

电磁波在吸波涂层中的干涉现象

姜晓文 黄大庆 何山 王智勇 赵云龙

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要 为研究电磁波在吸波涂层中的干涉现象,选取了X型羰基铁粉吸收剂,采用同轴法测试了材料电磁参数,通过多次反射方法求解了X型吸波涂层在厚度为1/4波长时反射系数公式;另外,求解了不同厚度X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz平面电磁波反射系数公式,取公式前6项计算了反射系数 Γ_a 和反射率 R_a 。结果表明,多次反射波之间产生了干涉行为,发生了干涉相消现象。 Γ_a 、 R_a 分别与传输线方法计算的 Γ 和 R 的值非常接近,表明 Γ_a 和 R_a 可以近似代表X-1型吸波涂层对9.5 GHz电磁波的反射系数和反射率。当X-1型吸波涂层厚度小于1.9 mm或在3.2~6.6 mm时,第二反射波对第一反射波起到干涉相长作用,降低吸波性能,表明优选的吸波涂层厚度应该介于1.9~3.2 mm。

关键词 吸波涂层,干涉,多次反射,反射系数,羰基铁粉

中图分类号:TB34

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.05.006

Interference Phenomenon of Electromagnetic Wave in Radar Absorbing Coatings

JIANG Xiaowen HUANG Daqing HE Shan WANG Zhiyong ZHAO Yunlong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract Type X carbonyl iron powder mixed with different proportions of paraffin were used for testing permeabilities and permittivities of these materials to study interference phenomenon of electromagnetic wave in radar absorbing coatings (RACs). The formula of reflection coefficient of type X RACs to plane electromagnetic wave with the thickness of quarter-wavelength was solved by the method of multiple reflections. And the formula of reflection coefficient of type X RAC to plane electromagnetic wave of frequency at 9.5 GHz with different thickness was also solved in which the first six terms were chosen for calculating reflection coefficient Γ_a and reflectivity R_a . The results show that interference phenomenon is caused by the multiple reflections of wave. The value of Γ_a and the value of reflection coefficient Γ calculated by method of transmission line are close to each other which shows Γ_a and R_a can approximately represent Γ and reflectivity R of type X RAC separately. If the thickness of type X RAC is smaller than 1.9 mm or in the range from 3.2 to 6.6 mm, the second reflected wave will enhance the first reflected wave and increase the reflectivity which indicates the optimum thickness of type X RAC is in the area from 1.9 to 3.2 mm.

Key words Radar absorbing coating, Interference, Multiple reflections, Reflection coefficient, Carbonyl iron powder

0 引言

干涉是电磁波的基本性质之一。电磁波在吸波材料中会发生干涉现象,通常吸波材料厚度等于电磁波1/4波长时,干涉现象导致电磁波发生部分或完全相消现象^[1-4]。

刘虎腾等制备乙二胺视黄基席夫碱盐,采用微波矢量网络分析仪测量2~18 GHz频率范围的电磁参数并计算其反射率,探讨影响稀土配合视黄基席夫碱盐吸波性能的主要因素及机理。结果表明La³⁺配合席夫碱于12.9 GHz处反射率达-16 dB^[5]。李泽等利用1/4波长干涉相消理论对制备的三种不同

CoFe₂O₄含量的羰基铁/CoFe₂O₄核壳结构粉体的反射损耗峰频率与电磁参数间的关系进行了研究,结果表明各样品的吸收峰频率由 $\sqrt{|\epsilon_r||u_r|}$ 决定,随着CoFe₂O₄包覆量的增加,各样品的 $\sqrt{|\epsilon_r||u_r|}$ 逐渐减小。通过前后界面反射模型和阻抗匹配理论可知,电磁波在羰基铁/CoFe₂O₄复合材料的表面反射能量较低,使得更多电磁波进入材料内部而被损耗^[6]。

目前关于吸波涂层电磁参数和涂层反射率方面研究较多,但对于用多次反射方法研究电磁波在吸波涂层中的1/4波长理论,以及电磁波在吸波涂层中

收稿日期:2021-04-28

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

多次反射引起干涉现象定量分析方面,报道较少。本文选取X型羰基铁粉吸收剂,采用同轴法测试材料电磁参数,通过多次反射方法求解X型吸波涂层在厚度为1/4波长时反射系数公式,以及不同厚度X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz平面电磁波反射系数公式,计算反射系数 Γ_a 和反射率 R_a 。

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。

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。通过多次反射方法求解了X型吸波涂层在厚度为1/4波长时反射系数公式,以及不同厚度X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz平面电磁波反射系数公式,取公式前6项计算了反射系数 Γ_a 和反射率 R_a 。另外根据传输线理论模拟计算出吸波涂层对电磁波的反射系数和反射率等。

2 结果与讨论

2.1 1/4波长厚度吸波涂层干涉分析

将X型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,然后依据材料电磁参数计算吸波涂层的各种性能数据。表1是吸收剂添加含量,X型吸收剂质量分数分别为45%、50%、55%、60%。

表1 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 | carbonyl iron powder | 45 |
| X-2 | carbonyl iron powder | 50 |
| X-3 | carbonyl iron powder | 55 |
| X-4 | carbonyl iron powder | 60 |

图1是磁损耗型吸收剂在频率范围为1~18 GHz的电磁参数曲线。

材料介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'')$,其中 ϵ_r 称为相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ' 为相对介电常数实部, ϵ'' 为相对介电常数虚部。磁导率 $\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (\mu' - j\mu'')$, μ_r 称为相对磁导率。

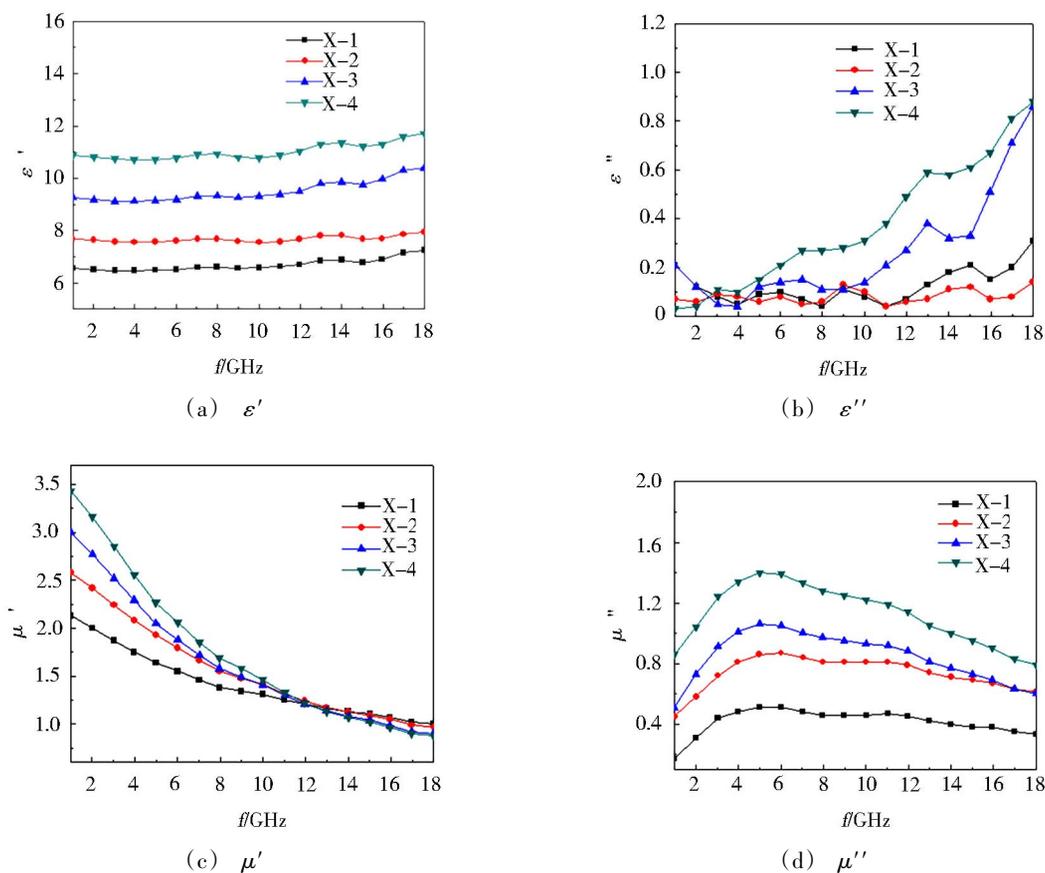


图1 X型吸波涂层电磁参数

Fig. 1 Electromagnetic parameters of the microwave absorbing coatings

图2是利用X型吸收剂电磁参数计算得到的不同厚度吸波涂层对频率为9.5 GHz(为整个频率范围1~18 GHz的中心点,较具有代表性)电磁波的反射

率,表2是X型吸波涂层对频率为9.5 GHz电磁波的反射率及特性参数。从图2和表2中可以看出,X型吸波涂层在厚度为1/4波长附近时出现明显吸收峰,

表2 X型吸波涂层对频率为9.5 GHz电磁波的反射率及特性参数

Tab. 2 Characteristic parameters and reflectivity of type X RACs to wave at 9.5 GHz with different thickness

| Sample | Thickness/mm | R_{max}/dB | α | β | quarter wavelength in coatings/mm | R in quarter wavelength /dB |
|--------|--------------|---------------------|----------|---------|-----------------------------------|-------------------------------|
| X-1 | 2.55 | -11.4 | 105.3 | 595.8 | 2.64 | -11.2 |
| X-2 | 2.15 | -20.7 | 183.5 | 680.8 | 2.31 | -16.6 |
| X-3 | 1.85 | -34.9 | 230.9 | 762.3 | 2.06 | -17.0 |
| X-4 | 1.60 | -21.3 | 316.3 | 856.9 | 1.83 | -14.3 |

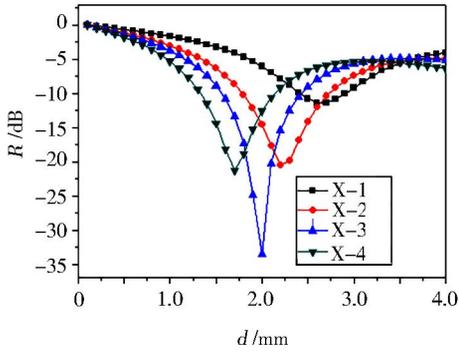


图2 X型吸波涂层对频率为9.5 GHz电磁波的反射率

Fig. 2 Reflectivity of type X RACs to plane electromagnetic wave of frequency at 9.5 GHz with different thickness

表明电磁波发生了干涉现象。干涉现象是由于电磁波在不同界面发生反射产生的反射波的存在光程差而引起的。从表2中可以看出,吸收峰对应厚度与1/4波长很接近,但不完全一致^[3],表明1/4波长理论不能充分解释X型吸波涂层吸波机理。

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,假定入射波具有沿x轴方向的电场,沿y轴方向的磁场,并沿z轴正方向传播。图3是电磁波在吸波涂层表面以及内部发生传播的过程示意图^[7],其中吸波涂层涂覆于金属基材表面(近似为理想导体)。

根据麦克斯韦方程和亥姆霍兹方程,求解得到

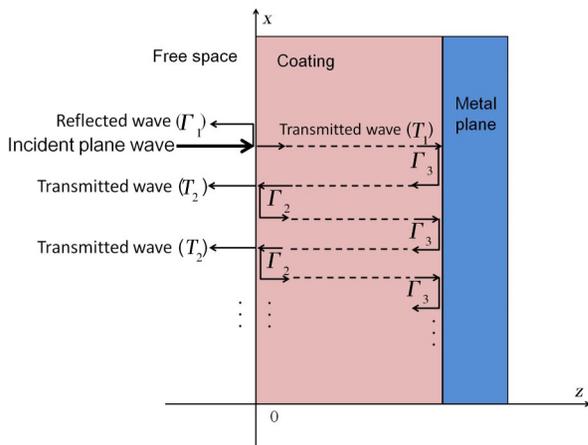


图3 电磁波在吸波涂层表面以及内部发生传播的过程示意图

Fig. 3 Scheme of propagation of plane wave in the microwave absorbing coating

沿z方向传播的平面电磁波在吸波涂层中总电场为

$$\vec{E} = \vec{a}_x E_0 e^{-\gamma z} \quad (1)$$

$$\vec{H} = \vec{a}_y \frac{E_0}{\eta} e^{-\gamma z} \quad (2)$$

式中,向量 \vec{a}_x 、 \vec{a}_y 分别为x轴、y轴单位向量,其方向指向纸面外侧, E_0 为正向传播的电磁波电场振幅, Γ 为复波数。

电磁波的反射系数和透射系数为^[7]:

$$\Gamma_1 = \frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0} = -\Gamma_2 \quad (3)$$

$$\Gamma_3 = -1 \quad (4)$$

$$T_1 = \frac{2\eta_1}{\eta_1 + \eta_0} \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{2\eta_0}{\eta_1 + \eta_0} \quad (6)$$

上述公式中,定义各符号如下:

(1) Γ_1 为入射到吸波涂层的波的整体或总反射系数;

(2) Γ_2 为来自自由空间的波入射到吸波涂层时的部分反射系数;

(3) Γ_3 为来自吸波涂层的波入射到自由空间时的部分反射系数;

(4) Γ_3 为来自吸波涂层的波入射到金属板时的部分反射系数,波在金属板表面反射系数近似为-1;

(5) T_1 为由自由空间进入到吸波涂层的部分传输系数;

(6) T_2 为由吸波涂层进入到自由空间的部分传输系数;

(7) η_0 为自由空间对电磁波本征阻抗;

(8) η_1 为吸波涂层对电磁波本征阻抗。

分析当X型吸波涂层厚度为1/4波长时入射波在涂层中传播规律。当入射波由自由空间进入吸波涂层时,场振幅逐渐衰减,透射波在涂层中传播1/4波长距离后到达金属板,在金属板表面发生完全反射,并发生半波损失现象,相位变化 180° ,随后此反射波朝向自由空间-涂层界面继续传播,在传播过程中同时伴随场振幅衰减。到达自由空间-涂层界面后,一部分电磁波透过界面继续传播,另一部分波发生反射,朝向金属板-涂层界面继续传播。然后电磁波在涂层中不断重复上述传播与反射过程,直至涂

层中电磁波场振幅完全衰减为零。

假设入射波电场振幅为 E_0 , 作如下定义。

(1) 第一反射波: 来自自由空间的波入射到吸波涂层表面时发生部分反射时产生的反射波, 其反射系数为 $\Gamma_{a1} = \Gamma_1$ 。

(2) 第二反射波定义为: 来自自由空间的波入射到吸波涂层内部, 并被金属板反射一次后而投射出涂层时的波, 其反射系数为 $-T_1 T_2 \Gamma_3 e^{-2\alpha(\lambda/4)}$, 记为 Γ_{a2} 。

(3) 第三反射波: 来自自由空间的波入射到吸波涂层内部, 在涂层内部来回反射, 总共被金属板反射

$$\begin{aligned} \Gamma &= \Gamma_{a1} + [-T_1 T_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda} + (-1)^2 T_1 T_2 T_2 \Gamma_3^2 e^{-\alpha\lambda} + \cdots + (-T_1 T_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda}) (-\Gamma_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda})^{n-2} + \cdots] \\ &= \Gamma_{a1} - T_1 T_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda} \sum_{n=2}^{\infty} (-\Gamma_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda})^{n-2} \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $0 < \left| -\Gamma_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda} \right| < 1$, 所以

$$\begin{aligned} -(\Gamma_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda})^n &= \frac{1}{1 - \Gamma_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda}}, \text{ 即} \\ \Gamma &= \Gamma_{a1} + \frac{T_1 T_2 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda}}{1 - \Gamma_2 \Gamma_3 e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda}} \end{aligned} \quad (8)$$

将式(2)代入式(8)后化简, 得到式(9), 即为吸波涂层厚度为 $1/4$ 波长时的反射系数。从式(8)中可以看出, 若要得到最小反射系数和反射率, 要求式中 $\Gamma_{a1} + e^{-2\alpha\lambda/4} = 0$, 在此条件下, 涂层可以实现完全吸波, 反射率为0。而由于X型吸波涂层的 Γ_{a1} 为复数, 即不满足 $\Gamma_{a1} + e^{-2\alpha\lambda/4} = 0$, 表明X型吸波涂层不能实现完全吸波。

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{a1} + e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda}}{1 + \Gamma_{a1} e^{-\frac{1}{2}\alpha\lambda}} \quad (9)$$

2.2 不同厚度吸波涂层干涉分析

从图2中可以看到, 当吸波涂层厚度不等于 $1/4$ 波长时, 在一定频率范围内仍然有较好的吸波性能,

$$\begin{aligned} \Gamma_a &= \Gamma_{a1} + [T_1 T_2 \Gamma_3 e^{-2\alpha d - j\frac{4\pi d}{\lambda}} + T_1 T_2 T_2 \Gamma_3^2 e^{-4\alpha d - j\frac{8\pi d}{\lambda}} + \cdots + T_1 T_2 \Gamma_3 e^{-2\alpha d - j\frac{4\pi d}{\lambda}} (\Gamma_2 \Gamma_3 e^{-2\alpha d - j\frac{4\pi d}{\lambda}})^n + \cdots] \\ &= \Gamma_{a1} + T_1 T_2 \Gamma_3 e^{-2\alpha d - j\frac{4\pi d}{\lambda}} \sum_{n=0}^{\infty} (\Gamma_2 \Gamma_3 e^{-2\alpha d - j\frac{4\pi d}{\lambda}})^n \end{aligned} \quad (11)$$

为简化计算, 取上式前6项之和, 代表总的反射系数, 用 Γ_a 表示。计算了X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz的电磁波的 Γ_a , 进而计算了反射率 R_a , 并与传输线方法计算的反射系数 Γ 及反射率 R 进行对比。从图4中可以看出, Γ_a 实部和虚部分别与 Γ 实部和虚部非常接近, 以及 R_a 与 R 的值非常接近, 表明 Γ_a 可以近似代表X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz平面电磁波的反射系数 Γ 。

图5为不同厚度X-1型吸波涂层对9.5 GHz电磁波的反射系数曲线。从图中可以看出, 第一反射波反射系数的模 $|\Gamma_{a1}|$ 随吸波涂层厚度变化而保持不变, 值为

两次后而投射出涂层时的波, 其反射系数为 $T_1 T_2 T_2 \Gamma_3^2 e^{-4\alpha(\lambda/4)}$, 记为 Γ_{a3} 。

...

(n) 第n反射波: 来自自由空间的波入射到吸波涂层内部, 在涂层内部来回反射, 总共被金属板反射n-1次后而投射出涂层时的波, 其反射系数为 $(-1)^{n-1} T_1 T_2 (\Gamma_2 \Gamma_3)^{n-1} \Gamma_3 e^{-n\alpha\lambda/2}$, 记为 Γ_{an} , 其中 $n=2, 3, 4, \cdots$ 。

总的反射波为上述所有反射波加和, 因此总的反射系数为:

因此考察垂直入射的平面电磁波在不超过波长长度范围内的不同厚度的吸波涂层中传播及干涉现象。

假设涂层厚度为 d , 入射波到达涂层表面时, 一部分波发生反射, 另一部分投射进入涂层内部, 则从进入涂层表面到传播至涂层-金属板界面所用时间 t_d 为:

$$t_d = \frac{2\pi d}{\lambda \omega} \quad (10)$$

从涂层-金属板界面返回至涂层表面所用时间也是 t_d , 因此透射波在涂层中传播所用时间为 $2t_d$, 即在涂层表面被反射的波比进入涂层后又从涂层中透射出的波相位超前, 超前的相位值为 $2\omega t_d$ 的整数倍, 例如当波在涂层中只被金属板反射一次, 则超前的相位值为 $2\omega t_d$, 当波在涂层中总共被金属板反射 n 次, 超前的相位值为 $2n\omega t_d$, 其中 $n=1, 2, 3, \cdots$

假设平面入射波电场振幅为 E_0 , 第一反射波反射系数 Γ_{a1} , 第二反射波反射系数为 $T_1 T_2 \Gamma_3^2 e^{-2\alpha d - j4\pi d/\lambda}$, 第三反射波反射系数为 $T_1 T_2 T_2 \Gamma_3^3 e^{-4\alpha d - j8\pi d/\lambda}$, 第n反射波反射系数为 $T_1 T_2 \Gamma_3 (\Gamma_2 \Gamma_3 e^{-2\alpha d - j4\pi d/\lambda})^{n-1}$ 。因此总的反射系数为:

0.375。另外可以看到, 而 $|\Gamma_{a1} + \Gamma_{a2}|$ 的值在涂层厚度为2.5 mm时达到最小值0.143, 表明第一反射波与第二反射波发生了干涉相消现象。另外, 当涂层厚度小于1.9 mm时, $|\Gamma_{a1} + \Gamma_{a2}| > |\Gamma_{a1}|$, 说明第二反射波对第一反射波起到干涉相长作用。由于 $|\Gamma_{a2}|$ 明显大于 $|\Gamma_{a3}|$ 及 $|\Gamma_{a4}|$, 表明涂层厚度小于1.9 mm时, 反射波干涉现象会增加反射率, 因此对于9.5 GHz的电磁波, 吸波涂层厚度应该大于1.9 mm。同样, 当涂层厚度在3.2~6.6 mm时, $|\Gamma_{a1} + \Gamma_{a2}| > |\Gamma_{a1}|$, 第二反射波对第一反射波也起到干涉相长作用。综上所述, 对于9.5 GHz的电磁波, 优选的吸波涂层厚度应该介于1.9~3.2 mm。

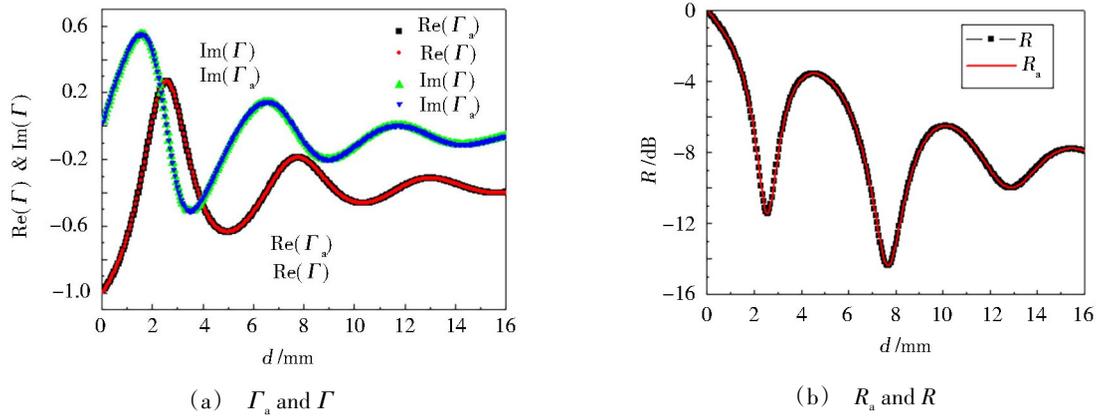


图4 用多次反射法计算的X-1型吸波涂层 Γ_a 和 R_a 与传输线方法计算的 Γ , R 曲线

Fig. 4 Γ_a and R_a of type X-1 RAC with different thickness to wave at 9.5 GHz calculated by multiple reflections and Γ , R calculated by method of transmission line

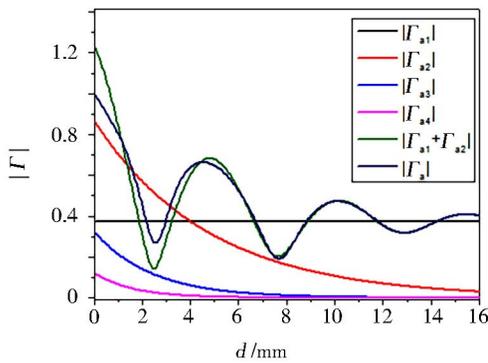


图5 不同厚度X-1型吸波涂层对9.5 GHz电磁波前6项反射波的反射系数模

Fig. 5 The first six reflection coefficient of Γ_a of type X-1 RAC with different thickness to wave at 9.5 GHz

另外,结合图4(a)和图5可以看出,当涂层厚度逐渐增大时,反射系数实部 $\text{Re}(\Gamma_a)$ 值逐渐趋于-0.369,即为第一反射系数实部值 $\text{Re}(\Gamma_{a1})$,反射系数虚部 $\text{Im}(\Gamma_a)$ 值逐渐趋于-0.0685,即为第一反射系数虚部值 $\text{Im}(\Gamma_{a1})$,表明当涂层厚度逐渐增大时,X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz电磁波反射系数受电磁波干涉的影响逐渐减小,而受吸波涂层本征阻抗影响逐渐增大。

3 结论

(1)对于X型吸波涂层,反射率吸收峰对应厚度与1/4波长不完全一致,通过多次反射方法求解了X型吸波涂层在厚度为1/4波长时反射系数公式,表明多次反射波之间产生了干涉行为,发生了干涉相消现象,并分析了1/4波长与反射率吸收峰对应厚度产生差异的原因。

(2)利用多次反射方法求解了不同厚度X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz平面电磁波反射系数公式,取公式前6项计算了反射系数 Γ_a 和反射率 R_a , R_a 与传输线方法计算的反射率 R 的值非常接近,表明 Γ_a 和 R_a 可以近似代表X-1型吸波涂层对频率为9.5

GHz平面电磁波的反射系数和反射率。

(3)用X-1型吸波涂层对频率为9.5 GHz的电磁波平面电磁波反射系数公式分析了电磁波在吸波涂层中的干涉行为,当涂层厚度小于1.9 mm或在3.2~6.6 mm时,第二反射波对第一反射波起到干涉相长作用,表明优选的吸波涂层厚度应该介于1.9~3.2 mm。

参考文献

- [1] JIA Z R, GAO Z G, FENG A L et al. Laminated microwave absorbers of A-site cation deficiency perovskite $\text{La}_{0.8}\text{FeO}_3$ doped at hybrid RGO carbon [J]. Composites Part B, 2019, 176: 107246.
- [2] HUANG X G, ZHANG J, LAI M, et al. Preparation and microwave absorption mechanisms of the NiZn ferrite nanofibers [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 627: 367-373.
- [3] SHU R W, ZHANG J B, GUO C L, et al. Synthesis of nitrogen-doped reduced graphene oxide/nickel-zinc ferrite composites as high-performance microwave absorbers in the X-band [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123266.
- [4] HUANG K, CHEN M M, HE G, et al. Stretchable microwave absorbing and electromagnetic interference shielding foam with hierarchical buckling induced by solvent swelling [J]. Carbon, 2020, 157: 466-477.
- [5] 刘虎腾,周克省,邓联文,等. 稀土 La^{3+} , Ce^{3+} 配合视黄基席夫碱盐的制备与吸波性能[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 104-109.
- [6] LIU H T, ZHOU K X, DENG L W, et al. Preparation and wave-absorbing performance of retinyl schiff base salts coordinated with rare earth La^{3+} and Ce^{3+} ions [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 104-109.
- [7] 李泽,赵芳,王建江,等. PVP表面修饰羰基铁/ CoFe_2O_4 核壳纳米结构的制备及低频吸波机理[J]. 材料研究学报, 2020, 34(7): 14027-14033.
- [8] LI Z, ZHAO F, WANG J J, et al. Wave-absorption properties of epoxy/ethyl cellulose microcapsule modified by carbonyl iron powder [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2020, 34(7): 14027-14033.
- [9] POZAR D. Microwave Engineering [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.