

Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4}合金的制备、表征及其低频吸波性能

Preparation, Characterization and Microwave Absorbing Properties of Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4} Alloys in the Low Frequency Range

冯永宝,唐传明,丘 泰

(南京工业大学 材料科学与工程学院,南京 210009)

FENG Yong-bao, TANG Chuan-ming, QIU Tai

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing

University of Technology, Nanjing 210009, China)

摘要: 采用机械合金化法制备了 Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4} 合金,借助 XRD, SEM, VSM 和 VNA,研究了 Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4} 合金的相结构、微观形貌、软磁性能以及 Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4}/石蜡吸波材料的电磁和吸波性能。结果表明,采用一步法和两步法制备的 Fe-SiAl 合金的晶相均为无序 bcc-Fe(Si, Al)相。一步法制备的 FeSiAl 合金形貌为不规则块状,而两步法制备的合金为片状。一步法与两步法制备的 FeSiAl 合金具有相近的比饱和磁化强度与矫顽力;但是与块状 FeSiAl/石蜡吸波材料相比,片状 FeSiAl/石蜡吸波材料具有更高的复介电常数和复磁导率,在 0.5~5GHz 范围内具有更低的反射率。厚度为 2~5mm 的片状 FeSiAl/石蜡吸波材料,随厚度的增加反射率降低,匹配频率向低频移动;2mm 材料反射率 ≤ -10 dB 的带宽达 1.07GHz。

关键词: Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4};机械合金化;吸波材料;电磁参数;微波吸收性能

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.02.001

中图分类号: TM25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)02-0001-06

Abstract: The Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4} alloys were prepared by mechanical alloying (MA) method. The phase structure, morphology, soft magnetic properties of the Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4} alloys, the electromagnetic and absorbing properties of the FeSiAl/paraffin absorbers were investigated with XRD, SEM, VSM and VNA. The results show that the crystalline structures of the FeSiAl alloys prepared by both one-step MA process and two-step MA process are disordered bcc-Fe (Si, Al) solid solutions. The shape of FeSiAl alloy prepared by the one-step MA process is irregular, while the FeSiAl alloy prepared by the two-step MA process is flake-shaped. The specific saturation magnetization and coercivity are similar to the FeSiAl alloys prepared by two methods. Compared with the irregular FeSiAl/paraffin absorber, the absorber filled with flaky FeSiAl alloys possesses the higher complex permittivity and permeability and presents lower reflectivity in the range of 0.5-5GHz. For the 2-5mm absorber filled with flaky Fe-SiAl alloys, the minimum reflectivity decreases and the matching frequency moves towards the lower frequency with the increase of the thickness. The absorption bandwidth of the 2mm absorber ($RL \leq -10$ dB) is 1.07GHz.

Key words: Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4}; mechanical alloying; absorber; electromagnetic parameter; microwave absorbing property

随着微波通讯和电子技术的不断发展,电子产品在人们日常生活中得到了越来越广泛的应用,同时也带来了日益严重的电磁干扰和电磁污染问题^[1]。一般采用微波吸收材料(简称吸波材料)来把不需要的电磁波转换为热能或其他的形式而耗散掉,从而抑制电磁

干扰并减小电磁污染所带来的危害^[1,2]。通常大多数的商业电子设备工作在低频波段,如 L 波段(1~2GHz)和 S 波段(2~4GHz)^[3]。目前,大多研究者关注的是吸波材料在 8~18GHz 频率范围内的吸波性能^[4-6],较少有研究者对吸波材料在 1~4GHz 低频范

围内的吸波性能进行研究。Li 等^[7]采用溶胶凝胶法和自蔓延燃烧法制备了 $\text{SrLa}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$ ($x=0\sim1.0$) 粉体,并以石蜡为基体,制备了微波吸收材料,结果发现:当 $x=0.4$ 时,在 10.25GHz 处,反射率达到最小值 -8dB。Chen 等^[8]以 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 和 ZnFe_2O_4 的混合物为吸收剂,当 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 质量分数达到 85% 时,吸波材料在 8.7GHz 处,最小反射率为 -37dB。有研究表明:较高的磁导率和较低的介电常数有利于提高材料的吸波性能^[9]。FeSiAl 合金在某一组成点 (Sendust 合金成分) 附近,磁晶各向异性 and 磁致伸缩系数均趋近于 0,磁导率较高^[10]。因此, $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{9.6}\text{Al}_{5.4}$ 有望成为一种理想的吸收剂。目前,已有大量对 FeSiAl 吸波材料电磁性能以及吸波性能的研究: Zhou 等^[11]用 Cr 取代 Si,制备了 $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{9.5-x}\text{Al}_{5.5}\text{Cr}_x$ ($x=0\sim6$) 合金,当 $x=2$ 时,FeSiAl 吸波材料在 11.5GHz 处,反射率达到 -20dB; Sakai 等^[12]选择颗粒粒径为 $5\mu\text{m}$ 的 $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{10}\text{Al}_5$ 合金作为吸收剂,以聚苯乙烯为基体,制备得到的 FeSiAl 吸波材料最大吸收峰处于 30~40GHz 范围内; Zhang 等^[13]对市购的 $\text{Fe}_{84.4}\text{Si}_{10}\text{Al}_{5.6}$ 合金做不同扁平化程度的研究,结果发现当合金的纵横比越来越大时,FeSiAl 吸波材料的最大吸收峰逐渐往低频移动。但是,对 FeSiAl 吸波材料的低频性能研究仍较少。本工作旨在通过机械合金化一步法和两步法工艺制备 $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{9.6}\text{Al}_{5.4}$ 合金,并研究 FeSiAl/石蜡吸波材料在 0.5~5GHz 低频范围内的电磁和吸波性能。

1 实验过程

1.1 FeSiAl 合金粉末与吸波材料的制备

以高纯 Fe, Si, Al 粉为原料 (纯度 > 99.9%, 粒度 < 300 目), 按质量分数 Fe : Si : Al = 85 : 9.6 : 5.4 称取各原料粉末; 按照球料质量比为 40 : 1 称取不锈钢球。将各原料粉末与不锈钢球一起置于不锈钢球磨罐中, 随后密封球磨罐后对球磨罐先抽真空再充入氩气, 以保护粉末在球磨过程中不被空气氧化。最后将球磨罐置于 ZM-2-A 型振动球磨机以 49Hz 的振动频率球磨 130h 后制得块状 FeSiAl 合金 A, 此过程称为一步法制备工艺。在一步法制备得到 FeSiAl 合金之后, 在球磨罐中再加入 90mL 无水乙醇, 继续球磨 15h, 而后采用过滤法去除无水乙醇并真空烘干粉末后得到 FeSiAl 合金 B, 此过程称为两步法工艺。

将一步法和两步法制备得到的合金粉末 A 和 B 分别按质量分数 80% 与切片石蜡 (熔点范围 54~56℃) 混合, 经 70℃ 水浴加热进一步混匀后干压制成外径 7mm、内径 3.04mm、厚 3mm 的吸波材料。

1.2 测试与表征

采用 ARL X'TRA 型 X 射线衍射仪 (XRD, Cu 靶, 波长为 0.1542nm) 对合金化产物进行物相分析。采用 JSM-5900 扫描电镜 (SEM) 观察 FeSiAl 合金粉末的微观形貌。采用 Lakeshore 7307 振动样品磁强计 (VSM) 测量样品的磁滞回线。采用 HP8722ET 矢量网络分析仪 (VNA) 对微波吸收吸波材料在 0.5~5GHz 频率范围内的电磁参数 (复介电常数 $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ 和复磁导率 $\mu_r = \mu' - j\mu''$) 进行测量, 并基于所测的电磁参数, 采用公式 (1) 和 (2) 来计算反射率 RL^[14, 15]:

$$RL = 20 \lg \sqrt{\frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1}} \quad (1)$$

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

式中: Z_{in} 是吸波材料的输入阻抗; ϵ_r 是吸波材料的复介电常数; μ_r 是吸波材料的复磁导率; d 是吸波材料的厚度; c 是光在真空中的传播速率; f 是频率。

不同厚度下吸波材料的吸波带宽根据公式 (3) 计算:

$$\Delta f = f_{up} - f_{low} \quad (3)$$

式中, f_{up} 和 f_{low} 分别是 $RL \leq -10\text{dB}$ 最高和最低的频率值。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图 1 是原料混合粉末, 一步法制备的 FeSiAl 合金以及两步法制备的 FeSiAl 合金的 X 射线衍射谱。由图 1 可见, 原料混合粉末的 XRD 图谱显示了典型的单质 Fe, Si 和 Al 的衍射峰。经过一步法球磨后, 混合粉末的相结构发生了明显的变化: 图谱中 Si 和 Al 的衍射峰已经完全消失, 只剩下 Fe 的衍射峰, 且在 XRD 图谱中不存在漫散射峰, 即在 $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{9.6}\text{Al}_{5.4}$ 球磨过程

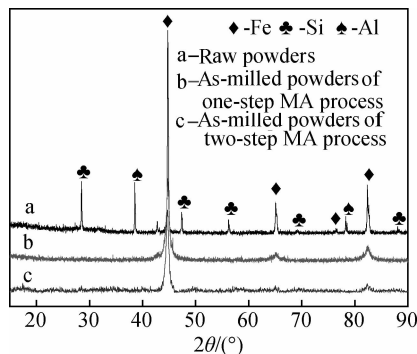


图 1 原料粉末以及球磨产物的 XRD 图谱
Fig. 1 X-ray diffraction patterns of raw powders and the milled powders

中,没有非晶相产生,从而形成无序 bcc-Fe(Si, Al) 固溶体。在一步球磨法工艺基础上进行的两步法球磨工艺对粉体相组成没有明显的影响。从图 1 还可以看到,球磨产物的衍射峰的半高宽有所展宽,其原因可能是球磨导致粉体的晶粒变细以及晶格应力变大^[16]。

2.2 微观形貌

图 2 是一步法和两步法制备的 FeSiAl 合金的显

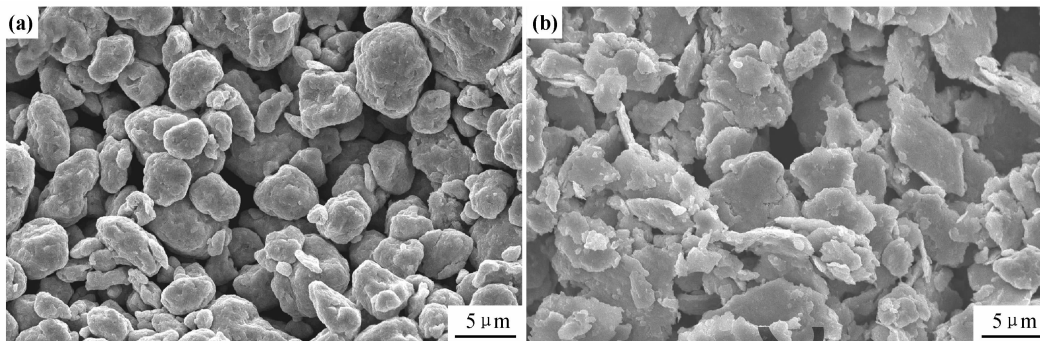


图 2 一步法(a)和两步法(b)制备的 FeSiAl 粉末的 SEM 图片

Fig. 2 SEM images of the FeSiAl alloys prepared by the one-step (a) and two-step (b) MA processes

2.3 磁滞回线

图 3 是一步法和两步法制备的 FeSiAl 合金的磁滞回线。根据趋近饱和定律,计算了合金样品的饱和磁化强度 M_s 。块状 FeSiAl 合金的 M_s 为 $151.2 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,略高于片状颗粒合金的 $149.9 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,而矫顽力则几乎相同,这表明两种粉体具有相近的软磁性能。

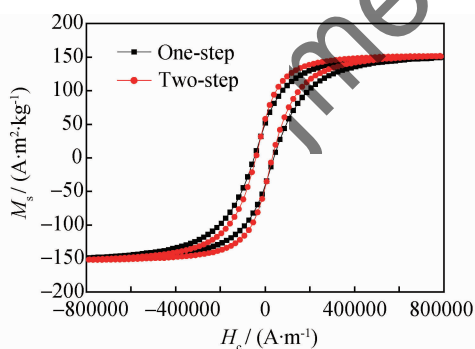


图 3 一步法和两步法制备的 FeSiAl 粉末的磁滞回线

Fig. 3 The hysteresis loops of FeSiAl alloys prepared by one-step and two-step MA processes

2.4 电磁参数

图 4 和图 5 描述的是一步法和两步法制备的 Fe-SiAl 与石蜡制成吸波材料的复介电常数、复磁导率与频率的关系曲线。复介电常数实部 ϵ' 反映的是介电能量的储存,虚部 ϵ'' 反应的是介电能量的损耗。由图 4 可见,在 $0.5 \sim 5 \text{ GHz}$ 范围内,一步法制备的 FeSiAl 合

微照片。由图 2 可见,采用一步法制备的 FeSiAl 合金粉末的形貌为不规则块状,颗粒表面粗糙,粒径分布不均匀。而采用两步法制备的 FeSiAl 合金粉末形貌为片状,颗粒表面光滑,粒径分布相对较均匀。所得到的片状 FeSiAl 粉末与块状 FeSiAl 粉末相比,具有更大的纵横比和形状各向异性,更能克服涡流对合金磁导率的影响,有望具有更大的磁导率。

金吸波材料的 ϵ' 和 ϵ'' 几乎为常量,分别为 11 和 0.1;而两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的 ϵ' 在所测频率范围内从 36 减小到 29, ϵ'' 从 6 增加到 10。整体而言,两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料与一步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料相比,具有更高的介电储存能量以及介电损耗。其原因可能是:与块状合金相比,片状合金一方面表面积更大,在材料中更容易形成导电通道,因而电导率更大;另一方面表面更容易被电极化^[17]。

与复介电常数类似,复磁导率实部 μ' 反应的是磁场能量的储存,虚部 μ'' 反应的是磁场能量的损耗。由图 5 可见,随着频率的增加,一步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的 μ' 从 2.5 减小至 1.6, μ'' 的值介于 0.5 ~ 0.65;而两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的 μ' 从 3.5 减小至 2.2, μ'' 的值介于 0.7 ~ 1.05。很明显,两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料具有更高的磁场能量储存及损耗。研究表明传统块状磁性材料的复磁导率在高频下受到 Snoek's 极限制^[18]:

$$(\mu_r - 1)f_r = \frac{2}{3}\gamma' M_s \quad (4)$$

式中, μ_r , f_r , γ' 和 M_s 分别是初始磁导率,共振频率,旋磁比和饱和磁化强度。然而,片状合金由于具有较大的形状各向异性,其复磁导率能突破 Snoek's 极限的限制^[18]:

$$(\mu_r - 1)f_r = \frac{2}{3}\gamma' M_s \sqrt{\frac{H_{\text{ha}}}{H_{\text{ca}}}} \quad (5)$$

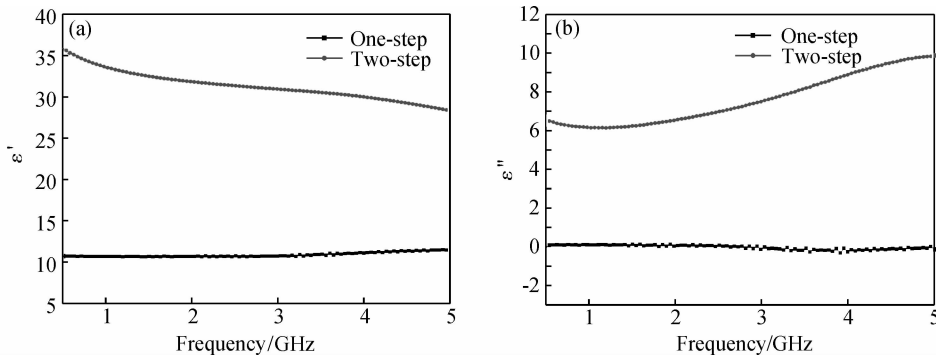


图 4 一步法和两步法制备的 FeSiAl 与石蜡制成吸波材料的复介电常数与频率的关系曲线

(a)复介电常数实部 ϵ' ; (b)复介电常数虚部 ϵ''

Fig. 4 The frequency dependences of complex permittivity for absorbers filled with FeSiAl alloys prepared by one-step and two-step MA processes (a) real part of complex permittivity ϵ' ; (b) imaginary part of complex permittivity ϵ''

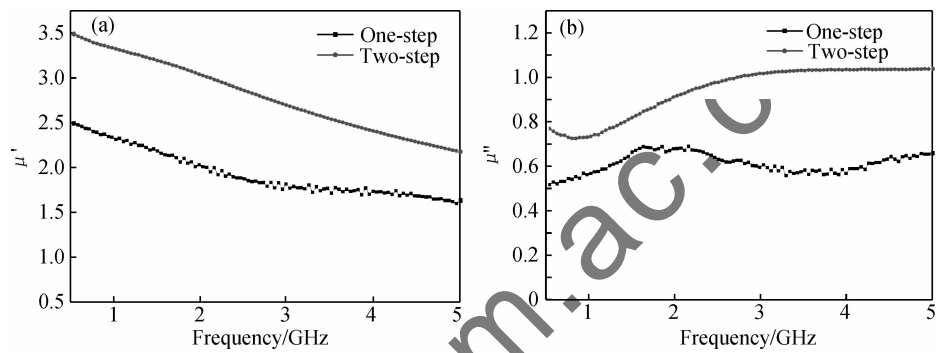


图 5 一步法(a)和两步法(b)制备的 FeSiAl 与石蜡制成吸波材料的复磁导率与频率的关系曲线

(a)复磁导率实部 μ' ; (b)复磁导率虚部 μ''

Fig. 5 The frequency dependences of complex permeability for absorbers filled with FeSiAl alloys prepared by one-step and two-step MA processes (a) real part of complex permeability μ' ; (b) imaginary part of complex permeability μ''

式中, H_{ca} 是平行于片状表面的各向异性场, 而 H_{ha} 是垂直于片状表面的各向异性场。对于片状合金来说, $H_{ha} \gg H_{ca}$, 因而能获得更大的磁导率。片状 FeSiAl 合金具有更高磁导率的另一个原因是涡流对它的影响更小, 高频下涡流对合金磁导率有很大的影响, 而片状合金, 由于厚度低于其趋肤深度, 因而受到涡流的影响较

小, 磁导率更大^[19]。

图 6 是一步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料和两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的介电损耗角正切 $\tan\delta_\epsilon(\epsilon''/\epsilon')$ 和磁损耗角正切 $\tan\delta_\mu(\mu''/\mu')$ 。由图 6 可见, 在 0.5~5GHz 范围内, 一步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的 $\tan\delta_\epsilon$ 几乎为 0, $\tan\delta_\mu$ 从 0.2 增加至 0.4。

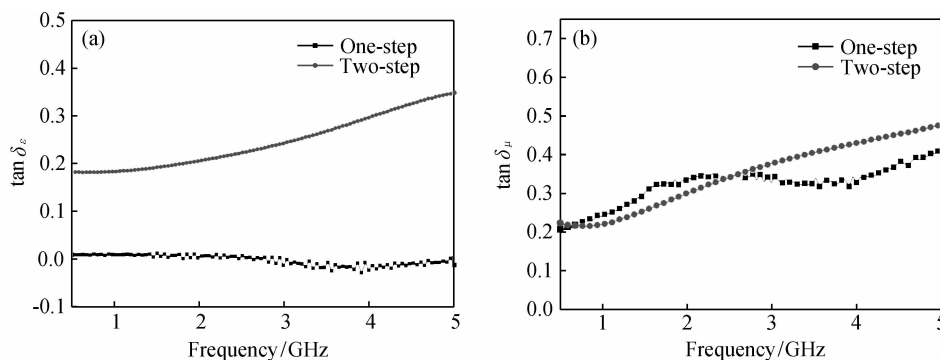


图 6 一步法和两步法制备的 FeSiAl 与石蜡制成吸波材料的介电损耗和磁损耗与频率的关系 (a)介电损耗; (b)磁损耗

Fig. 6 The frequency dependences of dielectric and magnetic losses for absorbers filled with FeSiAl alloys prepared by one-step and two-step MA processes (a) dielectric loss; (b) magnetic loss

这表明块状 FeSiAl 合金的介电损耗相对磁损耗几乎可以忽略不计,主要是靠磁损耗机制吸收电磁波。同时,两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的 $\tan\delta_e$ 从 0.18 增加至 0.35, $\tan\delta_\mu$ 从 0.21 增加至 0.46。这表明对片状 FeSiAl 合金而言,介电损耗和磁损耗两种机制共同作用于电磁波的吸收。

2.5 反射损耗

图 7 是计算得到的一步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料和两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料在不同

厚度下(1~5mm)的反射率 RL 曲线。由图 7 可见,吸波材料的厚度对吸波性能有很大的影响:随着厚度的增加,反射率降低,且匹配频率 f_m 逐渐往低频移动。匹配频率和厚度的关系由公式(6)表示^[20]:

$$d_m = \frac{n}{4}\lambda_m = \frac{nc}{4f_m \sqrt{|\mu_r \epsilon_r|}}, n = 1, 3, 5, \cdots \quad (6)$$

式中: d_m 是吸波材料的厚度; f_m 是吸波材料的匹配频率; c 是真空中光的速率;公式(6)同时也表明可以通过调整吸波材料的厚度来改变其吸波性能。

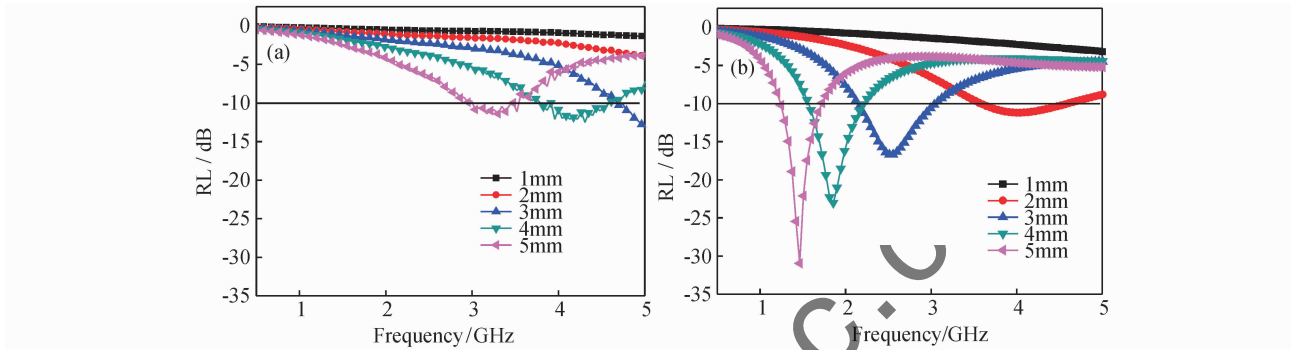


图 7 一步法(a)和两步法(b)制备的 FeSiAl 与石蜡制成吸波材料的反射损耗与频率的关系
Fig. 7 The frequency dependences of reflection losses for absorbers filled with FeSiAl alloys prepared by one-step (a) and two-step (b) MA processes

一步法和两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料在不同厚度下的最小反射率 RL、匹配频率 f_m 和 $RL < -10\text{dB}$ 的带宽见表 1 和表 2。从表 1 和表 2 可见,在 0.5~5GHz 范围内,对一步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料而言,当厚度为 1~3mm 时, f_m 并不在所测的频率范围之内;当厚度为 4mm 和 5mm 时,吸波性能并不理想,最小 RL 分别为 -12.41dB 和 -11.39dB。而两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料仅在 1mm 时,其吸波性能较差。当厚度超过 1mm 时,匹配频率均介于 0.5~5GHz 范围内,低频吸波性能显著提高。当厚度为 2mm 时,最小 RL 和 f_m 分别为 -11.21dB 和

表 2 两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的最小反射率,反射峰频率和有效带宽

Table 2 Minimum RL, peak frequency and effective bandwidth of absorbers filled with FeSiAl alloys prepared by two-step MA process

d/mm	Minimum RL/dB	Peak frequency f_m/GHz	Frequency width of $RL < -10\text{dB}/\text{GHz}$
1	—	—	—
2	-11.21	4.00	1.07
3	-16.68	2.56	0.91
4	-23.04	1.86	0.66
5	-30.97	1.47	0.48

表 1 一步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料的最小反射率,反射峰频率和有效带宽

Table 1 Minimum RL, peak frequency and effective bandwidth of absorbers filled with FeSiAl alloys prepared by one-step MA process

d/mm	Minimum RL/dB	Peak frequency f_m/GHz	Frequency width of $RL < -10\text{dB}/\text{GHz}$
1	—	—	—
2	—	—	—
3	—	—	—
4	-12.49	4.31	0.66
5	-11.39	3.17	0.53

4GHz;当厚度为 5mm 时,最小 RL 和 f_m 分别为 -30.97dB和 1.47GHz。同时,厚度在 2~5mm 之间变化时,其最小反射率频率在 1.47~4.00GHz 范围内移动,对电磁波也均可实现有效吸收。

作为理想的吸波材料,其输入阻抗 Z_{in} 应尽量接近 1 以保证绝大多数电磁波能进入材料内部被吸收损耗掉,为此计算了两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料在 $\lambda/4$ 厚度处的 Z_{in} 以及 RL 曲线(见图 8)。由图 8 可见,当厚度为 5mm 时,对应的 Z_{in} 值为 0.98,已经非常接近 Z_{in} 的理想值,阻抗匹配十分优异。整体而言,两步法制备的 FeSiAl 合金吸波材料在低频段(1~4GHz)具

有优良的吸波性能,有望应用于 L 和 S 波段。

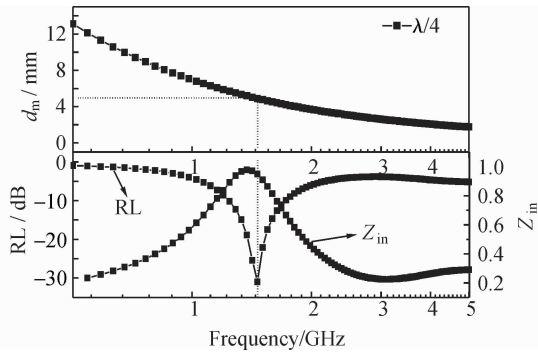


图 8 在 $\lambda/4$ 厚度处两步法制备的 FeSiAl 吸波材料输入阻抗、反射损耗与频率的关系

Fig. 8 The frequency dependences of the input impedance (Z_{in}) and reflection losses (RL) for absorbers filled with FeSiAl alloys prepared by the two-step MA process at the thickness of $\lambda/4$

3 结论

(1) 采用机械合金化一步法和两步法分别制备了块状和片状 bcc-Fe(Si, Al) 合金。两种形貌的 FeSiAl 合金具有相近的物相组成, 比饱和磁化强度和矫顽力。

(2) 与以一步法制备的块状 FeSiAl 合金为吸收剂的吸波材料相比, 以两步法制备的片状 FeSiAl 合金为吸收剂的吸波材料具有更大的介电常数和磁导率, 且在 1~4GHz 范围内吸波性能更加优异。通过改变厚度可以调整吸波材料最小反射率和匹配频率, 当厚度为 5mm 时, 片状 FeSiAl 吸波材料输入阻抗为 0.98, 最小反射率和匹配频率分别为 -30.97dB 和 1.47GHz, $RL < -10$ dB 的带宽为 0.48GHz, 可以应用于 L 和 S 波段。

参考文献

- [1] TONG G X, WU W X, HUA Q, et al. Enhanced electromagnetic characteristics of carbon nanotubes/carbonyl iron powders complex absorbers in 2-18GHz ranges[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(2): 451-456.
- [2] 何亚琼, 毛昌辉, 杨剑. 微波吸收剂的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(5): 28-31.
HE Y Q, MAO C H, YANG J. Research status and development of microwave-absorbing agents[J]. Materials Review, 2010, 24(5): 28-31.
- [3] CHO H S, KIM A S, KIM S M, et al. Study of electromagnetic wave-absorbing materials made by a melt-dragging process [J/OL]. Physica Status Solidi (a), 2004, 201(8): 1942-1945.
- [4] JIA S, LUO F, QING Y C, et al. Electroless plating preparation and microwave electromagnetic properties of Ni-coated carbonyl iron particle/epoxy coatings[J]. Physica B, 2010, 405(17): 3611-3615.

- [5] ABBAS S M, DIXIT A K, CHATTERJEE R, et al. Complex permittivity, complex permeability and microwave absorption properties of ferrite-polymer composites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 309(1): 20-24.
- [6] BAO T J, ZHAO Y, SU X F, et al. A study of the electromagnetic properties of cobalt-multiwalled carbon nanotubes (Co-MWCNTs) composites[J]. Materials Science and Engineering B, 2011, 176(12): 906-912.
- [7] LI Y Q, HUANG Y, QI S H, et al. Preparation, and magnetic and electromagnetic properties of La-doped strontium ferrite films [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(16): 2224-2232.
- [8] CHEN N, MU G H, PAN X F, et al. Microwave absorption properties of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ composite powders[J]. Materials Science and Engineering: B, 2007, 139(2): 256-260.
- [9] YAN S J, ZHEN L, XU C Y, et al. Synthesis, characterization and electromagnetic properties of $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ alloy flower-like microparticles[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(5): 515-520.
- [10] 徐一可, 沈春英, 冯永宝, 等. 铁-硅-铝合金吸波材料的制备及其性能[J]. 机械工程材料, 2009, 33(2): 71-77.
XU Y K, SHEN C Y, FENG Y B, et al. Preparation and property of FeSiAl alloy microwave absorbing material[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(2): 71-77.
- [11] ZHOU T D, TANG J K, WANG Z Y. Influence of Cr content on structure and magnetic properties of Fe-Si-Al-Cr powders[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322(17): 2589-2592.
- [12] SAKAI K, WADA Y, YOSHIKADA S. Composite electromagnetic wave absorber made of permalloy or sendust and effect of sendust particle size on absorption characteristics[J]. Piers Online, 2008, 4(8): 846-853.
- [13] ZHANG Z Q, WEI J Q, YANG W F, et al. Effect of shape of sendust particles on their electromagnetic properties within 0.1-18GHz range[J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406(20): 3896-3900.
- [14] NI S B, WANG X H, ZHOU G, et al. Designed synthesis of wide range microwave absorption Fe_3O_4 -carbon sphere composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489(1): 252-256.
- [15] CAO M S, QIN R R, QIU C J, et al. Matching design and mismatching analysis towards radar absorbing coatings based on conducting plate[J]. Materials and Design, 2003, 24(5): 391-396.
- [16] 邓联文, 冯则坤, 江建军, 等. 纳米晶 $\text{Fe}_{85}\text{Si}_1\text{Al}_6\text{Cr}_8$ 扁平状颗粒材料微波吸收特性[J]. 金属学报, 2006, 42(3): 321-324.
DENG L W, FENG Z K, JIANG J J, et al. Microwave absorbing capability of $\text{Fe}_{85}\text{Si}_1\text{Al}_6\text{Cr}_8$ nanocrystalline flakes[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(3): 321-324.
- [17] WEN F S, ZUO W L, YI H B, et al. Microwave-absorbing properties of shape-optimized carbonyl iron particles with maximum microwave permeability[J]. Physica B: Condensed Matter, 2009, 404(20): 3567-3570.

- 米晶 TiO_2 的结构特性及其光催化活性[J]. 物理化学学报, 2007, 23(7): 1032—1036.
- YAN Zhi-ying, WU Li-yan, SUN Gui-xiang, et al. Structural characterization of nanocrystalline TiO_2 from ionic liquid water solvent mixture and its photocatalytic activity[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2007, 23(7): 1032—1036.
- [27] DONG W S, LI M Y, LIU C L, et al. Novel ionic liquid assisted synthesis of SnO_2 microspheres[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 319 (1): 115—122.
- [28] BANFIELD J F, WELCH S A, ZHANG H Z, et al. Aggregation-based crystal growth and microstructure development in natural iron oxyhydroxide biomineralization products[J]. Science, 2000, 289 (5480): 751—754.
- [29] LIU Y, LI J, JIA M, et al. Preparation and properties of nanostructure anatase TiO_2 monoliths using 1-butyl-3-methylimidazoliumtetrafluoroborate room-temperature ionic liquids as template solvents[J]. Crystal Growth and Design, 2005, 5(4): 1643—1649.
- [30] ZHOU Y, SCHATTKA J H, ANTONIETTI M. Room-temperature ionic liquids as template to monolithic mesoporous silica with wormlike pores via a sol-gel nanocasting technique[J]. Nano Letters, 2004, 4 (3): 477—481.
- [31] 王莉, 赵斌, 袁忠勇, 等. 离子液体中氧化铜纳米结构的合成[J]. 中国科学 B 辑 化学, 2006, 36(5): 386—392.
- WANG Li, ZHAO Bin, YUAN Zhong-yong, et al. Synthesis of copper oxide nanostructures in ionic liquids[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2006, 36(5): 386—392.
- [32] 陈青, 孙熾, 段小川, 等. 单斜 BiVO_4 的离子液体辅助水热合成及表征[J]. 高等学校化学学报, 2011, 32(3): 667—672.
- CHEN Qing, SUN Yan, DUAN Xiao-chuan, et al. Synthesis and characterization of m- BiVO_4 via ionic liquid-assisted hydrothermal synthesis[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2011, 32(3): 667—672.
- [33] 冯怡, 马天翼, 刘蕾, 等. 无机纳米晶的形貌调控及生长机理研究[J]. 中国科学 B 辑 化学, 2009, 39(9): 864—886.
- FENG Yi, MA Tian-yi, LIU Lei, et al. Insights into shape control and growth mechanism of inorganic nanocrystals[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2009, 39(9): 864—886.
- [34] XIONG S L, ZHANG X G, QIAN Y T. CdS with various novel hierarchical nanostructures by nanobelts/nanowires self-assembly: controllable preparation and their optical properties[J]. Crystal Growth and Design, 2009, 9 (12): 5259—5265.
- [35] 吴晓, 汪浩. ZnS 微纳米球的水热合成及光催化性能研究[J]. 无机化学学报, 2010, 26(3): 453—458.
- WU Xiao, WANG Hao. Hydrothermal synthesis and photocatalytic properties of ZnS microspheres[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2010, 26(3): 453—458.
- [36] 潘超. 新颖 Co_3O_4 分级结构的制备及其光催化性能研究[J]. 化学学报, 2011, 69(8): 870—874.
- PAN Chao. Fabrication and photocatalyst performance of a novel Co_3O_4 hierarchical structures[J]. Acta Chimica Sinica, 2011, 69(8): 870—874.
- 基金项目: 国家自然科学基金项目(20171039)
- 收稿日期: 2012-03-16; 修订日期: 2013-04-15
- 作者简介: 赵荣祥(1971—), 男, 副教授, 主要从事纳米材料的制备与应用研究, 联系地址: 辽宁省抚顺市望花区丹东路西段一号辽宁石油化工大学石油化工学院(113001), E-mail: zylhzrx@126.com
- *****
- (上接第 6 页)
- [18] WEI J Q, WANG T, LI F S. Effect of shape of Fe_3Al particles on their microwave permeability and absorption properties[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(21): 2608—2612.
- [19] GONG Y X, ZHEN L, JIANG J T, et al. Synthesis and microwave electromagnetic properties of CoFe alloy nanoflakes prepared with hydrogen-thermal reduction method[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(6): 0643021—0643025.
- [20] WEI J Q, ZHANG Z Q, WANG B C, et al. Microwave reflection characteristics of surface-modified $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ fine particle composites[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(12): 1239081—1239085.
- 基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1146); 国家自然科学基金(51307079)
- 收稿日期: 2012-12-07; 修订日期: 2013-10-15
- 作者简介: 冯永宝(1978—), 男, 硕士生导师, 现从事微波吸收材料的研究工作, 联系地址: 江苏省南京市鼓楼新模范马路 5 号南京工业大学材料学院丁家桥校区(210009), E-mail: fyyb_njut@163.com
- 通讯作者: 唐传明(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属磁性材料等方面的研究, 联系地址: 江苏省南京市鼓楼新模范马路 5 号南京工业大学材料学院丁家桥校区(210009), E-mail: tcmfjx@163.com