



电磁材料吸波机理及低频薄层吸波材料研究进展

王涛*, 李睿龙, 杨晟宇, 乔亮, 李发伸

兰州大学物理科学与技术学院, 磁学与磁功能材料教育部重点实验室, 兰州 730000

*联系人, E-mail: wtao@lzu.edu.cn

收稿日期: 2025-11-03; 接受日期: 2026-01-23; 网络出版日期: 2026-04-10

国家自然科学基金(编号: 11204115, 11574122, 51731001)和国家重点研发计划(编号: 2021YFB3501300)资助项目

摘要 在微波发射、探测技术快速发展及高频电子设备高度集成的当下, 高效的吸波材料不仅能够有效削弱微波反射信号, 防止目标被探测, 也能有效抑制高频器件间的电磁干扰, 用于电磁兼容. 近年来, 国内外研究人员为开发薄层、高效的吸波材料, 在不同材料体系和微观结构重构上作了大量研究工作. 由于缺乏对吸波体吸波机理的深入了解, 薄层吸波材料的研究未有显著进展. 本团队从探究、阐明吸收峰的来源出发, 通过设计实验结合理论计算揭示了吸收峰产生的物理机理, 并进一步揭示了吸收峰强度变化、阻抗匹配和峰宽的物理图像. 依据吸波机理, 本团队提出了吸波材料性能优劣的评价标准, 并开发了新型的易面磁性吸波材料, 在薄层吸波材料, 特别是低频薄层吸波材料的研制上取得重要突破. 对于近期引起学术界关注的超材料吸波体, 在解释其吸收峰的产生原因以及拓展吸波频带上, 本团队提出的吸波机理也完全适用, 能够有效指导开发性能更优的结构型吸波体.

关键词 吸收机理, 吸波材料, 超材料

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.67.Pt

1 引言

随着电子信息和智能交互技术的持续发展, 电磁波在日常生活中被广泛使用, 在通信、雷达、传感等诸多领域均发挥重要作用, 给人们的生活带来了极大的便利^[1,2]. 然而, 由于电磁波的大量使用, 人们对健康产生危害的忧虑也日渐增加. 同时, 在微波发射、探测技术快速发展及电子设备高度集成的当下, 对目标防探测和抗干扰的需求也愈发迫切. 高效的吸波材料不仅能够有效抑制微波反射信号, 防止目标被探测,

也能有效减少器件间的电磁干扰, 用于电磁兼容^[3,4]. 因此, 研究者在微波吸收领域开展了大量工作, 其中研究吸波材料的内在机理和开发新型高效的吸波材料尤为重要^[5].

性能优异的微波吸收材料需要具备“薄、轻、宽、强”的特点, 近年来, 国内外研究人员为开发薄层、高效的吸波材料, 在不同材料体系和微观结构重构上作了大量研究工作^[6]. 已经有大量工作对碳基材料^[7,8]、导电聚合物^[9,10]、磁性材料^[11]、金属材料^[12]、二维材料^[13]和高熵材料^[14,15]等的微波吸收特性进行了研

引用格式: 王涛, 李睿龙, 杨晟宇, 等. 电磁材料吸波机理及低频薄层吸波材料研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 250010

Wang T, Li R L, Yang S Y, et al. Research progress on wave-absorbing mechanism of electromagnetic materials and low-frequency thin-layer wave-absorbing materials (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 250010, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0521

究^[16]。除此之外, 材料的微观结构也会影响吸波材料的吸波性能, 常见的吸波材料具有球形、棒状、片状等简单结构^[11]。同时, 研究发现, 通过采用不同的合成方法、改变诸如温度或压力等参数, 并使用不同的掺杂材料, 可以形成不同的形态和微观结构(如花状、蛋壳状、多孔结构等)以调控吸波性能^[17,18]。然而, 由于目前对吸波体的吸波机理研究尚不清晰, 如何调控吸波材料电磁参数以获得更好的性能缺乏理论指导, 因此对薄层吸波材料的研究尚未取得显著进展。

在之前的大量研究中, 电磁损耗模型被广泛应用于解释吸波机理, 即电磁波尽可能进入吸波体, 随后依靠介电损耗和磁损耗吸波^[19]。然而, 该模型缺陷明显, 缺乏有效的物理图像来解释各种材料实际的吸波性能, 如吸收峰频率与吸收材料的最大介电损耗或磁损耗频率并不一致, 这难以解释吸收峰的出现原因。此外, 该模型也无法解释吸收峰随吸波体厚度的改变而发生强度和频率的变化的现象。

基于此, 本团队从探究、阐明吸收峰的来源出发, 通过设计实验结合理论计算和仿真阐述了吸收峰产生的物理机理, 并进一步揭示了吸收峰强度变化、阻抗匹配和峰宽的物理图像。依据吸波机理, 本团队提出了吸波材料性能优劣的评价标准, 并开发了新型的易面磁性吸波材料, 在薄层吸波材料, 特别是低频薄层吸波材料的研制上取得重要突破。

传统的吸波材料还存在有效吸收频宽较窄的局限, 新兴的吸波超材料因其具有多频段的响应特性, 能够在宽频段高效吸收电磁波而受到关注^[20,21]。研究者们提出了多层结构、蜂窝结构和框架结构等周期性结构, 以增强超材料对电磁波的吸收^[22]。对于新兴并引起广泛关注的超材料, 本团队提出的吸波机理在解释其吸收峰的产生原因以及拓展吸波频带上也完全适用, 能够有效指导开发性能更优的结构型吸波体。

2 电磁波与材料的相互作用

当电磁波入射匀质吸波材料时, 会发生反射、传播吸收和透射三个过程, 而经过多次这样的过程后, 电磁波被消耗殆尽, 如图1所示。反射和透射是由自由空间与介质材料之间阻抗不同导致的, 反射和透射系数可以通过材料的电磁参数计算得到。考虑无限大均匀介质, 电磁波由自由空间入射至介质表面时, 反射

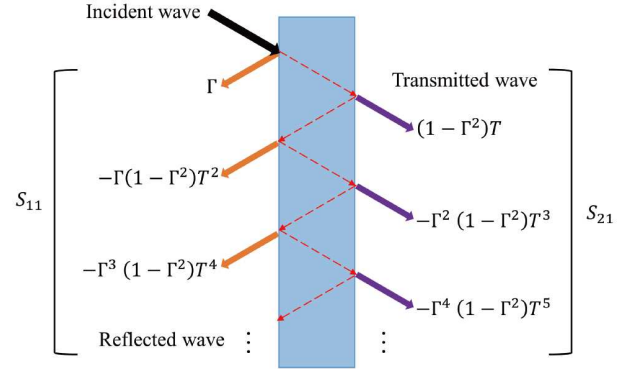


图1 电磁波与吸收材料的相互作用

Figure 1 Interaction of electromagnetic waves with absorbing materials.

系数为

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} + 1}. \quad (1)$$

当电磁波穿过有限厚度 d 的介质时, 其传输系数为

$$T = \exp(-i2\pi f d \sqrt{\mu_r \epsilon_r} / c), \quad (2)$$

其中, μ_r 和 ϵ_r 为介质的相对复数磁导率和介电常数, c 为光速, f 为对应频率。在电磁波垂直入射介质时, 会经过多次反射和透射, 在两端口处得到的散射系数 S_{11} 和 S_{21} 可由介质材料的电磁参数得到:

$$S_{11} = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 T^2}, \quad (3)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - \Gamma^2 T^2}. \quad (4)$$

同样地, 也可由散射系数 S_{11} 和 S_{21} 反演得到材料的电磁参数。可以发现, 电磁波与材料的相互作用由其电磁参数决定, 因此电磁参数对于吸波材料至关重要。

而吸波材料在实际使用时, 其底面要存在金属背底, 与吸波材料构成吸波体。入射电磁波会在吸波材料表面(前界面)和材料与金属背底交界面(后界面)发生反射, 两列波组成吸波体的反射波。通常采用反射损耗系数(RL)表征材料的微波吸收性能, 根据传输线理论, RL表示为

$$RL(\text{dB}) = 10\log_{10}R = 20\log_{10}\left|\frac{z_{\text{in}} - 1}{z_{\text{in}} + 1}\right|, \quad (5)$$

$$z_{\text{in}} = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh(i2\pi f d \sqrt{\mu_r \epsilon_r} / c), \quad (6)$$

其中, R 为吸波体的反射率, $\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}$ 与电磁波到达材料

表面时的透射系数和反射系数有关, 与材料构成吸波体后的厚度无关. z_{in} 为吸波体的相对输入阻抗, 是材料以一定厚度制成带有金属背衬的吸波体后对入射电磁波的阻抗. $z_{in}=1$ 时实现完全匹配, 即前后界面反射波同时满足相位匹配(相位差为 π)和强度匹配(振幅相等), 进而实现干涉相消. 此时在传输线理论公式中表现为 $RL=-\infty$, 即没有电磁波被反射, 吸波体实现完美吸收. 当反射损耗系数低于 -10 dB 时, 其反射率低于 10%, 即有多于 90% 的电磁波被吸收, 称为有效吸收.

3 微波吸收机理和吸波材料评价方法

3.1 损耗类型

综上所述, 电磁波与材料之间的相互作用会导致电磁波的损耗, 损耗的来源主要可分为介电损耗和磁损耗. 介电损耗主要是由于材料中的界面极化、导电网络的形成、缺陷的存在导致材料内部发生缺陷诱导的极化和偶极弛豫过程等. 产生磁损耗的原因有磁滞、涡流、磁畴壁共振、交换共振和自然共振等^[18].

3.2 吸收峰的产生机制

第 3.1 节介绍了电磁波在进入材料内部后与材料产生相互作用时所产生的损耗过程, 但并不是完整的吸波过程. 为了进一步分析微波吸收的过程, 本文将从吸收峰产生原因出发, 对电磁材料的吸波机理进行分析.

电磁损耗模型被广泛应用于解释吸波机理, 即电磁波进入吸波材料内部, 利用介电损耗和磁损耗吸收电磁波, 达到良好的吸波效果. 然而, 该模型缺陷明显, 缺乏有效的物理图像来解释各种材料实际的吸波性能. 首先, 吸收峰频与磁损耗或介电损耗的最大值不能对应, 难以解释吸收峰的出现原因; 其次, 吸波体的吸收峰随厚度改变而发生强度和频率的变化, 也同样难以利用电磁损耗模型来解释.

已有大量实验表明, 吸波体反射损耗系数的峰值频率与材料的厚度密切相关. 在材料较薄时, 微波段不出现吸收峰, 当厚度增加至足够大时, 出现吸收峰, 而随着材料厚度的增加, 吸收峰的频率向低频移动, 且峰值也会发生变化^[23,24]. 这一现象难以通过电磁损耗模型解释, 而 1/4 波长关系描述了吸收峰频率与材料厚度的关系^[25,26].

$$t_m = \frac{n\lambda_m}{4} = \frac{nc}{4f_m\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots, \quad (7)$$

即要获得吸收峰, 材料厚度要满足介质的 1/4 波长厚度的奇数倍. 1/4 波长关系适用于峰频的分析, 为了分析吸收峰强度变化和更宽频范围中电磁波的吸收行为, 本文利用界面反射模型对电磁波的吸收进行了分析.

图 2 是电磁波垂直入射吸波体的示意图, 图 2(a) 表示无金属背底的情况, 图 2(b) 表示有金属背底的情况. 对于无金属背底的吸波体, 入射波(E_0)在 AA 界面部分反射, 记为 E_{AA} , 是可被测得的 $S_{11-OPEN}$, 部分透射记为 S_{21} , 部分衰减在吸波体内记为 E_{loss1} . 当吸波体背面有金属板时, 在金属板前界面处的部分反射波能量(E_{AA})与没有金属板时相同^[27]. 在这种情况下, 图 2(a) 中的透射波在 AM 界面被完全反射, 然后从 AA 界面出射. 这个出射波的能量记为 E_{AM} . 此时, 波在吸波体中衰减能量是 E_{loss2} . 图 2(b) 中的 RL 可通过 $S_{11-SHORT}$ 直接测量, 与传输线理论计算值吻合. 如果入射电磁波的能量为 1, 通过测量 $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$, 可以得到一个重要的能量关系:

$$2E_{11-OPEN} \pm E_{11-SHORT} + E_{loss2} = 1, \quad (8)$$

其中, $E_{11-OPEN}$ 和 $E_{11-SHORT}$ 是由测量得到的 $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$ 参数转换而来的能量比率. 当 E_{AA} 小于 E_{AM} 时取正号, 否则取负号. 通过方程 (8), 可以得出在 AA 和 AM 界面处反射的电磁波能量以及在吸波体中衰减的能量值.

图 3 显示了不同厚度下无金属背板和有金属背板的羰基铁颗粒/石蜡复合材料对应的 $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$ 随频率变化曲线. 复合材料的 $S_{11-OPEN}$ 值在低频区很小, 其迅速增加并在高频区域保持稳定. $S_{11-OPEN}$ 随频率的

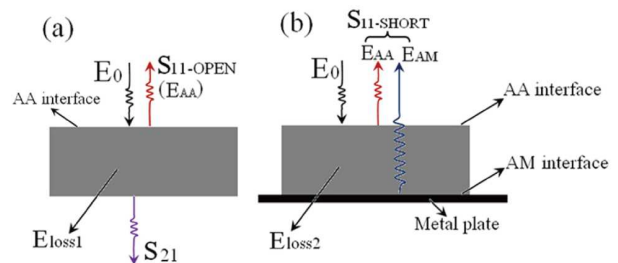


图 2 电磁波垂直入射吸波体的示意图. (a) 无金属背底, (b) 有金属背底^[27]

Figure 2 Scheme of an electromagnetic wave normally incident on the absorber. (a) Without a backed metal plate, (b) with a backed metal plate^[27].

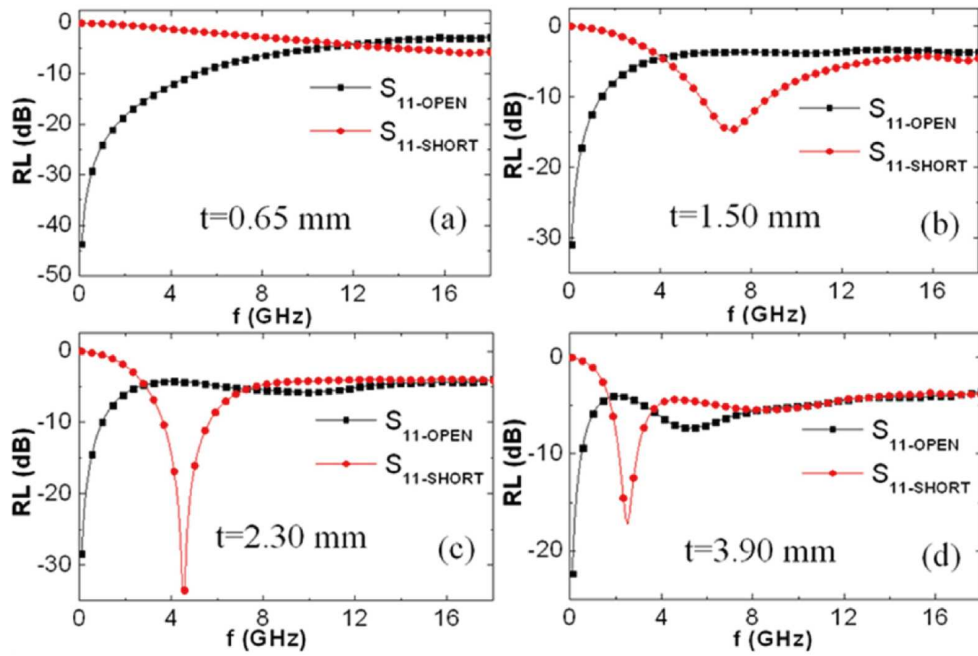


图 3 不同厚度下羰基铁(FSCI)颗粒/石蜡复合材料的 $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$ 与频率关系. (a) 0.65 mm, (b) 1.50 mm, (c) 2.30 mm, (d) 3.90 mm^[27]

Figure 3 Frequency dependence of $S_{11-OPEN}$ and $S_{11-SHORT}$ for FSCI particle/paraffin composite under various thicknesses. (a) 0.65 mm, (b) 1.50 mm, (c) 2.30 mm, (d) 3.90 mm [27].

变化规律表明, 低频区只有小部分电磁波在AA界面处反射, 且反射能量随频率的增加迅速增加, 并保持不变. 值得注意的是, 在不同厚度的 $S_{11-OPEN}$ 曲线中均未发现RL峰, 这证明, 如果复合材料没有背面金属板, 则不会出现RL峰. 然而, 在复合材料背面加金属板后, 除了0.65 mm的吸波体外, 在其他 $S_{11-SHORT}$ 曲线中发现RL峰. 这是因为, 图2(a)中标记为 S_{21} 的透射波在AM界面处完全被反射, 当添加背面金属板时, 它会从AA界面透射, 并与AA界面处的反射波叠加. 当复合材料厚度满足1/4波长时, $S_{11-SHORT}$ 曲线中会出现RL峰, 这是由于两波的干涉相消所致. 在厚度为0.65 mm时, 复合材料太薄无法满足1/4波长条件, 因此 $S_{11-SHORT}$ 曲线中未出现RL峰. 此外, 通过 $S_{11-SHORT}$ 测量的所有RL曲线与使用式(5)和(6)通过对应厚度电磁参数的计算结果非常吻合. 该实验直观地验证了对于带有背面金属板的吸波体, RL峰是由AA界面和AM界面的两个反射波的1/4波长相消所引起的.

为更清晰地分析两列反射波的行为, 我们建立了对称模型, 如图4所示^[28]. 当电磁波入射吸波体表面时, 部分电磁波被反射, 记为前界面反射波, 如图4(a)所示. 其余部分进入材料内部, 在传播至材料底部时被

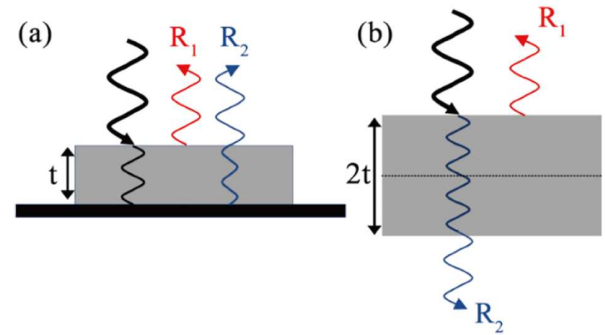


图 4 (a)吸波体中电磁波传播和(b)对称模型中分离的反射波的示意图^[28]

Figure 4 Schematic diagram of (a) electromagnetic wave propagation in the absorber and (b) separated reflected waves in the symmetry model [28].

金属背底全反射, 在经过传播后再次到达材料顶部透射而出, 记为后界面反射波. 电磁波在材料内部传播时, 伴随着材料对其的电磁损耗, 两列反射波最终叠加成为该吸波体的总反射波. 对于不同的材料, 两列波在界面处的反射系数不一致, 传播损耗也不一致, 最终导致了不同材料对电磁波不同的吸收性能. 通过建立对称模型, 能够分离前后界面的反射波, 如图4(b)所示.

通过仿真和计算得到的两列波的矢量叠加结果与吸波体的反射损耗曲线一致, 能够证明干涉相消现象的存在. 如图5所示^[28], 我们对常见的磁性材料羰基

铁、铁氧体样品和介电材料进行了分析. 对于所使用的羰基铁样品, 在吸收峰处, 两列波相位相差 180° , 强度接近, 有利于波的干涉相消以产生吸收峰. 而所使用

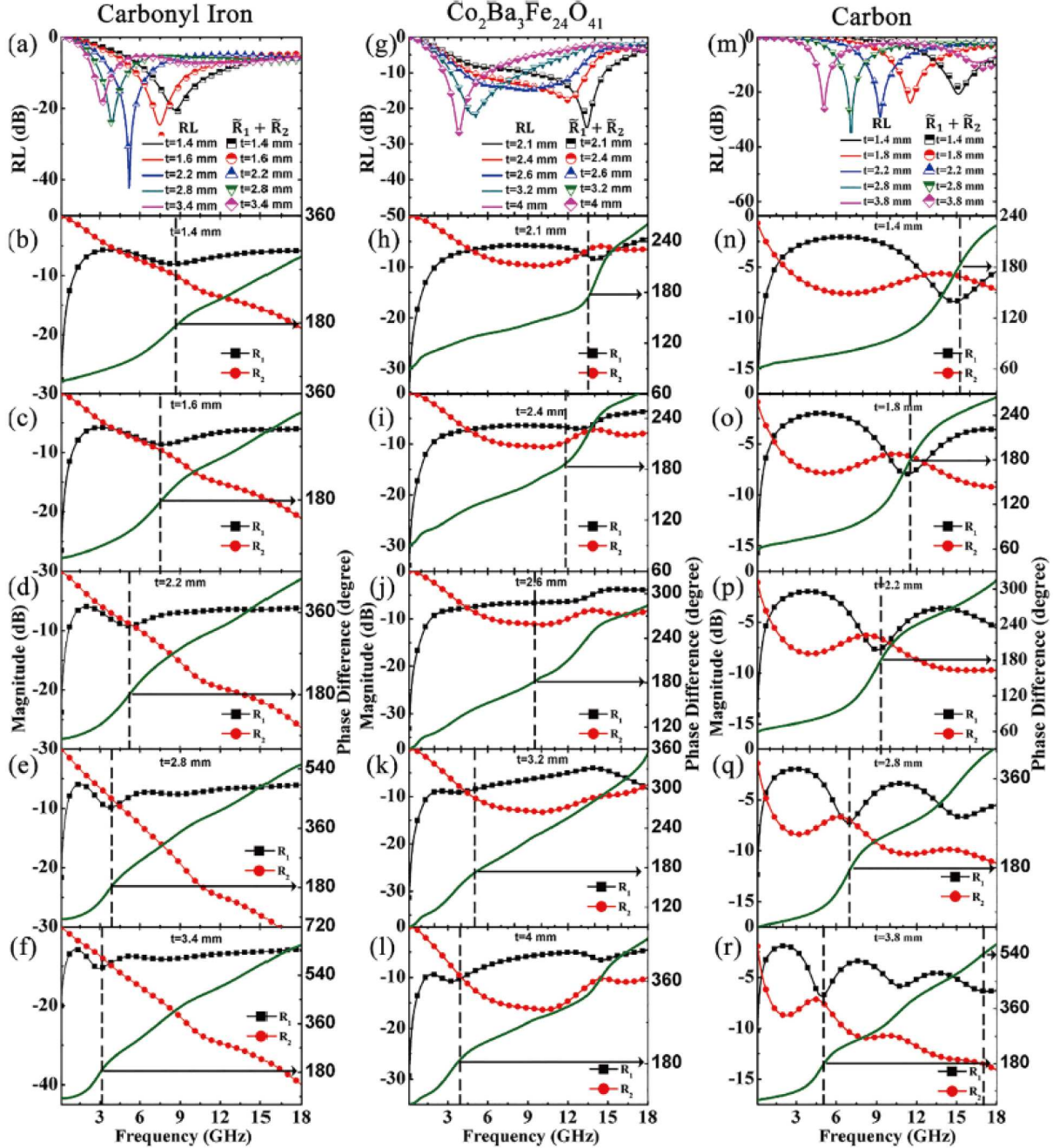


图 5 (a), (g)和(m)分别为三种吸波体的反射损耗, 其中实线为仿真结果, 符号线为分离波的干涉结果. (b)–(f), (h)–(l)和(n)–(r)分别为三种吸波体在不同厚度下分离的波. 前、后界面反射的波分别用黑色和红色绘制, 其相位差用绿色绘制. 黑色虚线用于标记每种厚度下的峰值频率^[28]

Figure 5 (a), (g), and (m) are the reflection losses of the three kinds of absorbers, in which the solid lines are the results of simulation, while the symbol lines are the interference results of separated waves. (b)–(f), (h)–(l), and (n)–(r) are the separated waves of the three kinds of absorbers under different thicknesses, respectively. The waves reflected by the front and back interfaces were plotted in black and red, respectively, and their phase difference was plotted in green. The black dashed lines are used to mark the peak frequency at each thickness ^[28].

的铁氧体 $\text{Co}_2\text{Ba}_3\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 样品在2.6 mm厚度下, RL曲线平坦, 在1/4波长处未出现明显吸收峰, 根据分离曲线可知, 是因为两列波强度相差较大, 难以实现良好的干涉相消. 对于碳介电材料, 在3.8 mm厚度下, 两列波相位差为 180° 和 540° 时出现了两个吸收峰, 分别对应1/4和3/4波长的干涉相消. 而较大厚度的羰基铁材料也有 540° 的相位差, 但由于两列波强度相差较大, 并未发生强干涉而出现吸收峰.

可以看到, 材料的吸收峰来源于两列波的干涉相消, 出现于材料厚度满足 $\lambda/4$ 关系处, 此时两列波的相位差为 180° 的奇数倍, 称为相位匹配. 吸收峰的强弱取决于两列波的能量差, 当两者强度一致时, 实现完全相消, 此时吸波体的输入阻抗 $z_{\text{in}}=1$, 达到完全匹配(强度和相位同时匹配); 反之, 电磁波只能部分相消, 能量差越大, 峰强越弱, 甚至不会出现明显吸收峰^[29]. 根据以往的电磁损耗模型, 实现匹配的条件是材料 $\mu_r/\epsilon_r=1$, 但现实材料通常都不满足 $\mu_r/\epsilon_r=1$, 构成的吸波体仍能实现良好的吸收. 根据界面反射模型, 为了保证吸收峰的出现以实现强吸收, 前界面需要具有一定的反射率使前界面反射波能够产生, 即 μ_r/ϵ_r 不能等于1, 这也符合实际情况和结果. 同时, 我们也根据传输线理论推导了1/4波长关系的严格证明, 并对该关系在材料实际性能中出现的偏差提出了修正方程以进行解释^[30].

3.3 峰强、阻抗匹配的物理机制

在探究了吸收峰产生的原因后, 可以根据界面反射模型进一步揭示吸收峰强度变化和实现阻抗匹配的物理图像. 根据前面的讨论可知, 能否获得较强的吸收

峰取决于前后界面反射波的能量差, 在1/4波长处两列波相位差为 180° (即相位匹配), 当两者能量相等时(即强度匹配), 达到完全匹配($z_{\text{in}}=1$), 入射波被完全吸收. 而能量差过大或过小的不完全匹配都会导致相消的不完全, 致使吸收峰较弱, 甚至消失. 通常情况下, 材料的介电常数大于磁导率, 即 $\sqrt{|\epsilon_r/\mu_r|}$ (我们称之为反射因子)大于1, 此时 $\sqrt{|\epsilon_r/\mu_r|}$ 与前界面反射强度成正比, 其数值很大程度决定了吸波体前后界面反射波的能量差. 图6给出了在实现完美吸收时, 介电常数与磁导率值的匹配关系, 可以看到实现完全匹配时, $\sqrt{|\epsilon_r/\mu_r|}$ 具有一定的数值^[31]. 根据理论分析和大量的实验数据对比发现, 吸波频率处反射因子在2~5范围内时, 可以得到约-10 dB或更小的反射损耗. 超出这个范围, 即反射因子过大或过小, 吸收峰强度都会减小. 若得到的吸波材料性能需要提高, 可以根据该反射因子进行电磁参数的调节, 以达到期望的吸波效果. 较为便捷的解决方法有: (1) 固定吸波材料的体积分数时, 可改变其种类, 使反射因子达到合适的值; (2) 选定吸波材料时, 可改变其体积分数使反射因子达到合适的值. 也可以通过组分或者工艺来进行调节, 如反射因子较高时, 可以对材料进行氧化处理, 以降低介电常数, 从而改善反射因子和吸波性能; 反射因子较低时, 可以通过添加导电粉末来提高介电常数, 从而增大反射因子.

以往的电磁损耗模型认为, 磁导率和介电常数相等时(即 $\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}=1$), 电磁波能够完全进入吸波体内部, 从而有利于材料通过电磁损耗对电磁波进行强吸

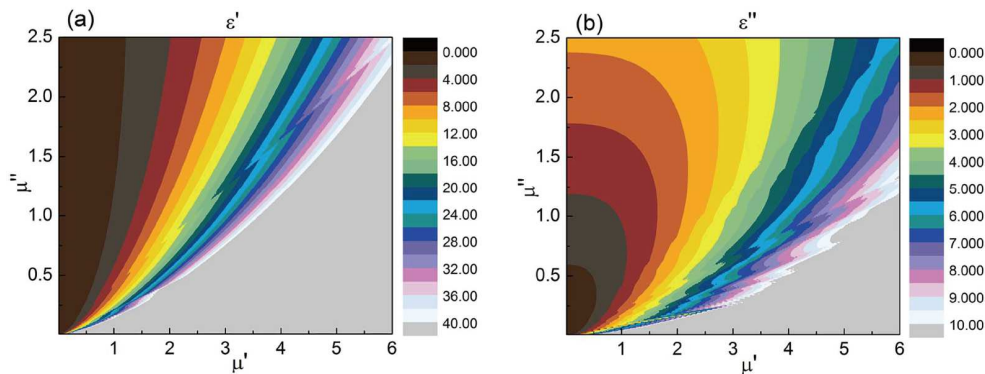


图 6 在完美匹配点处, 复介电常数的等值线图随复磁率的变化. (a) 介电常数的实部, (b) 介电常数的虚部^[31]

Figure 6 Contour map of complex permittivity varied with complex permeability at the perfect matching point. (a) Real part of permittivity, (b) imaginary part of permittivity [31].

收. 但是根据实际情况来看, 吸波材料的 $\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}$ 并不为1, 前界面存在反射, 仍能在吸收峰处实现强吸收, 甚至完美吸收, 这意味着微波吸收并不是因为电磁波完全进入吸波体后才通过电磁损耗实现吸收, 而是来源于内部电磁吸收和表面干涉的双重作用. 根据以上分析可知, 基于正确的匹配观点, 自然界的电磁材料体系只要改变体积浓度和厚度, 使前后界面电磁波能量在1/4波长处相等, 都能获得100%的吸波效果.

3.4 峰宽的物理机制

由于RL峰值来自前后两列波的抵消, 因此在峰值频率点处相位差为 π . 当频率偏离峰值频率点 Δf 时, 由于两反射波的相位差从 π 偏离到 $\pi-\Delta\theta$, 峰强减弱^[27,32]. 图7显示了RL峰的带宽示意图, E_p 为峰值频率点能量, E_d 为指定频率点能量.

由于 E_p 是相位差为 π 的前界面反射波 E_{R1} 和后界面反射波 E_{R2} 的差, 可以表示为

$$E_p = E_{R1}\cos^2 0 - E_{R2}\cos^2 \pi = E_{R1} - E_{R2}. \quad (9)$$

E_d 是 E_{R1} 和 E_{R2} 的相位差为 $\pi-\Delta\theta$ 时的矢量和, 可

写为

$$E_d = E_{R1}\cos^2 0 - E_{R2}\cos^2(\pi-\Delta\theta). \quad (10)$$

因此, E_p 和 E_d 的能量差为

$$E_d - E_p = E_{R2}(1 + \cos^2 \Delta\theta). \quad (11)$$

假设 $\Delta\theta$ 足够小, 其可以表示为

$$\cos \Delta\theta = 1 - \frac{(\Delta\theta)^2}{2!} \approx 1 - \frac{1}{2}(\Delta\theta)^2, \quad (12)$$

$$\Delta\theta = \left[2 \left(1 - \left(1 - \frac{E_d - E_p}{E_{R2}} \right) \right) \right]^{1/2}. \quad (13)$$

根据相位偏差来源于入射波频率的变化, $\Delta\theta$ 可表示为

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{t_m} \left[\left(\left| \frac{dt_m}{df} \right| \right) \Delta f \right]. \quad (14)$$

因此, 吸收带宽可表示为

$$\Delta = 2\Delta f = \left[2 \left(1 - \left(1 - \frac{E_d - E_p}{E_{R2}} \right) \right) \right]^{1/2} \cdot \frac{2t_m}{\pi} \left| \frac{dt_m}{df} \right|. \quad (15)$$

公式表明, 吸收峰的带宽受匹配厚度对频率的导数、匹配厚度、界面反射波能量、峰值频率的能量差以及特定频率的影响.

表1展示了材料在不同厚度下, RL为-10 dB时测量和计算得出的带宽参数. 可以看到, 不同厚度下通过理论计算得出的带宽与实验结果几乎完全一致, 这一结果证明了由1/4波长相消机制推导出的带宽公式是有效的. 从表中可以发现, 均匀单层的吸波体频率越低, 有效吸波带宽越小^[33]. 而吸收峰由于相消的产生机制决定了单层吸波体的带宽受到相位偏离的固有局限, 因此从材料微结构重构、介电损耗、磁损耗调控入手, 通过调控材料电磁参数进而大幅度提升吸波带宽是存在限制的, 可以改善吸波性能, 但难以实现超宽带的微波吸收.

4 吸波材料性能优劣评价标准及薄层吸波材料研究进展

4.1 吸波材料性能优劣评价标准

目前, 学界普遍认为, 较低的反射损耗值代表更优异的微波吸收性能, 因此RL值常被视为评估吸波材料

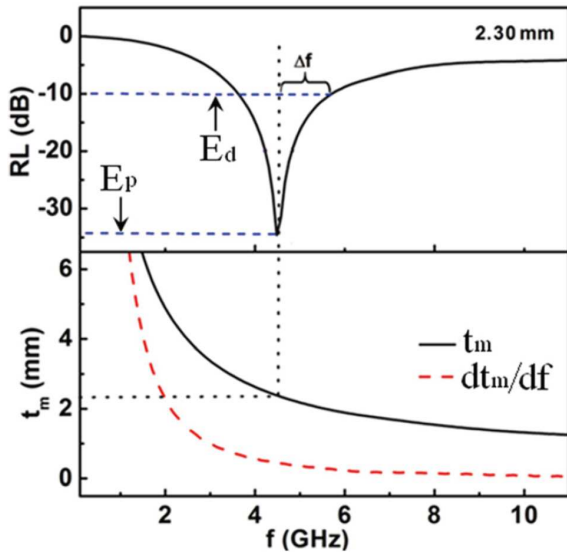


图7 1/4波长的对应频率和FSCI颗粒/石蜡复合材料的RL峰带宽示意图. dt_m/df 是匹配厚度对频率的导数; E_p 是峰值频率点的能量, E_d 是-10 dB时的能量; Δf 是-10 dB时的半带宽^[27]

Figure 7 Schematic diagram of the quarter-wavelength matching frequency and the bandwidth of RL peak for FSCI particle/paraffin composite. dt_m/df is the derivation of matching thickness to frequency; E_p is the energy at the peak frequency point, and E_d is the energy at -10 dB; Δf is the half bandwidth at -10 dB^[27].

表 1 在不同厚度下, FSCI 粉末/石蜡复合材料在 $E_d = -10$ dB 时测量和计算的带宽参数^[27]**Table 1** Parameters of the measured and calculated bandwidth at $E_d = -10$ dB for FSCI particle/paraffin composite under various thicknesses^[27]

t (mm)	f_m (GHz)	dt_m/df	$\Delta_{\text{Cal.}}$ (GHz)	$\Delta_{\text{Mea.}}$ (GHz)
1.50	7.08	0.17	2.62	2.93
2.30	4.58	0.43	1.87	1.96
3.01	3.23	0.86	1.21	1.25
3.90	2.51	1.42	0.86	0.81
6.40	1.53	3.92	0.13	0.09

性能的决定性指标. 然而, 这一观点存在明显局限, Rozanov 团队^[34]与 Chen 团队^[35]率先对 RL 值的评估合理性质疑. 2017 年, Rozanov 团队^[34]指出, 优良的电磁波吸收性能并非单纯取决于 RL 值的大小, 本质上取决于材料电磁参数的合理匹配关系. 换言之, 不能简单地认为 RL 为 -30 dB 优于 -20 dB. 2019 年, Chen 团队^[35]进一步指出, 通过精细调整最小 RL 点附近的频率与厚度参数, 虽可获得更低的 RL 值, 但这往往源于计算伪像, 而非材料的真实吸收特性. Rozanov 团队与 Chen 团队的见解既具有理论深度, 又体现出科学严谨性. 遗憾的是, 在过去几年间, 这些重要观点在文献中大多被忽视. 多数研究者至今仍缺乏系统、客观的标准来判断何为优良吸波材料, 从而导致“万物皆可吸波”的误区蔓延, 这不仅造成研究资源的浪费, 也阻碍了该领域核心难题——实现超薄材料在低频段高效吸收——的实质性突破. 因此, 建立科学、严谨且具有可比性的质量评价体系已刻不容缓.

针对这一问题, 我们课题组提出以完美匹配状态下的平方折射率 $(\mu_r \epsilon_r)_{\text{perfect}}$ 作为评估吸波性能的可靠质量指标. 通过对比分析发现, 在完美匹配频率处, 具有更大 $(\mu_r \epsilon_r)_{\text{perfect}}$ 值的材料往往展现出更优异的吸波性能. 具体而言, 在给定的匹配频率下, 较大的 $(\mu_r \epsilon_r)_{\text{perfect}}$ 值对应更小的吸收厚度因子 $(f_m \cdot t_m)_{\text{perfect}}$, 意味着吸波体可以实现更薄的设计; 而在固定厚度条件下, 较大的 $(\mu_r \epsilon_r)_{\text{perfect}}$ 值同样对应更低的工作频段. 这一规律为解决低频段高吸收与超薄化之间的长期矛盾提供了新的理论路径与设计思路.

此外, 纯介电材料用作吸波体时, 其吸收机制同样遵循界面反射模型. 具体而言, 形成吸收峰的相位匹配

条件为 $t_m = \frac{n\lambda}{4f_m \sqrt{|\mu_r(f)\epsilon_r(f)|}}$, 其中对于纯介电材料, 该

公式中的 $\mu_r = 1$ ^[36].

4.2 薄层吸波材料研究进展

根据吸波机理和吸波材料评价方法, 可以通过调整制备工艺^[37]、取向^[38,39]、包覆^[40]、掺杂、多层复合等方法调节材料电磁参数, 进而改善其吸波性能, 以达到薄层和强吸收的目的. 本文课题组在相关方面作了大量研究, 开发了新型的易面磁性吸波材料, 在薄层吸波材料, 特别是低频薄层吸波材料的研制上取得重要突破.

在微波频段范围内, 我们对表面经过改性的平面各向异性 $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ 和树脂复合材料进行了研究. 经过表面改性后, 涡流效应得到了有效抑制, 而磁导率几乎保持不变. 获得了较高的磁导率和适当的介电常数, 从而使得匹配厚度变薄, L 波段 ($1\text{--}2$ GHz) 的反射损耗降低^[41]. 在不同的氮化温度下, 制备了具有平面各向异性的 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{3-\delta}$ 颗粒, 随着氮化温度的升高, 复合材料的磁导率先增加后降低. 500°C 的氮化温度下, 最大磁导率为 3.34, 自然共振频率为 7.4 GHz, 带宽超过 10 GHz^[42]. 采用淬火和球磨技术制备了平面各向异性 Y_2Fe_{17} 粉末, 取向后的复合材料磁导率显著提高, 匹配厚度大幅减小. 未取向和取向的复合材料在厚度仅为 3.9 和 2.3 mm 时分别在 2.34 和 3.4 GHz 处实现强吸收^[43], 如图 8(a) 所示. 使用 SiO_2 包覆球磨后的片状 FeSi 粉末, 在保持其高磁导率的同时, 有效降低了其介电常数, 提高了其微波吸收性能, 在 0.1–4 GHz 内, 最佳吸收峰从 -8 dB 下降至 -34 dB^[44], 如图 8(b) 所示. 使用 ZnO 包覆羰基铁颗粒, 降低了材料介电常数, 显著增强了反射损耗^[45]. 通过共沉淀还原扩散工艺制备了稀土合金 $\text{Y}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ni}_x$, 随着镍掺杂量的增加, 静态磁性能和吸波性能发生了显著变化, Y_2Co_{17} 和 $\text{Y}_2\text{Co}_{16}\text{Ni}_1$ 的最大反射损耗峰值分别出现在 1.316 和 1.515 GHz^[46], 如图 8(c) 所示.

由于仅在吸收峰处产生较强的干涉相消从而实现良好的吸波性能, 单层吸波材料难以获得宽频吸收, 多层吸波材料由于微波在界面处的多重反射, 有利于更宽频的吸收^[47]. 为此, 本文提出了羰基铁复合材料/非晶合金薄片/羰基铁复合材料的夹层结构宽带吸收器, 测量结果表明, 在不同频率下同时出现了两个强的吸收峰, 这两个吸收峰的复合极大地拓宽了吸收带宽, 图 8(d) 所示^[48]. 同时, 我们对 TE 和 TM 模式电磁波斜入

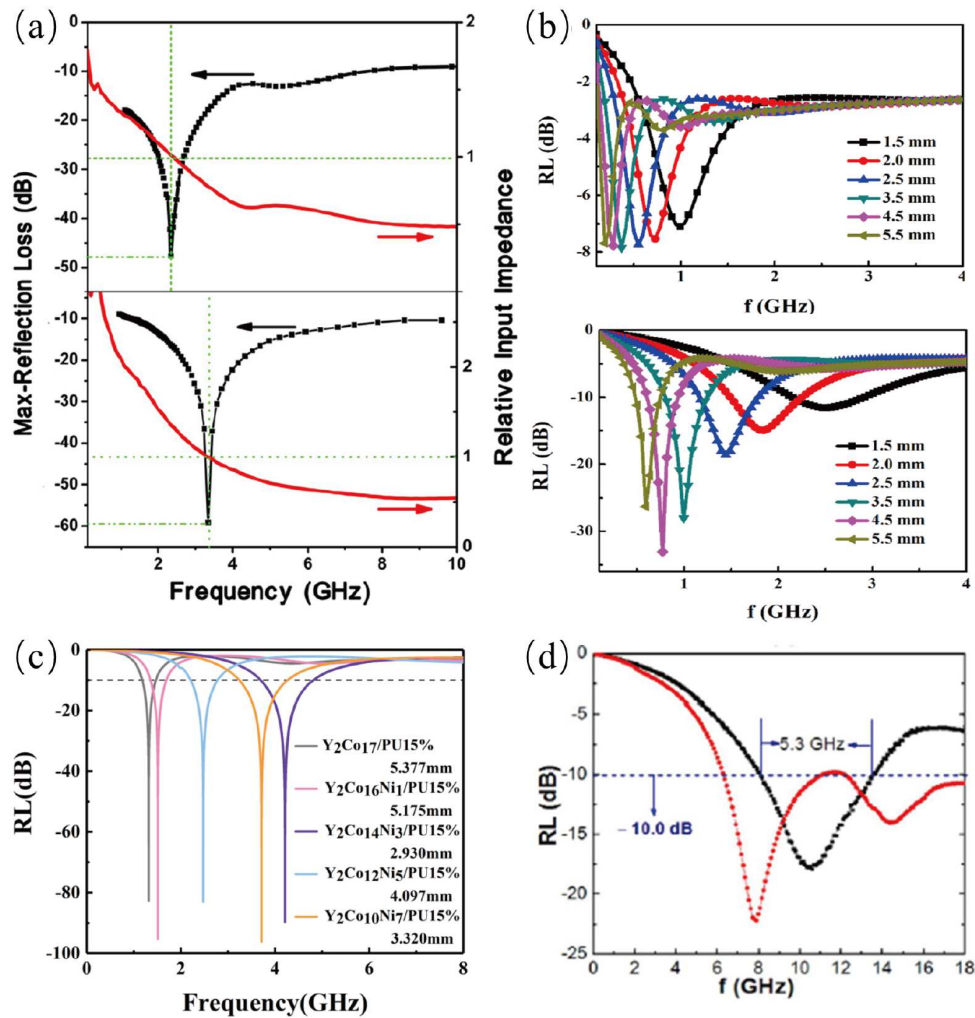


图 8 (a) 无取向(上)和取向(下) Y_2Fe_{17} 复合材料在给定频率下的最大RL和相对输入阻抗与频率关系^[43]. (b) 在不同厚度下, 具有25%体积分数在经过表面改性前(上)和改性后(下)的易面各向异性FeSi复合材料在不同频率下的RL与频率的关系^[44]. (c) 对于厚度满足零反射损耗条件的 $\text{Y}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ni}_x/\text{PU}$ 复合吸波体的频率与RL之间的关系^[46]. (d) 单层羰基铁复合材料与厚度同为2.1 mm的羰基铁/非晶合金/羰基铁夹层结构复合材料在吸波性能方面的对比^[48]

Figure 8 (a) The frequency dependence of maximum RL of a given frequency and relative input impedance for unoriented (upper) and oriented (lower) Y_2Fe_{17} composites, respectively [43]. (b) Frequency dependence of RL for the easy-plane anisotropy FeSi composites before (upper) and after (lower) surface modification with 25% volume fraction at various thicknesses [44]. (c) The relationship between frequency and RL for the thickness of the $\text{Y}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ni}_x/\text{PU}$ compound absorbers satisfying the zero reflection loss condition [46]. (d) The absorption performance comparison between the single-layer CI composite and sandwich structure of CI composite/thin amorphous alloy slice/CI composite with the same thickness of 2.1 mm [48].

射时的吸收性能也进行了一定的探究^[49,50], 结果表明, 斜入射反射损耗的变化主要取决于不同界面反射波随入射角度的变化.

5 超材料吸波机理和研究进展

随着微波吸收材料的不断发展, 传统吸波材料由于仅在吸收峰处产生较强的干涉相消从而实现良好的

吸波性能, 因此难以实现宽频吸收, 存在固有的局限性. 而超材料因其人工周期性结构可以获得多频点的响应以实现宽频吸收而受到关注, 同时通过调节结构设计可以获得良好吸波性能和实现多功能应用^[20].

界面反射模型揭示的干涉现象不仅仅存在于传统吸波材料中, 也同样适用于超材料^[51]. 以蜂窝结构为例^[52], 将蜂窝结构的超材料吸波体建立对称模型, 如图9(a)所示. 根据对称模型和界面反射理论提取散射

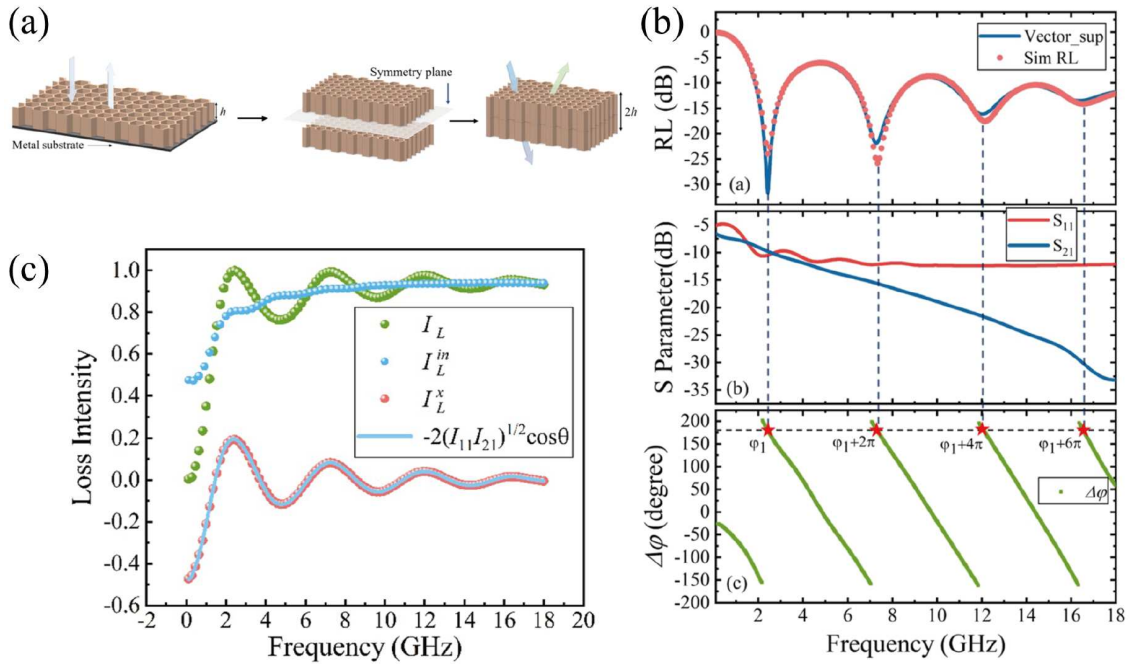


图 9 (a) 对称操作示意图. (b) 两个矢量波叠加的结果以及仿真的RL (上)、两个分离波的强度(中)、前后界面反射波的相位差(下). (c) 损耗的不同组成部分^[52]

Figure 9 (a) Schematic diagram of symmetry operation. (b) Consequence of the summation of two vector waves and the simulated RL (upper), intensities of the two separated waves (middle), and phase difference between the front and rear interfaces of reflected waves (lower). (c) Different components of the loss ^[52].

参数(S_{11} 和 S_{21}), 如图9(b)所示. 可以看到根据前后界面反射波叠加得到的结果和仿真的RL曲线基本一致, 吸收峰出现在两列波相位差为 π 的奇数倍时, 且随着两列波能量差的增加, 吸收峰逐渐减弱. 电磁波在材料内部的损耗能量为入射波能量和前后界面反射波的总能量之差 $I_L^{\text{in}} = I_0 - I_{11} - I_{21}$, 干涉损耗为前后界面的干涉项 $I_L^x = -2\sqrt{I_{11}I_{21}}\cos\theta$, 总损耗为 $I_L = I_L^{\text{in}} + I_L^x$. 对电磁波在入射吸波体后的总损耗进行分离, 如图9(c)所示, 可以看到内部的损耗曲线较为平滑无峰, 说明其并不是吸收峰产生的原因. 而干涉项随频率具有波动变化, 且峰位与吸收峰具有一定的对应关系.

从超材料吸波机理和功能应用出发, 提出了一种结合二极管和磁性材料的周期性结构吸收器^[53]. 通过改变电源电压, 可以改变吸收器的吸收性能. 实验表明, 当偏置电压从0 V变化到9 V时, 吸收器的吸收峰从4.3 GHz变化到8.8 GHz, 反射率在4–4.6和6–9.3 GHz的宽带内低于−10 dB, 如图10(a)所示. 基于频率选择表面(FSS)、磁性材料和PIN二极管, 提出了一种宽带

吸波超材料, 通过控制二极管的偏置状态, 该吸波材料能够在S波段主动切换反射和透射状态, 并在5.15–18 GHz宽带范围内实现超过85%的吸收, 如图10(b)所示^[54]. 基于具有FSS的磁性基板, 开发了一种宽带的超材料吸收器^[55]. 利用遗传算法从数据库中选择最合适的磁性基板. 通过在磁性基板上添加优化的FSS层, 所得到的超材料吸收器在厚度为3.1 mm的情况下, 在2.5–17.2 GHz范围内的反射损耗低于−10 dB, 如图10(c)所示. 同时, 也研究了蜂窝结构波吸收器, 如图10(d)所示^[52]. 根据遗传算法提出了一种自动化设计高效超表面的方法, 该超表面能够扩大基板的带宽, 如图10(e)所示^[56]. 该设计是通过利用编码超表面以及两种类型智能算法的组合来实现的. 首先, 受到编码超表面的启发, 通过随机生成相关的二进制代码来生成大量结构, 这些结构作为潜在的超表面单元模式发挥作用. 然后, 将二进制代码作为优化对象直接代入遗传算法中, 以找到最优的超表面. 最后, 引入神经网络来替代有限元分析方法, 将二进制代码与吸收带宽相关联. 借助神经网络的参与, 遗传算法能够在短时间内

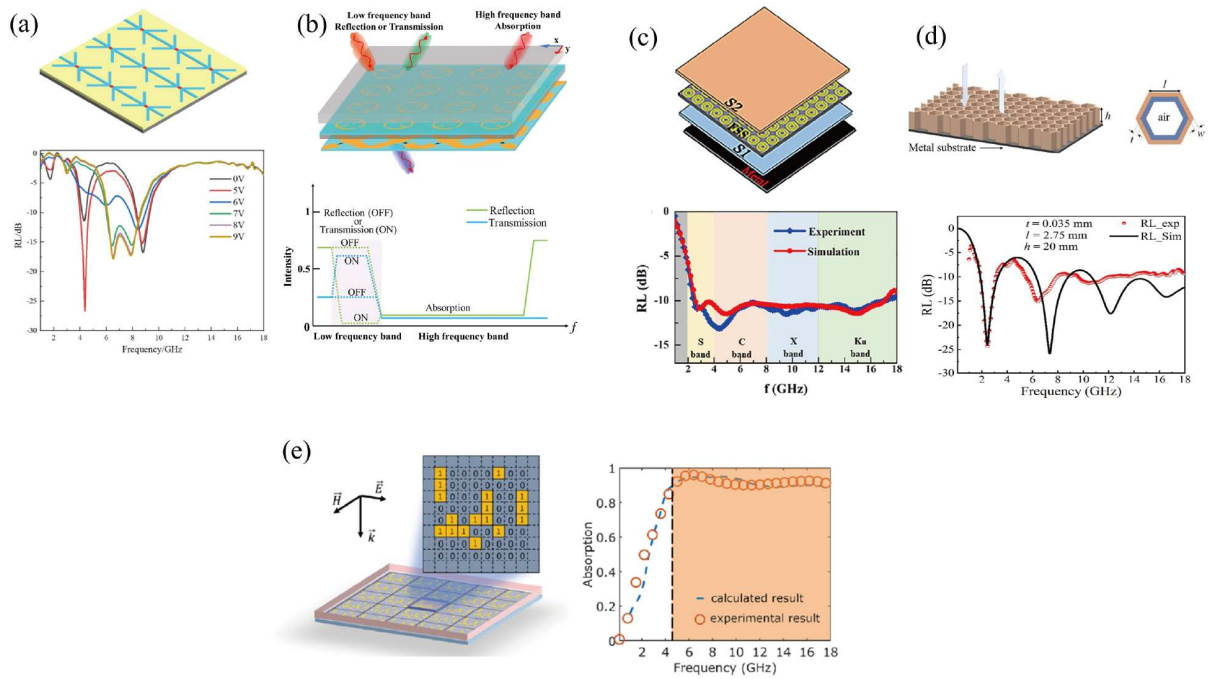


图 10 (a) 结合磁性材料和二极管的主动可调吸波体^[53]. (b) 具有可切换反射/透射带的宽频吸波体^[54]. (c) 基于磁性基底的超薄宽带超材料吸收器^[55]. (d) 具有金属基底的蜂窝结构吸波器^[52]. (e) 利用遗传算法实现超表面设计的自动化以扩展吸收带宽^[56]

Figure 10 (a) Actively tunable absorbers combined with magnetic material and diodes [53]. (b) Wideband absorber with switchable reflection/transmission band [54]. (c) Ultrathin broadband metamaterial absorber with a magnetic substrate [55]. (d) Honeycomb structured absorbers with a metal substrate [52]. (e) Genetic algorithms to automate the design of metasurfaces for absorption bandwidth broadening [56].

找到最优解.

6 结束语与展望

关于微波吸收机理, 我们将传输线理论与1/4波长模型结合, 提出了形成微波吸收峰的界面反射模型. 在这个模型中, 当垂直入射的电磁波到达吸波体表面时, 始终存在前界面的反射波和吸波材料与背衬金属界面的反射波. 当两束波的相位差为 180° 时, 即为相位匹配; 当两束波的幅度相等时, 即为强度匹配. 若同时满足相位匹配和强度匹配, 即达到完全匹配

(Perfect Matching, $z_{in}=1$), 其反射损耗RL值达到负无穷. 界面反射模型不仅能定量解释现有微波吸收材料的吸收峰的所有性质(峰值、频率、厚度、反射损耗RL、带宽等), 还能根据材料的电磁性质 $\mu_r(f)$ 和 $\epsilon_r(f)$ 对吸收峰的所有性质进行正确的预估和设计. 利用这个模型, 我们发现任何电磁材料都可以达到完全匹配($z_{in}=1$), 即 $RL = -\infty$ 的状态, 并用实验数据予以证实. 为了得到性能优异的低频、薄层吸波材料, 需使用完全匹配时平方折射率 $(\mu_r \epsilon_r)_{\text{perfect}}$ 大的材料. 平面取向度高的二维磁织构材料有利于获得性能优异的低频薄层吸波体.

参考文献

- Wu F, Hu P, Hu F, et al. Multifunctional MXene/C aerogels for enhanced microwave absorption and thermal insulation. *Nano-Micro Lett*, 2023, 15: 194
- Zhang Y, Gao S, Zhang X, et al. Structural and microwave absorption properties of CoFe₂O₄/residual carbon composites. *Int J Miner Metall Mater*, 2024, 32: 221–232
- Lv H, Yang Z, Pan H, et al. Electromagnetic absorption materials: Current progress and new frontiers. *Prog Mater Sci*, 2022, 127: 100946

- 4 Wu N, Shen Z, Ma Y, et al. Three-dimensional lightweight melamine foams modified by MXene sheets and CoNi alloys towards multifunctional microwave absorption. *Nano Res*, 2025, 18: 94907121
- 5 Elmahaishi M F, Azis R S, Ismail I, et al. A review on electromagnetic microwave absorption properties: Their materials and performance. *J Mater Res Tech*, 2022, 20: 2188–2220
- 6 Zhang T, Duan Y, Liu J, et al. Polarization insensitive hierarchical metamaterial for broadband microwave absorption with multi-scale optimization and integrated design. *Compos Sci Tech*, 2022, 228: 109643
- 7 Qamar T H, Ma L, Hassan S, et al. Facile synthesis of eco-friendly mango peel-derived porous carbon for optimizing microwave absorption. *Phys Scr*, 2024, 99: 065048
- 8 He Z, Sun R, Xu H, et al. Metal-organic-frameworks derived hollow carbon derivatives: Controllable configurations and optimized microwave absorption. *Carbon*, 2024, 219: 118853
- 9 Kumari S, Dalal J, Kumar A, et al. Enhanced microwave absorption properties of conducting polymer@graphene composite to counteract electromagnetic radiation pollution: Green EMI shielding. *RSC Adv*, 2024, 14: 662–676
- 10 Li T, Li J, Xu Z, et al. Electromagnetic response of multistage-helical nano-micro conducting polymer structures and their enhanced attenuation mechanism of multiscale-chiral synergistic effect. *Small*, 2023, 19: 2300233
- 11 Peng J, Wang D W, Cheng Z Y, et al. Improving microwave absorption performance of carbonyl iron powder by regulating geometric dimensions and electromagnetic-dielectric synergism. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2025, 190: 108719
- 12 Singh S, Singh S K, Harijan P K, et al. Investigation on the effect of Fe impurity pickups during ball milling and Ni dispersion on the microwave absorption performance of ball milled Fe impurities-Ni/SiC composites. *J Mater Sci-Mater Electron*, 2022, 33: 17828–17841
- 13 Feng L, Zhao D, Yu J, et al. Two-dimensional transition metal dichalcogenides based composites for microwave absorption applications: A review. *J Phys Energy*, 2022, 5: 012001
- 14 Hassan S, Yang Y, Qamar T H, et al. Core-shell designed high entropy alloy CoNiFeCuV-C nanoparticles for enhanced microwave absorption. *Appl Phys Lett*, 2024, 124: 121902
- 15 Gang S, Qian Y, Xiong T, et al. High electromagnetic wave absorption performance from all-scale hierarchically defective Ni-Mn-Co-Cu-Al high entropy alloys@carbon. *Chem Eng J*, 2024, 499: 156254
- 16 Chen X, Lan D, Zhou L, et al. Review of recent advances in ferrite-based materials: From synthesis techniques to electromagnetic wave absorption performance. *Int J Miner Metall Mater*, 2025, 32: 591–608
- 17 Miao Y, Zhang M, Liu Q, et al. Egg derived porous carbon decorated with Fe₃O₄ nanorods for high efficiency electromagnetic wave absorption. *Carbon*, 2025, 235: 120076
- 18 Sharma S, Parne S R, Panda S S S, et al. Progress in microwave absorbing materials: A critical review. *Adv Colloid Interface Sci*, 2024, 327: 103143
- 19 Feng W, Liu Y, Bi Y, et al. Recent advancement of magnetic MOF composites in microwave absorption. *Synth Met*, 2023, 294: 117307
- 20 Wang B, Xu C, Duan G, et al. Review of broadband metamaterial absorbers: From principles, design strategies, and tunable properties to functional applications. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2213818
- 21 Jeong H, Le D H, Lim D, et al. Reconfigurable metasurfaces for frequency selective absorption. *Adv Opt Mater*, 2020, 8: 1902182
- 22 Wu Y, Tan S, Zhao Y, et al. Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application. *Prog Mater Sci*, 2023, 135: 101088
- 23 Zheng Z, Ma Y, Wang H, et al. Preparation of Ce₂Fe₁₇N_{3-δ}@FePO₄ composite with excellent microwave absorption performance by reduction-diffusion (R/D) and phosphating processes. *J Rare Earths*, 2023, 41: 1754–1762
- 24 Li W, Zhang J, He D, et al. Microwave absorption properties of amorphous Fe-B particle composites in K band. *J Phys D-Appl Phys*, 2021, 54: 305002
- 25 Inui T, Konishi K, Oda K. Fabrications of broad-band RF-absorber composed of planar hexagonal ferrites. *IEEE Trans Magn*, 1999, 35: 3148–3150
- 26 Li Z W, Lin G Q, Kong L B. Microwave reflection characteristics of Co₂Z barium ferrite composites with various volume concentration. *IEEE Trans Magn*, 2008, 44: 2255–2261
- 27 Wang T, Han R, Tan G, et al. Reflection loss mechanism of single layer absorber for flake-shaped carbonyl-iron particle composite. *J Appl Phys*, 2012, 112: 104903

- 28 Zhang J, Wang P, Wang G, et al. Investigation on the absorption performance by separated electromagnetic waves reflected from different interfaces of absorber. *J Magn Magn Mater*, 2020, 498: 166096
- 29 Wang P, Zhang J, Chen Y, et al. Magnetism and microwave absorption properties of Fe_3O_4 microflake-paraffin composites without and with magnetic orientation. *J Elec Mater*, 2017, 47: 721–729
- 30 Zhang S, Wang T, Gao M, et al. Strict proof and applicable range of the quarter-wavelength model for microwave absorbers. *J Phys D-Appl Phys*, 2020, 53: 265004
- 31 Wang T, Wang H, Tan G, et al. The relationship of permeability and permittivity at the perfect matching point of electromagnetic wave absorption for the absorber filled by metallic magnetic particles. *IEEE Trans Magn*, 2015, 51: 1–5
- 32 Qiao L, Wang T, Mei Z L, et al. Analyzing bandwidth on the microwave absorber by the interface reflection model. *Chin Phys Lett*, 2016, 33: 027502
- 33 Wang H, Qiao L, Zheng Z Y, et al. Microwave absorption properties regulation and bandwidth formula of oriented $\text{Y}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{3-\delta}/\text{SiO}_2/\text{PU}$ composite synthesized by reduction-diffusion method. *Chin Phys B*, 2022, 31: 114206
- 34 Rozanov K N, Koledintseva M Y. Matching conditions for a homogeneous absorbing layer. *Procedia Eng*, 2017, 216: 79–84
- 35 Green M, Chen X. Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. *J Materiom*, 2019, 5: 503–541
- 36 Yang S, Wu P, Sheng Y, et al. On the quality criteria for microwave absorbing materials. *Adv Elect Mater*, 2025, 11: e00239
- 37 Qiao L, Han R, Wang T, et al. Greatly enhanced microwave absorbing properties of planar anisotropy carbonyl-iron particle composites. *J Magn Magn Mater*, 2015, 375: 100–105
- 38 Zhang Y, Wang P, Wang Y, et al. Synthesis and excellent electromagnetic wave absorption properties of parallel aligned FeCo/C core-shell nanoflake composites. *J Mater Chem C*, 2015, 3: 10813–10818
- 39 Han R, Han X, Qiao L, et al. Superior electromagnetic properties of oriented silica-coated planar anisotropy carbonyl-iron particles in quasimicrowave band. *Phys B-Condens Matter*, 2011, 406: 1932–1935
- 40 Han R, Gong L, Wang T, et al. Complex permeability and microwave absorbing properties of planar anisotropy carbonyl-iron/ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ composite in quasimicrowave band. *Mater Chem Phys*, 2012, 131: 555–560
- 41 Wei J, Zhang Z, Wang B, et al. Microwave reflection characteristics of surface-modified $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ fine particle composites. *J Appl Phys*, 2010, 108: 123908
- 42 Zuo W, Ying L, Qiao L, et al. High frequency magnetic properties of $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{3-\delta}$ particles with planar anisotropy. *Phys B-Condens Matter*, 2010, 405: 4397–4400
- 43 Chi X, Yi H, Zuo W, et al. Complex permeability and microwave absorption properties of Y_2Fe_{17} micropowders with planar anisotropy. *J Phys D-Appl Phys*, 2011, 44: 295001
- 44 Duan B, Zhang J, Wang G, et al. Microwave absorption properties of easy-plane anisotropy Fe-Si powders with surface modification in the frequency range of 0.1–4 GHz. *J Mater Sci-Mater Electron*, 2019, 30: 13810–13819
- 45 Han R, Han X, Qiao L, et al. Enhanced microwave absorption of ZnO-coated planar anisotropy carbonyl-iron particles in quasimicrowave frequency band. *Mater Chem Phys*, 2011, 128: 317–322
- 46 Sheng Y F, Tu C F, Wu P, et al. Effect of Ni substitution on magnetic properties and microwave absorption of the Y_2Co_{17} compounds and composites. *J Appl Phys*, 2023, 134: 173901
- 47 Wang T, Qiao L, Han R, et al. The origin of reflection loss peaks in the double-layer electromagnetic wave absorber. *J Magn Magn Mater*, 2012, 324: 3209–3212
- 48 Wang T, Wang P, Wang Y, et al. A broadband far-field microwave absorber with a sandwich structure. *Mater Des*, 2016, 95: 486–489
- 49 Zhang J, Liu C, Wang T, et al. Investigating the absorption performance of a monolayer-coated absorber at oblique incidence. *J Phys D-Appl Phys*, 2021, 55: 065001
- 50 Wang P, Zhang J, Wang G, et al. Synthesis and characterization of $\text{MoS}_2/\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanocomposites exhibiting enhanced microwave absorption performance at normal and oblique incidences. *J Mater Sci Tech*, 2019, 35: 1931–1939
- 51 Xiao D, Zhu M, Wang Q, et al. A flexible and ultra-broadband terahertz wave absorber based on graphene-vertically aligned carbon nanotube hybrids. *J Mater Chem C*, 2020, 8: 7244–7252
- 52 Leng S Y, Wu B, Mu L, et al. Electromagnetic loss study of honeycomb structured absorbers with a metal substrate. *AIP Adv*, 2023, 13: 105226
- 53 Lin W, Leng S, Zhang J, et al. Design and analysis of actively tunable absorbers combined with diodes and magnetic material. *J Phys D-Appl*

- [Phys](#), 2023, 56: 365303
- 54 Li R, Xiong L, He D, et al. Thin ultra-wideband metamaterial absorber with switchable reflection/transmission band and polarization insensitivity. [Opt Express](#), 2025, 33: 27903
- 55 Duan B, Zhang J, Wang P, et al. Design and preparation of an ultrathin broadband metamaterial absorber with a magnetic substrate based on genetic algorithm. [J Magn Magn Mater](#), 2020, 501: 166439
- 56 Zhang J, Wang G, Wang T, et al. Genetic algorithms to automate the design of metasurfaces for absorption bandwidth broadening. [ACS Appl Mater Interfaces](#), 2021, 13: 7792–7800

Research progress on wave-absorbing mechanism of electromagnetic materials and low-frequency thin-layer wave-absorbing materials

WANG Tao^{*}, LI RuiLong, YANG ShengYu, QIAO Liang & LI FaShen

Key Laboratory of Magnetism and Magnetic Functional Materials, Ministry of Education, School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Corresponding author (email: wtao@lzu.edu.cn)*

With the rapid development of microwave emission and detection technologies and the high integration of high-frequency electronic devices, efficient wave-absorbing materials can not only effectively weak microwave reflection signals to prevent the target from being detected, but also inhibit electromagnetic interference between high-frequency devices for electromagnetic compatibility. In recent years, domestic and foreign researchers have done a lot of research work on different material systems and microstructure reconfiguration for the development of thin-layered and efficient wave-absorbing materials. Due to the lack of in-depth understanding of the wave-absorbing mechanism of the absorbers, the research on thin-layer wave-absorbing materials has not made significant progress. Starting from exploring and clarifying the source of absorption peaks, our team reveals the physical mechanism of absorption peak generation by designing experiments combined with theoretical calculations, and further reveals the physical images of intensity change, impedance matching, and bandwidth of absorption peaks. Based on the wave-absorbing mechanism, our team has proposed the evaluation standard for the performance of wave-absorbing materials, and developed a new type of easy-plane magnetic wave-absorbing material. Important breakthroughs have been made in the development of thin-layer, especially low-frequency thin-layer wave-absorbing materials. For metamaterial wave absorbers, which have recently attracted attention in academia, the absorption mechanism proposed by our team is also fully applicable in explaining the generation of absorption peaks and expanding the absorption frequency band, providing effective guidance for the development of structural types of wave absorbers with better performance.

absorbing mechanism, wave-absorbing material, metamaterial

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.67.Pt

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0521](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0521)