

文章编号: 1004-0609(2006)03-0524-06

Fe-Si-Al 系合金粉微波吸收特性^①

曹 琦, 龚荣洲, 冯则坤, 聂 彦
(华中科技大学 电子科学与技术系, 武汉 430074)

摘 要: 采用扁平化工艺以及绝缘包覆工艺对铁硅铝系软磁合金粉末进行改性。对实验样品进行扫描电镜分析, 观察颗粒形貌对材料性能的影响; 探讨球磨时间以及不同绝缘介质含量对于材料电磁性能的影响规律。根据单层吸波材料(含导电衬底)对电磁波的反射率公式的分析以及对不同样品反射率的计算可知, 球磨扁平化工艺以及绝缘包覆工艺可有效地改善铁硅铝金属粉末的微波吸收性能。经改性后的铁硅铝系软磁金属粉末在 1.0~3.5 GHz 频段具有较好的吸波性能, 可应用于抗电磁干扰领域。

关键词: Fe-Si-Al 系合金; 扁平化处理; 包覆工艺; 反射系数

中图分类号: TM 25

文献标识码: A

Microwave absorption property of Fe-Si-Al magnetic alloy powders

CAO Qi, GONG Rong-zhou, FENG Ze-kun, NIE Yan

(Department of Electronic Science and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By flattening the metallic materials and by means of a chemical coating method, the anti-electromagnetic interference characteristic of the Fe-Si-Al magnetic alloy powder can be improved. The influence of different flattening time and the different additive contents of insulative materials on electromagnetic parameters of Fe-Si-Al magnetic alloy powders were discussed. The formulas of reflection coefficient of absorbing materials with conduction bases was analysed. The results shows that this materials can be used as absorbing materials on 1.0~3.5 GHz.

Key words: Fe-Si-Al magnetic alloy powders; flattening; chemical coating method; reflection coefficient

随着电子信息技术的高速发展, 个人计算机和移动电话等电子设备的信号处理日趋高速化。个人计算机中中央处理器时钟脉冲频率升高; LAN 等移动通信设备的工作频率上升到 GHz; 开关电源的开关频率提高到 MHz 频段。随之而来, 电磁波干扰频率越来越高。同时为满足设备小型轻量化的要求, 促使电路高度集成, 元件高密度组装, 而使其抗干扰能力下降。因此仅仅采用目前的电磁吸收、屏蔽手段, 难以奏效^[1]。为了抑制高频发射噪声引起的电磁波泄漏、电路内部的电磁干扰、共振现象和不需要的辐射, 就需要开发高频损耗大的电磁波吸收材料, 有效地吸收电磁噪声能量^[2]。目前通用

的抗 EMI 设计技术有吸波技术、屏蔽技术、接地技术^[3]。吸波技术与目前使用较多的屏蔽技术最本质上的区别是吸波材料将照射到其表面的电磁波吸收, 转化为其他形式的能量消耗掉, 而不是反射回去。吸波技术已在世界各国得到广泛重视, 并被广泛利用。

在 20 世纪 40 年代, 软磁铁氧体被广泛用于高频领域。虽然铁氧体在几百 MHz 频段内是应用最广也最有效的抗电磁干扰材料, 然而, 当到达 GHz 频段时由于其 Snoek 极限值而导致其吸收干扰波性能变差。金属磁性材料的饱和磁感应强度高过于铁氧体, 微波段的磁导率高, 有利于实现薄层化,

① 收稿日期: 2005-07-07; 修订日期: 2005-10-24

作者简介: 曹 琦(1982-), 女, 硕士研究生

通讯作者: 龚荣洲, 教授; 电话: 027-87547337; E-mail: rzhgong@sina.com

而 Snoek 极限值所达到的频率也高于铁氧体材料。因此, 可以采用金属磁性材料来满足 GHz 频段以上抗干扰吸收器件的要求。同时, 金属磁性材料居里温度较高, 在解决好氧化问题后, 温度稳定性比铁氧体材料好。基于上述考虑, 近年来提出了使用橡胶或者环氧树脂作粘结剂的铁硅铝系软磁合金粉末^[4~6]。有文献理论分析提出^[7, 8], 由片形或针形颗粒构成的材料的吸波性能会优于由球形颗粒构成的材料, 本文作者通过对合金材料的扁平化处理, 使得颗粒实现扁平化, 并加以包覆, 从而获得较好的吸波特性。

1 实验

1.1 材料改性

本实验选用市售铁硅铝材料(Fe, Si, Al 的质量分数分别为 84%, 10%, 6%)。工艺上首先对铁硅铝材料进行扁平化处理。将铁硅铝材料按球料质量比为 10:1 与钢球一起装入不锈钢罐中, 并加入少量偶联剂、酞菁铜, 同时加入丙酮(材料与丙酮的质量比为 2:1), 球磨机转速为 460 r/min, 球磨时间分别取 2、2.5、3、5 h。所得粉末样品编号分别为 A、B、C、D。球磨后金属磁性微粉的性能与不同的球磨工艺密切相关, 例如: 球料溶剂比、球磨时间、转速等。

利用化学包覆法对球磨 3 h 后的材料进行绝缘包覆。首先, 配制粉末包覆液, 称取适当质量比的磷酸(H_3PO_3)、硼酸(H_3BO_3)等无机氧化物加水溶解, 并滴入少量甘油以使包覆液具有良好的浸润性能和成膜性能。待包覆液溶解至透明, 将选用的粉末按一定质量比与包覆液混合均匀, 在温度为 70 °C 的水浴中进行搅拌初步干燥, 最后在真空炉中 200 °C 下加热 1 h 烘干待用。分别制备了粉末与包覆液中无机氧化物的质量比为 2:100、3:100、4:100、5:100 的粉末样品。所得粉末样品编号分别为 C1、C2、C3、C4。

1.2 样品性能检测

用扫描电镜(SEM)观察球磨不同时间并进行绝缘包覆后样品的形貌。

经过球磨后的金属磁性微粉与粘结剂(质量分数为 20%)均匀混合, 压制成外径 7 mm 内径为 3 mm 的同轴样品。借助 Agilent8722ES 矢量网络分析仪采用传输反射法来进行电磁参数的测试, 在 0.1~3.5 GHz 频率范围内测量不同样品的复数磁

导率和复介电常数。

2 结果及分析

2.1 扫描电镜分析

铁硅铝球磨不同时间后绝缘包覆的扫描电镜形貌示于图 1。可以看出, 当球磨时间为 3 h 时, 样品的颗粒粒度大约为 20 μm , 且其扁平化效果很好; 当球磨时间为 5 h 时, 样品的颗粒粒度减小, 大约为 10 μm , 且有少量的小颗粒出现(见图 1(b)); 铁硅铝粉末外围的绝缘介质层厚度较为均匀, 粉末之间隔离良好, 从而使粉末之间的绝缘性能提高, 材料电阻率升高, 这样最终会使其介电常数有所降低。

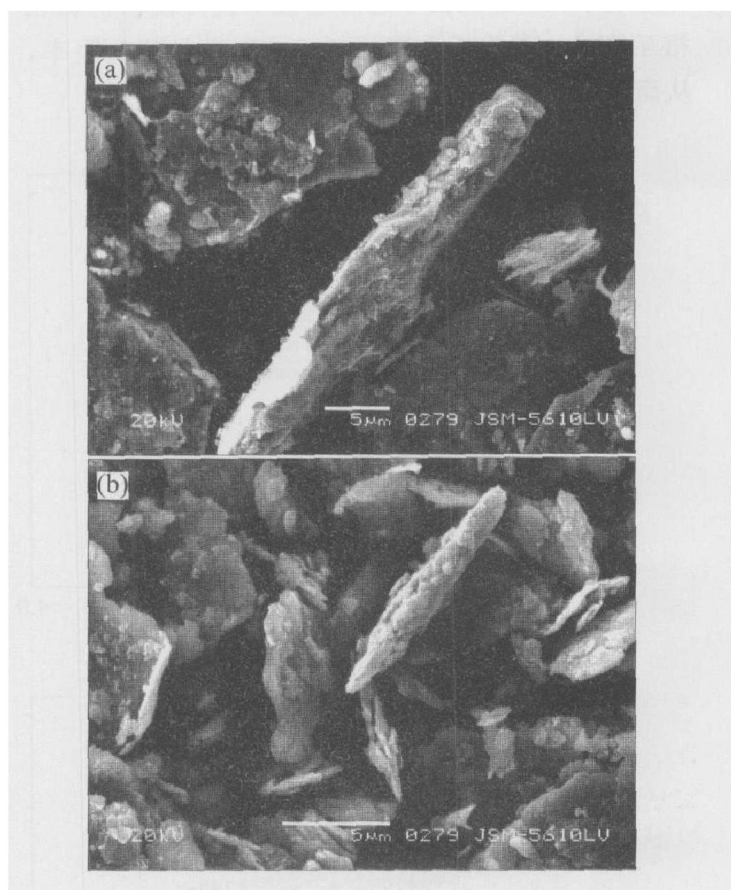


图 1 FeSiAl 合金微粉绝缘包覆后的扫描电镜形貌

Fig. 1 SEM micrographs of flattened and chemical coated Fe-Si-Al alloy

(a) —3 h; (b) —5 h

2.2 材料电磁特性

材料的复介电常数以及复磁导率频谱(0.1~3.5 GHz)随球磨时间不同的变化曲线示于图 2。可见, 磁导率实部 μ' 、磁导率虚部 μ'' 随着球磨时间的增加而增加, 粉末颗粒扁平化处理改变了其形状各向异性以及粉末粒度, 因而对其磁性能产生了较大

的影响。可知样品 C 的 μ'' 最大, 这是由于球磨工艺中采用了偶联剂以及酞菁铜, 起到了一定的包覆作用, 对其磁性能也会有一定影响。对于样品 D 而言, 随球磨时间增加, 颗粒的表面积更大, 所包覆的绝缘介质更多, 从而导致磁性参数反而下降。介电常数实部 ϵ' 值随频率变化不大, 对于样品 C 而言, 其 ϵ' 维持在 33 左右。同样由于球磨工艺中采用了偶联剂以及酞菁铜, 起到了一定的包覆作用, 所以, 由图可以看出其介电常数虚部 ϵ'' 均较小, 且随着球磨时间的增加而下降。

材料复介电常数以及复磁导率频谱(0.1~3.5 GHz)随绝缘介质含量不同的变化曲线示于图 3。可见, 绝缘介质的含量对材料性能有较大影响, 随着绝缘介质含量的增加, 介电常数显著下降, 磁性能却影响不大。这是由于通过包覆工艺可使粉末颗粒相互绝缘, 降低其涡流损耗, 提高材料的电阻率, 从而降低其介电性能。

2.3 样品吸波性能分析

在电磁波吸收材料中, 应尽可能提高 μ' , ϵ'' 的值。但是只有电磁波进入吸波材料内部后, 吸波材料的各种吸波机制才能发挥作用^[9]。入射到材料表面上的电磁波能否进入材料内部, 完全取决于吸波材料与空气界面两侧材料的波阻抗。当电磁波由空气进入吸波介质时, 若满足波阻抗匹配, 则电磁波入射到介质表面就能最大限度地进入介质而被吸收。真空波阻抗 $z_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ (式中 μ_0 、 ϵ_0 分别为真空磁导率和介电常数), 吸波材料波阻抗 $z_2 = \sqrt{\frac{(\mu' - j\mu'')\mu_0}{(\epsilon' - j\epsilon'')\epsilon_0}}$, 若 $z_1 = z_2$ (即波阻抗匹配), 则吸波材料必须满足 $(\mu' - j\mu'') = (\epsilon' - j\epsilon'')$ 。但是在微波段金属粉末类 ϵ 远远大于 μ , 因此必须对吸波材料进行改性, 降低 ϵ 而提高 μ , 才能达到好的吸波效果。

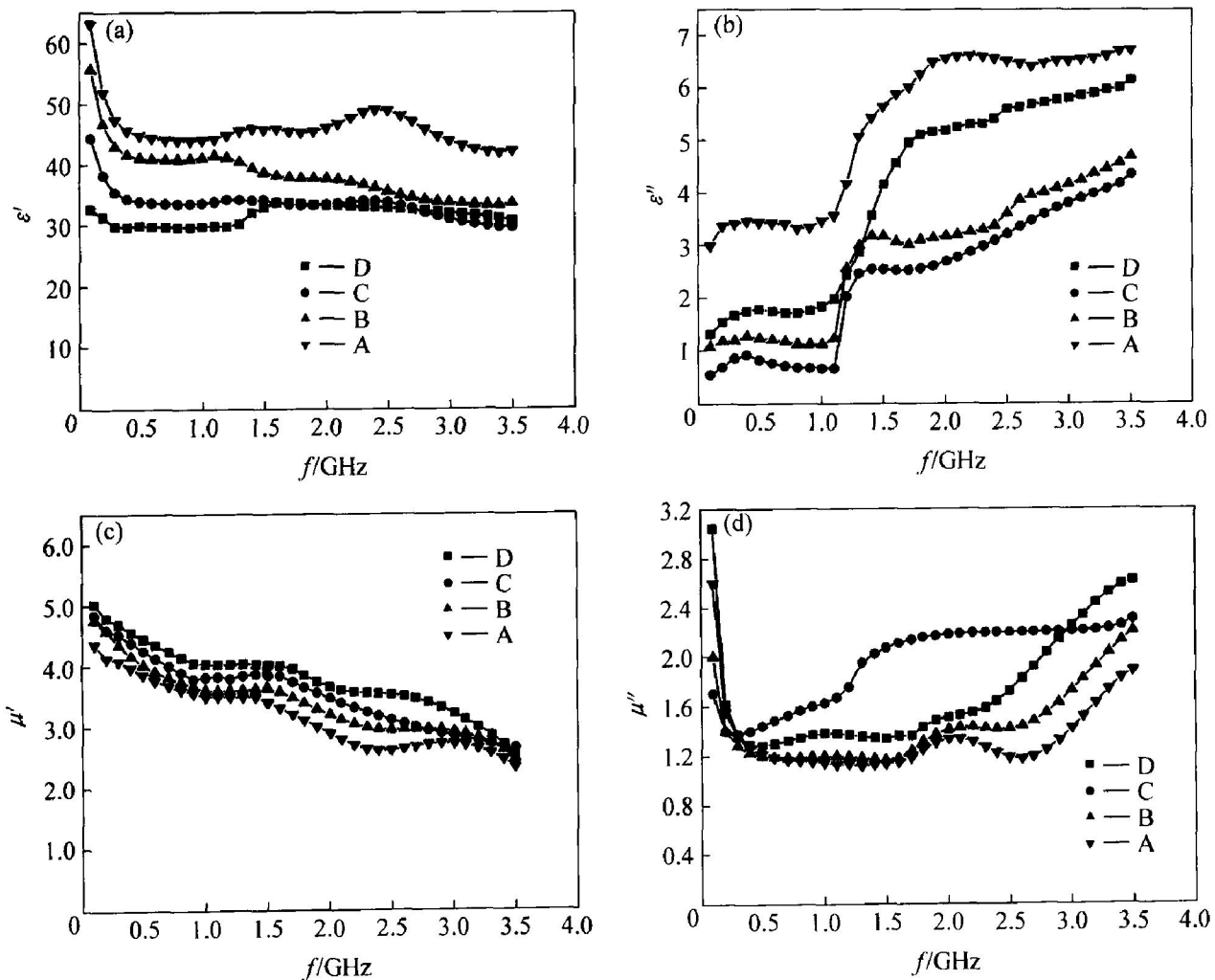


图 2 不同球磨时间后材料的 ϵ 、 μ 谱

Fig. 2 ϵ and μ spectrum of materials after different flattening time

(a) $-\epsilon' - f$ curve; (b) $-\epsilon'' - f$ curve; (c) $-\mu' - f$ curve; (d) $-\mu'' - f$ curve

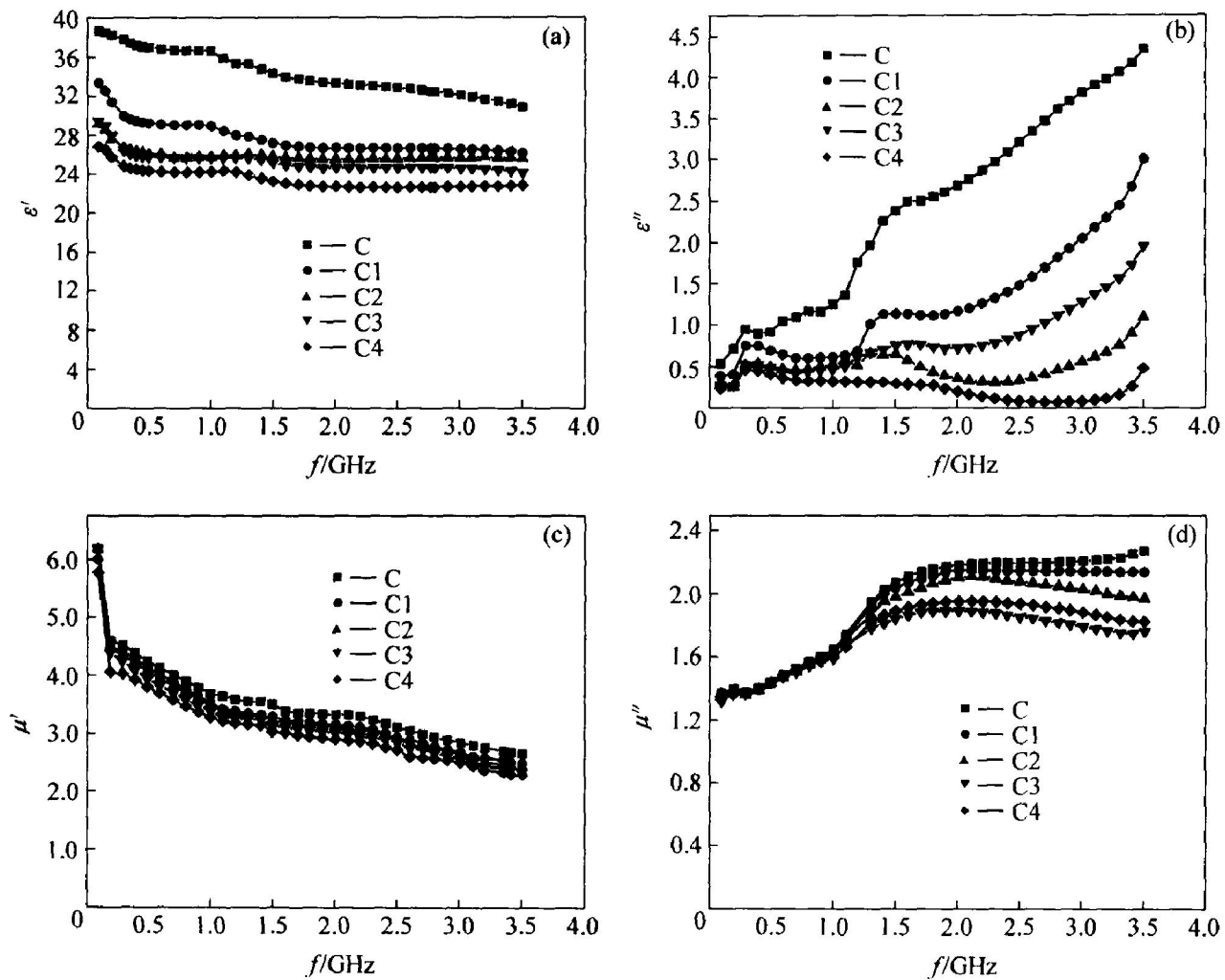


图 3 绝缘介质含量不同时材料的 ϵ μ 谱

Fig. 3 ϵ and μ spectrum of materials with different additive contents of insulative materials
(a) $-\epsilon'-f$ curve; (b) $-\epsilon''-f$ curve; (c) $-\mu'-f$ curve; (d) $-\mu''-f$ curve

本实验中,通过球磨工艺提高了铁硅铝系软磁金属粉末 μ' , μ'' ;同时,通过包覆工艺可使粉末颗粒相互绝缘,降低其涡流损耗,提高材料的电阻率,降低其介电性能,也使磁性能与介电性能最大限度地趋于匹配,从而提高材料的吸收率即改善了材料的吸波性能。

吸波材料的反射率值用来评价材料的吸波性能。单层吸波材料(含导电衬底)的反射率是介电常数和磁导率以及频率 f 和厚度 d 的函数,反射系数计算公式为^[10]

$$\Gamma = 20 \lg \left| \frac{z \tanh(jk \cdot d) - z_0}{z \tanh(jk \cdot d) + z_0} \right|$$

式中 k 为传播常数, $k = 2\pi f \times \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 (\epsilon' - j\epsilon'')(\mu' - j\mu'')}$; z 为波阻抗, $z = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j\epsilon''}} \mu_0$; z_0 为真空波阻抗 = $120\pi \Omega$; μ_0 , ϵ_0 分别为真空磁导率和介电常数; d 为吸波层厚度。

由所测量的样品电磁参数计算出经改性后的材料的反射率随频率变化曲线(1.0~ 3.5 GHz)如图 4 所示。样品 C2 在不同厚度下(2、2.5、3 mm)的反射率见图 4(a)。在 2.5 mm 厚度条件下,不同样品的反射率见图 4(b)。

由图 4(a)可看出,随着吸波涂层厚度的增加,吸收峰由高频向低频移动,且在低频吸收峰的宽度变窄。厚度为 2 mm 的吸收峰位于 3.4 GHz,反射率最低为 -14 dB;厚度为 2.5 mm 的吸收峰位于 2.79 GHz,反射率最低为 -16.4 dB, -10 dB(90% 吸收率)带宽从 2.3 GHz 到 3.35 GHz,约为 1 GHz;厚度为 3 mm 的吸收峰位于 2.26 GHz,反射率最低为 -19 dB, -10 dB 带宽从 1.85 GHz 到 2.78 GHz。

由图 4(b)可知,对于 2.5 mm 厚度的材料,样品 C2, C4, A 吸收峰峰值所对应的频率分别为 2.79 GHz(-16.4 dB)、3.27 GHz(-13.15 dB)、

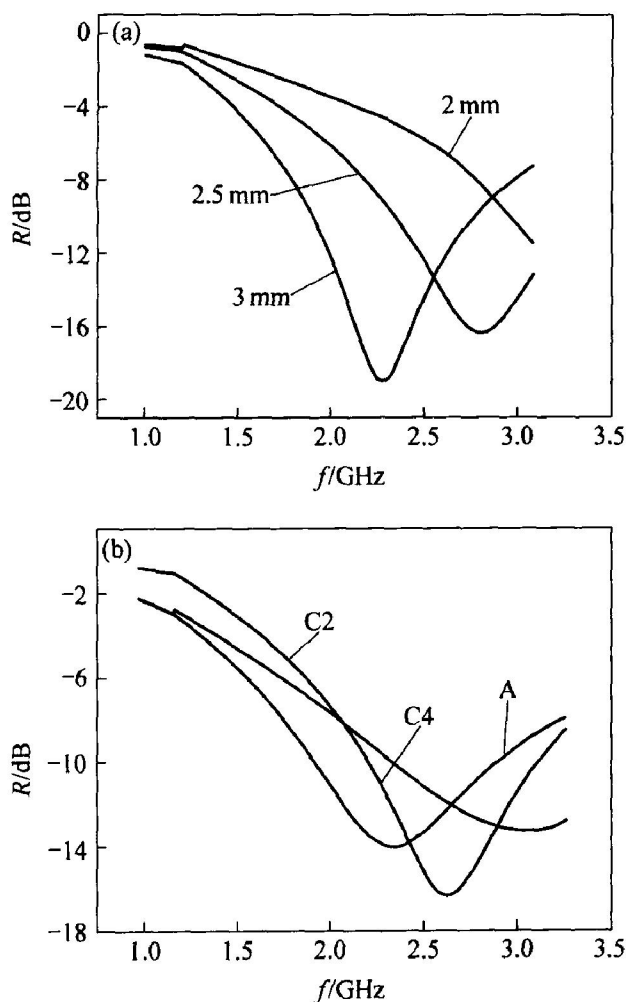


图 4 样品反射率计算曲线

Fig. 4 Calculated reflectivity curves of sample

(a) —Thickness—reflecting curves;

(b) —Reflecting curves of different samples

2.49 GHz (-14 dB)。对于样品 C2, 其磁导率最大, 而介电常数相比其它的较小, 其反射率曲线的吸收峰较强, 反射率随频率变化快。而对于样品 A、C4, 其反射率随频率变化较小, 其反射率曲线的吸收峰也较弱。同时可以看出, 随着球磨时间的增加以及绝缘介质含量的增加, 吸收峰向高频移动。这是由于材料反射率的减小主要来源于^[11, 12]: 一是入射到材料表面及其底面的反射波之间的干涉作用; 二是吸收剂对电磁波的吸收作用。当产生干涉作用时, 其材料的厚度 d 与入射电磁波的波长 λ 和材料的介电常数 ϵ 、磁导率 μ 有如下关系:

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon\mu}}$$

若材料厚度一定, 当球磨时间增加, 由于 $\epsilon\mu$ 减小, 产生干涉作用时的入射电磁波波长减小, 即干涉峰向高频移动, 同时, 由于样品 C2 的 μ' 提高, 同时其电磁参数较为匹配, 故吸收峰增大。而若绝

缘介质含量增加, 由于 ϵ 、 μ 均减小, 故产生干涉作用时的入射电磁波波长减小, 干涉峰向高频移动, 同时, 由于 μ' 、 ϵ'' 均减小故吸收峰减小。

3 结论

1) 可采用扁平化处理对铁硅铝系软磁金属粉末进行改性, 其磁性参数 μ' 、 μ'' 均有所提高, 改性后的材料具有较好的吸波特性。采取上述球磨工艺球磨 3 h 的样品, 其综合性能最好, 吸波特性最优。

2) 采用化学包覆法对铁硅铝材料进行表面包覆处理可以显著降低其介电常数, 有利于使其作为电磁波吸收材料使用时达到阻抗的匹配。

3) 经过改性后的铁硅铝系软磁金属粉末在 1.0~3.5 GHz 频段具有较好的吸波性能, 可应用于抗电磁干扰领域。

REFERENCES

- [1] Butcher P M, Withnall S G. A practical strategy for EMC design[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1993, 5(4): 257-264.
- [2] Maddocks A J. Advances in design for EMC[J]. Science Measurement and Technology, 1994, 141(4): 293-296.
- [3] Uchikoba F. Multilayer EMC devices using GHz absorption of iron resin composite materials[A]. Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology (IEMT) Symposium[C]. 1997. 362-367.
- [4] 张卫东, 张明雪. 雷达吸波涂层研究进展[J]. 隐身技术, 1999(1): 6-9.
ZHANG Weidong, ZHANG Ming-xue. Progress of radar wave absorbing coating[J]. Stealthy Technology, 1999(1): 6-9.
- [5] Thoumire O, Atmani H, Teilet J, et al. Structural, mechanical and magnetic properties of nitrated FeSi and FeSiAl sheets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 196: 346-348.
- [6] Daval J, Bechevet B, Arroyo J, et al. Thick and stress-free Sendust films on silicon for recording head cores[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(6): 3930-3932.
- [7] Yanagimoto K, Majima K, Sunada S, et al. Effect of powder compositions on GHz microwave absorption of EM absorbing sheets[J]. J Jpn Soc Powder Powder Metallurgy, 2004, 51(4): 293-296.

- [8] 葛副鼎, 朱 静, 陈利民. 吸收剂颗粒形状对吸波材料性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 1996, 5: 42 - 49.
GE Fu-din, ZHU Jing, CHEN Li-ming. Effects of inclusion-shape on absorbing ability of microwave absorbing materials[J]. Aerospace Materials and Technology, 1996, 5: 42 - 49.
- [9] 周克省, 黄可龙, 孔德明, 等. 吸波材料的物理机制及其设计[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(6): 617 - 621.
ZHOU Ke-sheng, HUANG Ke-long, KONG De-ming, et al. Physical mechanism and design of materials with electromagnetic wave absorption function[J]. J Cent South Univ Technol, 2001, 32(6): 617 - 621.
- [10] 杨志民, 毛昌辉, 杨 剑, 等. 低频(3 GHz)微波吸收材料电磁参数匹配特性的研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(6): 1006 - 1009.
YANG Zhi-min, MAO Chang-hui, YAN Jian, et al. Matching characteristic of electromagnetic parameters of microwave absorbing materials for low frequency(3 GHz)[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(6): 1006 - 1009.
- [11] 穆武第, 程海峰, 唐耿平, 等. 添加导电纤维对羰基铁粉吸波性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(4): 557 - 560.
MU Wu-di, CHENG Hai-feng, TANG Geng-ping, et al. Effect of addition of electrical conductive fiber on radar absorbing property of carbonyl iron powder [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2005, 23(4): 557 - 560.
- [12] 梁 沂, 彭 刚, 薛明华. 便携式吸波涂料吸波性能测试系统的研究[J]. 微波学报, 2005, 21(2): 60 - 62.
LIANG Yi, PENG Gang, XUE Ming-hua. Research of portable measurement system for RAC absorbing performance[J]. Journal of Microwaves, 2005, 21(2): 60 - 62.

(编辑 陈爱华)