

纳米表面改性纤维增强树脂基复合材料 吸波性能及机理研究

Wave Absorbing Property and Mechanism of Nano-surface-modified
Fiber Reinforced Resin Based Composite

李岳¹, 陶冶¹, 刘培英¹, 张勤¹, 张通和²

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083;

2 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875)

LI Yue¹, TAO Ye¹, LIU Pei-ying¹, ZHANG Qin¹, ZHANG Tong-he²

(1 College of Material Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2 Institute of Low Energy Nuclear Physics,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

摘要: 用 MEVVA 源离子注入法对增强纤维进行表面处理, 形成纳米表面改性层, 用表面纳米改性的纤维制作树脂基复合材料, 并对纳米表面改性纤维增强树脂基复合材料的电磁学性能和吸波特性进行研究, 研究表明: 对增强纤维进行纳米表面改性, 可以有效改善纤维增强树脂基复合材料的吸波性能, 用纳米表面改性法制备的纤维增强树脂基复合材料在 8~18GHz 内, 反射率为 - (2.6~6.1) dB, 吸波曲线具有宽频带吸波特征, 材料的质量增量趋近于 0。

关键词: 纳米表面改性; 纤维增强树脂基复合材料; 吸波性能; 隐身材料

中图分类号: TQ342+.742; TQ327.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2004) 01-0046-03

Abstract: Nanometer modified films was formed on the surface of the fiber by vacuum plasma. The resin matrix composite was reinforced by the modified fibers. The electro-magnetic property and wave-absorbing property of the composite were tested. The results show that the wave-absorbing property of the fiber reinforced composite can be effectively improved by nano-surface modification. The reflectivity of the composite is - (2.6~6.1) dB in 8~18 GHz. The wave-absorbing curve has such character as wide wave-absorbing frequency. The mass increment of the material is almost zero.

Key words: nanometer surface modification; fiber reinforced composite; wave-absorbing property; radar-absorbing materials (RAM)

吸波材料按其成型和承载能力, 可以分为涂层型和结构吸波功能一体化材料两大类^[1]。涂层型吸波材料工艺比较成熟, 几乎已用于所有的隐身兵器上, 但它具有质量增量、粘结性差、维护费用高等缺点。结构吸波功能一体化材料质量增量小, 具有承载和吸波双重功能, 有望实现吸波材料“薄、轻、宽、强”的要求, 是很有发展前途的一类吸波材料。

纤维增强树脂基复合材料是常用的一种结构复合材料, 结构吸波材料中的吸波 C 纤维的制备方法主要有如下几种^[2]: 不完全碳化法, 降低 C 纤维的碳化程度以提高其电阻率, 可以改善 C 纤维的吸波性能, 但会降低 C 纤维的强度; 混杂编织法, 将 C 纤维与异形截面 SiC 纤维混杂编织可使入射波回波产生散射, 降低反射率, 但会显著降低弹性模量和降低比强度。研究表明: 上述方法都可以是纤维增强树脂基复合材

料有一定的吸波作用, 但吸波频带较窄, 一般小于 5GHz, 离实用还有一段距离。

本研究用 MEVVA 源离子注入法制备具有吸波功能的纳米表面改性纤维增强树脂基复合材料是一个新的尝试, 它的质量增量非常小, 甚至可忽略不计; 沉积物质可选范围广; 由于是对纤维进行纳米表面改性, 可把纤维用到各个零部件处的结构材料中, 所以具有广泛的应用前景。

1 实验方法

1.1 纤维纳米表面改性

用 MEVVA 源离子注入法对 C 纤维和玻璃纤维织物进行纳米表面改性, 表 1 和表 2 分别为两种纤维的注入方案。在 C 纤维表面形成纳米改性层。

表 1 C 纤维注入方案

Table 1 Experiment of C fibers

No.	1	2	3	4	5	6
Injected amount / (10^{17} ions \cdot cm $^{-2}$)	4	4	4	4	4	8
Electrical current / mA	4	4	4	9	9	10
Injected elements	Ti	Ti	Ti	Ti	Ti	Ti
Voltage / kV	45	45	45	45	45	45

表 2 玻璃纤维注入方案

Table 2 Experiment of Glass fibers

No.	1	2	3	4	5	6
Injected amount / (10^{17} ions \cdot cm $^{-2}$)	4	8	4	4	4	4
Electrical current / mA	4	8	4	4	4	4
Injected elements	Ti	Ti	Fe	Fe	Ag	Ag
Voltage / kV	45	45	45	45	45	45

1.2 纤维增强树脂基复合材料的制备过程

(1) 配胶: 树脂 (616 环氧树脂) 与固化剂 (三乙烯四胺) 的质量百分比为 10 : 1, 用丙酮稀释至溶液的密度 0.92 ~ 0.94g/cm³。

(2) 把 C 纤维束和玻璃纤维织物排成 180mm × 180mm 的平面, 其中 C 纤维呈单向排布。用刷子在纤维平面上刷少许所配的胶, 为防止压制的板子中有气泡等缺陷, 静置 3.5h, 使丙酮挥发完全。

(3) 将纤维平面叠放在一起, 放入模具, 在液压机上压制成型, 同时升温, 上板 101℃, 下板 119℃。恒温 0.5h 后, 随炉冷却, 取下复合材料板。试样尺寸为 180mm × 180mm × 0.2mm。

1.3 C 纤维电阻率测试实验

用二探针法测定 C 纤维的宏观电阻率, 判断表面改性对 C 纤维电阻率的影响。将一束 C 纤维作为一个电阻, 加一定的电压, 测定纤维两端的电流。

$$R=U/I=\rho \times L/s$$

式中, R 为电阻, U 为电压, I 为电流, L 为纤维长度, s 为纤维束的总截面积, ρ 为电阻率。已知每束纤维的根数及每根的直径, 计算出 s , 由上述公式可计算出电阻率。

1.4 雷达波反射率曲线测试实验

反射率曲线测试的实验设备为 1504B 型 RAM 反射率测试系统。发射源是惠普 HP83751B 扫频源, 接收源是惠普 HP8757E 标量网络分析仪。其工作原理如下: 从发射天线发出的雷达波以入射角 θ 入射到试样表面, 与材料发生电磁作用后, 形成反射波而被接受天线所探测。表征平板材料反射特性的参量为反

射系数 (%) 或反射率 (dB), 均以材料反射相对于同样尺寸的金属板的反射定量表示, 是衡量材料电性能的重要技术指标^[3]。设入射波功率为 P_1 , 反射波功率为 P_2 , 则以分贝计反射率 R (dB) = 10lg $|P_2/P_1|$ 。本实验使用的入射角 $\theta=8^\circ$ 。

2 结果分析

2.1 C 纤维电阻率测试

从表 3 的测量结果看, C 纤维的电阻率只有很小的变化。经过纳米表面改性后的玻璃纤维的电阻率仍很大, 超出了仪器的测量范围。由此可见, 纳米表面改性 C 纤维增强树脂基复合材料的吸波性能变化不是电阻率变化导致的结果。

表 3 纳米表面改性 C 纤维的电阻率

Table 3 Resistivity of nano-modified C fiber

No.	0#	1#	2#	3#
Resistivity / ($10^{-5}\Omega \cdot$ m)	2.944	11.99	6.800	4.136

Note: 0# is C fibers not modified, 1#, 2#, 3# are C fibers which are surface-modified.

2.2 雷达波反射率测试结果

由未经表面改性的 0# C 纤维制备的树脂基复合材料的雷达波反射率在 8 ~ 18GHz 的雷达常用频段上几乎为零。由纳米表面改性的 1# C 纤维增强树脂基复合材料的雷达波反射率曲线如图 1 所示。测试时电磁场极化方向与其水平, 在 8 ~ 18GHz 的雷达常用频段上, 雷达波反射率在 - (0.22 ~ 4.86) dB 范围。当雷达频率在 14.2GHz, 16GHz, 17GHz 时纳米表面改性 C 纤维增强树脂基复合材料的反射率出现三个峰值, 分别为: - 3.66dB, - 3.85dB, - 4.86dB。

在 8 ~ 18GHz 频带上随频率的增加, 雷达波反射率整体上呈递减的趋势, 吸波效果随频率的增加而逐渐变好。

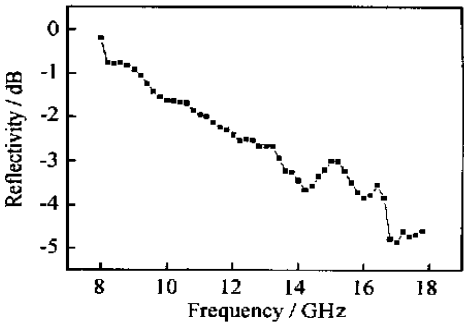


图 1 1# 试样的雷达波反射率测试曲线 (水平极化)
Fig. 1 The reflectivity curve of sample 1# (horizontal polarization)

图2为电磁场极化方向与其试样垂直的雷达波反射率测试曲线。在8~18GHz的雷达常用频段上,雷达波反射率在- (2.68~6.13) dB范围。当雷达频率在12.2GHz, 14.2GHz, 16.6GHz, 17.8GHz时的雷达波反射率测试曲线出现四个峰值, 分别为: -5.03dB, -6.13dB, -5.61dB, -5.56dB。在14.20GHz雷达波反射率达到最小值-6.13dB, 这时的吸波效果最好。

在8~18GHz频带上雷达波反射率曲线近似于漏斗型曲线。

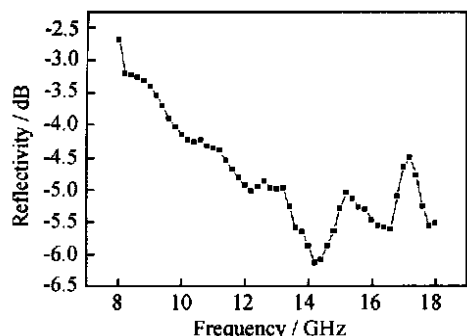


图2 1# 试样的雷达波反射率测试曲线 (垂直极化)

Fig. 2 The reflectivity curve of sample 1# (vertical polarization)

纳米表面改性的玻璃纤维增强树脂基复合材料的雷达波反射率在8~18GHz范围内为0~-3dB, 吸波效果不明显。

3 吸波机理讨论

纤维增强树脂基复合材料具备这样的吸波性能是因为纤维纳米表面改性所带来的多种电磁学效应所致。可以认为有以下几种效应对纤维增强树脂基复合材料吸波性能的改善起了主要作用。

3.1 多重界面散射效应

在C纤维表面离子注入Ti后, 在表面形成非平衡态结构的Ti+ C纳米改性层, 其电磁学性能与C纤维基体有很大差异。当电磁波进入复合材料, 环氧树脂是透波材料, 对电磁波不起衰减和损耗作用。纳米改性层的厚度远远小于电磁波在该层中的趋肤深度, 使得能够进入到C碳纤维的表面改性层中, 在该层中电磁波发生介电损耗和能量弛豫^[4]。在该复合材料中, 每根C纤维可以看作是一个具有一定衰减功能的界面, C纤维直径为6~8μm, 一束中有1.2万根C纤维, 电磁波经过大量的C纤维界面的散射作用, 产生大量的能量损耗, 使反射波的能量降低, 产生吸波效果。

玻璃纤维布离子注入表面改性对吸波性能的改善效果不明显。其原因是: 玻璃纤维布离子注入后制

成的复合材料试样最后得到的纳米表面改性层界面仅有8层(玻璃纤维布的层数)。而C纤维增强树脂基复合材料的制备方法是: 首先对成束的C纤维进行离子注入, 将注入后的C纤维织成纤维布后再制备纤维增强树脂基复合材料, 因此, 纳米表面改性层界面数量可以认为是无穷大, 对雷达波的界面损耗也就多, 所以吸波效果好于表面改性的玻璃纤维。

3.2 电介质层中的介电损耗与能量弛豫

纳米膜电介质层是电导率很低的材料, 在交变电场下, 晶体中的电偶极子随交变电场发生弛豫, 从交变电场中吸收能量, 发生介电损耗。纳米膜表面的界面极化更大, 因而介电损耗更大。

本试验对纤维注入的Ti是非铁磁性材料, 它在树脂基复合材料中对吸波性能产生影响的损耗通道有: 纤维界面的散射作用、介电损耗与能量弛豫。如果注入的是铁磁性材料, 在损耗通道中将会加入铁磁损耗等其他效应^[5], 吸波性能将会进一步提高。

4 结论

(1) 对增强纤维进行真空等离子体纳米表面改性, 可以显著改善增强纤维树脂基复合材料的吸波特性。

(2) 经表面改性的纤维增强树脂基复合材料的雷达反射率曲线在较宽的频率范围内整体下降, 有可能达到展宽吸收频带的目的。

(3) 纳米表面改性纤维增强树脂基复合材料具有良好吸波特性的主要原因是: 它具有多重界面衰减效应。界面多, 雷达波经过无数次的衰减, 吸波效果好。

(4) 纤维增强树脂基复合材料的吸波效果与测试时电磁场的极化方向有一定的关系。

参考文献

- [1] 赵东林, 周万城. 涂覆型吸波材料及其涂层结构设计[J]. 兵器材料科学与工程, 1998, 21(4): 59-62.
- [2] 赵东林, 沈曾民, 等. 碳纤维结构吸波材料及其吸波碳纤维的制备[J]. 高科技纤维与应用, 2000, 25(3): 8-11.
- [3] 阮颖整, 等. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 102-104.
- [4] 黄昆原著, 韩汝琦改编. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988. 417-421.
- [5] 戴道生, 钱昆明. 铁磁学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998. 478-482.

基金项目: 国家自然科学基金(50273001); 航空科学基金(02J51010)

收稿日期: 2003-07-17; 修订日期: 2003-10-16

作者简介: 李岳(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为纳米多层膜隐身材料及机理研究以及表面改性纤维增强树脂基复合材料的隐身性能研究, 联系地址: 北京航空航天大学材料科学与工程学院陶治教授转李岳(100083)。