

特约专栏

片形 FeSiAl 磁粉复合材料的雷达波吸收机理

王涛, 位建强, 张钊琦, 李发伸

(兰州大学 磁学与磁性材料教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 雷达波吸收材料已广泛应用于高频电子器件的抗电磁干扰和国防武器装备的雷达波隐身涂层。高性能的雷达波吸收材料要求其中的填充剂在 GHz 频段具有高的磁导率和合适的介电常数。片形 FeSiAl 磁粉由于良好的软磁性能, 且在 GHz 频段具有较高的磁导率和相适应的介电常数, 其复合材料被广泛用于高性能的雷达波吸收体。本工作制备了不同体积分数和不同厚度的片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物, 利用矢量网络分析仪测试了复合物在 0.1 ~ 18 GHz 的电磁参数, 利用直接探测开路 and 短路状态下反射系数的方法研究了雷达波在空气-吸波涂层界面、吸波涂层-金属短路板界面的反射性能及反射损耗特性。结合开路和短路状态下反射系数的测量结果和相关模拟计算, 直接确定了吸收峰峰值频率和吸波体厚度的依赖关系, 进一步利用界面反射模型对吸收峰强度, 吸收峰宽度做了深入的原理性讨论。

关键词: 雷达波吸收; 片形 FeSiAl 磁粉; 吸收峰峰值频率; 吸收峰强度; 吸收峰宽度

中图分类号: O441.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2013)02-0094-08

Radar Wave Absorption Mechanism of the Flake-Shaped FeSiAl Particle Composite

WANG Tao, WEI Jianqiang, ZHANG Zhaoqi, LI Fashen

(Key Laboratory of Magnetism and Magnetic Materials of Ministry of Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Radar wave absorption materials have been widely used in electron devices working in microwave frequency to avoid the electromagnetic wave interference and in military equipments to prevent the detection of radar wave. High performance radar wave absorption materials require a high permeability and appropriate permittivity in GHz range. Due to that the flake-shaped FeSiAl powder has the superior soft magnetic properties and possesses the high permeability and appropriate permittivity in GHz range, its composite has been widely used as radar wave absorber with high performance. In this work, the flake-shaped FeSiAl/paraffin composites with various volume concentration and thickness were prepared. Their electromagnetic parameters in 0.1 ~ 18 GHz were measured by VNA. Their radar wave reflection properties at the air-absorber interface and absorber-metal plate interface and the reflection loss properties were studied by measuring the S_{11} coefficients with and without a terminated metal plate. According to the measured S_{11} coefficients and the simulation data, the relationship between the frequency position of the reflection loss (RL) peak and the absorber thickness was confirmed directly, and furthermore, the intensity and bandwidth of the RL peak were investigated deeply from viewpoint of their origin on the base of interface reflection model.

Key words: radar wave absorption; flake-shaped FeSiAl powder; peak frequency; peak intensity; peak width

1 前言

随着电子信息技术的迅速发展, 微波作为信息传播的重要载体, 越来越多地被用于人类的生活、生产等方面。随着工作中微波频段设备的广泛应用, 电磁环境越来越复杂, 微波对人体及环境的影响日益严重。同时,

复杂的电磁环境也导致了微波干扰及电磁兼容等问题。解决这些问题的有效途径之一, 就是使用微波吸收涂层, 吸收产生干扰和污染的电磁波。在军事方面, 针对不断提高的雷达探测技术, 为了保证军事武器的生存能力, 提升攻防能力, 除了通过外形设计降低雷达波反射截面外, 还需要雷达波吸收涂层进一步提升隐身能力。总体来看, 无论是民用领域还是军事领域, 吸波材料都拥有广阔的应用前景和日益强劲的需求。FeSiAl 是一种软磁性能优异的材料, 它具有高的饱和磁化强度、低的矫顽力、高电阻率、低密度等优点^[1]。将 FeSiAl 制备成片形微粉后, 能得到优异的微波电磁特性, 具有开发成高性能雷达波吸收体的巨大潜力, 近年来, 其微波吸收

收稿日期: 2012-10-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB933101); 国家自然科学基金项目(11144008)

第一作者: 王涛, 男, 1979年生, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 李发伸, 男, 1940年生, 教授, 博士生导师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.02.04

性能已被国内外广泛报道^[2-8]。本文制备了片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物, 结合实验测试结果和相关模拟计算, 综合研究反射损耗吸收峰的峰值频率、吸收峰强度、吸收峰宽度与材料的电磁参数, 涂层结构参数的关系, 深入讨论片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的雷达波吸收机理。

2 实验

2.1 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的制备

实验原材料为不规则方形 FeSiAl 微粉, 购买自成都晶品非晶材料厂, 主要成份为: 10.0% Si-5.6% Al-84.4% Fe (质量分数), 微粉大小约为 40 μm 。利用摆振球磨的方法, 将其尺寸减小并制备成片状的 FeSiAl 微粉, 所用球磨钢罐大小为 80 mL, 球磨珠的直径 10 mm, 球料比为 10:1, 球磨介质为 40 mL 的无水乙醇, 球磨时间为 4 h。

得到片形 FeSiAl 磁粉后, 首先进行表面处理, 方法是: 将钛酸酯偶联剂按微粉质量的 1% 称量并完全溶解在异丙醇溶液中, 然后加入磁性微粉并在超声波细胞粉碎机中超声处理 30 min, 这样能使钛酸酯偶联剂完全包覆在磁性材料表面, 将异丙醇溶液烘干, 就可以得到经过表面处理的片形 FeSiAl 磁粉。将经过表面处理的样品与石蜡以一定体积分数混合均匀后, 置入压环磨具中, 压制内径为 3.04 mm, 外径为 7.00 mm, 厚度为 1.5 ~ 8.0 mm, 供矢量网络分析仪测试的环形样品。

2.2 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物微波电磁性能的测试

利用矢量网络分析仪测量样品的反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21} , 即 S 参数。然后根据 Nicolson 的传输/反射模型, 结合 S 参数, 计算得到材料的相对复数磁导率和介电常数^[9]。实验中使用的仪器型号为 Agilent PNA E8363B, 材料测试软件为 80571E, 测量范围为 0.1 ~ 18 GHz。

2.3 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物微波吸收性能的计算与测试

当电磁波垂直入射到背后有理想导体金属板的吸波涂层时, 反射损耗 (Return-Wave Loss, RL) 可根据传输理论计算得出^[10]:

$$RL(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (1)$$

Z_{in} 是经过归一化的输入阻抗:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} f d \right] \quad (2)$$

式中, c 是真空光速, f 是微波频率, d 是吸收层厚度, μ_r 和 ϵ_r 为矢量网络分析仪测得的相对介电常数和磁导率。

样品的反射损耗也可由矢量网络分析仪直接测得。具体方法是, 测试样品在用金属板短路情况下的反射参

数 $S_{11-\text{SHORT}}$, 另外, 样品的前界面反射特性可在无金属板开路情况下测量 $S_{11-\text{OPEN}}$ 获得^[11]。

3 结果与讨论

3.1 球磨后 FeSiAl 磁粉的形貌与静态磁性

图 1a 和 b 分别是 FeSiAl 原粉及球磨后磁粉的 SEM 照片。球磨前, 原粉呈不规则块状, 大小在 40 μm 左右分布, 微粉之间有良好的分散性。球磨后微粉线度在 40 μm 左右, 厚度降为 1 μm 以下, 具有很好的片形结构。球磨后样品的尺寸和形貌由球磨时间、球磨速度、球料比及球磨介质共同确定。图 2 是片形 FeSiAl 磁粉的磁滞回线, 饱和磁化强度为 124.2 emu/g, 矫顽力为 $10 \times 79.58 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 说明样品不仅具有高的饱和磁化强度, 而且具有良好的软磁性能。

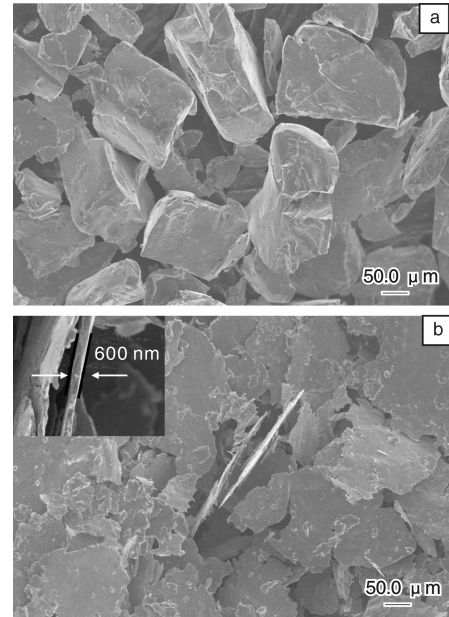


图 1 (a) 原粉和 (b) 球磨后 FeSiAl 颗粒的 SEM 照片
Fig. 1 SEM micrographs of FeSiAl raw material (a) and FeSiAl particles after ball milling (b)

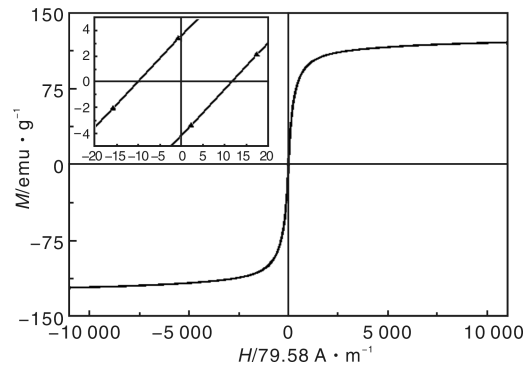


图 2 片形 FeSiAl 粉体的磁滞回线
Fig. 2 Hysteresis loop of FeSiAl powder with flake shape

3.2 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的微波电磁特性及吸波性能

图 3~5 分别给出了体积分数为 15%, 25%, 35% (体积分数) 的片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物微波电磁特性及在不同厚度下的反射损耗 (RL) 曲线。其中, 介电常数的实部和虚部都随着片形 FeSiAl 磁粉浓度的增加而增加, 对于每一种浓度的样品, 在整个测量频段, 介电常数都变化不大; 磁导率实部和虚部也随着 FeSiAl 磁粉浓度的增加而增加, 但对于每一浓度的样品, 磁导率都表现为弛豫形磁谱。计算了 3 个样品在 2, 3, 4, 6, 9 mm 的反射损耗, 仔细分析反射损耗结果, 可以得到如下结论: ①对于同一体积浓度的样品, 随着样品厚

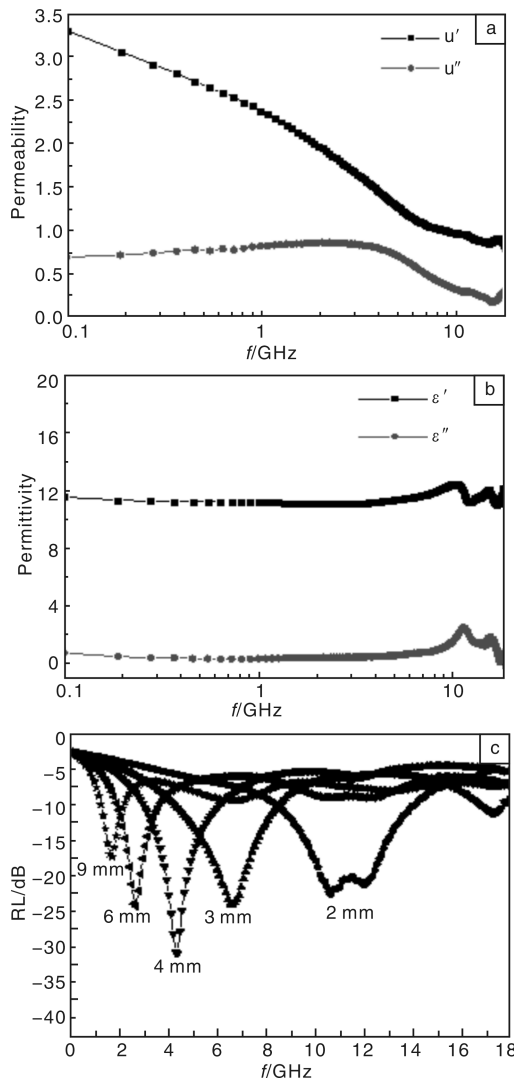


图 3 15% 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的磁谱 (a), 电谱 (b), 不同厚度下的反射损耗 (c)

Fig. 3 Dependence of permeability (a) and permittivity (b) on frequency, and RL properties at various thickness (c) for flake-shaped FeSiAl/paraffin composite (15%)

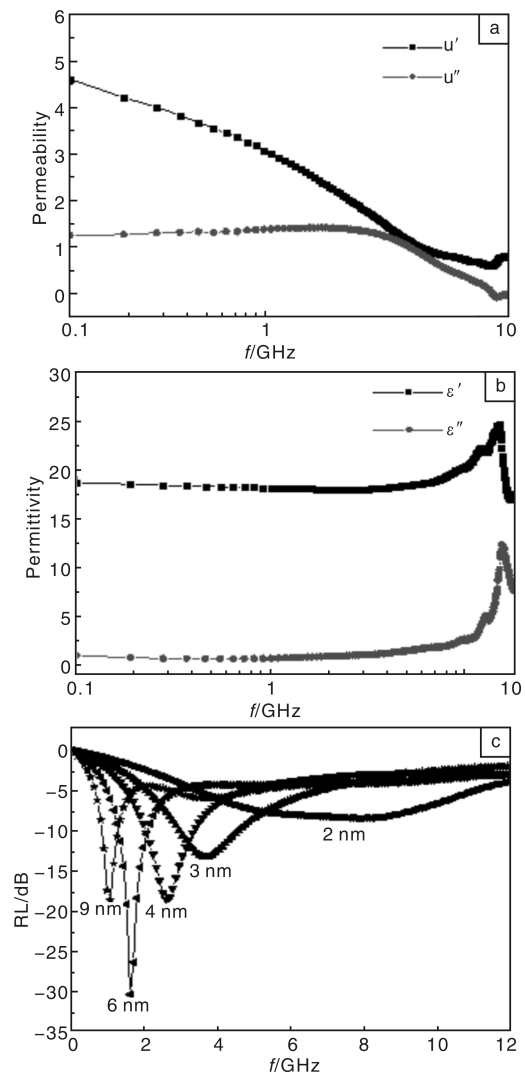


图 4 25% 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的磁谱 (a), 电谱 (b), 不同厚度下的反射损耗 (c)

Fig. 4 Dependence of permeability (a) and permittivity (b) on frequency, and RL properties at various thickness (c) for flake-shaped FeSiAl/paraffin composite (25%)

度的增加, 反射损耗峰的峰位向低频移动; 当厚度超过一定值时, 会有第 2 个 (甚至更多) 反射损耗峰的出现; 反射损耗峰的强度先增强后减弱; 越靠近低频反射损耗峰带宽越窄。②对于相同厚度的样品, 随着复合物中 FeSiAl 磁粉浓度的增加, 反射损耗峰的峰位向低频方向移动。

同一体积浓度的样品, 电谱和磁谱都不随厚度而改变, 仅从电损耗, 磁损耗的吸波机理考虑, 反射损耗峰位、损耗峰个数理论上不应该随厚度产生变化。所以, 对于反射损耗曲线这样的变化规律, 单纯依靠电损耗和磁损耗机制无法给出合理的解释。另外, 损耗吸收峰强度随厚度先增强后减弱、越靠近低频端带宽越窄、相同

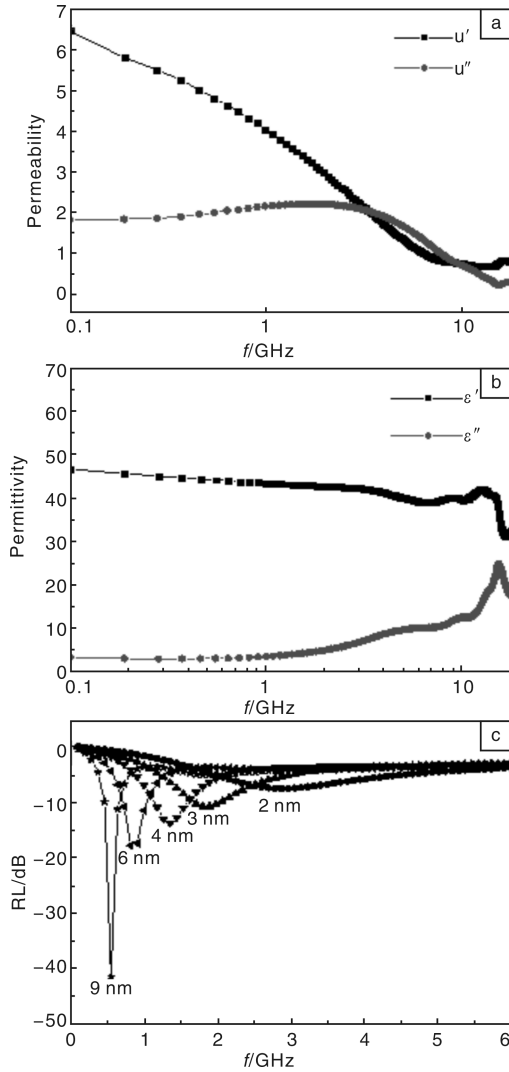


图5 35% 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的磁谱(a), 电谱(b), 不同厚度下的反射损耗(c)

Fig. 5 Dependence of permeability (a) and permittivity (b) on frequency, and the RL properties at various thickness (c) for flake-shaped FeSiAl/paraffin composite (35%)

厚度下磁粉体积浓度越高损耗峰越靠近低频端的现象, 也无法用电磁损耗机理给出解释。

3.3 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的微波吸波机理

3.3.1 RL 峰值频率与电磁参数、涂层厚度的关系

对于背后有理想金属板的吸波涂层, 在 RL 峰的成因上, 学术界存在两种观点: 一种是电磁损耗机制, 一种是 $1/4$ 波长相消机制^[12]。从上面的实验结果已经得出电磁损耗机制无法解释片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物 RL 峰的变化规律。而 $1/4$ 波长相消机制是: 垂直入射的雷达波达到样品前界面时有一部分被反射回来, 称为前界面反射波 (Reflective Wave, W_r); 进入吸波涂层内的部分入射雷达波, 遇到后界面的理想金属板后被完全反射, 并经前界面出来, 称为后界面出射波 (Emerging

Wave, W_e)。当两束反射波相位相差 180° 时, 会出现干涉相消的现象, 此时即出现反射损耗峰。当满足这个条件, 吸波涂层的厚度应为 $1/4$ 介质波长的奇数倍, 即:

$$t_m = \frac{nc}{4f_m \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} (n = 1, 3, 5 \dots) \quad (3)$$

式中, t_m 为匹配厚度, f_m 为匹配频率, ϵ_r 为样品的相对介电常数, μ_r 为样品的相对磁导率。

图6为片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物 (15%) $1/4$ 、 $3/4$ 波长厚度曲线与对应的反射损耗峰图。图6a是根据公式(3)计算的不同频率下对应的吸波层的厚度, 即 $1/4$ 介质波长厚度。图6b为根据式(1)和式(2)计算的给定厚度下的 RL 曲线。从图6b的 RL 曲线中可以看到, 当吸收体的厚度等于 1 mm 时, 在 RL 曲线上没有出现 RL 峰, 此时, 在 0.1 ~ 18 GHz 整个频段的反射电磁波能量都很高; 当吸收体的厚度为 3 mm 时, 出现了一个 RL 峰; 当样品的厚度为 5 mm 时, 出现了两个 RL 峰。所有这些 RL 峰对应的涂层厚度, 完全与介质的 $1/4$ 波长和 $3/4$ 波长一致。这一结果也表明, 当吸波涂层厚度确定后, RL 峰的峰值频率、个数完全由 $1/4$ 波长相消机制决定。另外, 从 $1/4$ 、 $3/4$ 波长曲线上还可以得到的信息是: 在 0.1 ~ 18 GHz 的频率范围内, 当厚度小于

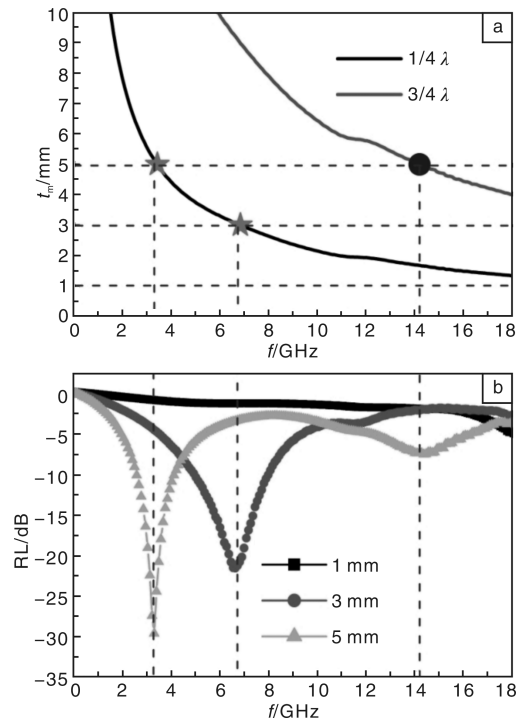


图6 15% 片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的 $1/4$ 、 $3/4$ 介质波长(a)与反射损耗峰(b)对照图

Fig. 6 Dependence of $\lambda/4$ and $3\lambda/4$ on frequency (a) and RL properties at different thickness (b) for FeSiAl/paraffin composite (15%)

1.4 mm 时, 等厚度线与 1/4 波长曲线没有交点, 此时应没有 RL 峰存在; 当厚度大于 1.4 mm 小于 4.0 mm 时, 等厚度线只与 1/4 波长曲线有交点, 说明在这个厚度范围内有一个 RL 峰; 当厚度大于 4 mm 时, 等厚度线既与 1/4 波长曲线有交点, 又与 3/4 波长曲线有交点, 说明在这个厚度范围内, 会有两个 RL 峰。

3.3.2 损耗吸收峰强度的变化机理

从图 3 到图 5 的 RL 曲线可以看到, 随着样品厚度的增加, RL 峰的强度先增强后减弱, 在某一厚度可达到 -30 dB 或更好的吸收。要解释这一现象, 首先结合 1/4 波长相消机制, 对电磁波的能量流向做一分析, 为后续计算提供理论基础。图 7 是雷达波 1/4 波长界面反射模型示意图。对于没有金属短路板的吸波体(图 7a), 入射后的雷达波(E_0)分为 3 个部分: 一部分被前界面反射回去($S_{11-OPEN}$); 一部分在吸波体内被损耗掉(E_{loss1}); 还有一部分通过吸波体后, 从吸波体后界面透射(S_{21})。假设入射波的能量为 1, 那么有:

$$S_{11-OPEN} + S_{21} + E_{loss1} = 1 \quad (4)$$

加上金属短路板后(图 7b), 雷达波入射到样品上时, 被前界面反射一部分能量 $S_{11-OPEN}$, 这一部分能量与没有金属板时被前界面反射的能量相同。而原本透射过去的那部分雷达波(S_{21})被后界面的金属板完全反射, 穿过样品后再从前界面出射的能量为 E_e , 样品内部损耗的能量为 E_{loss2} , 这种情况下的总能量关系式表示为:

$$S_{11-OPEN} + E_e + E_{loss2} = 1 \quad (5)$$

这时的反射损耗特性就是直接测量的 $S_{11-SHORT}$, 这里的 $S_{11-SHORT}$ 和利用传输线理论计算的反射吸收曲线是一致的, 这时能量关系有:

$$|S_{11-OPEN} - E_e| = S_{11-SHORT} \quad (6)$$

将(6)式代入到(5)式中, 可得到一个重要的能量关系式:

$$2S_{11-OPEN} \pm S_{11-SHORT} + E_{loss2} = 1 \quad (7)$$

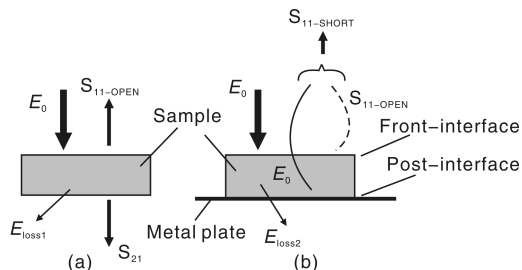


图 7 电磁波在样品界面反射模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of reflection model of an EM wave on an absorbing layer without and with a metal plate

在上述公式中, $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$ 可以用矢量网络分析仪直接测量得到。利用这两个参数, 结合上面的公

式, 就可以确定电磁波的能量流向, 计算样品前界面反射能量, 后界面反射能量以及涂层内部损耗的能量分别所占份额。

通过实验制备了不同厚度的片形 FeSiAl 磁粉/石蜡 (15%) 复合物样品, 这些样品的厚度分别为 2.03, 3.74, 4.74, 6.15, 7.21 mm。根据前面的讨论, 已经知道这些样品的 RL 峰随着厚度的增加向低频移动, 且损耗吸收峰强度先增大后减小。利用矢量网络分析仪分别测试了样品在开路(无金属板)和短路(有金属板)情况下的反射参数: $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$, 结果在图 8 中列出。对于不同厚度的样品, 前界面反射 $S_{11-OPEN}$ 在低频端很小,

表明雷达波只有少部分被样品前界面反射, 大部分穿过了样品。随着频率增加, $S_{11-OPEN}$ 逐渐增大并趋于稳定, 说明雷达波被前界面反射的能量也在增大并趋于稳定。在这些厚度的样品中, 开路的 $S_{11-OPEN}$ 值都没有反射损耗峰的出现。当加短路金属板后, $S_{11-SHORT}$ 出现了反射损耗峰。这是因为原本透过样品的雷达波被后界面的金属板全部反射, 通过样品后穿出前界面, 与前界面的反射波形成叠加。当样品厚度满足两束波相位差 180° 时, 两束波叠加相消, 形成损耗峰。这个实验也更直观地证实了损耗峰来源于两束波的叠加相消。

结合界面反射模型对能量流向的分析, 利用公式(7)就可以得到上述 5 个不同厚度样品, 在前界面和后界面的雷达波反射能量及在吸波体内部的能量损耗, 这些数据及其它相关参数列于表 1 中。首先看厚度为 4.74 mm 的样品, 在 4 GHz 的反射损耗峰最强, 达到了最佳吸收, 即很多研究文献中常提到的完全匹配 (Perfect Matching)。表中数据显示, 这时前界面和后界面反射波的能量正好相等, 导致反射损耗峰最强。而且这时的输入阻抗最接近为 1, 符合完全匹配条件。对于其他厚度样品, 前后界面反射波能量均不相等, 只能部分相消, 导致峰强变弱。分析 $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$ 测试数据可以得出, 以完全匹配频率 (4.0 GHz) 为参考点, 低于 4.0 GHz 出现的吸收峰, 前界面的反射波能量小于后界面出射波能量; 高于 4.0 GHz 出现的吸收峰, 则恰好相反, 前界面的反射波能量大于后界面出射波能量。还可以看出, 吸波涂层本身对雷达波能量在 0.1 ~ 18 GHz 的整个频率范围都有一定的损耗。当存在反射损耗峰时, 涂层材料对雷达波能量的损耗却只占总损耗能量的一小部分。在最佳匹配厚度时, 涂层材料损耗的能量只占到 28%。同时, 达到了最佳匹配时介电常数和磁导率的比值并不等于 1, 这个结果与很多文献中认为只有当介电常数和磁导率的比值为 1 或接近于 1 时才能有较好的损耗明显不

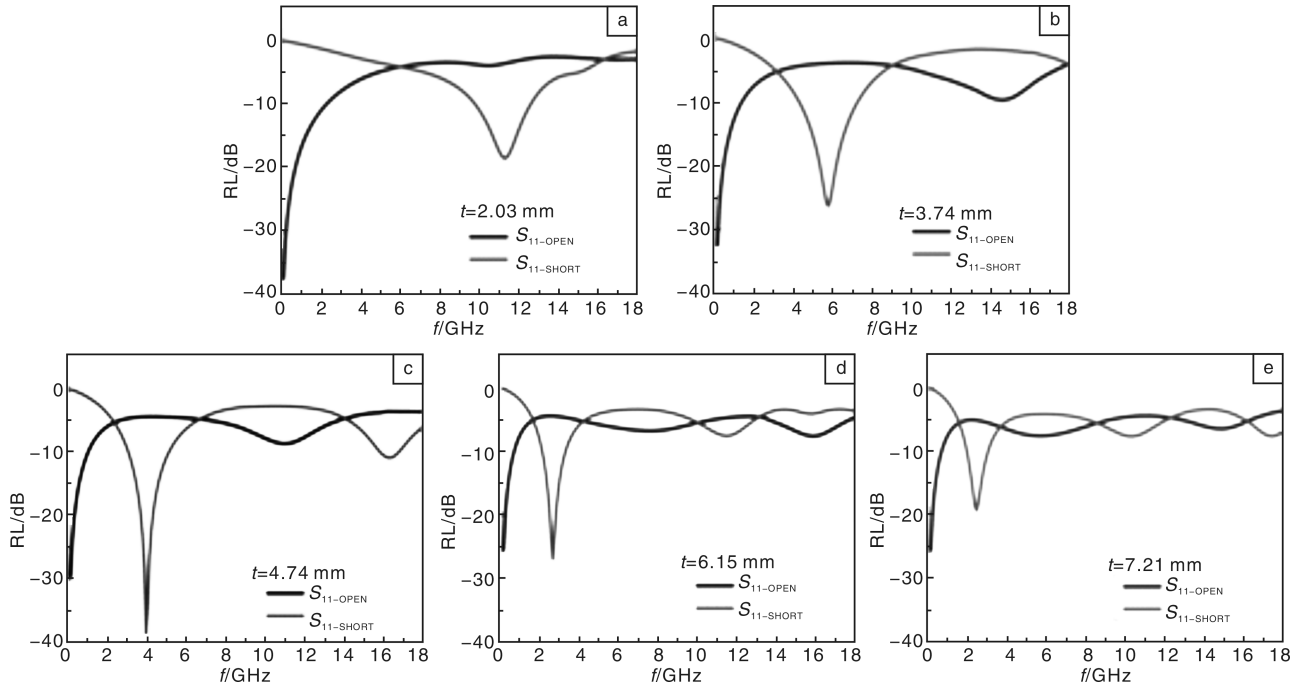


图8 15%片形 FeSiAl 磁粉/石蜡复合物不同厚度样品 $S_{11-OPEN}$ 和 $S_{11-SHORT}$ 与频率的关系: (a) 2.03 mm, (b) 3.74 mm, (c) 4.47 mm, (d) 6.15 mm, (e) 7.21 mm

Fig. 8 Influence of frequency on $S_{11-OPEN}$ and $S_{11-SHORT}$ of the flake-shaped FeSiAl/paraffin composite (15%) at different thickness

表1 不同厚度样品在 RL 峰值频率处, 前后界面反射和内部损耗的电磁波能量及其它相关参数

Table 1 The EM energy reflected by the front interface of the absorber and the metal plate, and depleted in the absorber at the RL peak frequency for the sample with different thickness; Other related parameters are also listed

t_m/mm	f_m/GHz	RL/dB	Reflective energy	Reflection of front-interface	Reflection of post-interface	Coat loss	$ \varepsilon/\mu $	$ Z_m/Z_0 $
2.03	11.3	-18.4	0.014	0.46	0.44	0.10	11.23	1.02
3.74	5.8	-26.3	0.002	0.41	0.41	0.18	8.09	0.90
4.74	4.0	-38.2	1.5E-4	0.36	0.36	0.28	6.23	1.03
6.15	2.6	-26.8	0.002	0.36	0.36	0.28	4.84	1.30
7.21	2.4	-19.1	0.012	0.31	0.32	0.37	5.03	1.33

一致。由上面的分析可知反射损耗峰的强度是由前界面和后界面反射波的相对强度所决定, 当两束波的能量大小相等时, 会实现对雷达波的完全吸收, 否则只能部分吸收, 导致损耗吸收峰强度变弱。

3.3.3 损耗峰带宽的影响因素

图9是根据1/4波长模型分析反射损耗带宽的示意图。反射损耗峰的带宽, 是由于前界面反射波和后界面反射波的相位差比峰值频率时的180°错开了一个小角度 $\Delta\theta$ 造成的。这里 W_r 为前界面反射波的能量, W_e 为金属板-后界面的出射波的能量, R_0 为峰值点反射的能量, R_1 为指定点反射的能量。对于峰值点, 反射的能量等于前界面的反射波和经过 π 相移的金属板界面出射波之和:

$$R_0 = W_r \cos^2 \theta - W_e \cos^2 \pi = W_r - W_e \quad (8)$$

指定点反射的能量, 为前界面的反射波和位相为 $(\pi - \Delta\theta)$ 的金属板界面出射波之和:

$$R_1 = W_r \cos^2 \theta - W_e \cos^2 (\pi - \Delta\theta) \quad (9)$$

这里假设了两种情况下, 前界面的反射波是相等的。指定点反射的能量与峰值点能量之差为:

$$R_1 - R_0 = W_e (1 + \cos^2 \Delta\theta) \quad (10)$$

因为

$$\cos \Delta\theta = 1 - \frac{(\Delta\theta)^2}{2!} \approx 1 - \frac{1}{2} (\Delta\theta)^2 \quad (11)$$

$$\Delta\theta = \left[2 \left(1 - \left(1 - \frac{R_1 - R_0}{W_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

又因为

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{t_{1/4}} \left[\left(\left| \frac{dt_{1/4}}{df} \right| \right) \cdot \Delta f \right] \quad (13)$$

所以带宽

$$\Delta = 2f = \left[2 \left(1 - \left(1 - \frac{R_i - R_0}{W_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{2t_{1/4}}{\pi} / \left| \frac{dt_{1/4}}{df} \right| \right] \quad (14)$$

从式中可以看出, 带宽与 $1/4$ 波长、 $1/4$ 波长随频率的变化率、金属板-后界面出射波、指定点以及峰值点反射的能量有关。当指定点为 $R_i = -5$ dB 时, 根据图 9 中的数据, 结合公式 (14), 就可以计算得到反射损耗带宽。具体的实验和计算数据列于表 2 中, 带宽的计算值和实验值基本一致。

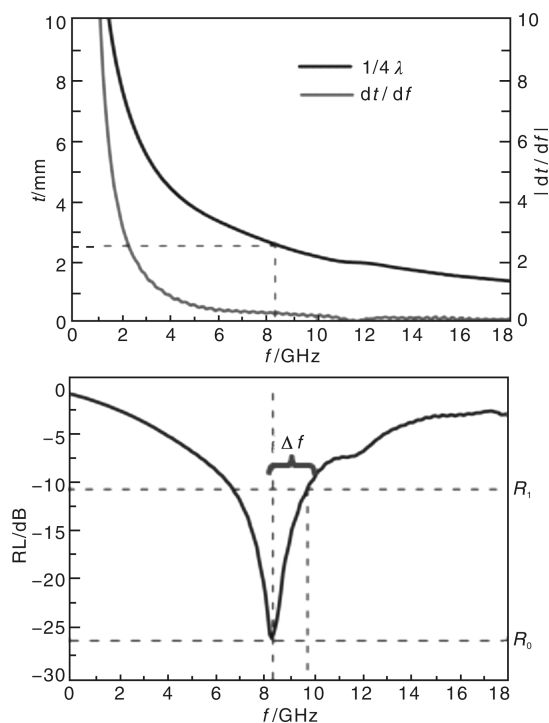


图 9 $1/4$ 波长模型反射损耗带宽示意图

Fig. 9 The diagram of $1/4\lambda$ and the bandwidth of RL peak

表 2 指定点 $R_i = -5$ dB 时, 带宽的计算值与实验值

Table 2 The measured and calculated bandwidth values Δ at $R_i = -5$ dB

f/GHz	$t_{1/4}/\text{mm}$	Calculated values	Measured values
11.3	2.03	8.60	7.74
5.8	3.74	6.04	5.55
4.0	4.74	4.05	4.37
2.6	6.15	2.08	2.60
2.4	7.21	2.07	2.65

4 结 论

(1) 利用 $1/4$ 波长损耗模型, 很好地解释了片形 Fe-SiAl 磁粉/石蜡复合物的反射损耗峰的峰位、个数与吸波体厚度和电磁参数的关系。开路和短路 S_{11} 参数的直接测

量和比较, 进一步验证了 $1/4$ 波长相消的损耗机制。

(2) FeSiAl 磁粉/石蜡复合物的反射损耗峰的峰强由相位差为 180° 的前界面和后界面反射波的能量差决定。当两列波能量相等时, 反射损耗峰最强, 实现最佳吸收; 否则, 反射损耗峰强度变弱。

(3) 反射损耗吸收峰宽度与 $1/4$ 波长、 $1/4$ 波长随频率的变化率、金属板界面出射波、指定点以及峰值点反射的能量有关。影响反射损耗吸收峰宽度的最主要的因素, 是涂层材料的 $1/4$ 波长厚度随频率的变化率 ($dt_{1/4}/df$)。在微波低频端, 吸收峰带宽总是较微波高频端偏窄。

参考文献 References

- [1] Wohlfarth E P. *Handbook of Magnetic Materials* [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1980: 120.
- [2] Lee K S, Yun Y C, Kim S W, et al. Microwave Absorption of $\lambda/4$ Wave Absorbers Using High Permeability Magnetic Composites in Quasimicrowave Frequency Band [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: 07E504.
- [3] Liu J, Ma T Y, Tong H, et al. Electromagnetic Wave Absorption Properties of Flaky Fe-Ti-Si-Al Nanocrystalline composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322, 940-944.
- [4] Zhang Z Q, Wei J Q, Yang W F, et al. Effect of Shape of Sendust Particles on Their Electromagnetic Properties within 0.1 ~ 18 GHz [J]. *Physica B*, 2011, 406: 3 896-3 900.
- [5] Zhou T D, Zhou P H, Liang D F, et al. Structure and Electromagnetic Characteristics of Flaky FeSiAl Powders Made by Melt-Quenching [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484: 545-549.
- [6] Yoshida S Y, Sato M, Sugawara E, et al. Permeability and Electromagnetic-Interference Characteristics of Fe-Si-Al Alloy Flakes-Polymer Composite [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85: 4 636-4 638.
- [7] Lee S J, Kim Y B, Lee K S. Effect of Annealing Temperature on Electromagnetic Absorption Properties of Crystalline Fe-Si-Al Alloy Powder-Polymer Composites [J]. *Phys Stat Sol (A)*, 2007, 204: 4 121-4 124.
- [8] Wang W, Ma T Y, Yan M. Microstructure and Magnetic Properties of Nanocrystalline Co-Doped Sendust Alloys Prepared by Melt Spinning [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 459: 447-451.
- [9] Nicolsin A M, Ross G. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1970, 19: 377-382.
- [10] Liu J R, Itoh M, Machida K I. Electromagnetic Wave Absorption Properties of $\alpha\text{-Fe}/\text{Fe}_3\text{B}/\text{Y}_2\text{O}_3$ Nanocomposites in Gigahertz Range [J]. *Applied Physics Letter*, 2003, 83: 4 017-4 019.
- [11] Wang B C, Wei J Q, Yang Y, et al. Investigation on Peak Frequency of the Microwave Absorption for Carbonyl Iron/Epoxy

Resin Composite[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323: 1 101 - 1 103.

[12] Wang B C, Wei J Q, Qiao L, et al. Influence of the Interface Re-

flections on the Microwave Reflection Loss for Carbonyl Iron/Paraffin Composite Backed by a Perfect Conduction Plate[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 324: 761 - 765.



专栏特约编辑李 卫

李 卫: 男, 1957 年生, 教授, 博导; 1992 年获国务院政府津贴, 1995 年成为国家人事部“重点资助优秀留学回国人员”, 1996 年获国家“中青年有突出贡献专家”, 2000 年获“全国劳动模范”称号, 2012 年获全国“讲理想、比贡献”科技标兵称号; 中国稀土学会理事兼理事, 全国磁性材料与器件行业协会专家委员会委员, 中国稀土学会永磁专业委员会副主任委员, 中国电子学会应用磁学分会委员会委员, 中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会副理事长, 《金属学报》、《中国稀土学报》、《磁性材料与器件》、《功能材料与器件学报》编委, 科技部国家秘密技术审查专家; 主要在稀土及其它永磁新材料基础、工程化关键技术、新产品创新等方面开展研



特约撰稿人都有为

究, 在高稳定性和高磁能积稀土永磁材料及工程化关键技术, 热压金属永磁产业技术、整体烧结稀土永磁环的近终成型短流程技术, 特高温钕钴永磁、特种性能永磁材料及制备工艺等研究方面取得重要进展; 主持和主研了 28 项国家攻关、“863”、“973”、国家自然科学基金重点、国际合作和军工配套等项目工程; 曾获包括中国工程院光华工程科技奖、国家科技进步一等奖 1 项、国家科技进步二等奖 2 项在内的国家和省部级奖 16 项; 发表 SCI 和 EI 论文 120 余篇, 获国家发明专利 12 项。

都有为: 男, 1936 年生, 教授, 博导, 2005 年当选为中国科学院院士; 长期从事磁学和磁性材料的教学和科研工作, 开展了磁性、磁输运性质与材料组



特约撰稿人沈保根

成、微结构关系的研究, 他与科研组的师生共发表 SCI 论文 600 余篇, 被 SCI 论文引用 4 000 余次, 国内学术刊物论文 200 余篇, 获国家发明专利 18 项, 编著(含合编)书 10 本; 获国家自然科学二等奖、江苏省科技一等奖各 1 项, 省部级科技进步二等奖 4 项等, 均为第一获奖人; 获 2007 年度何梁-何利科学技术进步奖; 曾任南京大学纳米科学技术研究中心主任, 国家 85 攀登计划“纳米材料科学”专家委员会委员, 95 攀登预选计划“纳米材料科学”首席科学家, 973 项目“纳米材料和纳米结构”08 课题负责人; 在南京大学组建了纳米磁性科研组, 培育博士生 40 多人, 其中二人分别获 2000 与 2003 年度全国优秀博士论文奖。

沈保根: 男, 1952



特约撰稿人李发伸

年生, 中国科学院物理研究所研究员, 中国科学院院士; 长期从事磁学和磁性材料的研究工作, 开展了非晶态合金的磁性和输运性质研究, 解释了金属-金属基非晶态合金中磁性和电性的反常现象; 研究了稀土-铁基化合物的结构与磁性, 合成出多种新型纳米晶稀土永磁材料, 揭示了它们的矫顽力机理; 研究了稀土-过渡族化合物的晶体结构、相变、磁性和磁热效应, 发现了多种新型大磁热效应材料, 阐明了一级相变体系中磁热效应的物理机制。

李发伸: 男, 1940 年生, 教授, 博导; 1962 年毕业于兰州大学物理系, 同年留校任教至今; 1981 年 10 月~1983 年 10 月以访问学者身份留学德国鲁尔大学(波鸿)物理系, 曾任兰州大学科研处处长

(1984~1989), 1989 年 10 月~1993 年 2 月任兰州大学副校长, 1993 年~2006 年 6 月任兰州大学校长; 曾兼任国家重离子物理实验室副主任、中国核物理学会穆斯堡尔学组副主任等职; 曾为第九、十届全国人大代表, 国务院学位委员会第四、五届物理学、天文学学科评议组成员, 曾任国际穆斯堡尔谱学应用咨询委员会委员; 长期从事固体物理、磁学及磁性材料穆斯堡尔谱学及自旋回波核磁共振的教学及科研工作, 在磁性材料的微观特性及其与宏观磁性的关系研究方面, 取得了多项研究成果; “磁性微粉及稀土——铁磁性材料的制备和穆斯堡尔研究”, 荣获甘肃省科委科技进步二等奖; “新型磁性材料的制备及电磁性能的研究”荣获甘肃省科技进步三等奖, “低 Nd 快淬 NdFeB 合金的核磁共振及穆斯堡尔谱研究”荣获甘肃省科技进步二等奖, “2: 17 型稀土-铁碳化物的稳定性、磁性及穆斯堡尔谱研究”荣获教育部科技进步二等奖; 自 1990 年以来, 已发表学术论文 200 多篇。