

表面层对 FeSiAl/聚氨酯复合物吸波体吸波性能的影响

王国武, 张峻铭, 王 鹏, 王 涛, 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: 用超声混合的方法制备 FeSiAl/聚氨酯复合物及 Co₂Z/聚氨酯和 Al/聚氨酯复合物, 计算了不同厚度材料的吸波性能, 并分析了 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值对复合物吸波性能的影响; 用不同 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值的表面层与基底层(FeSiAl/聚氨酯)结合的方式设计吸波体, 调节基底层的吸波性能。结果表明, 采用高 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值的 Al/聚氨酯复合物表面层可以有效地调节基底层的吸波性能。单纯的基底层在 1 mm 厚度下的反射损耗峰在 16.6 GHz, 强度为 -10.9 dB; 当添加一层 0.1 mm 厚的 Al/聚氨酯表面层后, 整个吸波体的反射损耗峰移向低频, 匹配频率为 13.5 GHz, 强度增至 -29.3 dB。

关键词: FeSiAl/聚氨酯复合物; 表面层; 电磁参数; 吸波性能; 界面反射

中图分类号: TM25

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0005-05

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.002

Effect of surface layer on the microwave absorbing performance of FeSiAl/PU composite absorber

WANG Guo-wu, ZHANG Jun-ming, WANG Peng, WANG Tao, LI Fa-shen

Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The FeSiAl/PU composite was prepared by ultrasound mixing method. The absorbing performance of composite under different thickness was calculated and effect of $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ and $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ value on absorbing performance was analyzed. The microwave absorbing performance is adjusted by combining the base layer (FeSiAl/PU) with surface layer with different $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ and $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ value. The results show that the absorbing performance can be effectively adjusted by using a surface layer with high $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ value. The reflection loss (RL) peak of base layer at 1 mm is located at 16.6 GHz and the RL is -10.9 dB. When Al/PU composite with 0.1 mm in thickness is added as surface layer, the reflection loss peak of composite is shifted to lower frequency, the matching frequency is located at 13.5 GHz and the intensity increases to -29.3 dB.

Key words: FeSiAl/PU composite; surface layer; electromagnetic parameters; microwave absorbing performance; interface reflection

1 引言

随着现代科技的日益发展, 大量广泛应用的电子产品和无线电设备给人类的生活带来了极大的便利, 但同时由此产生的微波辐射和电磁污染也在影响着人类的正常生活。吸波材料因其在减弱电磁污染方面的功能而受到广泛的关注^[1-4]。近年来, 随着应用领域和环境的要求, 研究者们对吸波体提出了“薄、轻、宽、强”的性能要求^[5], 但就目前传统的吸波体材料而言, 很难同时实现对吸波体性能“薄、轻、宽、强”的要求。介电型吸波材料密度低, 该

类型的吸波体典型的优点是轻, 而且通过适当地调节材料参数, 可以实现很强的吸波效果。但是该类型材料由于磁导率为 1, 导致吸波体厚度较厚, 一般在 2 mm 以上, 而且存在着吸收带宽太窄的问题。磁损耗型吸波材料, 如羰基铁、FeNi 复合物等, 在很薄的吸波体厚度下就能实现很强的吸波效果, 而且吸收带宽较宽, 但由于磁性金属颗粒的密度较高, 吸波体的质量一般都比较重。所以, 对于磁损耗型吸波体, 要同时满足“薄、轻、宽、强”的性能要求, 就要对其进行减重。

众所周知, 磁损耗型吸波体的质量与吸波体中

收稿日期: 2019-02-26 修回日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11574122; 51731001)

通讯作者: 王 涛 E-mail: wtao@lzu.edu.cn

磁性颗粒的添加浓度有关,低的添加浓度能有效地降低吸波体质量,但低体积浓度吸波体对应的吸收峰频率较高。在这种情况下,要实现更低频率下的微波吸收,传统的方法是增加吸波体厚度。也就是说,对于单层吸波体,我们很难同时满足“薄”和“轻”的要求。根据界面反射模型^[6],吸波体的微波吸收性能与吸波体前界面反射的微波能量有关。如果在低体积浓度吸波体前界面添加一层不同电磁参数的表面层,改变整体吸波体前界面反射的微波能量,整体吸波体对应的吸波性能也就会相应地改变。通过适当地选择表面层,调节整体吸波体前界面反射的微波能量,就可以将吸收峰的位置移动到低频,同时吸收峰的强度也可以进一步得到改善。这样就可以同时满足吸波体“薄、轻、宽、强”的要求。

在本实验中,选择低体积浓度的 FeSiAl/聚氨酯复合物为基底层吸波材料,选择 Co₂Z/聚氨酯和 Al/聚氨酯复合物作为表面层,测量了各自的高频电磁参数,并通过 HFSS 模拟计算了不同电磁参数的表面层对基底层吸波性能的影响,观察并分析不同 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值的表面层对吸波体吸波性能的影响。

2 实验

2.1 复合物制备

将片状 FeSiAl 颗粒按照 5% 的体积浓度和聚氨酯复合,过程为:(1)将 2.8 g 聚氨酯溶于丙酮溶液中,待其完全溶解后,称取 1 g FeSiAl 颗粒加入溶液中,超声并搅拌均匀,待混合溶液中丙酮完全挥发后取出剩余的混合料;(2)将均匀混合的混合料在 50 °C 的烘箱中放置 12 h,进一步挥发剩余的丙酮;(3)取一部分混合料放置在直径为 1.2 cm 的圆形压片模具中,在 90 °C 保持 10 min,然后在 2 MPa 的压力下压制直径为 1.2 cm、厚度为 0.5 mm 左右的圆片,最后再采用冲环模具在圆片上冲压出外径为 7 mm、内径为 3.04 mm、厚度为 0.5 mm 左右的环形样品。最后,按照同样的方法分别制备体积浓度为 30% 的 Co₂Z/聚氨酯和体积浓度为 35% 的 Al/聚氨酯复合物的环形样品。

2.2 表面层结合方式

5% 的 FeSiAl/聚氨酯复合物作为吸波体主要部分,厚度为 1 mm,为基底层。分别将 Co₂Z/聚氨酯和 Al/聚氨酯复合物添加在基底层的上表面,厚度为 0.1 mm,为表面层。

2.3 材料性能表征

采用场发射扫描电子显微镜(SEM, Hitachi S-4800)对 FeSiAl 颗粒进行形貌观察;用 X 射线衍射仪(XRD, Philips X'Pert PRO)对颗粒进行物相分析,X 射线源为 Cu 靶($\lambda=0.15406$ nm);振动样品磁强计(VSM, Lake Shore 7304)用来观察颗粒的静态磁性能;最后采用矢量网络分析仪(VNA, Agilent E85030B)对三种复合物在 0.1~18 GHz 的电磁参数进行测量。按照 2.2 中吸波体的设计方式,将 VAN 测量的复合物电磁参数导入到 HFSS 仿真模拟软件中,模拟计算结构吸波体的吸波性能。不同厚度复合物的吸波性能根据传输线理论计算^[7-8]:

$$Z = \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \tanh [j(2\pi ft/c)\sqrt{\mu_r \epsilon_r}] \quad (1)$$

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right| \quad (2)$$

其中 Z 为相对于空气的输入阻抗, RL 为反射损耗强度, μ_r 和 ϵ_r 分别为复合物的相对磁导率和相对介电常数, f 为微波频率, t 为吸波体厚度, c 为光速。

3 结果与讨论

3.1 FeSiAl 基本性能

图 1 给出了 FeSiAl 颗粒的形貌、XRD 谱和静态磁性能。图 1a 表明,原粉粒径在 50 μm 左右,厚度在亚微米尺度,颗粒显示很小的纵横比。根据相关理论和实验^[9-10],小的纵横比不仅有利于突破 Snoek 极限,而且能明显降低材料在高频下的涡流损耗。图 1b 表明,合金为单纯的 Fe₃Si_{0.7}Al_{0.3} 相,显示很好的结晶性,最强峰对应的衍射晶面分别为(220)、(400)和(422)。图 1c 表明,FeSiAl 颗粒很容易被磁化饱和,当外场为 3 kOe 时颗粒基本被磁化饱和,饱和磁化强度(M_s)可达 100 emu/g;另外,插图所示合金颗粒的矫顽力 H_c 很小,仅为 1 Oe 左右,剩余磁化强度 M_r 为 0.2 emu/g,合金展示出很好的软磁性能,在微波磁场下容易被磁化,具有高的磁导率。

3.2 FeSiAl/聚氨酯复合物的电磁参数及吸波性能

图 2 所示为 FeSiAl/聚氨酯复合物在 0.1~18 GHz 范围内的介电谱和磁谱,介电常数的实部和虚部在整个频段范围内基本保持常数,这主要是因为 FeSiAl 合金良好的导电能力。对于金属复合吸波体,自由电子在颗粒内形成的局部导电网络,随外场频率的变化而形成电子极化,这种极化在金属复合物中占有主要的地位,而且由于自由电子移动周期很

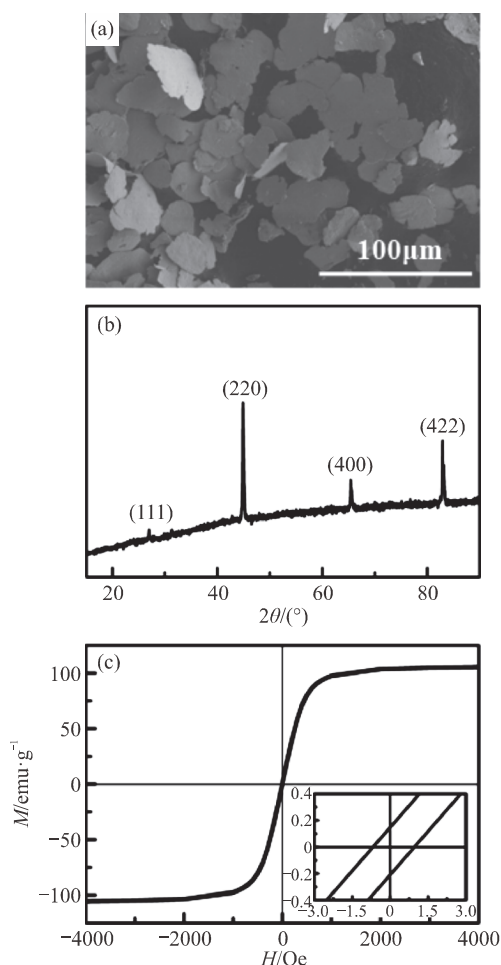


图 1 FeSiAl 颗粒的(a)形貌、(b)XRD 谱和(c)静态磁性能

短，在高频下也不会出现极化弛豫现象，所以介电常数在整个频段范围内基本保持不变。相比介电常数，复合物的磁导率出现了明显的弛豫现象，这主要是因为磁性材料在高频下的磁共振^[11]。磁性材料内部存在多种共振形式，自然共振是较高频率下存在的一种共振形式，在自然共振频率附近，材料内部的磁矩偏转角达到最大，对微波场的能量吸收也达到最大，磁导率实部会出现突然的降低；另外，对于金属颗粒，由于导电能力比较强，颗粒在高频下产生的趋肤效应也会使材料的磁导率出现明显的降低^[12]。

表 1 所示为 FeSiAl/聚氨酯复合物不同频率下的微波折射率 $|\varepsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和反射因子 $(|\varepsilon/\mu|^{1/2})$ 。 $|\varepsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 主要反映材料对于波长的压缩能力。根据界面反射模型^[6]，要实现强的吸波性能，即出现强的反射损耗峰，吸波体的厚度与频率之间存在以下关系：

$$t_m = \frac{nc}{4f\sqrt{|\varepsilon_r \mu_r|}} \quad (3)$$

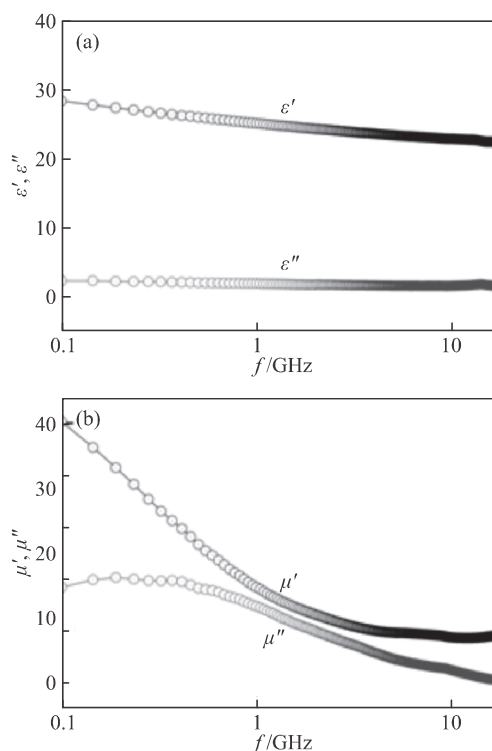


图 2 FeSiAl/聚氨酯复合物的(a)介电常数，(b)磁导率

其中等式左边是吸波体厚度，右边为微波在吸波体材料内的四分之一介质波长，即当吸波体厚度与微波在材料里的四分之一介质波长相等时，吸波体前后界面产生的两列电磁波可以形成相互干涉，满足微波干涉相消的必要条件。根据该公式可以明显看到，越高的 $|\varepsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 对应越短的介质波长，所以吸波体厚度就越薄。 $|\varepsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 满足了相位匹配的条件，即吸波体在一定厚度下可以得到反射损耗峰。而强的反射损耗峰则需要靠调节吸波体前后界面的反射量来实现，即当复合物前后界面对于微波能量的反射相同时才能实现完全的干涉相消，吸波体前界面反射的微波能量与 $|\varepsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 成正比，调节 $|\varepsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 的大小就可以实现完全的干涉相消^[6]。

表 1 不同频率下 FeSiAl/聚氨酯复合物的微波折射率和反射因子

f/GHz	1	2	4	8	12	18
$ \varepsilon \cdot \mu ^{1/2}$	7.71	6.35	5.24	4.72	4.46	4.55
$ \varepsilon/\mu ^{1/2}$	3.27	3.84	4.52	4.88	5.11	4.96

图 3 所示为不同厚度 FeSiAl/聚氨酯复合物的反射损耗强度，随厚度的增大，反射损耗峰逐渐向低频方向移动，且强度先增大后减小，在 12.3 GHz 处达到最强(-45 dB)，对应的吸波体厚度为 1.38 mm，说明在该频率、厚度下复合物几乎实现了完全的干

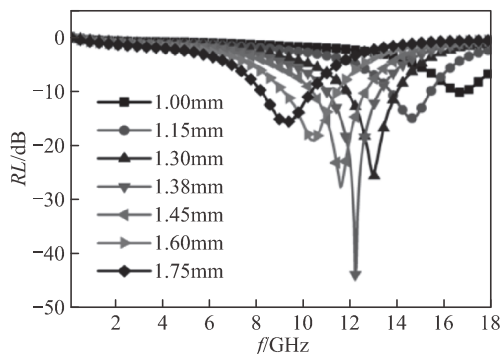


图 3 FeSiAl/聚氨酯复合物不同厚度下的反射损耗性能

涉相消, 结合表 1, 此时复合物所对应的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 分别为 4.46 和 5.11。

3.3 Co₂Z/聚氨酯复合物表面层对 FeSiAl 复合物吸波性能的影响

3.3.1 Co₂Z/聚氨酯复合物的电磁参数

图 4 所示为 Co₂Z/聚氨酯复合物的介电谱和磁谱, 不同频率下对应的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 分别如表 2 所示。对比图 2 和表 1, 无论是电磁参数或者 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值, Co₂Z/聚氨酯复合物都与 FeSiAl/聚氨酯复合物存在较大的差别, 尤其是不同频率下的 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值, 前者明显低于后者, 说明采用 Co₂Z/聚氨酯复合物作为表面层, 与 FeSiAl/聚氨酯复合物构成整体吸波体后, 吸波体前界面的反射量相比单纯的 FeSiAl/聚氨酯复合物可能会发生明显的变化。

表 2 Co₂Z/聚氨酯复合物不同频率下的微波折射率和反射因子

f/GHz	1	2	4	8	12	18
$ \epsilon \cdot \mu ^{1/2}$	3.51	3.11	2.95	2.08	1.92	2.05
$ \epsilon/\mu ^{1/2}$	1.32	1.50	1.56	2.24	2.43	2.33

3.3.2 Co₂Z 表面层对 FeSiAl 复合物吸波性能的影响

图 5 所示为采用 HFSS 模拟计算的表面层 (Co₂Z/聚氨酯复合物) 对于基底层 (FeSiAl/聚氨酯复合物) 吸波性能的影响, 可知, 两条反射损耗曲线基本完全重合, 说明表面层对吸波体的吸波性能基本没有影响, 整个吸波体主要起吸波作用的仍是基底层。这主要有两方面的原因, 一方面, $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 表征材料对微波波长的压缩能力, 该数值越大, 微波在材料里面的波长就越短, 反之, 波长变化将越小。由于 Co₂Z 表面层的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 值太小, 不能形成明显的波长压缩, 而且表面层的厚度太小, 所以相比单纯的基底层, 表面层的加入并不能明显影响微波的波长, 同时也不会改变基底层的干涉相消条件。另一方面, 如前所述, $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 体现复合物前界面对于微波的反射程度, 同样由于表面层的 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值太低, 不能明显影响基底层前界面对

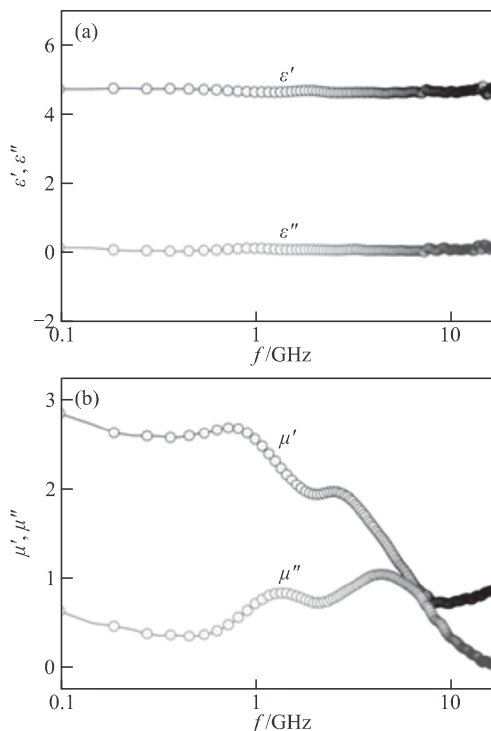


图 4 Co₂Z/聚氨酯复合物的(a)介电常数与(b)磁导率

微波的反射量, 整个吸波体前界面反射的微波仍主要来源于 FeSiAl/聚氨酯复合物, 所以表面层的加入并未明显改变吸波体前界面的反射量。由于这两方面的原因, 表面层的加入并没有改变基底层的干涉相消条件, 同时也未影响基底层前界面反射的微波能量, 所以整个结构吸波体的吸波性能并未受到明显的影响。

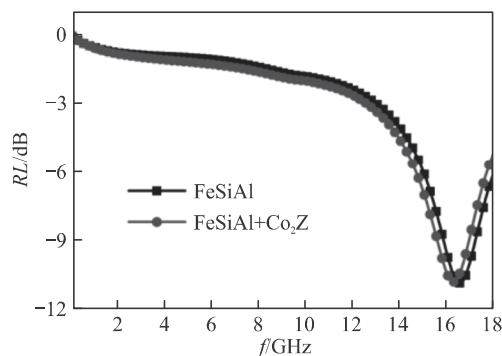


图 5 Co₂Z 表面层对吸波体反射损耗性能的影响

3.4 Al/聚氨酯复合物表面层对 FeSiAl/聚氨酯复合物吸波性能的影响

3.4.1 Al/聚氨酯复合物的电磁参数

图 6 所示为 Al/聚氨酯复合物的电磁参数, 相比图 2 中所示 FeSiAl/聚氨酯复合物, Al/聚氨酯复合物有更高的介电常数。而且, 由于金属 Al 为顺磁性物质, 在微波频段不显磁性, 复合物的磁导率为 1, 所以该复合物会显示出更高的 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值, 对于改变结构

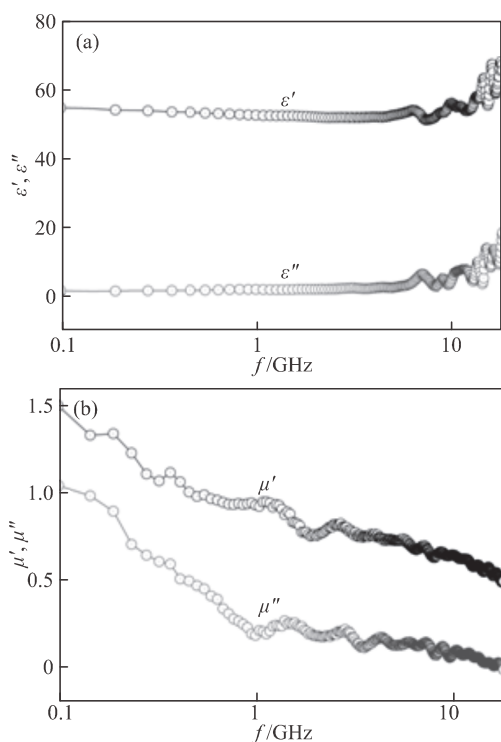


图 6 Al/聚氨酯复合物的(a)介电常数和(b)磁导率

吸波体前界面的反射量有明显的变化。表 3 所示为 Al/聚氨酯复合物不同频率下的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值，由于高介电常数低磁导率的原因，Al/聚氨酯复合物相比 FeSiAl/聚氨酯复合物有明显高于后者的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值。

表 3 Al/聚氨酯复合物不同频率下的微波折射率和反射因子

f/GHz	1	2	4	8	12	18
$ \epsilon \cdot \mu ^{1/2}$	7.03	6.36	6.34	5.71	5.75	5.76
$ \epsilon/\mu ^{1/2}$	7.46	8.18	8.2	9.08	9.43	11.8

3.4.2 Al/聚氨酯复合物表面层对FeSiAl复合物吸波性能的影响

图 7 所示为 Al/聚氨酯复合物表面层对基底层 (FeSiAl/聚氨酯复合物)吸波性能的影响。同样，基底层厚度为 1 mm，表面层为 0.1 mm。从图中可以发现，表面层的加入对基底层的吸波性能产生了明显的影响。随着表面层的加入，整体吸波体的反射损耗峰向低频方向移动，而且反射损耗强度明显增大，在 13.5 GHz 几乎达到对微波完全的吸收。

如图 3 所示，基底层对于微波的最佳吸收在 12.3GHz，此时的匹配厚度为 1.38 mm，反射损耗峰强度为-45 dB，此时的吸波体厚度和吸收峰频率分别称之为最佳匹配厚度和最佳匹配频率^[5]。当基底层厚度为 1 mm 时，由于吸波体厚度不足 1/4 介质波长，

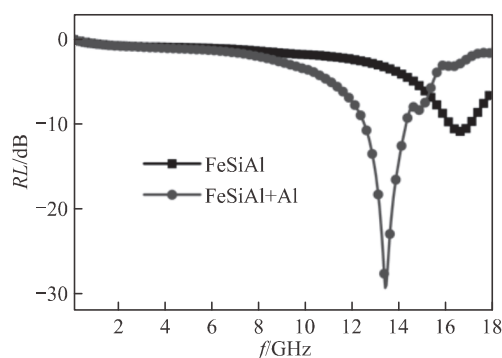


图 7 Al/聚氨酯复合物表面层对吸波体反射损耗性能的影响

该频率下的干涉相消条件被破坏，新的干涉条件将在更高的频率(波长更短)下出现；同时由于吸波体厚度的减小，吸波体内部消耗的能量降低，后界面反射能量增加，吸波体前后界面反射的能量产生差值(对于高介电复合吸波体，高频下前界面的反射量几乎不受频率的影响)，导致反射损耗峰强度降。

当加入表面层之后，复合物前界面的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值发生了变化。如前所示， $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 值代表了复合物对于微波的压缩能力，影响着吸波体厚度及前后界面反射电磁波的干涉状态，根据表 1 和表 3，表面层有更大的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 值，根据(3)式，在厚度不变的情况下， $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 值的增大会导致反射损耗峰向低频方向移动；另一方面，表面层高的 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值可以增加整体吸波体前界面反射的微波能量，平衡前后界面两列反射波的能量差，所示整体吸波体的反射损耗明显增大。

表 4 所示为我们选择的两种表面层对基底层吸波性能的影响程度。由于所选择的两种表面层的电磁参数完全不同，对于基底层吸波性能的影响程度也完全不同。Co₂Z/聚氨酯复合物的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值都明显小于基底层，所以该表面层并不能对基底层的吸波性能产生明显影响；反之 Al/聚氨酯复合物的 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值明显大于基底层，通过添加 0.1 mm 厚度的表面层就实现了单纯基底层在 1.38 mm 厚度下的反射损耗强度，有效地将吸波体厚度减小至 1.1 mm；另外，由于金属 Al 密度很低，用 Al/聚氨酯复合物作为表面层代替掉一部分基底层厚度后，可以降低整体吸波体的质量。所以，采用高介电常数的 Al 复合物作为表面层，通过与基底层结合的方式设计吸波体，不仅能降低吸波体厚度，还可以减小吸波体的整体质量，这对于对吸波体厚度、质量有严格要求的领域有至关重要的作用。

(下转 44 页)

时, 晶粒细小、晶界增厚, 则有利于提升耐冲击特性, 但是此时的 B_s 同时发生了大幅下降(表 1) μ_i 也有显著降低, 材料的综合性能恶化。

参考文献:

[1] Yan S Q, dong L, Chen Z H, et al. The effect of the microstructure on the DC-bias superposition characteristic of NiCuZn ferrite [J]. *J Magn Magn Mater*, 2004, 353: 47-50.

[2] Tang X L, Zhang H W, Su H, et al. Influence of

microstructure on the DC-bias-superposition characteristics of NiZn ferrites [J]. *IEEE Transn Magn*, 2011, 47(10): 4332-4335.

[3] 周志刚. 铁氧体磁性材料[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 243-256.

[4] Sun K, Lan Z, Yu Z, et al. Effects of SnO₂ addition on the microstructure and magnetic properties of NiZn ferrites [J]. *J Magn Magn Mater*, 2008, 320(24): 3352-3355.

作者简介: 朱晓斌(1987—), 电子材料学士, 从事电子材料的开发。

(上接 9 页)

表 4 不同表面层对基层反射损耗峰的影响程度

	FeSiAl/聚氨酯	FeSiAl+Co ₂ Z	FeSiAl+Al
f_m /GHz	16.6	16.4	13.5
RL /dB	-10.9	-10.8	-29.3

4 结论

(1)对于厚度小于最佳匹配厚度的吸波体, 通过添加 $|\epsilon \cdot \mu|^{1/2}$ 和 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值更高的表面层, 可以改善吸波体的吸波性能, 具体表现为反射损耗峰频率向低频转移, 强度明显增加。

(2) $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值比基层小的表面层并不能对基层的吸波性能产生明显的影响, 只有大于基层 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值的表面层才会产生影响, 而且 $|\epsilon/\mu|^{1/2}$ 值越大, 影响越明显。

(3)通过采用不同电磁参数的表面层结合基层的方法设计结构吸波体, 可以有效地降低吸波体的厚度和质量。

参考文献:

[1] 徐银, 周涛, 姜菁菁. 羰基铁在微波吸收领域中的研究进展[J]. *山东化工*, 2017, 46(5): 44-46.

[2] 赵晓明, 鲁亚稳. 吸波材料的最新研究进展及发展趋势[J]. *成都纺织高等专科学校学报*, 2016, 33(3): 120-124.

[3] Zhou Y, Xie H, Zhou W, et al. Enhanced antioxidation and microwave absorbing properties of SiO₂-coated flaky carbonyl iron particles [J]. *J Magn Magn Mater*, 2017, 446(15): 143-149

[4] Lu D, Mo Z, Liang B, et al. Flexible, lightweight carbon nanotube sponges and composites for high-performance electromagnetic interference shielding [J]. *Carbon*, 2018,

133: 457-463.

[5] 王涛, 张峻铭, 王鹏, 等. 吸波材料吸波机制及吸波剂性能优劣评价方法[J]. *磁性材料及器件*, 2016, 47(6): 7-12.

[6] Wang T, Han R, Tan G, et al. Reflection loss mechanism of single layer absorber for flake-shaped carbonyl-iron particle composite [J]. *J Appl Phys*, 2012, 112(10): 104903.

[7] Liu J R, Itoh M, Machida K I. Electromagnetic wave absorption properties of α -Fe/Fe₃B/Y₂O₃ nanocomposites in gigahertz range [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(19): 4017-4019.

[8] Singh P, Babbar V K, Razdan A, et al. Complex Permittivity, permeability, and X-band microwave absorption of CaCoTi ferrite composites [J]. *J Appl Phys*, 2000, 87(9): 4362-4366.

[9] Han R, Han X H, Qiao L, et al. Enhanced microwave absorption of ZnO-coated planar anisotropy carbonyl-iron particles in quasimicrowave frequency band [J]. *Mater Chem Phys*, 2011, 128(3): 317-322.

[10] Zhao H, Cheng Y, Liu W, et al. The flaky porous Fe₃O₄ with tunable dimensions for enhanced microwave absorption performance in X- and C-band [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(29): 295603.

[11] Han R, Gong L Q, Wang T, et al. Complex permeability and microwave absorbing properties of planar anisotropy carbonyl-iron/Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ composite in quasimicrowave band [J]. *Mater Chem Phys*, 2012, 131(3): 555-560.

[12] Zhou B, Wang Y, Li F, et al. Submicron carbonyl iron particles as an efficient microwave absorber in the low frequency band [J]. *J Phys D Appl Phys*, 2017, 50(47): 475001.

作者简介: 王国武(1992—), 男, 甘肃定西人, 博士研究生, 研究方向为材料的高频磁性及微波吸收材料。