

基于超材料设计的钡铁氧体吸波涂层研究

Barium ferrite microwave absorbing coating based on metamaterial design

高海涛, 王建江, 李 泽

(陆军工程大学 先进材料研究所, 石家庄 050003)

GAO Hai-tao, WANG Jian-jiang, LI Ze

(Advanced Material Institute, Army Engineering University,
Shijiazhuang 050003, China)

摘要: 本工作设计了一种基于超材料结构的钡铁氧体吸波涂层, 分析了超材料的结构设计对钡铁氧体涂层吸波性能的影响, 并对涂层的吸波机理进行了研究和讨论。通过仿真发现, 钡铁氧体涂层经超材料设计改进后, 吸波性能得到大幅增强, 改进后的钡铁氧体涂层存在最佳的匹配厚度 2.5mm 和电阻膜方块电阻值 $70\Omega/\square$, 此时涂层的吸收带宽最大, 并存在两个吸收峰, 在 8~18GHz 频段内反射损耗都小于 -10dB。钡铁氧体通过超材料设计改进后, 吸波性能得到极大改善。

关键词: 钡铁氧体; 超材料; 吸波涂层; 吸波机理

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000447

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2019)01-0070-07

Abstract: A barium ferrite microwave absorbing coating based on metamaterial structure was designed. The influence of metamaterial structure on the absorbing properties of this coating was analyzed, and the absorbing mechanism of coating was studied and discussed. Through simulation, it is found that the absorbing properties of barium ferrite have been greatly enhanced with metamaterial structure. The optimum value of the coating thickness (2.5mm) and sheet resistance ($70\Omega/\square$) are unique, meanwhile, the widest absorbing bandwidth of the coating is achieved. There exist two absorption peaks and the reflection loss can reach -10dB within the frequency range of 8-18GHz. The results show that the absorbing properties of barium ferrite are improved immensely with metamaterial structure design.

Key words: barium ferrite; metamaterial; absorbing coating; absorbing mechanism

钡铁氧体材料具有较大的矫顽力和单轴磁晶各向异性等优点, 同时还拥有高电阻率、良好的化学稳定性和低成本等优点, 被广泛应用于微波吸收领域, 能够成为一种良好的吸波材料^[1]。虽然钡铁氧体吸波材料的磁吸收特性比较强, 但是其较高的密度、低介质损耗以及较大的吸波厚度等缺点严重限制了钡铁氧体的应用^[2]。为了使钡铁氧体吸波材料能够更好地克服这些缺点, 并满足吸波材料‘薄、宽、轻、强’的要求, 人们对钡铁氧体吸波材料进行了大量的改进研究。目前, 提高钡铁氧体吸波性能的手段主要有掺杂、取代、包覆、复合等^[3]。

离子掺杂与取代是比较常用的手段, 通过离子掺杂与取代, 可以对钡铁氧体的电磁参数进行微调, 使其吸波性能优化。Shen 等^[4]合成了 La-Ni 取代的钡铁

氧体, 在 1.5mm 的厚度下小于 -10dB 的带宽有 2.15GHz; Shayan 等^[5]利用 Al^{3+} 对钡铁氧体进行掺杂改性, 发现掺入 Al^{3+} 后, 吸收强度和吸收带宽都显著增加; Qiu 等^[6]研究了 Co/Zr 掺杂的钡铁氧体, 发现掺入 Co^{2+} 和 Zr^{4+} 后, 钡铁氧体的磁损耗得到了增强。相比掺杂, 包覆与复合是更为简单和直接的手段, 一般是通过将介电损耗较强的材料与钡铁氧体进行复合, 优化阻抗匹配, 来提高吸波性能。Zhang 等^[7]制备了纳米银包覆的钡铁氧体吸波材料, 在包覆了一定量的纳米银颗粒后, 钡铁氧体的匹配厚度大幅降低; Li 等^[8]制备了包覆钡铁氧体的空心微球, 在 3mm 的厚度能达到 -15.4dB 的反射损耗; Wang 等^[9]将石墨粉末与纯钡铁氧体进行复合, 提高了材料整体的介电性能, 在较小的吸波体厚度实现了高反射损耗; Zhao

等^[10]合成了一种由碳纳米管/膨胀石墨/钡铁氧体构成的三明治型复合材料,在 1mm 的厚度小于-10dB 的带宽达到 4.2GHz。

上述改进手段在一定程度上调整了钡铁氧体的电磁参数,改善和优化了吸收性能,但是难以进一步提升钡铁氧体吸收极限。超材料^[11]是一种人工设计的周期阵列结构复合材料,通过对超材料的有序结构进行设计可以突破某些自然规律的限制,获得超出自然界固有性质的物理特性,将超材料的特性应用到吸波领域为人们改善装备隐身性能提供了新思路。钡铁氧体吸波材料的应用一般是作为涂层涂覆在金属表面,本工作将钡铁氧体涂层与超材料的结构设计相结合,设计了一种基于超材料的钡铁氧体吸波涂层,分析了超材料的结构设计对涂层吸波性能的影响,并对吸波机理进行了研究和讨论。结果表明,钡铁氧体涂层经过超材料设计改进后,进一步拓展了吸波性能。

1 实验材料与方法

1.1 钡铁氧体的制备

原料及药品:Ba(NO₃)₂,Fe(NO₃)₃·9H₂O,柠檬酸,去离子水和氨水,均为分析纯。

制备工艺流程:采用溶胶凝胶法制备 M 型钡铁氧体 BaFe₁₂O₁₉,按离子比例($n(\text{Ba}):n(\text{Fe}):n(\text{柠檬酸})=1:12:15.6$)称取一定量的 Ba(NO₃)₂,Fe(NO₃)₃·9H₂O 和柠檬酸,加入适量去离子水,搅拌 30min 使其溶解,使用氨水调节 pH 值为 7,将溶液 80℃ 恒温加热并不断搅拌至形成稳定的溶胶,将溶胶放入干燥箱中 120℃ 烘干处理 3h,得到蓬松的干凝胶,将干凝胶研磨成粉

末,在马弗炉中 450℃ 预烧 2h,再在 1000℃ 下煅烧 4h,随炉自然冷却后取出,将样品研磨成细粉,经 300 目筛过筛后获得颗粒均匀的钡铁氧体粉末。

1.2 分析测试方法

采用 XD-6 型 X 射线衍射仪对制备的钡铁氧体进行物相分析,Cu 靶 K_{α1} 射线波长 $\lambda=0.154056\text{nm}$,扫描速率为 8(°)/min,扫描角度为 10°~90°。采用 Agilent-8721ET 型矢量网络分析仪搭建的电磁参数扫频测量系统,测试钡铁氧体在 0.5~18GHz 频率范围内的电磁参数,测试过程如下:将钡铁氧体粉体与石蜡混合均匀,放入特定模具中压制成圆环,圆环尺寸为厚度 3mm,内径 3.04mm,外径 7mm,测试样品中钡铁氧体的体积分数为 30%,将样品放入连接矢量网络分析仪的同轴线中进行测量。

1.3 钡铁氧体涂层的超材料设计

钡铁氧体涂层的超材料设计,主要是将钡铁氧体涂层与超材料的结构设计结合起来。超材料一般由三层结构组成,即表层图案层、中间介质层以及金属背板。钡铁氧体吸波材料的应用一般是作为涂层涂覆在金属表面,为此,将钡铁氧体涂层作为超材料结构的中间介质层,涂覆金属作为背板,然后,在钡铁氧体涂层之上印刷一层电阻膜图案,便构成了基于超材料结构的钡铁氧体吸波涂层。基于超材料设计的钡铁氧体吸波涂层结构如图 1 所示,自上而下依次是方块图案电阻膜、钡铁氧体涂层和金属背板。本工作使用 CST Microwave Studio 电磁仿真软件中的频域求解器对吸波涂层进行数值仿真分析,设定 x 和 y 方向为超材料结构单元的周期边界,电场沿 y 轴方向,磁场沿 x 轴方向,电磁波沿 z 轴方向垂直入射。

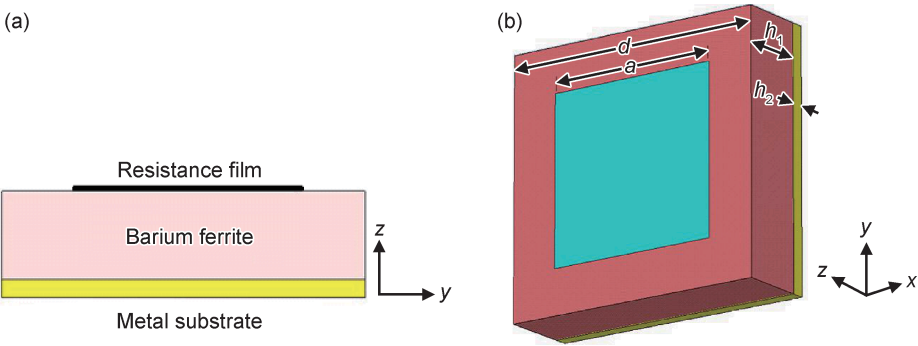


图 1 基于超材料设计的钡铁氧体吸波涂层结构图

Fig. 1 Structure chart of the barium ferrite absorbing coating based on metamaterial design

基于超材料设计的吸波涂层结构参数在图中标出,其中,超材料结构单元周期长度 $d=5\text{mm}$,方块图案电阻膜的边长 $a=3.25\text{mm}$,钡铁氧体涂层的厚度 h_1 和电阻膜图案的方块电阻值 R_s 作为变量进行讨论。

为了使仿真结果贴近于实际,一般把电阻膜厚度设为 0mm,另外由于 GHz 频段电磁波的趋肤深度极小,金属背板厚度 h_2 对涂层吸波性能的影响可以忽略。根据等效媒质理论^[12]可知,吸波材料的吸收率 A 可以表

示为: $A = 1 - T - R$, 其中 $R = |S_{11}|^2$ 为反射率, $T = |S_{21}|^2$ 为透射率。由于金属背板的存在, 其透射率 $T = 0$, 因此吸收率 A 可简化为: $A = 1 - R = 1 - |S_{11}|^2$, 故可用散射参数 S_{11} 来表征吸波涂层对电磁波的吸收, 进而分析其吸波性能。

2 结果与分析

2.1 钡铁氧体的电磁性能及吸波特性

图2为M型钡铁氧体粉末的XRD谱图。从图中可以看出, 所得钡铁氧体样品的衍射峰均可与PDF卡片12-1029的特征峰一一对应, 说明制备的钡铁氧体为纯相M型 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, 并且未发现其他物相衍射杂峰, 衍射峰的强度较高, 表明制备的钡铁氧体粉末纯度高, 结晶度好。

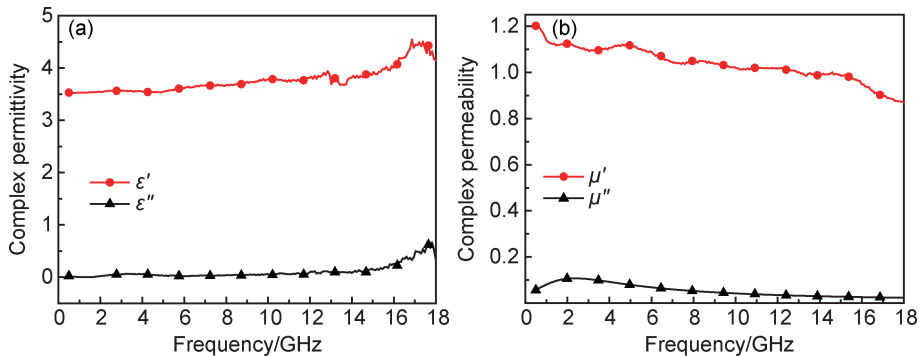


图3 钡铁氧体粉末的复介电常数(a)和复磁导率(b)

Fig. 3 Complex permittivity and complex permeability of the barium ferrite

随频率升高而增大, 实部 ϵ' 由 3.5 增大到 4.4, 虚部 ϵ'' 由 0.1 增大到 0.5; 复磁导率的实部在整个频段内缓慢下降, μ' 由 1.2 下降到 0.9, 虚部 μ'' 则先增大后减小, 最后下降到 0。

根据传输线理论, 钡铁氧体涂层等效输入阻抗 Z_d 可以表示为^[12]:

$$Z_d = j \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan\left(\frac{2\pi f h_1}{c} \cdot \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right) \quad (1)$$

式中: ϵ_r, μ_r 为钡铁氧体的相对介电常数和相对磁导率; h_1 为钡铁氧体涂层厚度; j 为虚数单位。当电磁波垂直入射到吸波材料表面时, 其反射功率损耗 R 可根据下式计算:

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_d - Z_0}{Z_d + Z_0} \right| \quad (2)$$

其中, Z_0 为自由空间阻抗, 约为 377Ω 。根据测得钡铁氧体的电磁参数, 通过计算得到了涂层厚度为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0mm 时的反射损耗曲线, 如图4所示。从

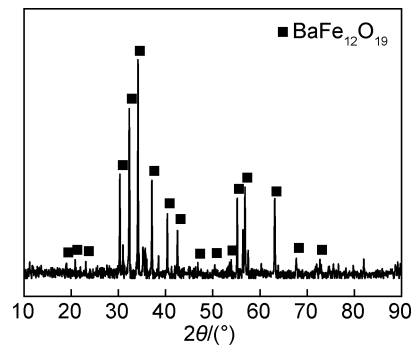


图2 M型钡铁氧体的XRD谱图

Fig. 2 XRD pattern of the M type barium ferrite

图3为钡铁氧体粉末在0.5~18GHz频率范围内电磁参数随频率变化的关系曲线。从图中可以看出, 钡铁氧体粉末的复介电常数的实部和虚部在0.5~14GHz频段内基本保持不变, 在14~18GHz频段内

图中可以看出, 单一的钡铁氧体涂层在低频段对电磁波的吸收很小, 吸收峰出现在高频位置; 当厚度较小时, 反射损耗不明显, 随着钡铁氧体涂层厚度增加, 反射损耗逐渐增加, 在2.5mm时达到最强, 最大反射损耗达到-8.6dB, 当厚度继续增加时, 反射损耗减小, 说明钡铁氧体涂层的最佳匹配厚度为2.5mm。上述结果表明, 制备的钡铁氧体粉体具备一定的吸收性能, 其涂层最佳匹配厚度为2.5mm。

2.2 基于超材料设计的钡铁氧体涂层吸波性能

根据图4可知, 钡铁氧体涂层的最佳匹配厚度为2.5mm, 为了方便设计, 设定基于超材料改进的钡铁氧体涂层厚度 $h_1 = 2.5\text{mm}$, 研究表面电阻膜方阻 R_s 对吸波性能的影响。通过仿真计算得到了电阻膜方阻 R_s 为 40, 70, 100, 130 Ω/\square 时涂层的反射损耗曲线, 如图5所示。从图中可以看出, 经过超材料设计改进后的钡铁氧体涂层吸波性能得到了大幅提升。在电阻膜方块电阻值较小时, 吸波涂层存在两个吸收峰, 分别位

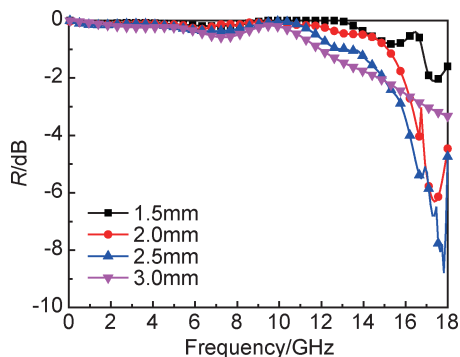


图 4 不同厚度下钡铁氧体涂层的反射损耗曲线

Fig. 4 Reflection loss of the barium ferrite coatings with different thicknesses

于 8~10GHz 和 16~18GHz 频段内,在两个吸收峰位置性能最佳,其他频段性能较差;随着方块电阻值的增加,当方块电阻值大于 $100\Omega/\square$ 时,位于低频位置的吸收峰消失,整个频段内最终只存在一个吸收峰,并且随着电阻膜方块电阻值的增加,吸收峰强度增大,但吸收频带变窄。在方块电阻值为 $70\Omega/\square$ 时,改进后的吸波涂层能够充分利用两个吸收峰带来的吸收效果,在 8~18GHz 频段内反射率都能达到 -10dB 以下。可以看出,相比较单一的钡铁氧体涂层,基于超材料设计改进后的涂层的吸收带宽和吸收率大幅增加,说明通过超材料的设计改进可以有效地拓展传统材料的吸波性能。另外,从图 5 中可以看出电阻膜图案对应着一个最佳的方块电阻值,此时的吸波带宽达到最大。

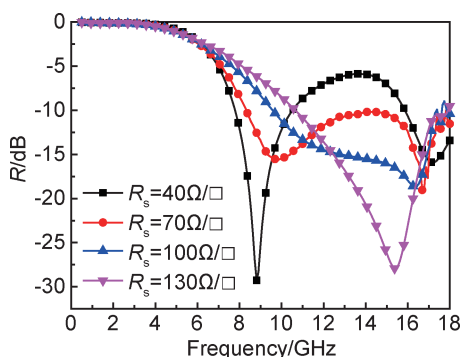


图 5 吸波涂层在不同电阻膜方块电阻值时的反射损耗曲线

Fig. 5 Reflection loss of the absorbing coatings with different sheet resistance

由图 5 可知,电阻膜方块电阻值为 $70\Omega/\square$ 时,涂层具有最宽的吸收带宽,为了研究钡铁氧体厚度对吸波涂层性能的影响,固定方块电阻值 $R_s = 70\Omega/\square$,计算不同厚度 h_1 值时涂层的反射损耗,如图 6 所示。从图中可以看出,随着钡铁氧体厚度的增加,改进后的吸波涂层的吸收性能逐渐增强,并开始出现两个吸收峰;

随着厚度继续增加,高频段的吸收峰逐渐消失,低频段的吸收峰强度增大,但整体的吸收带宽开始减小;在钡铁氧体厚度为 2.5mm 时,改进后的吸波涂层吸收带宽达到最大,这说明基于超材料设计改进后的吸波涂层也存在一个匹配厚度,此时的吸收性能最好,而且匹配厚度与单一钡铁氧体涂层的匹配厚度一致。

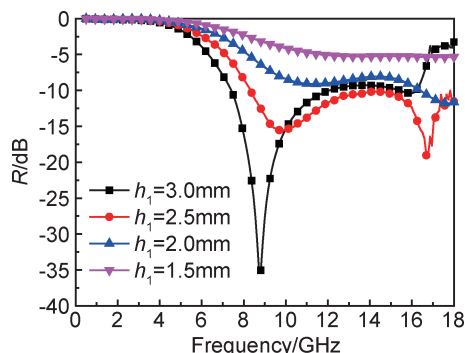


图 6 吸波涂层在不同钡铁氧体厚度时的反射损耗曲线

Fig. 6 Reflection loss of the absorbing coatings with different thicknesses

2.3 基于超材料设计的吸波机理分析

为了更好地分析和研究超材料设计改进后钡铁氧体涂层的吸收规律,通过等效电路模型来分析涂层对电磁波的传输特性。根据传输线理论,改进后的涂层输入阻抗 Z_{in} 可以等效为钡铁氧体涂层阻抗 Z_d 与电阻膜表面阻抗 Z_p 的并联。因此,改进后涂层可以等效为 RLC 串联电路,等效电路模型如图 7 所示。

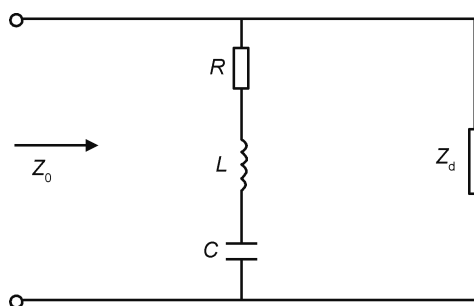


图 7 经超材料设计后的吸波涂层的等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit diagram of the absorbing coatings with metamaterial design

涂层的输入阻抗 Z_{in} 可以表示为:

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_d}} = \frac{Z_p \times Z_d}{Z_p + Z_d} \quad (3)$$

电阻膜表面阻抗 Z_p 可以近似用下式计算^[13]:

$$Z_p = R + j\omega L - 1/j\omega C \quad (4)$$

式中: R 为电阻膜等效电阻; L 为等效电感; C 为等效电容。RLC 等效电路参数,可根据电阻膜的图案结

构,通过仿真计算得到^[14]。根据公式(1)和(4)进行仿真计算,分别得到了电阻膜的表面阻抗和钡铁氧体涂层的等效阻抗,其阻抗虚部特性曲线如图 8 所示。从图中可以看出,钡铁氧体涂层的阻抗虚部,在 15.42GHz 频点处出现跳动,由正值变为负值,在各自区间频段内阻抗虚部单调上升。而电阻膜的表面阻抗恰好相反,在整个频段内单调上升,在 14.41GHz 处由负值变为正值。根据阻抗匹配的规律可知,电阻膜的表面阻抗虚部和钡铁氧体涂层阻抗虚部相等时^[15],涂层整体发生谐振,与自由空间实现阻抗匹配。根据图 8 中曲线可知,在 9.6GHz 频点处和 17.32GHz 频点处,电阻膜的表面阻抗虚部和钡铁氧体涂层阻抗虚部相等,这与吸收峰的位置非常接近(9.86GHz 和 17.12GHz),说明理论分析与计算结果相符合。

为了进一步研究钡铁氧体涂层与电阻膜对改进后涂层吸收性能的影响,选取频段内两个吸收峰位置为

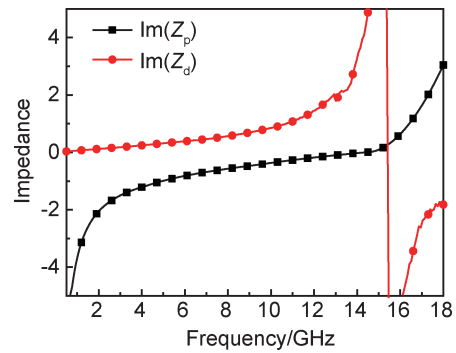


图 8 电阻膜与钡铁氧体涂层的等效阻抗虚部
Fig. 8 Imaginary part of the impedance of the resistance films and the barium ferrite

观察点,即 $f=9.86\text{GHz}$ 和 $f=17.12\text{GHz}$ 频点处,并选用 $f=2\text{GHz}$ 频点作为对照点,分别观察在 TE 波模式下吸波涂层的电场分布和磁场分布,仿真结果如图 9,10 所示。

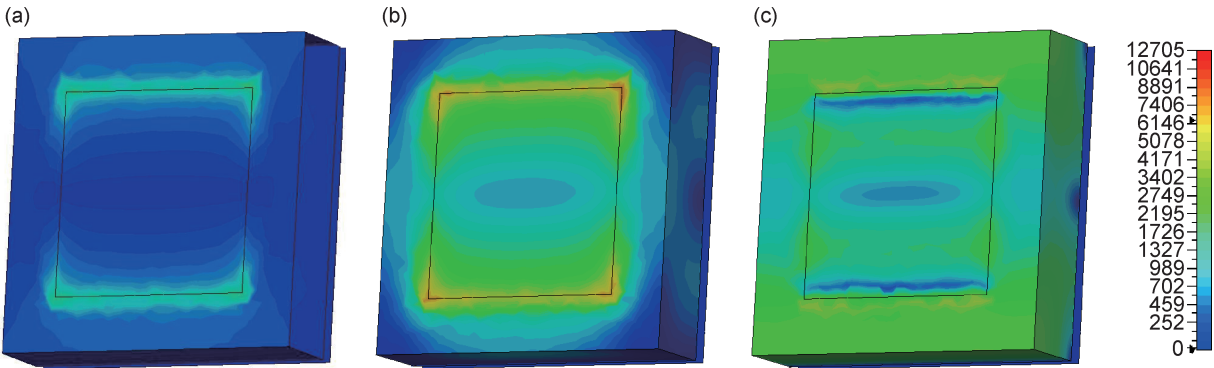


图 9 吸波涂层在吸收峰处的电场分布图 (a)2GHz;(b)9.86GHz;(c)17.12GHz
Fig. 9 Electric field distributions of the absorbing coatings at the frequencies of absorption picks
(a)2GHz;(b)9.86GHz;(c)17.12GHz

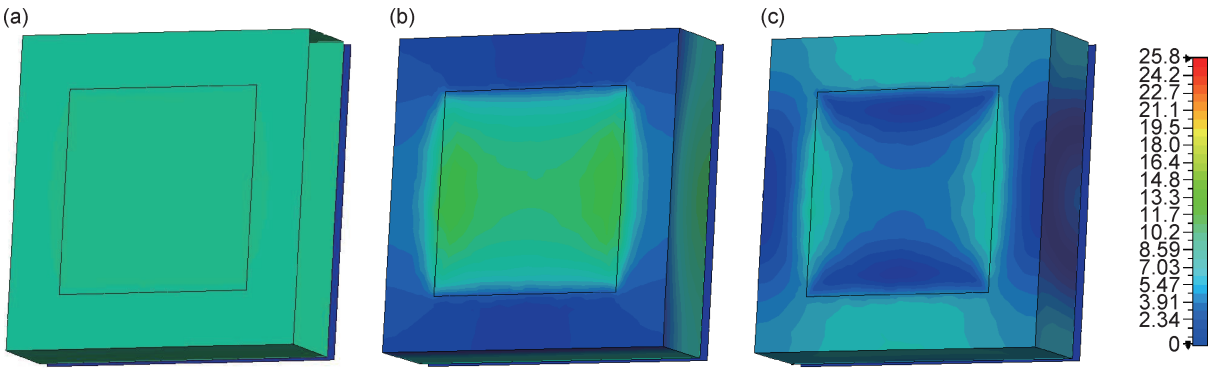


图 10 吸波涂层在吸收峰处的磁场分布图 (a)2GHz;(b)9.86GHz;(c)17.12GHz
Fig. 10 Magnetic field distributions of the absorbing coatings at the frequencies of absorption picks
(a)2GHz;(b)9.86GHz;(c)17.12GHz

由图 9 可知,在 2GHz 低频频点处,吸波涂层上的电场开始在电阻膜上下边缘处聚集;在 9.86GHz 频点

处,电场主要分布在电阻膜上面,且在电阻膜的上下两侧边缘位置聚集了较强的电场;在 17.12GHz 频点处,

电阻膜上的电场减小,钡铁氧体涂层上的电场强度增大,电场在上下两侧聚集。由图 10 可以看到,在 2GHz 低频频点处,吸波涂层上的磁场在整个钡铁氧体涂层和电阻膜上均匀分布;在 9.86GHz 频点处,磁场主要分布在电阻膜内部区域以及金属背板附近的钡铁氧体涂层上;在 17.12GHz 频点处,电阻膜处的磁场大幅降低,磁场集中在钡铁氧体涂层的上下两侧。通过电场和磁场分布图可以看出,在低频处电场和磁场的分布逐渐向电阻膜上集中,随着频率的升高,电阻膜上的磁场和电场慢慢远离,磁场和电场开始聚集在钡铁氧体涂层上下两侧位置。

图 11 为改进后的吸波涂层在吸收峰频点处的功率损耗密度分布情况。从图中可以看出,在 2GHz 频点处,电阻膜上下两侧附近出现少许损耗。在 9.86GHz 频点位置,入射波能量主要消耗在电阻膜上面,这是由于在低频段,电场和磁场都集中分布在电阻膜上面,通过电流的移动,形成欧姆损耗。在 17.12GHz 频点处,电阻膜上面的损耗减小,能量损耗分布在钡铁氧体涂层的上下两侧,由上面的分析可知,随着频率的升高,电场和磁场逐渐远离电阻膜,开始在钡铁氧体涂层上集中,因此能量损耗的位置也由电阻膜逐渐转移到钡铁氧体层上面来。

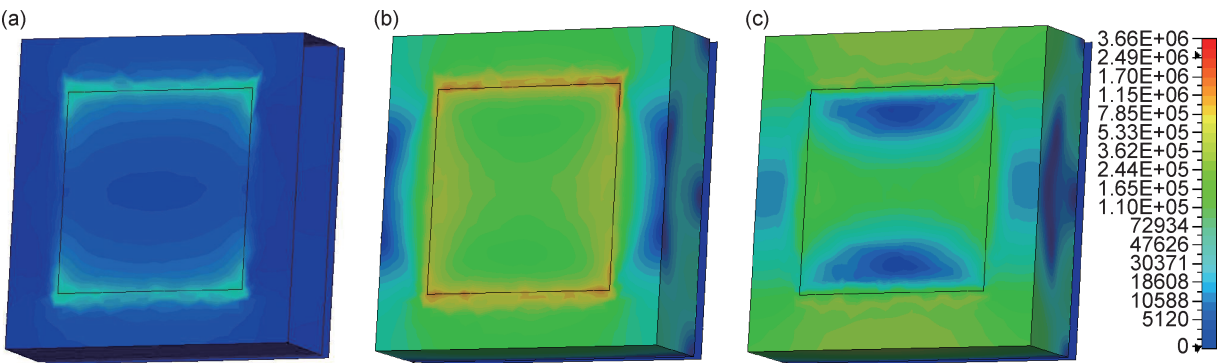


图 11 吸波涂层吸收峰处的功率损耗密度分布图 (a)2GHz;(b)9.86GHz;(c)17.12GHz
Fig. 11 Power loss density distribution of the absorbing coatings at the frequencies of absorption picks
(a)2GHz;(b)9.86GHz;(c)17.12GHz

通过计算得到了改进后的吸波涂层不同结构对入射电磁波的能量损耗,如图 12 所示。从图中可以看出,钡铁氧体涂层在低频处的能量损耗很小,到高频处(16~18GHz)才开始增加,这也对应了图 3 中的钡铁氧体的吸收曲线。电阻膜上的能量损耗集中在 8~16GHz 处,在高频处,电阻膜上损耗的能量迅速下降。可以看出,相对于单一的钡铁氧体涂层,超材料设计改进后的吸波涂层,通过电阻膜在低频段的吸

收,大幅拓展了钡铁氧体吸收带宽,说明通过采用超材料设计的方法可以有效地拓展传统材料的吸波性能。

3 结论

(1)钡铁氧体涂层通过超材料设计改进后,吸收带宽和吸收率大幅增加,说明通过超材料的设计改进可以有效地拓展钡铁氧体的吸波性能。当钡铁氧体涂层厚度为 2.5mm,电阻膜方块电阻值 70Ω/□时,改进后的吸波涂层吸收带宽达到最大,反射损耗都小于 -10dB 的带宽达到 10GHz。

(2)电阻膜的表面阻抗虚部和钡铁氧体涂层阻抗虚部相等,吸波涂层发生电磁谐振,与自由空间实现阻抗匹配,是出现吸收峰的原因。

(3)在低频吸收峰位置,电场和磁场都集中分布在电阻膜上面,入射波能量主要消耗在电阻膜上面;在高频吸收峰处,电场和磁场聚集在钡铁氧体涂层上,能量损耗分布在钡铁氧体上。结果表明,钡铁氧体通过超材料设计改进后,吸收性能得到极大改善。

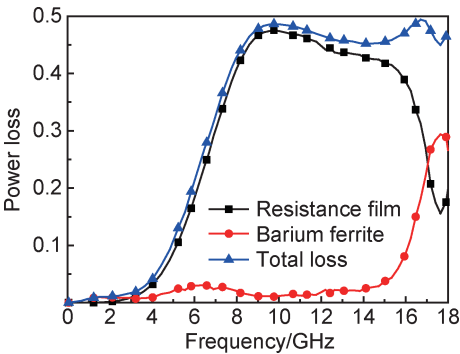


图 12 吸波涂层不同结构对电磁波的能量损耗分布曲线
Fig. 12 Power loss distribution curves of electromagnetic wave in different forms of the absorbing coating

参考文献

- [1] KOSTISHYN V G, PANINA L V, TIMOFEEV A V, et al. Dual ferroic properties of hexagonal ferrite ceramics $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ and $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2016, 400:327-332.
- [2] SONG F, SHEN X, LIU M, et al. Formation and characterization of magnetic barium ferrite hollow fibers with high specific surface area *via* sol-gel process[J]. Solid State Sciences, 2010, 12(9):1603-1607.
- [3] LIU J, LIU P, ZHANG X, et al. Fabrication of magnetic rubber composites by recycling waste rubber powders *via* a microwave-assisted *in situ* surface modification and semi-devulcanization process[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 295(73):73-79.
- [4] SHEN P, LUO J, ZUO Y, et al. Effect of La-Ni substitution on structural, magnetic and microwave absorption properties of barium ferrite[J]. Ceramics International, 2016, 43(6):4846-4851.
- [5] SHAYAN A, ABDELLAHI M, SHAHMOHAMMADIAN F, et al. Mechanochemically aided sintering process for the synthesis of barium ferrite: effect of aluminum substitution on microstructure, magnetic properties and microwave absorption[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 708: 538-546.
- [6] QIU T, LI J, GAN G, et al. Low-temperature cofired Co/Zr-Co-substituted M-type barium ferrite[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 46(2):1-5.
- [7] ZHANG Y, XU F, TAN G, et al. Improvement of microwave-absorbing properties of Co_2Z barium ferrite composite by coating Ag nanoparticles[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 615:749-753.
- [8] LI Q, PANG J, WANG B, et al. Preparation, characterization and microwave absorption properties of barium-ferrite-coated fly-ash cenospheres [J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24(1):288-294.
- [9] WANG T, PAN C, WANG Y, et al. Improvement of absorption performance for Co_2Z barium ferrite composite by increasing the reflected electromagnetic wave from air-absorber interface [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2014, 354(3):12-16.
- [10] ZHAO T, JIN W, JI X, et al. Synthesis of sandwich micro-structured expanded graphite/barium ferrite connected with carbon nanotube composite and its electromagnetic wave absorbing properties[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 712:59-68.
- [11] 张勇,张斌珍,段俊萍,等. 超材料在完美吸波器中的应用[J]. 材料工程, 2016, 44(11):120-128.
- ZHANG Y, ZHANG B Z, DUAN J P, et al. Application of metamaterial in perfect absorber[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(11):120-128.
- [12] 陈明东,揭晓华,张海燕. 碳纳米管复合吸波涂层微波吸收性能的模拟计算[J]. 物理学报, 2014, 63(6):188-193.
- CHEN M D, JIE X H, ZHANG H Y. Simulation and calculation of the absorbing microwave properties of carbon nanotube composite coating[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(6):188-193.
- [13] COSTA F, MONORCHIO A, MANARA G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(5):1551-1558.
- [14] D'AMORE M, SANTIS V D, FELIZIANI M. Equivalent circuit modeling of frequency-selective surfaces based on nanostructured transparent thin films[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2):703-706.
- [15] 郭飞,杜红亮,屈绍波,等. 基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体的设计与制备[J]. 物理学报, 2015, 64(7): 354-360.
- GUO F, DU H L, QU S B, et al. Design and fabrication of a broadband metamaterial absorber based on a dielectric and magnetic hybrid substrate[J]. Acta Phys Sin, 2015, 64(7): 354-360.

基金项目:国家自然科学基金项目(51172282)

收稿日期:2018-04-28;修订日期:2018-10-12

通讯作者:高海涛(1989—),男,博士研究生,主要从事吸波复合材料方面的研究,联系地址:河北省石家庄市新华区和平西路97号陆军工程大学石家庄校区先进材料研究所8号楼815室(050003),E-mail: gao-haitao12y1034@163.com

(本文责编:齐书涵)