

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.023

夹杂长碳纤维束电路模拟结构复合材料吸波性能

万晓霞, 宋宇华, 李永波, 厉宁, 刘欣, 刘景, 黄成亮, 吴滨, 潘士兵

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要: 利用玻璃纤维夹杂长碳纤维束的方式制作两种碳纤维含量的电路屏, 真空成型的方式制作了测试样板。研究了电路屏中碳纤维含量、电路屏铺层结构以及铺层厚度对复合材料电磁吸收性能的影响。在本试验条件下, 随着碳纤维含量的增加复合材料样板的吸波效果有明显的增加; 在入射波方向, 碳纤维含量先递增再递减的铺层方式, 吸收雷达波效果优异; 采用此种梯度铺层方式, 且每种碳纤维含量的电路屏铺3层的梯度铺层方式制得的复合材料样板在25.6~40 GHz波段吸收效果最好。

关键词: 改性乙烯基酯树脂; 碳纤维; 电路屏; 复合材料; 吸波性能; 排布方式

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0120-05

Absorption Performance of Analog Structural Composites with Long Carbon Fiber Beam Circuits

Wan Xiaoxia, Song Yuhua, Li Yongbo, Li Ning, Liu Xin, Liu Jing, Huang Chengliang, Wu Bin, Pan Shibing

(Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China)

Abstract : Two kinds of carbon fiber content circuit screens were produced by fiberglass mixed with long carbon fiber bundles, and the test samples were made by vacuum molding. The effects of carbon fiber content, circuit screen paving structure and paving thickness on the electromagnetic absorption performance of composite materials were studied. Under the experimental conditions, the absorbing effect of the composite sample is increased obviously with the increase of carbon fiber content. In the direction of incident wave, the carbon fiber content increases first and then decreases, and the effect of absorbing radar wave is excellent. The composite sample prepared by the gradient lay-up method with 3 layers of each carbon fiber content circuit plate has the best absorption effect in the band of 25.6-40 GHz.

Keywords : modified vinyl ester resin ; carbon fiber ; circuit screen ; composites ; absorbing ; arrangement

雷达波隐形在隐身技术中占有重要位置, 从二战以来, 尤其是20世纪90年代以来的几次典型战争: 北约对南联盟的战争(科索沃战争)、海湾战争、美国攻打阿富汗的战争、英美联军攻打伊拉克的战争, 隐身技术得到空前应用^[1-2], 令不少国家政府不得不认真对待。隐身复合材料分为涂覆型(CRAM)和结构型(SRAM)吸波材料, 随着隐身技术的发展和军事需求, 结构型吸波材料由于其隐身和承载的双功能在国防高技术中占有重要位置^[3]。

结构型吸波材料是在先进复合材料基础上发展起来的功能复合材料, 复合材料向功能与结构一体化发展是复合材料研究与设计的重大进展。含有

纤维增强的树脂基功能复合材料在导电、电磁屏蔽、反射与吸收、电子包装或结构应用等方面有特殊的优越性^[4-6], 已成为功能型复合材料研究的主要内容。

电路模拟吸波材料是一种新型的结构吸波材料, 是由吸波材料中放置周期性导体条、栅或片构成的薄片(电路屏)制成。通过合理的结构设计, 它能产生高于普通吸波材料的吸波性能^[7]。国内对电路模拟结构以及频率选择表面等电路屏的研究很多, 夏少旭等^[8]用碳纤维设计交错结构频率选择表面(FSS), 研究了碳纤维二次活化条件对此电路屏制备的复合材料吸波性能的影响。蒋丽英等^[9]研

通信作者: 万晓霞, 硕士, 副研究员, 现从事隐身材料和涂料的研发与生产工作 E-mail: wanxiaoxia0208@163.com

收稿日期: 2021-03-02

引用格式: 万晓霞, 宋宇华, 李永波, 等. 夹杂长碳纤维束电路模拟结构复合材料吸波性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 120-124.

Wan Xiaoxia, Song Yuhua, Li Yongbo, et al. Absorption performance of analog structural composites with long carbon fiber beam circuits[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 120-124.

究了通过合理的设计电路屏尺寸,选择合适的电路屏材质使得吸波复合材料在其吸波和承载性能上均有大幅度的提高。

碳纤维是结构吸波材料中常用的吸收剂和增强体,由它制成的结构吸波材料已在隐身飞机和隐身兵器中得到广泛的应用,天津大学和哈尔滨工业大学对此研究较多^[10-13]。笔者采用长碳纤维束制备了感性电路屏,研究了碳纤维含量、铺层结构以及铺层厚度对复合材料样板吸波性能的影响,从而制备一种在 8 mm 波段宽频强吸收的复合材料样板。

1 电路模拟结构及仪器设备的引用与设计

1.1 主要原材料

碳纤维:兰州炭素厂;
改性乙烯基酯树脂:自制;
固化剂过氧化甲乙酮:市售;
玻璃纤维:南京玻璃纤维研究院。

1.2 主要仪器及设备

高速分散机:JFS-1500 型,常州耀凯科技有限公司;

电子天平:KD-2000NEC 型,福州科迪技术有限公司;

真空泵:淄博鑫诚机械有限公司;

反射率测试系统:自制。

1.3 试样制备

(1) 电路模拟结构设计。

长碳纤维束通过正交排布的方式均匀地分散于一层玻璃纤维织物中,这样的组合设定为一个电路模拟结构单元即电路屏,其排布平面图和剖面图如图 1、图 2 所示,其中, b 为每根碳纤维束的直径, d 为碳纤维之间的间距。通过控制间距 d 的大小来控制每块样板中碳纤维的含量,进而计算出每块电路屏中碳纤维质量比,其数据见表 1。

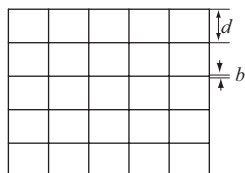


图1 碳纤维排布平面图

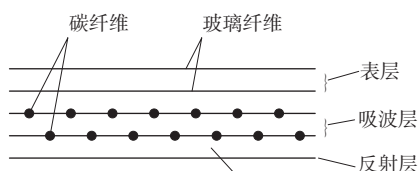


图2 碳纤维排布剖面图

表1 电路屏中碳纤维含量

编号	d/cm	碳纤维质量分数/%
m1	5	5.23
m2	3	7.95

(2) 试样制备。

笔者所用的复合材料为三层结构,表层、吸波层和反射层,其中表层和反射层为玻璃纤维布,吸波层由电路屏模块组成。将玻璃纤维布裁剪至 200 mm × 200 mm 正方形,同时将碳纤维束裁剪为 200 mm 的长度,按照图 1 的排布方式和表 1 的间距设计将碳纤维束排列于玻璃纤维布上,制作成两种碳纤维含量的电路屏模块。

试样的制备采用复合材料真空成型的方式,工艺流程如图 3 所示,胶料的配制按照树脂和固化剂质量比 7 : 1 进行,分散 20 min 后开始真空抽入。完成后继续保压 60 min,使胶料充分地浸润和固化,冷却后脱模,用水刀加工成 180 mm × 180 mm 的测试样板。

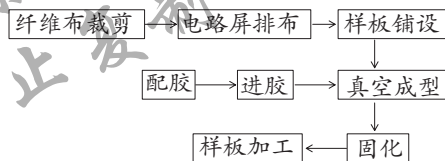


图3 测试样板制作流程

1.4 性能测试

按照 GJB 2038-1994 的规定,采用弓形测试法测量复合材料样板反射率。反射率的测量范围为: 25.6 ~ 40 GHz。试验样板尺寸为 85 mm × 85 mm, 测试装置如图 4 所示。

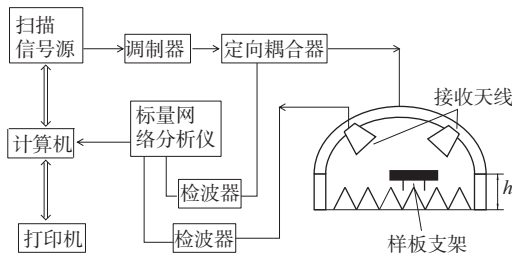


图4 反射率测试装置结构

2 试验结果及吸波性能的讨论

2.1 电路屏中碳纤维含量对吸波性能的影响

采用两种含量 ($m_1=5.23\%$, $m_2=7.95\%$) 的含碳纤维束的电路屏,分别对同一种碳纤维含量的玻璃布均匀铺层考察不同碳纤维含量对于吸波性能的影响,同时进行两种含量的碳纤维在雷达波入射方向上进行梯度铺层的探索试验,初步了解单一碳纤维含量和梯度含量对于雷达波吸收的情况。统一采用

三层纤维布铺层: m1-m1-m1 (1[#]), m2-m2-m2 (2[#]), m1-m2-m2 (3[#]), 真空成型了复合材料样板, 进行吸波性能测试, 结果如图 5 所示。

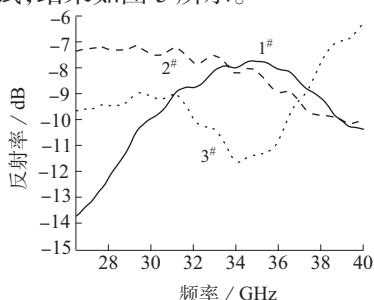


图5 不同碳纤维含量时复合材料吸波效果

由图 5 可以发现, 单一含量铺层为 1[#] 样板曲线, 在低频率点反射率比较低, 随着频率的增大, 没有出现反射率峰值, 反而在增大, 尤其在中心频率点附近, 反射率最大, 吸收效果最差。单一含量铺层为 2[#] 样板曲线, 随着频率的增大, 反射率有一定的下降, 由 -7.3 dB 降低到 -10 dB, 说明随着碳纤维含量的增加, 雷达波反射率在降低, 吸波效果增大。但是对于仅采用一种含量的碳纤维铺层, 两种样板对雷达波要达到宽频强吸收的性能难度均较大, 而 3[#] 样板的两种含量的梯度铺层设计在 32~36.5 GHz 处有低于 -10 dB 的低反射区域, 且在 34.5 GHz 的中心点位置出现最小反射率, 达到 -11.5 dB, 吸波效果比较好。电路模拟结构电路屏设计的电磁反射机理可以用阻抗匹配理论来解释。但是此试验结果是否与阻抗匹配理论相符合还需要进一步的试验探索 [14-15]。

2.2 不同含量电路屏梯度排列结构对吸波性能的影响

在梯度铺层中, 含量为 m1, m2 的两种电路屏的铺层结构不同, 对复合材料样板的吸波性能也有一定影响, 设计试验, 铺层结构由入射波的方向, 依次按照 m1-m2-m2 (3[#]), m2-m1-m1 (4[#]), m2-m1-m2 (5[#]), m1-m2-m1 (6[#]) 的梯度顺序制备复合材料样板, 进行吸波性能测试和试验比较, 结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 4[#] 曲线整体效果不错, 低于 -10 dB 的带宽达到 7 GHz, 但是整个曲线向低频率方向移动, 最小反射率出现在 29.5 GHz 附近。5[#] 曲线在频率点为 26.5 GHz 处出现了最小反射率点达到 -22 dB, 但是随着频率升高, 反射率突然增强, 最大反射率出现在中心点位置, 达到 -6 dB, 同时低于 -10 dB 的带宽只有 4 GHz。3[#] 和 6[#] 的碳纤维铺层结构的反射率曲线形状比较接近, 曲线的形状与

中心点的位置最完美, 3[#] 样板的曲线的峰值略小, -10 dB 以下的带宽略窄, 整体的雷达波吸收效果略差; 6[#] 样板曲线在整个试验中效果最好, -10 dB 以下的带宽 5 GHz 左右, 最小反射率点在 33.5 GHz 附近达到 -16 dB。比较发现, 从雷达波的入射方向上, 碳纤维的含量先逐步增大再减小, 其电磁衰减最大、发射率最小、吸波效果最好。这是因为, 由玻璃纤维布和树脂组成的表层, 可以使得入射波阻抗和自由空间的波阻抗相匹配, 可以使入射的电磁波较少地从表面反射, 尽可能地进入材料内部, 进入的电磁波在吸收层发生相互作用: 反复的反射和透射, 逐步消耗掉, 这也与阻抗匹配理论相符合。

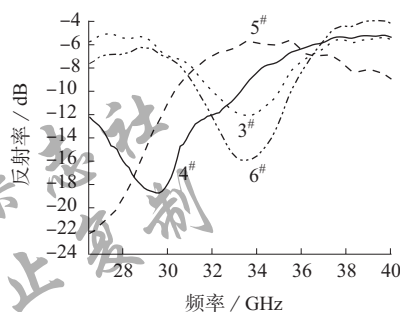


图6 不同铺层结构时复合材料的吸波效果

2.3 电路屏铺层厚度对吸波性能的影响

以上试验探索均是在每种含量碳纤维只有一个组合也就是一个电路屏的情况下进行的, 此时碳纤维在整个复合材料中占据的比例较小, 想要进行碳纤维含量增大试验可以通过两种途径来实现, 一是增加每束碳纤维的根数, 二是增加碳纤维的铺层数。根据电磁学理论, 当雷达波垂直入射时, 碳纤维对电磁波的吸收主要是由谐振效应引起的。由电阻功率的公式, 知道在电流一定的情况下, 复合材料中碳纤维束的电阻越大其吸波效果越好 [14]。如果增加每股碳纤维的根数会使其截面积增大, 电阻变小, 所以采用第二种方法即铺设多层电路屏, 以达到增加复合材料电阻的目的。结合 2.3 的结论, 选定铺层厚度分别为 1 层 m1-m2-m1 (6[#]), 2 层 m1-m1-m2-m2-m1-m1 (7[#]), 3 层 m1-m1-m1-m2-m2-m2-m1-m1 (8[#]), 5 层 m1-m1-m1-m1-m1-m2-m2-m2-m2-m1-m1-m1-m1-m1 (9[#]) 进行制样, 测试其吸收性能, 进行试验对比。结果如图 7 所示。

由图 7 可以发现, 随着碳纤维铺层厚度的增加, 峰值和带宽均增加, 符合上述理论。但是当层数增加到 5 层时由 9[#] 曲线所示, 虽然吸收率也是大于 10 dB, 但是其峰值减小而且向低频方向偏移, 所

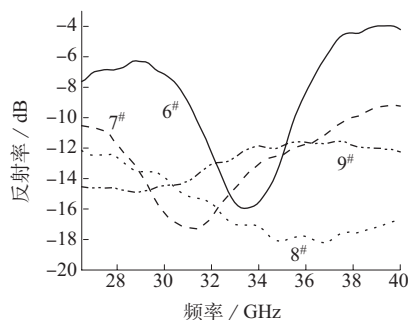


图7 不同铺层厚度时的复合材料吸波效果

以设计电路屏铺层时要根据设计频率来选择最佳的铺层数。在本试验的条件下,每种含量的电路屏铺3层(8#曲线所示)的梯度铺层结构制得的复合材料样板吸波效果最好,整个波段反射率全部低于-12 dB,最小反射率出现在35~37 GHz附近,达到-18 dB。

2.4 阻抗匹配理论

阻抗匹配这个概念来源于传输线上^[15-17],以此来达到所有高频的电磁波均能传递至负载点的目的,负载阻抗与传输线的特性阻抗相等。此处,当雷达发射的电磁波进入样板时,可以把样板看成传输线,从而可以将传输线的理论用来解释雷达波和样板的相互作用,雷达波在样板的表层和吸收层发生反射和透射的作用,反射与透射的电磁波的多少直接影响因素就是样板本身。吸波材料的研制过程中,阻抗匹配是其中一个非常关键性的问题。沿着入射波的方向,单层的吸波材料在测试过程中,是电磁波由空气入射到吸波材料表面,所以得到:

$\Gamma(d) = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0}$, 其中: η 为吸波材料的特性阻抗, η_0 为空气(真空)的特性阻抗。

要使得电磁波入射到吸波材料阻抗得到完全的匹配,要求 $\Gamma=0$, 也就是要满足 $\eta = \eta_0 \left(\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \right)$, 即吸波材料的阻抗等于自由空间的阻抗。其中: μ 为吸波材料的磁导率, μ_0 为空气(真空)的磁导率, ε 为吸波材料的介电常数, ε_0 为空气(真空)的介电常数。

这个理想状态下电磁波没有反射,电磁波全部进入吸波材料中。这种完全匹配的理想情况,在实际的试验制备中无法达到,只能去无限的接近。

3 结论

(1) 相对于一种碳纤维含量的均匀铺层,随着碳纤维含量的增加,能够提高复合材料样板的吸波效果,但是要达到宽频强吸收的性能难度比较大。

(2) 根据阻抗匹配理论,电路屏中碳纤维含量由表层到反射层逐步增大再减小的梯度铺层结构,可以使入射的电磁波较少的从表面反射,尽最大可能进入到吸波材料内部,而进入材料内部的电磁波经过反复的透射和反射被逐步消耗掉,从而达到很好的吸波效果。

(3) 根据电磁学理论,在本试验的条件下,每种含量的电路屏5层的梯度铺层结构制得的复合材料样板吸波效果最好,整个波段反射率全部低于-12 dB,最小反射率出现在35~37 GHz附近,达到-18 dB。

参考文献

- [1] 吴朝阳. 飞机隐身技术及其雷达对抗措施[J]. 科技风, 2017(20):16.
Wu Zhaoyang. Aircraft stealth technology and radar counter-measures[J]. Technology Wind, 2017(20):16.
- [2] 代红, 何丹. 飞机隐身与雷达反隐身技术综述[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(6):40-43.
Dai Hong, He Dan. A review of aircraft stealth and radar[J]. Anti-Stealth Technology, 2016, 31(6):40-43.
- [3] 胡传忻. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004:16-22.
Hu Chuanxin. Stealth coating technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:16-22.
- [4] 陈雪刚, 叶瑛, 程继鹏. 电磁波吸收材料的研究进展[J]. 无机材料学报, 2011, 26(5):449-457.
Chen Xuegang, Ye Ying, Cheng Jipeng. Recent progress in electromagnetic wave absorbers[J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(5):449-457.
- [5] 谢炜, 程海峰, 楚增勇, 等. 新型吸波碳纤维的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(9):40-43.
Xie Wei, Cheng Haifeng, Chu Zengyong, et al. Development of new radar absorbing carbon fiber[J]. Materials Review, 2007, 21(9): 40-43.
- [6] Sha Y, Jose K A, Neo C P, et al. Experimental investigations of microwave absorbed with FSS embedded in carbon fiber composite[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 32(4):245-249.
- [7] Chakravarty S, Mittra R, Williams N R. Application of a micro genetic algorithm (MGA) to the design of broad-band microwave absorbers using multiple frequency selective surface screens buried in dielectrics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 50(3):284-296.

- [8] 夏少旭,李利伟,史燕妮,等. 活性碳纤维结构对电路屏复合材料吸波性能影响研究[J]. 功能材料,2015,24(46):24 053–24 062.
Xia Shaoxu, Li Liwei, Shi Yanni, et al. Effect of ACF micro-structure on microwave absorption properties of ACF felt screen composites[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 24(46):24 053–24 062.
- [9] 邢丽英,蒋诗才,李斌太. 含电路模拟结构陷阱式吸波复合材料研究[J]. 材料工程,2003(12):29–32.
Xing Liying, Jiang Shicai, Li Bintai. Study on the microwave-absorbing composite in trap type with circuit analogue[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(12):29–32.
- [10] 李红彬,孙志杰,陈淳. 含碳纤维格栅结构吸波复合材料的实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2007(5):24–27.
Li Hongbin, Sun Zhijie, Chen Chun. Experiment study of carbon fiber grid structural for wave absorbing composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2007(5):24–27.
- [11] 郭伟凯. 碳纤维排布方式对结构吸波材料吸波性能的影响及其机理分析[D]. 天津:天津大学,2004.
Guo Weikai. The influence and structure analysis of carbon fiber exhaust on the absorption performance of structural absorbent materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [12] 郭伟凯,李家俊,赵乃勤,等. 纤维类雷达波吸收剂的研究进展[J]. 宇航材料与工艺,2003,33(6):12–18.
Guo weikai, Li Jiajun, Zhao Naiqin, et al. Development of fibers as radar wave absorbers[J]. Aerospace Materials and Technology, 2003, 33(6):12–18.
- [13] 赵乃勤,曹婷,李家俊,等. 碳纤维(炭毡)/树脂复合吸波材料的研究[J]. 复合材料学报,2003,20(5):63–67.
Zhao Naiqin, Cao Ting, Li Jiajun, et al. Microwave absorbing properties of carbon fiber (carbon fiber felt)/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(5):63–67.
- [14] 莫红松,吕潇,李光,等. 复合材料中碳纤维的铺设方式对吸波性能的影响[J]. 功能材料,2007,38(ZK):3 063–3 066.
Mo Hongsong, Lyu Xiao, Li Guang, et al. The microwave absorption performance of composites with various aligned carbon fiber[J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(ZK):3 063–3 066.
- [15] 张军. 透波材料匹配层研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.
Zhang Jun. Research on matching layer of microwave transmitting materials[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [16] 陆晓欣. 碳纤维增强树脂基复合材料表面阻抗调制与结构吸波性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
Lu Xiaoxin. Research on the surface impedance modulation and structural absorbing properties of carbon fiber reinforced plastic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [17] 陶睿,刘朝辉,班国东,等. 空气层匹配碳纤维吸波涂层的吸波性能[J]. 表面技术,2017,46(10):201–206.
Tao Rui, Liu Zhaohui, Ban Guodong, et al. Absorbing properties of carbon fiber absorbing coating matched with air layer[J]. Surface Technology, 2017, 46(10):201–206.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.net,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账户汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

《工程塑料应用》杂志社