第 30 卷第 7 期 中国有色金属学报 2020 年 7 月
Volume 30 Number 7 The Chinese Journal of Nonferrous Metals July 2020
DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-37591

羰基铁/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$双层宽频吸波体的构建及实现

刘 渊[1]，吴晋瑞[1]，王 莹[2]

(1. 火箭军工程大学，西安 710025；
2. 江苏金环环保设备有限公司，宜兴 214200)

摘 要：根据电磁波传输线理论和阻抗匹配原理，设计羰基铁(CIP)/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$双层复合吸波材料，并以环氧树脂为基体制备相应的性能优异的吸波涂层。使用 XDR 和 SEM 对粉末和涂层的结构进行表征。通过同轴法测定 CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$的电磁参数，借助 MATLAB 软件，计算面层与底层不同厚度和不同次序条件下的反射率。结果表明：$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 作为面层，CIP 作为底层时可以极大地拓展涂层的吸收带宽和减小反射率峰值。以 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$为面层，CIP 为底层，厚度分别为 1.5 和 0.6 mm 时，涂层的吸波效果最好，反射率峰值为−38.2 dB，小于−10 dB 频宽为 13.4 GHz。制备的涂层中吸波剂总体分散良好，无明显缺陷。通过实验值和理论值的比较，验证优化结果的准确性，实现在较小厚度和较宽频带下，吸波涂层有较强吸收的要求。

关键词：吸波材料；阻抗匹配；双层；电磁性能
文章编号：1004-0609(2020)-07-1626-08 **中图分类号**：TB383；TM277 **文献标志码**：A

雷达隐身技术是提高国防体系中地面军事目标的生存能力与武器系统的突防能力和纵深打击能力的有效手段之一，各国的研究人员对其进行了大量研究[1−4]。依据降低目标的雷达散射截面积(RCS)的原理，可以将雷达隐身技术分为外形隐身技术和吸波材料隐身技术两大类[5−6]。外形隐身主要通过改变形状以牺牲自身性能为代价来实现；雷达吸波涂层技术因维护简便、适用范围广、性能优异、成本低等优点而成为隐身技术的研究重点[7]。

羰基铁(CIP)和铁氧体因其制备工艺简单、成本低、磁损耗角大和吸波能力强等优点，在吸波材料中得到了广泛的应用[8−9]。目前，针对在一定频率和吸收带宽下能够有效工作的吸波涂层已经进行了大量的研究[10−14]。但对于单涂层吸波材料而言，吸波体设计可变参量少，有效带宽较窄，难以满足军事活动中吸收宽频带的要求[15]。因此，多层吸波材料的研制势在必行。从电结构设计优化角度看，多层结构形式的吸波材料有利于多频带、宽频带，有利于充分利用各层吸收材料的性能，达到最优的吸波效果[16−18]。在已发表的文献中鲜有 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 粉体作为匹配层的相关报道。因此，本研究使用溶胶凝胶法，制备了 La 掺杂的尖晶石型铁氧体粉末 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$，结合 CIP 设计并制备了一种新型双层吸波体，取得了较好的吸波效果。

1 双层吸波的原理

采用 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$微粉与 CIP 微粉 2 种典型吸波剂相结合，利用计算机编程模拟计算了双层吸波涂层在 2~18 GHz 范围内的吸波性能。对于双层复合吸波涂层，当电磁波垂直入射时，其输入阻抗为[17]

$$Z_{\text{in}} = Z_2 \frac{Z_{\text{in1}} + Z_2 \tanh[j(2\pi f d_2 / c)\sqrt{\mu_2/\varepsilon_2}]}{Z_2 + Z_{\text{in1}} \tanh[j(2\pi f d_2 / c)\sqrt{\mu_2/\varepsilon_2}]} \quad (1)$$

$$Z_{\text{in1}} = Z_1 \tanh[j(2\pi f d_1 / c)\sqrt{\mu_1/\varepsilon_1}] \quad (2)$$

式中：Z_{in}和 Z_{in1}分别为电磁波入射方向上复合涂层的面层和底层的垂直输入阻抗；Z_1和 Z_2分别为底层和面层的特征阻抗；μ_1和 μ_2为材料的复磁导率；ε_1和 ε_2为

基金项目：陕西省自然科学基金资助项目(2014JM2-5084)
收稿日期：2019-07-19；**修订日期**：2019-12-02
通信作者：刘 渊，讲师，博士；电话：13468956247；E-mail：liuyuanbixue@163.com

材料的复介电常数；c 为真空中的光速；f 为电磁波的频率；d_1 和 d_2 为涂层厚度。双层复合吸波涂层的模型见图 1。

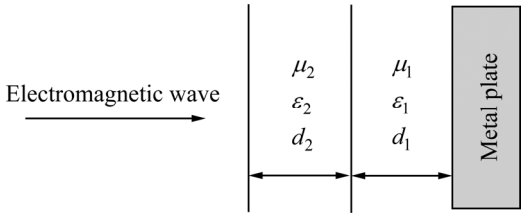

图 1　双层吸波体的模型

Fig. 1　Geometry for double-layer absorber

2　实验方法

2.1　样品制备

$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 的化学计量比称取相应质量的 $Fe(NO_3)_3$、$Ni(NO_3)_2$ 和 $La(NO_3)_3$ 并溶于一定量的去离子水中，按物质的量比 n(CA):n(Fe+La+Ni)=4:3 向溶液中加入柠檬酸(CA)待用，按照图 2 所示流程即可以完成 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 铁氧体的制备。羰基铁粉为陕西兴化羰基铁粉厂生产。电磁参数测试样品的制备过程如下：分别称量所需的基体石蜡和吸波剂(质量分数为 60%)，将吸波剂加入到熔融的石蜡中并充分搅拌，冷却后用研钵研磨，再熔融搅拌，冷却研磨，以上步骤反复 3~4 次，以使吸波剂与石蜡均匀混合；再加入适量酒精，在高速乳化机中剪切分散，然后蒸干研磨成粉末，压制成外径为 7 mm、内径为 3 mm、长度为 2~5 mm 的圆形同轴试样。

2.2　吸波涂层的制备

样品制备前需进行预处理：将 18 mm×18 mm×3 mm 的铝板依次用清水、丙酮洗净，烘干待用。样品制备步骤如下：1) 称取吸波剂(CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$)和基体(环氧树脂和聚酰胺)；2) 将环氧树脂和聚酰胺分别溶于二甲苯与正丁醇混合溶剂中，充分搅拌至溶解为透明溶液待用；3) 依次将吸波剂和一定量的防沉降剂加入到环氧树脂体系中，加入偶联剂并充分搅拌，超声波分散 30 min；4) 将溶解后的聚酰胺加入上一体系中，充分搅拌 30 min，制成粘稠浆料，添加固化促进剂搅拌 10 min；5) 采用多次刷涂进一步控制吸波剂沉降，将涂料均匀涂刮在预处理后的铝板上，置于烘箱内干燥(45 ℃)，待涂层初步固化后再次刷涂，刷涂过程中使用 0.3 mm 和 0.5 mm 的模具控制厚度，最后置于烘箱内干燥(45 ℃)，待涂层完全干燥后进行吸波

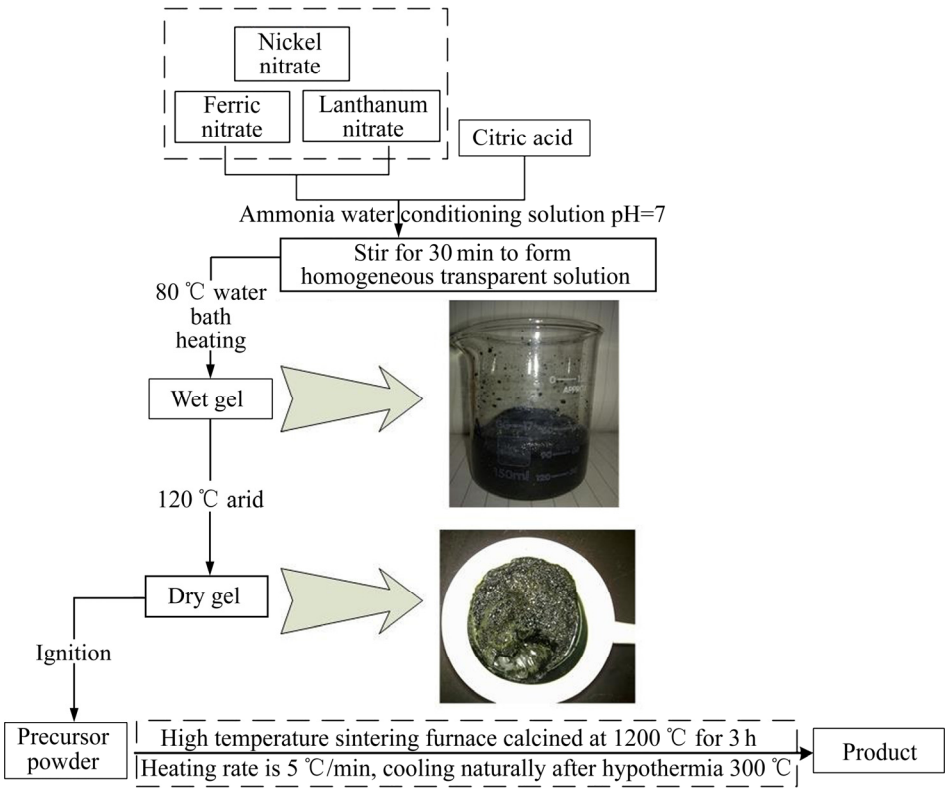

图 2　$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 样品的制备流程

Fig. 2　Schematic diagram of preparation of $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ sample

性能测试。涂层的测试方法依照 GJB 2038—94 进行。

2.3 样品表征

采用 Rigaku D/max−2400 型(Cu K_α，λ=0.15418 nm，靶电压 40 kV，靶电流 100 mA，步进扫描，步长 0.02°，扫描速率 15 (°)/min，扫描范围 15°~80°) X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析；采用 VEGAIIXMUINCN 型扫描电子显微镜(SEM)研究其形貌及微观组织；采用 HP−8720ES 型矢量网络分析仪并结合同轴法测量电磁参数，测试频率为 2~18 GHz。

3 模拟优化方法

由式(1)和(2)及图 1 可以看出，双层吸波涂层各层的厚度 d，电磁波频率 f 及电磁参数 ε 和 μ 与涂层的吸波性能密切有关。固定双层吸波涂层各层的选材与厚度时，即可以用式(1)到(2)计算出反射率；当需要对各层材料和厚度进行选择而寻找最优组合时，则可以借用遗传算法(GA)，通过 MATLAB 软件优化设计。本文中采用自适应遗传操作生成符合限制条件的种群，采用精英保留策略，初始种群选择为 50，交叉、变异概率均为 0.9。适应度函数的设计：吸波涂层的厚度，最小反射率及吸波带宽(＜−10 dB)为评定双层吸波涂层性能的三个方面。图 3 所示为具有限制条件的双层吸波涂层优化设计遗传算法原理图。

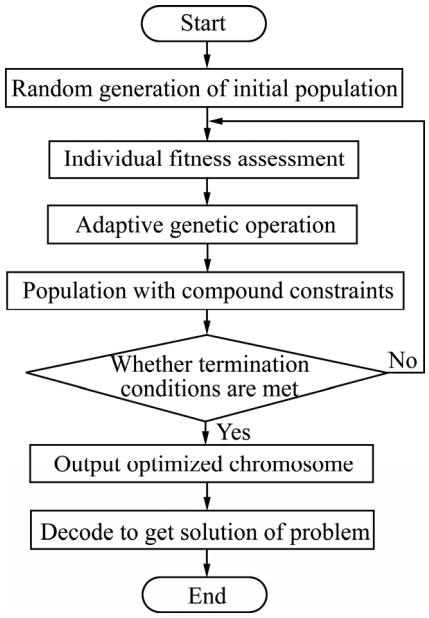

图 3 具有限制条件的双层吸波涂层优化设计 GA 原理图

Fig. 3 Schematic diagram of GA for optimum design of double-layer absorbing coatings with constraints

4 实验结果与分析

4.1 XRD 分析

图 4 所示为 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 和 CIP 的 XRD 谱，将图 4(a)与 $NiFe_2O_4$ 特征 XRD 峰进行对比，可以看出，样品谱的 XRD 衍射峰与 $NiFe_2O_4$ 的粉末衍射卡片数据库(JCPDS 71−1269)的特征 XRD 峰吻合很好，没有其他杂质峰出现，而且所有晶面的 XRD 峰峰形尖锐，相对强度强，说明此时形成晶体的晶型趋于完整，生成纯净的 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 粉末。图 4(b)是 CIP 的 XRD 谱，与 α-Fe 的标准图谱(JCPDS 06−0696)一致，存在明显的晶相结构，无氧化物的衍射峰出现，说明 CIP 未被氧化。

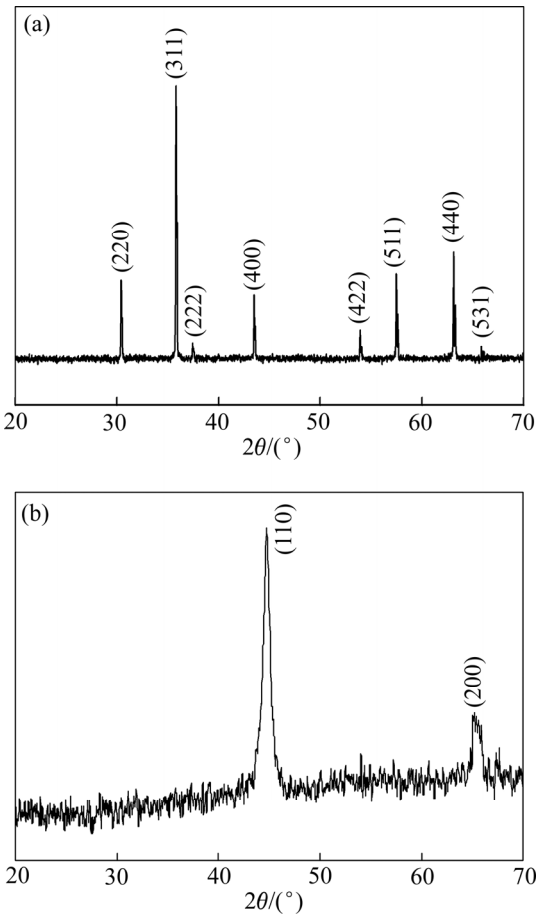

图 4 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 和 CIP 的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ (a) and CIP (b) powder

4.2 SEM 分析

4.2.1 粉体的 SEM 像

图 5 所示为 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 和 CIP 粉末的 SEM 像。

由图 5(a)可以看出，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 粉末颗粒棱角鲜明，呈多面体形状，颗粒尺寸较大，约为 2 μm，少量粉末尺寸超过 3 μm。由图 5(b)中可见，CIP 颗粒呈现出大小不一的圆球状，并团聚在一起，直径为 1~4 μm。

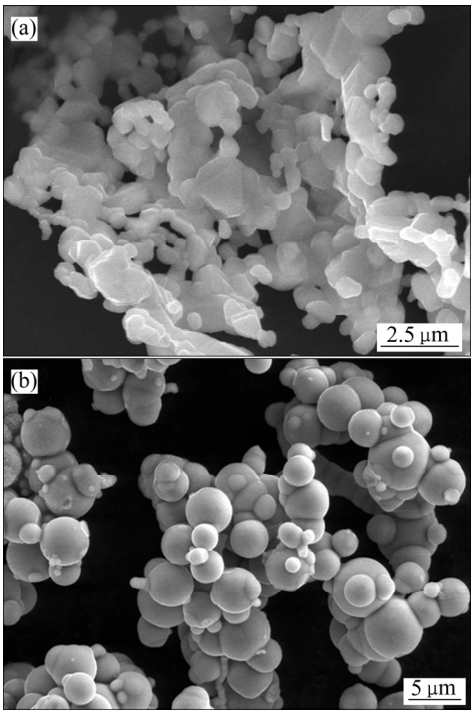

图 5　$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 和 CIP 的 SEM 像

Fig. 5　SEM images of $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ (a) and CIP (b) powder

4.2.2　涂层的 SEM 分析

图 6 所示为本研究制备的双层吸波涂层的表面和截面 SEM 像。由图 6(a)可见，涂层表面平坦，填料分布均匀。由于手工刷涂存在工艺控制误差，导致表面有少许缺陷(圆圈处)。图 6(b)所示为涂层截面图，两层之间的界面十分明显。上层的 CIP 密集的聚集在一起，CIP 的颗粒密实均匀地分布于涂层中，CIP 颗粒被基体所包裹，使得各个 CIP 颗粒隔开，这也使得 CIP 颗粒之间没有形成导电网络，有利于电磁波的进入。下层 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 明显地被基体分隔开，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 在涂层中的分布并不如 CIP 那样均匀，部分团聚在一起形成较大的颗粒分布于基体之中，出现了较大面积的基体剖面区和吸波剂区。图 6(b)中出现的孔洞(圆圈处)是由于在切开涂层时其中的填料掉出所导致。

4.3　$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 和 CIP 粉体的电磁参数

图 7 所示为 CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 粉体的电磁参数。由图 7(a)可见，CIP 的复介电常数实部 ε_1' 在测试频率范围内呈现降低的趋势，最大为 21.9，最小为 19.7。复介电常数虚部 ε_1'' 在 2~6 GHz 先升高后降低，在 4.3 GHz 达到最大值 1.8，而后基本维持不变，稳定在约 1.3。由图 7(b)可以明显地看出，复磁导率实部 μ_1' 呈现明显的下降趋势，复磁导率虚部 μ_1'' 在 2~4 GHz 内急速下降后基本保持平稳。

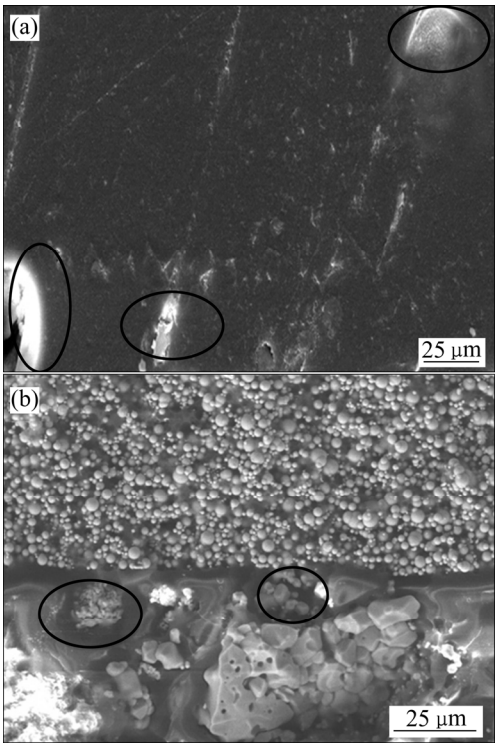

图 6　双层涂层表面和截面的 SEM 像

Fig. 6　SEM images of CIP/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ double layer absorber: (a) Surface; (b) Section

图 7(c)中可见，在测试频率内，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 复介电常数基本保持不变。图 7(d)中，复磁导率实部 μ_2' 在 2~7 GHz 内急速下降后基本保持不变，复磁导率虚部 μ_2'' 在 2~6 GHz 内缓慢下降，6~11 GHz 内下降趋势明显，而后基本保持不变。由于 La^{3+}的半径比 Ni^{2+} 半径和 Fe^{3+}半径要大很多，当它进入镍铁氧体晶格中会使其晶格产生较大畸变，形成较大电矩的固有电偶极子，同时，La^{3+}和 Fe^{3+}之间也会形成固有电矩，这些作用有利于改善铁氧体的电磁性能和调整电磁波吸收频段。

4.4　CIP/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 复合吸波材料的涂层优化

图 8 所示为吸收剂 CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 在不同厚度下的反射率曲线图。由图 8(a)可见，随着吸收剂 CIP 涂层厚度增加，反射峰向低频移动，在厚度为 1 mm 时最小反射率峰值为−14.6 dB，此时涂层整体反

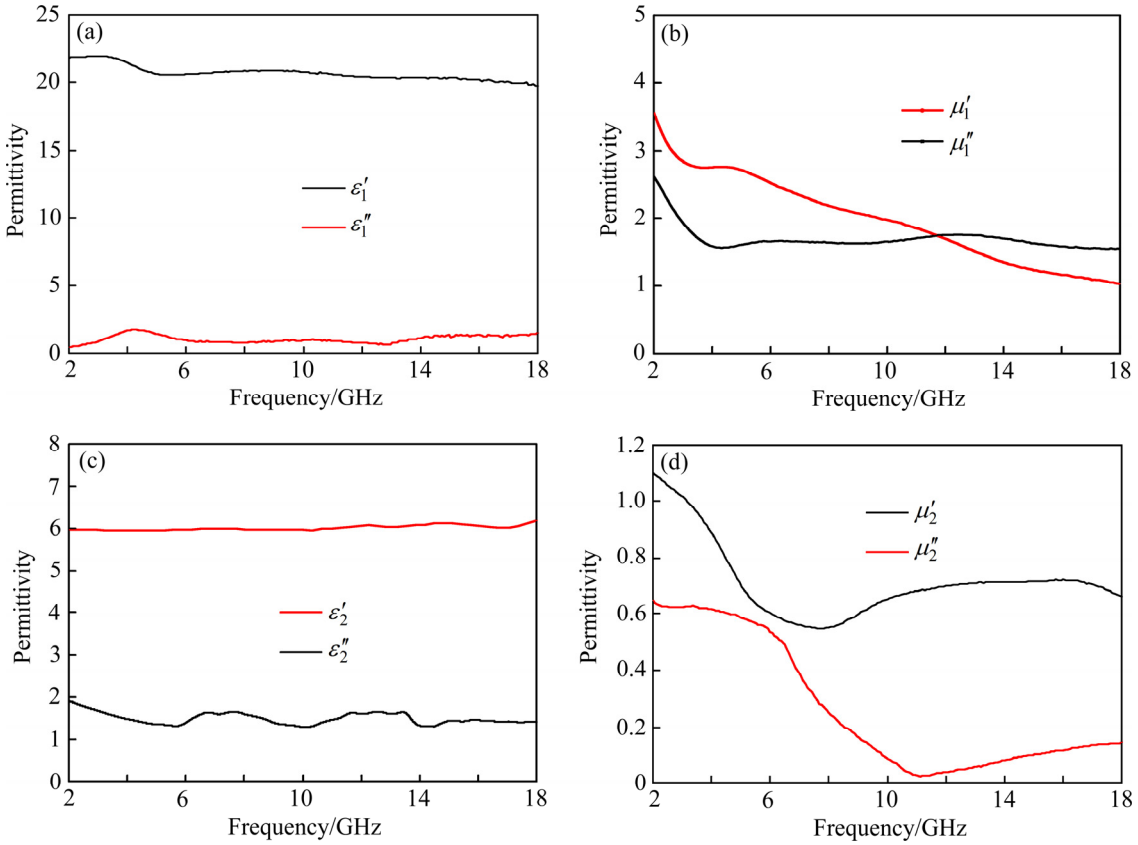

图 7 CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 粉体的电磁参数

Fig. 7 Relative permittivity ((a), (c)) and permeability ((b), (d)) of different powders: (a), (b) CIP; (c), (d) $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$

射率小于−10 dB 的频宽达到 4 GHz；在厚度为 2 mm 时最小反射率峰值为−25.0 dB，但此时涂层整体反射率小于−10.0 dB 的频宽仅为 2 GHz。图 8(b)中可见，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$吸收剂在厚度 4 mm 以上时才有较好的吸收效果。因此，单纯以吸收剂 CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 所制备涂层难以同时满足在较小厚度下，较宽频带有较强吸收的要求。

为了在尽可能地减小吸波涂层厚度的同时，增大吸收频宽且能更大限度的吸收电磁波能量，计算了面层与底层不同厚度和不同次序条件下的反射率。图 9(a)所示为 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 为面层，CIP 为底层时不同厚度条件下的反射率；图 9(b)所示为 CIP 为面层，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 为底层时不同厚度条件下的反射率。

因此，以 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 为面层时反射率小于−10 dB 的频宽较宽，以 CIP 为面层时反射率峰值较小，说明 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 做面层有助于拓展涂层带宽，以 CIP 为面层利于减小反射率。当 CIP 厚度为 0.5 mm，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 做面层时，能够起到减小反射率峰值，拓展频宽的作用；当 CIP 厚度为 1.0 mm 时，加入 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 涂层能够减小反射率峰值，但是展宽作用不明显；当 CIP 厚度为 1.5 mm 时，双层复合涂层相对于单层 CIP 涂层在反射率峰值及吸收频带上效果都不明显。综合考虑，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 做面层，CIP 做底层构成的双层复合涂层经过优化设计后会取得较好的吸波效果。

以 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 为面层，固定 CIP 厚度为 0.5 mm，计算不同铁氧体厚度下涂层反射率曲线如图 10(a)所示，从图中可以看出，当 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 厚度为 1.0 mm 时，涂层反射率峰值最小，为−35.0 dB，小于−10 dB 频宽达到 9.4 GHz；当 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 厚度为 1.5 mm 时，涂层反射率小于−10 dB 频宽最大，达到 10 GHz 以上，由此充分说明了 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 作为面层时能够有效地调节带宽，拓展吸收频带的作用。

以 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 为面层，固定厚度为 1.5 mm，在不同 CIP 厚度下涂层反射率曲线分别如图 10(b)所示，可以看出，当 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 和 CIP 厚度分别为 1.5 mm、0.6 mm 时，涂层反射率峰值最小且小于−10 dB 频宽最大，分别为−38.2 dB 和 13.4 GHz。

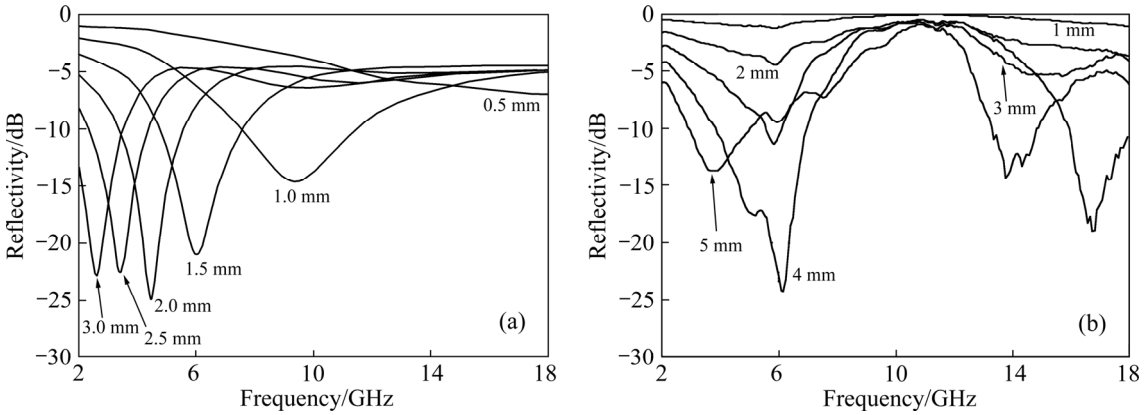

图 8　CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 在不同厚度下的反射率曲线

Fig. 8　Microwave reflection loss curves of CIP (a) and $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ (b) under different thicknesses

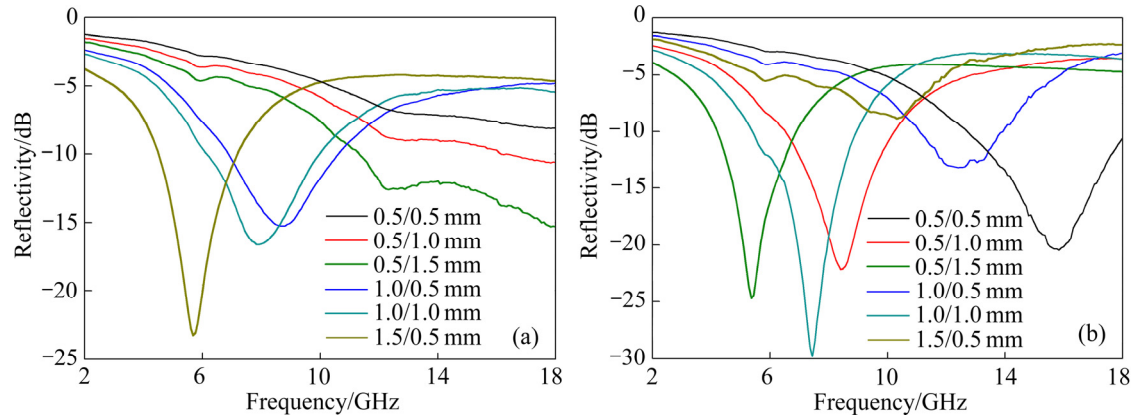

图 9　不同参数设置下 CIP/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 双层复合吸波涂层的吸收曲线

Fig. 9　Microwave reflection loss of $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$/CIP(a) and CIP/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$(b) double-layer absorbers of under different order and thickness

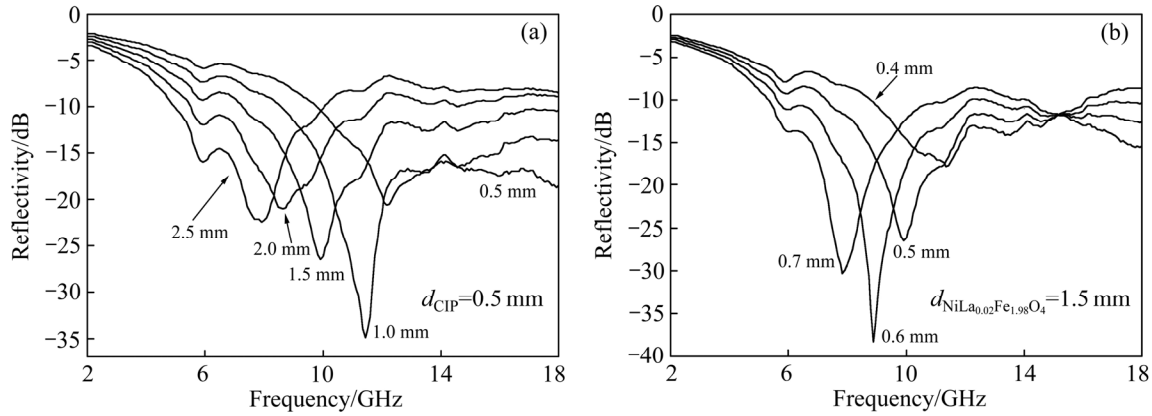

图 10　$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 做面层时在不同厚度参数下的反射率曲线

Fig. 10　Microwave reflection loss curves of $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ surface under different thicknesses: (a) Different thickness of $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$; (b) Different thickness of CIP

4.5　吸波性能测试

对所制备的双层吸波涂层进行了吸波性能测试，测试结果如图 11 所示。实测值和理论值虽然有一定的误差，但实测值还是基本反映出了理论优化的结果。

通过前文分析可知导致双层吸波涂层实验和理论差异的主要原因：1) 厚度误差扩大。双层涂层制备过

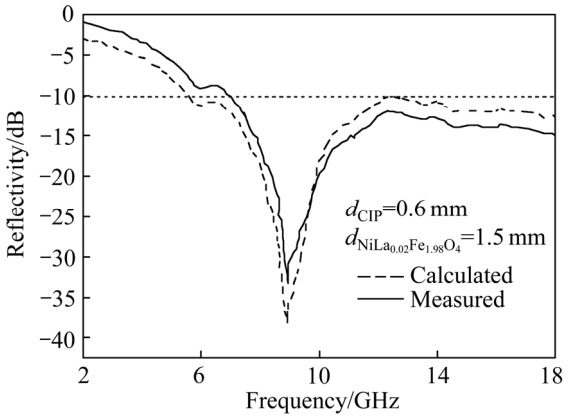

图 11 双层吸波涂层计算和测试结果

Fig. 11 Calculated and measured results of double-layer absorbers

程中会造成双层的厚度误差叠加而使得厚度误差增大。2) 吸波剂分布不均匀。通过图 6(b)发现，$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 分布不均匀，这也会导致实验误差增大。3) 基体材料的不同。电磁参数测试采用的是石蜡为基体，涂层使用的环氧树脂作为基体，这也会造成实验与理论值的误差。

5 结论

1) $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 做面层，CIP 为底层有助于拓展涂层带宽和减小反射率。以 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 为面层，CIP 为底层，厚度分别为 1.5 mm 和 0.6 mm 时，涂层反射率峰值最小且小于−10 dB 频宽最大，分别为−38.2 dB 和 13.4 GHz，充分说明了铁氧体作为面层时能够有效地调节带宽，拓展吸收频带的作用。

2) 制备的涂层中吸波剂总体分散良好，没有明显的缺陷存在。通过实验值和理论值的比较，验证了优化结果的准确性，相比与 CIP 和 $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ 的单层吸波效果有了明显的改善，具有一定的工程应用价值。

REFERENCES

[1] 刘 渊, 何祯鑫, 牛梓蓉. $Sr_{0.8}Re_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$(Re=La, Nd)的制备、表征及吸波性能[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(2): 341−347.
LIU Yuan, HE Zhen-xin, NIU Zi-rong. Preparation, characterization and absorption properties of $Sr_{0.8}Re_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$(Re=La, Nd)[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(2): 341−347

[2] LIU Yuan, LI Rong, JIA Ying, HE Zhen-xin. Effect of deposition temperature on $SrFe_{12}O_{19}$@carbonyl iron core-shell composites as high-performance microwave absorbers[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(6): 067701.

[3] 刘 渊, 刘祥萱, 何春平, 王 炜. 磁性粉体包覆式核壳型复合吸波材料研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 83−91.
LIU Yuan, LIU Xiang-xuan, HE Chun-ping, WANG Wei. Progress of core shell structured magnetic composite wave absorbing materials[J]. Surface Technology, 2018, 47(10): 83−91.

[4] 穆 阳, 邓佳欣, 李 皓, 周万城. 两种连续 SiC 纤维的高温介电及吸波性能对比[J]. 无机材料学报, 2018, 33(4): 427−433.
MU Yang, DENG Jia-xin, LI Hao, ZHOU Wan-cheng. Comparison of high-temperature dielectric and microwave absorbing property of two continuous SiC fibers[J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(4): 427−433.

[5] MOSALLAEI H, RAHMAT-SAMII Y. RCS reduction of canonical targets using genetic algorithm synthesized RAM[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2002, 48(10): 1594−1606.

[6] GIANNAKOPOULOU T, OIKONOMOU A, KORDAS G. Double-layer microwave absorbers based on materials with large magnetic and dielectric losses[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2004, 271(2): 224−229.

[7] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 王 飞, 贾艺凡, 丁逸栋, 林 锐. 新型涂覆型雷达吸波材料的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 140−146.
BAN Guo-dong, LIU Zhao-hui, YE Sheng-tian, WANG Fei, JIA Yi-fan, DING Yi-dong, LIN Rui. Research progress of new radar absorbing coating[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 140−146.

[8] 童国秀, 官建国, 张五一, 张 巍, 王 维, 董德明. 纳米铁纤维与羰基铁粉共混制备轻质宽带吸波涂层材料[J]. 金属学报, 2008, 44(8): 1001−1005.
TONG Guo-xiu, GUAN Jian-guo, ZHANG Wu-yi, ZHANG Wei, WANG Wei, DONG De-ming. Preparation of light radar absorbing materials with broad bandwidth by mixing iron nanofibers with carbonyl iron particles[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(8): 1001−1005.

[9] HE Y, PAN S, CHENG L, LUO J, YU J. Improving microwave absorbing property of flaky Ce_2Co_{17} alloys by Ni content and carbonyl iron powder[J]. Journal of Electronic Materials, 2019(12): 1574−1581.

[10] JI P, XIE G, XIE N, LI J, CHEN J, CHEN J. Microwave absorbing properties of flaky carbonyl iron powder prepared

by rod milling method[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(4): 2495−2500.

[11] 刘　渊, 刘祥萱, 王煊军, 张泽洋, 李　茸, 郭　磊. 离子取代镍基铁氧体的性能及吸波涂层优化设计[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 168−174.
LIU Yuan, LIU Xiang-xuan, WANG Xuan-jun, ZHANG Ze-yang, LI Rong, GUO Lei. Performance of nickel ferrite replaced by different ions and optimization design of absorbing coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 168−174.

[12] JI P, XIE G, XIE N, LI J, CHEN J, XU R, CHEN J. Fabrication and microwave absorption properties of the flaky carbonyl iron/FeSiAl composite in S-band[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2018, 29(7/8): 1−6.

[13] ZHANG Z, LIU X, WANG X, WU Y, LI R. Effect of Nd-Co substitution on magnetic and microwave absorption properties of $SrFe_{12}O_{19}$ hexaferrites[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 525(11): 114−119.

[14] HE J, LUO H, HE L, YAN S, SHAN D, HUANG S, DENG L. Investigation on microwave dielectric behavior of flaky carbonyl iron composites[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2018, 29(9): 1−7.

[15] ZHANG J, YU D, CHEN W, XIE Y, WAN W, LIANG H, MIN C. Preparation of poly(styrene-glucidylmethacrylate)/Fe_3O_4 composite microspheres with high magnetite contents[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2009, 321(6): 572−577.

[16] REZAZADEH N, KIANVASH A, PALMEH P. Microwave absorption properties of double-layer nanocomposites based on polypyrrole/natural rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(34): 46565.

[17] RUSLY S N A, MATORI K A, ISMAIL I, ABBAS Z, AWANG Z, ZULKIMI M M, IDRIS F M, MOHD H M, ZULFIKRI N D. Microwave absorption properties of single- and double-layer coatings based on strontium hexaferrite and graphite nanocomposite[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2018, 29(7): 1−15.

[18] GAO Y, GAO X, LI J, GUO S. Microwave absorbing and mechanical properties of alternating multilayer carbonyl iron powder-poly(vinyl chloride) composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 135(12): 45846.

Preparation and design of carbonyl iron/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ double layer absorber

LIU Yuan[1], WU Jing-rui[1], WANG Yin[2]

(1. Xi'an Research Institute of High Technology, Xi'an 710025, China;
2. Jiangsu Jinhuan Environmental Protection Equipment Co., Ltd., Yixing 214200, China)

Abstract: The carbonyl iron (CIP)/$NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ double layer composite absorber was designed based on the electromagnetic transmission line theory and impedance matching principle, and the microwave absorbing coating with high performance was prepared based on epoxy resin. XRD and SEM were used to characterize the structure of the powder and coating. The coaxial method was used to mensurate the electromagnetic parameters of CIP and $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$. The reflectances of the surface layer and the bottom layer under the conditions of different thickness and different orders were calculated by using MATLAB software. The results show that, taking $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ as a surface layer and CIP as the bottom layer can greatly expand the coating absorption bandwidth and decrease the reflectance peak. While $NiLa_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ for surface layer, CIP for the bottom layer, with a thickness of 1.5mm and 0.6 mm, respectively, the absorbing effect of the coating is the best, the reflectance peak is −38.2 dB, and the bandwidth, which is less than −10 dB, is 13.4 GHz. The absorbents overall dispersion in the coating prepared meets the requirement, there are no obvious defects that exist. By comparison of the experimental and theoretical values, the accuracy of the optimal results is verified, thus, the requirements of microwave coatings strong absorption with a lesser thickness and the wideband are met.

Key words: absorbing materials; impedance matching; double layer; electromagnetic property

Foundation item: Project(2014JM2-5084) supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China
Received date: 2019-07-19; **Accepted date:** 2019-12-02

Corresponding author: LIU Yuan; Tel: +86-13468956247; E-mail: liuyuanbixue@163.com

(编辑　王　超)