

科学研究

基于各向异性介质的宽频吸波超材料结构设计研究

张 晗^{1,2} 张 婷^{1,2} 张泽奎^{1,2} 李宝毅^{1,2}

(1.中国电子科技集团公司第三十三研究所,太原 030006;
2.电磁防护材料与技术山西省重点实验室,太原 030006)

摘 要 针对当前常规的吸波超材料大多数均基于稳定的单一的各向同性的介质基底进行的结构设计,对各向异性介质的超材料结构设计研究较少,提出了以各向异性介质为基底设计吸波超材料结构的理念,采用各向异性物质的独特性质,可实现多功能一体化。以复杂的芳纶纤维复合板作为介质基底,以铜膜为微结构层,设计多层吸波超材料结构,并通过刻蚀及热压复合工艺制得宽频吸波超材料,最终实现在 7GHz~22GHz 频段内的反射率小于 -10dB,吸收率达到 90%以上,在 7.7GHz 处,电磁强度最大达到 5.5×10^4 V/m,磁场强度最大达到 1.0×10^2 A/m,填补了各向异性多层介质的超材料设计的空白。

关键词 各向异性介质,多层,宽频,吸波,超材料

Design and research of broad band absorbing metamaterial structure based on anisotropic media

Zhang Han^{1,2} Zhang Ting^{1,2} Zhang Zekui^{1,2} Li Baoyi^{1,2}

(1.No.33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,
Taiyuan 030006;2.Electromagnetic Protection Materials and Technology Key
Laboratory of Shanxi Province,Taiyuan 030006)

Abstract For most of structural design of current conventional absorbing metamaterials are based on a stable single isotropic dielectric substrate,the metamaterials structure design of anisotropic media is less studied.The idea of designing absorbing metamaterials structure based on anisotropic media was proposed,the unique properties of anisotropic materials were used to achieve multi-functional integration. A multi-layered microwave-absorbing metamaterials structure was designed by using a complex Kevlar fiber composite board as the dielectric substrate and copper film as the microstructure layer.The preparation was carried out by etching process and thermoforming tank molding.Finally its reflectance was less than -10dB in the 7GHz~22GHz band,absorption rate reached 90%,at the 7.7GHz,the electromagnetic strength reaches a maximum of 5.5×10^4 V/m,and the magnetic field strength reached a maximum of 1.0×10^2 A/m.The blank of the metamaterials design of anisotropic multi-layer medium was filled.

Key words anisotropic media,multi-layer,broad band,microwave absorbing,metamaterial

超材料是在 2008 年由英国人 Landy 等^[1]首次提出,其摆脱了对组成物质本征电磁特性的依赖,从材料的结构设计上实现了对入射电磁波的吸收,具有设计灵活、易于实现阻抗匹配等优点。Ding 等^[2]采用在一个单元上放置多个谐振器的方法,在 20 层介质的基础上,实现了 7.8GHz~14.7GHz 的吸收带宽。熊汉^[3]采用反射相消原理,基于特氟龙和罗杰斯 TMM4 型号 2 种共 4 层材质,设计出在 8.37~

21GHz 频段内吸收率 90%以上的超材料吸波体,该设计不仅降低了基材的层数,也拓宽了吸收带宽。Sun 等^[4]采用有耗介质作为基底,设计出 4 层共 4.5mm 厚的吸波超材料结构,其吸收带宽为 10~70GHz,吸收率在 80%以上。

通常的超材料吸波体是以各向同性介质为基底,但随着在各类军用民用产业中应用的材料种类日益增多,因此对吸波超材料的设计研究已不局限

基金项目:装备发展部共用技术资助项目(33KJ1707YY034A);装备发展部重点实验室基金资助项目(33KJ1707JJ039B)

作者简介:张晗(1989-),女,硕士,工程师,主要从事电磁超材料设计研究。

于各向同性介质,更多的各向异性介质被应用其中^[5]。如铁氧体之类的铁磁复合物,常用作吸收剂,其在微波频段为各向异性材料,在不同方向微波信号通过条件下呈现不同的响应^[6]。再如碳纤维、芳纶纤维等复合材料,均具有典型的各向异性特征,具有特有的性能和优势,如芳纶纤维复合材料具有优异的抗弹性能,与超材料结构设计相结合,可实现吸波、抗弹的功能一体化。所以在复杂多层的各向异性介质上的吸波超材料结构设计与研究,对隐身材料领域的发展具有非常重大的意义。

本研究基于复杂多层的各向异性介质,以芳纶纤维复合材料作为介质基底,实现吸波、抗弹性能兼具的超材料结构,与现有技术相比,既不影响超材料的吸波性能,又增加了超材料的其他性能,实现了功能一体化。在设计的基础上,根据不同各向异性材料自身的性能特点及优势,还可实现其他功能的融合设计。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

芳纶纤维布(面密度为 $440\text{g}/\text{m}^2$,抗拉强度 567.05MPa ,断裂延伸率 4.85% ,拉伸模量 19.48GPa),中芳特纤股份有限公司;吸波超材料(单元结构的单元尺寸为 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$,从上到下共有 4 层芳纶纤维介质基底,3 层微结构层,1 层接地金属板,芳纶纤维介质层与微结构层交替层叠,顶层的芳纶纤维介质层为匹配层,其厚度为 1.2mm ,第二层至第四层的芳纶纤维介质层为 1mm ,微结构层的铜膜厚度为 0.018mm ,接地板的铜厚度为 1mm),国营 785 厂;ST-6050 胶膜,拓一联创科技深圳有限公司。

热压罐(DN600 $\times$ 800 型),山东中航泰达复合材料股份有限公司;热压机[BY120 $\times$ 120/10(3)型],青岛国森机械有限公司;烘箱(DYJX-15 型),河北奥升机械设备有限公司;真空泵(VT48 型),德国布鲁克公司;带状线测试仪(带状线测试夹具),成都电子科技大学;网络分析仪(N5253A 型),是德科技公司;高 Q 腔测试仪(自由空间法夹具),成都电子科技大学;矢量网络分析仪(E8363C 型),是德科技公司。

1.2 样品的制备

1.2.1 芳纶纤维预浸料的制备

采用热压罐(DN600 $\times$ 800 型,山东中航泰达复合材料股份有限公司)将 ST-6050 胶膜与芳纶纤维

热压成型^[7-8],初始温度为 26°C ,固化温度为 $180^\circ\text{C} \pm 6^\circ\text{C}$,总时间为 313min ,升温时间 67min ,保温时间 150min ,降温时间为 96min ,升温速率为 $2.3^\circ\text{C}/\text{min}$,降温速率为 $1.6^\circ\text{C}/\text{min}$,即制得芳纶纤维预浸料,并进行镀铜膜加工。

1.2.2 吸波超材料的制备

为解决在各向同性介质上的吸波超材料的功能单一,多种性能一体化的优势不强的问题,本研究在复杂多层各向异性介质上进行吸波超材料结构单元设计,提供一种技术方案:以芳纶纤维^[9-10]复合板为多层各向异性介质基底,设计 3 层结构的吸波超材料,顶层的芳纶纤维板为匹配层,底层的金属铜板为接地层。超材料微结构均为“双 L”形式,形成中心对称结构。最下层微结构图形其“L”的长边长 5mm ,短边长为 4.9mm ,宽为 0.2mm ,”L”与”L”的间距为 0.1mm 。中间层微结构图形其“L”的长边长 3.8mm ,短边长为 3.7mm ,宽为 0.2mm ,”L”与”L”的间距为 0.1mm 。最上层微结构图形其“L”的长边长 0.6mm ,短边长为 0.5mm ,宽为 0.2mm ,”L”与”L”的间距为 0.1mm ,采用刻蚀工艺加工超材料图形。吸波超材料结构示意图见图 1。

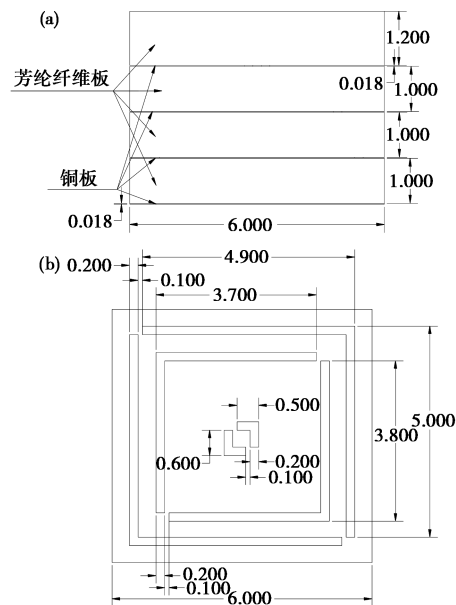


图 1 吸波超材料结构示意图

[(a)吸波超材料结构侧视图;(b)三层微结构俯视图]

1.2.3 多功能复合材料制备

将多层介质采用在 100°C , 25min , $0.9 \sim 0.6\text{MPa}$ 和 120°C , 40min , $8.1 \sim 7.8\text{MPa}$ 条件下的模压工艺,以及整体结构采用 70°C , 90min , 0.1MPa 的真空袋压工艺制备,并通过对工艺参数的精确控制,将多层变形、移动引起的结构间层间错位以及介

质层厚度变化收缩或膨胀引起的距离变化的影响降低到最小,来保证多层结构的对位精度。

1.3 样品的测试

采用带状线测试仪(带状线测试夹具,成都电子科技大学)、网络分析仪(N5253A型,是德科技公司)、高Q腔测试仪(自由空间法夹具,成都电子科技大学)、矢量网络分析仪(E8363C型,是德科技公司)对芳纶纤维复合板不同方向的介电常数和损耗进行测试,芳纶纤维复合板的相对介电常数 $\epsilon_x = \epsilon_y = 2.96$, $\epsilon_z = 2.84$, 损耗角正切 $\tan\delta_x = \tan\delta_y = 0.0047$, $\tan\delta_z = 0.015$, 微结构和接地板均采用金属铜,其导电率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。

吸波体对电磁波的反射特性测试。均匀各向异性媒质的磁导率和介电常数为对称张量,在选择主轴为坐标轴条件下,这些对称张量又可化为对角张量。基于各向异性材料吸波体的电磁波传播示意图见图2。

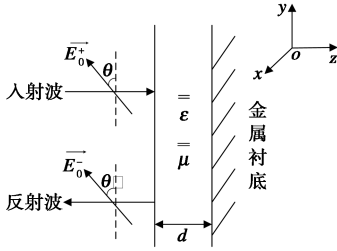


图2 基于各向异性材料吸波体的电磁波传播示意图

以各向异性介质^[11]吸波材料为例,基于各向异性材料吸波体的电磁波传播(见图2所示), z 轴垂直于吸波材料与金属衬底之间的分界面, y 轴为光轴方向, xOy 坐标平面与分界面重合,则各向异性吸波材料的张量磁导率(ϵ)和张量介电常数(μ)见式(1)^[12]。

$$\bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix}, \bar{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

以均匀平面波垂直入射到吸波材料表面(见图2)为例, θ 为入射波电场 $\vec{E}_0^+$ 与 y 轴的夹角, θ' 为反射波电场 $\vec{E}_0^-$ 与 y 轴的夹角, E_0^+ 和 E_0^- 分别为原点处入射波电场和反射波电场的振幅,则自由空间中合成电场在 x 和 y 方向的分量分别为见式(2)、式(3)。

$$E_{0x} = E_0^+ \sin\theta e^{-k_0 z} + E_0^- \sin\theta' e^{k_0 z} \quad (2)$$

$$E_{0y} = E_0^+ \cos\theta e^{-k_0 z} + E_0^- \cos\theta' e^{k_0 z} \quad (3)$$

式中, $k_0 = jk \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 为自由空间中的传输常数。

合成磁场在 x 和 y 方向上的分量见式(4)、式(5)。

$$H_{0x} = -(1/Z_0) E_0^+ \cos\theta e^{-k_0 z} + (1/Z_0) E_0^- \cos\theta' e^{k_0 z} \quad (4)$$

$$H_{0y} = (1/Z_0) E_0^+ \sin\theta e^{-k_0 z} - (1/Z_0) E_0^- \sin\theta' e^{k_0 z} \quad (5)$$

式中, $Z_0 = \mu_0 / \epsilon_0$ 为自由空间中的特征阻抗。

吸波体中合成电场在 x 和 y 方向上的分量,以及合成磁场在 x 和 y 方向上的分量分别见式(6)、式(7)、式(8)、式(9)。

$$E_x = A_1 e^{-k_0 \sqrt{\epsilon_x \mu_y} z} + A_2 e^{k_0 \sqrt{\epsilon_x \mu_y} z} \quad (6)$$

$$E_y = B_1 e^{-k_0 \sqrt{\epsilon_y \mu_x} z} + B_2 e^{k_0 \sqrt{\epsilon_y \mu_x} z} \quad (7)$$

$$H_x = -(1/Z_0) \sqrt{\epsilon_y / \mu_x} (B_1 e^{-k_0 \sqrt{\epsilon_y \mu_x} z} - B_2 e^{k_0 \sqrt{\epsilon_y \mu_x} z}) \quad (8)$$

$$H_y = (1/Z_0) \sqrt{\epsilon_x / \mu_y} (A_1 e^{-k_0 \sqrt{\epsilon_x \mu_y} z} - A_2 e^{k_0 \sqrt{\epsilon_x \mu_y} z}) \quad (9)$$

由于在金属衬底表面($z=0$)电场应为零, $A_1 = -A_2$, $B_1 = -B_2$ 。再由边界条件可知分界面 $z = -d$ 处,电场强度和磁场强度的切向分量应连续^[13], $z = -d$ 处反射波电场强度与入射波电场强度的比值定义为吸波体对电磁波的反射系数,见式(10)、式(11)、式(12)、式(13)。

$$\Gamma = E_0^- e^{-k_0 d} / (E_0^+ e^{k_0 d}) \quad (10)$$

$$\Gamma^2 = M^2 \sin^2 \theta + N^2 \cos^2 \theta \quad (11)$$

$$M = \frac{(\sqrt{\epsilon_x} + \sqrt{\mu_y}) + (\sqrt{\epsilon_x} - \sqrt{\mu_y}) e^{2\epsilon}}{(\sqrt{\epsilon_x} - \sqrt{\mu_y}) + (\sqrt{\epsilon_x} + \sqrt{\mu_y}) e^{2\epsilon}} \quad (12)$$

$$N = \frac{(\sqrt{\epsilon_y} + \sqrt{\mu_x}) + (\sqrt{\epsilon_y} - \sqrt{\mu_x}) e^{2\epsilon}}{(\sqrt{\epsilon_y} + \sqrt{\mu_x}) + (\sqrt{\epsilon_y} - \sqrt{\mu_x}) e^{2\epsilon}} \quad (13)$$

若以分贝(dB)表示反射系数则见式(14)。

$$R/\text{dB} = 20 \lg |\Gamma| = 10 \lg |M^2 \sin^2 \theta + N^2 \cos^2 \theta| \quad (14)$$

在各向异性材料的 $\epsilon_x \neq \epsilon_y$, $\mu_x \neq \mu_y$ 条件下,此时反射系数 R 与夹角 θ 有关,即反射特性与入射波电场的极化方向有关。本研究的吸波超材料结构设计是以芳纶纤维复合板为介质基底,其 $\epsilon_x = \epsilon_y \neq \epsilon_z$, $\mu_x = \mu_y \neq \mu_z$,式(14)可化简为式(15)。

$$R/\text{dB} = 20 \lg |M| = 20 \lg |N| \quad (15)$$

2 结果与讨论

2.1 反射率分析

多层各向异性介质吸波超材料结构反射率曲线见图3。从图可以看出,该基于多层各向异性介质的吸波超材料在7~22GHz频带内,反射率均小于-10dB,吸收率达到90%以上,在7.7GHz、

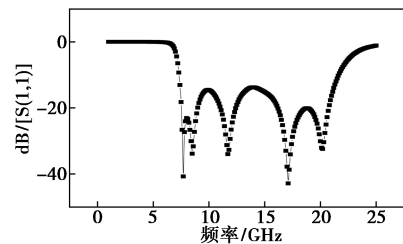


图3 多层各向异性介质吸波超材料结构反射率曲线图

8.5GHz、11.7GHz、17.1GHz 和 20.2GHz 五个频点处反射率曲线达到波谷,可达到-40dB 左右,实现最大吸收。

2.2 电磁强度、磁场强度分析

吸波体坡印廷矢量分布图见图 4。从图可以看出,在低频点 7.7GHz 处,吸波体的电磁场、坡印廷矢量主要分布在吸波体的第四层介质及第三层微结构上,电场主要分布在“双 L”型“L”与“L”的间距缺口处,电磁强度最大达到 $5.5 \times 10^4 \text{ V/m}$,磁场主要分布在“双 L”型的边长处,磁场强度最大达到 $1.0 \times 10^2 \text{ A/m}$,随着频率的增加,在 17.1GHz 处,电磁场强度分布及坡印廷矢量主要分布在第三层介质及第二层微结构上,第四层介质和第三层微结构的电磁场强度下降,总体呈逐渐向上分布的态势,这是因为谐振频率与金属环的长度成反比关系^[14],谐振频率越低,金属环长度越长,即底层微结构层,谐振频率越高,金属环长度越短,即顶层微结构层。

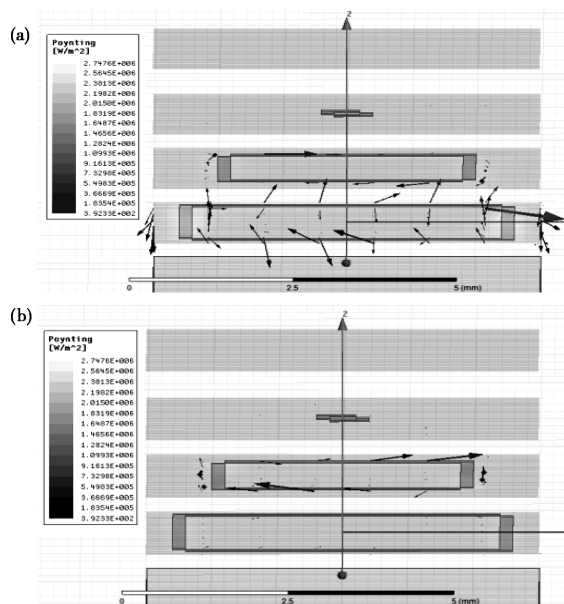


图 4 吸波体坡印廷矢量分布图

[(a)7.7GHz 处;(b)17.1GHz 处]

综上所述,本研究充分利用复杂的各项异性的复合材料的性能优势,结合多层吸波超材料结构设计,实现防弹性能和宽频吸波性能的一体化融合,与各向同性的吸波超材料相比,在不影响超材料吸波性能的同时,融合了防弹性能,拓展了吸波超材料的应用领域。

3 结论

以复杂的芳纶纤维复合板作为介质基底,以铜膜为微结构层,设计多层吸波超材料结构,并通过刻

蚀及热压复合工艺,成功制得宽频吸波超材料。制得的宽频吸波超材料为各向异性材料,具有传统各向同性所不具有的性能和优势,具有优异的抗弹性能,在 7~22GHz 频带内,反射率均小于-10dB,吸收率达到 90% 以上,在 7.7GHz、8.5GHz、11.7GHz、17.1GHz 和 20.2GHz 五个频点处反射率曲线达到波谷,为最大吸收峰值,在 7.7GHz 处,电磁强度最大达到 $5.5 \times 10^4 \text{ V/m}$,磁场强度最大达到 $1.0 \times 10^2 \text{ A/m}$,实现吸波、抗弹的功能一体化。结合各向异性复合材料与超材料结构设计,与现有技术相比,既不影响超材料的吸波性能,又增加了超材料的其他性能,实现了多功能一体化的融合。

参考文献

- [1] Landy N L, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402-207405.
- [2] Ding F, Cui Y, Ge X, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(10): 103504-103506.
- [3] 熊汉. 电磁超材料在微波吸波体与天线中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [4] Sun J B, Liu L Y, Dong G Y, et al. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21155-21162.
- [5] 魏兵. 各向异性介质电磁散射及参数反演研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- [6] 宇文骊敏. 各向异性介质目标电磁散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [7] 苏鹏, 崔文峰. 先进复合材料热压罐成型技术[J]. 现代制造技术与装备, 2016, 89(11): 165-166.
- [8] 贾云超, 关志东, 李星, 等. 热压罐温度场分析与影响因素研究[J]. 航空制造技术, 2016, 497(1/2): 90-95.
- [9] Miao X G, Zhao Z Y, Yang X L, et al. Characterization of kevlar fiber-reinforced absorbing composites[J]. Advanced Materials Research, 2013, 787(2013): 311-315.
- [10] 杨坤, 朱波, 曹伟伟, 等. 高性能纤维在防弹复合材料中的应用[J]. 材料导报 A(综述篇), 2017, 29(7): 24-28.
- [11] 葛亚岑. 单轴双各向异性介质圆柱电磁散射解析解的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
- [12] 石刚. 单轴各向异性左手介质中电磁波的传播条件[J]. 蚌埠学院学报, 2013, 2(4): 9-11.
- [13] 张楚顺. 电磁波在双轴各向异性介质中传播特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [14] Li Z Z, Luo C Y, Yao G, et al. Design of a concise and dual-band tunable metamaterial absorber[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(10): 83-88.

收稿日期: 2018-07-13

修稿日期: 2019-10-15