

离子比例对镁钴铁氧体吸波性能的影响

马志军, 杭文武, 翁兴媛, 高静, 郑云生, 陶洪霖

(辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 采用水热法制备尖晶石型 $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$, 通过 X 射线衍射仪 (XRD)、透射电镜 (TEM) 和矢量网络分析仪 (VNA) 表征手段, 研究了掺杂 Mg、Co 比例对铁氧体晶体结构、微观形貌及吸波性能的影响, 总结了镁钴铁氧体的电磁波吸收机制。结果表明: 在 pH=10、晶化温度为 180 °C、晶化时间为 8 h 条件下, 成功制备出形貌为不规则四边形的镁钴铁氧体材料。当 Mg^{2+} 、 Co^{2+} 配比为 5:5, 吸波层厚度为 3.5 mm 时, 在频率 9.50 GHz 处反射损耗值达到 -40.78 dB, 有效吸收带宽为 3.65 GHz (8.06~11.71 GHz), 覆盖 X 波段。优异的吸波性能归因于自然共振、交换共振和涡流损耗的共同作用。

关键词: 水热法; 镁钴铁氧体; 尖晶石型; X 波段; 吸波性能

中图分类号: TM277+.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)10-2934-07

随着信息时代的到来以及人工智能的迅猛发展, 电磁波作为信息传播的重要载体, 已经深入到生活的各个方面, 电子产品在国民经济和生活的各个领域都得到了广泛的应用, 但同时也带来了严重的电磁干扰和辐射污染等问题^[1-3]。除此之外, 电磁波在军事领域同样也带来了诸多不利影响^[4]。因此, 研究出一种既能在民用上降低电磁波辐射危害, 又能在军事上提升武器隐身能力的高性能吸波材料, 对当今社会的进步与发展都具有重要意义^[5]。在实际应用中, 理想的吸波材料应具有吸收能力强、吸收频带宽、吸收层厚度薄、质量轻等特点^[6-7]。

铁氧体吸波材料具有优异的磁性能、稳定的结构、简单的制备流程以及低廉的价格而被广泛应用^[8-9]。目前, 铁氧体吸波材料对国防安全、医学应用和信息产业以及社会生活等诸多领域都具有非常重要的影响^[10]。其中晶型为尖晶石结构的钴基铁氧体因具有适中的磁导率、较高的矫顽力、电阻率、磁晶各向异性以及化学稳定性等优点, 在吸波领域备受关注^[11]。大量研究表明^[12-13], 对尖晶石结构的钴铁氧体进行非磁性离子的掺杂, 可以调控其晶体结构, 进而有效地提高其电磁性能。Goud 等^[14]采用柠檬酸盐凝胶自燃法合成了 $Co_{0.75}Mg_{0.25}Ce_xFe_{2-x}O_4$, 并研究了它的结构、光学、光催化、电磁和生物学特性, 结果表明, $Co_{0.75}Mg_{0.25}Ce_{0.25}Fe_{1.75}O_4$ 具有高的饱和磁化强度, 样品表现出超顺磁性。Kaur 等^[15]通过溶胶-凝胶法在 1000 °C 下烧结合成了 $Zn_{1-x}Co_xFe_2O_4$, 研究了钴取

代锌铁氧体的 K 波段微波吸收。反射损耗研究表明, 合成的铁氧体具有较高的磁损耗和介电损耗, 在所研究的频段内, 所有合成的组合物都产生了超过 90% 的吸收强度, 从而使其成为实现高频微波吸收器的潜在候选者。

本工作选用非磁性离子 Mg^{2+} 与 Co^{2+} 结合, 通过水热法制备不同离子比例的镁钴铁氧体, 对其微观结构和形貌进行了分析, 进一步阐明了对吸波性能的影响机制。

1 实验

用量筒量取 100 mL 蒸馏水倒入烧杯中, 加入 1 g 十六烷基三甲基溴化铵, 超声分散 40 min; 按照 $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ ($Mg^{2+}:Co^{2+}=2:8, 3:7, 4:6, 5:5$) 配比, 称取一定量的 $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 及 $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$; 将混合溶液倒入烧杯中, 用超声波分散 30 min, 使其均匀混合。将混合溶液倒入四口烧瓶中, 在 40 °C 恒温水浴锅中搅拌 30 min, 接着以 2 s/滴的速率向四口烧瓶中滴加浓度为 2 mol/L 的 NaOH 溶液, 调节溶液 pH 值至 10, 继续恒温水浴搅拌 30 min, 生成反应前驱体; 将反应前驱体在常温下静置 10 h, 使其分层。待陈化反应结束后, 倒掉部分上层清液, 将下层沉淀的反应前驱体震荡摇匀后, 将其移入带有聚四氟乙烯衬套的水热高压反应釜中 (物料填入比例不超过 80%); 在温度为 180 °C 的电热恒温鼓风干燥箱中进行晶化反应, 反应持续 8 h。待反应结束后, 让样品自然冷却至室温。然后, 将反应产物用蒸馏水和无水乙醇各洗涤 3 次,

收稿日期: 2023-10-19

基金项目: 国家自然科学基金 (52274265)

作者简介: 马志军, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000, E-mail: mazhijun@lntu.edu.cn

直到溶液呈中性。再进行真空抽滤, 将滤出的沉淀置于 60 °C 电热恒温鼓风干燥箱中烘干。最终, 将得到的块状物研磨成粉末, 即得到镁钴铁氧体。

在 Cu 靶 K α 辐射, 40 kV 工作电压, 波长 $\lambda=0.15406$ nm, 30 mA 管电流, 5°~80° 测量范围的条件下, 采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (X-Ray Diffraction) 测定样品的物相组成。使用 JEM-2010 型透射电子显微镜 (TEM), 可以对晶体的外观、微观结构和粒径大小进行分析。该显微镜的分辨率在 0.1~0.2 nm, 加速电压为 200 kV, 放大倍数可调节在 20 倍到 1000000 倍之间。使用 HP8722ES 矢量网络分析仪 (VNA) 进行电磁参数测试, 采用同轴线测试法对样品在 1~18 GHz 频率范围内的复介电常数和复磁导率进行测量。根据测试得到的电磁参数值, 计算出相应的反射损耗, 并研究其吸波性能。

2 结果与讨论

2.1 物相组成

图 1 为 Mg $_x$ Co $_{1-x}$ Fe $_2$ O $_4$ (Mg $^{2+}$:Co $^{2+}$ =2:8, 3:7, 4:6, 5:5) 的 XRD 图谱。样品的 XRD 图谱中包含了 11 个主要的衍射峰, 峰位分别为(111)、(220)、(311)、(222)、(400)、(422)、(511)、(440)、(620)、(533)和(622)。样品衍射峰与 PDF#88-1939 标准卡对比, 并无杂峰出现, 说明合成了纯相立方尖晶石结构的镁钴铁氧体。4 种样品的衍射峰强且尖锐, 表明所制备的镁钴铁氧体晶体构型规整且结晶度高。

根据布拉格公式^[16] $2d\sin\theta=k\lambda$, 衍射角度 θ 与晶面间距 d 成反比, θ 减小则 d 增大, 意味着峰位会向左偏移, 这与 XRD 测试结果相符。根据 Scherrer 公式计算晶粒尺寸 D :

$$D=0.89\lambda/\beta\cos\theta \quad (1)$$

式中, D 为平均晶粒尺寸; β 为最强衍射峰(311)晶面的半高宽(FWHM); λ 为 X 射线衍射波长($\lambda=0.154056$ nm); θ 为布拉格衍射角。样品的晶格常数 a 可以按以下晶体计算公式计算:

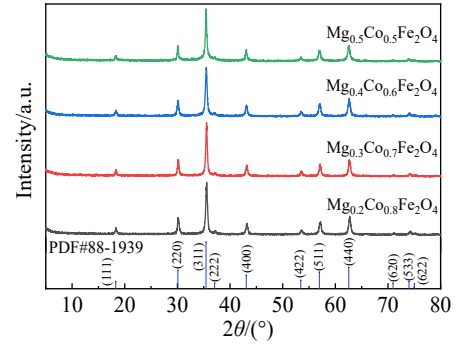


图 1 不同 Mg、Co 离子比例 Mg $_x$ Co $_{1-x}$ Fe $_2$ O $_4$ 的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of Mg $_x$ Co $_{1-x}$ Fe $_2$ O $_4$ with different proportions of Mg and Co ions

$$a=d\sqrt{h^2+k^2+l^2} \quad (2)$$

其中, d 表示晶体平面间距; h 、 k 、 l 表示密勒指数。计算的结构参数列于表 1。表 1 表明, 最强衍射峰(311)晶面的峰位从 35.537°减小到 35.414°, 说明样品的衍射峰位均向小角度方向偏移。

由表 1 的分析结果可以看出, 不同比例的镁钴铁氧体(311)晶面衍射峰的晶格常数 a 和晶面间距 d 均随衍射角 2θ 的减小而逐渐增大。晶格常数随着 Mg $^{2+}$ 比例的增加并未呈现明显的变化, 这是因为 Mg $^{2+}$ (0.072 nm) 与 Co $^{2+}$ (0.0745 nm) 的离子半径较为相似。

2.2 微观形貌

图 2 是纳米镁钴铁氧体的 TEM 照片。从图中可以看出, 不同 Mg、Co 离子比例的镁钴铁氧体形貌均为不规则四边形, 粒度均为纳米级, 平均晶粒尺寸在 20~30 nm, 晶粒尺寸与 XRD 分析结果相同。随着 Mg $^{2+}$ 比例的增加, 根据金属离子占位趋势倾向性, 其占据 B 位(八面体)趋势更强, 将会把原本占据 B 位的部分 Fe $^{3+}$ 赶到 A 位(四面体), 导致其 B 位间隙变大, 使得晶格发生畸变, 尖晶石结构被破坏, 形貌变得不规则。同时还可以看出样品晶粒越小时, 排列越紧密, 分散性越差, 团聚现象愈加明显。这是因为受表面效应的影

表 1 Mg $_x$ Co $_{1-x}$ Fe $_2$ O $_4$ 结构参数

Table 1 Structural parameters of Mg $_x$ Co $_{1-x}$ Fe $_2$ O $_4$

Constitution	2 θ (°)	a /nm	Diffraction peak of (311) crystal plane		
			D /nm	FWHM(°)	d /nm
Mg $_{0.2}$ Co $_{0.8}$ Fe $_2$ O $_4$	35.537	0.83715	20.6	0.0070	0.25241
Mg $_{0.3}$ Co $_{0.7}$ Fe $_2$ O $_4$	35.508	0.83781	24.4	0.0059	0.25261
Mg $_{0.4}$ Co $_{0.6}$ Fe $_2$ O $_4$	35.465	0.83877	22.1	0.0065	0.25290
Mg $_{0.5}$ Co $_{0.5}$ Fe $_2$ O $_4$	35.414	0.83994	28.2	0.0051	0.25325

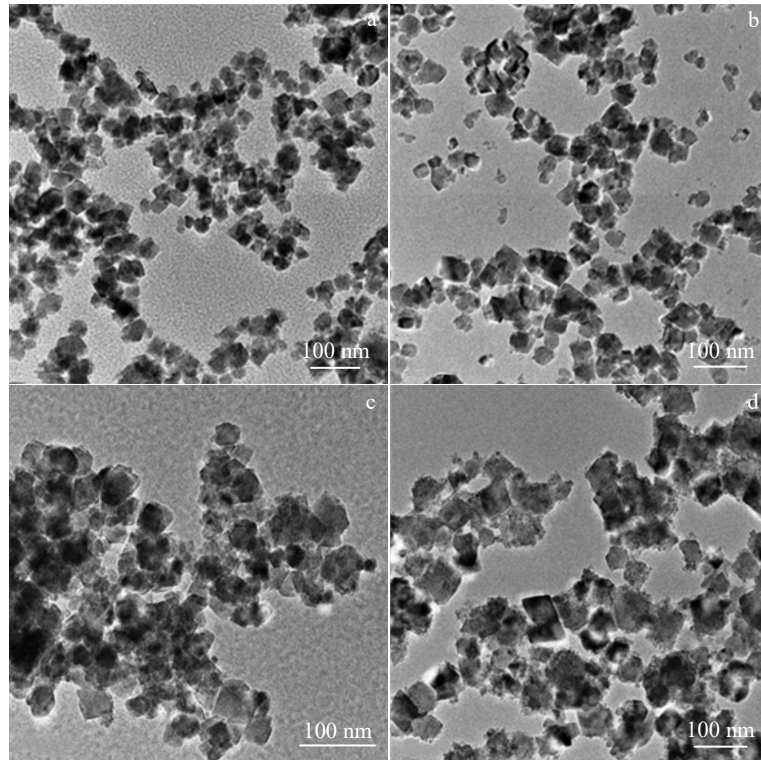


图 2 Mg_{0.2}Co_{0.8}Fe₂O₄、Mg_{0.3}Co_{0.7}Fe₂O₄、Mg_{0.4}Co_{0.6}Fe₂O₄、Mg_{0.5}Co_{0.5}Fe₂O₄ 的 TEM 照片

Fig.2 TEM images of Mg_{0.2}Co_{0.8}Fe₂O₄ (a), Mg_{0.3}Co_{0.7}Fe₂O₄ (b), Mg_{0.4}Co_{0.6}Fe₂O₄ (c), and Mg_{0.5}Co_{0.5}Fe₂O₄ (d)

响，磁性材料离子之间会相互吸引，颗粒越细，表面能也就越大。

2.3 电磁参数

图 3 为不同离子比例的镁钴铁氧体的电磁参数随频率变化曲线。电磁参数可分为复介电常数 ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$) 和复磁导率 ($\mu_r = \mu' - j\mu''$)，其中复介电常数和复磁导率实部 (ϵ' 、 μ') 代表电能和磁能的储存能力，相应的虚部 (ϵ'' 、 μ'') 代表电能和磁能的损耗能力^[17]。

如图 3a 所示，不同离子比例下的镁钴铁氧体的复介电常数实部随频率变化的趋势基本一致，均有频散效应发生，并在整个频段内呈现多重共振状态，4 个样品的复介电常数均随频率的增加而降低，分别从 3.89、4.26、4.31、4.67 降至 3.85、4.06、4.06、4.41；从图 3b 中可以看出，4 种不同比例下的镁钴铁氧体的复介电常数虚部变化范围分别为 0.03~0.27、0.01~0.19、0.02~0.35、0.07~0.41，并且存在 2 个明显的共振峰。离子比例为 5:5 时存在最大值，说明此时镁钴铁氧体的界面极化效果最佳，介电损耗最多。

图 3c 和 3d 分别为不同离子比例的镁钴铁氧体的复磁导率实部 (μ') 和虚部 (μ'') 随频率变化曲线。4 种不同比例的 μ' 值变化范围为 0.89~1.16、0.92~1.19、0.86~1.25、0.74~1.38，离子比例为 5:5 时， μ' 值在 C 和

X 波段变化较大，其余 3 种比例整体变化范围相差较小，变化趋势较为相似。从图 3d 中可以看出，4 个样品均有 1 个明显的共振峰出现，离子例子比例为 5:5 时共振峰出现在 C 和 X 波段，另外 3 种比例的共振峰均出现在 Ku 波段，表明 4 种不同比例均在对应波段磁化作用最强，磁损耗最多。

铁氧体吸波材料的电磁损耗能力可以用介电损耗正切值 ($\tan\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$) 和磁损耗正切值 ($\tan\delta_\mu = \mu''/\mu'$) 来进行评估，介电损耗正切值越大，表示介电损耗能力越强；磁损耗正切值越大，表示磁损耗能力越强^[18]。图 3e 和 3f 分别为不同离子比例的镁钴铁氧体的介电损耗正切值和磁损耗正切值随频率变化曲线。从图中可以发现，介电损耗正切值曲线变化趋势与复介电常数虚部曲线变化趋势基本一致；磁损耗正切值曲线变化趋势与复磁导率虚部曲线变化趋势基本一致。离子比例为 5:5 时，存在最大的介电损耗正切值 0.09 以及最大的磁损耗正切值 0.7，在整个频段内，磁损耗正切值均大于介电损耗正切值，说明镁钴铁氧体主要是以磁损耗的形式衰减电磁波。

铁氧体类磁性材料的磁损耗主要来源于磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗 3 种类型^[19-20]，而在 GHz 频段，主要以自然共振、交换共振和涡流损耗形式耗散电磁波，其

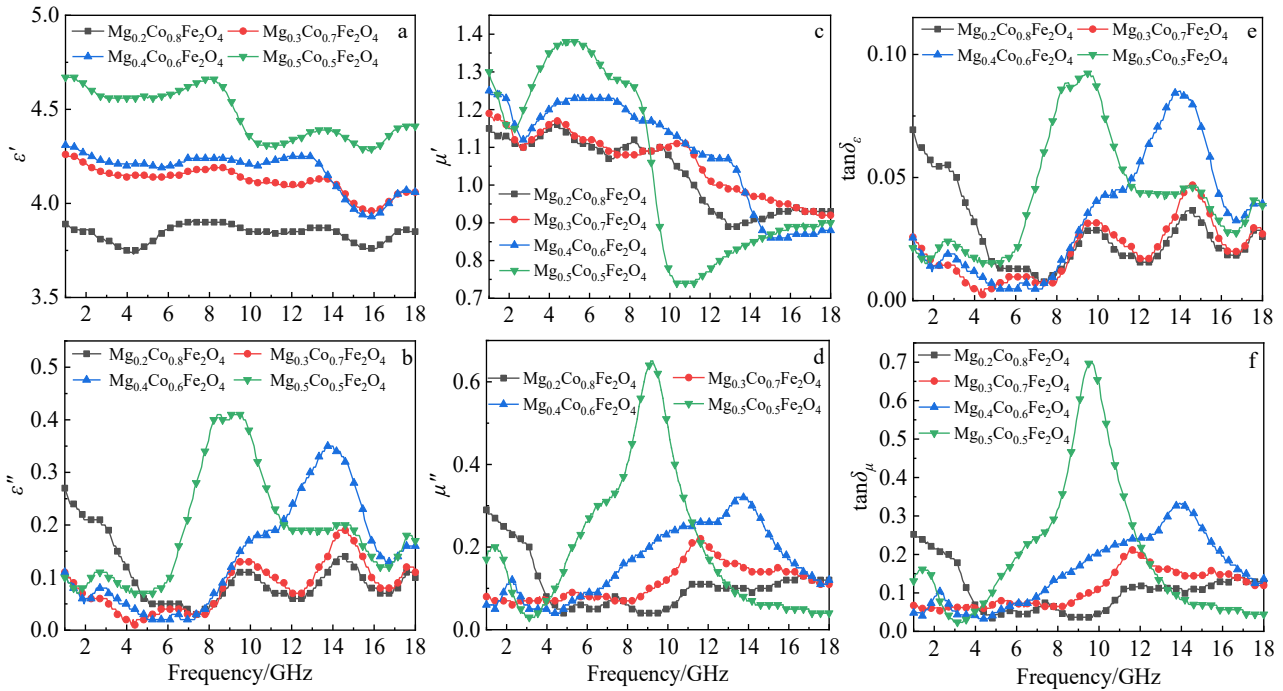


图 3 不同 Mg、Co 离子比例 $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ 的复介电常数实部、虚部; 复磁导率实部、虚部; 介电损耗正切值磁损耗正切值

Fig.3 Real part (a) and imaginary part (b) of the complex permittivity, real part (c) and imaginary part (d) of the complex permeability, dielectric loss tangent (e) and magnetic loss tangent (f) of $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ with different ratios of Mg and Co ions

中自然共振和交换共振通常分别发生在低频 (2~10 GHz) 和 高频 (10~18 GHz) 范围内^[21]。通过计算 C_0 值来进一步探究磁损耗形式, 公式为^[22]:

$$C_0 = \frac{\mu'''}{(\mu')^2 f} \quad (3)$$

式中, f 为电磁波频率。

如果 C_0 值在测试频段范围内是一个常数, 则表明该材料的磁损耗形式主要以涡流损耗为主^[23]。如图 4 所示, 4 种不同比例的镁钴铁氧体的 C_0 值在 1~4 GHz 频率范围内变化较大, 这表明在该频率范围内磁损耗的主要机制为自然共振, 在 4~18 GHz 频率范围内, 离子比例

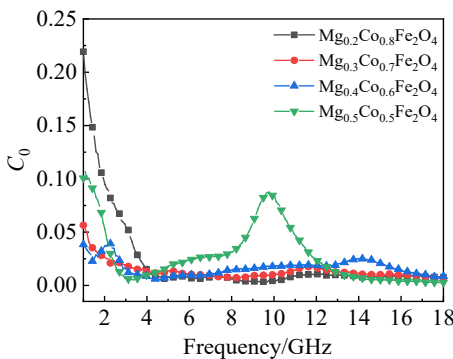


图 4 不同 Mg、Co 离子比例 $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ 的 C_0 值

Fig.4 C_0 values of $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ with different Mg and Co ion ratios

为 2:8、3:7、4:6 的 C_0 值曲线较为平缓, 这表明在该频率范围内磁损耗机制主要以涡流损耗为主, 但也存在交换共振; 离子比例为 5:5 的 C_0 值在 12~18 GHz 曲线平缓, 说明存在涡流损耗, 但在 4~12 GHz 频率范围内存在 1 个明显的共振峰, 这是由自然共振和交换共振共同作用的结果。

2.4 吸波性能

根据电磁波传输线理论^[24-26], 计算铁氧体吸波材料的反射损耗 (RL):

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (4)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (5)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh \left[j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right]} \quad (6)$$

其中, Z_0 为自由空间阻抗, Z_{in} 为吸波材料输入阻抗, f 为电磁波频率, d 为吸波材料的厚度, c 为电磁波在自由空间的传播速度, μ_0 、 ϵ_0 为真空磁导率和介电常数, μ_r 、 ϵ_r 为吸波材料的复磁导率和复介电常数, j 为复磁导率和复介电常数的虚部单位。

图 5 为 4 种离子比例的镁钴铁氧体在 1~18 GHz 频段内不同厚度下的反射损耗曲线图。当反射损耗值小于 -10 dB 时, 表示 90% 的电磁波被吸收, 对应的频率范围

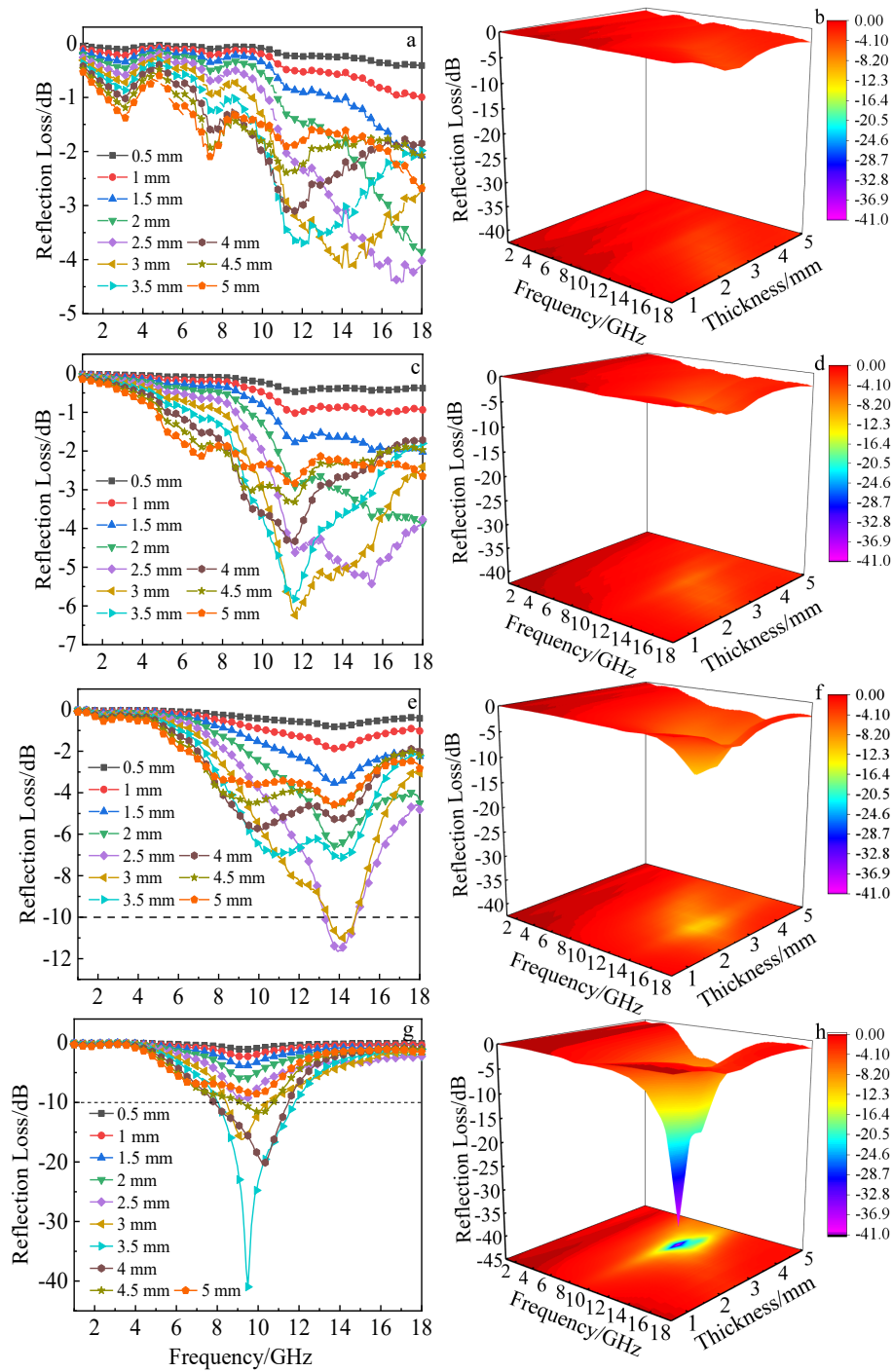


图 5 $Mg_{0.2}Co_{0.8}Fe_2O_4$ 、 $Mg_{0.3}Co_{0.7}Fe_2O_4$ 、 $Mg_{0.4}Co_{0.6}Fe_2O_4$ 、 $Mg_{0.5}Co_{0.5}Fe_2O_4$ 的反射损耗二维图和三维图

Fig.5 Reflection loss of $Mg_{0.2}Co_{0.8}Fe_2O_4$ (a-b), $Mg_{0.3}Co_{0.7}Fe_2O_4$ (c-d), $Mg_{0.4}Co_{0.6}Fe_2O_4$ (e-f), and $Mg_{0.5}Co_{0.5}Fe_2O_4$ (g-h) in two dimensions (a, c, e, g) and three dimensions (b, d, f, h)

被定义为有效吸收带宽 (EAB) [27]。离子比例为 2:8 的镁钴铁氧体在吸波层厚度为 2.5 mm、频率为 16.98 GHz 时, 反射损耗最小值为 -4.42 dB, 如图 5a 和 5b 所示; 离子比例为 3:7 的镁钴铁氧体在吸波层厚度为 3 mm、频率为 11.63 GHz 时, 反射损耗最小值为 -6.24 dB, 如图 5c 和 5d 所示; 离子比例为 4:6 的镁钴铁氧体在吸波层厚度

为 2.5 mm、频率为 13.92 GHz 时, 反射损耗最小值为 -11.70 dB, 有效吸收带宽为 1.44 GHz (13.33~14.77 GHz), 如图 5e 和 5f 所示; 离子比例为 5:5 的镁钴铁氧体表现出优异的电磁波吸收性能, 其在吸波层厚度为 3.5 mm、频率为 9.50 GHz 时, 反射损耗最小值为 -40.78 dB, 有效吸收带宽为 3.65 GHz (8.06~11.71 GHz), 几乎覆盖整

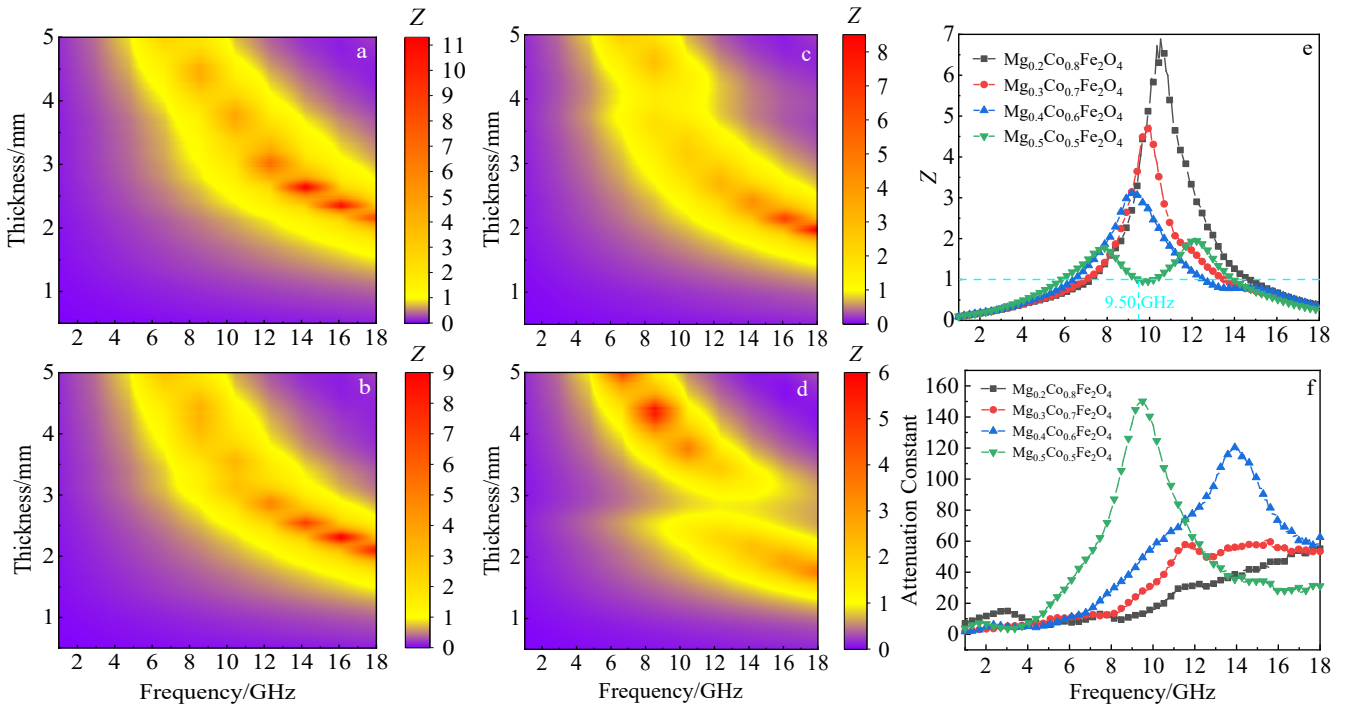


图 6 $Mg_{0.2}Co_{0.8}Fe_2O_4$ 、 $Mg_{0.3}Co_{0.7}Fe_2O_4$ 、 $Mg_{0.4}Co_{0.6}Fe_2O_4$ 、 $Mg_{0.5}Co_{0.5}Fe_2O_4$ 的阻抗匹配二维等高线图；厚度为 3.5 mm 时的阻抗匹配图和不同 Mg、Co 离子比例 $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ 的衰减常数

Fig.6 Two-dimensional impedance matching contour map of $Mg_{0.2}Co_{0.8}Fe_2O_4$ (a), $Mg_{0.3}Co_{0.7}Fe_2O_4$ (b), $Mg_{0.4}Co_{0.6}Fe_2O_4$ (c) and $Mg_{0.5}Co_{0.5}Fe_2O_4$ (d); impedance matching diagram at a thickness of 3.5 mm (e); attenuation constants of $Mg_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ with different Mg and Co ion ratios (f)

个 X 波段，如图 5g 和 5h 所示。结合 C_0 值分析可知，其原因是，离子比例为 5:5 的镁钴铁氧体由自然共振、交换共振和涡流损耗共同损耗电磁波。

阻抗匹配和衰减常数是影响吸波性能的 2 个决定性因素。当阻抗匹配 Z 值越接近 1 时，表明电磁波能够最大程度地进入材料内部而不被反射；衰减常数越大，表明对进入材料内部的电磁波损耗能力越强^[28]。通过以下公式计算不同离子配比制备的镁钴铁氧体的阻抗匹配 (Z) 和衰减常数 (α)^[29-30]：

$$Z = \frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh \left[j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right]} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2\pi f}}{c} \sqrt{\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon' + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\mu'\epsilon' + \mu''\epsilon'')^2}} \quad (8)$$

如图 6a~6d 所示，随着 Mg^{2+} 配比的增加，镁钴铁氧体的阻抗匹配特性越来越好，Mg、Co 离子比例为 2:8、3:7 时，阻抗匹配度相对较差，其原因是复介电常数较低，导致阻抗不匹配；相比之下，离子比例为 4:6、5:5 时，阻抗匹配有所改善。当吸波层厚度为 3.5 mm 时，在最佳反射损耗频率下，离子比例为 5:5 的镁钴铁氧体阻抗匹配 Z 值接近于 1，同时衰减常数存在峰值，表明此比例的吸波性能最佳，这与反射损耗的分析结果一致。

3 结 论

1) 采用水热法制备出的不同离子比例的镁钴铁氧体结晶度良好，且均为纯相立方尖晶石结构；晶粒以不规则四边形为主，平均晶粒尺寸在 20~30 nm，分散性较差。

2) $Mg^{2+}:Co^{2+}=5:5$ 的镁钴铁氧体存在最大的介电损耗以及磁损耗，但在整个频段段内以磁损耗为主，其磁损耗机制主要由自然共振、交换共振和涡流损耗共同作用。

3) $Mg^{2+}:Co^{2+}=5:5$ 的镁钴铁氧体表现出优异的吸波性能，在频率为 9.50 GHz 时，吸波层厚度为 3.5 mm，反射损耗最小值达到 -40.78 dB，有效吸收带宽为 3.65 GHz (8.06~11.71 GHz)，几乎覆盖整个 X 波段。

参考文献 References

[1] Fang J Y, Li P, Liu Y D *et al. Journal of Materials Chemistry C*[J], 2021, 9(7): 2474
 [2] Li S S, Tang X W, Zhang Y W *et al. ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2022, 14: 8297
 [3] Li Z J, Lin H, Ding S Q *et al. Carbon*[J], 2020, 167: 148
 [4] Hang L N, Chen C G, Li Z J *et al. Nanotechnology*[J], 2020,

- 31(16): 162001
- [5] Liu J L, Zhang L M, Wu H J. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2021, 54(20): 203001
- [6] Gao S, Yang S H, Wang H Y *et al.* *Carbon*[J], 2020, 162: 438
- [7] Di X C, Wang Y, Lu Z *et al.* *Carbon*[J], 2021, 179: 566
- [8] Bandaru S, Murthy N, Kulkarni R *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 86: 127
- [9] Mahdikhah V, Ataie A, Babaei A *et al.* *Ceramics International*[J], 2020, 46(11): 17903
- [10] Liu P B, Gao S, Zhang G Z *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2021, 31(27): 2102812
- [11] Sodaee T, Ghasemi A, Razavi R S. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 706: 133
- [12] Bayoumi W. *Journal of Materials Science*[J], 2007, 42(19): 8254
- [13] Chaudhari M V, Shirsath S E, Kadam A B *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 552: 443
- [14] Goud S, Venkatesh N, Kumar D R *et al.* *Inorganic Chemistry Communications*[J], 2022, 145: 109969
- [15] Kaur M, Kaur P, Bahel S. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2022, 33: 12182
- [16] Xia T R, Cheng L C, Yu J J *et al.* *Journal of Electronic Materials*[J], 2021, 50: 1996
- [17] Zhou X F, Jia Z R, Zhang X X *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 87: 120
- [18] Jin L Q, Yi P S, Wan L *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2022, 427: 130940
- [19] Cao M S, Cai Y Z, He P *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2019, 359: 1265
- [20] Zhang H X, Shi C, Jia Z R *et al.* *Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2021, 584: 382
- [21] Zhou C L, Wang X X, Luo H *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2020, 383: 123095
- [22] Huang M Q, Wang L, Pei K *et al.* *Small*[J], 2020, 16(14): 2000158
- [23] Ouyang J, He Z L, Zhang Y *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2019, 11(42): 39304
- [24] Shu R W, Zhang G Y, Wang X *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2018, 337: 242
- [25] Ma J X, Li W H, Fan Y C *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2019, 11(49): 46386
- [26] Ma J X, Fan S J, Wang J C *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2022, 442: 136394
- [27] Li Z X, Li X H, Zong Y *et al.* *Carbon*[J], 2017, 115: 493
- [28] Guan X M, Yang Z H, Zhou M *et al.* *Small Structures*[J], 2022, 3(10): 2200102
- [29] Yuan Y, Wei S C, Liang Y *et al.* *Materials*[J], 2020, 13(23): 5331
- [30] Zhou P P, Wang X K, Song Z *et al.* *Carbon*[J], 2021, 176: 209

Effect of Ion Ratio on Wave Absorption Properties of Magnesia-Cobalt Ferrite

Ma Zhijun, Hang Wenwu, Weng Xingyuan, Gao Jing, Zheng Yunsheng, Tao Honglin
(Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Spinel $\text{Mg}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ was prepared by hydrothermal method. The effects of the proportion of Mg and Co doping on the crystal structure, microstructure and wave absorption properties of magnesia-cobalt ferrite were studied by X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM) and vector network analyzer (VNA). The electromagnetic wave absorption mechanism of magnesia-cobalt ferrite was summarized. The results show that when $\text{pH}=10$, crystallization temperature is $180\text{ }^\circ\text{C}$ and crystallization time is 8 h, magnesia-cobalt ferrite with irregular quadrilateral morphology is prepared. When the ratio of Mg^{2+} and Co^{2+} is 5:5 and the thickness of the absorbing layer is 3.5 mm, the reflection loss value at the frequency of 9.50 GHz reaches -40.78 dB , and the effective absorption frequency bandwidth is 3.65 GHz (8.06 - 11.71 GHz), covering the X-band. The excellent absorbing properties are attributed to the combined action of natural resonance, exchange resonance and eddy current loss.

Key words: hydrothermal method; magnesia-cobalt ferrite; spinel type; X-band; wave absorption property

Corresponding author: Ma Zhijun, Ph. D., Professor, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, P. R. China, E-mail: mazhijun@lntu.edu.cn