

以异型碳化硅纤维为吸收剂的结构吸波材料设计

Designing of Structural Radar Absorbing Materials with Shaped Silicon Carbide Fibers for Absorbent

王 军, 陈 革, 宋永才, 王应德, 冯春祥

(国防科技大学材料工程与应用化学系, 长沙 410073)

WANG Jun, CHEN Ge, SONG Yong-cai, WANG Ying-de, FENG Chun-xiang

(National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

摘要: 通过阻抗匹配设计, 将异型截面碳化硅纤维与环氧树脂复合, 制备成结构吸波材料。这种材料对 X-波段的雷达波具有大于 10dB 的反射衰减。

关键词: 雷达吸波材料; 碳化硅纤维; 阻抗匹配设计

中图分类号: TM25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2000) 07-0027-03

Abstract: The structural radar absorbing materials, which composed of shaped silicon carbide fibers with resin, were prepared through designing impedance matching, the materials exhibited a reflection attenuation amount of about 10dB in the range of X-band.

Key words: radar absorbing materials; silicon carbide fibers; designing impedance matching

先驱体转化法碳化硅 (SiC) 纤维具有高强度、高模量、耐高温氧化、电阻率可调节等优良特性, 在结构吸波材料上具有重要的应用前景^[1,2]。以聚碳硅烷 (PCS) 为原料, 采用具有三叶型截面的异型纺丝组件, 通过熔融纺丝制得异型截面 PCS 纤维, 再经过不熔化和高温烧成, 可以制备出具有异型 (三叶型) 截面的 SiC 纤维。本研究通过阻抗匹配设计, 将所制备的异型截面 SiC 纤维与环氧树脂复合, 制备出具有良好吸波性能的结构吸波材料。

1 原料与实验方法

以自制聚碳硅烷 (PCS) 为基本原料。将 PCS 置于自制单孔熔融纺丝机中, 在高纯 N₂ 保护下, 加热至纺丝温度, 脱泡处理。在一定压力下, PCS 熔体经具有三叶型喷丝板的纺丝组件流出, 牵伸成型为三叶型 PCS 原纤维。原纤维经空气不熔化处理, 再在高纯 N₂ 保护下高温处理, 制得外形如图 1 所示的三叶型 SiC 纤维。经阻抗匹配设计, 将具有一定强度和适宜电磁参数的异型 SiC 纤维正交铺排, 刷上一定比例加有固化剂的环氧树脂, 加压固化, 制得单层树脂基结构吸波材料。将其按阻抗匹配设计要求多层叠合即可制得多层结构吸波材料。采用空间样板移动法对结构吸波材料样品进行雷达波吸收性能测试。

2 阻抗匹配设计原理

从电动力学原理可知, 吸波材料对雷达波具有好的吸收性能不仅取决于材料具有大的介电损耗, 还决定于雷达波能否从介质 (如自由空间) 进入材料内部, 这就要求材料表面的电阻抗与介质相同, 也就是阻抗匹配。假设有一束电磁波由自由空间入射到有损耗的介质上, 当电磁波垂直入射时, 有损耗介质可由图 2 的等效电路进行计算。

在数学处理上, 一般采用电磁场传输线理论来模拟计算, 当雷达波垂直入射时, 材料的特性阻抗为:

$$Z_1 = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) = \eta_h \gamma_d \quad (1)$$

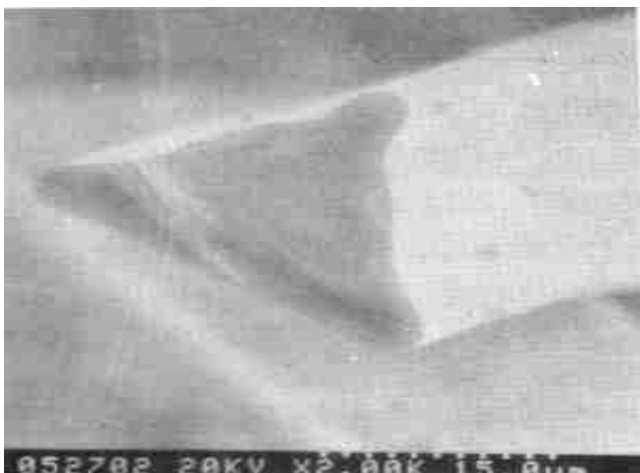


图 1 三叶型 SiC 纤维

Fig. 1 Trilobal SiC fiber

其中, ϵ 和 μ 分别为介质的相对介电常数与相对磁导率, 即: $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ 和 $\mu = \mu' - j\mu''$, $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ 为介质特性阻抗, γ 为电磁波传播常数, Z_0 为真空特性阻抗。由材料的特性阻抗可计算出反射系数 Γ :

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2)$$

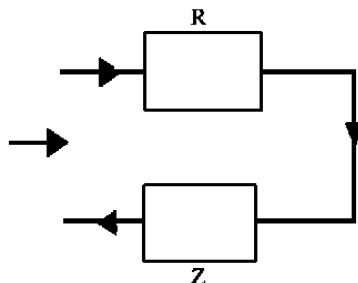


图2 单层损耗介质的等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of monolayer loss medium

若以分贝来表示反射系数, 则可得反射率:

$$R = -20 \log |\Gamma| \quad (3)$$

对于多层吸波材料的处理, 一般采用多层介质等效方法(如图3)^[3,4], 即将多层材料等效成一层单一介质。若已知多层材料各层的电磁参数及厚度, 则可计

$$\alpha_i = \frac{\omega}{2c} \cdot \frac{\mu_r \epsilon_i + \mu_r \epsilon_i + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2}{(\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2} \quad (8)$$

$$\beta_i = \frac{\omega}{2c} \cdot \frac{\mu_r \epsilon_i + \mu_r \epsilon_i + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2}{(\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2 + (\mu_r \epsilon_i)^2} \quad (9)$$

式中 α 、 β 分别为第 i 层的衰减常数和相位常数, 而

$$\tanh(k_i d_i) = \frac{\tanh(\alpha_i d_i) + j \tanh(\beta_i d_i)}{1 + j \tanh(\alpha_i d_i) \tanh(\beta_i d_i)} \quad (10)$$

因此, 结构吸波材料与空气分界面的输入阻抗为:

$$Z_n = \eta_n \frac{Z_{n-1} + \eta_n \tanh(\gamma_n d_n)}{\eta_n + Z_{n-1} \tanh(\gamma_n d_n)} \quad (11)$$

若材料对电磁波无反射, 理想情况下必须使材料的阻抗与自由空间的阻抗相匹配, 亦即:

$$Z_n = Z_0 \quad (12)$$

式中 Z_0 为空气的特性阻抗, 它等于 1。如果上式不成立, 则当电磁波入射到材料表面时, 在空气与材料的分界面上, 材料反射电磁波, 其反射系数为:

$$\Gamma = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \quad (13)$$

如用分贝为单位表示反射系数, 则有:

$$R = -20 \lg |\Gamma| = -20 \lg \left| \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \right| \quad (14)$$

利用上述公式编制计算机程序, 在已知结构参数和结构类型时, 可计算出结构吸波材料的频率-反射

算出等效介质的电磁参数, 再由电磁参数计算材料的反射率及等效的结构参数。各层的输入阻抗为:

$$Z_1 = \eta_h (\gamma_1 d_1) \quad (4)$$

$$Z_i = \eta \cdot \frac{Z_{i-1} + \eta_{i+1} \tanh(\gamma_i d_i)}{\eta_{i+1} + Z_{i-1} \tanh(\gamma_i d_i)} \quad (i=2, \dots, n) \quad (5)$$

式中 η 为第 i 层的特性阻抗, 且:

$$\eta_i = \frac{(\mu_{r,i} - j\mu_{r,i}) / (\epsilon_{r,i} - j\epsilon_{r,i})}{(\mu_{r,i} - j\mu_{r,i}) / (\epsilon_{r,i} - j\epsilon_{r,i})} \quad (6)$$

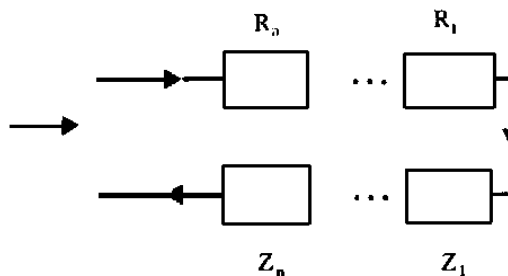


图3 多层损耗材料的等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of multilayer loss materials

k_i 为通过第 i 层的波矢, 由于电磁波垂直入射, 所以它是常数, 可表示为:

$$k_i = a_i + jb_i = j\omega \cdot \frac{\epsilon_r \mu_r}{c} \quad (7)$$

由上式可得:

衰减曲线。在给定反射率、频宽等条件时, 对结构吸波材料的阻抗进行匹配设计, 即设计材料结构和参数。

3 吸波材料结构及吸波性能

单层雷达吸波材料存在吸收频带较窄的缺点, 要使吸波材料获得所希望的频宽, 一般按电阻抗渐变的原则复合成多层材料^[3,4], 并通过计算机辅助设计, 在多种材料体系中选择最佳电磁参数及材料厚度配合。采用多层结构是拓宽雷达波吸收材料吸波频带的常用方法。但考虑到实际施工中的困难, 实际应用的吸波材料一般不超过三层。本研究所制备的结构吸波材料采用的也是三层结构, 其示意图见图4。

结构吸波材料主要由树脂基体、增强剂和吸收剂复合而成。本研究采用环氧 618 树脂为基体, 增强剂和吸收剂都是异型 SiC 纤维。由于纤维力学性能和成型工艺等多方面的问题, 材料的电磁参数、电磁损耗值调节幅度小, 难以与对电磁参数进行优化设计得到

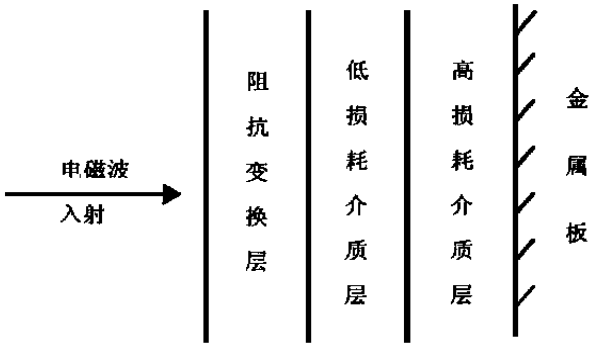


图 4 三层结构吸波材料示意图

Fig.4 The sketch map of tri-layer structural radar absorbing materials

的结果相一致，因此本文主要对吸波材料的结构与厚度进行设计，使材料阻抗尽可能与自由空间匹配。所制备的三层结构吸波材料总厚度为4mm，从最外层到与金属板相接触的最里层分别为第一、二、三层，厚度分别为1.5、1.5、1.0mm，每层选用的纤维品种分别为SiC-1、SiC-2和SiC-3，其基本电磁性能见表1。

表 1 10GHz 下异型 SiC 纤维基本电学性能

Table 1 The basic electrom agnetic properties of shaped SiC fibers at 10GHz

纤维品种	抗张强度 / GPa	电磁参数			
		ϵ	ϵ	μ	μ
SiC-1	1.47	4.19	2.07	1.02	0.00
SiC-2	1.25	5.04	4.69	0.96	0.01
SiC-3	1.55	4.87	8.97	1.02	0.04

本研究制备的层板型结构吸波材料的反射衰减曲线见图5。可以看出，理论计算值与实测值基本吻合，说明阻抗匹配设计对雷达吸波材料的制备具有很强的理论指导意义。经过阻抗匹配设计，异型SiC纤维与环氧树脂复合制成的层板型结构吸波材料具有优异的吸波特性。

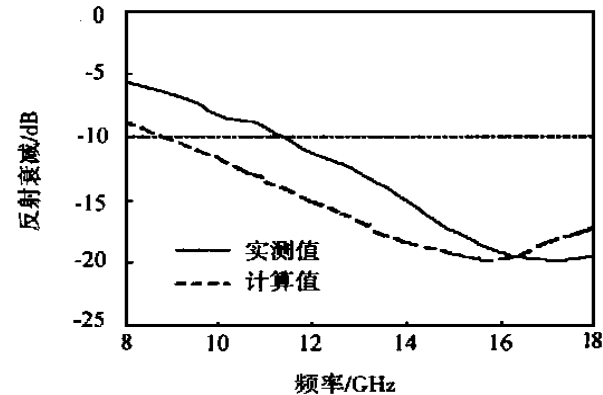


图 5 三层结构吸波材料的吸波性能

Fig.5 The reflection attenuation curve of tri-layer structural radar absorbing materials

4 结论

阻抗匹配设计对雷达吸波材料的制备具有很强的理论指导意义，通过阻抗匹配设计，将掺混型SiC纤维与环氧树脂复合可以制备出具有良好吸波性能的结构吸波材料。

参考文献

[1] Yamamuna T., Toshikawa T., Shibuya M.. USP5094907, 1992
[2] 王军, 宋永才, 冯春祥. 功能材料, 1997, 28 (6): 619
[3] 王军等. 功能材料, 1998, 29 (增刊): 219
[4] 赵辉, 宋宝钢. 宇航材料工艺, 1989, 19 (4~5): 59

基金项目: 国家自然科学基金资助 (59802012); 国防预研资助项目
收稿日期: 1999-07-14; 修订日期: 2000-03-20
作者简介: 王军 (1970-), 男, 博士, 主要从事高性能陶瓷纤维及其复合材料的制备和雷达吸波结构用吸收/增强剂的研究工作。联系地址: 长沙国防科学技术大学材料工程与应用化学系 (410073)。

本文编辑: 解 宏

* * * * *

(上接第 26 页)

3 结论

(1) 快速凝固 Bi-Mn 合金的饱和磁化强度 σ_s 与剩磁 σ_r 随含 Mn 量线性变化, 变化关系的回归方程显著。

(2) 快速凝固 Bi-Mn 合金的矫顽力 H_m 随含 Mn 量的变化非线性关系, 但有峰值存在。

(3) 快速凝固使 Mn 在 Bi 中的固溶度扩展至 2.4%。

参考文献

[1] Masuda M et al. Jpn. J. Appl. Phys. 1987, 26: 707
[2] Nagata et al. Jpn. J. Appl. Phys. 1984, 23: 580
[3] Shetty M N et al. J. Mater. Sci. 1987, 22: 1908
[4] 陈翌庆等. 快速凝固 Al-7.83Fe 合金的显微组织特征 [J]. 矿冶工程, 1999, 19 (3): 59~60
[5] 彭平等. 快凝 Ni₇₄Si₁₀B₁₆ 非晶合金电阻热稳定性的考查 [J]. 功能材料, 1999, 30 (5): 479~480
[6] 吕光裂等. 快凝合金 Zr (Ni_{0.55}Mn_{0.3}VO_{0.1}Cr_{0.05})_{2.1} 的相结构与储氢性能 [J]. 金属学报, 1999, 35 (5): 453~457
[7] 刘佐权等. 中国学术期刊文摘, 1999, 5: 670

收稿日期: 1999-09-19; 修订日期: 2000-03-28
作者简介: 晋芳伟 (1965-), 男, 讲师。主要从事固体材料的结构与性能研究、材料的深冷处理研究。联系地址: 昆明市云南农业大学工程技术学院 (650201)

本文编辑: 孙常青