

GHz 铁氧体电磁波吸收材料的研究

范学伟¹ 姚敏琪¹ 舒扬¹ 王倩¹ 张晓宁²

(1 北矿磁材科技股份有限公司,北京 100067)

(2 北京工业大学新型功能材料教育部重点实验室,北京 100022)

文 摘 鉴于民用吸波材料市场的日益增加,用传统粉末冶金的方法制备了铁氧体吸收剂粉体,并测定了其内禀磁性能和电磁参数。采用吸收剂粉体与氯化聚乙烯复合的方法轧制出不同厚度的胶板,测定了 10 MHz ~ 1.8 GHz 电磁波吸收性能及厚度的影响,复合胶板在 400 MHz ~ 1.8 GHz 频段显示良好的吸收性能。降低吸收剂粉体的填充率有利于展宽频带,复合胶板在 2 GHz ~ 10 GHz 频段的测试结果表明,反射系数小于 -5 dB 的带宽达到 3.6 GHz,对应吸收率大于 70%。样品的吸波性能已经具有一定的实用性。

关键词 电磁波吸收材料,铁氧体,电磁参数,吸收性能

Ferrite Electromagnetic Wave Absorbers in GHz Range

Fan Xuewei¹ Yao Minqi¹ Shu Yang¹ Wang Qian¹ Zhang Xiaoning²

(1 BGRIMM Magnetic Materials and Technology Co., Ltd., Beijing 100067)

(2 Key Lab. of Advanced Functional Materials of the State Education Commission, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract With the increase of products for civil use, electromagnetic wave absorber powders have been prepared through conventional powder metallurgy method. The intrinsic magnetic properties and the electromagnetic parameters of them are also determined. Composite materials from the powders and CPE are obtained to test their absorbing properties, which are fairly good in the 400 MHz to 1.8 GHz range. It is helpful for reducing absorber content to widen frequency range. The absorption rate of this composite material exceeds 70% in the 3.6 GHz frequency range width. An absorption efficiency of samples has shown some certain practicability.

Key words Electromagnetic wave absorber, Ferrite, Electromagnetic parameter, Absorption efficiency

1 引言

始于二战期间^[1]的军事隐身目的的电磁波吸波材料,在电子信息技术飞速发展的今天,重新吸引了人们的注意力。由于可以获得更高的传输速率,使用 GHz 范围频率的电磁波进行数据传输增长得很快。例如,移动通信和局域网(LAN)系统就使用 1 GHz ~ 5 GHz 的电磁波^[2];MD-80 民航机机身上有 20 个天线,用于通信、导航、雷达等系统,其分别的工作频谱范围从 10 kHz 直至 9.2 GHz^[3]。然而,由

此引发的电磁干扰(EMI)问题也日趋严重,最直接解决问题的办法之一就是利用吸波材料,使有害电磁波转化为热能被消解。随着中国加入 WTO 后面临的世界范围的电磁兼容(EMC)标准的强制实施,以及人们对居住所处的电磁环境的高度关注,吸波材料在民用方面,如防止高层建筑物反射电磁波引起的电视重影^[4]、EMC 暗室以及解决高频设备引起的设备内部和设备之间的干扰等方面^[5]具有广泛的应用前景。

收稿日期:2003-06-30;修回日期:2003-08-18

范学伟,1973 年出生,博士,从事永磁材料及吸波材料的研究开发工作

由于电磁波吸收材料或多或少地涉及到隐身等军事敏感领域,因此吸收剂的配方属于保密范畴。鉴于民用方面对吸波材料产品的需求日益增加,以及民用设备的高频化发展趋势的加速,有必要开发出针对不同波段的吸收材料。本文在自行研制出吸收剂粉体后,用工业设备及工艺对其进行了产品化,并在频带展宽方面也进行了一些有益的尝试。

2 实验

2.1 吸收剂粉体的制备

如图1所示,将配好的原料在球磨机中湿磨1 h,料浆烘干经分散后加入适量的水,人工制成直径约6 mm~7 mm的小球,在空气中用硅碳棒加热的箱式电阻炉以900~1300℃预烧,破碎并调整成合适的粒度后低温回火即得到铁氧体吸收剂粉体。

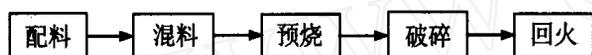


图1 吸收剂粉体的制备

Fig.1 Preparation of absorbing powder

2.2 试样的制备

随频段的不同,实验样品的形状和尺寸有所变化。

2.2.1 小于2 GHz

磁导率样品为外径 \times 壁厚 \times 高度 = 6.98 mm \times 1.97 mm \times 2.62 mm 的小环,吸收剂粉体用环氧树脂粘结,粉体 树脂 = 98 2(质量分数),在 WE-10A 液压式万能试验机上压制后低温固化得到。介电常数样品为直径大于 15 mm 的氯化聚乙烯(CPE)复合薄片;反射系数试样为直径 115 mm 的 CPE 复合胶板,吸收剂粉体的质量分数为 90%,均通过 SK-160B 双辊筒炼塑机开炼,在 C33150 双辊轧膜机上精整到需要的厚度。

2.2.2 大于2 GHz

电磁参数和反射系数试样均为 CPE 复合胶板,前者的厚度为 1.5 mm~2 mm,长、宽随波段改变;后者长 \times 宽 = 180 mm \times 180 mm,厚度可变;粉体的质量分数为 65%,制备方法同小于 2 GHz 的。

2.3 测试设备

粉体的内禀磁性能由 LDI9500 型振动样品磁强计(VSM)测得。试样小于 2 GHz 的磁导率和介电常数在 Agilent 4396B 阻抗分析仪上测得,反射系数在 Agilent 4396B 网络分析仪(带 Agilent85046A S-端口)上测得;试样大于 2 GHz 的磁导率和介电常数在

HP8722ES 矢量网络分析仪上测试,反射系数用雷达吸波材料弓形法反射率扫频测试系统测得。

3 结果与讨论

3.1 内禀磁性能、磁导率及介电常数

吸收剂粉体的内禀磁性能、磁导率和介电常数的测试结果分别如表1、图2和图3所示。

表1 吸收剂粉体的内禀磁性能¹⁾

Tab.1 VSM properties of an absorbing powder

材料	比饱和磁化强度 $\sqrt{A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}}$	剩余比磁化强度 $\sqrt{A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}}$	矫顽力 $H_c / kA \cdot m^{-1}$
1R3-2	60.90	2.81	1.59

注:1) 测试时最大外加磁场 $H_{ex}(\max) = 1\,591.55 \text{ kA/m}$ 。

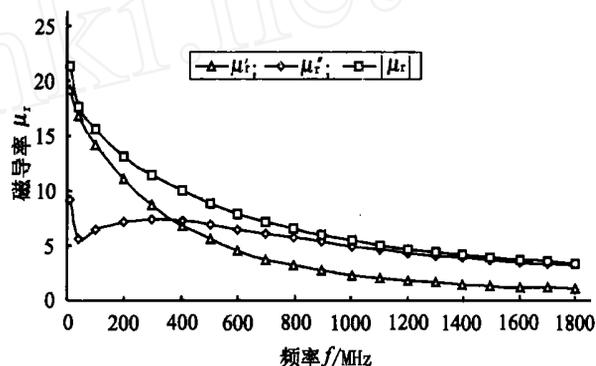


图2 10 MHz~1.8 GHz 树脂粘结环的磁导率

Fig.2 Permeability of toroidally shaped ferrite bonded by resin at 10 MHz to 1.8 GHz

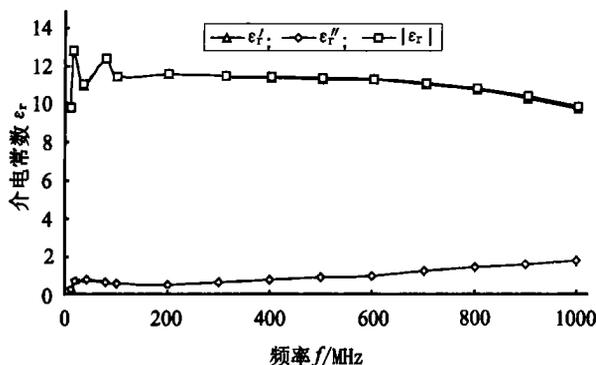


图3 10 MHz~1 GHz 厚 2.71 mm 胶板的介电常数

Fig.3 Permittivity of a composite material with a 2.71 mm thickness at 10 MHz to 1 GHz

从表1所示的内禀磁性能看,该吸收剂粉体具有较为明显的软磁材料的特征,剩余比磁化强度和矫顽力的值都很低。

在图2所测频率范围内,吸收剂粘结环的磁导率频谱呈现较为典型的铁氧体磁谱^[6]:磁导率实部

随频率升高从 19.20 减小到 1.05;虚部从 10 MHz 的 9.16 下降到约 37 MHz 的 5.64,后随频率升高上升至 314 MHz 的 7.46,之后随频率升高缓慢下降;337 MHz ~ 1.8 GHz,磁导率虚部值超过实部。在所用测试设备的频率上限(1.8 GHz)处的磁导率虚部仍然保持在大于 3 这样的较高值。

图 3 结果表明,除了 100 MHz 以下 μ_r 和 μ_i 有小幅震荡之外,在 100 MHz ~ 600 MHz 介电常数的实部和虚部分别维持在 10 ~ 12、0 ~ 2 之间的一个相对稳定值;超过 600 MHz 后,实部和虚部分别有小幅下降和上升,但也基本上保持在前述数值范围内。对于铁氧体来说,介电损耗对于吸收作用的贡献主要来源于固有电偶极子极化和界面极化^[7],但是作用有限。

3.2 吸收性能

不同厚度的 CPE 复合样品(1R3 - 2,吸收剂粉体的质量分数为 90%) 10 MHz ~ 1.8 GHz 的反射损耗(R.L.)如图 4 所示,其中厚(t)为 10.34 mm 样品是将 t 7.63 mm 和 t 2.71 mm 样品叠加得来的。作为比较, t 6.61 mm 烧结标样 SS 的吸收特性也在图中给出。STD 为设备的校准曲线。

对于较厚的两个 CPE 复合样品,500 MHz ~ 1.8 GHz 的吸收性能在总体上优于烧结样 SS; t 为 2.71 mm 复合样在 1.2 GHz ~ 1.4 GHz 之间显示了超过 -20 dB 的吸收性能。随着复合样品厚度的变薄: t 10.34 mm、 t 7.63 mm、 t 2.71 mm,最大吸收分别发生在 675 MHz、900 MHz 和 1.30 GHz,产生了吸收峰向高频端的漂移,这与铁氧体材料的厚度匹配特性密切相关。与内藤喜之^[8]的匹配厚度 d_m 同匹配频率 f_m 成反比的公式完全一致

$$d_m = V_c / (2 f_m \mu_r)$$

式中, V_c 为真空中的光速。

从图 4 中还可以看出,发生较明显吸收(如 -5 dB)的频率随样品厚度的增加移向低频端,从最薄的 t 2.71 mm 到 t 7.63 mm,再到最厚的 t 10.34 mm 样品,该点频率分别为 531 MHz、432 MHz、396 MHz,估计也与铁氧体材料的厚度匹配特性有关系。而烧结样品 SS 仅在 225 MHz 处即达到 -5 dB 的吸收效果,而且在 225 MHz ~ 1.8 GHz 如此宽的频率范围均稳定在 -5 dB ~ -10 dB 之间,与 SS 厚度较为接近的 t 7.63 mm 粘结样品的吸收特性曲线甚为相似。

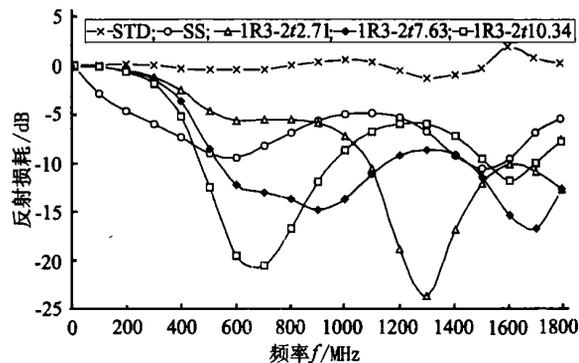


图 4 10 MHz to 1.8 GHz 吸收性能

Fig. 4 Absorption efficiency of several samples at 10 MHz to 1.8 GHz

利用铁氧体材料的匹配厚度特性,可以制备出在有限的范围内满足不同频段吸收性能的复合材料。改变吸收剂的含量,可能在大于 10 GHz 的频段获得吸收峰^[9],对展宽频带十分有利。本文尝试将吸收剂 1R3 - 2 与 CPE 复合的质量分数降低至 65%,测试了长 \times 宽 \times 厚 = 180 mm \times 180 mm \times 6.06 mm 试样在 2 GHz ~ 10 GHz 范围的吸收性能,如图 5 所示。最小反射系数为 4.6 GHz 时的 -7.79 dB,反射系数小于 -5 dB 的带宽约为 3.6 GHz,对应的吸收率大于 70%,已经显示出一定的实用价值。

对样品的磁导率测试结果表明,8.2 GHz 时,样品的磁导率值很小,实部 $\mu_r = 0.77$ 、虚部 $\mu_i = 0.08$,此后随频率升高,磁导率实部略微增大,而虚部进一步降低接近零,导致以磁损耗为主的铁氧体损耗很小。因此图 5 中,超过 8 GHz 时,反射系数大于 -2 dB,吸收性能变坏。

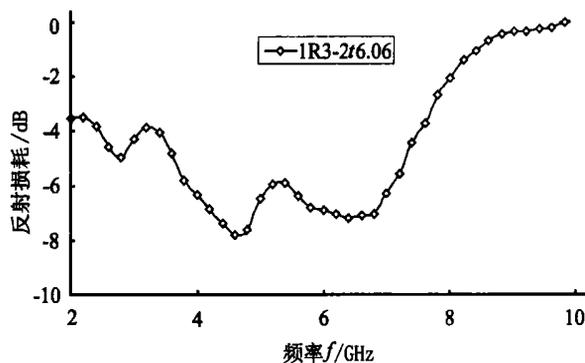


图 5 2 GHz ~ 10 GHz 低填充率试样吸收性能

Fig. 5 Absorption efficiency of lower mass content sample at 2 GHz to 10 GHz

4 结论

(1) 利用传统的粉末冶金技术,可以在大气中制备出具有较为明显软磁材料特征的吸收剂粉体。

(2) 结合工业设备和工艺,可以制造出在 400 MHz~1.8 GHz 具有良好吸收作用的复合电磁波吸收材料。

(3) 降低吸收剂粉体的填充率对于频带展宽有利。2 GHz~8 GHz 频段的测试结果表明,65%填充率的试样,反射系数小于 -5 dB 的带宽可达 3.6 GHz。

通过对实验样品的其他如力学、阻燃、表面等性能的进一步综合研究及改进,研制的材料有望在电磁兼容领域获得广泛的应用。

参考文献

1 李韬. 六角型吸波铁氧体材料性能的研究. 天津大学硕士学位论文, 1996: 3

2 Maeda T et al. Electromagnetic microwave absorption of a-Fe microstructure produced by disproportionation reaction of Sm₂Fe₁₇ compound. Materials Transactions. JIM, 2000; 41 (9): 1 172

3 张林昌. 发展电磁兼容——历史的必然. <http://www.emcchina.org>

4 Akita K. Countermeasures against TV ghost interference using ferrite. ICF3. Kyoto, 1980: 885

5 Dixon P F. Microwave absorbers: theory, design and test. Microwave Journal, 1993;(11): 88

6 廖绍彬. 铁磁学(下). 北京: 科学出版社, 1988: 63

7 曹茂盛. 多层复合隐身材料设计及性能预报. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1999: 41

8 内藤喜之. フェライト吸収壁の厚さについて. 电子通信学会论文, 1969; 52-B (1): 21

9 Tsutaoka T et al. Microwave absorbers using spinel ferrite composite materials. ICF8. Kyoto and Tokyo, 2000: 988

(编辑 李洪泉)

(上接第 29 页)

4 结论

环氧 TDE-90 树脂共混双马来酰亚胺 4501A 树脂具有优异的耐热性能,在 155℃ 时,复合材料的强度、模量的保留率明显高于环氧 TDE-85 树脂基透波复合材料;具有优异的介电性能,共混透波材料具有低的介电损耗,有利于提高透波率和降低反射率;具有优异的工艺性,共混树脂改善了双马来酰亚胺树脂体系的工艺性。

参考文献

1 梁国正,顾媛娟,蓝立文. 用于高性能雷达罩的树脂

基体的研究. 宇航材料工艺, 1996;26(6):14

2 丁著明,吴良义,范华,田呈祥. 环氧树脂的稳定化(1). 热固性树脂, 2001;(5):34

3 彭永利,黄志雄. 双马来酰亚胺/环氧树脂的电性能研究. 武汉化工学院学报, 2001;23(3):43

4 梁国正,顾媛娟. 双马来酰亚胺树脂. 北京:化工出版社, 1997:206~208

5 顾媛娟,梁国正,蓝立文. 环氧型双马来酰亚胺树脂的研究. 西北工业大学学报, 1995;13(4):572

(编辑 李洪泉)