

环氧基复合吸波涂层的制备与性能研究

王顺顺, 张喆, 王霏, 张际亮, 颜丙功, 顾永华, 江开勇

(华侨大学 a.福建省特种能源制造重点实验室 b.厦门市数字化视觉测量重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: **目的** 制备综合吸波性能良好的复合吸波涂层。**方法** 选择炭黑和羰基铁粉进行机械混合, 作为吸波剂加入到环氧树脂中进行吸波材料制备, 利用扫描电子显微镜对炭黑和羰基铁粉分别进行微观形貌的观察。利用矢量网络分析仪在 2~18 GHz 内测试其电磁性能, 研究炭黑和羰基铁粉含量及涂层厚度对吸波性能的影响规律。**结果** 通过观察微观形貌发现, 炭黑颗粒较小, 出现团聚和粘附性现象, 羰基铁粉颗粒呈球状, 表面光滑, 分散性好。复合后的材料混合较均匀, 羰基铁粉分散在基体中, 与炭黑团配合能够提高材料的吸波性能。纯炭黑的吸波频带较窄, 纯羰基铁粉的频带主要集中在中高频段, 而复合后的吸波频段较宽, 有着良好的吸波性能。炭黑质量分数为 4%, 羰基铁粉质量分数为 250%, 厚度为 2 mm 时, 吸波涂层在 9~18 GHz 的微波吸收率超过 90%, 且反射损耗峰值达到近 -45 dB。**结论** 炭黑和羰基铁粉复合后, 吸波材料的吸波频带更宽, 效果更好, 解决了单一吸波剂涂层存在的吸波频带窄和集中于高频段的问题。通过调节涂层厚度, 可以使材料在相对应的波段获得更好的吸波性能, 从而得到更广泛的应用。

关键词: 吸波涂层; 炭黑; 羰基铁粉; 复介电常数; 复磁导率; 吸波性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)04-0325-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.04.034

Preparation and Properties of Epoxy Matrix Composite Absorbing Materials

WANG Shun-shun, ZHANG Zhe, WANG Fei, ZHANG Ji-liang, YAN Bing-gong,
GU Yong-hua, JIANG Kai-yong

(a. Fujian Key Laboratory of Special Energy Manufacturing, b. Xiamen Key Laboratory of Digital Vision Measurement, Huaqiao University, Fujian Xiamen 361021, China)

ABSTRACT: This paper is to prepare hybrid composite absorbing coating with good absorbing properties. Carbon black and carbonyl iron powder are mixed mechanically and added into epoxy resin as absorbent for the preparation of absorbing materials. The microstructure of carbon black and carbonyl iron powder is observed by scanning electron microscope. The

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-09-27

Received: 2021-04-06; Revised: 2021-09-27

基金项目: 福建省自然科学基金 (2016J01089, 2020J01067); 福建省科技计划项目 (2019H6016)

Fund: The Natural Science Foundation of Fujian Province (2016J01089, 2020J01067); Fujian Provincial Science and Technology Project (2019H6016)

作者简介: 王顺顺 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为增材制造。

Biography: WANG Shun-shun (1996—), Male, Postgraduate, Research focus: additive manufacturing.

通讯作者: 王霏 (1979—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为增材制造。

Corresponding author: WANG Fei (1979—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: additive manufacturing

引文格式: 王顺顺, 张喆, 王霏, 等. 环氧基复合吸波涂层的制备与性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 325-334.

WANG Shun-shun, ZHANG Zhe, WANG Fei, et al. Preparation and Properties of Epoxy Matrix Composite Absorbing Materials[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 325-334.

electromagnetic properties are tested by vector network analyzer in 2~18 GHz. The effects of carbon black and carbonyl iron powder content and the coating thickness on the absorbing properties are studied. By observing the microscopic morphology, it is found that the carbon black particles are small, appearing agglomeration and adhesion phenomenon, while the carbonyl iron powder particles are spherical, the surface is smooth, good dispersion. The composite material mixture is more uniform, the carbonyl iron powder dispersed in the matrix with carbon black group can improve the absorbing performance of the material; The absorbing frequency band of pure carbon black is narrow, and that of pure carbonyl iron powder is mainly concentrated in the middle and high frequency band, while the absorbing frequency band of composite is wider, which has good absorbing performance. When the content of carbon black is 4%, carbonyl iron powder is 250%, and the thickness of the absorbing coating is 2 mm, the absorption rate of the coating is more than 90% in the range of 9~18 GHz, and the peak value of reflection loss is nearly -45 dB. The composite material of carbon black and carbonyl iron powder has wider absorbing band and better effect, which solves the problems that single absorbing agent coating is narrow absorbing band and concentrated in high frequency band. By adjusting the coating thickness, the material can obtain better absorption performance in the corresponding band, so it can be used more widely.

KEY WORDS: absorbing coating; carbon black; carbonyl iron powder; complex permittivity; complex permeability; absorbing performance

在电子设备和军事装备飞速发展的时代,吸波材料广泛应用于军事武器、雷达、通信、建筑等行业中^[1-5]。在军事领域利用吸波材料能够提高无人机等设备的隐蔽性,从而提高探测和侦查能力,不受激光武器的攻击等^[6]。这不仅需要吸波材料的吸波性能强,并且对吸波材料的轻质性、厚度、宽频性等提出了新的要求^[7],因而需要进一步研究材料属性,获得综合性能更高的新型吸波材料。

根据电磁损耗的机理,吸波材料可分为电介质型、电阻型和磁介质型^[8]。其中电介质型的代表材料是氮化硅^[9],其吸波机理是介质极化的弛豫损耗^[10];电阻型包括炭黑^[11-12]、碳纤维^[13]、碳化硅^[14-15]、石墨烯^[16-17]、碳纳米管^[18-19]等,主要通过材料与电场的相互作用实现吸波,吸波效果取决于材料本身的介电常数和电导率;磁介质型包括铁氧体^[20-21]、羰基铁粉^[22-23]等,其吸波机理主要是自共振和磁滞损耗。由于吸波机理的限制,采用单一类型吸波剂无法实现宽频的吸波性能,将2种或2种以上的吸波剂混合使用,制备复合涂层成为新的发展趋势。

炭黑作为电阻型材料,具有质量轻、介电性能好、成本低等特点,但同时存在介电常数过大、阻抗匹配较差、频带窄等缺点^[12,24-25]。羰基铁粉有较高的磁导率,且吸波频带宽,成本较低,但也存在密度大、难以实现轻量化的不足^[26-27]。因此,为了获得综合吸波性能良好的复合材料,可以将2种材料共用。共用的方法有2种,一种是将羰基铁粉作为匹配层,炭黑作为损耗层,制备多层吸波材料;另一种则是直接将二者混合制备吸波材料。Wang等^[28]将羰基铁粉和炭黑分别用于匹配层和吸收层,发现在2~18 GHz中有2个吸收峰,并且在羰基铁粉的质量分数为70%,炭黑的质量分数为50%或60%时,<-4 dB的带宽大于10 GHz,但涂层较厚,总厚度为4 mm。栗志等^[29]通

过将羰基铁粉、炭黑和硫氧镁基体材料复合,设计了强度高、耐热好的吸波涂层,将羰基铁粉和炭黑分别作为匹配层与吸收层,最终在匹配层内添加2%炭黑达到吸波效果,但没有对炭黑含量进行试验设计以确定其最佳用量。Liu等^[30]通过试验得到25%的炭黑与25%的羰基铁粉加入到环氧树脂中能够制备出吸波性能良好的涂层,但炭黑含量过高会影响材料整体的黏度,在实际制备中增加了困难。Shen等^[31]将羰基铁粉、炭黑复合加入到线性低密度聚乙烯基体中制备吸波材料,发现500%的羰基铁粉和7%的炭黑混合均匀后,吸波效果比单一炭黑或羰基铁粉更好,但是羰基铁粉含量偏高,会大大加大涂层的密度,不利于制造和实际使用。由此可见,炭黑与羰基铁粉复合吸波材料可有效提高综合吸波性能,但针对材料配方和制备工艺的定量研究还不够具体和深入。

本文将电阻型吸波材料炭黑与磁介质型吸波材料羰基铁粉进行混合,在扫描电镜下观察其微观形貌,并且与单纯的炭黑和羰基铁粉作对比,讨论其吸波性能。重点关注不同配比的炭黑和羰基铁粉含量以及涂层厚度对复合材料整体吸波性能的影响,最终制备出宽频高效的吸波涂层。

1 试验

1.1 材料与制备

E51 环氧树脂由广州穗心化工有限公司提供,固化剂 1021 由络合高新材料(上海)有限公司提供,炭黑(CB)由天津正远科技有限公司提供,羰基铁粉(CIP)由河北乐伯金属材料科技有限公司提供。在E51环氧树脂中添加质量分数为15%的1021固化剂,放入搅拌机中进行混合,搅拌机转速为300 r/min,搅拌1 h以保证搅拌均匀,再加入相对应质量分数的

羰基铁粉, 均匀搅拌 30 min 后, 加入相对应质量分数的炭黑, 其中质量分数均为与环氧树脂的百分比。炭黑加入后, 将材料放入搅拌机中均匀搅拌 1 h 后进行脱泡。本试验利用台式脱泡离心机进行脱泡, 转速为 4500 r/min, 脱泡时间为 5 min。复合材料脱泡之后挤出到对应的模具中, 放入 80 °C 烘箱中恒温 10 h 使其完全固化, 取出样品在干燥环境放置 7 d, 最终完成制样。制得的试样为外径 7 mm、内径 3 mm、高 2 mm 的空心圆环。

1.2 测试与表征

使用扫描电镜 (SEM, JEOL JSM-IT500LA) 观察炭黑和羰基铁粉微粒, 以及固化后复合材料的微观形貌。采用传输线同轴法, 利用矢量网络分析仪 (Agilent E5071C Keysight) 在 2~18 GHz 频率内测量材料的电磁参数, 包括复介电常数和复磁导率。

1.3 试验设计

根据前期试验, 以 4% 炭黑或 250% 羰基铁粉作为单一吸波剂的材料吸波效果最佳。然而, 2 种吸波剂复合后, 吸波性能随含量的变化规律受到面密度、阻抗匹配等多种因素综合影响, 需要设计试验进一步探究。本文设计单因素试验, 分别探究炭黑和羰基铁粉含量对复合材料电磁性能影响, 具体的材料配比见表 1 和表 2。

表 1 不同炭黑含量的吸波材料配比
Tab.1 Ratio of absorbing materials with different carbon black content

Samples	wt. %					
	CB0-CIP2.5	CB2-CIP2.5	CB4-CIP2.5	CB6-CIP2.5	CB8-CIP2.5	CB10-CIP2.5
CB	0	2	4	6	8	10
CIP	250	250	250	250	250	250

表 2 不同羰基铁粉含量的吸波材料配比
Tab.2 Ratio of absorbing materials with different carbonyl iron powder content

Samples	wt. %				
	CB4-CIP0	CB4-CIP1	CB4-CIP1.5	CB4-CIP2	CB4-CIP3
CB	4	4	4	4	4
CIP	0	100	150	200	300

在上述测试结果的基础上, 研究涂层吸波性能的影响因素。吸波性能通常采用反射损耗 w_{RL} 来表示, 在涂层中, 由于没有复杂结构增加衰减, 反射损耗通常由式 (1) 和 (2) 所示^[32]。

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

$$Z_{ink} = \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \tan \left[ikd (\mu \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; d 为涂层厚度; ε 和 μ 代表材料的复介电常数和复磁导率。通过式 (1) 和 (2) 可以看出, 反射损耗与材料的配方 (电磁参数) 及涂层厚度有关。因此, 将炭黑含量、羰基铁粉含量和厚度分别作为变量进行探究, 炭黑含量、羰基铁粉含量分别见表 1 和表 2, 厚度分别取值为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm。

2 分析与讨论

2.1 吸波剂和复合材料的微观形貌

炭黑和羰基铁粉在扫描电镜下 (5 000 倍) 的微观形貌如图 1 和图 2 所示。由图 1 可知, 炭黑颗粒较小, 出现了团聚和粘附现象。这种团聚和粘附形成导电网络, 能够增大材料的电导率和介电常数。但因为炭黑与基体树脂的相容性较差, 阻抗匹配较低, 所以宏观上很难大幅度提高材料的吸波性能。由图 2 可以看出, 羰基铁粉颗粒基本呈球状, 颗粒较为饱满, 粒径为 1~5 μm , 表面光滑, 这有利于其在基体树脂中均匀分散。与炭黑相比, 羰基铁粉的吸波性能更好, 主要因为羰基铁粉依靠介电损耗和磁损耗, 能够提高阻抗匹配, 从而增强材料对电磁波的吸收。但羰基铁粉的吸收频段较窄, 且密度更大, 不利于吸波涂层的轻量化。

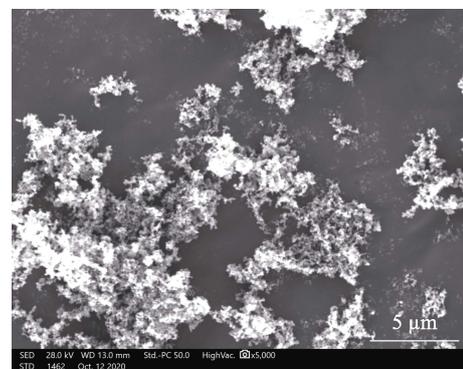


图 1 炭黑的 SEM 形貌
Fig.1 SEM images of carbon black

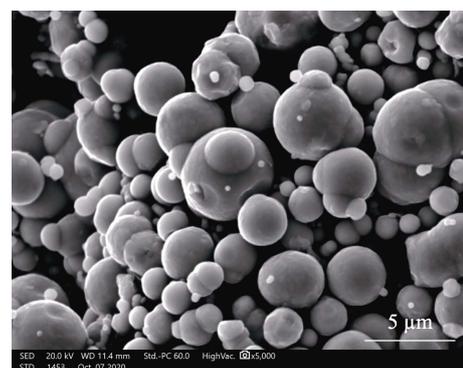


图 2 羰基铁粉的 SEM 形貌
Fig.2 SEM images of carbonyl iron powder

制备完成的环氧树脂基复合吸波材料的微观形貌如图3所示。从图3可以清晰地看出, 碳基铁粉颗粒均匀分散在基体材料中, 无团聚现象。与纯炭黑相比, 加入碳基铁粉能够有效降低材料的介电常数, 提高阻抗匹配。与纯碳基铁粉相比, 炭黑的加入则能够提高材料的介电常数, 减少碳基铁粉的使用量, 在提高吸波性能的同时, 降低材料密度。炭黑与碳基铁粉复合使用, 材料的吸波机理也随之发生改变, 与纯炭黑或纯碳基铁粉对比, 可通过电与磁的双重损耗机制拓宽吸波频带, 提高吸波材料的性能。

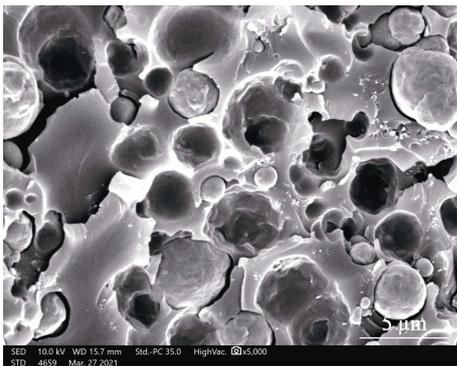


图3 复合材料的SEM形貌

Fig.3 SEM images of composite material

2.2 吸波剂含量对复合材料电磁参数的影响

2.2.1 炭黑含量

复合材料在电磁性能的描述中一般需要比较2个参数: 一个是复介电常数 ϵ ; 另一个是复磁导率 μ 。介电常数的实部 ϵ' 代表介质储存电磁波的能力, 虚部 ϵ'' 代表损耗电磁波的能力; 复磁导率实部 μ' 代表了介质对电磁波的储存能力, 而虚部 μ'' 代表损耗电磁波的能力。

不同含量炭黑添加到复合材料后, 复介电常数和复磁导率的实部和虚部与对应频率之间的关系分别如图4和图5所示(“CB2-CIP2.5”表示“炭黑2%-碳基铁粉250%”, 下同)。通过图4a、b对比介电常数的实部和虚部发现, 增大炭黑含量, 介电常数的实部增加, 虚部基本不变, 但整体介电常数缓慢增长, 但当炭黑含量增加到10%时, 复介电常数的实部和虚部总体上均有明显提升, 实部的均值在12以上。通过分析图5a、b发现, 随着炭黑含量的增加, 材料的磁导率没有明显变化, 主要是因为炭黑作为典型的电阻型损耗材料, 不具有导磁性, 对材料的磁导率不产生影响, 但炭黑含量在10%时, 材料的复磁导率的实部和虚部都有一定的下降。

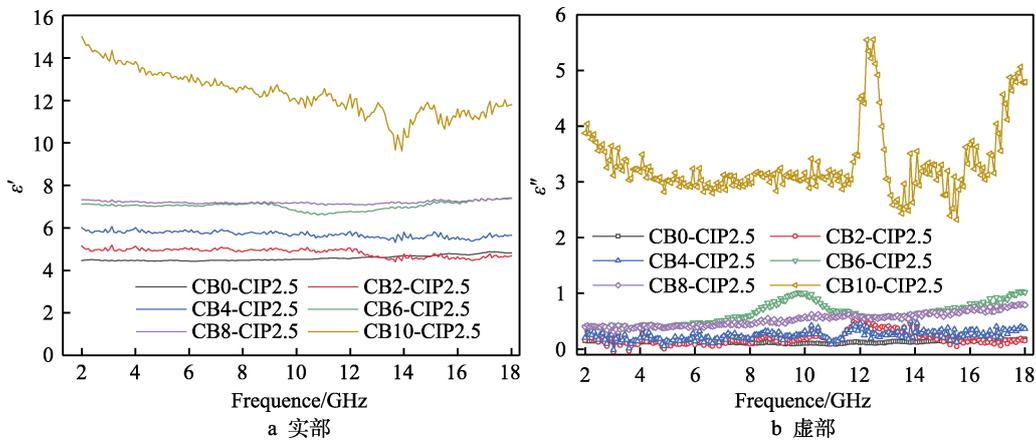


图4 不同炭黑含量对材料复介电常数的影响

Fig.4 Effect of different carbon black content on complex permittivity of materials: a) real part; b) imaginary part

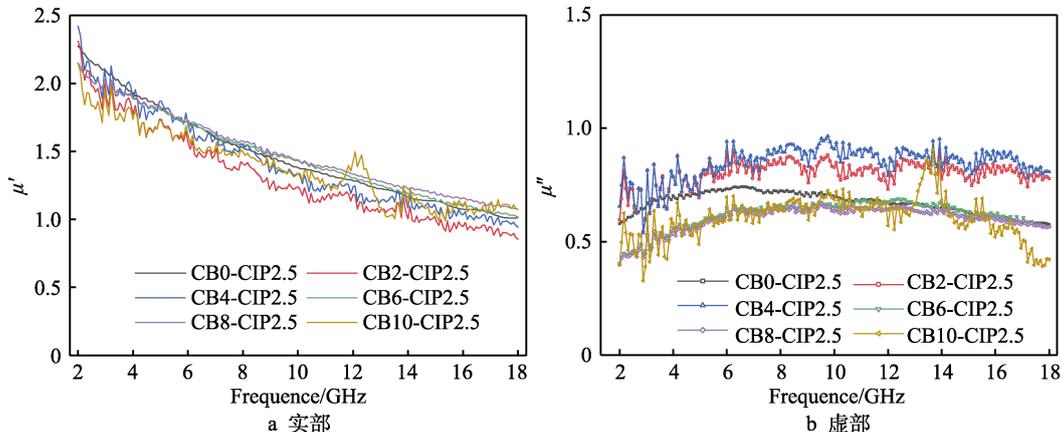


图5 不同炭黑含量对材料复磁导率的影响

Fig.5 Effect of different carbon black content on complex permeability of materials: a) real part; b) imaginary part

复介电常数和复磁导率虚部与实部的比值大小决定了材料的损耗形式, 称为损耗角的正切值, 如式 (3) 和式 (4) 所示。

$$\tan \delta_{\epsilon} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

$$\tan \delta_{\mu} = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (4)$$

为了观察探究 10% 炭黑的材料损耗属性是否有别于其他组, 通过式 (3) 和 (4) 计算得到炭黑质量分数为 4%、8%、10% 复合材料的损耗角正切值, 如图 6 所示。可以看出, 当炭黑的质量分数从 4% 增加到 8% 时, 介电损耗角正切值提升较小, 而磁损耗角正切值降低明显, 但因为炭黑含量较少, 材料的磁损耗远大于介电损耗, 所以复合材料损耗形式仍以磁损耗为主; 当炭黑的质量分数从 8% 升高到 10% 时, 材料的介电损耗有了大幅提升, 磁损耗基本不变, 二者差距有了明显减小, 介电损耗在某些区域高于磁损耗。虽然损耗材料主要以羰基铁粉为主, 但此时材料的介电常数有了明显提高, 材料逐渐由磁损耗向介电损耗转换。因此, 10% 炭黑材料的介电常数比 8% 有明显提高, 而磁导率变化不明显。

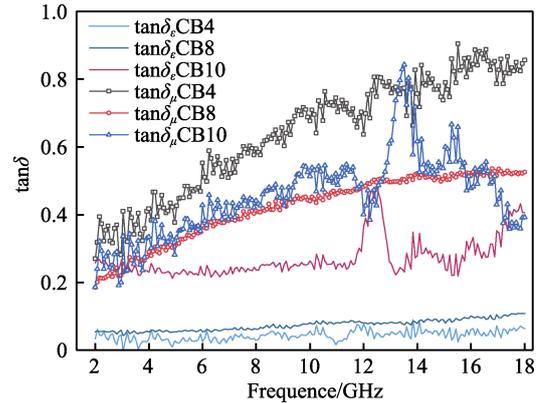


图 6 不同含量炭黑的损耗角正切值
Fig.6 Tangent of loss angle of carbon black with different contents

2.2.2 羰基铁粉含量

不同含量羰基铁粉复合材料的复介电常数和复磁导率如图 7 和图 8 所示。通过图 7 可知, 随着羰基铁粉含量的增加, 材料的复介电常数实部先增加, 羰基铁粉质量分数到 150% 后, 再加入羰基铁粉, 材料的复介电常数实部有下降的趋势, 但是下降幅度较小。羰基铁粉质量分数在 250% 时, 复介电常数实部

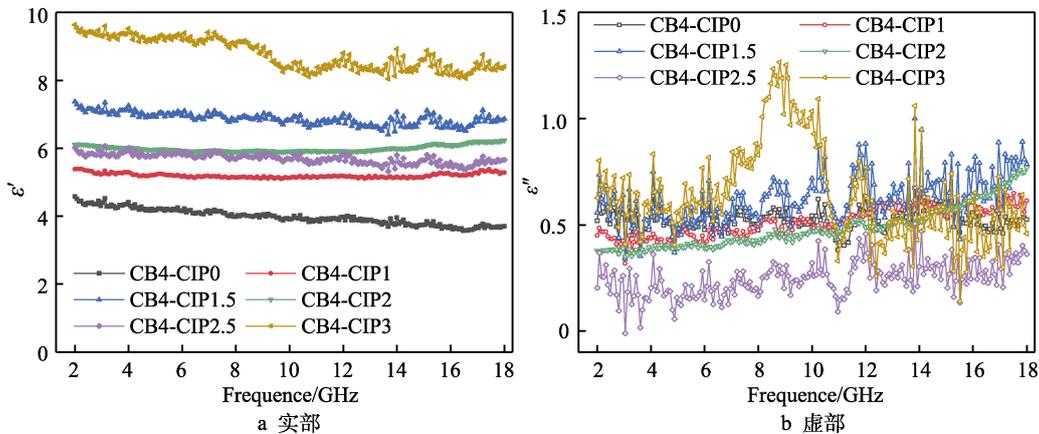


图 7 不同羰基铁粉含量对材料复介电常数的影响
Fig.7 Effect of different carbonyl iron powder content on complex permittivity of materials

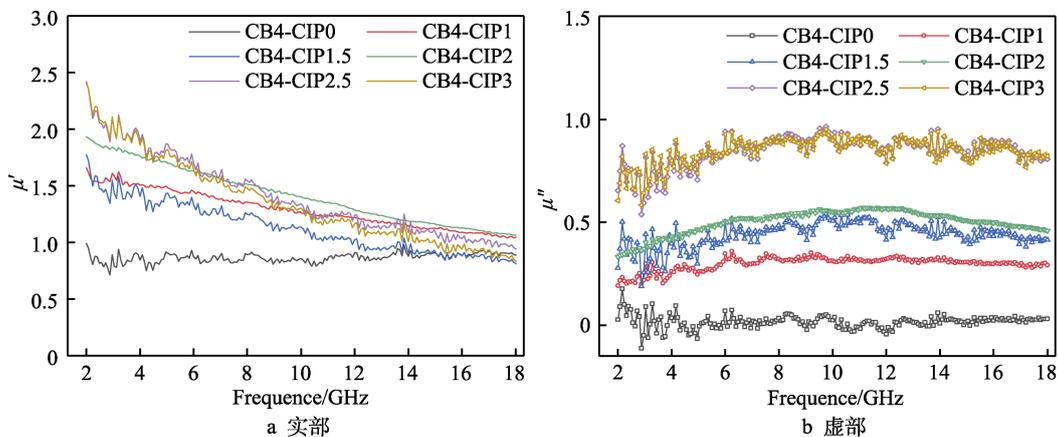


图 8 不同羰基铁粉含量对材料复磁导率的影响
Fig.8 Effect of different carbonyl iron powder content on complex permeability of materials: a) real part; b) imaginary part

降低到6左右。后续再添加羰基铁粉,材料整体的复介电常数实部有了大幅提高,而羰基铁粉含量对复介电常数的虚部无明显影响。通过图8可知,羰基铁粉的加入相比纯炭黑能够明显提高材料的复磁导率,而且羰基铁粉含量的增加与复磁导率基本呈正相关趋势。

由于介电常数和磁导率并不是单调变化的,因此根据式(3)和(4)计算羰基铁粉质量分数为100%、150%、250%、300%时的损耗角正切值,如图9所示。通过图9可以看出,材料吸波机制以磁损耗为主。虽然羰基铁粉质量分数在150%时,复磁导率实部有所下降,但是与羰基铁粉质量分数为100%时相比,磁损耗的特性仍然更加显著。羰基铁粉质量分数提高到250%时,磁损耗基本达到最大值,继续添加羰基铁粉,材料的损耗性质基本没有提升。

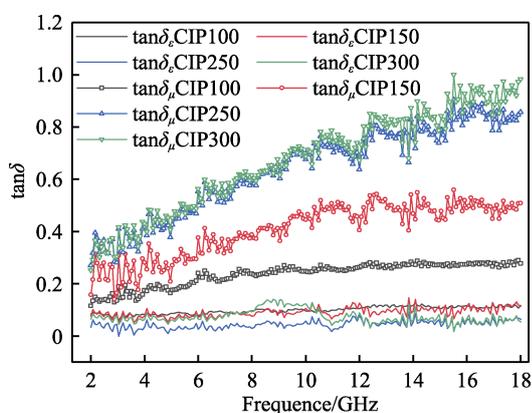


图9 不同含量羰基铁粉的损耗角正切值
Fig.9 Tangent of loss angle of different content carbonyl iron powder

2.3 复合材料的吸波性能

炭黑/羰基铁粉的反射损耗与频率之间的关系如图10所示。通过图10总体可以看出,随着厚度的增加,各组分的峰值均向左移动。图10a、b中,当厚度为1.0 mm时,材料整体的吸波性能较差,虽然羰基铁粉和炭黑的加入能够提升吸波性能,但提升幅度有限,吸波性能整体受厚度限制。当厚度提升到1.5 mm时,添加量较多的CB8-CIP2.5组在高频(12~18 GHz)出现峰值,但是带宽在6 GHz左右,带宽较窄。随着厚度增加到2.0 mm,峰值逐渐左移,吸波带宽都有明显增加,CB2-CIP2.5和CB4-CIP2.5和CB4-CIP1.5组的吸波效果更好。其中,CB4-CIP2.5组的带宽最宽,9~18 GHz的吸收率在90%以上,峰值约为-40 dB。随着厚度继续增加到3.0 mm,带宽变窄,吸波效果减弱。相比于纯炭黑和纯羰基铁粉的结果,将炭黑和羰基铁粉复合的吸波剂能够大幅提升吸波性能。但在厚度较低时,炭黑或羰基铁粉含量过高,同样也会减小峰值,其原因是过高含量的吸波剂使得涂层表面的阻抗匹配大大降低,导致电磁波无法进入材料内部。

比较反射损耗与厚度频率的三维图(图11a—k)可更直观地看出上述问题,还可以看出,厚度为1.5~2.5 mm时,炭黑质量分数为2%和4%、羰基铁粉质量分数为250%的吸波效果较好。涂层厚度为1~1.5 mm时,炭黑质量分数为8%、羰基铁粉质量分数为250%的吸波效果较强。通过观察投影图可以看出,随着厚度的增加,材料出现峰值的频率由高频向低频移动,整体近似为扇形。这主要是因为平板结构在1/4波长的厚度下能够在截面之间形成干涉相消,能够使损耗的介质层与自由空间形成较好的阻抗匹配,从而使得该频率下的反射损耗达到峰值。

不同材料反射损耗的峰值对比如图12所示,虚线代表吸波效率达90%以上(<-10 dB)的分界线。通过图12a、b均可看出,炭黑、羰基铁粉均添加后,相较于添加纯炭黑或纯羰基铁粉的吸波性能明显提高。图12a中,涂层厚度为1.0 mm时,材料的反射损耗均在-10 dB以内,吸波效果不明显,但随着厚度的不断增加,在1.0~2.0 mm时,吸波效果大幅提高。继续增大材料的厚度,吸波效果逐渐下降,但下降趋势较小,表明材料厚度大于2.0 mm后,对吸波效果无明显影响。在炭黑质量分数为2%和4%时,吸波效果较好,变化明显,继续增大炭黑含量后,吸波峰值变差。图12b中,羰基铁粉含量偏高($>100%$)时的吸波效果较好,并且在涂层厚度增加的过程中,吸波效果均为先增加、后减小。

不同厚度下复合涂层的带宽(<-10 dB)如图13所示。-10 dB代表材料对电磁波的吸收率在90%。通过图13a可知,在厚度为1.0 mm时,带宽均为0,表明电磁波的吸收率很低。复合涂层厚度从1.0 mm逐渐提升到2.0 mm的过程中,带宽明显增加,电磁波吸收率有了显著的提高,带宽最大值出现在炭黑质量分数为4%、羰基铁粉质量分数为250%时,近9 GHz。继续增加厚度,带宽逐渐减小,但减小的幅度较小,这与最大峰值出现的规律基本一致。通过对比炭黑含量可以看出,炭黑含量较高的试验组在1.5 mm时的带宽最宽,说明吸收率在90%以上的频率更多,整体吸波性能更好;而炭黑含量较低的复合涂层厚度在2.0~3.0 mm时,带宽均大于高炭黑含量组。另外,相比较于不加炭黑试验组,加少量炭黑能够提高材料的电磁波吸收率。通过图13b可以看出,不加羰基铁粉的试验组,带宽均为0,吸波效果较差,但将羰基铁粉和炭黑复合之后,带宽比之前有了明显增加。与炭黑试验组的试验规律近似,在1.0 mm处电磁波吸收率均比较差,但当涂层厚度增大到2 mm时,涂层的吸收率有了明显的提升,带宽大大增宽。当炭黑质量分数为4%、羰基铁粉质量分数为250%时,带宽达到最大。涂层厚度继续增加,带宽明显变窄,吸波效果减弱。通过比较羰基铁粉含量发现,羰基铁粉质量分数在低于250%时,涂层在2.0 mm处的带宽最宽;当羰基铁粉质量分数大于250%时,涂层在1.5 mm处达到最宽。

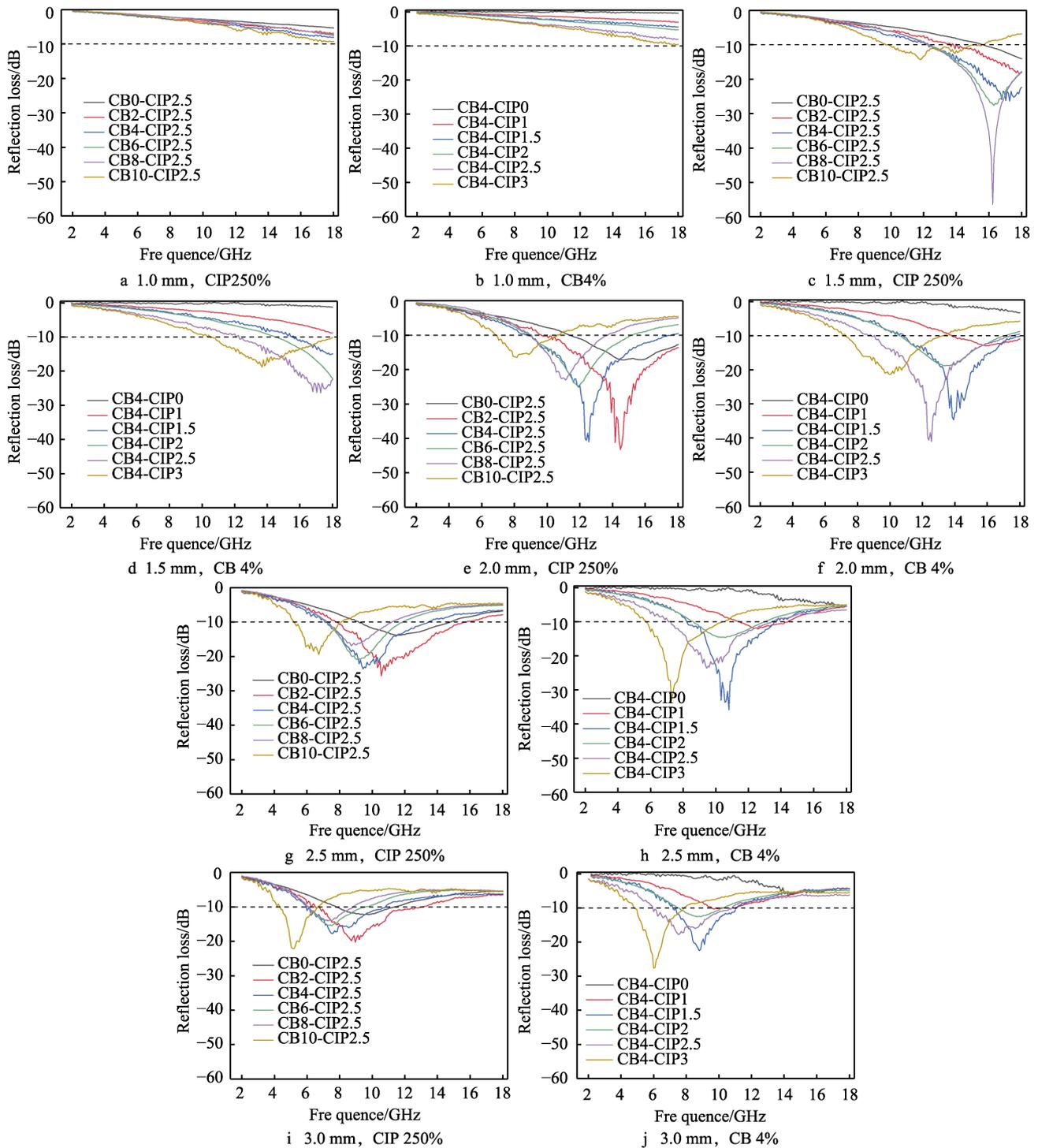


图 10 不同厚度的复合材料反射损耗

Fig.10 Reflection loss diagrams of composites with different thicknesses

通过图 10—13 对吸收带宽 (<-10 dB) 以及峰值的比较, 综合制备过程中的材料特性, 最终选择 4% 炭黑、250% 碳基铁粉作为材料, 制备的涂层厚度为 2 mm 时, 在 9~18 GHz 的吸收率在 90% 以上, 并且峰值出现在 12.5 GHz 左右, 峰值约为 -40 dB。

分析材料的吸波机理可知, 电磁波垂直入射到涂层表面, 大部分被吸波剂的涂层进行损耗, 小部分在界面发生反射。由图 6 和图 9 所示损耗角正切大小可

知, 炭黑/碳基铁粉复合材料的磁损耗角正切远大于介电损耗角正切, 材料的能量转换主要是由磁损耗为主, 介电损耗为辅。磁损耗的损耗机制主要是依赖于磁滞损耗、共振、涡流损耗等机制, 增大电磁波散射^[21]。介电损耗主要是通过炭黑粒子对电磁波的反射和散射, 以及炭黑和碳基铁粉之间的界面极化^[33]。将电阻型损耗机理的炭黑和磁损耗机理为主的碳基铁粉复合能够产生相互作用, 二者适量地混合能够有效减

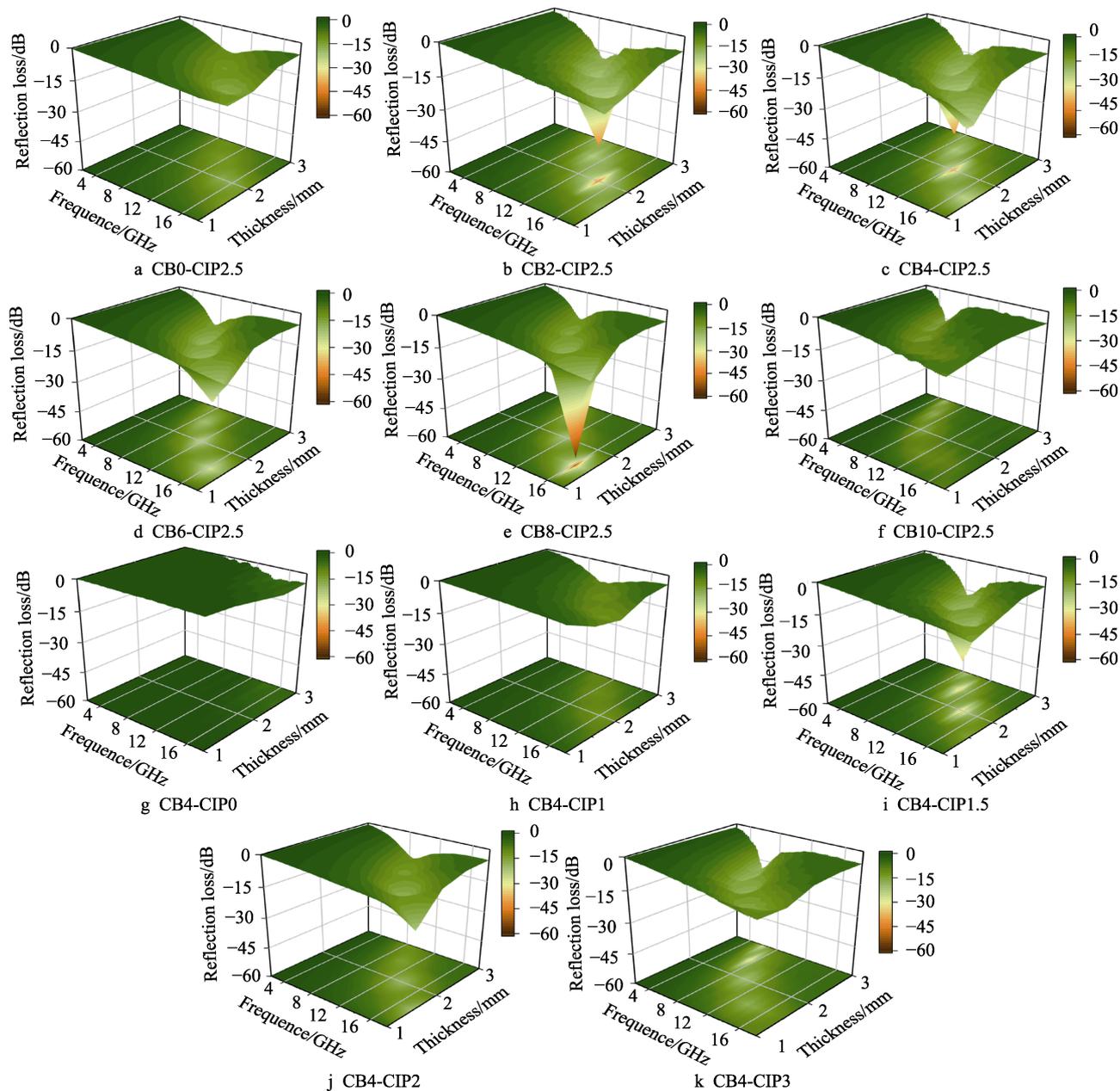


图 11 不同厚度吸波涂层的反射损耗三维图

Fig.11 Three-dimensional graphs of reflection losses of absorbing coatings within different thicknesses

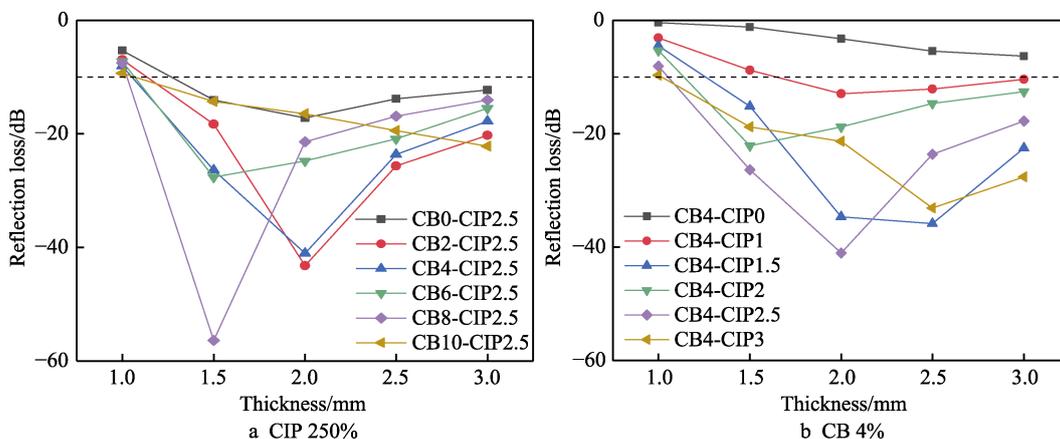
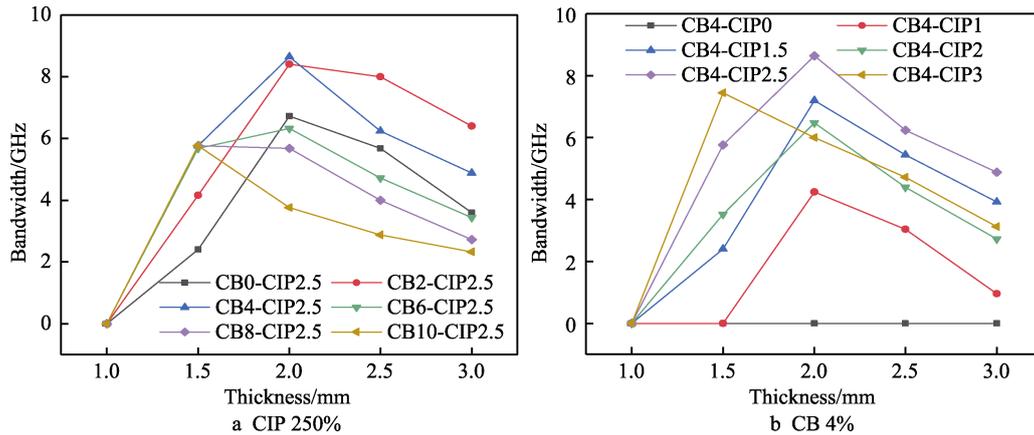


图 12 反射损耗峰值

Fig.12 Peak figure of reflection loss

图 13 不同厚度涂层的带宽 (<-10 dB)Fig.13 Bandwidth diagrams of materials in different thicknesses (<-10 dB)

少炭黑和羰基铁粉的团聚, 形成复合导电网络, 有利于电子跃迁, 并使得涂层内部产生界面极化, 改善了复介电常数和复磁导率, 提高阻抗匹配, 使其利于吸收电磁波, 提高电磁波的吸收带宽和峰值。当其中某一成分过高或单一成分吸波时, 容易产生团聚现象, 形成涡流效应强烈的传导电流, 降低涂层阻抗匹配, 从而影响吸收效果。

3 结论

1) 单纯的炭黑或羰基铁粉的吸波效果较差, 吸收频带较窄, 不适合作为最终的吸波材料应用。

2) 通过确定炭黑/羰基铁粉的配比, 获得更好的吸波效果。当炭黑含量增加时, 材料的介电属性得到加强, 吸波效果有明显提升, 在炭黑的质量分数为 4% 时, 吸波效果最好。进一步提高炭黑含量, 吸波性能降低, 整个过程反射损耗峰值逐渐向左移动。当羰基铁粉含量增加时, 材料的吸波性能提高, 在羰基铁粉质量分数为 250% 时达到最大, 进一步提高羰基铁粉含量, 材料的吸波性能降低, 整个过程中反射损耗峰值逐渐左移。因此, 最终选择 4% 炭黑和 250% 羰基的铁粉作为材料, 其整体的吸波性能较好。

3) 通过仿真分析不同厚度的吸波涂层对吸波性能的影响, 本文设计的涂层厚度为 2 mm, 吸波带宽 (<-10 dB) 覆盖 9~18 GHz, 达到了宽频吸收微波的性能。

参考文献:

- [1] 李彬, 李仁林, 冀志江, 等. 角锥结构炭黑/水泥基复合材料的吸波性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(6): 1-5. LI Bin, LI Ren-lin, JI Zhi-jiang, et al. Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Carbon Black/Cement-Based Materials with Pyramidal Structures[J]. New Building Materials, 2020, 47(6): 1-5.
- [2] BALL P. New Lessons for Stealth Technology[J]. Nature Materials, 2021, 20(1): 4.
- [3] LEE I G, YOON S H, LEE J S, et al. Design of Wideband Radar Absorbing Material with Improved Optical Transmittance by Using Printed Metal-Mesh[J]. Electronics Letters, 2016, 52(7): 555-557.
- [4] AHMAD H, TARIQ A, SHEHZAD A, et al. Stealth Technology: Methods and Composite Materials—A Review[J]. Polymer Composites, 2019, 40(12): 4457-4472.
- [5] STERGIOU C A, LITSARDAKIS G. Y-Type Hexagonal Ferrites for Microwave Absorber and Antenna Applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 405: 54-61.
- [6] LU Shao-ze, HUANG Jun, SONG Lei, et al. A Study on Zoning Coating Method of Absorbing Materials for Stealth Aircraft[J]. Optik, 2020, 208: 163912.
- [7] HOUBI A, ALDASHEVICH Z A, ATASSI Y, et al. Microwave Absorbing Properties of Ferrites and Their Composites: A Review[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 529: 167839.
- [8] 燕佳欣, 吴建华, 时君友, 等. 雷达吸波涂层材料的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 155-169. YAN Jia-xin, WU Jian-hua, SHI Jun-you, et al. Research Progress of Radar Absorbing Coating Materials[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 155-169.
- [9] ZHOU Wei, LONG Lan, BU Guo-bin, et al. Mechanical and Microwave-Absorption Properties of Si_3N_4 Ceramic with SiCNFs Fillers[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(5): 1800665.
- [10] LIU Wei, TAN Shu-juan, YANG Zhi-hong, et al. Hollow Graphite Spheres Embedded in Porous Amorphous Carbon Matrices as Lightweight and Low-Frequency Microwave Absorbing Material through Modulating Dielectric Loss[J]. Carbon, 2018, 138: 143-153.
- [11] AL-HARTOMY O A, AL-GHAMDI A, DISHOVSKY N, et al. Comparison of Microwave Absorbing Properties of Chloroprene Rubber Composites Containing Carbon Black and Nickel/Cobalt Powder[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2013, 45(5): 471-485.
- [12] LING Qin-cai, SUN Jian-zhong, ZHAO Qian, et al. Effects of Carbon Black Content on Microwave Absorbing and

- Mechanical Properties of Linear Low Density Polyethylene/Ethylene-Octene Copolymer/Calcium Carbonate Composites[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2011, 50(1): 89-94.
- [13] BU Ai-ming, ZHANG Yong-fu, XIANG Yan, et al. Formation of Laminated Nano-Coatings for Enhanced Anti-Oxidation and Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Carbon Fiber[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 9153-9161.
- [14] SHEN Zhou-zhou, CHEN Jun-hong, LI Bin, et al. Recent Progress in SiC Nanowires as Electromagnetic Microwaves Absorbing Materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 815: 152388.
- [15] 王希晰, 曹茂盛. 特色研究报告: 低维电磁功能材料研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 18-28.
WANG Xi-xi, CAO Mao-sheng. Low-Dimensional Electromagnetic Functional Materials[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 18-28.
- [16] THI Q V, LIM S, JANG E, et al. Silica Particles Wrapped with Poly(Aniline-Co-Pyrrole) and Reduced Graphene Oxide for Advanced Microwave Absorption[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 244: 122691.
- [17] 疏金成, 曹茂盛. 石墨烯基电磁功能材料[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 29-40.
SHU Jin-cheng, CAO Mao-sheng. Graphene-Based Electromagnetic Functional Materials[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 29-40.
SHU Jin-cheng, CAO Mao-sheng. Graphene-Based Electromagnetic Functional Materials[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 29-40.
- [18] CHEN S H, KUO W S, YANG R B. Microwave Absorbing Properties of a Radar Absorbing Structure Composed of Carbon Nanotube Papers/Glass Fabric Composites[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2019, 16(5): 2065-2072.
- [19] SONG Wei-li, CAO Mao-sheng, HOU Zhi-ling, et al. High-Temperature Microwave Absorption and Evolutionary Behavior of Multiwalled Carbon Nanotube Nanocomposite[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 61(2): 201-204.
- [20] GAO Yu, WANG Zhi, SHI Rui-min, et al. Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Ti Doped Li-Zn Ferrites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 805: 934-941.
- [21] 罗强, 刘甲, 曹茂盛. 典型低维过渡金属材料电磁波吸收性能研究进展[J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2017, 34(1): 54-68.
LUO Qiang, LIU Jia, CAO Mao-sheng. Research Progress on Electromagnetic Wave Absorption Performance of Typical Low-Dimensional Transition Metal Materials[J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2017, 34(1): 54-68.
- [22] 卢明明, 刘甲, 宫元勋, 等. 不同形貌羰基铁的复合对电磁特性及吸波性能的影响[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 95-99.
LU Ming-ming, LIU Jia, GONG Yuan-xun, et al. Electromagnetic Characteristics and Microwave Absorption Properties of Carbonyl Iron Composites with Different Morphologies[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 95-99.
- [23] ZHANG Yu-hong, XU Jing-feng, FENG Yong-bao, et al. Hot-Air Aging Failure Mechanisms of Carbonyl Iron Powder/Methyl Vinyl Silicone Rubber Microwave-Absorbing Materials[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2018, 37(8): 3262-3275.
- [24] WU K H, TING T H, WANG G P, et al. Effect of Carbon Black Content on Electrical and Microwave Absorbing Properties of Polyaniline/Carbon Black Nanocomposites[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008, 93(2): 483-488.
- [25] 汤进, 林斌, 王勇, 等. 轻质 CB/RGO 复合涂层的制备及其吸波性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 100-108.
TANG Jin, LIN Bin, WANG Yong, et al. Preparation and Microwave Absorption Properties of Lightweight CB/RGO Composite Coating[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 100-108.
- [26] YANG Dong, YIN Yi-fa, ZHANG Zhi-kun, et al. Wide-Angle Microwave Absorption Properties of Multilayer Metamaterial Fabricated by 3D Printing[J]. *Materials Letters*, 2020, 281: 128571.
- [27] WEI Hong-yu, ZHANG Zhi-ping, ZHOU Lai-shui, et al. Influence of Heat Treatment on the Microwave Absorption Properties of Flaky Carbonyl Iron Powder[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2020, 3(3): 258-264.
- [28] WANG Meng, DUAN Yu-ping, LIU Shun-hua, et al. Absorption Properties of Carbonyl-Iron/Carbon Black Double-Layer Microwave Absorbers[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 321(20): 3442-3446.
- [29] 栗志, 郝万军, 王运鹏, 等. 高强耐热型硫氧镁复合吸波涂层的设计与制备[J]. *功能材料*, 2020, 51(10): 10179-10184.
LI Zhi, HAO Wan-jun, WANG Yun-peng, et al. Design and Preparation of High-Strength Heat-Resistant Magnesium Oxysulfide Composite Wave-Absorbing Coating[J]. *Journal of Functional Materials*, 2020, 51(10): 10179-10184.
- [30] LIU Li-dong, DUAN Yu-ping, MA Li-xin, et al. Microwave Absorption Properties of a Wave-Absorbing Coating Employing Carbonyl-Iron Powder and Carbon Black[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 257(3): 842-846.
- [31] SHEN Xiang-zhong, XIE Shan-mei, GUO Jun, et al. Microwave Absorbing Properties of Ternary Linear Low-Density Polyethylene/Carbonyl Iron Powder/Carbon Black Composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114(6): 3434-3439.
- [32] 丁文皓, 于名讯, 朱洪立, 等. EP/SCF 吸波涂层的介电性能和吸波效果研究[J]. *工程塑料应用*, 2008, 36(5): 26-29.
DING Wen-hao, YU Ming-xun, ZHU Hong-li, et al. Study on Dielectric Property and Absorbing Property of Ep/Scf Coating[J]. *Engineering Plastics Application*, 2008, 36(5): 26-29.
- [33] LU Ming-ming, CAO Mao-sheng, CHEN Yi-hua, et al. Multiscale Assembly of Grape-Like Ferroferric Oxide and Carbon Nanotubes: A Smart Absorber Prototype Varying Temperature to Tune Intensities[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(34): 19408-19415.