

## 平面各向异性羰基铁/铁氧体复合吸波材料的设计

邓智平, 刘朝辉, 周国柱, 张行

(后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311)

**[摘要]** 研究了平面各向异性羰基铁/石蜡、铁氧体/石蜡同轴样品的介电常数与磁导率频谱特性,制备了平面各向异性羰基铁与铁氧体不同配比的石蜡同轴样品,并测试了样品的电磁频谱,发现以适当配比对二者进行复合后,可以发挥各自的优点。以环氧树脂-聚酰胺固化剂体系为基,按铁氧体和平面各向异性羰基铁的体积分数均为10%制备了厚1.3 mm的单层平板吸波材料,测试了其在8~18 GHz频段内的反射损耗曲线,其最小反射值达到了-19.7 dB,小于-10 dB的带宽达到8 GHz。

**[关键词]** 吸波材料; 羰基铁; 铁氧体; 反射损耗

**[中图分类号]** TQ630.6; TJ765.5

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2012)06-0104-04

## Design of Absorber of the Planar Anisotropic Carbonyl-iron/Ferrite Composites

DENG Zhi-ping, LIU Zhao-hui, ZHOU Guo-zhu, ZHANG Hang

(Dept. of Chemistry &amp; Material Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China)

**[Abstract]** The spectra of permittivity and permeability of the coaxial planar anisotropic carbonyl-iron (PACI)/paraffin and ferrite/paraffin composite samples were studied. The coaxial ferrite/PACI/paraffin composite samples with different volume concentration of the two kinds of particles were prepared. Their permittivity and permeability were also tested and studied which show preferable characteristics can be obtained by appropriate combinations. Using epoxy-polyamide system as the matrix resin, a single-layer coating with a 10% volume concentration of both ferrite and PACI particles was prepared, which has a thickness of 1.3 mm. The reflection loss was tested in the frequency range of 8~18 GHz, which shows a minimum reflection of -19.7 dB with a -10 dB bandwidth of nearly 8 GHz.

**[Key words]** absorbing materials; carbonyl-iron; ferrite; reflection loss

随着现代通信技术的飞速发展,各类电磁波元器件的应用越来越广泛,电磁兼容与电磁干扰问题在民用和军用领域都比较严重,因此人们开展了电磁波防护方面的研究。吸波材料作为解决电磁兼容和电磁干扰等问题的重要途径,近年来得到广泛重视和迅速发展<sup>[1-4]</sup>。在军事隐身材料领域,对吸波材料提出了“薄、轻、宽、强”的总发展目标,而吸收剂的研究和发展是实现这个目标的关键<sup>[5]</sup>。吸波材料的传输线理论<sup>[6-8]</sup>和四分之一波长理论<sup>[9]</sup>均表明,吸波材料的厚度等指标主要受介电常数和磁导率的影响。平面各向异性羰基铁(planar anisotropy carbonyl-iron, PACI)金属微粉突破了 Snoek 极限的限制<sup>[10-11]</sup>,具有优异的高

频磁性,可以降低吸收剂的用量和材料的厚度;但其介电常数较高,使得材料与自由空间的阻抗匹配特性受到影响,材料性能的发挥受到限制。六角晶系铁氧体具有介电常数小的特点。将这两种吸收剂进行复合,有望获得具有优异吸波特性的新型吸波材料。

## 1 实验

## 1.1 原材料

羰基铁原粉采用江苏天一超细金属粉末有限公司生产的球形羰基铁。铁氧体为电子科技大学研制的六角晶系铁氧体。涂层体系采用环氧树脂-聚酰胺固化

**[收稿日期]** 2012-09-13; **[修回日期]** 2012-10-23

**[作者简介]** 邓智平(1988—),男,四川人,硕士生,主攻雷达吸波涂层。

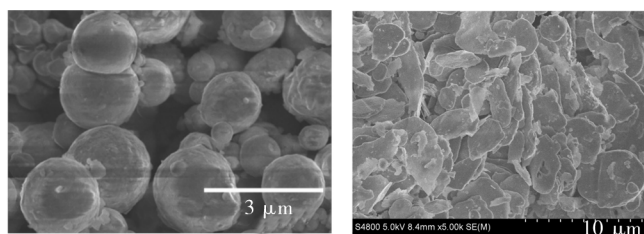
**[通信作者]** 刘朝辉(1965—),男,重庆人,博士,教授,主要研究方向为隐身材料与防腐涂层。

剂体系,环氧树脂的型号为 E44(蓝星新材料无锡树脂厂),低分子聚酰胺固化剂的型号为 650(镇江丹宝树脂有限公司)。喷涂所用方形铝板为自制,尺寸 18 cm×18 cm。

## 1.2 试样制备

### 1.2.1 平面各向异性羰基铁

利用 QM-2SP-CL 型行星式齿轮球磨机对球形羰基铁原粉进行球磨,制备平面各向异性的羰基铁颗粒微粉。球磨介质为 50 mL 正己烷,球料比为 25 : 1,球磨时间 8 h,球磨速度为 500 r/min。HITACHI S-4800 型场发射扫描电子显微镜(SEM)的扫描结果(图 1)显示,球形羰基铁原粉的颗粒直径为 0.1 ~ 3 μm,球磨后得到了片状的平面各向异性羰基铁颗粒微粉,颗粒直径为 1 ~ 60 μm。



a 球形羰基铁原粉

b 平面各向异性羰基铁

图 1 羰基铁的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM images of carbonyl-iron

### 1.2.2 石蜡同轴样品

先按设计的体积比称取一定质量石蜡固体于坩埚内,向坩埚中加入适量正己烷,然后置于 KQ5200DB 型超声清洗器中超声处理,直至石蜡固体完全溶于正己烷,时间大约 5 min。然后称取相应质量的吸收剂加入坩埚内,将坩埚置于超声清洗器中超声处理,直至正己烷全部挥发,时间大约 8 h。最后取出坩埚中的剩余固体,在碾钵中碾成均匀粉末,将该粉末状复合物放于同轴模具(模具内径为 3.04 mm,外径为 7.00 mm)中,在 FW-4 型压片机上加压到 1 MPa,加压时间 3 min,得到同轴样品。

### 1.2.3 吸波样板

通过 SKL-FS400 型高速分散研磨机,将吸收剂分别分散在环氧树脂和聚酰胺固化剂中,方法如下:将称量的环氧树脂(或分散剂)加入分散罐,低速(<500 r/min)搅动树脂,再将称取的吸收剂逐次加入,与树脂均匀混合,然后按与吸收剂的质量比为 1 : 1 加入铅珠,逐步调高转速至 4000 r/min 左右,加入适量二甲苯和正丁醇的混合液(二甲苯和正丁醇质量比为 5 : 1),分散 4 h,最后将铅珠用混合溶剂洗出。将分散好的两组分混合均匀,随即采用喷涂工艺逐次在铝板上进行喷涂,于常温下固化。

## 1.3 性能测试

根据 GJB 2038—1994,通过弓形法测试吸波样板的电磁波反射率,测试频段为 8 ~ 18 GHz。根据同一标准,通过微波矢量网络分析法测定复合材料试样的复数相对介电常数  $\epsilon_r$  ( $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ ) 和复数相对磁导率  $\mu_r$  ( $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$ ),所用矢量网络分析仪型号为 E8363B,测试频率范围为 0.1 ~ 18 GHz。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PACI 和铁氧体的电磁频谱特性

图 2 是 PACI 体积分数分别为 15%、20%、30% 的 PACI/石蜡同轴样品的电磁频谱。图 2a 显示,复合材料介电常数的实部和虚部都随 PACI 体积分数的增加而增大,特别是实部增大更为明显,其增长速率远大于磁导率。图 2b 显示,复合材料的磁导率虚部随 PACI 体积分数的增加而增大,最大值达到 3,表明复合材料具有较好的高频磁性,且随 PACI 体积分数的增加,其共振频率向低频方向移动。

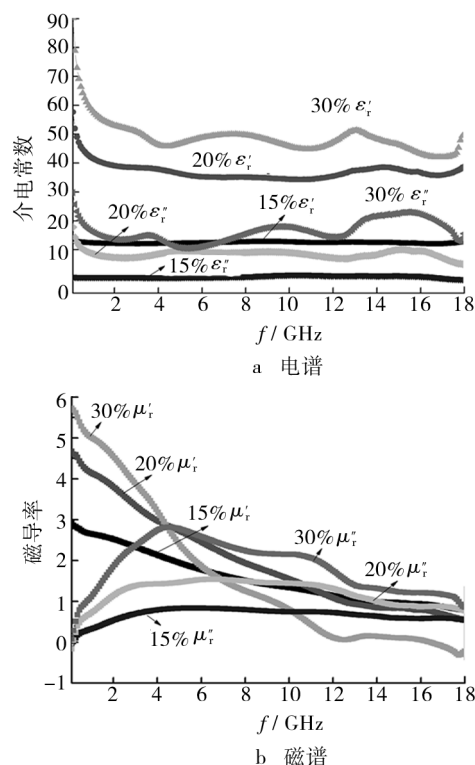


图 2 PACI/石蜡同轴样品的电谱和磁谱

Fig. 2 The complex permeability and permittivity spectra of the coaxial PACI/paraffin composite samples

图 3 是铁氧体体积分数分别为 20%、30%、40% 的铁氧体/石蜡同轴样品的电磁频谱。从图 3a 可以看出,铁氧体的介电常数较低,随其体积分数的增加,复合材料介电常数增大的幅度并不大,因此用铁氧体制

备涂层吸波材料时,其体积分数可以使用较高的值。图 3b 显示,该铁氧体磁导率虚部的值并不高,但呈现双峰的特性,这有利于拓宽吸波材料的频带。

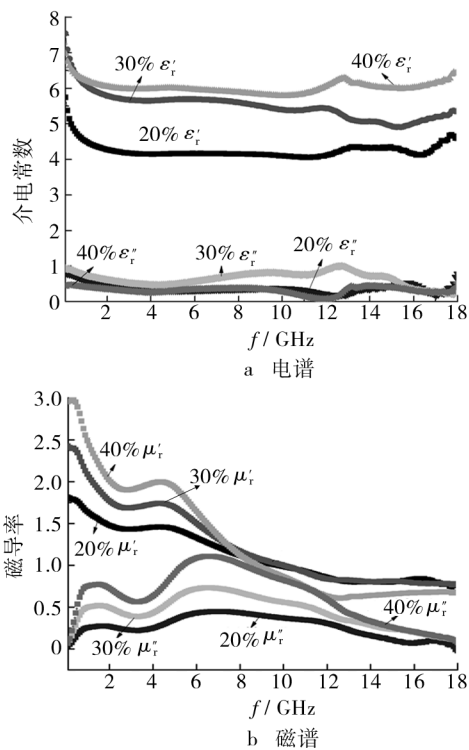


图 3 铁氧体/石蜡同轴样品的电谱和磁谱

Fig. 3 The complex permeability and permittivity spectra of the coaxial ferrite/paraffin composite samples

综上分析可知,PACI 具有好的高频磁性,对电磁波具有较强的磁损耗,用其作为吸收剂,可以在减少用量的同时降低材料的厚度;铁氧体具有较低的介电常数,与自由空间的阻抗匹配较好,且能够拓宽材料的吸收频带。对 PACI 和铁氧体进行复合和设计,有望获得吸收强、频带宽、薄而轻的新型吸波材料。

## 2.2 PACI/铁氧体复合同轴样品的电磁频谱特性

按铁氧体/PACI 的体积分数分别为 5%/15%, 10%/10%, 10%/15%, 15%/10% 及 15%/15%, 制备石蜡同轴样品,并依次编为 1<sup>#</sup>—5<sup>#</sup>。这五个样品的介电常数实部和磁导率虚部测试情况见图 4。

图 4 表明,PACI 体积分数为 15% 的样品(1<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>)的介电常数实部和磁导率虚部,都明显高于 PACI 体积分数为 10% 的样品(2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>),说明复合后,PACI 对材料介电常数实部和磁导率虚部起主要影响作用。此外,2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>样品的磁导率虚部相当于图 3b 中铁氧体高体积分数 40% 的水平,而其介电常数实部则相当于图 2a 中 PACI 低体积分数 15% 的水平,说明 2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>样品综合了 PACI 高磁性与铁氧体低介电常数的性质。同时,2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>样品中吸收剂的总用量较低(2<sup>#</sup>样品的总

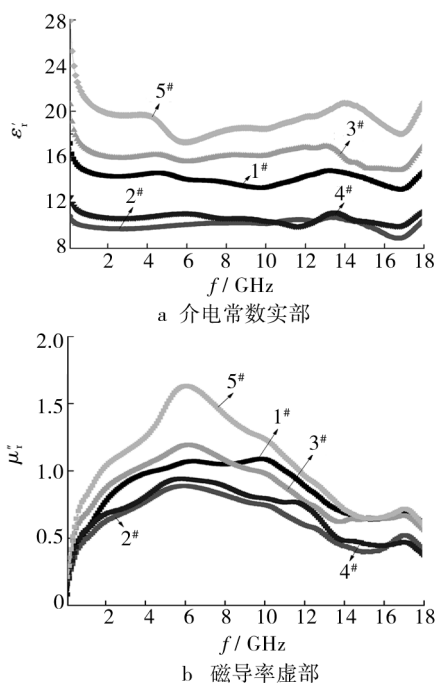


图 4 铁氧体/PACI/石蜡同轴样品的电磁参数

Fig. 4 The spectra of permittivity and permeability of the coaxial ferrite/PACI/paraffin composite samples

体积分数为 20%,4<sup>#</sup>样品为 25%),使得吸波材料具有质轻、施工性能好的优点。因此,选择 2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>样品中吸收剂的用量组合,制备 PACI/铁氧体复合单层平板吸波材料。

## 2.3 单层平板吸波材料的反射特性

按照 2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>同轴样品中铁氧体与 PACI 的用量组合,制备了吸波样板,同样分别称为 2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>,在 8~18 GHz 频段内测试了其反射损耗,反射损耗曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,4<sup>#</sup>样板(铁氧体和 PACI 体积分数分别为 15% 和 10%)在涂层厚度为 1.5 mm 时,测试频段内的最大反射损耗为 -14.2 dB,小于 -10 dB 的频带宽度为 6.4 GHz;而 2<sup>#</sup>样板(铁氧体和 PACI 体积分数分别为 10% 和 10%)在涂层厚度为 1.3 mm 时,测试频段内的最大反射损耗达到了 -19.7 dB,小于

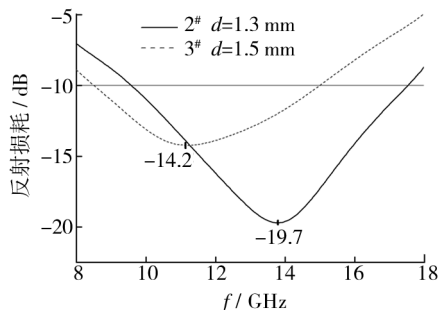


图 5 PACI/铁氧体复合单层平板吸波样品的反射损耗曲线

Fig. 5 Reflection loss of the PACI/ferrite composite single-layer coating samples

-10 dB 的频带宽度达到了 8 GHz, 在 8 ~ 18 GHz 频段内显示了较好的吸波性能。

### 3 结论

1) PACI 具有较好的高频磁性, 在含量比较低时也具有较高的磁导率虚部, 对电磁波具有较强的磁损耗, 同时其介电常数(特别是实部)较大, 并随含量的升高增长得很快, 不利于与自由空间进行阻抗匹配。铁氧体具有较低的介电常数实部, 磁导率虚部值不高, 但呈现双峰, 有利于阻抗匹配和拓宽频带。将 PACI 与铁氧体以一定配比进行复合, 可以发挥这两种吸收剂的优点, 制备出具有较好吸波性能的材料。

2) 以环氧树脂-聚酰胺固化剂体系为基, 按铁氧体和 PACI 体积分数均为 10% 制备的单层平板吸波材料, 涂层厚 1.3 mm 时, 在 8 ~ 18 GHz 频段内的最大反射损耗可达 -19.7 dB, 小于 -10 dB 的频带宽度达到 8 GHz, 具有薄而轻、反射损耗强以及频带宽的性质。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] OH Jung-hoon, OH Kyung-sub, KIM Chun-gon, et al. Design of Radar Absorbing Structures Using Glass/Epoxy Composite Containing Carbon Black in x-band Frequency Ranges[J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35(1): 49—56.
- [2] SEO Li-sung, CHIN Woo-seok, LEE Dai-gil. Characterization of Electromagnetic Properties of Polymeric Composite Materi-

(上接第 81 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] WILLIAM H H, GREEN H. Improvements in or Relating to the Surfaces of Stainless or Restless Steel or Irons[J]. Thin Solid Films, 1996, 287(9): 80—86.
- [2] STOYCHEV D, STEFANOV P, NICOLOVA D, et al. Chemical Composition and Resistance of Passive Chromate Films Formed on Stainless Steels 316L and 1. 4301[J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 73(2): 252—258.
- [3] 陈天玉. 不锈钢表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 265—267.
- [4] EVANS T E, CHART A, SKEDGELL A N. The Colored Film on Stainless Steel[J]. Trans Inst Metal Finishing, 1973, 17(3): 51—108.
- [5] EVANS T E. The Mechanism of the Colored Film on Stainless Steel[J]. Corrosion Science, 1977, 17(2): 105—109.
- [6] 胡俊利, 满瑞林, 梁永煌, 等. 不锈钢表面化学着色的研究进展[J]. 电镀与环保, 2012, 32(3): 4—6.

- als with Free Space Method[J]. Composite Structures, 2004, 66(1/2/3/4): 533—542.
- [3] 熊国宣, 徐玲玲, 邓敏, 等. 掺杂 TiO<sub>2</sub> 水泥的吸波材料性能与力学性能研究[J]. 功能材料与器件学报, 2005, 11(1): 87—91.
- [4] YUSOFF A N, ABDULLAH M H. Microwave Electromagnetic and Absorption Properties of some LiZn Ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 269(2): 271—280.
- [5] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] 邹田春, 赵乃勤, 师春生, 等. 吸波材料吸波性能的计算及其优化设计[J]. 功能材料, 2005, 36(7): 988—991.
- [7] 甘治平, 官建国, 王维. 单层均匀吸波材料电磁参数的匹配研究[J]. 航空材料学报, 2002, 22(2): 37—40.
- [8] 邹田春, 赵乃勤, 师春生. 活性碳纤维/树脂复合吸波材料的设计[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(1): 54—58.
- [9] ZHANG Zhao-qi, WEI Jian-qiang, YANG Wei-feng, et al. Effect of Shape of Sendust Particles on Their Electromagnetic Properties within 0. 1 ~ 18 GHz Range[J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406(2): 3896—3900.
- [10] HAN Rui, QIAO Liang, WANG Tao, et al. Microwave Complex Permeability of Planar Anisotropy Carbonyl-iron Particles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(6): 2734—2737.
- [11] HAN Rui, HAN Xiang-hua, QIAO Liang, et al. Superior Electromagnetic Properties of Oriented Silica-coated Planar Anisotropy Carbonyl-iron Particles in Quasimicrowave Band[J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406(10): 1932—1935.

- [7] 陈天玉. 不锈钢表面处理应用技术简介( I ) [J]. 材料保护, 2002, 35(2): 45—46.
- [8] 方景礼, 韩克平. 不锈钢化学抛光的定量研究[J]. 电镀与环保, 1995, 15(6): 15—17.
- [9] 彭敏, 曲宁松, 朱获. 不锈钢电解抛光工艺研究[J]. 航空精密制造技术, 2001, 37(3): 6—10.
- [10] KAO P S, HOCHENG H. Optimization of Electrochemical Polishing of Stainless Steel by Grey Relational Analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1): 255—259.
- [11] LIN C C, HU C C. Electropolishing of 304 Stainless Steel: Interactive of Glycerol Content, Bath Temperature, and Current Density[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(4): 448—454.
- [12] TANG Z P, XUE Y Q, LUAN C H. One-step Method for Determining the Brightness, the Color and the Thickness of Coloring Stainless Steel Colored Film[J]. Contemporary Chemical Industry, 2007, 36(3): 321—324.
- [13] GB/T 10127—2002 不锈钢三氯化铁缝隙试验方法[S].