

Research of Carbon Fibre Absorbing Material Based on Impedance Matching

Yehua Li^{*}, Daqing Huang, Shan He, Hongfei Cheng, Youqiang Shi

Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing, China

Email address:

rongchuanligang@163.com (Yehua Li), hdqbiam@163.com (Daqing Huang), biamhs333@sina.com (Shan He),

chenghongfei1989@16.com (Hongfei Cheng), npusyq@163.com (Youqiang Shi)

^{*}Corresponding author

To cite this article:

Yehua Li, Daqing Huang, Shan He, Hongfei Cheng, Youqiang Shi. Research Of Carbon Fibre Absorbing Material Based On Impedance Matching. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 5, 2016, pp. 324-329. doi: 10.11648/j.sd.20160405.22

Received: September 8, 2016; **Accepted:** November 1, 2016; **Published:** November 5, 2016

Abstract: The carbon fibre has a good characteristic of electrical conductivity. When cut short and dispersed, it reacts as electric dipole or harmonic oscillator to radar wave. This paper blends the short carbon fibre with ethoxyline resin, and makes films by spraying the blend on prepreg which made by glass fibre and resin, then measures the EM parameters with the free-space method, and designs the low reflectivity absorbing material from 8GHz to 18GHz by matching impedance and calculating the reflectivity of multilayer films. Adjusting the kinds and quantities of matching layers can shift the absorbing frequency bands, and become better absorbing respective in X-band and Ku-band. The absorbing material samples are made by vacuumizing and heating method, and their reflectivity correspond to the designed result. The designing method and absorbing material made in this paper can be referred in engineering application.

Keywords: Short Carbon Fiber, Free-Space Method, Impedance Matching

基于阻抗匹配的碳纤维吸波材料研究

李业华^{*}, 黄大庆, 何山, 程红飞, 史有强

北京航空材料研究院, 北京, 中国

邮箱

rongchuanligang@163.com (李业华), hdqbiam@163.com (黄大庆), biamhs333@sina.com (何山), chenghongfei1989@16.com (程红飞),

npusyq@163.com (史有强)

摘要: 碳纤维具有良好的导电性, 经过短切和分散处理对雷达波作用时成为偶极子或谐振子, 具有较好的吸波效果。本文将短切碳纤维与环氧树脂混合喷涂在玻璃纤维布与树脂做成的预浸料上制成胶膜, 使用自由空间法测量胶膜的电磁参数, 对胶膜进行多层阻抗匹配及反射率计算, 设计出在8~18GHz具有较低反射率的吸波材料。通过调整匹配层的种类和数量使吸波材料的吸收频带偏移, 分别对X波段和Ku波段实现良好的吸收。使用抽真空热压成型的方法制成吸波材料样品, 测试反射率与设计相符。本文中的设计方法和制作的吸波材料可作为相关工程应用的参考。

关键词: 短切碳纤维, 自由空间法, 阻抗匹配

1. 引言

随着雷达探测技术的发展,越来越多的装备提出了雷达隐身性能要求,雷达隐身技术成为各国武器装备发展的重点。雷达隐身技术包括外形隐身技术和雷达吸波材料隐身技术,外形隐身技术是通过对外形设计减少电磁波向发射方向反射的技术,雷达吸波材料隐身技术是在武器装备的表面使用吸波材料吸收电磁波减弱反射的技术[1]。按照吸波材料的应用方式,可分为涂覆型吸波材料、贴片型吸波材料、结构型吸波材料等。其中结构型吸波材料具有承载和减小雷达反射截面的双重功能,既能减轻结构重量又能提高隐身性能[2],并具有吸收频带可设计性强的优点,结构型吸波材料成为隐身技术发展的重点。

碳纤维复合吸波材料是一种重要的结构型吸波材料,已在武器装备中获得广泛应用,美国的B-2战略轰炸机、F22战斗机、YF-22战斗机、YF-23战斗机、法国的F-1战斗机、苏联的米格29战斗机以及先进的巡航导弹等大量采用了碳纤维结构吸波材料,碳纤维复合吸波材料在发达国家的应用已经比较成熟。

国内在碳纤维复合吸波材料方面开展了一系列的研究工作。何燕飞等采用磁性微粉与碳纤维制作的三层吸波体在8~18GHz频段可实现反射率<-8dB[3]。赵东林等以螺旋形碳纤维作为吸收剂制备了Nomex蜂窝夹芯结构吸波材料,厚度为9.5mm,在3.76~18GHz频段的反射率<-10dB,最大吸收峰值可达-21.62dB[4]。刘辉等以镀镍中间相沥青基碳纤维作为吸收剂环氧树脂为基体制备了单层吸波涂层,涂层厚度为1.02mm时在15.4~18GHz反射率<-10dB,最大吸收峰可达-20.74dB[5]。王雯结合湿法纺丝工艺将含有还原铁粉的PAN聚合液纺制成纤维制备碳基复合纤维材料,材料涂层厚度为1.3mm时6~13.2GHz和13.9~18GHz反射率<-10dB,最大吸收峰值可达-21.1dB[6]。周勇将碳纤维镀镍制成镀镍碳纤维/环氧树脂吸波材料,当碳纤维质量分数在0.86%纤维间距为5mm时,13.15~18GHz频段反射率<-10dB,加入磁性金属Co粉拓宽了吸收频带,在7~9GHz和12.4~18GHz大部分频段反射率<-10dB[7]。邹田春等人研究了活性炭纤维偶极阵列/环氧树脂复合材料的吸波性能,当碳纤维偶极平行于电场方向时,复合材料反射率<-10dB的频宽达到12.2GHz,反射率最低可达-32dB[8]。邹田春还研究了长度为1~2mm的活性炭纤维的介电特性,通过阻抗匹配方法设计了四层活性炭纤维吸波复合材料,在7~15GHz反射率<-10dB,最大反射可达-39.3dB[9]。谢炜等以中空多孔聚丙烯腈(PAN)碳纤维为主要吸收剂制备了双层轻质雷达吸波材料,并以羰基铁粉作吸收剂的匹配层提高吸波性能,在4~18GHz频率范围内反射率≤-10dB的带宽达10.90GHz[10]。赵乃勤等制备了含有直立碳纤维(VACFs)和活性炭纤维毡(IACFFSs)的环氧树脂吸波复合材料,当IACFFSs中的束间距离、束宽以及VACFs中纤维间距分别为10mm、5mm和8mm时,复合材料在11.8~18GHz频段内的反射率均小于-20dB[11]。贺龙辉等采用2mm与4mm两种短切碳纤维以3:4比例混合作为吸收剂,质量分数为7%,制备聚氨酯硬质泡沫基复合吸波材料,并以3%填充量的多晶铁纤维加入聚氨酯基体中制

成厚度为3mm的匹配层,总厚度为10mm,在8~18GHz频段反射率可<-10dB[12]。

经过对碳纤维复合吸波材料的相关文献研究发现:(1)单层碳纤维复合吸波材料的吸收频带比较窄,反射率整体偏高;(2)多层碳纤维复合吸波材料中多数匹配层使用的是磁性吸收剂,制备工艺相对复杂,并且磁性吸收剂对温度以及环境比较敏感,吸波性能容易变化;(3)碳纤维复合吸波材料受碳纤维排列方式影响很大,对电磁波的入射方向非常敏感。

吸波材料设计中为展宽吸收频带和降低反射率通常采用多层阻抗匹配设计实现。本文对多层阻抗渐变设计原理进行了分析,采用阻抗渐变结构设计了8~18GHz的多层短切碳纤维树脂基复合吸波材料,通过调整匹配层的种类与数量改变了吸收频带和端点处的反射率值。试验中选用短切碳纤维作为吸收剂,环氧树脂作为载体,喷涂在玻璃纤维布与环氧树脂做成的预浸料表面,制成碳纤维分布均匀而含量不同的吸波胶膜,使用自由空间法测量吸波胶膜的电磁参数,以此计算反射率和优化阻抗匹配,设计了三种不同吸收特性的吸波材料,通过实验制备了样品测试了反射率,得到的测试结果与设计相符,本文中的设计与研制方法可以作为相关研究的参考。

2. 实验材料及方法

2.1. 多层吸波材料设计原理

多层吸波材料设计遵循微波传输线理论,要实现良好的吸收性能要求具备两个特点:(1)吸波材料表面阻抗与空气阻抗接近,减少入射电磁波在材料表面的反射;(2)内层吸波材料对进入的电磁波实现高效损耗吸收,减少电磁波在底面发生反射后再次传出吸波材料。常见的阻抗匹配结构有两种,一种是阻抗渐变型,即沿着电磁波入射方向阻抗依次增大;另一种是阻抗更迭型,即沿着电磁波入射方向在某些阻抗层后边插入阻抗更低的匹配层[13]。本文选用的是阻抗渐变型结构。

对于多层吸波材料,结构如图1所示,电磁波垂直入射到多层吸波材料表面时,各层的输入阻抗如(1)、(2)式表示[14]:

$$Z_{i1} = \eta_1 \tanh(k_1 d_1) \quad (1)$$

$$Z_{ik} = Z_k \frac{Z_{i(k-1)} + Z_k \tanh(\gamma_k d_k)}{Z_k + Z_{i(k-1)} \tanh(\gamma_k d_k)} \quad (2)$$

式中 Z_k —第k层的特性阻抗, $Z_k = \sqrt{\frac{\mu_k}{\epsilon_k}}$;

γ_k —第k层的传播常数, $\gamma_k = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_k \epsilon_k}$;

d_k —第k层的介质厚度;

μ_k —第k层的相对磁导率;

ϵ_k —第k层的相对介电常数;

在吸波材料表面反射系数为:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3)$$

反射率以dB为单位表示为:

$$\Gamma_{dB} = 20 \lg |\Gamma| \quad (4)$$

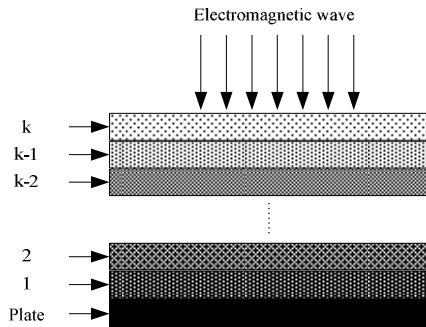


图1 多层吸波材料结构示意图。

2.2. 实验选材

碳纤维由石墨结晶沿纤维轴向排列而成,含碳量在90%以上,属于电损耗型吸波材料,具备耐高温、耐磨、耐腐蚀、导电导热以及柔软各向异性等特点。目前对碳纤维吸波机理的解释有两种:一是碳纤维在入射电磁波激励下发生谐振,形成耗散电流,耗散电流以热能为主要方式被基体材料等逐渐消耗;二是碳纤维在入射电磁波激励下发生极化,以偶极子的形式产生极化耗散电流,在周围基体材料作用下电磁能转换其它形式的能量衰减掉[15]。碳纤维的长度以及含量直接影响着吸波材料的电磁参数,并且随着入射电磁波的频率而改变,具有频响特性。以短切碳纤维与环氧树脂制作的碳纤维复合材料样品在碳纤维含量为1wt%时,4mm长的碳纤维具有较大的复介电实部和虚部,并具有良好的频响特性[16]。在实验中以喷涂方式制作的碳纤维吸波材料时碳纤维湿重百分比一般不能超过1.5wt%,若超过1.5wt%则容易因团聚堵塞管道。常用的喷枪口径一般不超过4mm,对于4mm长的短切碳纤维适用的喷枪口径为3~4mm。本文中选用的碳纤维为T700,长度为4mm。本文实验中使用的原材料如表1所示。

表1 实验原材料。

原材料名称	型号	生产厂家
短切碳纤维	T700, 4mm	上海骏杰碳素材料有限公司
玻璃纤维布	EW-100a	湖北菲利华石英玻璃股份有限公司
环氧树脂	ME301	北京昊天嘉诚科技有限公司
环氧树脂	E44	无锡钱广化工原料有限公司
固化剂	D400	常州市润翔化工有限公司
二甲苯	分析纯	国药集团试剂有限公司
丙酮	分析纯	国药集团试剂有限公司

2.3. 原材料处理

将EW-100a玻璃纤维布与ME301环氧树脂通过热熔法制成预浸料。碳纤维表面有层胶体,需将胶体去除使碳纤维分散,避免团聚。称取适量短切碳纤维放置于烧杯中,往烧杯中加入丙酮漫过碳纤维浸泡,将烧杯放入超声波清洗机中清洗分散30min,清洗后将烧杯中的丙酮倒出,将碳纤维烘干,对短切碳纤维电镜扫描如图2所示,可见在清洗之后碳纤维表面无杂质。称取晾干后不同量的短切碳纤维分别与E44环氧树脂、D400固化剂、二甲苯、丙酮按照一定比例混合均匀,制成5种碳纤维含量的混合溶液。将5种溶液按照一定量均匀喷涂在预浸料表面晾干,制成5种不同碳纤维含量的吸波胶膜,编号为A、B、C、D、E。将喷涂C胶膜的混合溶液喷涂在脱膜纸上,如图3所示,可见碳纤维分布均匀,可避免短切碳纤维因取向不同而导致电性能的差异[17]。

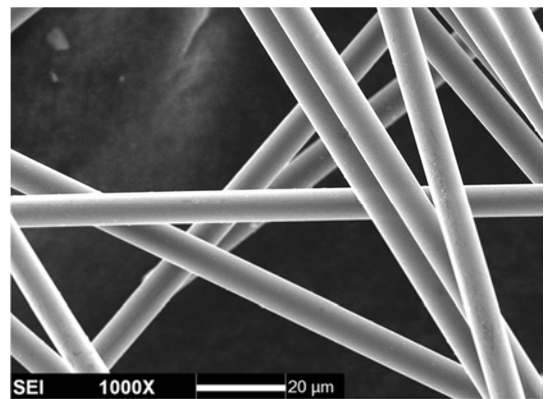


图2 短切碳纤维电镜扫描图。



图3 短切碳纤维喷涂分布图。

2.4. 电磁参数测量

材料电磁参数的测量方法有多种,包括驻波法、谐振腔法、传输/反射法、自由空间法等,对于损耗超过0.1的大损耗材料,电磁参数测量方法主要使用同轴法、波导法和自由空间法,其中同轴法使用的频率范围为1~18GHz,波导法和自由空间法的适用范围为2.6~40GHz。近几年随着矢量网络分析仪的更新,自由空间法的测试频率范围已经拓展到75~110GHz。

自由空间法是一种非接触和非破坏性的测试方法,对测试样品没有严格的形状和工艺要求,只需厚度均匀且有

足够大的测试面积，使电磁波均匀照射到样品表面并避免边缘绕射即可[18]。

在以往工程应用中由于测试技术及设备限制，通常对粉末状吸收剂或一定厚度的吸波材料样品分别采用同轴法和波导法测量电磁参数作为评估和计算使用。而在吸波材料对电磁波的吸收损耗中，除了吸收剂对电磁波的损耗，吸收剂载体亦对电磁波产生作用，载体的电磁参数影响着电磁波的反射、透波以及热损耗性能。吸收剂与载体对电磁波的综合作用效果才是真实的吸波效果。使用自由空间法测量吸波材料样品可以得到吸波材料整体的电磁参数，对于计算反射率设计隐身性能更准确。

本文中使用自由空间法对5种碳纤维含量的吸波胶膜测量电磁参数，测试系统的矢量网络分析仪型号为安捷伦E8363B，测试软件为安捷伦85071E。测量5种胶膜电磁参数发现磁损耗非常小，因而更换为介电常数测量。对测试数据进行平滑处理得到的电导率实部和虚部如图4、5所示。

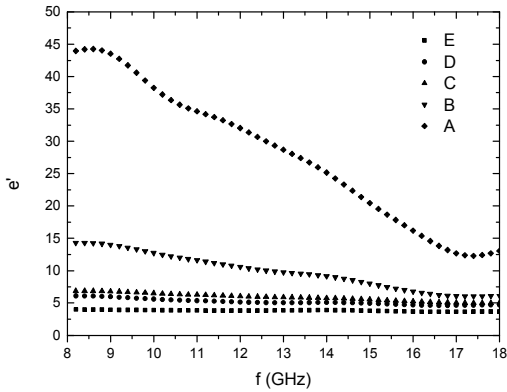


图4 5种胶膜的电导率实部。

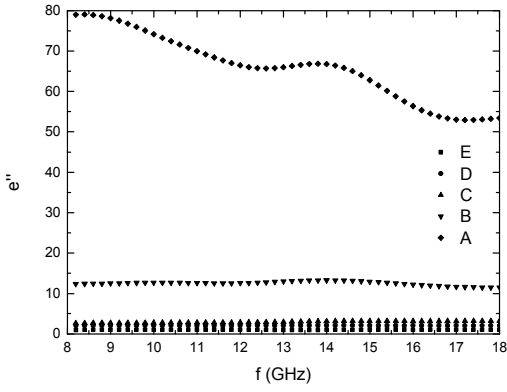


图5 5种胶膜的电导率虚部。

2.5. 吸波材料设计

依据阻抗渐变原理，对含有短切碳纤维的吸波胶膜进行多层设计，按照电导率从大到小的顺序将胶膜A、B、C、D、E从下往上依次排列层叠，将5种吸波胶膜按照表2中顺序和数量层叠得到1#、2#、3#吸波材料样品。1#样品使用

3种胶膜，2#、3#样品与1#样品相比在吸波材料内部增加了中间梯度层，调整了吸波胶膜的数量，改变了吸波材料内部的阻抗匹配。使用5种吸波胶膜的电磁参数计算得到3种吸波材料样品的反射率和输入阻抗的阻抗圆图，如图6、7所示。

表2 吸波材料各层编号及数量。

胶膜编号	A	B	C	D	E
厚度(mm)	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2
1#, 层数	8	0	8	0	8
2#, 层数	8	3	6	2	8
3#, 层数	5	2	5	2	5

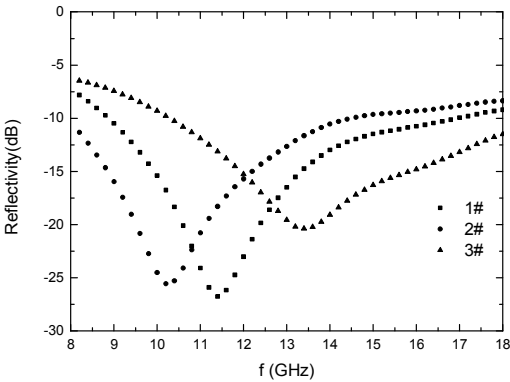


图6 吸波材料反射率计算结果。

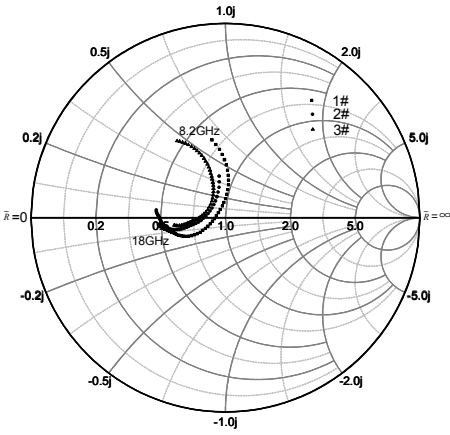


图7 吸波材料阻抗圆图。

2.6. 样品制备与测试

将A、B、C、D、E 5种吸波胶膜裁剪成200mm×200mm的方形胶膜，按照表2中吸波材料样品的设计方案层叠，使用真空袋将层叠好的吸波材料密封，用真空泵连接真空袋，抽压-0.1Mpa，将压紧的吸波材料放入烘箱在120℃高温下热压120min固化成型。冷却后从200mm×200mm样品中间裁剪出180mm×180mm的测试样品，厚度与重量如表3所示。

按照GJB 2038A-2011标准中的弓形测试法测量反射率，如图8所示，得到1#、2#、3#样品的反射率曲线，如

图9所示。选取2#样品顺时针旋转90° 再次测试反射率，对比旋转前后反射率如图10所示。

表3 吸波材料样品的厚度与重量。

样品编号	1#	2#	3#
厚度 (mm)	5.10	6.03	3.92
重量 (g)	212.17	236.94	166.25



图8 吸波材料样品反射率测量图。

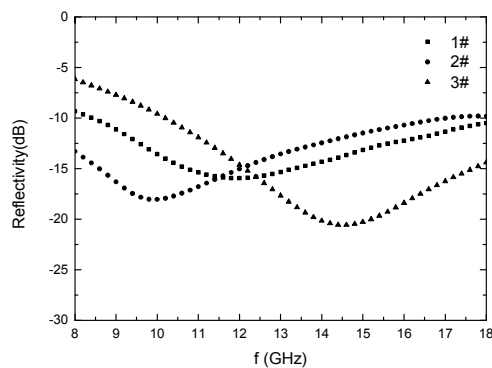


图9 吸波材料样品反射率测试结果。

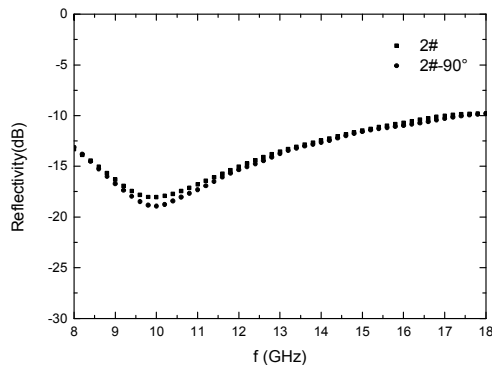


图10 2#样品旋转90° 反射率对比。

3. 讨论

由图6、9对比样品的反射率测试与计算结果可知，1#样品的-10dB吸收带宽增加1.6GHz，反射率在曲线两端下降，吸收峰向右偏移0.5GHz；2#样品的-10dB吸收带宽增大2.6GHz，反射率在曲线两端下降，吸收峰向左偏移0.25GHz；3#样品的-10dB吸收带宽基本不变，反射率在曲线右端下降，吸收峰向右偏移1GHz。对比可见，三种设计方案制备的吸波材料样品反射率与设计效果基本相符。

根据图7所示阻抗圆图分析样品的阻抗匹配情况，输入阻抗曲线经过阻抗圆图中的(1, 0)点时实现最佳阻抗匹配，入射到材料表面的电磁波被全部吸收没有反射。吸波材料的输入阻抗随着频率变化，在一个频段内输入阻抗离(1, 0)点越近匹配效果越好[19]。图7中阻抗曲线对应的频率上端为8.2GHz下端为18GHz，频率从8.2GHz增至18GHz过程中，1#样品的输入阻抗在中间频段离(1, 0)点近，2#样品的输入阻抗在整个频段的前2/3部分离(1, 0)点近，而3#样品的输入阻抗在整个频段的后2/3部分离(1, 0)点近。3个样品在该频段的输入阻抗都是随频率增加先接近(1, 0)点而后远离(1, 0)点，匹配效果逐渐变好再逐渐变差，对应的反射率先降低后升高，具有单峰吸收特性。输入阻抗曲线多数位于 $\tilde{R}=0.5$ 、 $\tilde{R}=1$ 、 $\tilde{X}=-0.2j$ 、 $\tilde{X}=0.5j$ 四条曲线围成的狭窄区域内，输入阻抗渐变变化分布密集，说明样品的输入阻抗围绕最佳匹配点变化较小，在整个频段具有良好的匹配特性。

对比3个样品使用的吸波胶膜分析反射率的变化，1#样品使用A、C、E 3种胶膜匹配实现了8.4~18GHz反射率 ≤ -10 dB的宽带吸收特性，最低反射率为-15.95dB位于12GHz。2#与1#样品的A、E胶膜数量相同，2#样品在中间减少了C胶膜的数量，并增加少量的B、D胶膜，实现了8~17GHz反射率 ≤ -10 dB的宽带吸收特性，最低反射率为-18.05dB，位于9.9GHz，在8GHz处反射率较1#样品降低4dB，相比吸收频带移向8.2~12.4GHz (X波段)。3#与1#样品相比减少了A、C、E胶膜数量，在中间增加少量的B、D胶膜，3#样品实现了10.2~18GHz反射率 ≤ -10 dB的宽带吸收特性，最低反射率为-20.58dB位于14.5GHz，在18GHz处反射率较1#吸波材料降低3.9dB，相比吸收频带移向12.4~18GHz (Ku波段)。

由图10可见选取的2#吸波材料在旋转90° 前后反射率测试结果几乎完全一致，说明碳纤维分散均匀使吸波材料整体呈现各向同性特征。

综合以上讨论，相比以往相关研究中出现的问题，本文使用的吸收剂单一，制备工艺简单，制作的吸波材料在8~18GHz的-10dB吸收带宽相对更宽，并且对电磁波的入射方向不敏感，便于应用。

4. 结论

- (1) 以短切碳纤维作为吸收剂制作的多层复合吸波材料经过阻抗匹配设计可实现良好的宽带吸收特性；

- (2) 使用自由空间法测量的吸波胶膜电磁参数是吸收剂与载体材料共同作用的结果, 以此计算的反射率与样品测量的反射率具有很好的一致性;
- (3) 通过增加中间梯度层种类改变各梯度层的数量可以调整阻抗匹配展宽吸收频带, 同时降低吸波材料的厚度和重量;
- (4) 本文中制作的3种吸波材料样品在8~18GHz的反射率都比较低, 其中2#样品在X波段性能较好, 3#样品在Ku波段性能较好, 并且制作的吸波材料对方向不敏感, 可以用于工程应用以及研究参考。

致谢

本文为航空科学基金《新型宽带电损耗隐身结构复合材料的力学建模和性能验证分析》(编号: 20143121003)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 田森. 复杂涂覆目标高频电磁散射特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011。
- [2] 沈福贵, 逯贵祯, 梁晶晶. 宽带结构吸波材料特性研究[J]. 微波学报: 2012, (S3): 423-426。
- [3] 何燕飞, 龚荣洲, 李享成, 王鲜, 何华辉. 多层复合吸波材料的制备及其吸波性能[J]. 无机材料学报, 2006, 21(6): 1450-1453。
- [4] 赵东林, 高云雷, 沈曾民. 螺旋形碳纤维结构吸波材料的制备及其吸波性能研究[J]. 功能材料信息, 2011, 8(4): 17-21。
- [5] 刘辉, 高云雷, 赵东林, 迟伟东, 沈曾民. 镀镍中间相沥青基碳纤维的吸波性能[J]. EMC材料应用, 2011, (5): 9-12。
- [6] 王雯. 碳基复合吸波材料的制备及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2012: 89-90。
- [7] 周勇. 镀镍碳纤维/环氧树脂复合材料的制备及吸波性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 27-32。
- [8] Zou T C, Shi C S, Zhao N Q. Microwave absorbing properties of activated carbon-fiber felt dipole array/epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(13):4870-4876.
- [9] 邹田春, 赵乃勤, 师春生. 活性碳纤维/树脂复合吸波材料的设计[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(1): 54-58。
- [10] 谢炜, 程海峰, 楚增勇, 陈朝辉, 周永江. 以中空多孔碳纤维为主体的轻质吸波材料吸波性能研究[J]. 无机材料学报, 2009, 24(2): 320-324。
- [11] Zhao N Q, Zou T C, Shi C S, Li J J, Guo W W. Microwave absorbing properties of activated carbon-fiber felt screens (vertical-arranged carbon fibers)/epoxy resin composites [J]. Materials Science and Engineering B, 2006, 127(2):207-211.
- [12] 贺龙辉, 胡照文, 邓联文, 黄生祥, 刘胜, 贺君, 文瑞. 宽频高性能短切碳纤维/聚氨酯泡沫吸波材料制备[J]. 功能材料, 2015, 23(46): 23120-23123。
- [13] 齐宇, 黄大庆, 何山. 多层复合吸波涂料设计与试验研究[J]. 航空材料学报: 2010, 30(2): 89-93。
- [14] 马成勇, 程海峰, 唐耿平, 等. 三层雷达吸波涂层的吸波性能研究[J]. 材料工程: 2008, (1): 11-13。
- [15] 赵冉. 炭黑/碳纤维树脂基复合吸波材料性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2012: 35-39。
- [16] 吴红焕. 短切碳纤维和炭黑的介电性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 25-34。
- [17] 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: 20-47。
- [18] 张伟, 苏东林, 齐万泉. 基于自由空间法的复合材料电磁参数测量[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 141-145。
- [19] 何山, 李业华, 周淳. 一种多层胶板雷达吸波材料[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4): 41-46。