

# 磁损耗吸波涂层的损耗特性

姜晓文 黄大庆 何山 王智勇 周淳

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**文 摘** 为研究磁损耗吸波涂层的损耗特性,选取了两种羰基铁粉吸收剂及一种铁氧体吸收剂,采用同轴法测试了材料电磁参数,并计算了频率为1~18 GHz电磁波在吸波涂层中的衰减常数、相位常数和波长,考察了电磁波在吸波涂层中的衰减率,计算了吸波涂层对电磁波的输入阻抗和反射率。结果表明,厚度为2 mm的S型吸波涂层对频率为18 GHz的电磁波的衰减率达到-24.9 dB,电磁波能量下降为原来的0.3%。三种吸波涂层输入阻抗实部 $\text{Re}(Z_{in})$ 最大值对应频率与反射率最大值对应频率值基本相等。输入阻抗实部 $\text{Re}(Z_{in})$ 与自由空间中本征阻抗匹配性能不是决定涂层反射率的唯一重要因素。

**关键词** 磁损耗,衰减常数,阻抗匹配,相位常数,吸波涂层

中图分类号:TB34

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.01.007

## Electromagnetic Loss Mechanisms of Magnetic Loss Radar Absorbing Coatings

JIANG Xiaowen HUANG Daqing HE Shan WANG Zhiyong ZHOU Chun

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

**Abstract** To study loss mechanisms of magnetic loss radar absorbing coatings (RACs), two kinds of carbonyl iron powders and a kind of ferrite were used. The permeability and permittivity were tested by coaxial method, the attenuation constant, phase constant, wavelength, and attenuation loss of microwave with frequencies at 1~18 GHz in RACs were investigated. And the input impedance of RACs on microwave were calculated. The results show that the attenuation loss of microwave at 18 GHz by type S absorbing coating with thickness of 2 mm is -24.9 dB, which shows the electromagnetic energy is reduced to only 0.3% of the original energy. These frequencies of maximum of real input impedance  $\text{Re}(Z_{in})$  of RACs stay the same with frequencies of maximum of reflection loss of radar absorbing materials separately. The impedance matching of real input impedance  $\text{Re}(Z_{in})$  of RACs with intrinsic impedance of free space is not the only factor of reflection loss of radar absorbing coatings.

**Key words** Magnetic loss, Attenuation constant, Impedance matching, Phase constant, Radar absorbing coating

### 0 引言

随着电子工业的迅猛发展,高效吸波材料研制成为研究热点<sup>[1-5]</sup>。在种类繁多的吸波材料中,磁损耗型吸波材料应用最广泛和成熟。由羰基铁粉作为吸收剂填料制备的涂覆型吸波涂层,是应用较早的一类磁损耗微波吸收材料,具有磁导率高,磁损耗大等优点,是薄层吸波材料的主要吸收剂之一<sup>[6-7]</sup>。

刚骏涛等<sup>[8]</sup>制备SiO<sub>2</sub>包覆羰基铁粉复合吸波剂,用Agilent/HP-8720ET矢量网络分析仪对样品进行吸波性能分析,当吸波剂的涂覆层厚度为 $d=1.9$  mm

时,在6.4~11.4 GHz波段范围的反射吸收率小于-10 dB,最低反射率达到-58.6 dB。胡晶等<sup>[9]</sup>用多元助剂有效降低羰基铁粉的复介电常数,增加复磁导率虚部,提高吸波材料的电磁匹配性能,改善吸收剂的低频吸收效果,在厚度为2 mm时,三元助剂改性羰基铁粉的反射损耗峰值在2 GHz附近达到-15 dB。WEI等<sup>[10]</sup>利用高能球磨制备了纳米片状羰基铁粉并测试了材料电磁参数,结果表明频率为2 GHz时,磁导率实部达到3.2。YOO等<sup>[11]</sup>制备了尖晶石型铁氧体 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ( $x=0.4, 0.5, 0.6$ ),并模拟计算了材料

收稿日期:2021-04-28

第一作者简介:姜晓文,1988年出生,硕士,主要从事吸波涂层材料研究工作。E-mail:huaxuexiaowen@126.com

吸波性能,结果表明吸波材料厚度为5.6 mm时,对频率为2.9 GHz的电磁波反射率达到-60 dB。

目前关于吸波涂层电磁参数和涂层反射率方面研究较多,但在吸波涂层衰减常数、衰减率,以及 $\text{Re}(Z_{in})$ 对反射率影响方面报道较少。本文测试磁损耗吸收剂电磁参数,分析吸波涂层对电磁波的衰减常数和衰减率,计算了电磁波在吸波涂层中的相位常数和波长,然后研究吸波涂层对电磁波的输入阻抗,以及输入阻抗对涂层反射率的影响。

## 1 实验

### 1.1 材料

石蜡:工业级;微波吸收剂X,工业级,北京航空材料研究院;微波吸收剂S、微波吸收剂K,工业级,南京大学。

### 1.2 实验方法

材料的频率为1~18 GHz复介电常数和复磁导率基于同轴法采用矢量网络仪进行测定;测试设备为HP8722ES矢量网络分析仪,根据传输线理论模拟计算出吸波涂层对电磁波的衰减常数、衰减率,电磁

波在涂层中的波长、相位常数,以及涂层对电磁波的输入阻抗、反射损耗等。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸收剂电磁参数

选取了三种磁损耗型吸收剂,其中S型和X型属于羰基铁粉类吸收剂,K型属于铁氧体类吸收剂。将上述吸收剂按比例与石蜡共混,制备成吸波材料,并测试电磁参数,然后依据电磁参数计算吸波材料及吸波涂层的各种性能数据。表1是三种磁性吸收剂添加含量。

表1 三种吸波材料中吸收剂的种类及质量分数

Tab. 1 Lossy materials and mass percent in the three kinds of radar absorbing materials

Sample	Lossy materials	Mass percent/%
X-1	X carbonyl iron	45
X-2	X carbonyl iron	50
X-3	X carbonyl iron	55
X-4	X carbonyl iron	60
S	S carbonyl iron	50
K	K ferrite	50

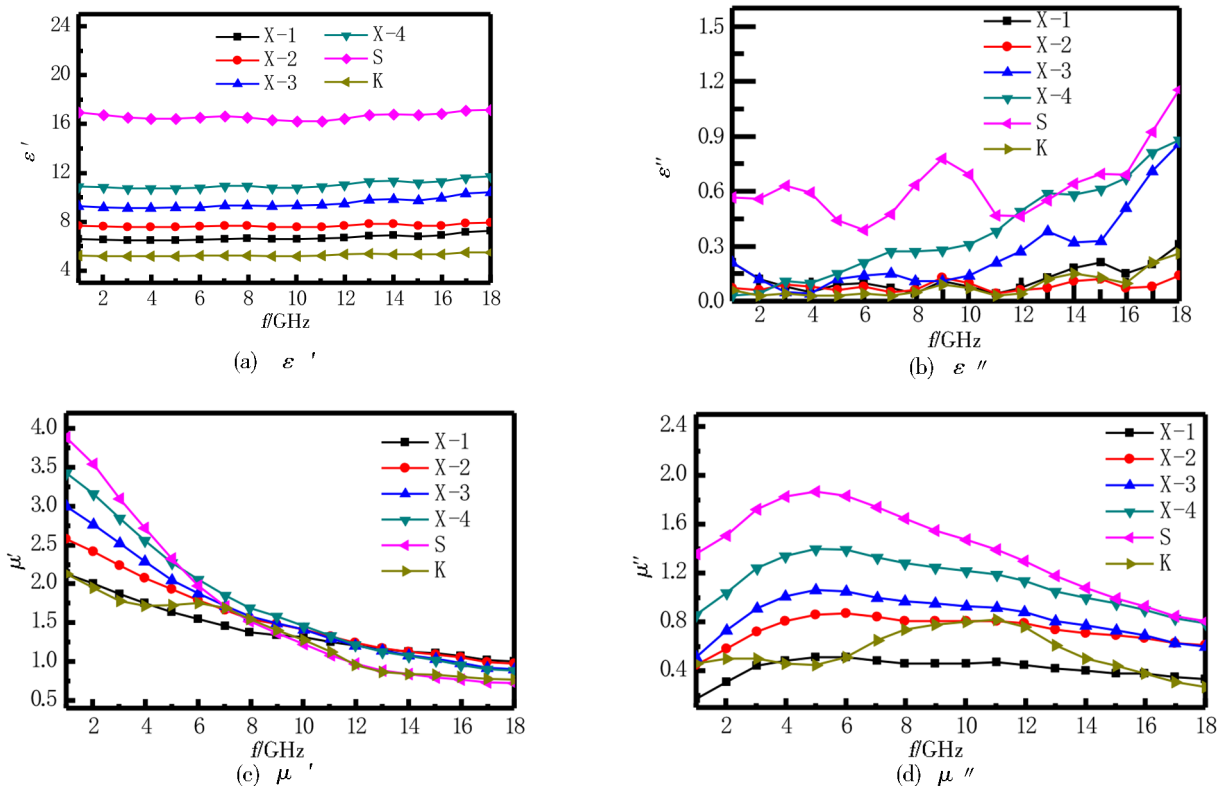


图1 三种吸波涂层电磁参数

Fig. 1 Electromagnetic parameters of the microwave absorbing coatings

图1是吸收剂在电磁波频率为1~18 GHz的电磁参数曲线。从图1(a)可以看出,三种吸收剂的 $\epsilon'$ 随频率变化而基本保持不变,其中S型吸收剂 $\epsilon'$ 最

大,为17左右,K型吸收剂 $\epsilon'$ 最小,为5左右。对于X型吸收剂,介电常数实部 $\epsilon'$ 随吸收剂质量分数增加而逐渐增大,表明材料储存电磁波能量能力变大<sup>[8]</sup>。

从图1(c)可以看到,三种吸收剂的 $\mu'$ 在1~18 GHz范围内均随频率增大而逐渐减小,表明三种吸收剂的磁存储能力随频率增加而逐渐下降<sup>[9]</sup>。从图1(d)可以看到,三种吸收剂的 $\mu''$ 在1~18 GHz范围内均随频率增大而呈先增大后减小的规律,其中S型、X型吸收剂 $\mu''$ 极大值均在频率为5 GHz附近,而K型吸收剂 $\mu''$ 极大值在11 GHz附近。

## 2.2 电磁波在吸波涂层中的复波数

分析时谐平面电磁波(以下简称电磁波)进入吸波涂层并在其中传播的情况,图2是电磁波在涂层表面以及内部发生传播的过程示意图<sup>[12]</sup>,其中吸波涂层涂覆于金属基材表面(近似为理想导体)。

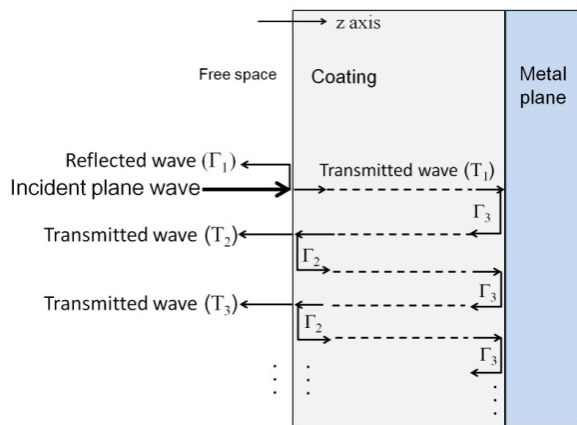
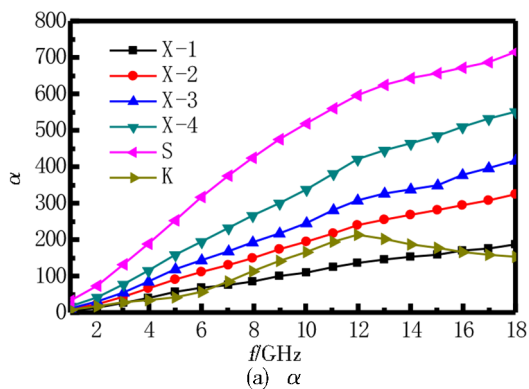


图2 电磁波在吸波涂层表面以及内部发生传播的过程示意图

Fig. 2 Scheme of propagation of plane wave in the microwave absorbing coating

根据麦克斯韦方程和亥姆霍兹方程,求解得到沿 $z$ 方向传播的电磁波在吸波涂层中总电场为

$$E = E^+ e^{-\gamma z} + E^- e^{+\gamma z} \quad (1)$$



其中复波数 $\gamma$ 为:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega(\epsilon\mu)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 为衰减常数, $\beta$ 为相位常数<sup>[12]</sup>, $j$ 为虚数, $\omega$ 为角频率。 $E^+$ 和 $E^-$ 分别为正向、反向传播的电磁波电场振幅。

对于图2中的透射波 $T_1$ ,其在吸波涂层中传播 $d$ 距离( $d$ 为涂层厚度)后到达金属基材,在金属基材表面发生完全反射,传播方向发生 $180^\circ$ 改变,并继续在吸波涂层中传播 $d$ 距离后到达涂层表面。在此过程中,电磁波发生衰减,根据公式(3)可由衰减常数求得衰减后的电场振幅 $E^{+'}$ ,根据公式(4)可求得电磁波在吸波涂层中的衰减率 $R_\alpha$ 。

$$E^{+'} = E^+ e^{-2\alpha d} \quad (3)$$

$$R_\alpha = 20 \lg \frac{E^{+'}}{E^+} \quad (4)$$

电磁波在吸波涂层中衰减是决定涂层吸波性能的重要因素<sup>[9]</sup>。图3(a)是频率为1~18 GHz的电磁波在涂层内的衰减常数,从图中可以看出,S型和X型吸波涂层的衰减常数随频率增加而逐渐增大,表明吸波涂层衰减电磁波能力逐渐增大。对于X型吸波涂层,衰减常数随吸收剂质量分数增加而逐渐增大,表明材料衰减电磁波能量能力随吸收剂质量分数增加而逐渐变大。

图3(b)是电磁波在厚度为2 mm涂层内的衰减率计算结果,从图中可以看出,频率为18 GHz的电磁波在S型吸波涂层中衰减率为-24.9 dB,由于电磁波能量与电场振幅平方成正比,即电磁波场强振幅降为原振幅的5.7%,电磁波能量下降为原来的0.3%,衰减效果非常明显。

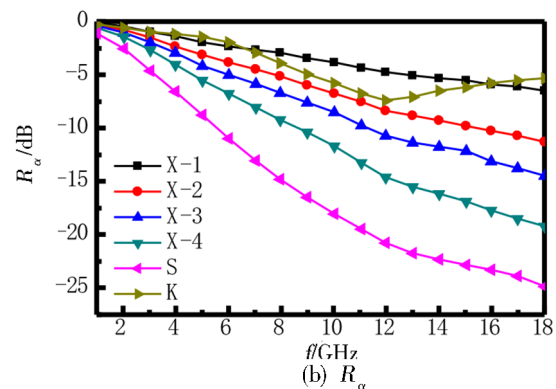


图3 电磁波在三种吸波涂层中衰减常数与衰减率

Fig. 3 Attenuation constant and energy loss of the microwave in microwave absorbing coatings

图4(a)是频率为1~18 GHz的电磁波在涂层内的相位常数,从图中可以看出,相位常数在随频率增加而逐渐增大,且均大于在自由空间中的相位常数。根据公式(5)可以由相位常数 $\beta$ 求得电磁波在材料中

的波长<sup>[12]</sup>;

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (5)$$

图4(b)是频率为1~18 GHz的电磁波在吸波涂层航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第1期

层内的波长,从图中可以看出,电磁波吸波涂层的波长在1~18 GHz范围内随频率增加而逐渐减小;电磁波在S型吸波涂层中波长最小,在K型吸波涂层中波

长最大。对于X型吸波涂层,电磁波波长随吸收剂质量分数增加而逐渐减小。

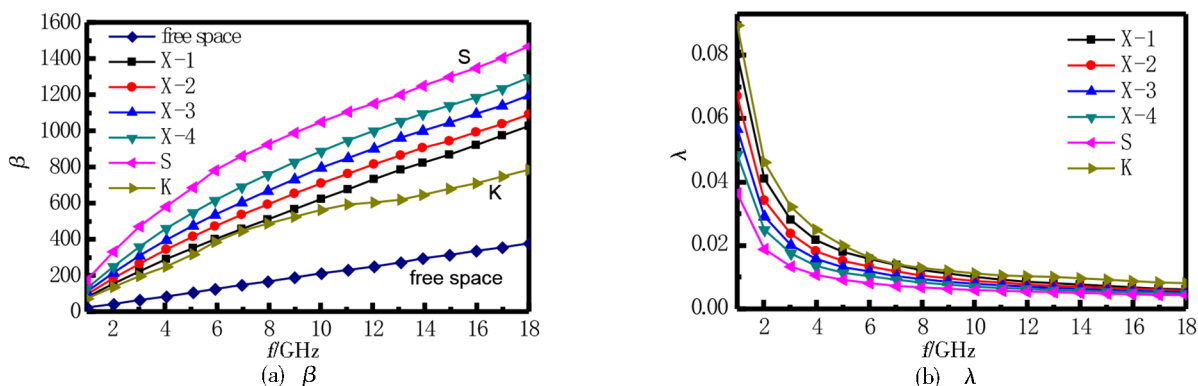


图4 电磁波在三种吸波涂层中相位常数与波长

Fig. 4 Phase constant and wavelength of microwave in microwave absorbing coatings

### 2.3 吸波涂层阻抗性能

阻抗匹配是决定吸波材料吸波性能的另一重要因素<sup>[13]</sup>。公式(6)为涂覆于金属基板上的吸波涂层输入阻抗计算公式。从公式可以看出,材料输入阻抗与厚度有关,根据公式(6)计算了吸波涂层在厚度2 mm时的输入阻抗,并计算了X-1型吸波涂层不同厚度下的输入阻抗。

$$Z_{in} = \eta \tanh yd = (\epsilon\mu)^{\frac{1}{2}} \tanh yd \quad (6)$$

图5(a)是吸波涂层在厚度2 mm时的输入阻抗

实部  $Re(Z_{in})$  曲线,可以看出,S型、X型吸波涂层  $Re(Z_{in})$  在1~18 GHz范围内随频率增加呈现先增大后减小的规律。X-1型吸波涂层对频率为12.73 GHz的电磁波  $Re(Z_{in})$  达到578.2  $\Omega$ ,明显高于自由空间本征阻抗值376.7  $\Omega$ 。对于X型吸波涂层,吸波涂层输入阻抗实部最大值随吸收剂质量分数增加逐渐减小;同时,吸波涂层  $Re(Z_{in})$  最大值随吸收剂质量分数增加逐渐向低频移动。图5(b)是不同厚度下X-1型吸波涂层  $Re(Z_{in})$ ,可以看出,  $Re(Z_{in})$  最大值随吸波涂层厚度增加逐渐向低频移动。

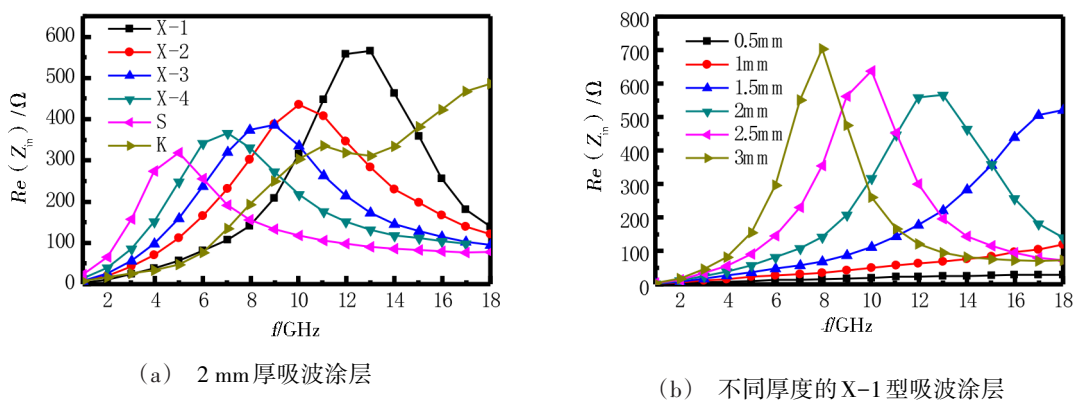


图5 三种吸波涂层对电磁波输入阻抗实部

Fig. 5 The real part of input impedance of microwave absorbing coatings

### 2.4 吸波涂层反射率

图6(a)是利用电磁参数计算得到的厚度为2 mm的涂层对电磁波的反射率,可以看出,S型吸波涂层反射率最大值对应频率最低,在5 GHz附近。对于X型吸波涂层,反射率最大值随吸收剂质量分数增加逐渐变大。图6(b)是不同厚度下X-1型吸波涂层对电磁波的反射率,可以看出,X-1型吸波涂层反射率

最大值随吸波涂层厚度增加逐渐向低频移动。将图6(a)与图5(a)对比可以看出,S型吸波涂层  $Re(Z_{in})$  最大值与反射率最大值均在5 GHz附近,两者对应频率值基本相等,对于X型吸波涂层和K型吸波涂层均有类似规律。

表2是吸波涂层的  $Re(Z_{in})$  与在自由空间中本征阻抗匹配情况,从表中可以看出,S型吸波涂层对频

率为 4.83 GHz 的电磁波的  $\text{Re}(Z_{in})$  为  $321.5 \Omega$ , 与自由空间中本征阻抗  $376.7 \Omega$  差值最小, 匹配最好; 对于 S 型、X 型吸波涂层, 其对电磁波  $\text{Re}(Z_{in})$  均可与自由空间中本征阻抗实现完全匹配。另外, 对于 X 型

吸波涂层, 当  $\text{Re}(Z_{in})$  与  $\eta_0$  匹配较好或者完全相等时, 涂层反射率并不是最大值, 表明电磁波  $\text{Re}(Z_{in})$  与自由空间中本征阻抗匹配性能不是决定涂层反射率的唯一重要因素。

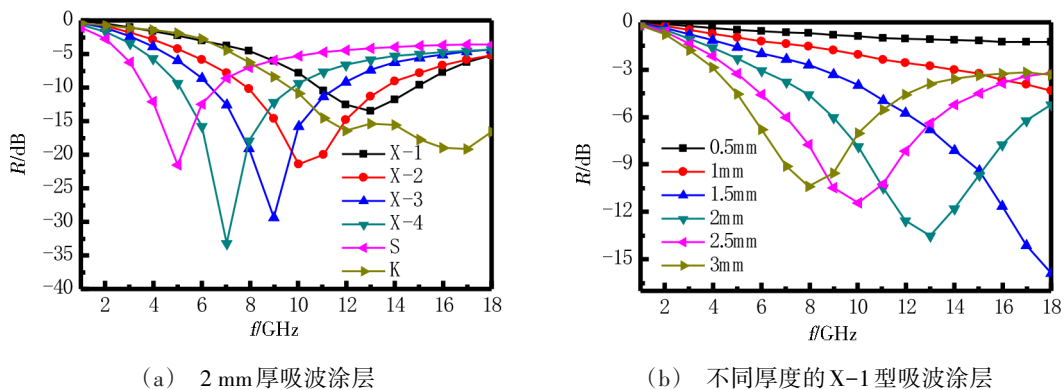


图6 三种吸波涂层的反射率

Fig. 6 Reflection loss of three kinds of microwave absorbing coatings

表2 电磁波在吸波涂层的  $\text{Re}(Z_{in})$  与在自由空间中本征阻抗 ( $\eta_0$ ) 匹配情况

Tab. 2 Impedance matching between real part of input impedance ( $Z_{in}$ ) and wave impedance ( $\eta_0$ ) of free space

Sample	$f/\text{GHz}$	$d/\text{mm}$	$\text{Re}(Z_{in})/\Omega$	$R/\text{dB}$
X-1	15.28	1.5	377.8	-9.9
X-1	8.14	2.5	386.3	-8.2
X-1	11.37	2.5	384.2	-9.4
X-1	6.44	3	377.3	-7.6
X-1	9.42	3	370.3	-8.5
X-1	10.52	2	383.5	-9.2
X-1	14.94	2	369.7	-9.9
X-2	8.82	2	375.4	-13.7
X-2	11.46	2	377.7	-17.4
X-3	7.97	2	376.7	-19.1
X-3	9.33	2	375.3	-21.9
X-4	6.86	2	364.3	-29.1
S	4.83	2	321.5	-21.6
K	16.64	2	380.8	-15.6
Free space ( $\eta_0$ )	-	2	376.7	-

### 3 结论

(1) 三种吸收剂的  $\epsilon'$  随频率变化而基本保持不变, 其中 S 型吸收剂  $\epsilon'$  最大, 为 17 左右, K 型吸收剂  $\epsilon'$  值最小, 为 5 左右。对于 X 型吸收剂, 介电常数实部  $\epsilon'$  随吸收剂质量分数增加而逐渐增大。

(2) S 型、X 型吸波涂层的衰减常数在 1 ~ 18 GHz 范围内随频率增加而逐渐增大。对于 X 型吸波涂

层, 衰减常数随吸收剂质量分数增加而逐渐增大。对于 S 型吸波涂层, 频率为 18 GHz 的电磁波在其中衰减率为 -24.9 dB, 衰减效果非常明显。

(3) S 型、X 型吸波涂层对电磁波的输入阻抗实部在 1 ~ 18 GHz 范围内随频率增加而呈现先增大后减小的规律。X-1 型吸波涂层输入阻抗实部最大值随吸收剂质量分数增加逐渐向低频移动。X-1 型吸波涂层输入阻抗实部最大值随吸波涂层厚度增加逐渐向低频移动。

(4) 三种吸波涂层输入阻抗实部最大值对应频率与反射率最大值对应频率值基本相等。三种吸波涂层对电磁波输入阻抗  $Z_{in}$  实部与自由空间中本征阻抗匹配性能不是决定涂层反射率的唯一重要因素。

### 参考文献

[1] SASRIA N, Ardhyanta H, Fajarin R, et al. Synthesis and characterization of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ /poly (aniline, pyrrole, ethylene terephthalate) composites coatings as radar absorbing material (RAM) [J]. Journal of Physics: Conf. Series, 2017, 877:012057.

[2] 张彪, 陈乐, 孙惠敏, 等. MNZ 材料在蜂窝吸波结构中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(6): 55-58.

ZHANG B, CHEN L, SUN H M, et al. Application of MNZ material in honeycomb absorbing structure [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(6): 55-58.

[3] 张龙, 万晓娜, 段文静, 等.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @聚吡咯@聚苯胺核壳结构的制备及吸波性能[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(1): 185-192.

ZHANG L, WAN X N, DUAN W J, et al. Synthesis and microwave absorption performance of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @PPy@PANI 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第1期

composites [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2018, 39(1): 185-192

[4] 马志军, 莽昌焯, 王俊策, 等. 三种金属离子掺杂对纳米镍锌铁氧体吸波性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(12): 909-917.

MA Z J, MANG C Y, WANG J C, et al. Influence of doping with metal ions  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  on absorbability of nano Ni-Zn ferrite[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(12): 909-917.

[5] 何山, 李业华, 周淳. 一种多层胶板雷达吸波材料[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4): 41-46.

HE S, LI Y H, ZHOU C. A multilayer rubber board radar absorbing materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(4): 41-46.

[6] 周莉, 柳汀, 郑典亮, 等. 选择表面工艺改性的CIPs涂层及其氧化物的吸波性能[J]. 材料工程, 2019, 47(9): 132-138.

ZHOU L, LIU T, ZHENG D L, et al. Absorbing properties of CIPs coatings and oxides modified by selective surface technology [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(9): 132-138.

[7] 王信刚, 汪兴京, 夏龙, 等. 羰基铁粉改性环氧树脂/乙基纤维素微胶囊的吸波性能[J]. 材料研究学报, 2019, 33(11): 824-830.

WANG X G, WANG X J, XIA L, et al. Wave-absorption properties of epoxy/ethyl cellulose microcapsule modified by carbonyl iron powder [J]. Chinese Journal of Materials

Research, 2019, 33(11): 824-830.

[8] 刚骏涛, 冯旺军, 李靖, 等. 以 APTES 为硅源制备  $\text{SiO}_2$  包覆羰基铁粉的吸波性能[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(5): 773-777, 799.

GANG J T, FENG J W, LI J, et al. Microwave absorption of  $\text{SiO}_2$ @carbonyl iron powder prepared by using APTES as the silica source [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(5): 773-777, 799.

[9] 胡晶, 谢国治, 顾家新, 等. 多元助剂改性羰基铁粉雷达波低频吸波性能研究[J]. 材料导报 B, 2018, 32(4): 520-524.

HU J, XIE G Z, GU J X, et al. Low frequency radar wave absorbing performance of carbonyl iron powder modified by compound auxiliary agents [J]. Materials Reports (B), 2018, 32(4): 520-524.

[10] WEI H Y, ZHANG Z P, ZHOU L S, 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.

[11] YOO J E, KANG Y M. Electromagnetic wave absorbing properties of Ni-Zn ferrite powder - epoxy composites in GHz range [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 513: 167075.

[12] POZAR D. Microwave Engineering [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[13] KNOTT E F, SHAEFFER J F, TULEY M T. Radar Cross Section [M]. Raleigh: SciTech Publishing, Inc., 2004.