

# 新型碳基雷达吸波材料的制备及反射率性能仿真计算

吴 赛, 杨东方, 胡 悦, 李业华, 赫丽华  
(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 为了研制一种轻质薄层宽带吸波材料, 采用抄纸法制备一种由短切碳纤维和短切玻璃纤维组成的超薄碳玻纸, 将含有导电碳纤维的碳玻纸作为电损耗层与聚甲基丙烯酸酞亚胺(PMI)泡沫介质层交替粘接成型为多层复合吸波材料。通过对材料进行介电常数试验、反射率仿真计算以及反射率实测, 开展材料的反射率各向异性研究, 探索材料的反射率性能。结果表明: 采用自由空间法试验的吸波材料的复合电磁参数模拟的反射率与材料实测反射率基本吻合; 通过材料阻抗匹配设计的多层碳基材料均展现了优异的吸波性能, 材料在 8~18 GHz 的反射率均小于 -10 dB, 吸波效能大于 90%, 其中当 PMI 泡沫厚度为 2 mm、碳纤维质量分数分别为 0.01%、0.15%、0.20% 时, 多层复合吸波材料吸收性能最优, 最大反射率为 -28.03dB@15.73 GHz; 短切碳纤维在碳玻纸中分散均匀, 材料反射率各向异性小。

**关键词:** 碳基雷达吸波材料; 反射率; 短切碳纤维; 碳玻纸; 电损耗层; 抄纸法; 阻抗匹配

中图分类号: V254.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.01.025

## Preparation and Reflectance Performance Simulation of New Carbon-Based Radar Absorbing Materials

WU Sai, YANG Dong-fang, HU Yue, LI Ye-hua, HE Li-hua

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** In order to develop a lightweight thin layer wideband absorbing material, an ultra-thin carbon glass paper was prepared by paper making method. The carbon glass paper containing conductive carbon fiber was used as the electric loss layer and the Polymethacrylimide (PMI) foam medium layer was used as the matching layer, the above two layers were alternately bonded into a multilayer composite absorbing material. The reflectivity performance of the material was explored through dielectric constant testing, reflectance simulation calculation, reflectance measurement, and anisotropy study of the material reflectance. The results show that the reflectance simulated by the free space method is basically consistent with the measured reflectance. The multilayer carbon-based materials with impedance matching design all show excellent radar wave absorbing performance. The reflectance of the materials is less than -10dB at 8 to 18GHz, and the wave absorbing efficiency is greater than 90%. The best absorption performance is achieved when the thickness of PMI foam is 2mm and carbon fiber content is 0.01%, 0.15%, and 0.2%, respectively. The maximum reflectance is -28.03dB@15.73GHz. The short carbon fiber is evenly dispersed in carbon glass paper, and the material reflectance anisotropy is small.

**Key words:** carbon-based radar absorbing material; reflectivity; short carbon fiber; carbon glass paper; electric loss layer; paper making; impedance matching

## 0 引言

雷达吸波材料被广泛应用在现代武器装备的隐身性能设计中, 如飞行器机翼前缘、机身强散射源部位和发动机尾喷管等部位<sup>[1-3]</sup>。随着侦察手段的不断发展, 对雷达隐身技术提出了新的要求, 吸波材料性能逐步向更宽频带、更低频带和更轻薄方向发展。传

统雷达吸波材料主要为磁性吸收剂雷达吸波涂层, 因为填料为铁磁性金属粉末, 所以涂层面密度高, 涂敷型吸波材料对于基材增重较大<sup>[4]</sup>; 而低密度碳类吸收剂质量轻填量少, 且能搭配轻质低介电层制备多层复合材料, 满足了吸波材料的“薄、轻、宽、强”的发展趋势以及从涂敷型向结构型吸波材料的拓展<sup>[5-6]</sup>。碳类吸收剂包括导电碳黑<sup>[7]</sup>、碳纤维<sup>[8]</sup>、碳化硅纤维<sup>[9]</sup>、石墨

收稿日期: 2023-05-14 基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 吴赛(1988), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 吴赛, 杨东方, 胡悦, 等. 新型碳基雷达吸波材料的制备及反射率性能仿真计算[J]. 航空发动机, 2025, 51(1): 171-174. WU Sai, YANG Dongfang, HU Yue, et al. Preparation and reflectance performance simulation of new carbon-based radar absorbing materials[J]. Aeroengine, 2025, 51(1): 171-174.

烯<sup>[10]</sup>、碳纳米管<sup>[11]</sup>等。电磁吸波性能主要与碳基吸收剂的导电率相关,导电率越大,载流子所引起的宏观电流越大,其入射的电磁波大部分衰减在材料的电阻上。吸波材料的吸波性能除了由吸收剂决定以外,也受到材料的制备工艺设计、多层阻抗匹配结构设计、频率表面选择设计等的影响<sup>[12]</sup>。

碳纤维因其成熟量产和优异的介电损耗性能而广泛被应用到电损耗吸波材料中。Jin等<sup>[13]</sup>通过在玻璃纤维织物层中加入均匀分布的短切碳纤维层,制备了一种多板杂化复合雷达吸波材料,研究表明通过调控短切纤维层的面密度可获得不同吸波性能的层板材料;Chakradhary等<sup>[14]</sup>通过将频率选择表面结构与短切碳纤维复合材料集成在金属片上,最终获得了一种新型的混合吸收体,并在反射率仿真模拟软件中进行了模拟,该混合吸收体的最优反射率为-23.50 dB,吸收带宽为0.45 GHz,样品总厚度仅为1.5 mm;邹田春等<sup>[15]</sup>研究了活性碳纤维/树脂吸波复合材料的微波吸收特性,表明活性碳纤维吸波材料的吸波性能与吸波层中纤维的质量分数、分布方式密切相关;贺龙辉等<sup>[16]</sup>采用不同长度的短切碳纤维与聚氨酯泡沫制备了泡沫型吸波材料,当纤维质量分数为7%时,制备的泡沫复合吸波材料优于-10 dB的最大带宽达7.6 GHz;Ling等<sup>[17]</sup>采用熔融共混法制备了短碳纤维填充线性低密度聚乙烯/乙烯-辛烯共聚物复合材料,当复合材料中短切碳纤维质量分数为30%时有2个吸收峰,最大反射损耗在4.6 GHz时达到-15.66、-10 dB以下的反射损耗对应的带宽约为3.6 GHz。

本文在已有短切碳纤维在吸波材料中应用的研究基础上,采用短切碳纤维和玻璃纤维制备新型碳玻纸基损耗层,研究碳玻纸基多层吸波材料多层设计、材料不同碳纤维质量分数对于材料反射率的影响以及材料反射率各向异性。

## 1 试验材料及方法

采用微波传输线理论进行多层吸波材料阻抗匹配设计及制备,设计需要满足:(1)入射到材料表面的电磁波能够最大限度的进入材料内部,尽量减少电磁波在材料表面的反射,材料具有较好的阻抗匹配特性,即吸波材料表面阻抗与空气阻抗相近,然后逐渐增大;(2)进入材料内部的电磁波能尽可能多的被损耗掉,尽量减少透过和二次反射的电磁波,材料具有

良好的衰减特性。

### 1.1 试验原辅材料

短切碳纤维(日本东丽公司制造)的平均长度约为4 mm,直径约为7  $\mu\text{m}$ ;短切玻璃纤维(中国泰山玻璃纤维有限公司制造)的平均长度为6 mm,直径约为8  $\mu\text{m}$ ;聚甲基丙烯酸酰胺(Polymethacrylimide, PMI)泡沫(中国湖南兆恒材料科技有限公司制造)的厚度为2 mm。

### 1.2 材料制备

碳玻纤维纸为一种由短切碳纤维和玻璃纤维组成的超薄纸,作为电损耗层。本试验采用抄纸法制备不同碳纤维质量分数碳玻纤维纸。采用PMI泡沫作为无损间隔层,使用胶粘剂将损耗层与间隔层粘接,制备符合抗匹配设计的多层复新型碳基雷达吸波材料。材料总共为6层,3层碳玻纸损耗层和3层PMI泡沫层交替叠加,损耗层的碳纤维质量分数依次增加,搭接多层吸波材料,如图1所示。共制备3个样品,3组多层吸波材料短切碳纤维质量分数见表1。

图1 多层吸波材料

表1 3组多层吸波材料短切碳纤维质量分数 wt%

| 材料编号 | 第1层  | 第2层  | 第3层  |
|------|------|------|------|
| 1#   | 0.01 | 0.05 | 0.10 |
| 2#   | 0.01 | 0.10 | 0.15 |
| 3#   | 0.01 | 0.15 | 0.20 |

### 1.3 表征方法

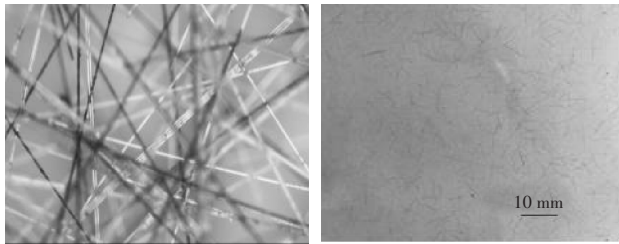
本试验采用GJB 2038A-2011标准中的弓形测试法测试新型碳基雷达吸波材料的反射率,测试频段为2~18 GHz。采用自由空间法测量吸波材料电磁参数,测试系统的矢量网络分析仪型号为安捷伦E8363B,测试软件为安捷伦85071E,测试频段为2~18 GHz。采用OLYMPUS型号U-MSSP显微镜观察碳玻纸微观形貌。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 碳玻纸形貌观察

短切碳纤维和短切玻璃纤维制备的碳玻纤维纸照片如图2所示。从图2(a)中可见,深色纤维棒为短切碳纤维,亮色纤维棒为玻璃纤维,碳纤维和玻璃纤维交织成网。从图2(b)中可见,短切碳纤维分布均匀,损耗材料分布均匀能够消除材料反射率的各向异

性。碳纤维质量分数均为0.1%。



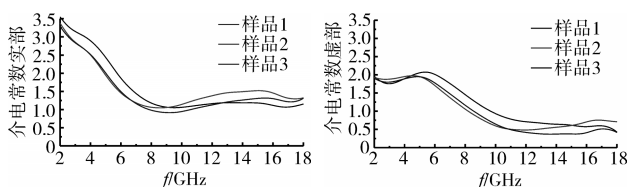
(a) 微观显微镜照片

(b) 宏观照片

图2 碳玻纤维纸照片

## 2.2 新型碳基吸波材料电磁参数测试

材料的电磁参数是影响雷达反射率重要参数,电磁参数包括介电常数和磁导率。通过测试材料电磁参数,可规律掌握材料吸波性能。自由空间法是一种非接触和非破坏性的电磁参数测试方法,对测试样品没有严格的形状和工艺要求,只需材料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<sup>[18]</sup>。本试验制备长宽厚为300 mm×300 mm×8 mm的正方形多层碳基吸波材料,可直接用于自由空间法测试材料复合介电常数和磁导率。由于材料为非磁性材料,所以磁导率实部为1,虚部为0。3个样品在电磁波为2~18 GHz时复合介电常数实部和虚部如图3所示。图中横坐标 $f$ 为频率,从图中可见,每个样品的实部和虚部数据趋势相同,但样品3的介电常数实部和虚部均为最大,同时表现了良好的频散特性。



(a) 实部

(b) 虚部

图3 吸波材料介电常数实部和虚部

## 2.3 新型碳基吸波材料反射率研究分析

### 2.3.1 模拟反射率与实测反射率分析

通过计算软件对测量样品3的复合电磁参数进行反射率计算,得到材料模拟的反射率数据,然后按照GJB 2038A-2011标准中的弓形测试法测量样品3反射率,对比通过电磁参数仿真模拟的反射率和材料实测反射率的吻合度。反射率实测和模拟数据如图4所示。从图中可见,仿真计算结果在13 GHz之前优于实测值,在13 GHz之后相反。电磁参数测试过程中扰动因素较多,比如材料厚度,平整度,材料本征特

性等,但模拟结果和实测值总体吻合度相似,说明通过对材料的复合电磁参数特性研究可以对材料的吸波性能进行良好的阻抗匹配优化设计。

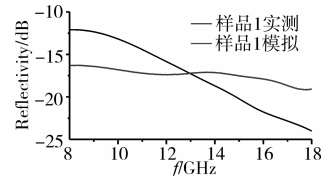


图4 反射率实测和模拟数据

### 2.3.2 不同碳纤维含量的复合材料样品反射率分析

样品1、2、3复合吸波材料均为3层电损耗层和3层介质空白层组合而成。为满足阻抗匹配设计,面层碳纤维含量最低,然后依次增加(表1)。对3个样品采用弓形法进行反射率实测,得到不同配方设计的吸波材料反射率曲线如图5所示。从图中可见,3个样品在8~18 GHz的反射率均小于-10 dB,吸波效能大于90%,展现了良好的吸波性能。样品3最大发射率为最大反射率为-28.03dB@15.73 GHz,其吸波性能比样品2的要优,这也与上述3个样品的电磁参数数据趋势相吻合。说明材料介电常数越大,频散特性越好,材料吸波性能越好。

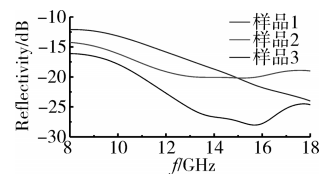


图5 不同配方设计的吸波材料反射率曲线

### 2.3.3 吸波材料反射率方向性

对样品3进行平面0°和平面旋转90°反射率测试,分析材料反射率是否有方向性。材料0°和90°反射率试验结果如图6所示。从图中可见,材料反射率的方向性小,说明短切碳纤维作为吸波剂在碳玻纸中分布均匀,不会造成材料反射率各向异性。

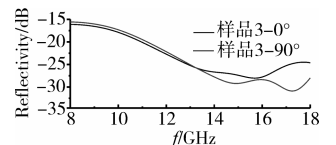


图6 材料0°和90°反射率试验结果

## 3 结论

(1)通过阻抗匹配设计的多层新型碳基吸波材料的电磁参数具有良好的频散特性。其中,当样品3中PMI泡棉厚度为2 mm条件下,碳纤维质量分数分别为0.01%、0.15%、0.20%时的阻抗匹配最优,得到最好的电磁参数频散特性。

(2)复合材料的电磁参数仿真模拟反射率与实测反射率吻合度相似,可以优化设计材料的复合介电常数和磁导率,指导材料的阻抗匹配设计。

(3)多层新型碳基复合材料展现了优异的吸波特

性,材料在8~18 GHz的反射率均小于-10 dB,吸波效能大于90%。

(4)短切碳纤维与玻璃纤维制备的碳玻纸作为电损耗层时,碳纤维均匀分布在纸张内,使得材料的吸波特性没有方向性,材料吸波各向异性小。

#### 参考文献:

- [1] 邓洪伟,赵春生,贾东兵,等.航空发动机喷管隐身修形设计技术分析[J].航空发动机,2014,40(2):10-14.  
DENG Hongwei, ZHAO Chunsheng, JIA Dongbing, et al. Analysis of stealthy shape design technology for aeroengine exhaust nozzle[J]. Aero-engine, 2014, 40(2): 10-14. (in Chinese)
- [2] Jing S, Wang W L, Yue Q Y. Review on microwave-matter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies[J]. Materials, 2016, 9(4): 231.
- [3] Yuan C X, Zhou Z X, Zhang J W, et al. Properties of propagation of electromagnetic wave in a multilayer radar-absorbing structure with plasma-and radar-absorbing material[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(9): 1768-1775.
- [4] Zhang B, Feng Y, Xiong J, et al. Microwave-absorbing properties of de-aggregated flake-shaped carbonyl-iron particle composites at 2-18 GHz[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(7): 1778-1781.
- [5] Lee S, Lee W, Oh K, et al. Broadband all fiber-reinforced composite radar absorbing structure integrated by inductive frequency selective carbon fiber fabric and carbon-nanotube-loaded glass fabrics[J]. Carbon, 2016, 107: 564-572.
- [6] Wei F, Lin J Y, Nandika D, et al. Enhanced mechanical and radar absorbing properties of carbon/glass fiber hybrid composites with unique 3D orthogonal structure[J]. Polymer Testing, 2018, 69: 71-79.
- [7] Tripathi K C, Abbas S M, Sharma R B, et al. Electromagnetic & microwave absorption properties of carbon black/pu di-electric nano-composite absorber[J]. IJSART, 2015, 1(7): 12-16.
- [8] Chen H, Ma W, Huang Z, et al. Graphene-based materials toward microwave and terahertz absorbing stealth technologies[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(8): 1801318.
- [9] 吴赛,杨东方,张旭,等.短切碳纤维树脂膜/聚乙烯泡棉材料的制备与吸波性能研究[J].化工新型材料,2020,48(12):81-83.  
WU Sai, YANG Dongfang, ZHANG Xu, et al. Preparation and electromagnetic wave absorbing property of short carbon fibers epoxy film/polyethylene foam[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(12): 81-83. (in Chinese)
- [10] Shen Z, Chen J, Li B, et al. Recent progress in SiC nanowires as electromagnetic microwaves absorbing materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 815: 152388.
- [11] Bhattacharya P, Sahoo S, Das C K. Microwave absorption behaviour of MWCNT based nanocomposites in X-band region[J]. Express Polymer Letters, 2013, 7(3): 212-223.
- [12] 程金波,赵海波,李蒙恩,等.碳基吸波材料的研究进展[J].中国材料进展,2019,38(9):897-905.  
CHEN Jinbo, ZHAO Haibo, LI Meng'en, et al. Research progress on carbon-based microwave absorption materials[J]. Materials China, 2019, 38(9): 897-905. (in Chinese)
- [13] Jin D H, Jang M S, Choi H J, et al. Multi-slab hybrid radar absorbing structure containing short carbon fiber layer with controllable permittivity[J]. Composite Structures, 2021, 273: 114279.
- [14] Chakradhary V K, Baskey H B, Akhtar M J. Novel X-band microwave absorber based on carbon nanofiber integrated with the FSS structure for RCS reduction of strategic targets[C]//2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC). Kanpur: IEEE, 2018: 1-4.
- [15] 邹田春,冯振宇,赵乃勤,等.活性炭纤维/树脂复合吸波材料的研究[J].材料工程,2011,333(2):22-25.  
ZOU Tianchun, FENG Zhenyu, ZHAO Naiqin, et al. Microwave absorbing properties of activated carbon fibers/epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, 333(2): 22-25. (in Chinese)
- [16] 贺龙辉,胡照文,邓联文,等.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,2015,46(23):23120-23123.  
HE Longhui, HU Zhaowen, DENG Lianwen, et al. Study on wide-band wave-absorbing foam material prepared by shortened carbon fiber and polyurethane[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(23): 23120-23123. (in Chinese)
- [17] Ling Q, Sun J, Zhao Q, et al. Microwave absorbing properties of linear low density polyethylene/ethylene-octene copolymer composites filled with short carbon fiber[J]. Materials Science and Engineering: B, 2009, 162(3): 162-166.
- [18] Semenenko V N, Chistyayev V A, Politiko A A, et al. Complex permittivity and permeability of composite materials based on carbonyl iron powder over an ultrawide frequency band[J]. Physical Review Applied, 2021, 16(1): 014062.

(编辑:兰海青,孙明霞)