

颗粒尺寸对 Fe-Si-Al 电磁与吸波性能的影响

周 熠 丘 泰 冯永宝

(南京工业大学材料科学与工程学院,南京 210009)

文 摘 为阐明吸收剂的颗粒尺寸与吸波材料电磁、吸波性能之间的关系,以雾化球状 Fe-Si-Al 粉末为原料,通过筛分获得不同颗粒尺寸的 Fe-Si-Al 合金,以硅橡胶为基体制备了 Fe-Si-Al 吸波材料。借助振动样品磁强计和矢量网络分析仪分别研究了颗粒尺寸对 Fe-Si-Al 粉末和吸波材料的比饱和磁化强度、电磁参数和吸波性能的影响。结果表明:随着颗粒尺寸的减小,Fe-Si-Al 粉末的比饱和磁化强度增加;吸波材料的复磁导率增加,复介电常数减小;3 mm 厚的 Fe-Si-Al 吸波材料随其颗粒尺寸的减小,匹配频率向低频移动。减小吸收剂的粒径有助于提高其磁性能和吸波材料的低频吸收效果。

关键词 Fe-Si-Al 合金,颗粒尺寸,吸波材料,复介电常数,复磁导率

Effects of Particle Size on Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Fe-Si-Al Alloy Microwave Absorbing Materials

Zhou Yi Qiu Tai Feng Yongbao

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009)

Abstract In order to clarify the relationship between particle size of absorbents and the electromagnetic, microwave absorption properties of microwave absorbing materials, gas atomized spherical Fe-Si-Al alloy powders were used as raw materials, and Fe-Si-Al alloy powders with different particle sizes were obtained through screening. Fe-Si-Al alloy microwave absorbing materials were prepared with silicone rubber as matrix. Effects of particle size on specific saturation magnetization, electromagnetic parameters and microwave absorption properties of Fe-Si-Al alloy powders and microwave absorbing materials were investigated with sample vibrating magnetometer and vector network analyzer. The results show that specific saturation magnetization of Fe-Si-Al alloy powders and complex permeability of microwave absorbing materials increase, and complex permittivity decreases with the decrease of particle size. Moreover, the matching frequency of Fe-Si-Al alloy microwave absorbing materials with thickness 3 mm shifts to low frequency with particle size decreasing. The reduction of the absorbents' particle size can contribute to the improvements of their electromagnetic properties and microwave absorption properties in the low frequency range.

Key words Fe-Si-Al alloy, Particle size, Microwave absorbing materials, Complex permittivity, Complex permeability

1 引言

随着现代科学技术和军事技术的发展,微波吸收材料在军用隐身材料和民用抗电磁干扰和辐射领域得到了广泛的应用。但是仍存在一些不足,如微波吸收材料存在频带窄、密度大、性能低等缺点。目前,国内外研究人员主要从吸收剂的制备^[1-2]、吸波材料的设计角度^[3-4]去提高材料的电磁和吸波性能。而吸波材料性能的好坏关键在于吸收剂的选择,而吸收剂的吸波性能主要依赖于吸收剂颗粒的本征特性如微

结构、组分、大小、形状、取向等等以及颗粒在复合材料中的体积分数^[5]。近年来不少学者在吸收剂的组分^[6]、微结构^[7]以及体积分数^[8]方面作过一些研究,但是关于吸收剂颗粒尺寸与材料的电磁与吸波性能之间关系的研究报道却很少。

吸波材料的吸波性能与其电磁参数密切相关^[9],磁导率的适当提高和介电常数的适当降低有助于改善其吸波性能^[7]。传统的铁氧体吸波材料由于其复介电常数和复磁导率实部较小且匹配困难等

收稿日期:2009-09-04;修回日期:2009-10-12

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(09KJB430006)

作者简介:周熠,1984 年出生,硕士研究生,主要从事微波吸收材料的研究。E-mail: zhouyixiaoyi@126.com

不足,因而难以满足高性能吸波材料的要求。Fe-Si-Al 软磁材料具有高的饱和磁化强度和高的复磁导率,并且由于其价格低廉而被广泛用来制备微波吸收材料。

本文利用标准筛对 Fe-Si-Al 粉末筛分,获得不同颗粒尺寸的 Fe-Si-Al,研究颗粒尺寸与制备出的 Fe-Si-Al 吸波材料电磁参数和吸波性能的关系,为今后这类吸收剂的研究提供实验上的参考依据。

2 实验

2.1 原料

气雾化球形 Fe-Si-Al 粉末购于长沙骅骝冶金粉末有限公司,纯度 $\geq 99.5\%$,颗粒尺寸 D 为 $20 \sim 106 \mu\text{m}$,Fe/Si/Al 质量比为 85.16/9.54/5.3。110-2 型硅橡胶生胶购于山东大易化工有限公司。

2.2 样品制备

利用标准筛(150 ~ 625 目)对 Fe-Si-Al 粉末进行筛分,制备得到具有不同颗粒尺寸(74 ~ 106,58 ~ 74,48 ~ 58,25 ~ 38 和 20 ~ 25 μm)的合金粉末。

将不同颗粒尺寸 Fe-Si-Al 粉末、硅橡胶及硫化剂等,在双辊筒炼胶机上混炼均匀,再在平板硫化机上硫化制成内径 3.04 mm、外径 7.0 mm、厚 3 mm 的环状吸波材料,合金粉末在吸波材料中的体积分数均为 43%。

2.3 测试与表征

采用 ADE 公司 EV5 型振动样品磁强计测量不同颗粒尺寸 Fe-Si-Al 粉末的比饱和磁化强度 σ_s 。采用 Agilent 公司 HP8722ET 型矢量网络分析仪,根据传输/反射法^[10]测量吸波材料的电磁参数,并利用同轴反射法^[11]测试其吸波性能,扫频范围均为 1 ~ 10 GHz。

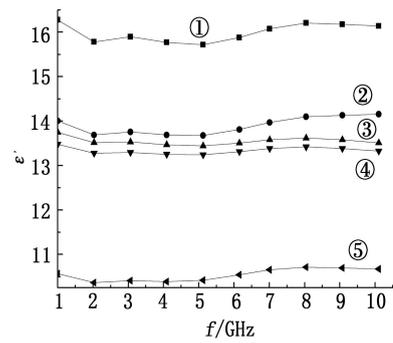
3 结果与讨论

3.1 颗粒尺寸对电磁参数的影响

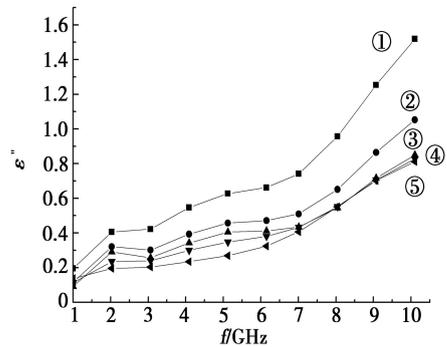
由于合金粉末难以直接进行电磁参数的测量,一般将其与胶黏剂均匀混合后制成复合材料来对吸波材料的电磁参数进行分析。因此,论文将不同颗粒尺寸的 Fe-Si-Al 粉末与硅橡胶按体积分数 43% 制成 3 mm 吸波材料后,对其电磁性能进行研究。图 1 是不同颗粒尺寸 Fe-Si-Al 吸波材料的复介电常数和复磁导率的频谱变化曲线。

由图 1(a)和(b)可知,Fe-Si-Al 吸波材料的复介电常数 ϵ' 和 ϵ'' 值在 1 ~ 10 GHz 都随颗粒尺寸的减小而减小, ϵ' 值随频率的增加变化不大, ϵ'' 值随频率增加而增大。研究表明,吸波材料的介电常数与其电导率密切相关^[12]。随着颗粒尺寸的减小,Fe-Si-Al 颗粒在硅橡胶当中更有可能彼此分离^[13],不易产生连通的导电网络,电导率减小,从而有利于介电常数

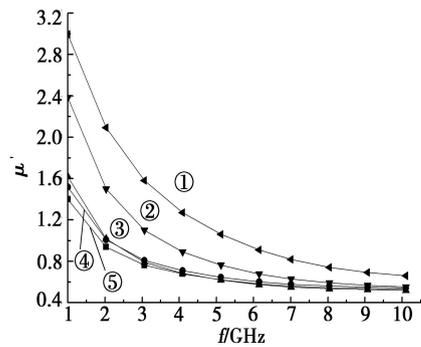
的减小。



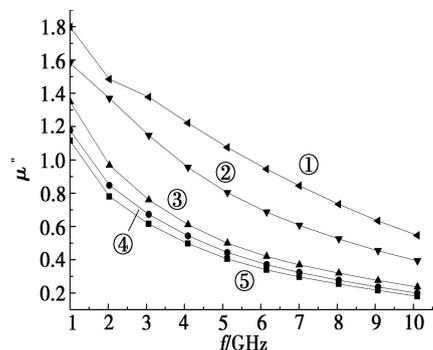
(a) ϵ'



(b) ϵ''



(c) μ'



(d) μ''

图 1 不同颗粒尺寸 Fe-Si-Al 吸波材料的复介电常数和复磁导率

Fig. 1 Complex permittivity and permeability of Fe-Si-Al alloy microwave absorbing materials with different particle sizes

①74 ~ 106 μm ; ②58 ~ 74 μm ; ③48 ~ 58 μm ;

④25 ~ 38 μm ; ⑤20 ~ 25 μm 。

从图 1(c) 和 (d) 可知,随着 Fe-Si-Al 合金粉末颗粒尺寸的减小,在 1 ~ 10 GHz,复磁导率 μ' 和 μ'' 值呈现逐渐增加的趋势,尤其在低频下这种变化更为明显。K. M. Lim 等人^[8] 在研究 1 ~ 10 GHz 内,不同颗粒尺寸与微米级 (10 ~ 125 μm) Fe_{78.4}Si₁₂B_{9.6} 非晶合金吸波材料复磁导率关系时也得出同样的结论。根据 Wallace 给出的磁导率公式^[14]:

$$\mu_i = 1 + \frac{(4\pi M_s)^2}{(4\pi M_s) H_a - (f/2.8)^2 + j\alpha(4\pi M_s)(f/2.8)} \quad (1)$$

式中, M_s 为饱和磁化强度, H_a 为磁晶各向异性场, f 为频率。可以看出,材料的 μ_i 与 M_s 呈单调递增关系。为此对不同颗粒尺寸 Fe-Si-Al 粉末的饱和磁化强度进行了测试,结果见表 1。由表 1 可知,随着 Fe-Si-Al 合金粉末颗粒尺寸的减小,比饱和磁化强度值 σ_s 不断增加。因此,颗粒尺寸小的 Fe-Si-Al 合金吸波材料之所以具有较高的磁导率是因为其合金粉末的比饱和磁化强度值较大,这与 L. Z. Wu 等人^[15] 利用公式(1)计算出的结果一致;此外,在电磁场下小颗粒比大颗粒具有更少的磁极,磁极产生的去磁场作用的减弱^[16] 也会造成小颗粒尺寸吸波材料具有较高的磁导率。

表 1 不同颗粒尺寸 Fe-Si-Al 粉末的比饱和磁化强度

Tab.1 Specific saturation magnetization of Fe-Si-Al alloy powders with different particle sizes

$D/\mu\text{m}$	$\sigma_s/\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$
74 ~ 106	97.50
58 ~ 74	99.30
48 ~ 58	101.3
25 ~ 38	103.8
20 ~ 25	110.5

从图 1(c) 和 (d) 还可以看出,随着频率的增加, μ' 和 μ'' 都减小,其中 μ' 随频率增大而减小的幅度更大。这是由于随着频率的增加,电磁波趋肤深度减小^[15],涡流作用引起的有效体积减小,从而导致磁导率减小^[8]。

3.2 颗粒尺寸对吸波性能的影响

反射率 R 是用来表征吸波材料吸波性能好坏的一个重要参数, R 值越小,其吸波性能越好。图 2 是 1 ~ 10 GHz 内测得 3 mm 厚 Fe-Si-Al 吸波材料的反射率。可知,随着颗粒尺寸减小,匹配频率由高频向低频移动,这是因为随着 Fe-Si-Al 粉末颗粒尺寸的减小,复磁导率逐渐增大、复介电常数逐渐减小,阻抗匹配向低频移动。这与王鲜等人^[17] 的结论一致,小于 48 μm 的 Fe-Cr-Si-Al 吸波材料的匹配频率要比 70 ~ 88 μm 的吸波材料的匹配频率小得多。这表明可以通过采用不同颗粒尺寸的 Fe-Si-Al 粉未来控制相同厚度吸波材料的匹配频率。此外还观察到低频下 (1 ~ 6.5 GHz) 最小反射率值随 Fe-Si-Al 粉末颗粒

尺寸的减小而减小,即吸波性能随之而增强。由此可见材料对电磁波的响应随颗粒尺寸而变化,因为一方面随着颗粒尺寸的减小,分散在硅橡胶当中的颗粒与颗粒之间的距离变大,材料的电导率减小,从而引起材料反射的电磁波变少;另一方面,合金粉末的颗粒尺寸减小,其表面积增大,与电磁波相互作用的面积就愈大,耗散电磁波的能量就愈多,因而吸收电磁波的能力增强。5 GHz 附近,颗粒尺寸为 20 ~ 25 μm 的 Fe-Si-Al 吸波材料的反射率为 -12.5 dB,这个值要明显小于 74 ~ 106 μm 的样品在相同频率下的反射率 (-4.55 dB),因此减小颗粒尺寸有助于改善吸波材料在低频下的吸波效果。利用这一特性,在允许的厚度范围内,小颗粒尺寸的金属微粉吸收剂可应用于 L 波段和 S 波段微波吸收材料的设计。

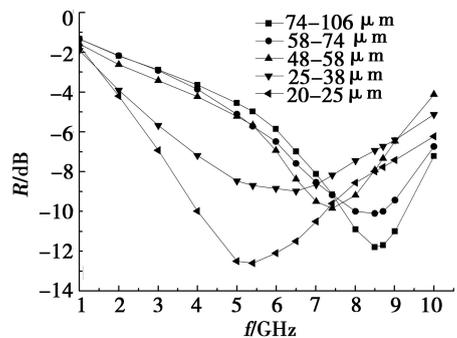


图 2 不同颗粒尺寸 Fe-Si-Al 吸波材料的反射率曲线
Fig.2 Reflection curves of Fe-Si-Al alloy microwave absorbing materials with different particle sizes

4 结论

(1) 减小颗粒尺寸有利于微米级 Fe-Si-Al 吸波材料电导率的减小、合金粉末比饱和磁化强度的增加以及去磁场作用的减弱,从而减小了材料在测试频率范围内的复介电常数,增加了材料的复磁导率。

(2) 吸收剂体积分数为 43% 的 Fe-Si-Al 吸波材料,当其厚度为 3 mm 时,随着颗粒尺寸的减小,匹配频率由高频向低频移动,并且在 1 ~ 6.5 GHz,由于反射的电磁波减少、吸收的电磁波增加从而使得材料的吸波性能逐渐增强。5 GHz 附近,颗粒尺寸 20 ~ 25 μm 的 Fe-Si-Al 吸波材料的反射率达 -12.5 dB,可应用于低频波段吸波材料的设计。

参考文献

- [1] 谢建良, 陆传林, 邓龙江. 二氧化硅/片状金属磁粉核壳粒子制备及电磁特性[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 18-22
- [2] Sugimoto Satoshi, Haga Kazuaki, Kagotani Toshio, et al. Microwave absorption properties of Ba M-type ferrite prepared by a modified coprecipitation method[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 290-291(2): 1188-1191

(下转第 62 页)