基于 SCFNA 法的 FSS 吸波材料设计及制备

沈立昊,郭春潮,郝东尧,许红,吴大鸣,高小龙,庄俭,孙靖尧,黄尧 (北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

摘要:目的 设计并制备一种与单元电导率匹配、电磁性能优异的柔性频率选择表面吸波材料。方法 首 先选择空间限域强制组装法(SCFNA)制造具有优异导电性能的片材,再按圆形谐振单元裁剪并周期性 排布在有机介质层内。完成频率选择表面(FSS)的制备后测试其电磁波性能,并与仿真模型优化的结 果进行对比。结果 制备的柔性选择表面样件在频率为 18~40 GHz 时吸收率达到 96.22%以上。结论 使 用空间限域强制组装法设计制备了导电单元,通过调整工艺参数实现对单元电导率的精准调控,成功制 备出了一种在 18~40 GHz 频段下电磁性能优异的高柔性吸波体材料。

关键词:频率选择表面;吸收率;空间限域强制组装法

中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)09-0099-05 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.012

Design and Preparation of Frequency Selective Surface Absorber Based on SCFNA

SHEN Li-hao, GUO Chun-chao, HAO Dong-yao, XU Hong, WU Da-ming, GAO Xiao-long, ZHUANG Jian, SUN Jing-yao, HUANG Yao

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: The work aims to design and prepare a flexible Frequency Selective Surface absorber with matching unit conductivity and excellent electromagnetic properties. Firstly, the functional conductive sheet with good conductivity was prepared by Spatial Confining Forced Network Assembly (SCFNA) and then cut into array according to the round resonant unit and encapsulated in the organic dielectric layer. The electromagnetic wave performance of the Frequency Selective Surface absorber was tested and compared with the optimization results of simulation model. The absorptivity of Frequency Selective Surface samples was over 96.22% in 18~40 GHz. Spatial Confining Forced Network Assembly is used to prepare the conductive unit, and the precise regulation of the unit conductivity is achieved by adjusting the process parameters. Thus, a highly flexible absorber with excellent electromagnetic properties in the 18~40 GHz band is successfully prepared.

KEY WORDS: Frequency Selective Surface; absorptivity; Spatial Confining Forced Network Assembly

频率选择表面(Frequency-Selective Surface, FSS)技术作为一种实现飞机、船舶隐身的重要方式, 广泛地应用于吸波器件的设计与制作中^[1-5]。频率选 择表面作为一种雷达吸波结构^[6],通过不同层级材料 层叠组合^[7-8],能制成质轻且具备优异吸波性能的材 料,成为雷达隐身领域的研究热点^[9]。

频率选择表面凭借二维平面或三维空间内阵列 化排布的导电单元,在不同电磁波频段内有不同的性 能表现^[10],当电磁波透射频率选择表面时,电场的影 响使得谐振单元内的大量电子产生电流和相应的吸

- **基金项目:**国家自然科学基金(52003018, 52311530089)
- 作者简介:沈立昊(2000—),男,硕士生。
- **通信作者:**黄尧(1987—),男,博士。

收稿日期: 2023-04-02

收损耗。通常 FSS 层内部的感应电流会随着电导率的 增大而增大,造成更多的吸收损耗。在谐振频率^[11] 下往往能达到最大的吸收损耗,但随之会带来更高的 反射率。在军事领域,灵活运用频率选择表面能够大 幅提高装备的隐身性能^[12]。

空间限域强制组装法(Spatial Confining Forced Network Assembly, SCFNA)是在聚合物中投入导电填料,通过机械手段向单一方向施加压力^[13],共混物逐渐发生自组装的过程。在压力增大的同时,导电填料内部的自组装力也随之增大,最终在外力作用下导电网络紧紧贴在一起,达到强制组装的效果^[14]。通过对填料质量分数,自组装时间,强制组装压力,厚度,温度等加工参数进行调控,可以制作符合预期的导电复合材料^[15-16],赋予复合材料导电性^[17-18]。

本文针对 K、Ka 波段的吸波需求,结合有限元 仿真优化的参数,基于 SCFNA 方法设计并制备一种 单元电导率匹配的柔性频率选择表面吸波材料,归纳 了有关 FSS 吸波材料制造和测试的工艺流程。

1 仿真方法与实验

1.1 建立仿真模型

利用 Ansoft HFSS 软件建立三维模型,先建模一 组圆环形谐振单元,通过调整谐振单元结构的方法实 现正三角形周期性排布,将 FSS 单元模型置于上下介 质层夹层中,设置上下自由空间的空气盒。图1是基 于 SCFNA 方法制备的频率选择表面仿真模型,如图 所示有 2 层 FSS 层和 3 层介质层,考虑级联问题,上 下 2 层 FSS 均采用相同的单元结构。



图 1 FSS 结构 Fig.1 FSS structure

1.2 参数设置与求解

圆环形谐振单元的主要参数设置有外圆和内圆 半径; FSS 层的参数要求包括介质层厚度、单元电导 率及相对介电常数。选取垂直于水平面的2个平行的 空间盒子作为主、从边界,设置求解频率为30GHz, 扫频范围为18~40GHz,离散求解后得到在K、Ka 波段的吸收率曲线。

1.3 SCFNA 法制备导电复合材料

SCFNA 法是根据聚合物的高流动性特点,通过 施加外力的手段降低导电填料间的距离,提升材料的 导电性能,对导电复合材料的强制性压缩使得聚合物 基体被挤出,导电网络更加密实。采用 SCFNA 法制 成的导电复合材料比共混自组装法的制品电导率要 高出 6 倍以上。通过仿真建立的电导率模型,能够制 备出精准调控电导率的导电复合材料。

1.3.1 实验材料与仪器

主要材料: 道康宁 184 硅胶和聚二甲基硅氧烷 (PDMS)。

主要仪器:由北京化工大学自主设计的热压印机,上下压板尺寸为160 mm×80 mm,能够提供最大的正向压力为 50 kN,加热板最大加热温度达到220 ℃。

1.3.2 实验步骤

按照仿真优化的结果制备频率选择表面,实验主要步骤如图2所示。



图 2 制备流程 Fig.2 Preparation flow chart

首先将碳纤维(SCF)和聚二甲基硅氧烷(PDMS) 加入非介入式均质机中分散混合,固化后形成 SCF/PDMS均相物料体系。接着使用热压印机对固化 物料进行第1次压印,形成自组装导电网络,再对其 二次压缩制备强制组装导电网络,最终得到 SCF/PDMS导电复合材料。使用冲孔器在导电片材上 冲孔制得圆环形阵列单元,排列在 PDMS 薄膜上, 通过涂布机涂布一层混合胶后加热固化完成封装,最 终制得后续测试用的 FSS 样件。

1.4 弓形法性能测试实验

图 3 为弓形法测试原理,电磁波信号经矢量网络 分析仪传输至发射天线,天线发出电磁波后在被测件 介质层与空气交界面上发生部分反射,其余部分则在 金属层全部反射。反射波通过接收天线接收,信号最 终传回矢量网络分析仪中。



图 3 弓形法测试原理 Fig.3 Principle of the bow test

图 4 是经仿真与测试后绘制的吸收率曲线,研究 发现 K 波段吸收率达到 96.3%以上, Ka 波段吸收率 达到 97.7%以上。整个测试频段的平均吸收率高达 98.4%,具有优异的吸波性能。由图 4 可知,在 K、 Ka 波段仿真与测试的吸收率曲线相拟合,拟合结果 证明了 SCFNA 法能大幅提高吸波材料的吸收率。说 明FSS样品通过电导率较高的第2层谐振单元时产生 了更多的电磁损耗。



图 4 FSS 样品最优吸收曲线 Fig.4 Optimal absorption curve of FSS sample

2 结果与分析

2.1 FSS 仿真分析

2.1.1 谐振单元平面尺寸

首先仿真分析不同外圆半径 r₁ 对吸收率的影响,综合考虑尺寸精度和加工的难易程度可得,在 r₁=4.0 mm 频段吸收性能最好,随着 r₁数值增加,吸 收率逐渐降低。接着研究 r₁固定为 4.0 mm 时,内圆 半径 r₂与吸收率的关系,发现随着 r₂的增大吸收率水 平也随之提高,当 r₂=2.0 mm 时性能表现最好。综合选 择 r₁=4.0 mm、r₂=2.0 mm 作为单元外内圆半径的尺寸。

2.1.2 介质层参数

因为频率选择表面具有上中下共3层介质层,所 以谐振频率同时受到 3 层介质层厚度及其相对介电 常数的影响。初步设定相对介电常数为 2.7、步长为 0.3 mm 进行仿真分析。首先研究上层介质层厚度 d₃ 对吸收率的影响,固定中下介质层厚度,发现在点频 率为 29 GHz 时吸收率达到峰值,此时上层介质层厚 度 d₃为 1.3 mm。初步确定上层厚度后,固定下层厚 度,研究中间介质层厚度 d2 对吸收率的影响。发现 吸收率没有明显的峰值分布,而且随着中间层厚度的 增大,吸收带宽最大缩减了 20.5%,平均吸收率最大 下降 2.07%。研究表明在中间介质层厚度 d2为 0.6 mm 时吸波性能最好。最后固定上、中介质层厚度,探究 不同下层厚度 d₁ 对吸波性能的影响。仿真结果表明 增大下层厚度,最低吸收率最大降低了9.68%,平均 吸收率最大降低了 3.15%, 因此初步选择相对数值较 低的 1.0 mm 作为下层介质层厚度。

因为初步仿真的结果存在步长较大的缺陷,容易 错过模型最佳数值,所以还需要缩小步长。图 5 是步 长缩小为 0.1 mm 时的吸收性能曲线,可以明显看出 上层介质层厚度 d_3 =1.2 mm 时保持了较高的吸收率, 同理选择 d_2 =0.6 mm、 d_1 =1.0 mm 作为中、下层介质 层厚度。除此以外还需要对材料的相对介电常数 ε_r 进行优化。因为介电常数会影响 FSS 的谐振频率,使 吸收率曲线在 x 轴产生偏移,所以对比平均吸收率后 仍选择吸波性能好的相对介电常数 ε_r =2.7。



图 5 当 d_2 =0.6 mm、 d_1 =1.0 mm 时, 不同 d_3 的吸收率曲线 Fig.5 Absorptivity curves of different d_3 values at d_2 =0.6 mm, d_1 =1.0 mm

2.1.3 单元电导率

为了实现电导率的精准调控,研究影响电导率的 主要因素。根据仿真建立的电导率模型,通过正交实 验绘制如图 6 所示碳纤维含量、混合转速和时间之间 的 3D 响应图。由图 6 可知,碳纤维含量、混合转速和时间均影响制品电阻,继而影响制品电导率。





利用 SCFNA 方法电导率可调控的特性,同时调 节上下 2 层 FSS 平面的参数,得到上下层电导率不同 的 FSS 模型。当下层 FSS 单元的电导率 σ_1 为 50 S/m 时,不同上层 FSS 单元电导率 σ_2 的吸收率曲线见图 7。 可以看到吸收率整体处于较高的水平,随着上层单元 电导率 σ_2 的增加,最低吸收率和平均吸收率均会降 低。这是因为上层单元电导率的提高会使得上层 FSS 平面呈现金属性,入射波产生较大的反射,降低了吸 收率。

确定上层 FSS 单元的电导率后,研究下层电导率 与 FSS 吸波性能的关系。因为高电导率使入射波穿过 下层 FSS 时会在谐振单元产生更多的感应电流,增加 电能损耗,所以仿真时需要设定高电导率的下层单元来 降低电能损耗。但下层单元的电导率不宜高于上层单元 太多,因此,综合选择下层单元的电导率为 75 S/m, 此电导率下 FSS 的吸收性能最优。



通过对频率选择表面在 K、Ka 波段进行仿真优化, 得出最终 FSS 模型的优化参数如下:采用正三角形排 列圆环形谐振单元,外圆半径 r_1 为 4.0 mm,内圆半径 r_2 为 2.0 mm,单元排列周期为 8.6 mm;上层谐振单元 电导率 σ_2 选择 50 S/m,下层电导率 σ_1 选择 75 S/m,上 中下介质层的相对介电常数 ε_r 设定均为 2.7,对应的厚 度分别为 d_3 =1.2 mm、 d_2 =0.6 mm 和 d_1 =1.0 mm。

2.2 实验测试结果

根据 FSS 电导率仿真模型,采用空间限域强制组装法制备导电复合材料,通过工艺参数精准调控导电单元的电导率,图 8 即为实验最终制得的 FSS 样件。对 FSS 样件进行弓形法测试,经测试样件在频率为 18~40 GHz 内吸收率达到了 96.22%以上,在整个测试频段内的平均吸收率高达 98.4%。



图 8 FSS 样品 Fig.8 FSS sample

第44卷 第9期

3 结语

本文设计制备了一种单元电导率匹配、电磁性能 优异的柔性频率选择表面 FSS 吸波材料。总结了一套 完整的工艺流程,通过调整仿真与实验参数来精准调 控单元电导率。

区别于传统 FSS 设计受材料电导率的限制,采用 SCFNA 方法能制作电导率在 50~150 S/m 内可控的复 合材料,且在 FSS 设计过程中能够直接修改单元电导 率来调控 FSS 的吸收率,增加了 FSS 设计过程的可 控制变量,使吸波材料达到更好的效果。完善了导电 复合材料 FSS 单元的仿真设计流程,对不同谐振单元 的电导率作了区别化调整。通过吸波性能测试证明了 所制备的 FSS 样件具有良好的吸波性能,在 K、Ka 波段能达到全覆盖吸收。

参考文献:

- SHADID W G, SHADID R. Electric Model for Electromagnetic Wave Fields[J]. IEEE Access, 2021, 9(9): 782-804.
- [2] KOZIOL M J. Reevaluation and Correction of Maxwell's Equations: a Magnetic Field has a Source, a Moving Electric Charge[J]. F1000 Research, 2020, 9: 1092.
- [3] DALMAN G H. The Beginnings of Army Air Forces Radar and Fighter Control[J]. Air & Space Power Journal, 2021, 35(1): 95.
- [4] 时晨光,董璟,周建江,等.飞行器射频隐身技术研究综述[J].系统工程与电子技术,2021,43(6): 1452-1467.

SHI Chen-guang, DONG Jing, ZHOU Jian-jiang, et al. Overview of Aircraft Radio Frequency Stealth Technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(6): 1452-1467.

- [5] 葛光楣,卞葆蓉,王杨兴,等. 隐身技术和雷达散射 截面测量简介[J]. 航空电子技术, 1986, 3: 24-27.
 GE Guang-mei, BIAN Bao-rong, WANG Yang-xing, et al. Introduction to Stealth Technology and Radar Scattering Cross Section measurements[J]. Avionics, 1986, 3: 24-27.
- [6] 候新宇,万伟,万国宾,等. 雷达罩壁双层 FSS 电结构设计与选择[J]. 电波科学学报, 1998, 13(4): 442-445.
 HOU Xin-yu, WAN Wei, WAN Guo-bin, et al. Electrical Configuration Design for the Double Layer FSS on Radome Application[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998, 13(4): 442-445.
- [7] NARAYAN S, SREEJA J. Radar Absorbing Structures Using Frequency Selective Surfaces: Trends and Perspectives[J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(3): 1728-1741.

- [8] HO C W, HYUNG S W, JUN L W, et al. Broadband Radar Absorbing Structures with a Practical Approach from Design to Fabrication[J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2020, 20(4): 1-7.
- [9] 鲁戈舞,张剑,杨洁颖,等.频率选择表面天线罩研究现状与发展趋势[J].物理学报,2013,62(19):1-10. LU Ge-wu, ZHANG Jian, YANG Jie-ying, et al. Status and Development of Frequency Selective Surface Radome[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 1-10.
- [10] 孙艳军,董连和,陈宇,等.频率选择表面的分析方 法和仿真技术研究[J]. 红外, 2010, 31(3): 24-29.
 SUN Yan-jun, DONG Lian-he, CHEN Yu, et al. Study of Analysis Method and Simulation Technology of Frequency Selective Surfaces[J]. Infrared, 2010, 31(3): 24-29.
- [11] BEGAM N, SAHA S, SARKAR S, et al. Design of Compact Patch Type Curved Frequency Selective Surface[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(9): 1096-4290.
- [12] SEO J. Analysis of Tracking Accuracy with Consideration of Fighter Radar Measurement Characteristics[J]. The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, 2018, 29(8): 640-647.
- [13] DU Y, ZHANG Q, HUANG Y, et al. Efficient Construction and Online Evaluation of Conductive Networks within Polydimethylsiloxane Composites via Continuous SCFNA Method[J]. Composites Communications, 2021, 24: 48-50.
- [14] KORMAKOV S, WU D M, SUN J Y, et al. The Electrical Conductive Behaviours of Polymer-Based Three-Phase Composites Prepared by Spatial Confining Forced Network Assembly[J]. Express Polymer Letters, 2019, 13(8): 713-723.
- [15] WU D M, GAO X L, SUN J Y, et al. Spatial Confining Forced Network Assembly for Preparation of Highperformance Conductive Polymeric Composites[J]. Applied Science and Manufacturing, 2017, 102: 88-95.
- [16] LU Yu-jiao, CHI Bai-hong, LIU Da-yong, et al. Wideband Metamaterial Absorbers Based on Conductive Plastic with Additive Manufacturing Technology[J]. ACS Omega, 2018, 3(9): 11144-11150.
- [17] 俞煌. 聚酰胺酰亚胺基三元导电复合材料的制备与表征[D]. 常州: 常州大学, 2021.
 YU Huang. Preparation and Characterization of Polyamideimide-Based Ternary Conductive Composites[D]. CHangzhou: Changzhou University, 2021.
- [18] 李哲,黄尧,吴刚强,等.基于空间限域强制组装法制备短切碳纤维/乙烯--醋酸乙烯导电复合材料性能
 [J].复合材料学报,2020,37(6):1234-1242.
 LI Zhe, HUANG Yao, WU Gang-qiang, et al. Properties of Short Carbon Fiber/Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer High Conductivity Composites Prepared by Spatial Confining Forced Network Assembly Method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(6): 1234-1242.