

用活性炭毡制备电路模拟吸波材料的研究*

赵乃勤 郭伟凯 李家俊

(天津大学材料学院,天津 300072)

文 摘 研究了以粘胶基活性碳纤维为导电材料制备单层电路模拟吸波材料的微波吸收特性。结果表明:感性电路屏在毡条宽为 5 mm、 a/b 为 2 时吸波性能最好,在 8 GHz ~ 18 GHz 内达到 -10 dB 以下的反射衰减,最大衰减峰达 -30 dB 以上;容性电路屏在毡块间距为 5 mm、 a/b 为 1.4 时吸波性能最好,在 8 GHz ~ 18 GHz 内达到 -10 dB 以下的反射衰减,最大衰减峰值 -30 dB 以上。可用粘胶基活性碳毡制备质轻价廉的雷达吸波材料。

关键词 吸波材料,电路模拟,粘胶基碳毡

Research on Single-layer Circuit Analog Absorbing Materials Utilizing Activated Carbon Fiber Felt

Zhao Naiqin Guo Weikai Li Jiajun

(School of Material Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract Microwave absorbing properties of single-layer circuit analog absorbing materials utilizing activated carbon fiber (ACF) felts as the conducting material are studied. Experimental results show that as felt width and a/b are 5 mm and 2 respectively, inductive circuit analog absorber gains the best absorbing properties and that the reflection loss in 8 GHz to 19 GHz frequency is below -10 dB and the maximum peak is below -30 dB. As distance between felt width and a/b are 5 and 1.4 respectively, capacitive circuit analog absorbing gains the optimal absorbing characteristics; the reflection loss in same frequency is below -10 dB and the maximum peak is below -30 dB. So a new type of light microwave absorbing material is obtained when ACF felt are used.

Key words Absorbing materials, Circuit analog, Viscose-based carbon felt

1 前言

吸波材料是指能对电磁波产生衰减吸收作用的一种功能材料。吸波材料衰减电磁波的途径有三种:材料损耗、相位抵消和散射作用。按其成型和承载能力可分为涂覆型吸波材料和结构型吸波材料两类,而后者具有承载和吸波双重功能,是目前吸波材料发展的重要方向。

在吸波材料的发展过程中,新的设计理论层出

不穷。目前结构吸波材料设计主要方法有分层结构阻抗匹配设计(包括单层和多层)、分块结构调制相位设计、模拟电路原理设计和蜂窝结构吸波材料设计,它们各有不同的吸波机理和设计原则。

电路模拟吸波材料是把微带天线设计理论应用到吸波材料设计中形成的一种新型吸波材料。赵伯琳^[1]、高正平^[2,3]等初步研究过这种吸波材料的原理、特性和设计方法。以往的研究均采用金属片制

收稿日期:2004-03-01

*天津市自然科学基金重点资助项目:013 616 911

赵乃勤,1961年出生,博士生导师,主要从事功能材料的研究工作

备电路屏^[1-4],获得的单层吸波材料频带窄、密度大。本文用粘胶基活性碳毡制备了一系列单层电路模拟吸波材料。采用粘胶剂活性碳毡主要是:(1)粘胶碳纤维的横截面是不规则的,而异型截面的碳纤维对电磁波有优良的衰减吸收性能^[5];(2)经活化的碳纤维表面有许多微孔,与未活化的纤维相比,纤维表面粗糙度增加,利于对电磁波形成漫反射;(3)粘胶基碳毡价廉易得,可大大降低材料的成本。

2 实验

2.1 原料

S 玻璃纤维布由天津玻璃纤维总厂生产,在材料系统中起匹配阻抗的作用,同时也兼具增强体的作用^[5]。

基体采用 E-44(6101)型环氧树脂,无锡市树脂厂生产,介电常数为 3.0~3.4,损耗角正切为 0.01~0.03。在材料中封装电路屏与其它成分成为整体,同时又起传递应力的作用。固化剂采用低分子量聚酰胺,天津延安化工厂生产,型号为 203#,介电常数为 3.0~4.0,电阻率为 $10^{13} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 。环氧树脂与低分子量聚酰胺以 2:1 混合。

导电材料选用自制的粘胶基活性碳纤维针刺毡,单根活性碳纤维截面的扫描电镜照片见图 1,比表面积 $830 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

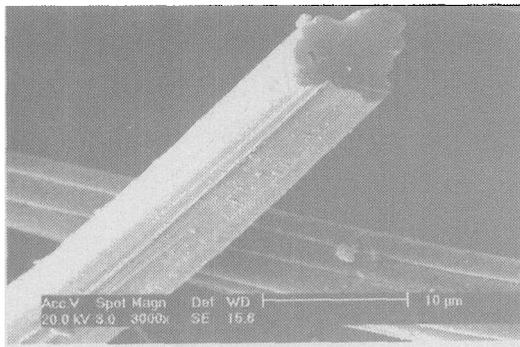


图 1 粘胶基活性碳纤维毡 SEM 照片
Fig. 1 SEM photo of viscose-based ACF

2.2 试样制备

将环氧树脂中加入固化剂,搅拌均匀、脱泡,浇注到半溢式模具中,模具中预置碳毡电路屏(如图 2 所示),平铺于模具中。在材料表面及模具底部各加一层 S 玻璃布。将浇注好的模具上模、封好,然后在 60°C 、 10 MPa 固化 2 h,得到 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 4$ mm 的正方板状试样。

mm 的正方板状试样。

电路屏结构尺寸常数如图 2 所示, a 表示两毡条间的净间距(感性)或毡块的宽度(容性); b 是毡条宽度(感性)或两毡块的净间距(容性)。

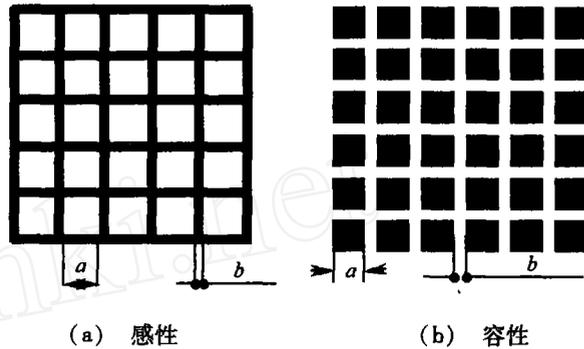


图 2 碳毡吸波材料试样结构示意图

Fig. 2 Schematic of absorbing materials based on carbon fiber felts

2.3 吸波性能测试

根据 GJB2038—94 标准^[6],北京航空材料研究院采用反射率弓形测试法,对试样进行了反射衰减的测试。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

3.1.1 以整块活性粘胶基碳毡为吸收剂的反射衰减性能

图 3 是整块粘胶基活性碳毡为吸收剂平铺时的反射衰减曲线,可见在中高频段有 -5 dB 左右的反射衰减,比其它基体(沥青基、丙烯腈基)的碳毡吸波材料的反射衰减要大。

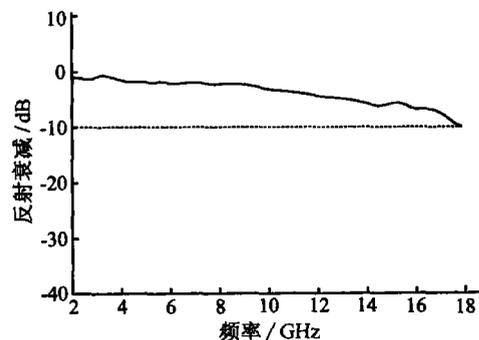


图 3 整块粘胶基活性碳毡吸波材料反射衰减扫频曲线
Fig. 3 Reflection loss of absorbing materials of block viscose-based ACF felt

3.1.2 参数 a/b 的影响

图4是 b 为 5 mm、 a/b 的值分别为 4、3、2、1.4 时的反射衰减曲线。从图4可以看出：(1) 活性碳毡制备的电路模拟吸波材料有良好的吸波性能，不论是容性还是感性，随着 a/b 比值的减小，-10 dB 以下的频带宽度呈扩张的趋势，最大吸收衰减也呈增大的趋势（感性电路屏稍有例外）；(2) 最大吸收

峰出现在 11 GHz ~ 14 GHz 之间；(3) 对感性电路屏，当 a/b 等于 2 左右时获得较好的综合性能，在 8 GHz ~ 18 GHz 有 -10 dB 以下的反射衰减，在 12.4 GHz 时最大反射衰减达到 -30.6 dB，对容性电路屏 a/b 比值为 1.4 获得较好的综合性能，在 12 GHz 时最大反射衰减达到 -31.7 dB；(4) a/b 值的变化对感性屏的影响敏感度要大于对容性屏的影响。

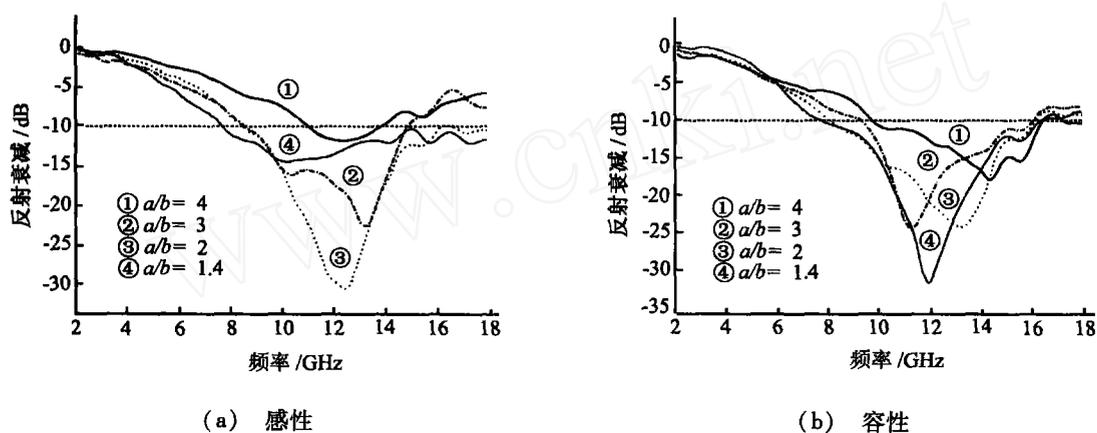


图4 a/b 变化时粘胶基活性碳毡吸波材料反射衰减扫频曲线

Fig. 4 Reflection loss of absorbing materials of viscose-based ACF felt with a/b change

3.1.3 参数 b 的影响

图5是 a/b 比值是 3、 b 的值分别为 7 mm、5 mm、3 mm 的电路模拟吸波材料的反射衰减曲线。从图5可以看出：

(1) 随着 b 的减小，不论是容性还是感性，-10 dB 以下的频带宽度呈扩张的趋势，最大吸收衰减也呈增大的趋势；

(2) b 值的变化对感性屏的影响敏感度要大于对容性屏的影响；

(3) 总体上吸收曲线主要在 11 GHz ~ 13 GHz 出现最大吸收峰，分别在高频段的与在低频段的吸收并不对称，在高频段(14 GHz 以后)优于低频段时(2 GHz ~ 6 GHz)的吸波性能。

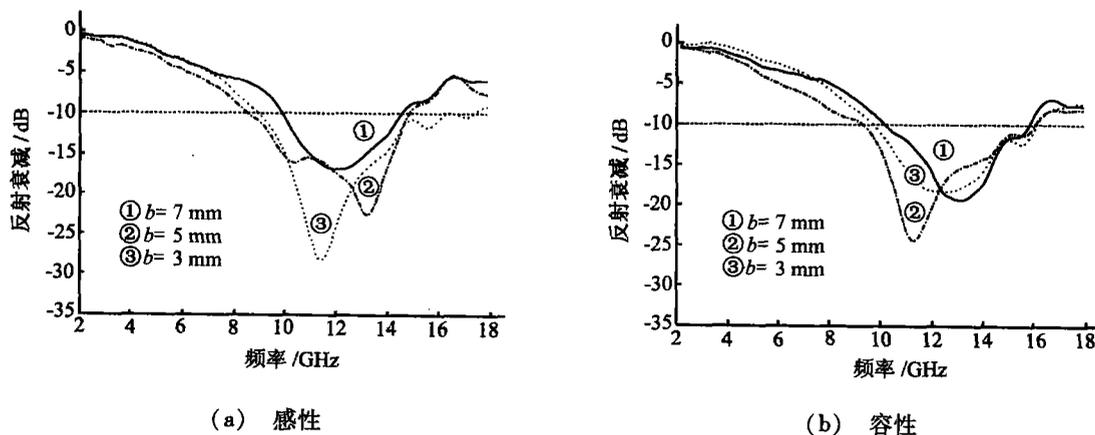


图5 b 变化时粘胶基活性碳毡吸波材料反射衰减扫频曲线

Fig. 5 Reflection loss of absorbing materials of viscose-based ACF felt with b change

3.2 吸波机理分析

由于所用的粘胶基碳纤维毡截面是不规则形状(见图1),表面沟槽十分明显,这种异型截面形状的碳纤维对电磁波具有很好的衰减作用,用这种纤维制得的碳毡具有三向织物结构,这种三向织物就象微波暗室结构一样,有许许多多微小的角锥,使入射的雷达波产生散射,经多次散射作用之后,雷达波被吸收掉,从而达到良好的吸波效果。有研究表明,异形截面碳纤维不仅具有非常高的介电损耗,而且具有比较高的磁损耗。异形截面碳纤维所具有的磁损耗应该是电与磁的耦合效应导致的^[7]。另外,粘胶基碳纤维的碱金属含量低($<0.01\%$),而目前的聚丙烯腈基碳纤维的碱金属含量高达 0.1% 数量级。高含量的碱金属是碳氧化的催化剂,而且在较低温度下发生离子化并使其周围空间的电子浓度激增,从而使雷达反射截面(RCS)扩大并干扰微波通讯。

经活化的碳毡,活化后纤维表面出现了许多微孔结构,增加了纤维表面的粗糙度,使入射到纤维表面的电磁波产生更多的漫反射,从而增大了材料的反射衰减。

对于用活性粘胶基碳毡制备的感性电路屏的电路模拟材料,反射衰减曲线的趋势大致相同。以碳毡条宽度为 3 mm 的试样曲线为例,碳毡厚度为 2 mm ,碳毡把整个感性电路屏分成若干个小室,对每个小室来说,它相当于一个谐振腔,电磁波在腔内不断的来回反射,由于粘胶基活性碳毡的特殊结构,使人射其中的电磁波损耗衰减掉。谐振腔有一个特性,对大于截至波长的电磁波不能在其中传输,即不能来回振荡,在碳毡上几乎没有损耗^[8],所以在低频段,反射衰减很小,如在 $2\text{ GHz} \sim 4\text{ GHz}$ 几乎没有吸收,在较高频段 8 GHz 以后,几乎都在 -10 dB 以下。当把许多这样的小室排成阵列,相当于同频率的一系列相干波源,不同波之间相互干涉,相位抵消,调节小室的大小可获得最大的损耗,即出现曲线中的最大吸收峰。当 a/b 值越小时,在整个试样平面上的小室数量就越多,相干波源数也就越多,反射衰减增加。但也并非相干波源数越多越好,如曲线 $a/b=1.4$ 时,最大吸收反而变小。从整块碳毡的吸收曲线也可得出, a/b 存在一最佳值可使损耗衰减综合性能最好。因为整块碳毡可看成是 $a/b=0$ 时,

即 $a=0$ 的情况。

对于容性电路屏电路模拟材料,碳毡块之间相互独立。对单个小块来说,感生的电场(二次电场)在毡块边沿最强,在毡块两端的场相对于基板可分成法向分量和切向分量,切向分量与外部电磁波的电场大小相等,相位相反。当毡块长度为 $\lambda/2$ 时,毡块两端相位相反,把毡块组合为阵列时,两毡块之间电场相位相反,通过相位抵消,消耗衰减电磁波最大^[8],间距 b 一定时, a/b 值越小,试样内的毡块数就越多,相位抵消就越多,损耗也就越大。

4 结论

(1)粘胶基活性碳毡对雷达波具有较好的衰减作用,用它制备的单层电路模拟吸波材料不管是容性还是感性都可在 $8\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$ 频率范围内达到 -10 dB 以下的反射衰减。

(2)感性电路屏在毡条宽为 5 mm 、 a/b 为 2 时吸波性能最好。在 $8\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$ 内达到 -10 dB 以下的反射衰减,最大衰减峰达 -30 dB 以上。

(3)容性电路屏在毡块间距为 5 mm 、 a/b 为 1.4 时吸波性能最好,在 $8\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$ 内达到 -10 dB 以下的反射衰减,最大衰减峰达 -30 dB 以上。

参考文献

- 1 饶克瑾,赵柏琳,高正平. 电路模拟吸收材料——原理、特性及设计方法. 电子科技大学学报,1995;24(2):164~170
- 2 高正平,华宝家. 电路模拟多层雷达吸收波材料的设计. 宇航材料工艺,1996;26(3):20~23
- 3 高正平,饶力. 电路模拟技术在吸波结构中的应用. 电子科技大学学报,1998;27(2):136~139
- 4 Lee S W, Zarrillo G, Law D L. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates. IEEE Trans Antenna Propagat,1982;AP-30(5):904
- 5 马铁军. 碳纤维毡类电磁功能复合材料的研究. 天津大学博士学位论文,1998
- 6 GJB2038—94《RAM反射率弓形测试法》
- 7 赵东林,沈曾民,迟伟东. 碳纤维及其复合材料的吸波性能和吸波机理. 新型炭材料,2001;16(2):16
- 8 李绪益. 电磁场与微波技术(下册). 第二版. 广州:华南理工大学出版社,2000:142

(编辑 吴坚)