

易面型 Y_2Co_{17} 稀土软磁复合材料的 雷达波吸收和带宽机理*

涂成发¹⁾ 郑祖应¹⁾ 乔亮^{1)†} 郝宏波²⁾ 马云国¹⁾
孙哲¹⁾ 王浩¹⁾ 王涛¹⁾ 李发伸¹⁾

1) (兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室, 应用磁学研究所, 兰州 730000)

2) (白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 包头 014000)

(2022 年 4 月 11 日收到; 2022 年 5 月 4 日收到修改稿)

吸波材料广泛应用于国防雷达波隐身和民用电磁屏蔽领域, 吸波材料的吸波性能由复合材料的电磁参数和厚度共同决定. 在实际加工过程中, 吸波材料的反射损耗峰强度随厚度的变化关系和带宽的理论设计与工程实践存在一定偏离, 并且反射损耗吸收峰的强度随厚度变化规律和反射损耗吸收峰的带宽机理研究鲜有报道, 因此, 对吸波材料的反射损耗峰的强度随厚度的变化关系及带宽机理的深入性原理研究有着迫切的需求. 本文通过共沉淀-还原扩散工艺制备易面型 Y_2Co_{17} /聚氨酯 (PU) 软磁复合材料并测量得到电磁参数, 基于界面反射模型研究了雷达波在吸波涂层空气界面的反射性能, 确定了匹配阻抗和吸波材料匹配厚度的依赖关系, 进一步利用匹配阻抗参数设计出 4—18 GHz 内不同厚度的吸波复合材料反射损耗峰强度持续稳定地小于 -10 dB, 6—18 GHz 内不同厚度的吸波复合材料反射损耗峰强度持续稳定地小于 -20 dB. 根据界面反射模型对匹配厚度处反射损耗峰的带宽进行了深入的原理性讨论, 理论计算与测量值吻合.

关键词: 稀土软磁复合材料, 共沉淀-还原扩散, 界面反射, 反射峰带宽

PACS: 42.25.Bs, 42.81.Dp, 72.30.+q, 76.30.Kg

DOI: 10.7498/aps.71.20220665

1 引言

近年来, 随着 5G 新型通信技术的迅速发展, 高频电磁器件被广泛应用^[1–4], 伴随的电磁干扰和污染不仅会影响器件的高效工作, 而且还影响人类的健康^[5–7], 电磁波吸收材料已引起科技界的关注.

稀土合金 $R_2\text{Me}_{17}$ (R = 稀土元素, $\text{Me} = \text{Fe}, \text{Co}$) 是一种具有强面内各向异性的材料, 具有高的共振频率, 用于雷达波吸收材料已被广泛报道^[8–11]. 根据双各向异性理论, $R_2\text{Me}_{17}$ 型材料的起始磁化

率 $(\mu_i - 1)$ 与自然共振频率 f_r 的乘积表达式为^[8]

$$f_r (\mu_i - 1) = \frac{1}{2} \Gamma M_s \sqrt{\frac{H_\theta}{H_\varphi}}, \quad (1)$$

其中, Γ 为旋磁比, M_s 为材料的饱和磁化强度, H_θ 为面内磁晶各向异性场, H_φ 为面外磁晶各向异性场. 基于 $R_2\text{Me}_{17}$ 型材料的研究^[8,9,11–15], 大量的高频磁性材料被给出, 北京大学杨金波课题组^[12] 研究给出 $\text{Sm}_{1.5}\text{Y}_{0.5}\text{Fe}_{15.5}\text{Si}_{1.5}$ /石蜡复合材料, 其反射损耗峰最大强度为 -55.1 dB, 实际测量带宽 (12.7—16.4 GHz) 为 3.7 GHz (反射损耗小于 -10 dB); 中国科学院宁波材料技术与工程研究所谭果果课题组^[16]

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB3501300)、国家自然科学基金 (批准号: 51731001) 和白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室重点研发项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiaoliang@lzu.edu.cn

给出的 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{3.6}$ /聚氨酯复合材料, 在厚度为 1.73 mm 时, 最强反射损耗吸收峰在 9.97 GHz, 强度为 -60.5 dB, 带宽为 5.24 GHz (反射损耗小于 -10 dB). 虽然对于反射损耗吸收峰的位置和强度已有深入的研究, 但是仅有少量的工作研究了反射损耗吸收峰的强度随厚度变化和吸收峰带宽问题.

本文根据界面反射模型, 从相位匹配下的阻抗分析得到软磁复合材料反射损耗吸收峰强度随厚度的变化规律: 当 $|Z_m/Z_0| \rightarrow 1$ 时, 吸波材料达到完全匹配. 在此基础上, 引入在指定厚度下反射损耗吸收峰于指定点的带宽计算模型^[17,18]:

$$\Delta = 2\Delta f = \frac{2}{\left| \frac{d\Delta\theta}{df} \right|} \sqrt{\left[\frac{2(|(RL)_1 - (RL)_0|)}{\Pi} \right]}, \quad (2)$$

其中, Δ 是指定点的带宽, Δf 是指定点带宽的一半, $(RL)_0$ 为峰值点反射的幅值, $(RL)_1$ 为指定点反射峰的幅值, Π 为金属板界面反射波的幅值, $\left| \frac{d\Delta\theta}{df} \right|$ 为 $\Delta\theta$ 随频率的变化率的绝对值. 根据界面反射模型在相位匹配附近前界面和后界面幅值的变化, 详细地研究了复合材料的反射吸收峰的带宽, 理论计算结果与实验值吻合.

2 样品的制备与表征

2.1 样品制备

按 Y_2Co_{17} 化学计量配比称取 24.270 g 的 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 5.655 g 的 $\text{YCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (过量 5%) 倒入装有 1600 mL 蒸馏水的烧杯中, 搅拌溶解, 待样品全部融化后, 缓慢滴入 NaOH 溶液, 滴定溶液 pH 数值为 10, 反应进行 1 h, 以 8000 r/min 的速度离心反应得到的混合物 5 min, 获得绿色沉淀物, 并用蒸馏水洗沉淀 2—3 次, 去掉 NaCl 和过量的 NaOH. 在干燥箱中以 60 °C 干燥 24 h, 以得到 $\text{Y}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 混合的前驱体. 将干燥好的前驱体、钙粒 (质量等同于前驱体的质量) 和固体 KCl (前驱体质量的一半) 混合装入三维混料机中混料, 抽真空后通入氩气并重复两次, 混合 8 h, 使 3 种粉料充分混合均匀. 最后, 在氩气环境中 1100 °C 下进行固相还原反应 2 h 得到样品.

取出样品, 手工研磨后, 过 400 目筛, 收集筛下粉料. 配置 5% 的乙酸铵水溶液, 将粉料与之混合超声搅拌 20 min, 之后超声 15 min, 重复 3 次, 然后用去离子水洗 3 次, 洗去样品中的杂质, 再用乙醇和丙酮洗两次, 最后真空干燥箱干燥. 最终制备得 Y_2Co_{17} 合金磁粉. 制备工艺如图 1 所示.

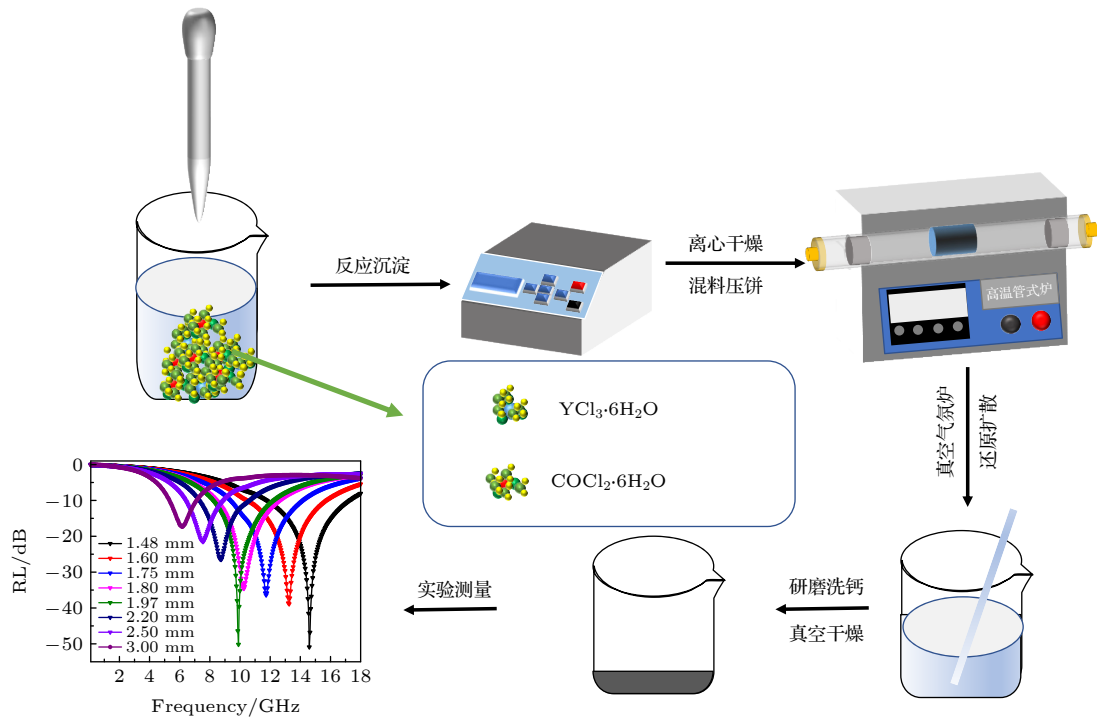


图 1 工艺流程示意图 (RL 表示反射损耗)

Fig. 1. Sketch map of workmanship (RL, reflection loss).

将得到的 Y_2Co_{17} 合金磁粉行星球磨 4 h, 样品在真空干燥箱中风干后, 取适量样品分别制备成体积分数为 15%, 20%, 25%, 30% 的 Y_2Co_{17} /PU 环形体共 4 个, 环形体内径 3.04 mm, 外径 7 mm. 本工艺涉及到的化学反应如下.

前驱体制备: $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_2$,

$\text{YCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 3\text{NaOH} \rightarrow \text{Y}(\text{OH})_3$.

合金成相: $2\text{Y}(\text{OH})_3 + 17\text{Co}(\text{OH})_2 + \text{Ca} \rightarrow \text{Y}_2\text{Co}_{17}$.

2.2 样品的表征

使用 Philip 公司的 X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪 (XRD) 来分析样品的微结构和结晶性. 在室温下, 使用振动样品磁强计 (VSM Lake Shore 7304), 在 20 kOe ($1 \text{ Oe} = 10^3/(4\pi) \text{ A/m}$) 的外加磁场下测量样品的静态磁性. 使用矢量网络分析仪 (安捷伦 E8363B), 在 0.1—18 GHz 范围内, 对样品的介电常数及磁导率进行了测量.

图 2 所示为 Y_2Co_{17} 合金磁粉样品的 XRD 谱. Y_2Co_{17} 样品的衍射峰峰位和衍射强度与标准谱 (PDF#18-0434) 一致, 无杂峰产生, 这说明没有杂相生成, 样品纯度高. 衍射峰峰形尖锐, 说明结晶性很好.

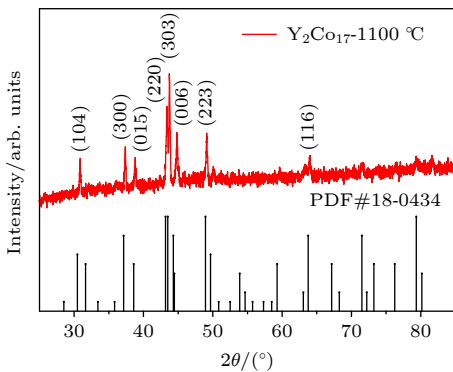


图 2 Y_2Co_{17} 样品 XRD 图谱

Fig. 2. XRD patterns of Y_2Co_{17} .

图 3(a) 给出了 Y_2Co_{17} 合金磁粉的静态磁滞回线, 其饱和磁化强度为 115.23 emu/g ($1 \text{ emu/g} = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$), 矫顽力为 48.82 Oe, 具有良好的软磁特性. 图 3(b) 给出了 30% 体积分数 Y_2Co_{17} /PU 复合片状样品的面内、面外磁滞回线, 其中红色为面外磁滞回线, 绿色为面内磁滞回线. 其面内矫顽力 H_m 和面外矫顽力 H_{out} 分别小于 190.91 Oe 和 339.318 Oe. 根据图中得到的 30% 体积分

Y_2Co_{17} /PU 复合片状样品的平面内饱和磁化强度 (M_s) 和平面外剩余磁化强度 ($M_{r,out-plane}$), 磁性片状样品的平面取向度计算公式^[10]:

$$\text{DPO} = \frac{M_s - M_{r,out-plane}}{M_s} \times 100(\%). \quad (3)$$

30% 体积分 Y_2Co_{17} /PU 复合片状样品面内饱和磁化强度 M_s 为 84.92 emu/g、面外剩余磁化强度 $M_{r,out-plane}$ 为 4.90 emu/g, 可以计算得到, 样品的取向度 (DPO) 为 94.23%, 这说明样品具有良好取向, 为较好的面内各向异性材料.

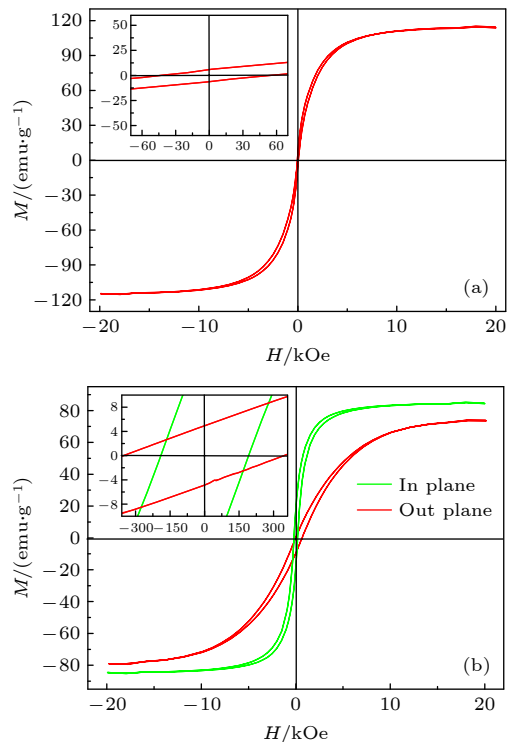


图 3 (a) Y_2Co_{17} 合金磁粉的磁滞回线; (b) 体积分数为 30% 的 Y_2Co_{17} /PU 复合片状样品的面内、面外磁滞回线

Fig. 3. (a) Hysteresis loop of the Y_2Co_{17} alloy magnetic powder; (b) in-plane and out-plane hysteresis loop of the Y_2Co_{17} /PU with a volume fraction of 30%.

3 吸波特性和带宽机理

如图 4 所示, 在 0.1—18 GHz 范围内, 对样品的介电常数及磁导率进行测量. 图 4(a) 为 Y_2Co_{17} /PU 复合材料的磁谱. 可以看到: 在 0.1—2 GHz 频率区间, 磁导率实部随频率的变化基本是平滑的, 体积分数为 15%, 20%, 25% 和 30% 的样品的磁导率分别为 1.7, 2.25, 2.70 和 3.00; 在 2—18 GHz 频率区间, 磁导率急剧的下降; 在 0.1—0.7 GHz 频率区间, 磁导率虚部基本是平滑的, 随后都逐渐地出

现自然共振峰, 体积分数越高, 自然共振峰越往前移; 随着样品体积分数的增大, 样品的磁导率也随着增大. 图 4(b) 为 $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ 复合材料的介电常数, 在 0.1—18 GHz 内, 样品的介电常数随着样品体积分数的增大而增大. 可以看到介电常数实部整体值较为平滑, 具有良好的频率特征; 介电常数实部和虚部值在 0.1—9 GHz 内, 均基本平滑.

当电磁波垂直入射到样品表面时, 电磁波一部分被样品表面反射, 另外一部分进入样品. 进入部分的电磁波一部分被样品损耗, 一部分透射过样品, 单束电磁波通过物体情形如图 5(b) 所示.

将吸波材料涂覆在金属板上, 电磁波一部分被样品前表面反射, 另外一部分进入样品. 进入部分

的电磁波一部分被样品损耗, 一部分被后界面完全反射. 如果吸波材料的厚度为某一特定值时, 会使得前界面的反射波和后界面的反射波相位相差 π , 这样会使得前后界面的反射波在前界面之前相互抵消掉, 从而在前界面之前的空气区域形成一个相消区, 增大吸波材料的有效吸收厚度, 提高吸波材料的工作效率. 这个特殊厚度通常为入射电磁波的 $\lambda/4$ 及其奇数倍, 该厚度的计算公式为 [19]

$$t_{1/4} = \frac{n}{4} \frac{c}{f_m \sqrt{|\varepsilon_r \mu_r|}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots, \quad (4)$$

其中 $t_{1/4}$ 是该样品厚度, f_m 是电磁波频率, ε_r 是复介电常数, μ_r 是复磁导率. 此物理过程示意图如图 5(a) 所示.

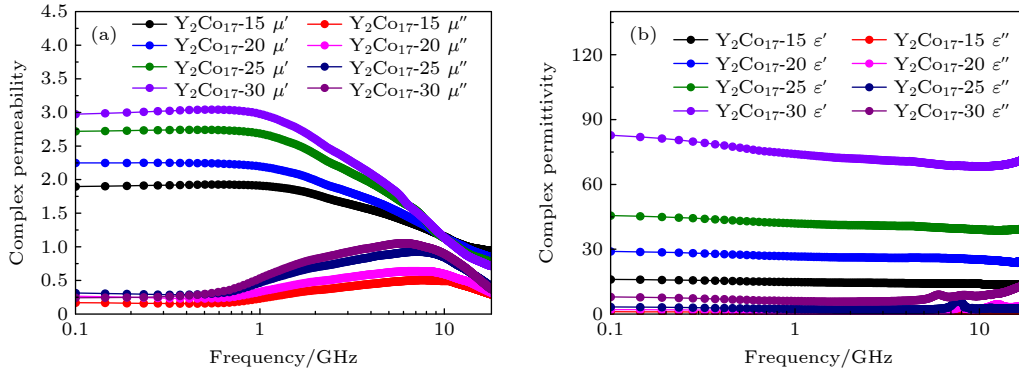


图 4 (a) $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ 复合材料的磁导率; (b) $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ 复合材料的介电常数

Fig. 4. (a) Complex permeability of $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ composites; (b) complex permittivity of $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ composites.

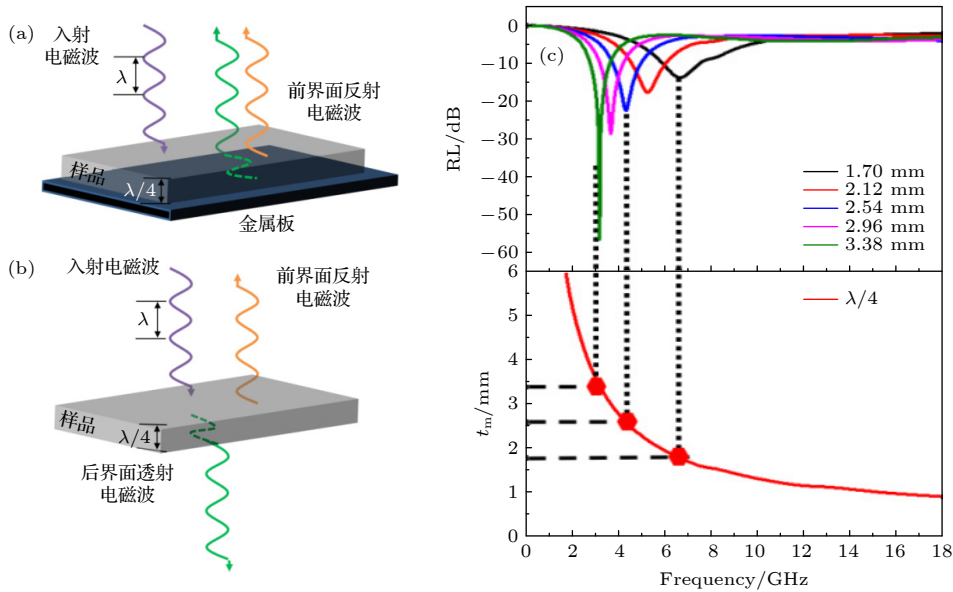


图 5 (a) 界面反射相消模型示意图; (b) 电磁波透过物体示意图; (c) $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ -25% 在不同厚度下吸收峰所对应的频点

Fig. 5. (a) Schematic diagram of interface reflection cancellation model; (b) schematic diagram of electromagnetic wave passing through objects; (c) frequency points corresponding to absorption peaks at different thicknesses of $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ -25%.

通过图 4 及 (4) 式, 可以计算得到 $t_{1/4}(f)$. 根据传输线理论^[20,21], 利用 $t_{1/4}(f)$, 可以计算 Y_2Co_{17} 样品的归一化的输入阻抗及反射损耗计算为

$$Z_{\text{in}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right), \quad (5)$$

$$\text{RL} = 20 \lg \frac{|Z_{\text{in}} - Z_0|}{|Z_{\text{in}} + Z_0|}, \quad (6)$$

其中 c 是光在真空中传播的速度, f 是微波实验频率, d 是样品的厚度, μ_r 是复数相对磁导率, ε_r 是复数相对磁导率, Z_{in} 为样品的本征阻抗, Z_0 为样品的真空阻抗. 反射损耗 (RL) 的值小于等于 -10 dB 意味着超过 90% 的电磁波会被吸收, 其对应的带宽称为有效带宽.

根据 (5) 式、(6) 式和图 4 可以得到 $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ 复合材料在不同体积分数、不同厚度下样品的吸波性能. 图 5(c) 所示为不同厚度的 $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ 复合材料的吸波损耗和 1/4 波长厚度随频率的变化曲线. 从图 5(c) 可知, 每个反射损耗吸收峰都与 $t_{1/4}(f)$ 曲线上的点对应. 用传输线理论的阻抗计算公式 (5) 可以计算出任何频率时吸收峰峰值点的阻抗 Z_{in}/Z_0 ; $Z_{\text{in}}/Z_0 = 1$ 的点即为吸波材料的完全匹配点. 由以上求出完全匹配频率 f_m 和完全匹配厚度 t_m . 用 (5) 式和 (6) 式计算即可得到吸波损耗- f 曲线完全匹配的吸收峰的位置及强度.

根据界面反射模型得到了吸收峰的位置及强度, 反射损耗吸收峰的带宽同样也可以引入界面反射模型. 如图 6 所示, 对于指定的反射幅值 $(\text{RL})_1$ 的带宽用 Δ 表示. 当在吸收峰的峰值, 即 $f = f_m$ 时, 前界面的反射波和后界面的反射波相位差为 π ; 当吸收峰的带宽为 Δ , 即反射幅值为指定的幅值 $(\text{RL})_1$ 时, 假设此时前界面的反射波和后界面的相位比 π 差一个微小的角度 $\Delta\theta$.

假设 Γ 为前界面反射波的幅值, Π 为金属板界面反射波的幅值, $(\text{RL})_0$ 为峰值点反射波的幅值, $t_{1/4}$ 为界面反射模型中的四分之一波长厚度, Δf 是吸收带宽的一半. 则峰值点反射的幅值为前界面的反射波和经过 π 相移的金属板出射波的幅值之和:

$$(\text{RL})_0 = \Gamma \cos 0^\circ + \Pi \cos \pi = \Gamma - \Pi. \quad (7)$$

指定点反射的幅值为前界面的反射波和经过 $\pi - \Delta\theta$ 相移的金属板界面出射波幅值之和:

$$(\text{RL})_1 = \Gamma \cos 0^\circ + \Pi \cos(\pi - \Delta\theta) = \Gamma - \Pi \cos(\Delta\theta). \quad (8)$$

则指定点反射的幅值与峰值点幅值之差为

$$(\text{RL})_1 - (\text{RL})_0 = \Pi [1 - \cos(\Delta\theta)], \quad (9)$$

对 $\cos(\Delta\theta)$ 进行二阶泰勒展开, 即 $\cos(\Delta\theta) \approx 1 - (\Delta\theta)^2/2$, 故 (9) 式可以化简为

$$(\text{RL})_1 - (\text{RL})_0 = \Pi \frac{(\Delta\theta)^2}{2}. \quad (10)$$

根据 $\Delta\theta$ 的定义, 如图 6(b) 所示, 可以将其写为如下形式:

$$\Delta\theta = \left| \frac{d\Delta\theta}{df} \right| \Delta f, \quad (11)$$

根据 (10) 式和 (11) 式可以得到, 指定点的带宽 Δ 的计算公式为

$$\Delta = 2\Delta f = \frac{2}{\left| \frac{d\Delta\theta}{df} \right|} \sqrt{\left[\frac{2((\text{RL})_1 - (\text{RL})_0)}{\Pi} \right]}. \quad (12)$$

如果取指定点为反射吸收峰的强度为 -10 dB 时, $(\text{RL})_1 = 0.32$; 反射吸收点的吸收峰强度为 -15 dB 时, 幅值为 0.18; 反射吸收点的吸收峰强度为 -20 dB 时, 幅值为 0.10; 反射吸收点的吸收峰强度为 -25 dB 时, 幅值为 0.06. 在这种情况下, 就很容易地求出指定样品在指定点的带宽.

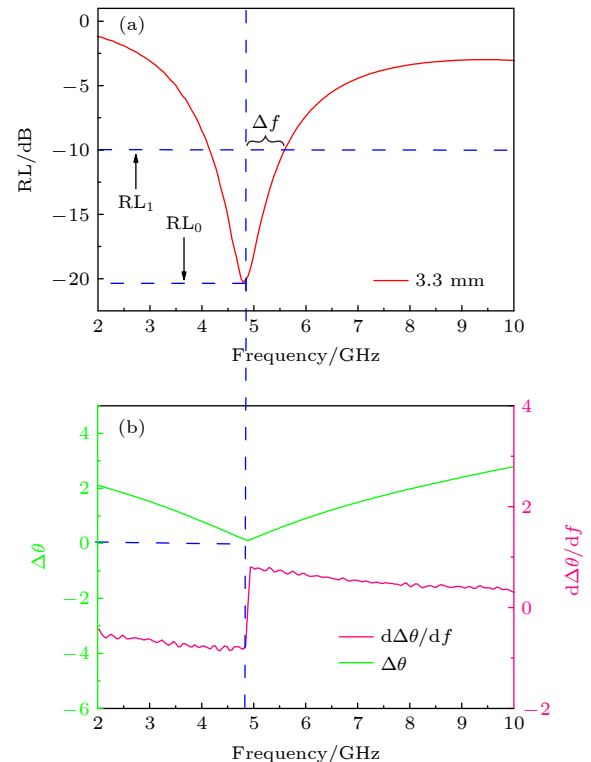


图 6 $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ -15% 复合物的 (a) RL 峰的带宽图和 (b) 四分之一波长的频率依赖性

Fig. 6. (a) Scheme of bandwidth of RL peak and (b) frequency dependent of quarter-wavelength for $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}$ -15% composites.

4 实验结果分析与讨论

4.1 Y_2Co_{17} 粉复合物的完全匹配条件与 Y_2Co_{17} 粉体浓度的关系

图 7 为体积分数为 15% 的 Y_2Co_{17} /PU 环形样品的磁导率谱和介电常数谱. 可以看出: 磁导率的实部和虚部在 1 GHz 之前基本保持不变, 实部大小为 1.9, 虚部为 0.2, 在 10 GHz 处磁导率的虚部会又一个自然共振峰; 介电常数实部和虚部均随着频率的增大而降低.

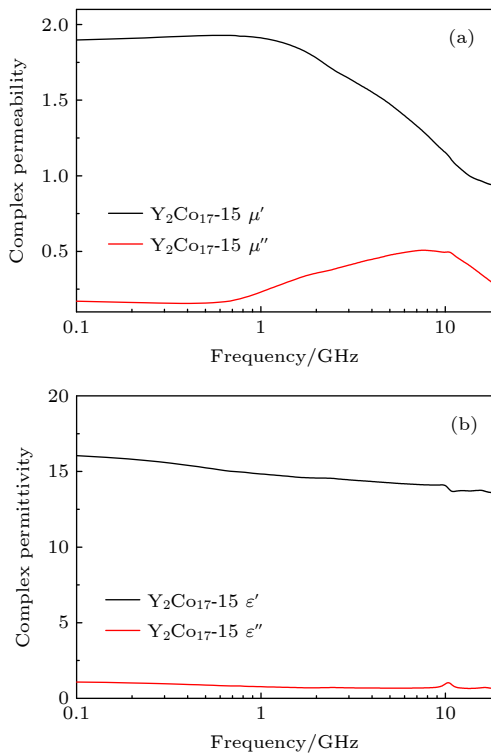


图 7 (a) Y_2Co_{17} /PU-15% 复合材料的磁导率; (b) Y_2Co_{17} /PU-15% 复合材料的介电常数

Fig. 7. (a) Complex permeability of Y_2Co_{17} /PU composites; (b) complex permittivity of Y_2Co_{17} /PU composites.

根据上述的计算, 可以得到在各个体积分数下的 Y_2Co_{17} /PU 复合材料的完全匹配条件, 对应的 $\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$, $\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}$ 和 RL 与复合材料体积浓度 V_c 的关系如表 1 所列. 在前文中已经描述过, 界面反射相消模型能够很好地解释和设计吸波体. 该理论模型的其中一个要点便是所有强度不同的吸收峰的峰值点频率均满足相位匹配条件 $t_{1/4} = \frac{nc}{4f\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}$ ($n = 1, 3, \dots$), 即当指定厚度 t_m 时, $\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$ 增大, 峰值频率点移向低频端; 同理, 当指定频率 f_m 时, 随

着 $\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$ 增大, 匹配厚度减小, 这有利于从理论上更好去设计吸波材料“薄、轻、宽、强”中“薄”的因素.

表 1 Y_2Co_{17} 磁粉复合物的零反射条件与体积分数的关系

Table 1. Relationship between zero reflection condition and volume concentration of Y_2Co_{17} magnetic powder composites.

$V_c/\%$	零反射条件		$\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$	$\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}$	RL/dB
	f_m/GHz	t_m/mm			
15	18.00	1.13	3.66	3.72	-59.60
20	3.14	3.88	7.01	3.72	-52.00
25	1.85	3.95	10.20	4.04	-60.70
30	0.995	5.02	15.00	4.95	-40.56

完全匹配频率 f_m 和完全匹配厚度 t_m 是工作生产目标的重要参数, Y_2Co_{17} /PU 复合材料的完全匹配参数 (f_m , t_m) 随浓度的变化关系, 如图 8 所示. 体积分数 V_c 从 30% 减小到 15%, 完全匹配频率 f_m 从 1.00 GHz 增大到 18.00 GHz, 厚度从 5.00 mm 降低到 1.13 mm. V_c 在 25%—20% 区间内, 完全匹配频率和完全匹配厚度的变化不明显, 但是 V_c 在 20%—15% 区间内, 完全匹配频率和完全匹配厚度随体积分数有明显的变化, 频率从 3.14 GHz 变化到了 18.00 GHz, 变化大小 $\Delta f = 14.86$ GHz, 厚度从 3.88 mm 变薄到 1.13 mm, 变化大小 $\Delta t = 2.75$ mm, 并且发现不同厚度的 Y_2Co_{17} 粉复合材料在 4—18 GHz 总有很好的吸波性能 ($\text{RL} < -10$ dB). 虽然仅做了 4 个体积分数的 Y_2Co_{17} 粉复合材料的零反射参数 (f_m , t_m) 随浓度变化关系, 但是可以用插值的方式, 按照工业生产的厚度和频率标准寻找出合适的体积分数的 Y_2Co_{17} 合金磁粉复合材料.

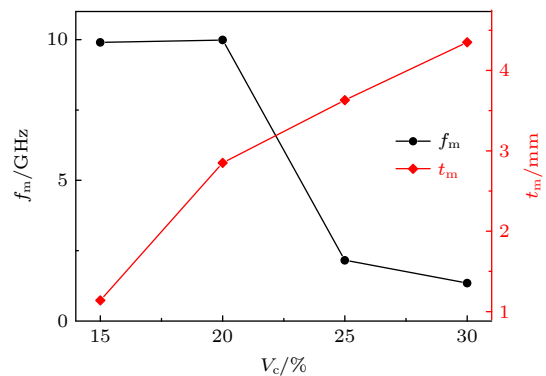


图 8 Y_2Co_{17} 磁粉复合材料的零反射参数 (f_m , t_m) 与浓度关系

Fig. 8. Relationship between zero reflection parameters (f_m , t_m) and volume concentration of Y_2Co_{17} magnetic powder composites.

4.2 Y_2Co_{17} 粉复合物饱和吸收条件

如图 9 所示, 对于一个厚度确定的样品, 随着频率的增大, RL 峰值先增大, 达到最大值后又逐渐减小. 并且发现, 随着样品厚度的增大, RL 峰值向低频区域移动. 众所周知, 对于指定的厚度吸波体总是会有较强的吸收峰. 但如图 9(b) 和图 9(d) 所示, 在材料阻抗和空气阻抗相等时厚度 $d_1 = 1.14$ mm 和 $d_2 = 2.35$ mm 这两个点所对应的吸收峰是最强的. 居于两个厚度之间, 当厚度远离这两个点时, 即 $|Z_{\text{in}} - Z_0|$ 越大, 材料吸收峰变弱, 但吸收带宽变大; 当厚度在这两个点附近时, 吸收带宽变小. 这两个厚度所锁定的厚度区间内的任一厚度, 总是有很强的吸收峰, 即 4—18 GHz 内不同厚度的吸波复合材料反射损耗峰强度持续稳定地小于 -10 dB, 6—18 GHz 内不同厚度的吸波复合材料反射损耗峰强度持续稳定地小于 -20 dB. 即使在工业过程中, 生产的样品厚度有微小的偏差或者微量磨损, 吸波器件的吸波性能不会偏离理论设计吸波性能, 为涂层的工业加工提供了保障. 并且当样品的厚度为 1.33 mm 时, 最强吸收峰在 15.5 GHz,

材料的工作范围为整个 k_u 波段 (反射损耗小于 -10 dB); 当样品的厚度为 1.73 mm 时, 最强吸收峰处吸收强度为 -25 dB, 样品的最强吸收峰出现在 10 GHz 处, 材料的工作范围为整个 X 波段 (反射损耗小于 -10 dB), 如图 9 所示.

根据 (12) 式可得到, 体积分数 15% 的 Y_2Co_{17} 粉复合物在指定点取为反射吸收峰的强度为 -10 dB 时, 带宽的理论计算值和实验值如表 2 所列.

表 2 指定点 $(\text{RL})_1 = -10$ dB 时, 带宽的测量值和计算值

Table 2. Calculated and measured values of bandwidth for the specified point $(\text{RL})_1 = -10$ dB.

f/GHz	t/mm	$(\text{RL})_{\text{min}}/\text{dB}$	Π	$\left \frac{d\Delta\theta}{df}\right $	$\Delta_{\text{计算}}/\text{GHz}$	$\Delta_{\text{测量}}/\text{GHz}$
6.6	2.4	-38.09	0.54	0.54	2.88	2.50
6.0	2.7	-27.4	0.56	0.63	2.34	2.01
5.336	3	-23.04	0.58	0.72	1.94	1.78
4.799	3.3	-20.28	0.60	0.78	1.70	1.68
4.35	3.6	-18.42	0.62	0.88	1.42	1.41
4.03	3.9	-17.26	0.64	0.98	1.22	1.25
3.72	4.2	-16.01	0.66	1.1	1.02	0.99
3.41	4.5	-15.26	0.67	1.17	0.92	0.92

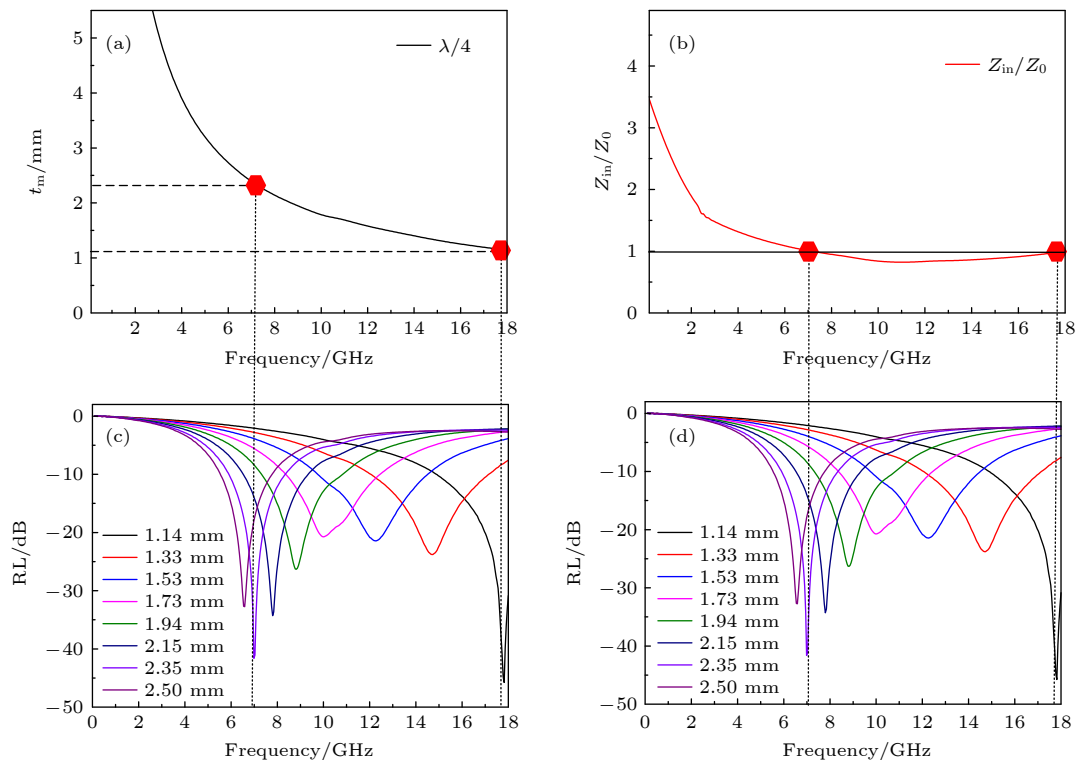


图 9 (a) $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}-15\%$ 四分之一波长厚度与频率的关系; (b) $\text{Y}_2\text{Co}_{17}/\text{PU}-15\%$ 阻抗匹配与厚度的关系; (c), (d) $\text{Y}_2\text{Co}_{17}-15\%$ 在不同厚度下吸收峰

Fig. 9. (a) Quarter wavelength thickness as a function of frequency of $\text{Y}_2\text{Co}_{17}-15\%$; (b) impedance matching versus thickness of $\text{Y}_2\text{Co}_{17}-15\%$; (c), (d) absorption peaks at different thicknesses of $\text{Y}_2\text{Co}_{17}-15\%$.

如图 10 所示, 随着厚度的增大, 反射损耗吸收峰频率向低频移动, 在反射损耗吸收峰的位置前的低频测曲线, 角度差随频率的变化率随频率的增大而减小, 在反射损耗吸收峰的位置, 角度差随频率的变化率出现一个反转, 随后角度差的变化率随频率的增大而减小. 带宽的计算值和理论值的变化规律一致, 在低频区域带宽的理论计算值与实验值完全吻合, 在高频区, 理论计算值略大于实验值.

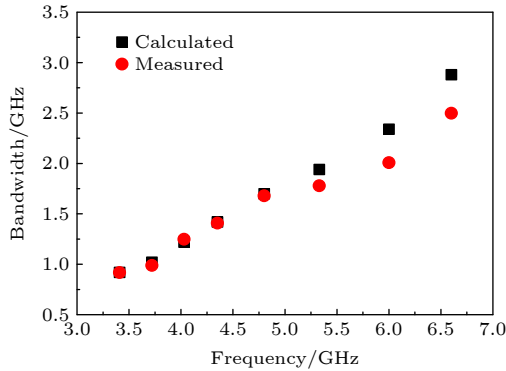


图 10 指定点 $(RL)_1 = -10$ dB 时, $Y_2Co_{17}/PU-15\%$ 带宽的测量值和计算值随频率的变化

Fig. 10. Measured and calculated bandwidth at $(RL)_1 = -10$ dB for $Y_2Co_{17}/PU-15\%$ composite under various frequencies.

5 总 结

本文通过共沉淀-还原扩散工艺制备易面型 Y_2Co_{17} /聚氨酯 (PU) 软磁复合材料并测量得到电磁参数, 利用界面相消模型设计出来了 Y_2Co_{17}/PU 复合材料的匹配频率与匹配厚度, 对反射损耗吸收峰的强度随厚度变化和吸收峰带宽进行了深入的研究, 当 $|Z_{in}/Z_0| \rightarrow 1$ 时, 吸波材料的吸收吸收性能好, 反之, $|Z_{in}/Z_0|$ 的值偏离 1 时, 吸波材料的吸收性能变弱. 从幅度的角度出发, 推导出反射损耗吸收峰在指定厚度下反射损耗吸收峰于指定点的带宽计算模型

$$\Delta = 2\Delta f = \left| \frac{d\Delta\theta}{df} \right| \sqrt{\left[\frac{2(|(RL)_1 - (RL)_0|)}{\Pi} \right]}.$$

基于基本理论研究, 还得到了 $Y_2Co_{17}-PU$ 复合材料优良的吸波性能, 在样品的厚度为 1.28 mm 时, 材料基本适用于整个 k_u 波段 (反射损耗小于 -10 dB); 当样品的厚度为 1.73 mm 时, 材料的工作范围为整个 X 波段 (反射损耗小于 -10 dB). 并且 4—18 GHz 内不同厚度的吸波复合材料反射损耗峰强度持续稳定地小于 -10 dB, 6—18 GHz 内不同厚度的吸波复合材料反射损耗峰强度持续稳定地小于 -20 dB.

参考文献

- [1] Lv H, Yang Z, Liu B, Wu G, Lou Z, Fei B, Wu R 2021 *Nat. Commun.* **12** 834
- [2] Guan B, Ding D, Wang L, Wu J, Xiong R 2017 *Mater. Res. Express* **4** 056103
- [3] Qu B, Zhu C, Li C, Zhang X, Chen Y 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 3730
- [4] Gao S T, Zhang Y C, Xing H L, Li H X 2020 *Chem. Eng. J.* **387** 124149
- [5] Wang Z, Cheng Z, Fang C, Hou X, Xie L 2020 *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **136** 105956
- [6] Zhang H, Jia Z, Feng A, Zhou Z, Zhang C, Wang K, Liu N, Wu G 2020 *Compos. Commun.* **19** 42
- [7] Wang F, Wang N, Han X, Liu D, Wang Y, Cui L, Xu P, Du Y 2019 *Carbon* **145** 701
- [8] Wang P, Zhang J, Wang G, Duan B, Wang T, Li F 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 112403
- [9] Han R, Yi H B, Zuo W L, Wang T, Qiao L, Li F S 2012 *J. Magn. Magn. Mater.* **324** 2488
- [10] Wu P, Zhang Y, Hao H, Qiao L, Liu X, Wang T, Li F 2022 *J. Magn. Magn. Mater.* **549** 168962
- [11] Qiao G, Hu Q, Zhang P, Yang W, Liu Z, Liu S, Wang C, Yang J 2020 *J. Alloys Compd.* **825** 154179
- [12] Yang W, Zhang Y, Qiao G, Lai Y, Liu S, Wang C, Han J, Du H, Zhang Y, Yang Y, Hou Y, Yang J B 2018 *Acta Materialia* **145** 331
- [13] Yan F, Zong Y, Zhao C, Tan G, Sun Y, Li X, Ren Z, Zheng X 2018 *J. Alloys Compd.* **742** 928
- [14] Wang Y, Liu Z, Zhang P, Cai K, Yang W, Han J, Liu S, Wang C, Zou R, Yang J 2021 *AIP Adv.* **11** 015237
- [15] Zhuang X, Tan G, Ning M, Qi C, Ge X, Yang Z, Man Q 2021 *J. Alloys Compd.* **883** 160835
- [16] Gu X, Tan G, Chen S, Man Q, Chang C, Wang X, Li R W, Che S, Jiang L 2017 *J. Magn. Magn. Mater.* **424** 39
- [17] Qiao L, Wang T, Mei Z L, Li X L, Sui W B, Tang L Y, Li F S 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 027502
- [18] Wang T, Han R, Tan G, Wei J, Qiao L, Li F 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 104903
- [19] Wang T, Wang H D, Tan G G, Li W, Qiao L 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 1
- [20] Liu J R, Itoh M, Machida K I 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4017
- [21] Singh P, Babbar V K, Razdan A, Puri R K, Goel T C 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 4362

Mechanism of radar wave absorption and bandwidth for easy-plane Y_2Co_{17} rare earth soft magnetic composites^{*}

Tu Cheng-Fa¹⁾ Zheng Zu-Ying¹⁾ Qiao Liang^{1)†} Hao Hong-Bo²⁾
Ma Yun-Guo¹⁾ Sun Zhe¹⁾ Wang Hao¹⁾ Wang Tao¹⁾ Li Fa-Shen¹⁾

1) (*Institute of Applied Magnetism, Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of
Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2) (*State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and
Comprehensive Utilization, Baotou 014000, China*)

(Received 11 April 2022; revised manuscript received 4 May 2022)

Abstract

Wave absorbing materials are widely used to prevent military equipment from being detected by radar wave and also serve as civil electromagnetic shielding. The absorbing properties of wave absorbing materials are determined by a combination of the electromagnetic parameters and the thickness of the composite material. In the actual case, the theoretically designed reflection loss peak intensity and the bandwidth of wave absorbing materials deviate from the engineered values. There are few reports on the mechanism about the variation of the intensity of the reflection loss absorption peak with thickness and the bandwidth of the reflection loss absorption peak. In this work, based on an interfacial reflection model, the reflective properties of radar wave at the air interface of the absorbing coating are investigated. The dependence of the matching impedance on the matching thickness of the absorbing material is determined, and the matching impedance parameters are further used to design the absorbing composites, which exhibit excellent microwave absorption properties, i.e. an average value of reflection loss is below -10 dB at 4–18 GHz in different thickness wave absorbing materials, and an average value of reflection loss is below -20 dB at 6–18 GHz in different thickness wave absorbing materials. The bandwidth of the reflection loss peak at the matched thickness is discussed in depth in principle based on the interface reflection model, and the theoretical calculations accord with the experimental results.

Keywords: rare earth soft magnetic composites, co-precipitation-reductive diffusion, interface reflection model, reflection peak bandwidth

PACS: 42.25.Bs, 42.81.Dp, 72.30.+q, 76.30.Kg

DOI: 10.7498/aps.71.20220665

^{*} Project supported by National Key R&D Program of China (Grant No. 2021YFB3501300), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51731001), and the State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization's Key Research and Development Projects, China.

[†] Corresponding author. E-mail: qiaoliang@lzu.edu.cn

易面型 Y_2Co_{17} 稀土软磁复合材料的雷达波吸收和带宽机理

涂成发 郑祖应 乔亮 郝宏波 马云国 孙哲 王浩 王涛 李发伸

Mechanism of radar wave absorption and bandwidth for easy-plane Y_2Co_{17} rare earth soft magnetic composites

Tu Cheng-Fa Zheng Zu-Ying Qiao Liang Hao Hong-Bo Ma Yun-Guo Sun Zhe Wang Hao Wang Tao Li Fa-Shen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 184201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220665

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220665>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

FeNiMo/SiO₂复合粉芯的制备与软磁性能调控

Preparation of FeNiMo/SiO₂ composite core and regulation of soft magnetic properties

物理学报. 2022, 71(15): 157502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212317>

磁致伸缩/压电层叠复合材料磁电效应分析

Magnetoelectric effect analysis of magnetostrictive/piezoelectric laminated composites

物理学报. 2018, 67(7): 077702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172307>

引入界面耦合系数的长片型磁电层状复合材料的等效电路模型

Equivalent circuit model for plate-type magnetoelectric laminate composite considering an interface coupling factor

物理学报. 2018, 67(2): 027501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172080>

稀土永磁体及复合磁体反磁化过程和矫顽力

Magnetization reversal and coercivity in rare-earth permanent magnets and composite magnets

物理学报. 2019, 68(17): 177501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190364>

SiC纤维增强Ti17合金复合材料轴向残余应力的拉曼光谱和X射线衍射法对比研究

Comparison between axial residual stresses measured by Raman spectroscopy and X-ray diffraction in SiC fiber reinforced titanium matrix composite

物理学报. 2018, 67(19): 197203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181157>

金刚石/铝复合材料界面性质第一性原理计算及界面反应

First-principles calculation of diamond/Al interface properties and study of interface reaction

物理学报. 2021, 70(17): 178101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210341>