



# 介电型双层吸波材料的数值计算及 X 与 Ku 波段的宽频吸波性能优化

郝邵强, 王慧雅, 朱曜峰

(浙江理工大学材料科学与工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为克服单层吸波材料的厚度依赖性, 设计并制备梯度阻抗型双层吸波材料, 以实现 X 和 Ku 波段的宽频吸波性能。首先采用数值计算方法计算双层吸波材料损耗层的理论介电参数, 并分析阻抗层厚度( $d_1$ )、损耗层厚度( $d_2$ )和阻抗层复介电常数实部( $\epsilon_{11}$ )对损耗层理论介电参数的调控作用; 然后在优化的结构参数指导下, 以水性聚氨酯(WPU)作为阻抗层, 以 MXene@碳化硅(SiC)/WPU 复合材料作为损耗层, 制备梯度阻抗型双层吸波材料; 最后使用矢量网络分析仪对其电磁参数和吸波性能进行测试与分析。结果表明: 增加阻抗层厚度有利于提升低频段的吸波性能; 介电型双层吸波材料的理想结构参数是  $d_1$  为 2.0 mm 和 3.0 mm,  $d_2$  为 2.0 mm,  $\epsilon_{11}$  值为 3.0, 在此参数下材料更容易实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收。当吸波剂质量分数为 20% 时, MXene@SiC/WPU 单层吸波材料的最大有效吸收带宽仅为 4.3 GHz, 最小反射损耗为 -13 dB; 双层吸波材料则在 X 和 Ku 波段实现全频有效吸收, 且最小反射损耗为 -25 dB, 样品厚度为 4.0 mm; 梯度阻抗双层结构设计能够显著拓展吸波材料的有效吸收带宽, 并提高吸收强度。该研究可为双层吸波材料的结构优化及带宽拓展提供参考。

**关键词:** 双层吸波材料; 介电型吸波材料; 介电参数; 数值计算; 宽频吸波性能

**中图分类号:** TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2025) 05-0295-10

**引文格式:** 郝邵强, 王慧雅, 朱曜峰. 介电型双层吸波材料的数值计算及 X 与 Ku 波段的宽频吸波性能优化[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(3): 295-304.

**Reference Format:** HAO Shaoqiang, WANG Huiya, ZHU Yaofeng. Numerical calculation and broadband absorption performance optimization of dielectric double-layer absorbing materials in X and Ku bands[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(3): 295-304.

## Numerical calculation and broadband absorption performance optimization of dielectric double-layer absorbing materials in X and Ku bands

HAO Shaoqiang, WANG Huiya, ZHU Yaofeng

(School of Materials Science & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To overcome the thickness dependence of single-layer absorbing materials, a gradient impedance double-layer absorbing material was designed and prepared to achieve broadband absorbing performance in the X and Ku bands. Firstly, numerical calculations were used to calculate the theoretical dielectric parameters of the loss layer of the double-layer absorbing material, and the effects of impedance layer thickness ( $d_1$ ), loss layer thickness ( $d_2$ ), and impedance layer complex dielectric constant real part ( $\epsilon_{11}$ ) on the theoretical dielectric parameters of the loss layer were analyzed. Then, under the guidance of optimized structural parameters, a gradient impedance double-layer absorbing material was prepared by using waterborne WPU as the impedance layer and MXene@SiC/WPU composite material as the loss

收稿日期: 2024-03-26 网络出版日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52373272)

作者简介: 郝邵强(1996—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事吸波材料方面的研究。

通信作者: 朱曜峰, E-mail: yfzhu@zstu.edu.cn

layer. Finally, its electromagnetic parameters and absorbing performance were tested and analyzed by using a vector network analyzer. The results showed that increasing the thickness of the impedance layer was beneficial to improving the absorbing performance at low frequencies. The ideal structural parameters for dielectric double-layer absorbing materials were 2.0 mm and 3.0 mm for  $d_1$ , 2.0 mm for  $d_2$ , and 3.0 for  $\epsilon_{11}$ . Under these parameters, the material was more likely to achieve full-frequency effective absorption in the X and Ku bands. When the mass fraction of the absorbing agent was 20%, the maximum effective absorption bandwidth of the MXene@SiC/WPU single-layer absorbing material was only 4.3 GHz, with a minimum reflection loss of -13 dB. The double-layer absorbing material achieved full-frequency effective absorption in both the X and Ku bands, with a minimum reflection loss of -25 dB and a sample thickness of 4.0 mm. The gradient impedance double-layer structure design could significantly expand the effective absorption bandwidth of absorbing materials and improve absorption strength. This study can provide reference for structural optimization and bandwidth expansion of double-layer absorbing materials.

**Key words:** double-layered absorbing materials; dielectric absorbing materials; dielectric parameters; numerical calculation; broadband absorbing performance

0 引 言

近年来,无线通信技术和电子设备的广泛使用导致电磁干扰和电磁辐射日益加剧,这不仅会影响人类的身体健康,还会干扰电子设备的正常运行<sup>[1-2]</sup>。吸波材料可将入射电磁波转化为热能或其他形式的能量消散掉,从根本上消除电磁污染,进而保护人类的身体健康以及电子设备的运行<sup>[3-4]</sup>。因此,开发高性能吸波材料成为当前的研究热点。

理想的吸波材料应具备厚度薄、重量轻、有效吸收带宽大和吸波能力强的特点<sup>[5-6]</sup>。然而,单层吸波材料存在电磁参数可调范围小、有效吸收频宽较窄的难题,难以满足多频谱智能通信及探测技术的发展需求<sup>[7-8]</sup>。单层吸波材料难以实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收性能,而基于梯度阻抗结构设计的多层吸波材料被证明可以有效地平衡材料的阻抗匹配和衰减能力,是实现宽频吸波性能的有效手段<sup>[9-10]</sup>。在梯度阻抗结构中,最外层的阻抗层一般为低介电常数的透波材料以提供与空气之间的良好阻抗匹配,内层材料的介电常数依次升高,从而实现阻抗渐变并增强电磁波损耗能力<sup>[11-12]</sup>。Zuo 等<sup>[13]</sup>采用 3D 打印制备了石墨烯基双层吸波材料,发现单层吸波材料在厚度为 2.1 mm 时取得最大有效吸收带宽为 3.4 GHz;而以低介电、低损耗特性材料为阻抗层,以高介电、强衰减性能材料作为损耗层,制备的双层吸波材料在总厚度为 4.0 mm 时获得的最大有效吸收带宽为 4.8 GHz,表明梯度阻抗结构设计有利于材料有效吸收带宽的拓展。双层吸波材料出色的吸波性能主要归功于:阻抗层优化了材料阻抗匹配,以及电磁波在材料内部的多次反射和多重

吸波损耗之间的协同作用,从而确保材料能够有效吸收并减少电磁波的反射,进而增强材料的吸波性能。

吸波材料的多层结构设计不仅要遵循阻抗匹配原则,还要考虑各层的反射叠加效果。简单依靠实验手段来优化材料的吸波性能,存在工作量大、研制周期长、盲目性大等局限;另外,各层参数影响材料整体吸波性能的机理尚不清楚,导致难以有效地指导多层吸波材料的设计以获得最佳的吸波性能。因此,有必要借助计算机辅助指导多层吸波材料的设计与开发,优化多层结构参数及材料电磁参数的设计,从而提高研究效率,减少大量的摸索实验<sup>[14]</sup>。

本文借助计算机辅助计算双层吸波材料实现有效吸收时损耗层的理论介电参数,并探讨双层吸波材料的阻抗层厚度( $d_1$ )、损耗层厚度( $d_2$ )和阻抗层复介电常数实部( $\epsilon_{11}$ )对损耗层理论介电参数的影响,进而优化梯度阻抗双层吸波材料的结构设计;选取水性聚氨酯(WPU)为阻抗层,质量分数为 20%的 MXene@碳化硅/水性聚氨酯(记为 MS-20)复合材料为损耗层,制备梯度阻抗型双层吸波材料 WPU/MS-20,以期望实现 X 与 Ku 波段的宽频吸波性能。本文可为宽频双层吸波材料的设计与制备提供一定的参考。

1 实验部分

1.1 双层吸波材料的结构模型

双层吸波材料的结构示意图如图 1 所示,其结构自上而下分别为阻抗层、损耗层和金属背板<sup>[15]</sup>。材料的电磁性能可通过式(1)—(5)所示参数进行计算与分析:

$$\epsilon_{r1} = \epsilon_{11} - j\epsilon_{12} \quad (1)$$

$$\mu_{r1} = \mu_{11} - j\mu_{12} \quad (2)$$

$$\epsilon_{r2} = \epsilon_{21} - j\epsilon_{22} \quad (3)$$

$$\mu_{r2} = \mu_{21} - j\mu_{22} \quad (4)$$

$$\tan\delta_\epsilon = \epsilon_{22}/\epsilon_{21} \quad (5)$$

其中:  $\epsilon_{r1}$ 、 $\mu_{r1}$ 、 $d_1$  与  $\epsilon_{r2}$ 、 $\mu_{r2}$ 、 $d_2$  分别表示阻抗层和损耗层的复介电常数、复磁导率和厚度;  $\epsilon_{11}$ 、 $\epsilon_{12}$  表示阻抗层复介电常数的实部与虚部,  $\mu_{11}$ 、 $\mu_{12}$  表示阻抗层复磁导率的实部与虚部;  $\epsilon_{21}$ 、 $\epsilon_{22}$  表示损耗层复介电常数的实部与虚部,  $\mu_{21}$ 、 $\mu_{22}$  表示损耗层复磁导率的实部与虚部。复介电常数实部和虚部分别表示材料的介电储存和耗散能力, 复磁导率实部和虚部分别表示材料的磁储存和耗散能力。  $\tan\delta_\epsilon$  是介电损耗角正切值, 表示材料对电磁波的损耗能力。

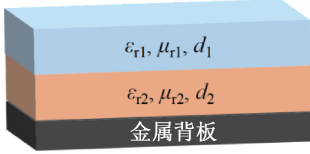


图 1 双层吸波材料结构示意图

## 1.2 双层吸波材料参数的数值计算方法

根据传输线理论可知, 双层吸波材料的输入阻抗和反射损耗值可通过下列公式<sup>[15]</sup>计算:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\epsilon_{r1}}} \frac{Z_2 + \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\epsilon_{r1}}} \tanh \left[ j \frac{2\pi f d_1}{c} \sqrt{\mu_{r1} \epsilon_{r1}} \right]}{\sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\epsilon_{r1}}} + Z_2 \tanh \left[ j \frac{2\pi f d_1}{c} \sqrt{\mu_{r1} \epsilon_{r1}} \right]} \quad (6)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}} \tanh \left[ j \frac{2\pi f d_2}{c} \sqrt{\mu_{r2} \epsilon_{r2}} \right] \quad (7)$$

$$R_L = \lg \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right| \quad (8)$$

其中:  $Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$  为自由空间的特征阻抗;  $Z_1$  为吸波材料整体的输入阻抗;  $Z_2$  为损耗层表面的输入阻抗;  $f$  为频率, Hz;  $c$  为真空光速 ( $c = 3.0 \times 10^8$  m/s);  $R_L$  是吸波材料的反射损耗值,  $R_L < -10$  dB 即表示超过 90% 的电磁波被吸收<sup>[16]</sup>。

以介电型吸波材料为试验对象, 故  $\mu_{11}$  和  $\mu_{21}$  设为 1.0 (定值),  $\mu_{12}$  和  $\mu_{22}$  设为 0.0 (定值);  $\epsilon_{11}$  设为 2.0~4.0,  $\epsilon_{12}$  设为 0.0 (定值); 以吸波材料在 X 和 Ku 波段实现  $R_L$  值小于 -10.0 dB (定值) 为目标。根据式(6)~(8), 借助 MATLAB 计算体系损耗层的理论介电参数 (即  $\epsilon_{21}$  和  $\epsilon_{22}$ )。理论数值计算时,  $d_1$  与  $d_2$  取值范围均为 1.0、2.0、3.0、4.0 mm,

且总厚度  $\leq 5.0$  mm;  $f$  分别取 8.2、10.0、12.4、14.0、16.0 GHz 和 18.0 GHz。设置  $\epsilon_{11}$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  值, 分别计算不同频点下损耗层的理论介电参数; 待所有频点的理论介电参数计算完成后, 再更新  $\epsilon_{11}$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  值, 重复以上计算过程。

## 1.3 实验原料

$\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  (400 目) 购于山东烯研新材料科技有限公司, 氟化锂 (分析纯) 购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 常规碳化硅纳米线 (100~600 nm) 购于南京先丰纳米材料科技有限公司, 二烯丙基二甲基氯化铵 (PDDA) 购于国药集团化学试剂有限公司, 水性聚氨酯 (WPU) 购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

## 1.4 MS-Y 及 WPU/MS-20 复合吸波材料的制备及电磁参数测试

少层  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 纳米片的制备: 根据 Zhang 等<sup>[17]</sup>的研究方法制备少层  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米片。

MS-Y 复合材料的制备: 将 SiC 纳米线加入 PDDA 水溶液中, 进行超声处理得到改性的 SiC 纳米线 (SiC-PDDA); 随后, 将少层  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  加入 SiC-PDDA 溶液中, 经冷冻干燥处理得到 MXene@SiC (MS) 粉末; 最后, 将 MS 以不同质量分数 (5.0%~20.0%) 加入 WPU 乳液中, 经搅拌、干燥后即可得到 MS-Y 复合材料, 其中 Y 表示 MS 的质量分数。制备流程如图 2 所示。

WPU/MS-20 双层吸波材料的制备: 选取 WPU 为阻抗层、MS-20 复合材料为损耗层制备双层吸波材料。制备 WPU/MS-20 双层吸波材料时, 首先将 MS-20 溶液加入模具中并进行干燥以制备损耗层; 待 MS-20 初步凝固后, 加入 WPU 乳液作为阻抗层, 样品完全干燥后即可得到 WPU/MS-20 双层吸波材料。由于损耗层和阻抗层基体均为 WPU, 因此二者相容性较高, 其交界面处的粘接强度可以得到保证。

电磁参数测试: 采用 N5222A 矢量网络分析仪 (是德科技 (Keysight)) 测试 WPU 和 MS-Y 复合材料的电磁参数, 测试模式为波导法, 测试频率范围为 X 波段 (8.2~12.4 GHz) 和 Ku 波段 (12.4~18.0 GHz), 试样测试尺寸分别为 23.0 mm × 10.0 mm 和 16.0 mm × 8.0 mm。进行测试时, 首先将样品裁切为所需尺寸, 借助矢量网络分析仪即可得到样品的电磁参数; 随后, 将测试得到的电磁参数代入式 (6)~(8) 中进行计算, 即可得到 WPU/MS-20 双层吸波材料在不同厚度下的反射损耗值。

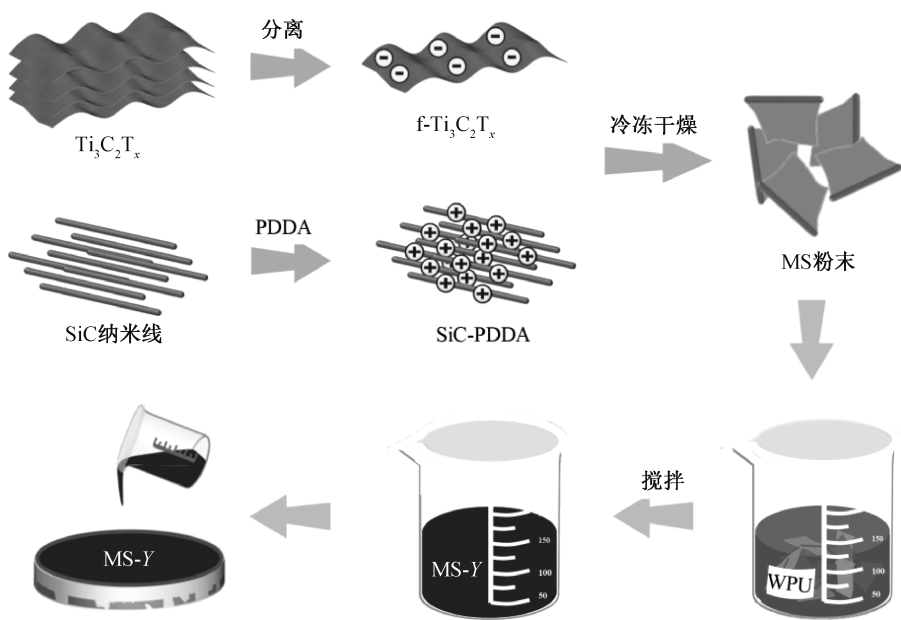


图 2 MS-Y 复合吸波材料的制备流程示意图

2 结果与讨论

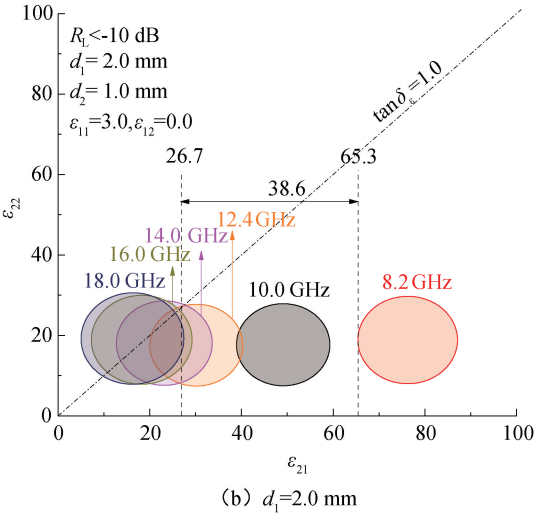
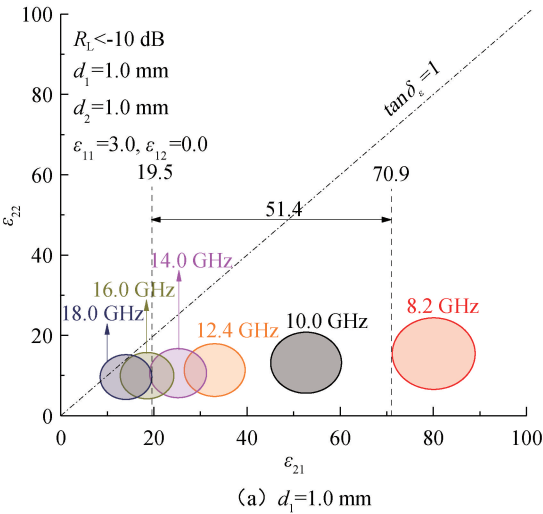
2.1 双层吸波材料的理论数值计算结果分析与性能预测

双层吸波材料与电磁波的相互作用机制较为复杂,并不仅仅受到材料本征电磁参数的影响,各层厚度以及排列方式亦会影响其吸波性能<sup>[18]</sup>。根据式(6)—(8)可知, $d_1$ 、 $d_2$ 、 $\epsilon_{11}$  值的改变均会影响损耗层理论介电参数的取值范围,故本文首先通过理论计算分析  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $\epsilon_{11}$  与损耗层理论介电参数之间的关联性,从而指导与优化双层吸波材料的结构设计。

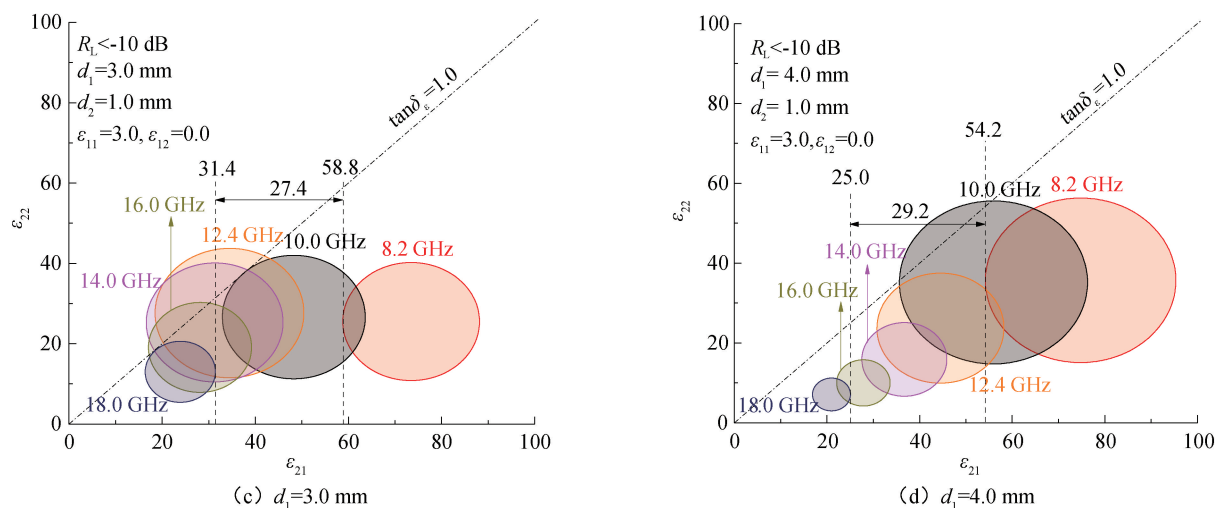
2.1.1 阻抗层厚度( $d_1$ )对损耗层理论介电参数的影响

固定  $d_2$  值与  $\epsilon_{11}$  值分别为 1.0 mm 和 3.0,探讨  $d_1$  值对损耗层理论介电参数的影响,其结果如

图 3 所示。从图 3 可以看出:相同厚度下,各频点的损耗层理论介电参数范围均呈椭圆状,且椭圆面积与取值均随频率的增大而减小;这一现象可以通过传输线理论与四分之一波长原理来解释<sup>[19]</sup>;双层吸波材料实现 X 与 Ku 波段全频有效吸收时,损耗层所需频散效应随  $d_1$  值增大而减小,其椭圆间隔由 51.4 减小为 29.2;但椭圆面积在高频(18.0 GHz)和中频处(14.0 GHz)呈现先增大后减小趋势,而在低频处(8.2 GHz)呈现逐渐增大趋势,表明增大  $d_1$  值有利于提升低频段的吸波性能,但厚度过大则不利于宽频吸收<sup>[20]</sup>。基于此,推测  $d_1$  值为 1.0 mm 或 4.0 mm 时,双层吸波材料由于频散效应的限制难以实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收。因此,将  $d_1$  值优化为 2.0 mm 或 3.0 mm,并进一步分析  $d_2$  值对损耗层理论介电参数的影响。





图 3 不同  $d_1$  值时损耗层理论介电参数的取值范围

### 2.1.2 损耗层厚度( $d_2$ )对损耗层理论介电参数的影响

固定  $\epsilon_{11}$  值为 3.0, 探讨  $d_1$  值分别为 2.0 mm 或 3.0 mm 时, 增大  $d_2$  值对损耗层理论介电参数的影响, 其结果如图 4 所示。从图 4 可以看出: 随  $d_2$  值增大, 椭圆逐渐发生聚集, 说明损耗层所需的频散效应减小; 当  $d_2$  为 1.0 mm 时, 损耗层所需频散效应较高, 不利于材料实现 X 与 Ku 波段的宽频吸波性能 (见图 4(a) 和图 4(d))。当  $d_2$  值增加至 3.0 mm 时, 体系在 14.0 GHz 处出现双理论介电参数范围; 而在 18.0、16.0 GHz 处出现超大的理论介电参数范围, 其是由双理论介电参数范围发生重叠与合并所得, 这非常有利于优化高频处的吸波性能 (见图 4(c))。这一现象可以用传输线二分之一波长转换器来解释<sup>[19]</sup>: 在四分之一波长传输线中增加二分之一波长段会使其变为四分之三波长传输线; 基于二分之一波长原理可知传输线归一化输入阻抗不变, 这使得长度为四分之一波长奇数倍的传输线均满足四分之一波长特性, 从而导致椭圆在一定范围内具有重复性。另外,  $d_2$  值为 3.0 mm 时, 损耗层理论介电参数的取值范围在中低频处 (14.0~8.2 GHz) 更靠近 Y 轴, 说明其最小  $\tan \delta_e$  值增大, 这不利于有效吸收带宽的拓展<sup>[21]</sup> (见图 4(c))。而  $d_2$  值为 2.0 mm 时, 双层吸波材料所需频散效应及  $\tan \delta_e$  值均相对较低, 这减小了实验设计难度, 从而更容易实现 X 与 Ku 波段内  $R_L$  值均小于 -10 dB 的设计目标 (见图 4(b) 和图 4(e))。因此, 将  $d_1$  值优化为 2.0 mm 或 3.0 mm,  $d_2$  值优化为 2.0 mm, 继续讨论阻抗层复介电常数实部 ( $\epsilon_{11}$ ) 对损耗层理论介电参数的影响。

### 2.1.3 阻抗层复介电常数实部 ( $\epsilon_{11}$ ) 对损耗层理论介电参数的影响

固定  $d_1$  值为 2.0 mm 或 3.0 mm, 探讨增大  $\epsilon_{11}$  值对损耗层理论介电参数的影响, 其结果如图 5 所示。当  $\epsilon_{11}$  值为 2.0 时, 双层吸波材料实现 X 与 Ku 波段全频有效吸收时, 损耗层所需频散效应较高 (见图 5(a) 和图 5(d)); 而当  $\epsilon_{11}$  值为 3.0 时, 其损耗层所需频散效应明显降低, 其值仅为 2.0,  $\epsilon_{21}$  为 10.0~12.0,  $\epsilon_{22}$  为 6.0~8.0 (见图 5(b) 区域 A 和图 5(e) 区域 B)。但  $\epsilon_{11}$  值为 4.0 且  $d_1$  值为 2.0 mm 时, 14.0 GHz 与 12.0 GHz 处损耗层理论介电参数的最小  $\tan \delta_e$  值为 0.7, 表明材料所需的介电损耗要求与  $\epsilon_{11}$  值为 3.0 相比较为高 (见图 5(b) 和图 5(c)),  $d_1$  值为 3.0 mm 时, 双层吸波材料实现全频有效吸收则主要受限于较高的频散效应 (见图 5(f))。相对而言,  $\epsilon_{11}$  值为 3.0 时, 损耗层所需频散效应及  $\tan \delta_e$  值均较小, 更有利于实现全频有效吸收。

综上, 根据理论数值分析合理预测  $d_1$  值为 2.0 mm 至 3.0 mm,  $d_2$  值约为 2.0 mm,  $\epsilon_{11}$  值为 3.0 时, 双层吸波材料更容易实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收, 有效降低了单层吸波材料的苛刻本征电磁参数要求<sup>[21]</sup>。

### 2.1.4 单层吸波材料的理论介电参数分析

单层吸波材料是双层吸波材料的特殊情况, 将  $d_1$  值设为 0, 即可计算得到单层吸波材料的理论介电参数<sup>[22]</sup>。图 6 为不同厚度的单层吸波材料在各频点处 (8.2、10.0、12.4、14.0、16.0 GHz 和 18.0 GHz) 的理论介电参数的取值范围, 可以看出: 单层吸波材料实现全频有效吸收时, 损耗层所需频

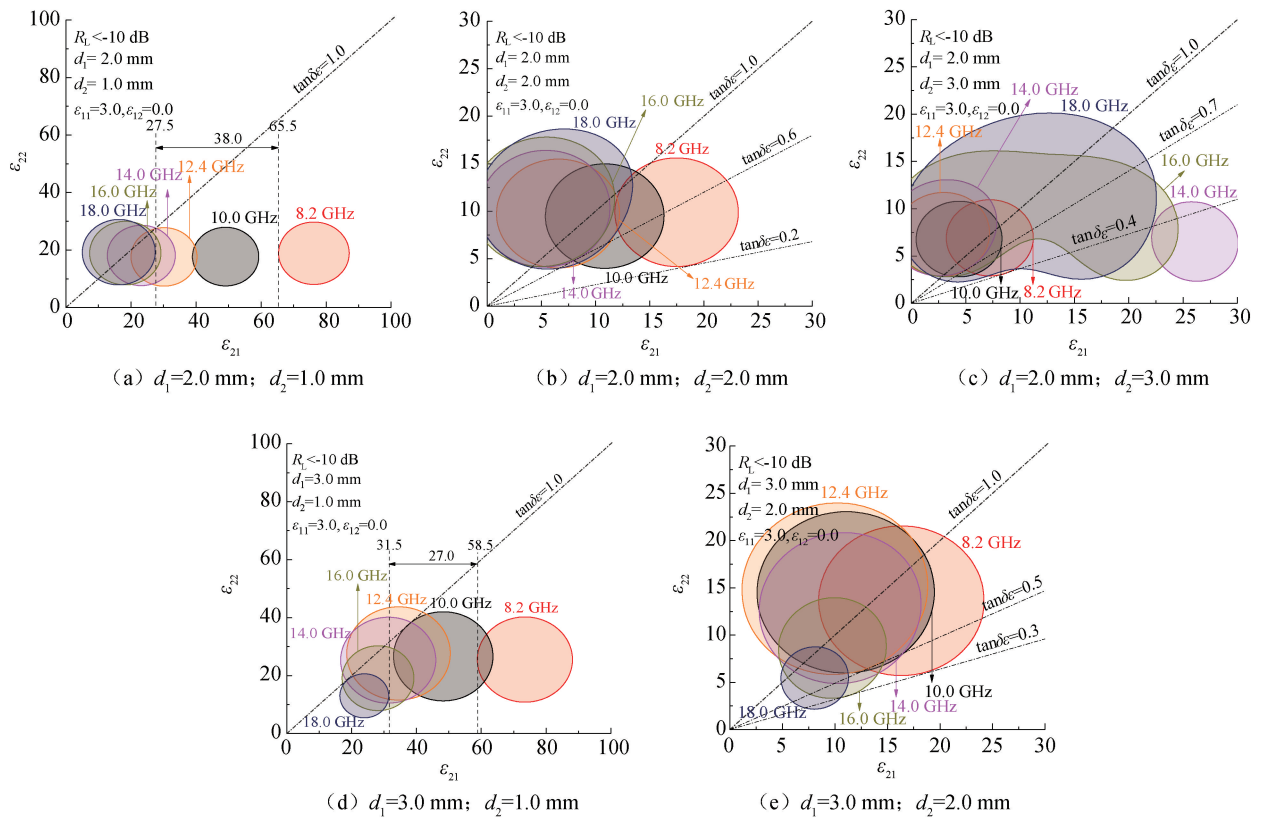


图 4 不同  $d_2$  值时损耗层理论介电参数的取值范围

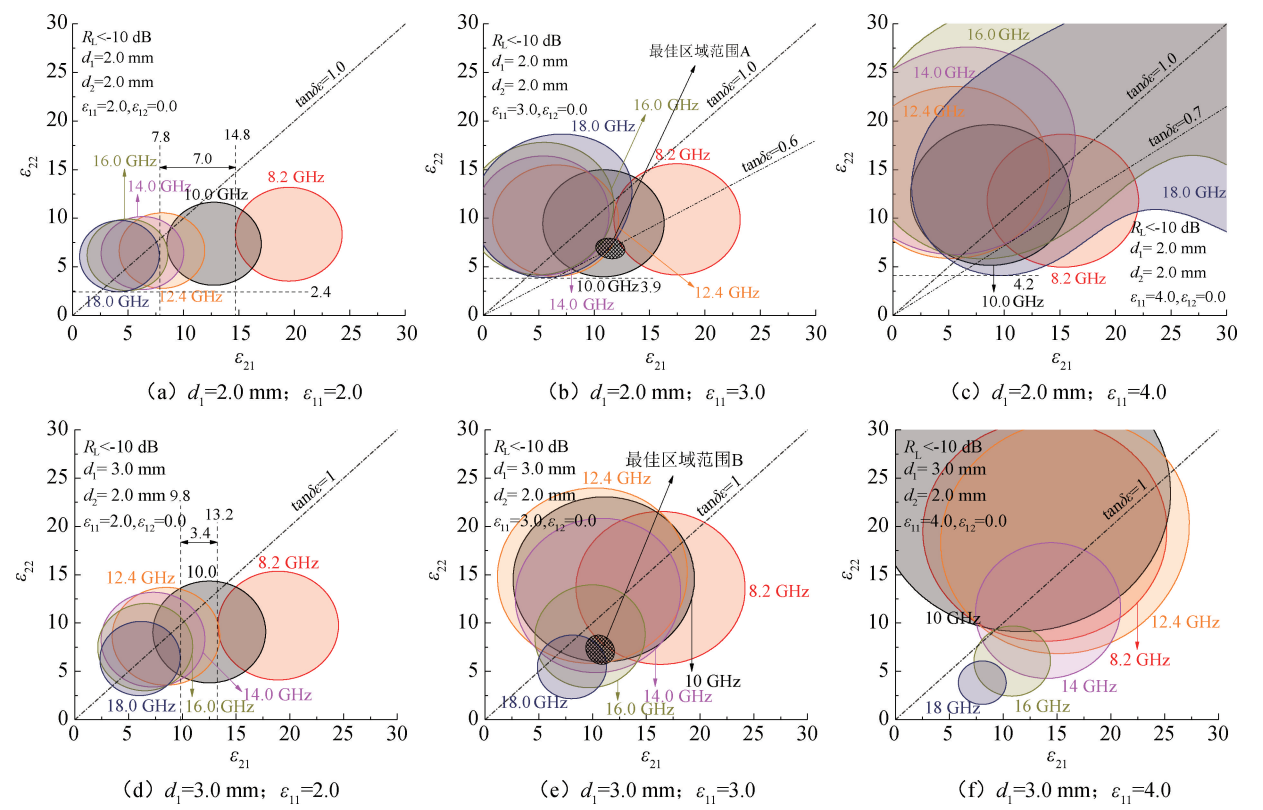


图 5 不同  $\epsilon_{11}$  值时损耗层理论介电参数的取值范围

散效应较小,约为 1.0,但同时具备低介电、高损耗特征才能实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收<sup>[23]</sup>;其理论介电参数实部范围为 2.0~4.0,虚部范围为 1.5~3.0,  $\tan \delta_e$  约为 0.8 现有吸波材料较

难满足这种苛刻要求<sup>[24-25]</sup>; 双层吸波材料损耗层理论介电参数的实部(10.0~12.0)与虚部(6.0~8.0)均增大, 并且所需频散效应没有明显增大, 这打破了

单层吸波材料需要兼具低介电、高损耗电磁参数的难点, 有利于材料实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收。

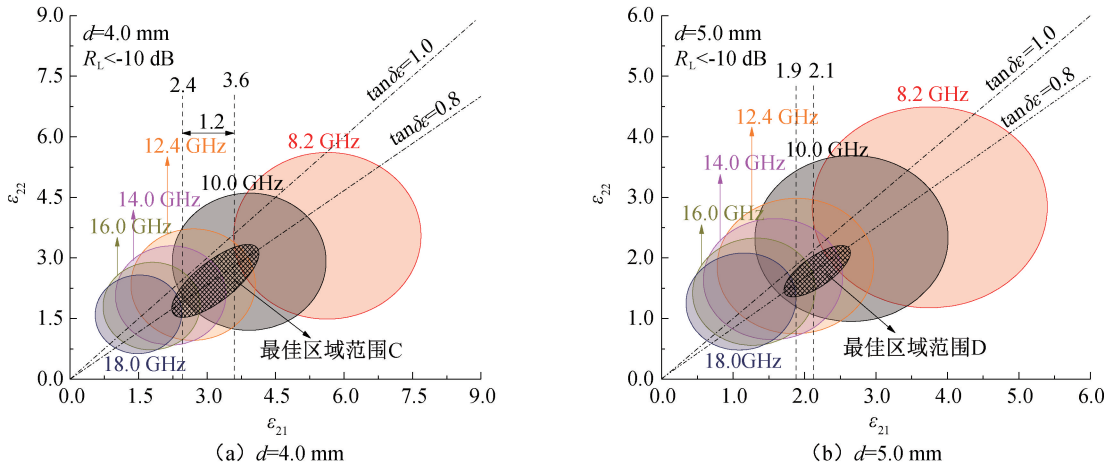


图 6 不同厚度下单层吸波材料的理论介电参数取值范围

2.2 MS-Y 复合材料的电磁参数分析

为进一步研究双层吸波材料的吸波性能, 采用波导法在 8.2~18.0 GHz 频率范围测试所制备 MS-Y 复合材料的电磁参数, 结果如图 7 所示。图 7 显示: 随着频率的增加, 各试样的实部和虚部值均呈现下降趋势, 表现出明显的频散效应; 可以用介电常数的最大值和最小值之差来衡量其大小<sup>[26-27]</sup>, 频散效应是由于材料内部的极化过程无法及时响应快速变化的外部电场, 从而导致能量存储和损耗能力均有所减少<sup>[28]</sup>。材料的复介电常

数实部和虚部值均随 MS 含量的增加而增加, 这主要得益于 WPU 基体中局部导电网络的逐步形成<sup>[29-30]</sup>。结合图 6 所示的理论介电参数可知, MS-Y 复合材料难以满足单层吸波材料低介电、高损耗的要求(实部为 2.0~4.0, tanδ<sub>ε</sub> 约为 0.8), MS-20 复合材料的复介电常数实部范围为 12.0~8.0(频散效应约为 4.0), 虚部范围为 7.0~6.0, 满足上述损耗层理论介电参数的要求(频散效应约为 2.0, ε<sub>21</sub> 范围为 10.0~12.0, ε<sub>22</sub> 范围为 6.0~8.0)。

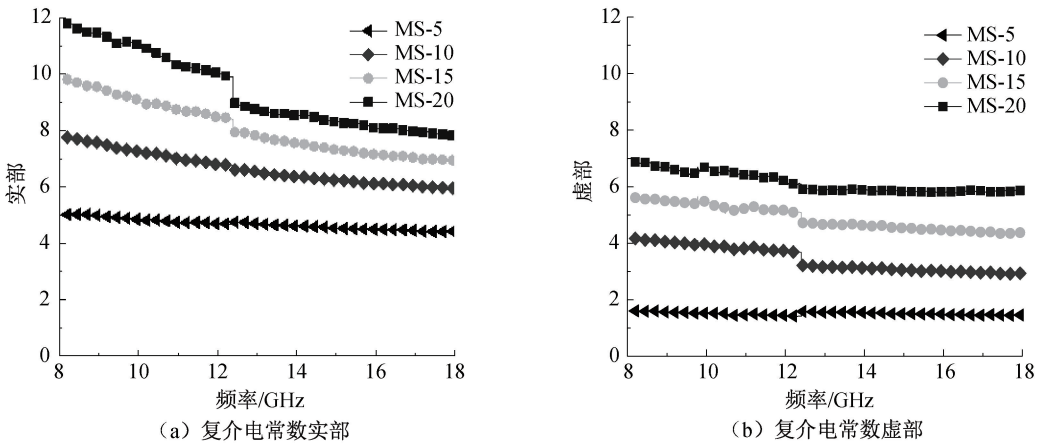


图 7 MS-Y 复合材料的电磁参数

2.3 WPU/MS-20 双层吸波材料的宽频吸波性能分析

通过数值计算与优化得到双层吸波材料更容易实现全频有效吸收的结构参数和电磁参数, 其设置分别为:  $d_1$  值为 2.0 mm 或 3.0 mm、 $d_2$  值为 2.0 mm、 $\epsilon_{11}$  值为 3.0、 $\epsilon_{21}$  范围为 10.0~12.0、 $\epsilon_{22}$

范围为 6.0~8.0。根据优化结果, 选择复介电常数实部约为 3.0, 虚部约为 0.3 的 WPU 作为双层吸波材料的阻抗层, 测试所得电磁参数如图 8 所示; 选择 MS-20 复合材料作为损耗层(见图 7), 制备梯度阻抗结构的 WPU/MS-20 双层吸波材料, 以期实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收。

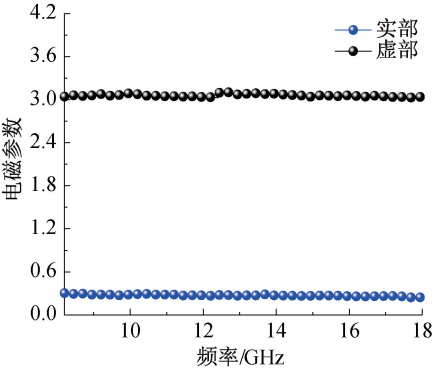
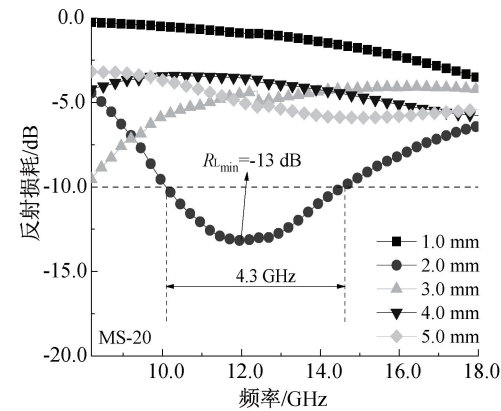


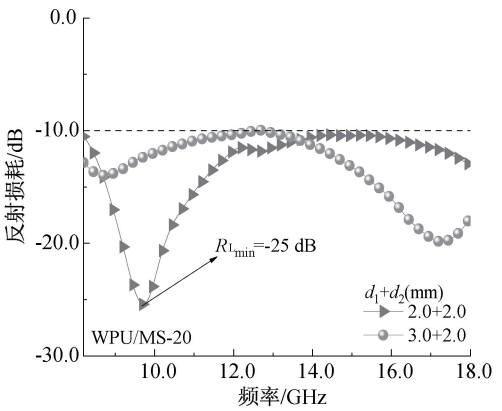
图 8 WPU 的电磁参数

图 9 为单层吸波材料、双层吸波材料的反射损耗图及损耗层理论介电参数的范围,双层吸波材料的性能显著优于单层吸波材料。单层吸波材料在厚度为 2.0 mm 时具有最大的有效吸收带宽为 4.3 GHz(10.2~14.5 GHz),最小反射损耗值( $R_{\text{Lmin}}$ )为-13 dB(见图 9(a))。而 WPU/MS-20 双层吸波材料实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收,且

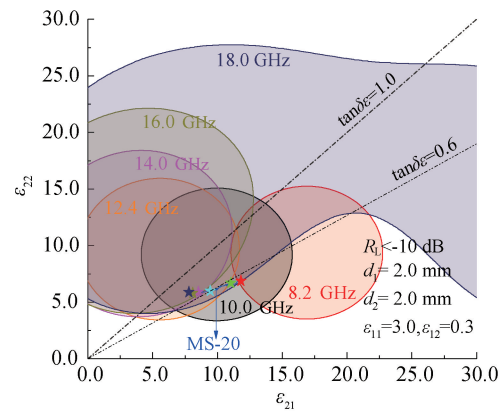
具有  $R_{\text{Lmin}}$  为-25 dB,厚度为(2.0+2.0) mm 和 (3.0+2.0) mm(表示阻抗层厚度+损耗层厚度,见图 9(b))。以厚度为(2.0+2.0) mm 样品为例,分析 WPU/MS-20 双层吸波材料能够实现 X 与 Ku 波段全频有效吸收的原因。从图 9(c)—(d)可以看出:WPU/MS-20 双层吸波材料的复介电常数均处于相应的理论介电参数取值范围之内,即各频点处复介电常数实部和虚部均能够满足反射损耗值小于-10 dB 的设计目标;与理论计算结果相一致,验证了损耗层理论介电参数计算的准确性与可行性。双层吸波材料优异的吸波性能可归因于:阻抗层的特征阻抗接近自由空间的阻抗值  $Z_0$ ,这有助于入射电磁波能够更大程度地进入双层吸波材料内部,并得以继续向下层传播并被损耗。因此,梯度阻抗型双层吸波材料在宽频范围具有良好的阻抗匹配特性和损耗能力,有利于吸波材料在 X 和 Ku 波段实现全频有效吸收<sup>[31-32]</sup>。



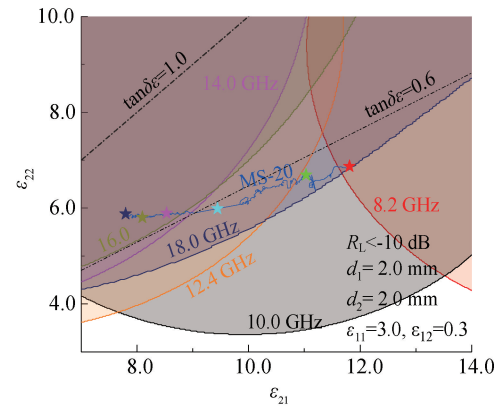
(a) MS-20 单层吸波材料的反射损耗图



(b) WPU/MS-20 双层吸波材料的反射损耗图



(c) 损耗层理论介电参数的取值范围



(d) 图 (c) 的局部放大图

图 9 吸波材料的反射损耗图及损耗层理论介电参数取值范围  
注:图 9(c)—(d)中,6 个颜色不同的“☆”从右向左分别表示 MS-20 复合材料在 8.2、10.0、12.4、14.0、16.0 GHz 和 18.0 GHz 处的复介电常数坐标。



### 3 结 论

本文通过数值计算方法得到了损耗层理论介电参数,分析了  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $\epsilon_{11}$  与损耗层理论介电参数之间的关联性,得出双层吸波材料更容易实现全频有效吸收的结构参数;进而,以 WPU 为阻抗层、以 MS-20 复合材料为损耗层制备了 WPU/MS-20 双层吸波材料,实现 X 与 Ku 波段的全频有效吸收,主要结论如下:

a)数值计算、优化得到的 X 和 Ku 波段全频有效吸收的双层吸波材料,其结构参数为: $d_1$  值为 2.0 mm 和 3.0 mm,  $d_2$  值约为 2.0 mm,  $\epsilon_{11}$  值为 3.0;吸波材料的损耗层理论介电参数范围为:频散效应约为 2.0,  $\epsilon_{21}$  为 10.0~12.0,  $\epsilon_{22}$  为 6.0~8.0。

b)在优化的双层结构参数指导下,制备梯度阻抗型双层吸波材料 WPU/MS-20,实现了 X 与 Ku 波段的全频有效吸收,吸波材料的  $R_{\text{Lmin}}$  为一 25 dB,厚度为(2.0+2.0) mm。

c)梯度阻抗结构赋予双层吸波材料连续变化的特征阻抗,从而允许更多的电磁波进入材料内部进而被损耗层材料吸收、耗散掉,使得材料在宽频范围兼具良好的阻抗匹配特性和损耗能力,从而拓展材料的有效吸收带宽。

### 参考文献:

[1] Ma Z L, Kang S L, Ma J Z, et al. Ultraflexible and mechanically strong double-layered aramid nanofiber- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene/silver nanowire nanocomposite papers for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. ACS Nano, 2020, 14(7): 8368-8382.

[2] 李彬. 3D 结构水泥基吸波板制备与吸波性能研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2020: 1-5.

[3] Li M, Fan X, Xu H, et al. Controllable synthesis of mesoporous carbon hollow microsphere twined by CNT for enhanced microwave absorption performance[J]. Journal of Materials Science&Technology, 2020, 59: 164-172.

[4] Zhang M, Han C, Cao W Q, et al. A nano-micro engineering nanofiber for electromagnetic absorber, green shielding and sensor[J]. Nano-Micro Letters, 2020, 13(1): 27.

[5] Liu P J, Yao Z J, Ng V M H, et al. Novel Multilayer-like structure of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /CNZF composites for low-frequency electromagnetic absorption[J]. Materials Letters, 2019, 248: 214-217.

[6] Li K Y, Sun H, Zhang X, et al. Micro-nanospheres assembled with helically coiled nitrogen-doped carbon nanotubes: Fabrication and microwave absorption properties[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108290.

[7] 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 B, 2014, 179: 17-24.

[8] Zhou Q, Yin X W, Ye F, et al. Optically transparent and flexible broadband microwave metamaterial absorber with sandwich structure[J]. Applied Physics A-Materials Science & Processing, 2019, 125(2): 131.

[9] 刘海韬, 黄文质, 周永江, 等. 高温吸波结构材料[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1-17.

[10] Zhao S C, Yan L L, Tian X D, et al. Flexible design of gradient multilayer nanofilms coated on carbon nanofibers by atomic layer deposition for enhanced microwave absorption performance[J]. Nano Research, 2018, 11(1): 530-541.

[11] Sheng A, Ren W, Yang Y Q, et al. Multilayer WPU conductive composites with controllable electro-magnetic gradient for absorption-dominated electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 129: 105692.

[12] Xu Y D, Yang Y Q, Yan D X, et al. Gradient structure design of flexible waterborne polyurethane conductive films for ultraefficient electromagnetic shielding with low reflection characteristic[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(22): 19143-19152.

[13] Zuo Y X, Su X R, Li X W, et al. Multimaterial 3D-printing of graphene/ $\text{Li}_{0.35}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_{2.35}\text{O}_4$  and graphene/carbonyl iron composites with superior microwave absorption properties and adjustable bandwidth[J]. Carbon, 2020, 167: 62-74.

[14] 马冕洋, 张西军, 曾一兵. 多层结构设计在吸波材料中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(4): 8-13.

[15] Qin F, Brosseau C. A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(6): 061301.

[16] Quan B, Shi W H, Ong S J H, et al. Defect engineering in two common types of dielectric materials for electromagnetic absorption applications[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(28): 1901236.

[17] Zhang C J, Pinilla S, McEvoy N, et al. Oxidation stability of colloidal two-dimensional titanium carbides (MXenes) [J]. Chemistry of Materials, 2017, 29(11): 4848-4856.

[18] Elmahaishi M F, Azis R S, Ismail I, et al. A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 2188-2220.

[19] 蒯雄宇. 吸波材料理想电磁参数区域的数值模拟及实验改性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017: 18-20.

[20] 王春齐, 符仲宇, 杜作娟, 等. 结构吸波复合材料透波层的研究[J]. 功能材料, 2015, 46(2): 2057-2059.

[21] 周倩. 宽频吸波复合材料的结构设计与性能优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2019: 31-42.

[22] Liu Y, Zhao K, Drew M G B, et al. A theoretical and practical clarification on the calculation of reflection loss for microwave

absorbing materials[J]. AIP Advances, 2018, 8(1): 015223.

[23] Duan W Y, Yin X W, Li Q, et al. A review of absorption properties in silicon-based polymer derived ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(15): 3681-3689.

[24] Wu Y, Gao X, Cheng J X, et al. Optimum design for permittivity of dielectric absorbing materials[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1765(1): 012002.

[25] Cui L R, Han X J, Wang F Y, et al. A review on recent advances in carbon-based dielectric system for microwave absorption[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(18): 10782-10811.

[26] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 镍铁合金/铁包云母粉复合吸波涂层材料的频散特性[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 95-100.

[27] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 碳纤维复合吸波材料的频散特性影响规律研究[J]. 表面技术, 2017, 46(4): 205-211.

[28] Abdalla I, Elhassan A, Yu J Y, et al. A hybrid comprised of porous carbon nanofibers and rGO for efficient electromagnetic wave absorption[J]. Carbon, 2020, 157: 703-713.

[29] Zhang X X, Wang J, Su X G, et al. Facile synthesis of reduced graphene oxide-wrapped CNFs with controllable chemical reduction degree for enhanced microwave absorption performance[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 553: 402-408.

[30] 杨汶童, 朱曜峰. 导电聚苯胺修饰结构碳材料的制备及吸波性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(2): 182-188.

[31] Zhang Y J, Pan L, Zhang P G, et al. Gradient multilayer design of  $Ti_3C_2T_x$  MXene nanocomposite for strong and broadband microwave absorption[J]. Small Science, 2022, 2(7): 2200018.

[32] 潘文辉, 李冬萌, 牛磊, 等. 宽频强吸收阻抗渐变结构设计制备[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3302-3311.

(责任编辑:张会巍)