

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.12.007

短切导电纤维填充复合材料吸波性能

伊洋,王飞,石中伟,何猛

(陆军装备部装备项目管理中心,北京 100000)

摘要:采用浇注工艺制备了短切导电纤维填充乙烯基酯树脂复合材料。研究了短切导电纤维含量的变化对复合材料电磁特性和吸波性能的影响,并对这种影响进行了理论分析;研究了复合材料厚度对吸波性能的影响。结果表明,在8~18 GHz频段内,随着短切导电纤维含量的增加,介电常数实部和虚部数值增大;在26.5~40 GHz频段内,短切导电纤维质量分数大于1%时,复合材料的介电常数实部和虚部随着频率的升高均呈下降趋势,表现出一定的频散特性。在8~18 GHz,26.5~40 GHz频段内,当短切导电纤维质量分数不大于5%时,复合材料的吸波性能随短切导电纤维含量的增加而增强,短切导电纤维质量分数为7%时,吸波性能反而降低;当短切导电纤维质量分数为5%时,在整个测试频段内,复合材料反射率小于-10 dB的有效带宽达到16.5 GHz,在10.3 GHz和29.8 GHz,复合材料各有一吸收峰,峰值均为-15 dB。随着复合材料厚度的增加,谐振峰向低频移动。

关键词:短切导电纤维;复合材料;吸波性能;介电常数

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)12-0031-05

Microwave Absorbing Performance of Composites Filled with Short Conductive Fiber

Yi Yang, Wang Fei, Shi Zhongwei, He Meng

(Army Equipment Department Equipment Project Management Center, Beijing 10000, China)

Abstract : Composite materials with short conductive fiber were prepared using pouring technology. The effect of short conductive fiber content on electromagnetic characterization and radar absorbing properties of the composite materials were studied, and this effect was carried on the theory analysis. The influences of thickness of composite materials on radar absorbing properties were investigated. The results indicate that: In the frequency range from 8 GHz to 18 GHz, with the content of short conductive fiber increasing, real and imaginary permittivity increase. In the frequency range from 26.5 GHz to 40 GHz, when the content of short conductive fiber is greater than 1%, the real and imaginary permittivity of the composite decrease with the increasing of frequency and show certain dispersion characteristics. In the frequency range from 8 GHz to 18 GHz and 26.5 GHz to 40 GHz, when the content of short conductive fiber is not more than 5%, the performance of microwave absorption increases with the increasing of the content of short conductive fiber, the performance of microwave absorption instead decreases when the content of short conductive fiber is 7%. When the content of short conductive fiber is 5%, in the whole test band, the effective bandwidth of composite material is 16.5GHz with reflectance value not more than -10 dB. At 10.3 GHz and 29.8 GHz, composites have an absorption peak each, the peak value is -15 dB. The resonant peak moves towards low frequency with the increasing of the thickness of composites.

Keywords : short conductive fiber ; composite ; microwave absorbing performance ; permittivity

缩短军事武器装备与监测器或探测器的距离而不被发现的技术称为隐身技术^[1]。隐身技术可通过改变武器装备的电、光、声、磁等特征来实现自身可探测特征信号的降低,从而缩短雷达的探测距离,降低被敌方跟踪侦查的概率,提高武器装备的战场

生存能力^[2-3],提高总体作战系统作战效能,隐身技术已经成为目前立体化现代战争中最重要、最有效的突防技术手段^[4-5]。第二次世界大战结束之后,隐身技术作为重大军事技术得到了广泛的关注,世界各军事大国投入了巨额的经费进行研究,已经取得

通信作者: 伊洋,高级工程师,主要从事伪装设计与材料技术方面的研究 E-mail : syuhua1999@163.com

收稿日期: 2020-09-11

引用格式: 伊洋,王飞,石中伟,等. 短切导电纤维填充复合材料吸波性能[J]. 工程塑料应用,2020,48(12): 31-35.

Yi Yang, Wang Fei, Shi Zhongwei, et al. Microwave absorbing performance of composites filled with short conductive fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12): 31-35.

了非常大的进展^[6]。

从各国隐身技术研究成果来看,雷达隐身技术是隐身技术中研究最多和发展最快的,材料隐身技术、外形隐身技术、电磁干扰和欺骗技术等是有效降低武器目标雷达散射截面以实现雷达隐身技术的主要措施。其中结构型雷达隐身复合材料既能承载又能很好地吸收电磁波,具有频率宽、效率高、不增加额外质量等优点,可设计性强^[7-11],且可直接成型制造各种形状复杂的结构部件,成为雷达隐身技术中重要的研究方向,受到国内外研究者的重视。

笔者采用短切导电纤维作为结构型复合材料的吸收剂,与乙烯基酯树脂复合,通过浇注法制备了短切导电纤维填充乙烯基酯树脂复合材料,并对不同短切导电纤维含量复合材料的电磁特性、短切导电纤维含量对复合材料吸波性能影响、厚度对复合材料吸波性能及谐振峰位置的影响进行了研究和探索,为电损耗型结构吸波材料的吸波机理深入研究及吸波性能优化打下基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

短切导电纤维:中国兵器工业集团第五三研究所;

乙烯基酯树脂:905,上纬(上海)精细化工有限公司;

过氧化甲乙酮:工业级,上海硕津贸易有限公司;

环烷酸钴:工业级,郑州邦诺化工产品有限公司。

1.2 主要仪器及设备

高速变频分散机:JFS-1500型,常州耀凯电子科技有限公司;

电子天平:KD-2000NEC型,福州科迪电子科技有限公司;

弓形反射率测试系统:中国兵器工业集团第五三研究所;

电磁参数测试系统:安捷伦科技(中国)有限公司。

1.3 复合材料的制备

将短切导电纤维分别按质量分数1%、2%、5%、7%称取,加入乙烯基酯树脂中,高速搅拌10 min,使短切导电纤维在树脂中均匀分散,然后加入固化剂及促进剂混合搅拌均匀,静止脱泡,稳定后浇注到钢模中,140℃下固化20 min,自然

冷却,脱模后加工成180 mm×180 mm×3 mm, 85 mm×85 mm×3 mm和180 mm×180 mm×5 mm, 85 mm×85 mm×5 mm的片状材料。

1.4 性能测试

(1) 反射率。

采用RAM弓形测试法,测试标准参照GJB 2038A-2011。测试厚度为3 mm、不同导电纤维质量分数(1%、2%、5%、7%)的复合材料的发射率值,探讨同一厚度下纤维含量变化对吸波性能的影响,测试短切导电纤维质量分数为5%、样品不同厚度(3,5 mm)的反射率,探讨复合材料厚度对吸波性能的影响。测试波段范围8~18 GHz,26.5~40 GHz。测试装置如图1所示。

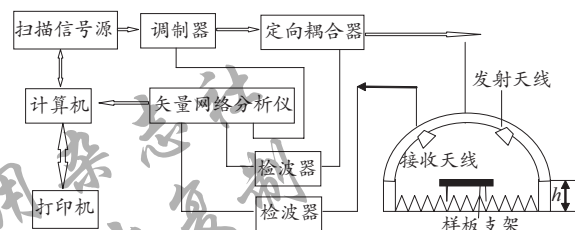


图1 反射率测试装置图

(2) 电磁参数。

采用自由空间法,对试样进行电磁参数的测试,测试波段范围8~18 GHz,26.5~40 GHz。自由空间测试系统如图2所示^[12]。

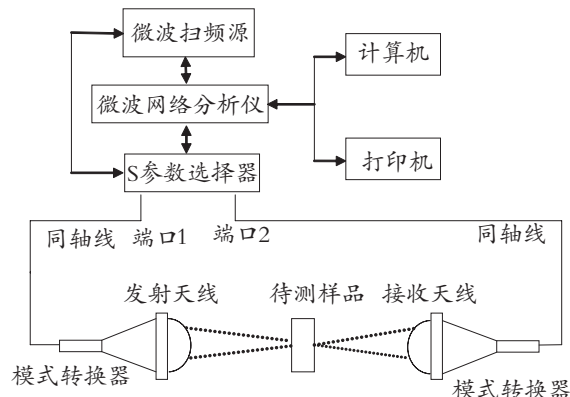


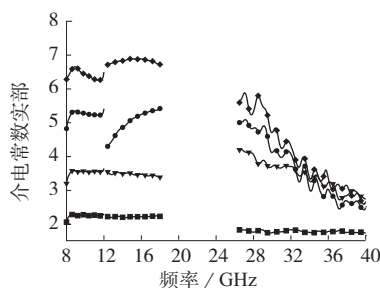
图2 自由空间法测试系统图

2 结果及讨论

2.1 不同含量短切导电纤维复合材料的电磁特性

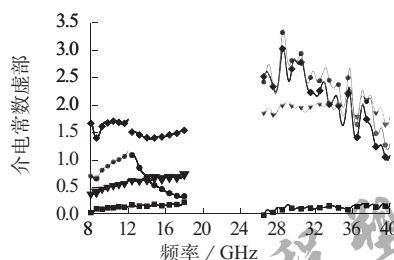
笔者对填充不同含量短切导电纤维复合材料的介电常数进行了测试分析。图3、图4分别为不同填充含量短切导电纤维复合材料的介电常数实部和虚部。由图3可以看出,在8~18 GHz,26.5~40 GHz频段内,复合材料的介电常数实部随着短切导电纤维含量的增加而增大。在8~18 GHz频段内,短切导电纤维质量分数为7%的复合材料介电常数

实部在 6.2~6.9 范围内,短切导电纤维质量分数为 5% 的复合材料介电常数实部在 4.2~5.4 范围内,短切导电纤维含量为 2% 的复合材料介电常数实部在 3.1~3.6 范围内。在 32~40 GHz 频段内,填充不同质量分数 (2%,5%,7%) 短切导电纤维复合材料的介电常数实部没有出现很明显的差别。



短切导电纤维质量分数: ■—1%; ▼—2%; ●—5%; ◆—7%

图3 不同含量短切导电纤维复合材料的介电常数实部



短切导电纤维质量分数: ■—1%; ▼—2%; ●—5%; ◆—7%

图4 不同含量短切导电纤维复合材料的介电常数虚部

介电常数虚部表示材料对电磁波的损耗性能。从图4可以看出,在 8~18 GHz 频段内,复合材料的介电常数虚部随着短切导电纤维含量的增加而增大。在 26.5~34.3 GHz 频段内,在短切导电纤维的质量分数不大于 5% 时,复合材料的介电常数虚部随着短切导电纤维含量的增加而增大,而当短切导电纤维的质量分数为 7% 时,复合材料的介电常数虚部反而降低。在 34.3~40 GHz 频段内,短切导电纤维质量分数分别为 2%,5%,7% 的复合材料样板,其介电常数虚部随着短切导电纤维含量的增大而减小。

由图3、图4可以看出,在 26.5~40 GHz 频段内,导电纤维质量分数大于 1% 时,复合材料的介电常数实部和虚部随着频率的升高均呈下降趋势,表现出一定的频散特性。因此,复合材料中填加导电纤维吸收剂能有效地拓宽吸波频带,有利于提高复合材料宽频段隐身性能。

2.2 短切导电纤维含量对复合材料吸波性能影响

图5为填充不同含量短切导电纤维复合材料的反射率曲线。由图5可看出,在 8~18 GHz,26.5~

32 GHz 频段内,短切导电纤维质量分数不大于 5% 时,随着短切导电纤维含量的增加,复合材料的反射率降低,吸波性能增强;而当短切导电纤维质量分数为 7% 时,反射率反而增大,吸波性能降低。当短切导电纤维质量分数为 5% 时,在整个测试频段内,复合材料反射率小于 -10 dB 的有效带宽达到 16.5 GHz,有利于进一步优化复合材料的宽频性能;在 10.3 GHz 和 29.8 GHz,复合材料各有一吸收峰,峰值均为 -15 dB。

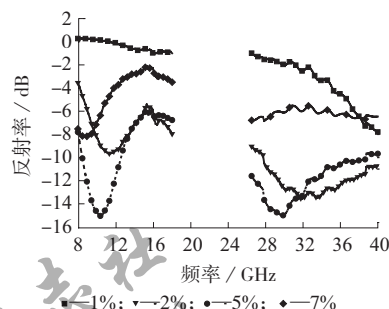


图5 不同含量短切导电纤维复合材料的反射率曲线

在填充不同含量短切导电纤维复合材料中,短切导电纤维含量较低时,短切导电纤维长度较短,在基体中随机分布,在雷达波电场中没有形成连续的传导电流,作为电偶极子(谐振子)在基体中运动。当电磁波入射到复合材料中,作为电偶极子的短切导电纤维与入射电磁波相互作用产生谐振电流^[13],在周围基体的作用下,谐振电流被衰减,从而雷达波能量被消耗转化为其它形式的能量(主要是热能),因而损耗了入射电磁波,复合材料具有了吸波性能。随着导电纤维含量的增加,复合材料的介电常数发生变化。对于有金属衬底的吸波层板的反射率 R 可表示为如下公式^[14-15]:

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right| \quad (1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (2)$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left(\frac{j \cdot 2\pi f d}{c} \sqrt{\mu \varepsilon} \right) \quad (3)$$

式中: μ_0 与 ε_0 ——真空磁导率和真空介电常数,为常量;

Z_0 ——自由空间阻抗;

Z_1 ——输入阻抗;

f ——频率;

d ——厚度;

c ——光速;

j ——虚部单位;

μ ——磁导率;

ε ——介电常数。

因此反射率 R 为频率 f 、电磁参数 ε 、 μ 和厚度 d 的函数。在厚度 d 相同的情况下,对某频段有一最佳导电纤维填充量,使该频段内的吸波性能最好。

因此随着作为电偶极子(谐振子)的短切导电纤维含量增加,被损耗的入射电磁波增加,复合材料的吸波性能增强。但是,当短切导电纤维含量增加到一定程度时,基体中的纤维不能作为独立的个体存在,纤维之间相互搭接,形成了连续的导电网络,反射了部分入射的电磁波,从而减少了复合材料对入射电磁波的损耗,降低了复合材料的吸波性能。

通过测试结果可以进一步得出结论,复合材料中短切导电纤维含量为 5%~7% 时,必存在一个最佳值,使复合材料的吸波性能达到最优。因此在进一步的优化中,可以通过控制短切导电纤维的添加量来实现复合材料更好的吸波性能。

2.3 厚度对短切导电纤维复合材料吸波性能影响

根据前面的实验结果,将短切导电纤维的质量分数确定为 5%,进一步考察复合材料样品的厚度对吸波性能的影响。

图 6 为不同短切导电纤维复合材料样品厚度的反射率曲线。在 8~18 GHz, 26.5~32 GHz 频段内,样品的厚度增加,复合材料的反射率变大,吸波性能减弱。在 8~18 GHz 频段内,可能是由于样品厚度增大使谐振损耗往低频偏移,导致样品厚度增加该波段的吸波性能反而降低。又加测了 2~8 GHz 的反射率来验证这一结果,图 7 为不同厚度短切导电纤维复合材料样品低波段的反射率曲线。由图 7 显示,厚度由 3 mm 增大至 5 mm,谐振峰的位置往低频偏移 3 GHz,这反而有利于复合材料低频吸波性能的提高。

在 26.5~40 GHz 频段内,样品厚度增加,反射率增大,吸波性能减弱。随着厚度的增加,样品中纤

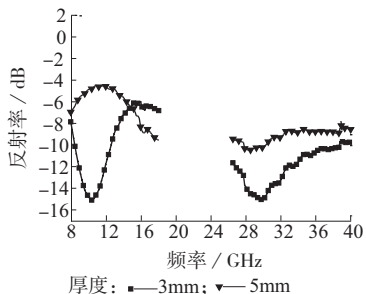


图 6 不同厚度短切导电纤维复合材料的反射率曲线

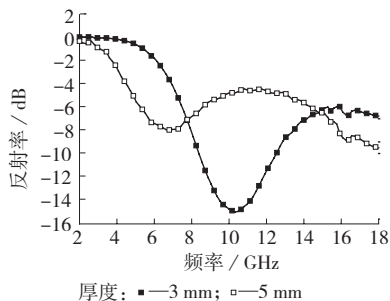


图 7 不同厚度短切导电纤维复合材料低波段的反射率曲线

维数目增多,材料的吸波性能有一个增强的过程,但是厚度的增加同时也改变了样品谐振峰的位置,谐振损耗向低频移动,导致样品在某一频段内的反射率值增大,吸波性能减弱。

根据电磁参数测试结构,通过传输线理论^[16-17]计算得到的雷达反射率如图 8 所示。厚度对雷达反射率的影响较大,在吸波材料中存在两种损耗机制,一是介电损耗,电磁波在吸波材料内传输过程中因为介电弛豫作用转化为热;二是干涉相消,进入吸波材料内部的波未完全损耗,在与界面反射波相位相差 $1/4$ 波长奇数倍时,发生干涉而损耗。厚度的增加一方面增加了介电损耗,同时使相位相消的谐振峰向低频移动。

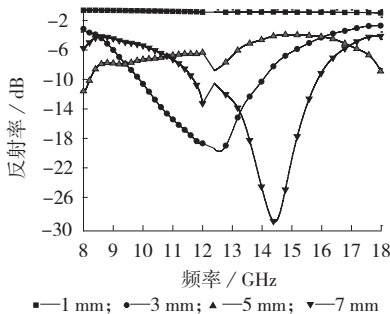


图 8 吸波复合材料雷达反射率理论值

3 结论

(1) 在 8~40 GHz 频段内,短切导电纤维复合材料的介电常数实部随着短切导电纤维含量的增加而增大。在 26.5~40 GHz 频段内,在短切导电纤维的质量分数不大于 5% 时,复合材料的介电常数虚部随着短切导电纤维含量的增加而增大,而当短切导电纤维的质量分数为 7% 时,复合材料的介电常数虚部反而降低。

(2) 在 8~40 GHz 频段内,短切导电纤维质量分数不大于 5% 时,随着短切导电纤维含量的增加,复合材料的反射率降低,吸波性能增强;而当短切导电纤维质量分数为 7% 时,反射率反而增加,吸波性能降低。短切导电纤维质量分数为 5%~7% 时

有一最佳值,使复合材料的吸波性能达到最优。当短切导电纤维质量分数为 5% 时,在整个测试频段内,复合材料反射率值小于 -10 dB 的有效带宽达到 16.5 GHz,有利于进一步优化复合材料的宽频性能;在 10.3 GHz 和 29.8 GHz,复合材料各有一吸收峰,峰值均为 -15 dB。

(3) 复合材料厚度对雷达反射率影响较大,厚度的增加一方面增加了介电损耗,同时使相位相消的谐振峰向低频移动。

参考文献

- [1] 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. Effects of carbon fiber arrangements on microwave absorbing properties of structural composites and mechanics discussions[D]. Tianjin:Tianjin University,2004.
- [2] 杨英萍. 飞机可见光隐身技术的研究与进展[J]. 通讯世界,2019,26(10):311-312.
Yang Yingping. Research and development of visible light stealth technology for aircraft[J]. Telecom World,2019,26(10):311-312.
- [3] 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 anti-stealth technology[J]. Electronic Information Warfare Technology,2016,31(6):40-43.
- [4] 李成功,傅恒志,于翹. 航空航天材料[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
Li Chenggong, Fu Hengzhi, Yu Qiao. Aerospace materials[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2002.
- [5] 赵培聪. 2010 年隐身与反隐身技术发展情况[J]. 现代雷达,2011,33(4):9-12.
Zhao Peicong. Development of stealth and anti-stealth technology of foreign country in 2010[J]. Modern Radar,2011,33(4):9-12.
- [6] 刘凌云. 红外与雷达波兼容隐身复合涂层的机理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
Liu Lingyun. Theoretical study of infrared and radar wave compatible stealth composite coating[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2006.
- [7] 张卫东,冯晓云,孟秀兰. 国外隐身材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000(3):1-5.
Zhang Weidong, Feng Xiaoyun, Meng Xiulan. Status and development of foreign study on new stealthy materials[J]. Aerospace Materials & Technology,2000(3):1-5.
- [8] 师俊朋,胡国平,王金龙,等. 雷达隐身技术分析及其进展[J]. 飞航导弹,2014(2):81-84.
Shi Junpeng, Hu Guoping, Wang Jinlong, et al. Analysis and progress of radar stealth technology[J]. Winged Missiles Journal,2014(2):81-84.
- [9] 曹义,程海峰,周永江,等. 一种新型结构吸波材料的制备[J]. 国防科技大学学报,2005,27(1):44-46.
Cao Yi, Cheng Haifeng, Zhou Yongjiang, et al. The manufacture of new-style structure radar absorbing materials[J]. Journal of National University of Defense Technology,2005,27(1):44-46.
- [10] 任晓辉,张旭东,徐国纲,等. 吸波复合材料的研究现状及发展前景[J]. 山东陶瓷,2006,29(2):20-23.
Ren Xiaohui, Zhang Xudong, Xu Guogang, et al. Current status and future prospects of absorbing composite materials[J]. Shandong Ceramics,2006,29(2):20-23.
- [11] 黄小忠,黎炎图,余维敏,等. 短切磁性碳纤维泡沫复合材料吸波性能研究[J]. 磁性材料及器件,2010,41(5):15-19.
Huang Xiaozhong, Li Yantu, Yu Weimin, et al. Radar absorbing properties of composite foam filled with short magnetic carbon fiber[J]. J Magn Mater Devices,2010,41(5):15-19.
- [12] 王依超,郭高凤,王娟,等. 自由空间法测量电磁材料电磁参数[J]. 宇航材料工艺,2014(1):107-111.
Wang Yichao, Guo Gaofeng, Wang Juan, et al. Measurement of electromagnetic parameters of electromagnetic materials by free-space method[J]. Aerospace Materials Technology,2014(1):107-111.
- [13] 黄大庆,康飞宇,牟维琦,等. 短切碳纤维填充复合材料的吸波特性研究[J]. 隐身技术,2011(4):22-26.
Huang Daqing, Kang Feiyu, Mu Weiqi, et al. Study on radar absorbing properties filled with short carbon fiber[J]. Stealth Technology,2011(4):22-26.
- [14] Rozanov K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation,2000,48(8):DOI:10.1109/8.884491.
- [15] 王晨,顾家琳,康飞宇. 吸波材料理论设计的研究进展[J]. 材料导报,2009,23(3):5-8.
Wang Chen, Gu Jialin, Kang Feiyu. Research progress in theoretical design of microwave absorbing materials[J]. Mater Rev,2009,23(3):5-8.
- [16] 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.
- [17] 宋鑫华,闫鸿浩,马征征,等. 基于传输线理论的电磁波反射系数正交分析[J]. 科学技术与工程,2018,18(12):137-141.
Song Xinhua, Yan Honghao, Ma Zhengzheng, et al. Orthogonal analysis of electromagnetic wave reflection coefficient based on transmission line theory[J]. Science Technology and Engineering,2018,18(12):137-141.