PDA 界面极化,构成了 TPP 的吸收机制,其最小反射损耗可以达到-32.6 dB,有效吸收带宽覆盖了整个 X 频段。

虽然泡沫基吸波材料借助多孔结构达成了宽频吸收,然而在可穿戴场景里它依旧面临着双重难题:其一,传统的发泡工艺很难处理泡孔尺寸均匀性与力学回弹性之间的耦合问题;其二,基体的刚性使得材料在发生 50% 形变时,吸波性能衰减超过 30%,与之相比,织物基吸波材料依靠纺织纤维所有的可编织形变能力以及良好的工艺兼容性,成为了动态防护的全新选择。接下来着重阐述针对织物基材料如何运用纤维-吸波剂协同构筑、多

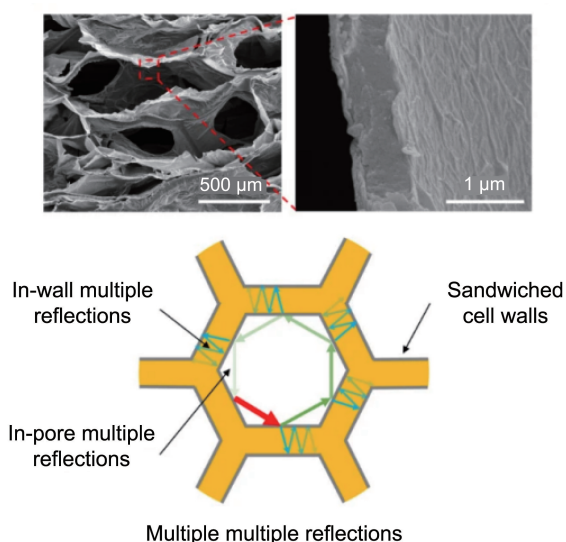


图 2 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@ \text{PDA}@ \text{PIF}(\text{TPP})$ 复合泡沫的微波吸收机理示意图^[47]

Fig. 2 Schematic illustration of the microwave absorbing mechanisms of the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@ \text{PDA}@ \text{PIF}(\text{TPP})$ composite foams^[47]

层织物叠层设计等策略,在维持柔性特征的情况下实现微波吸收功能。

3.3 织物基柔性吸波材料

织物基吸波材料是以柔性纺织基材作为结构载体,经过功能化改性使其具有电磁波损耗特性的复合材料,其核心功能是借助磁损耗、电损耗等机制,把入射电磁波能量转变为热能或者其他形式的能量进行耗散^[48],同时依靠纤维编织结构所有的柔韧性、可拉伸性以及结构稳定性,保留织物原本的加工适用性,是新一代柔性电子与智能防护领域里的关键材料。

3.3.1 负载型吸波织物

负载型吸波织物是依靠在织物基体的表面或者内部负载吸波功能材料来制成的,利用纤维编织结构的多孔性和表面吸附能力,把基底的柔韧性与功能材料的电磁损耗特性结合起来,达成对电磁波的高效吸收以及衰减^[49]。其核心优势在于制备工艺较为简便,例如浸渍、喷涂等方法,成本较低并且容易进行规模化生产。负载型吸波织物还可借助调控吸波剂的种类、浓度以及分布,实现对电磁波的宽频高效吸收^[50]。

常见的制备工艺有浸渍、喷涂和表面生长法。浸渍法是通过将基材浸入含有吸波剂的溶液实现三维均匀负载,适用于多孔材料。Gopika 等^[51]通过浸渍法将导电聚合物聚苯胺(PANI)与聚氨酯复合物负载到碳纤维织物上,利用碳纤维编织结构的多孔网络,使 PANI-PU 混合物充分渗透纤维间隙,制备了一种柔性轻质的介电吸波材料,浸渍法使 PANI-PU 混合物充分渗透碳纤维织物的

多孔结构,避免了涂层脱落。

喷涂法适用于复杂形状以及局部修饰,可保留织物纤维的柔韧性以及编织结构的完整性。孟雅鑫等^[52]采用层层喷涂法制备了 MXene/ Fe_3O_4 改性织物,该工艺的优势在于:经由逐层喷涂 MXene/ Fe_3O_4 分散液,可以保证吸波剂均匀地分布在棉织物表面,且防止颗粒出现团聚现象;同时该方法优化了材料的阻抗匹配特性:依靠介电损耗和磁损耗的协同作用,让材料在 1.5 mm 厚度时达到 -27 dB 的最小反射损耗,并且覆盖整个 X 波段,兼顾了轻质、柔性以及宽频吸收性能。

表面生长法可对微观形貌进行精准调控,其结合力较强,适用于高性能方面的需求, Jin 等^[53]依靠在棉织物表面生长 ZIF-67 MOFs,通过化学刻蚀以及碳化等工艺,制备了分层异质结构的 $\text{MoS}_2/\text{CoS}_2\text{-Co}_3\text{O}_4@$ 碳化棉织物(MCC@CCF)。MCC@CCF 的层次异质结构实现了 -52.87 dB 的最小反射损耗以及 6.88 GHz 的有效吸收带宽,呈现出优异的电磁波吸收性能,其卓越性能源自多尺度协同机制,具体如图 3 所示,微间隙结构对阻抗匹配进行了优化,并且提高了电磁波的多次散射,同时依靠对填充比例和厚度的精确调控,实现了理想的阻抗匹配与电磁波衰减能力的平衡。

3.3.2 改性纤维吸波织物

改性纤维吸波织物是通过将吸波剂嵌入到纤维内部而制成的,这样做克服了传统涂层与纤维编织结构结合不牢固的缺点,还可保持轻质、柔韧以及透气的特性。而静电纺丝技术则突破了纤维尺度的限制,它利用可以设计的超细纤维结构,像多孔、中空或者核壳构型等,来优化阻抗匹配与损耗机制,以超薄结构实现更宽频、高效的吸波性能,成为柔性隐身材料的前沿发展方向^[54]。

特别值得注意的是,借助原位聚合、热处理及碳化等工艺协同调控,静电纺丝纤维可实现从微观结构到组分特性的多级设计。Lu 等^[55]以聚丙烯腈(PAN)和金属盐为前驱体,经静电纺丝和高温碳化工艺制备出嵌入磁性 NiTi 纳米颗粒的碳纳米纤维复合材料(NiTi-CFs)。制作过程中,将核壳结构的 Co/CoO 纳米颗粒均匀嵌入氮掺杂碳纳米纤维,纤维编织后的多孔结构与核壳纳米纤维协同作用,使其在 2.5 mm 厚度时在 X 波段实现 -51.3 dB 的最小反射损耗,有效吸收带宽达 4.1 GHz。Han 等^[56]以聚丙烯腈或聚氨酯为基底,依靠静电纺丝结合原位还原或后沉积工艺,将碳纳米管等功能填料均匀分散于纳米纤维中,纤维编织形成的多孔导电网络显著增强了介电损耗,优化后的材料在 X 波段反射损耗峰值达 -45 dB,有效吸收带宽为 4 GHz;同时在 Ku 波段实现了 -52 dB 的最小反射损耗。

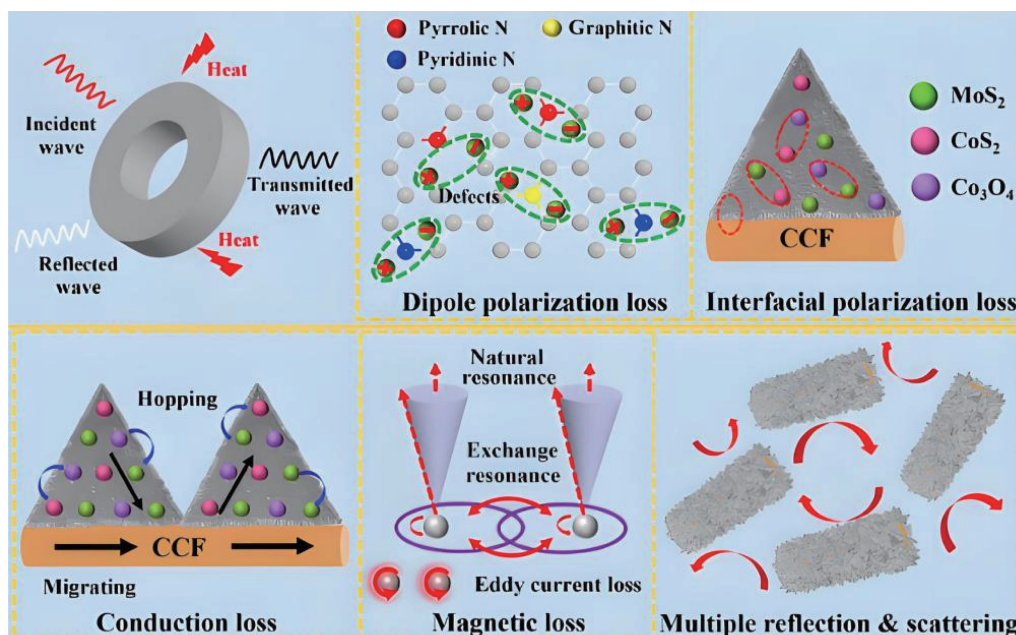


图 3 $\text{MoS}_2/\text{CoS}_2\text{-Co}_3\text{O}_4$ @ 碳化棉织物 (MCC@ CCF) 的电磁波吸收机制^[53]

Fig. 3 Electromagnetic wave absorption mechanism of the $\text{MoS}_2/\text{CoS}_2\text{-Co}_3\text{O}_4$ @ carbonized cotton fabric (MCC@ CCF)^[53]

在改性纤维吸波织物制备工艺中，湿法纺丝工艺呈现出了独特的优势。高晨光等^[57]运用湿法纺丝工艺来制备 SiBCN-rGO 陶瓷纤维，该工艺的独特之处在于借助化学交联精准调控纤维的微观结构，形成 rGO 导电网络、多孔基体以及异质界面的协同损耗机制。此外，SiBCN 陶瓷的高温稳定性解决了传统吸波材料高温失效这一问题，从实验数据可以看出，含质量分数为 6% rGO 的纤维的反射损耗低至 -50.90 dB (9.20 GHz)，且有效吸收带宽为 2.3 GHz，呈现出宽频高效吸收的特性。

徐文玉等^[58]运用同轴湿法纺丝一体化成型技术制备了核壳结构的 PEDOT:PSS/SA@MXene 复合改性纤维。借助同轴纺丝可精确调控核壳界面，依靠海藻酸钠与 MXene 之间的氢键作用提高两者的结合力，避免了传统涂层出现脱落的情况。当芯层 MXene 浓度为 1.0 mg/mL 时，复合纤维在 3.08 mm 厚度的情况下最小反射损耗可达到 -63.39 dB，有效吸收带宽为 3.20 GHz，此项实验为柔性吸波材料的结构设计以及功能集成开辟了新的途径。

综上所述，薄膜基、泡沫和织物基这 3 类柔性吸波材料将柔性基体+损耗介质作为核心设计思路，借助对介电损耗、磁损耗进行调控，或者让二者共同发挥作用，以此达成电磁波能量的耗散。3 种材料各有优势：薄膜基的优势在于其超薄的厚度以及纳米填料分散状态良好，能够在微米级厚度下实现高效电磁波吸收，这种特性使其适用于可穿戴设备；泡沫基的优势是利用三维贯穿多孔网络结构延长波传播路径，提升宽频散射效果，这

一特性契合航空航天领域对于轻量化的需求；织物基的优势则是依靠纤维编织特性和可拉伸性能，可适配动态形变场景，故而适用于智能防护服装。

4 结 语

柔性吸波材料的研究方向正从单纯的单一性能优化朝着多功能、智能化以及结构-功能一体化的综合设计不断演进，当下借助复合柔性基底与损耗介质、异质界面工程以及多机制协同，在宽频吸收能力、轻量化与柔韧性平衡等方面已经有了一定进展，如借助超薄多层梯度结构、动态交联网络或者仿生微结构设计来达成。不过其发展过程中依旧面临着核心挑战：阻抗匹配与衰减性能的协同优化仍有欠缺，吸波剂分散不均匀、界面结合薄弱以及长期稳定性问题较为突出，而且在温湿度、形变等动态环境下性能容易衰退，与传感、自修复、热管理等多功能集成的深度融合机制还需要有所突破。未来柔性吸波材料会聚焦于智能响应化、环境友好化、功能多元化以及结构跨尺度化，以契合 6G 通信、智能穿戴、航空航天隐身等场景对于宽频高效吸收、动态环境耐受以及复合功能集成的严格要求，推动电磁防护材料朝着智能化、绿色化、集成化方向实现跨越式发展。

参考文献 References

- [1] WANG H Y, SUN X B, YANG S H, *et al.* Nano-Micro Letters[J], 2021, 13: 206-206.
- [2] LIU P, ZHU C, GAO S, *et al.* Carbon[J], 2020, 163: 348-359.

- [3] 朱韩飞, 刘亚琼, 王利君. 纺织高校基础科学学报[J], 2025, 38(2): 67-79.
ZHU H F, LIU Y Q, WANG L J. Journal of Basic Science of Textile Colleges and Universities[J], 2025, 38(2): 67-79.
- [4] 王文豪, 王龙, 汪刘应, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2024, 53(3): 856-869.
WANG W H, WANG L, WANG L Y, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2024, 53(3): 856-869.
- [5] ASLAM A M, AHSEN R, USHA R Z, *et al.* Next Materials[J], 2025, 8: 100584.
- [6] LIANG B. Technology Wind[J], 2020, 32: 180-181.
- [7] ZHANG Y H, ZHANG L, SI H, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2025, 233: 69-79.
- [8] WANG R, REN S, CHEN P, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2025, 524: 169721.
- [9] 刘晓明, 华宇晨, 傅远翔, 等. 中国材料进展[J], 2023, 42(9): 685-698.
LIU X M, HUA Y C, FU Y X, *et al.* Materials China[J], 2023, 42(9): 685-698.
- [10] CAO M S, CAI Y Z, HE P, *et al.* Journal of Chemical Engineering[J], 2018, 359: 1265-1302.
- [11] PANG H F, DUAN Y P, HANG L X, *et al.* Composites Part B[J], 2021, 224: 109-173.
- [12] GAO Z G, YANG K, ZHAO Z H, *et al.* International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials[J], 2023, 30: 405-427.
- [13] DENG B W, ZHEN X, JUAN X, *et al.* Nano-Micro Letters[J], 2020, 12: 765-777.
- [14] ELMOWAFY E M, ZORAINY M, ABUZALAT O, *et al.* Journal of Physics: Conference Series[J], 2022, 228: 109423.
- [15] WU Y, TAN S J, ZHAO Y, *et al.* Progress in Materials Science[J], 2023, 135: 101088.
- [16] LI N N, SHU R W, ZHANG J B, *et al.* Journal of Colloid and Interface Science[J], 2021, 375: 596364.
- [17] 来侃, 陈美玉, 孙润军, 等. 西安工程大学学报[J], 2015, 29(6): 655-665.
LAI K, CHEN M Y, SUN R J, *et al.* Journal of Xi'an Engineering University[J], 2015, 29(6): 655-665.
- [18] 孟雅鑫. 柔性吸波纺织复合材料的制备及其吸波性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2024.
MENG Y X. Preparation and Absorption Properties of Flexible Absorbing Textile Composite Materials[D]. Qingdao: Qingdao University, 2024.
- [19] YE Y P, ZHENG X, ZHOU C, *et al.* Composite Structures[J], 2025, 363: 119116.
- [20] QING T, QI F, LEI H, *et al.* Molecules[J], 2025, 30: 1625.
- [21] 赵岳, 马秘辉, 台春雷, 等. 化工新型材料[J], 2026, 54(1): 228-233.
ZHAO Y, MA M H, TAI C L, *et al.* New Chemical Materials[J], 2026, 54(1): 228-233.
- [22] 唐超, 陈平, 于祺, 等. 纤维复合材料[J], 2014, 31(4): 52-54.
TANG C, CHEN P, YU Q, *et al.* Fiber Composite Materials[J], 2014, 31(4): 52-54.
- [23] LIU Y, LIU Y, DREW G M, *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2024, 593: 171850.
- [24] 王福成, 朱玲, 余佳芮, 等. 江西科技师范大学学报[J], 2023(6): 5-16.
WANG F C, ZHU L, YU J R, *et al.* Journal of Jiangxi Normal University of Science and Technology[J], 2023(6): 5-16.
- [25] 牛芳芳. 电镀与涂饰[J], 2020, 39(16): 1061-1065.
NIU F F. Electroplating and Coating[J], 2020, 39(16): 1061-1065.
- [26] KULKARNI G, KANDESAR P, VELHAL N, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2018, 355: 196-207.
- [27] 刘彦坚. 镍锌铁氧体/聚苯胺/聚酰亚胺多孔复合薄膜的制备及其吸波性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
LIU Y J. Preparation and Absorption Properties of Nickel Zinc Ferrite/Polyaniline/Polyimide Porous Composite Thin Films[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [28] NERMINE J, SADAT Z A, MEHDI M T. Synthetic Metals[J], 2021, 282: 116948.
- [29] LIU J, WU Y, HE J, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2025, 102: 179369.
- [30] 付凯, 李婧, 常冠军. 化学推进剂与高分子材料[J], 2025, 23(1): 32-35.
FU K, LI J, CHANG G J. Chemical Propellants and Polymer Materials[J], 2025, 23(1): 32-35.
- [31] YU C, QUAN B, LIU J J, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2025, 17(6): 9748-9759.
- [32] ZHOU H, LI X, XI Z, *et al.* Materials Today Physics[J], 2025, 51: 101640.
- [33] SHARAFEE M S, FARHAN S A, LOTFI S, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2022, 428: 131929
- [34] DAI Z Z, YU X L, WANG Y, *et al.* Ceramics International[J], 2023, 49(22): 37051-37058.
- [35] YANG L H, LI Q C, MO W R, *et al.* Carbon[J], 2024, 224: 119093.
- [36] 孙诗兵, 黄石明, 贾治勇, 等. 北京工业大学学报[J], 2018, 44(4): 611-616.
SUN S B, HUANG S M, JIA Z Y, *et al.* Journal of Beijing Institute of Technology[J], 2018, 44(4): 611-616.
- [37] 刘旭琦, 李双阳, 王玲轩, 等. 化工新型材料[J], 2023, 51(9): 8-12.
LIU X Q, LI S Y, WANG L X, *et al.* New Chemical Materials[J], 2023, 51(9): 8-12.
- [38] 尹春, 谭琳, 冯辉霞, 等. 化工新型材料[J], 2024, 52(2): 1-5.
YIN C, TAN L, FENG H X, *et al.* New Chemical Materials[J], 2024, 52(2): 1-5.
- [39] WANG C, LI J, GUO S. Composites Part A[J], 2019, 125: 105522.
- [40] XIA L X, TAO X K, BO G X, *et al.* International Journal of Molecu-

- lar Sciences[J], 2022, 23: 12301.
- [41] ZHENG J J, WEI X L, LI D C, *et al.* Nano Energy [J], 2021, 89: 106397.
- [42] HUANG X G, YU D P, WANG S M, *et al.* Materials[J], 2022, 15: 5690.
- [43] SUN G H, LIU L H, WANG J, *et al.* Polymer Degradation and Stability[J], 2015, 115: 1–15.
- [44] 余文涛. 聚酰亚胺基多孔碳复合吸波材料的制备与性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2024.
- YU W T. Preparation and Properties of Polyimide Based Porous Carbon Composite Absorbing Materials[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2024.
- [45] 王跃毅, 鄢定祥, 李忠明, 等. 航空学报[J], 2022, 43(7): 484–492.
- WANG Y Y, YAN D X, LI Z M, *et al.* Journal of Aeronautics[J], 2022, 43(7): 484–492.
- [46] 刘新超. 耐高温聚酰亚胺泡沫复合材料及其夹芯结构的多功能设计与表征[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- LIU X C. Multifunctional Design and Characterization of High Temperature Resistant Polyimide Foam Composites and Their Sandwich Structures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [47] ZHANG Y, HAN M, HU R, *et al.* Science China Materials [J], 2024, 67(1): 272–278.
- [48] 包文丽, 刘元军, 赵晓明. 纺织科学与工程学报[J], 2024, 41(3): 1–7.
- BAO W L, LIU Y J, ZHAO X M, *et al.* Journal of Textile Science and Engineering [J], 2024, 41(3): 1–7.
- [49] GUI Y P, JIN T Z, JUN R Y, *et al.* Carbon [J], 2024, 229: 119549.
- [50] 李博, 张昭环, 茹燕平, 等. 合成纤维[J], 2020, 49(1): 31–36.
- LI B, ZHANG Z H, RU Y P, *et al.* Synthetic Fiber [J], 2020, 49(1): 31–36.
- [51] GOPIKA G N, AVINASH R P, NANDAKUMAR K, *et al.* Journal of Natural Fibers [J], 2022, 19: 13348–13361.
- [52] 孟雅鑫, 张仲, 侯宪广, 等. 棉纺织技术[J], 2023, 51(5): 19–24.
- MENG Y X, ZHANG Z, HOU X G, *et al.* Cotton Textile Technology [J], 2023, 51(5): 19–24.
- [53] JIN J, LONG H, LIU H, *et al.* Nano Research [J], 2024, 17: 7290–7300.
- [54] ZHANG X X, HAO M Y, ZHANG Y G, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2025, 1022: 180016.
- [55] LU X C, LIU Y Z, KE B, *et al.* Materials Today Communications [J], 2024, 245: 39109.
- [56] HAN C, ZHANG M, CAO W Q, *et al.* Carbon [J], 2021, 171: 953–962.
- [57] 高晨光, 孙晓亮, 陈君, 等. 无机材料学报[J], 2025, 40(3): 290–296.
- GAO C G, SUN X L, CHEN J, *et al.* Journal of Inorganic Materials [J], 2025, 40(3): 290–296.
- [58] 徐文玉, 王慧雅, 朱曜峰, 等. 现代纺织技术[J], 2024, 32(12): 10–19.
- XU W Y, WANG H Y, ZHU Y F, *et al.* Modern Textile Technology [J], 2024, 32(12): 10–19.