

电路模拟吸波材料带宽拓展方法探索

姚承照^{1,2} 张 晨² 冯志海² 李仲平² 李嘉禄¹

(1 天津工业大学,天津 300160)

(2 航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

文 摘 电路模拟吸波材料有一定的频率选择特性,电磁波有效损耗的带宽通常比较窄,通过多层电路屏、掺杂电损耗介质、磁损耗介质层组合、磁电损耗组合的方法,对电路模拟结构吸波材料在 2~18 GHz 区间电磁损耗带宽的拓展进行了初步探索。结果证明:四种方法都能够提高电路模拟吸波材料的有效吸波带宽,并能够不同程度地提高材料的吸波效率。多层电路屏、掺杂电损耗介质的多层电路屏、组合磁损耗介质层的多层电路屏、组合磁损耗介质层和电损耗介质的多层电路屏,其反射率 -5 dB 的带宽较单层电路屏的 1.2 GHz 分别增加了 6.4、10.6、9.6、10.6 GHz,最小反射率分别达到 -8、-10、-12、-25 dB。

关键词 电路模拟吸波结构,多层电路屏,电损耗介质,磁损耗介质,带宽拓展

Exploration of Bandwidth Development of Circuit Analog Absorbing Materials

Yao Chengzhao^{1,2} Zhang Chen² Feng Zhihai² Li Zhongping² Li Jialu¹

(1 Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

(2 National Key Laboratory of Advance Functional Composite Materials, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Circuit analog absorbing material shows frequency selecting property, the frequency bandwidth of effective radar waves loss was usually narrow. Through multilayer circuit analog screen, doping electric loss medium, magnetic loss medium layer combination, magnetic and electric loss medium combination methods, the preliminary exploration of the circuit analog absorbing materials in 2 - 18 GHz sector electromagnetism loss band width development was carried out. The experiment proves that the a.m. four methods can all enhance the circuit analog structure to absorb radar wave frequency bandwidth effectively and can improve the absorbing efficiency. The width of lower than -5 dB spectrum of multilayer circuit analog screen, multilayer circuit analog screen with doping electric loss medium, multilayer circuit analog screen with magnetic loss medium layer, multilayer circuit analog screen with doping electric loss medium and magnetic loss medium layer is widened by 6.4 GHz, 11.8 GHz, 10.8 GHz, 11.8 GHz respectively relative to 1.2 GHz for single circuit analog screen. The minimal reflecting rates reaches -8 dB, -10 dB, -12 dB, -25 dB respectively.

Key words Circuit analog absorber, Multilayer circuit analog screens, Electric loss medium, Magnetic loss medium layer, Bandwidth development

1 引言

在复合材料制备过程中引入电路模拟吸波结构(电路屏)可以制作出在一定频率范围内具有吸波能力的结构隐身复合材料,其优点是在不增加材料质量的情况下,实现特定频率的雷达隐身功能,该技术适应复合材料的一体化成型技术,可以实现材料的

免维护和多功能一体化,是轻质、高效多功能复合材料实现的一种有效技术途径^[1~2]。

电路模拟吸波结构是基于频率选择表面原理的一种电磁波损耗技术^[3~4],在入射电磁波的作用下,金属条或导电纤维的表面产生趋肤电流,通过欧姆损耗将电磁波能量转化为热能而损耗掉。另外,入射电

收稿日期:2008-07-08

作者简介:姚承照,1971年出生,博士研究生,主要从事多功能复合材料的研究。E-mail: yao_c_z@126.com

磁波除了产生电损耗之外,在每个栅格之间部分电磁波会经衍射而发生类似相位相消的现象,进一步损耗电磁波的能量。

电路模拟吸波结构由栅格单元和间隔层构成,能反射一个或多个频率,而对其他频率是透明的。对于方格形排布的电路屏,栅格的间距是一定的,相对于电磁波在微波频段内的波长,它只对应着一个频率,在这个频率下,电磁波的相位对消达到最大值,反射衰减程度最大,而对其他频率的作用则明显减小^[5]。因此,其有效电磁波损耗的带宽通常比较窄。

电路模拟结构吸波材料的有效阻抗由材料类型、电路屏尺寸、间距等决定,因此可以通过改变材料的类型、电路屏的结构来拓展电磁波的损耗带宽。本文通过多层电路屏、掺杂电损耗介质、组合磁损耗介质层、磁电损耗组合等不同方法,制备了不同结构的吸波材料试样,测试和分析了这些试样的雷达反射特性,对电路模拟吸波材料在 2~18 GHz 电磁损耗带宽的拓展方法进行了初步探索。

2 实验

2.1 原材料

增强织物:EW160-90 无碱玻璃纤维平纹布。
导电纤维:T300 碳纤维(6K)。基体树脂:酚醛树脂。
损耗介质:磁损耗(磁性铁粉)、电损耗(纳米碳)。

2.2 试样制备

选择如图 1 所示的感式电路屏,材料的制备流程

如图 2 所示,试样编号及对应的结构参数见表 1。

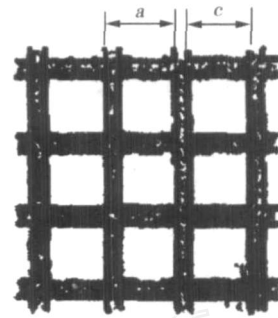


图 1 感式电路屏示意图

Fig 1 Diagram of inductive circuit analog screen

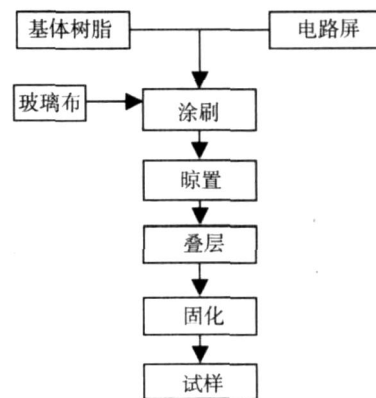


图 2 材料的制备流程图

Fig 2 Drawing of absorbing material

表 1 试样编号及结构

Tab 1 Serial number and structure of samples

试样编号	材料结构	布纤维组合方式 ¹⁾	基体配方(质量比)	试样尺寸/mm
MR-1	磁损耗介质层	3层玻璃布叠加	酚醛树脂 磁性铁粉 = 1 1	180 × 180 × 0.7
AR-1	电路模拟结构	12/Y/8	酚醛树脂	180 × 180 × 4.1
AR-2	电路模拟结构	4/W/4/X/4/Y/4/Z/4	酚醛树脂	180 × 180 × 4.2
EA-1	含电介质的电路模拟结构	12/Y/8	酚醛树脂 纳米碳 = 100 3	180 × 180 × 4.2
EA-2	含电介质的电路模拟结构	4/W/4/X/4/Y/4/Z/4	酚醛树脂 纳米碳 = 100 3	180 × 180 × 4.3
M-AR-2	MR-1与AR-2组合	-	-	180 × 180 × 4.9
M-EA-2	MR-1与EA-2组合	-	-	180 × 180 × 5.0

注:1)4/W/4/X/4/Y/4/Z/4式中,W、X、Y、Z分别表示电路模拟的结构形式,其中W结构的a、c分别是15mm、13mm;X结构的a、c分别是19mm、17mm;Y结构的a、c分别是23mm、21mm;Z结构的a、c分别是27mm、25mm。4/W/4/X/4/Y/4/Z/4表示将刷有基体的玻璃布每叠加4层,加入一个电路屏,加入的顺序分别是W、X、Y、Z的结构形式,同理12/Y/8表示将刷有基体的玻璃布叠加12层,加入Y结构的电路屏后,再叠加8层刷有基体的玻璃布。

2.3 测试方法

吸波材料反射率的测量标准为GJB2038—94,采用反射率弓形测试法,试样的底面为金属,测试系统的工作方式为扫频,可测量频率范围为2~18GHz,测量动态范围-40dB。

2.4 损耗带宽的界定

有效损耗带宽指定在2~18GHz试样反射率

-5dB的累积频带宽度,高损耗带宽指定在2~18GHz试样反射率-10dB的累积频带宽度。

3 结果与讨论

3.1 试验结果及分析

3.1.1 单一损耗材料

单一磁损耗介质层和单层电路屏反射率曲线见图3、图4。从图3可以看出:单一磁损耗介质层MR

-1的反射率曲线,近乎-45°向下,随频率的增加,损耗性能增强,-5 dB的频率区间约在13.6~18 GHz,其带宽也仅4.4 GHz。从图4可以看出单层电路屏AR-1的反射率在2~16.8 GHz均没有达到-5 dB,也就是说该结构在2~18 GHz,其反射率-5 dB的频带宽度只有1.2 GHz。由此可见,单一磁损耗介质层和单层模拟电路结构在2~18 GHz反射率-5 dB的带宽都很不理想。

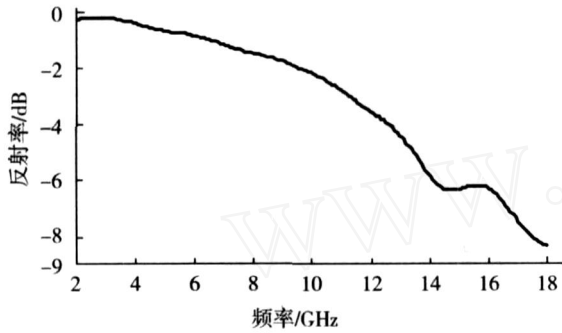


图3 单一磁损耗介质层反射特性曲线
Fig 3 Microwave reflective property curve of magnetic loss medium layer

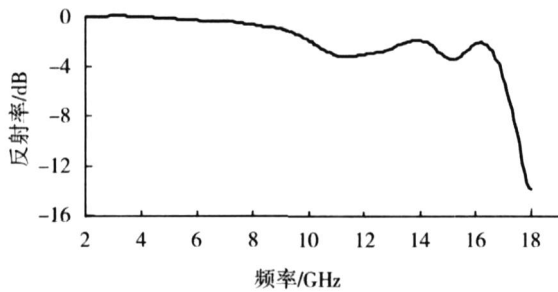


图4 单层电路屏反射特性曲线
Fig 4 Microwave reflective property curve of single circuit analog screen

3.1.2 多层电路屏结构

多层电路屏与单层电路屏反射率曲线见图5。

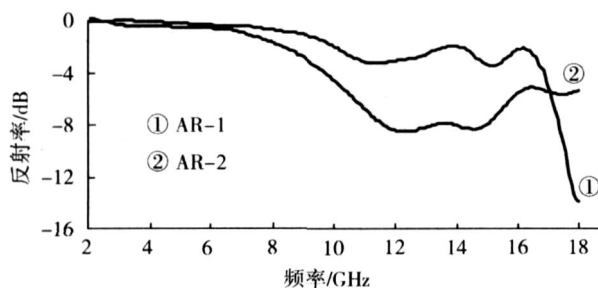


图5 单层电路屏与多层电路屏反射特性曲线
Fig 5 Microwave reflective property curve of single and multilayer circuit analog screen

可以看出:AR-2大约自10.4~18 GHz,反射率均能够-5 dB,其中在12和15 GHz频率附近,反

射率达到-8 dB以下,有效损耗带宽和损耗效能较AR-1都有明显增加。由此可见,多层电路屏不仅能够有效拓展材料的吸波带宽,同时可以提高材料的吸波效率。

3.1.3 掺杂电损耗介质

含有电损耗粒子和不含电损耗粒子的多层电路屏的反射率曲线如图6所示。可以看出:含有电损耗介质损耗的EA-2,大约自6.2~18 GHz,反射率均-5 dB,其中在8 GHz附近,反射率达到-10 dB以下,有效损耗带宽和损耗效能较单纯的AR-2都有明显增加。由此可见,电损耗介质损耗粒子的添加,能够提高多层电路屏的吸波带宽和吸波效率。

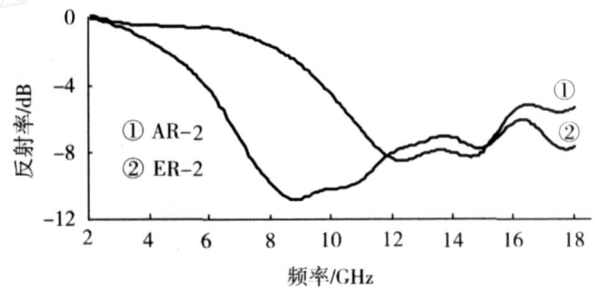


图6 电损耗介质对多层电路屏反射特性的影响
Fig 6 Influence of electric loss medium on reflective property of multilayer circuit analog screen

3.1.4 磁损耗介质层组合

组合磁损耗介质层和没有组合磁损耗介质层的多层电路屏的反射率曲线如图7所示。

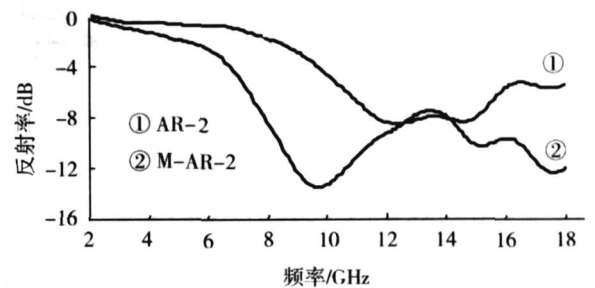


图7 磁损耗介质层对多层电路屏反射特性的影响
Fig 7 Influence of magnetic loss medium layer on reflective property of multilayer circuit analog screen

可以看出:M-AR-2大约在7.2~18 GHz,反射率均-5 dB,在9和17.2 GHz附近,反射率达到-12 dB以下,有效损耗带宽和损耗效能较AR-2都有明显增加。由此可见,磁损耗介质层的组合,能够提高多层电路屏的有效损耗带宽和损耗效果。

3.1.5 磁电损耗介质组合

组合磁损耗介质层和没有组合磁损耗介质层的含有电损耗介质的多层电路屏的反射率曲线如图8所示,可以看出:M-EA-2大约在6.2~18 GHz,反

射率均能够 -5 dB,其带宽与 EA-2相似,但吸波效率大幅度提高,大约在 $8 \sim 18$ GHz,反射率均达到 -10 dB以下,在 13.8 GHz附近,具有最大的吸波效能,达到 -25 dB,而 EA-2试样反射率 -10 dB以下带宽仅有 2 GHz(频率范围 $8 \sim 10$ GHz)。因此,磁损耗介质层的组合可以大幅提高该结构的吸波效率,并能够拓展高损耗的带宽。

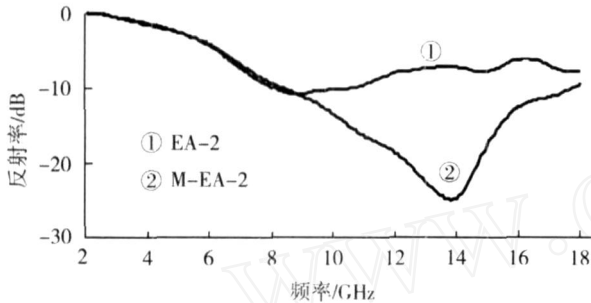


图 8 磁损耗介质层对含电损耗介质多层电路屏反射特性的影响

Fig 8 Influence of magnetic loss medium layer on reflective property of multilayer circuit analog screen with electric loss medium

3.2 机理分析

电路模拟吸波材料的吸波机理可采用传输线理论进行分析。按照传输线理论,传统多层吸波材料可以等效为如图 9 所示的电路模型。

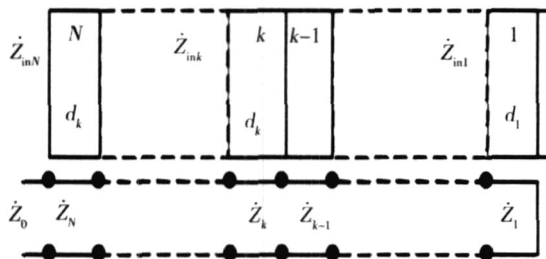


图 9 多层吸波材料结构等效电路

Fig 9 Diagram of multilayer absorbing material

当加入电路屏以后,电路模型演化为图 10 的形式,对于其中 Z_{in1} ,当 $d_1 < \lambda/4$ 时,电路为感性,相当于并联一个电纳,起到补偿作用,使总输入电纳减小,更有利于阻抗匹配。多层电路模拟吸波材料,每加入一个电路屏,相当于在电路模型的相应位置并联了一个电纳;在材料中掺杂电损耗介质和与磁损耗介质层相组合则相当于改变电路模型中每层的等效阻抗。这些因素的改变,都将影响材料整体的等效输入阻抗,扩大了材料整体等效输入阻抗的变化范围,从而可能在更大的带宽中取得与空气阻抗相匹配的等效输入阻抗,获得良好的吸波性能。

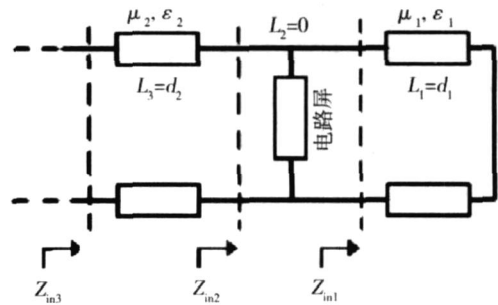


图 10 电路模拟吸波材料等效电路

Fig 10 Diagram of circuit analog absorbing material

3.3 问题讨论

对于组合了磁损耗介质层和电损耗介质的多层电路屏,吸波性能的影响因素显著增多,除材料的层数、分层的顺序、各层的厚度、电磁参数外,电路屏的结构尺寸、铺放位置及材料类型等对材料吸波性能都有很大影响,另外,对于碳纤维制作的电路屏结构,其电磁学计算模型的相关研究很少。

4 结论

多层电路屏、掺杂电损耗介质、组合磁损耗介质层、磁电损耗组合的方法能够有效拓展电路模拟吸波材料的有效吸波带宽,并不同程度地提高材料的吸波效率,其中,多层电路屏、掺杂电损耗介质的多层电路屏、组合磁损耗介质层的多层电路屏、组合磁损耗介质层和电损耗介质的多层电路屏,其反射率 -5 dB 的带宽较单层电路屏的 1.2 GHz 分别拓展了 6.4 、 10.6 、 9.6 、 10.6 GHz,最小反射率达到 -8 、 -10 、 -12 、 -25 dB。组合磁损耗介质层与电损耗介质的多层电路屏,其反射率 -5 dB 的带宽虽与掺杂电损耗介质的多层电路屏相近,但 -10 dB 的带宽达到 10 GHz,具有高损耗的优势。

参考文献

- 1 邢丽英,蒋诗才,李斌太.含电路模拟结构吸波复合材料.复合材料学报,2004;21(6):27~32
- 2 Jiang Shicai, Xing Liying, Li Bintai. Study on a novel radar absorbing structure composite. Materials Science Forum, 2005; 475~479: 1 023~1 027
- 3 张朝发,李焕喜,吕明云.吸波材料与 FSS 复合的隐身技术研究进展.材料导报,2007;21(7):118~121
- 4 阮颖铮.雷达截面与隐身技术.北京:国防工业出版社,1998:285~290
- 5 Lee SW, Zarrillo G, Law D L. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates. IEEE Trans Antenna Propagate, 1982; AP-30(5):904~906
- 6 饶克谨,赵柏林,高正平.电路模拟吸波材料——原理、特性及设计方法.电子科技大学学报,1995;24(2):164~170

(编辑 李洪泉)