

低浓度磁性纤维对吸波结构隐身材料电性能影响研究

黄全军^{1, 2, *}, 龚荣洲³

1. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

2. 隐身技术航空科技重点实验室, 辽宁 沈阳 110035

3. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘 要: 吸波结构隐身材料电性能提升与其内部的吸波成分关系密切, 研究发现, 磁性纤维具有形状各向异性及良好电磁性能, 与吸波结构隐身材料结合可形成具有一定吸波能力及力学性能的吸波结构隐身材料。雷达吸波材料性能主要依赖于其中的雷达波吸收剂损耗特性。首先利用成熟的CST仿真软件针对磁性纤维与雷达波相互作用开展了仿真研究, 验证了磁性纤维散射具有显著效应。通过等效电路模拟及电磁理论分析, 完成了低浓度磁性纤维吸波结构隐身材料的电磁参数数学模型的建立及验证。同时完成了纤维参数对材料电性能的影响研究, 获得了其磁性纤维参数的影响规律: 纤维线度(直径、长径比)首先影响极化因子, 从而影响等效介电常数; 当极化因子小到一定程度后, 其等效介电常数变化趋于平坦; 纤维线度、电导率、浓度最终影响吸波结构隐身材料的吸波性能。

关键词: 磁性纤维; 吸波结构; 隐身材料; 电性能; 极化因子; 等效介电常数

中图分类号: TQ342+.83

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2014) 08-0105-06

吸波结构隐身材料良好的吸波性能需具有以下两个条件:(1)入射来的雷达波要尽可能多地进入吸波材料而不被反射;(2)材料要能将雷达波损耗吸收掉^[1]。与传统粉体雷达波吸收剂相比,纤维型吸收剂的吸波材料具有各向异性、优良电磁性能、频响特性的可控等优点,在吸波材料、特别是结构型吸波材料中都有重要价值^[2-4]。磁性纤维的形状各向异性强、介电实部和虚部较高,是一种强损耗吸收剂^[5]。据报道,磁性纤维吸收剂体积占空比为25%、厚度为1mm多晶磁性铁纤维吸波涂层在3~18G的宽频带内反射系数低于-5dB^[6],磁性纤维吸波材料已用于战略防御部队的导弹和其他飞行器^[7]。因此,开展磁性纤维参数对其电性能影响规律的研究,为吸波结构隐身材料可设计性提供理论依据和支撑。

本文通过理论分析及试验,开展低体积分数磁性纤维在结构材料中排布方式及相关参数的变化对材料电磁特性的影响研究,获得其影响规律及设计方法,为吸波结构隐身材料的设计奠定基础。

1 电磁波与纤维的相互作用机制

1.1 纤维散射作用机理

电磁波在传播过程中遇到的障碍物称为散射体。在入射波作用下,金属散射体上将引起表面分布的电荷、电流;对于介质散射体,入射场会引起介质极化、磁化;在介质面以及介质内部出现极化电荷和极化、磁化电流分布。这些电荷、电流随入射场变化,向外辐射电磁波。在入射场激励下,散射体向外辐射电磁波的现象称为电磁波的散射。

收稿日期: 2014-06-10; 录用日期: 2014-07-10

基金项目: 航空科学基金(2011ZF01009)

*通讯作者: Tel.: 024-26784155 E-mail: hqj20090130@163.com

引用格式: HUANG Quanjun, GONG Rongzhou. Electrical properties influence study of low concentrations magnetic fiber for absorbing structure stealth material [J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(08): 105-110. 黄全军, 龚荣洲. 低浓度磁性纤维对吸波结构隐身材料电性能影响研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(08): 105-110.

散射场可以看作是散射体内的有效电流在真空中激发的场。为摸清其散射情况,首先建立初步仿真模型,采用成熟的CST仿真软件进行其电磁波与纤维的相互作用仿真分析。结果显示,对于纤维长度3mm、直径4 μm 的单根纤维,随着入射电磁波频率升高,散射效应变得更加明显,如图1所示(图中电磁波入射方向均为-Z轴方向,纤维排列方向平行入射面)。

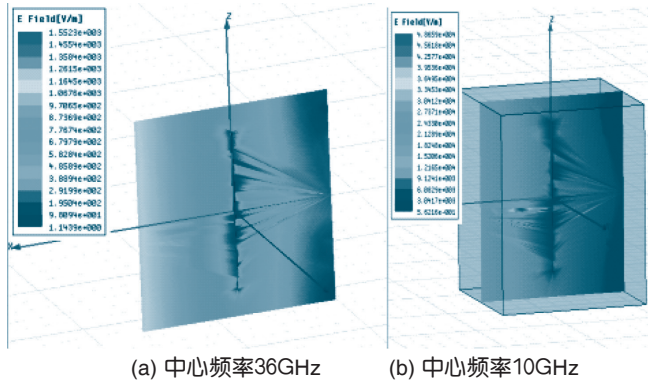


图1 单根纤维散射场分布仿真图

Fig.1 The simulation diagram of single fiber scattering distribution

而对于长度3mm、直径4 μm 的两根纤维,在电场中存在着较强的相互作用,场分布出现明显的强、弱分布,如图2所示。两根纤维间距1mm,纤维排列方向垂直于入射面。

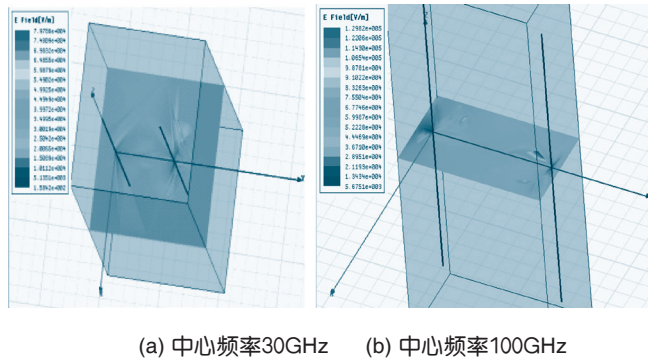


图2 两根纤维散射场分布仿真图

Fig.2 the simulation diagram of double fiber scattering distribution

经分析,入射电磁波投射到磁性金属纤维,且其线度 l 比波长小时,则纤维在外电场作用下,将感生出与外场同频率的电矩和磁矩,这些随时间变化的电矩和磁矩作为偶极天线再辐射,把入射波部分能量向四周散射出去。在雷达波高频带,磁性金属纤维发挥了电偶极子天线作用,向四周散射掉了大部分能量,从而表现出优异的吸波性能;在雷达波低频带,磁性纤维具有较大的磁导率实部与虚部,可有效衰减其电磁波能量^[8,9]。因此,磁性纤维能够获得超宽的频响特性、在低频带与高频带都表现出良好的吸波效果。

1.2 纤维电磁参数的等效电路模型

1982年Gauss提出了一种新型雷达波吸收材料(RACO)结构^[10]。磁性纤维规则排布如图3所示。

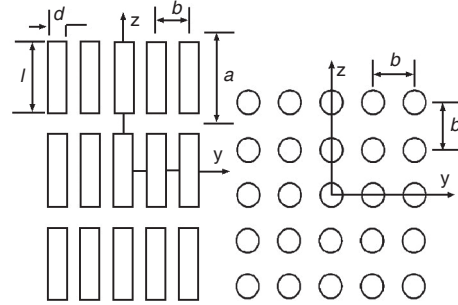


图3 规则RACO示意图

Fig.3 Schematic diagram of rule RACO

对于单一纤维,由于高频下电感不显著,通过纤维的电压可简单写作:

$$V = R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q \quad (1)$$

式中, q 为纤维上的电荷, R 为电阻, C 为纤维的电容。

平行于纤维的外部场 V 可写成 $lE_0 e^{j\omega t}$, l 为纤维长度。纤维电阻 $R = l/\sigma S$, σ 为纤维的电导率, S 为横截面积。

电容 $C = S\epsilon_0 / lL$,其中 ϵ_0 为自由空间的介电常数, L 为极化因子, $L = \ln(l/d)/(l/d)^2$, l/d 为长径比, P 为偶极矩。分别将 V , q , R , C 的表达式(1)代入可得到含偶极矩的表达式为:

$$lE_0 e^{j\omega t} = \frac{l}{\sigma S} \cdot \frac{P}{l} + \frac{lL}{S\epsilon_0} \cdot \frac{P}{l} \quad (2)$$

取 $P = \bar{P} e^{j\omega t}$,而 $S = \pi d^2/4$,故由(2)式可得:

$$\bar{P} = \frac{\pi d^2 l \epsilon_0 \sigma}{4(j\omega \epsilon_0 + \sigma L)} E_0 \quad (3)$$

考虑到纤维的相互作用,外部场 E_0 需要用纤维的局部场 E_L 来代替,因此

$$\bar{P} = \frac{\pi d^2 l \epsilon_0 \sigma}{4(j\omega \epsilon_0 + \sigma L)} E_L \quad (4)$$

纤维在介质中起着原子或分子的作用,任意节点材料的介电常数 ϵ_r 的一般关系式为:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{p}{\epsilon_0 E} \quad (5)$$

此处, p 为材料极化强度, E 为介电材料的平均场强。对于规则RACO,

$$p = N \bar{P} \quad (6)$$

此处 N 为单位体积纤维的数量, \bar{P} (偶极矩)由式(3)定义。定义体积分数 $f_v = N(\pi/4)d^2 l$,对于图4所示的规则排

布,可以表示成:

$$f_v = \frac{\pi}{4} \frac{1}{(a/l)(b/l)^2(l/d)^2} \quad (7)$$

故

$$P = \frac{\varepsilon_0 \sigma f_v}{j\omega \varepsilon_0 + \sigma L} E_L \quad (8)$$

它表明介质材料中的平均场强 E 与局部场强 E_L 有关,可由下式表示:

$$E = E_L - A \frac{P}{\varepsilon_0} \quad (9)$$

这里, A 为偶极子作用因子,与RACO的几何排布有关。

将式(9)代入式(5),由式(8)可得:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{\frac{X}{1-AX}}{1 + j\omega\tau(\frac{1}{1-AX})} \quad (10)$$

式中,单根纤维的衰减时间 $\tau = \varepsilon_0 / \sigma L$, $X = f_v / L$ 。

当纤维为无规则排布时,其等效介电常数表达为:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{\frac{X'}{1-AX'}}{1 + j\omega\tau(\frac{1}{1-AX'})} \quad (11)$$

这里 $X' = f_v / 3L$,系数3是由于偶极子无规则取向所引起。当 $A=0$ 时,忽略纤维相互作用;当 $A=1/3$ 时,排列偶极子为无规则集合近似。

2 有效电磁参数及吸波结构隐身材料的电性能模型

2.1 有效介电常数

Lagarkov和Sarychev^[11,12]在Bruggeman有效媒质理论的基础上,考虑到磁性纤维之间的相互作用,有效媒质中的纤维附近的局域介电常数是均匀的,是与纤维之间距离的函数,这使得纤维的纵向去极化因子变为

$$g_{//} = \frac{b^2 \varepsilon_e}{a^2 \varepsilon_d} \ln(1 + \frac{a \varepsilon_d}{b \varepsilon_e}) \quad (12)$$

式中, a 、 b 分别为纤维的长度和直径。另外又考虑到纤维在高频段时电磁波与纤维相互作用出现趋肤效应,以及电磁波传播的推迟效应,Lagarkov和Sarychev将磁性纤维的直流电导率归一化为高频时的体电导率,同时引入一个无量纲的纤维频率 Ω 来考虑Bruggeman有效媒质理论所采用的准静场近似所忽略的推迟效应。这样,按照Bruggeman有效媒质理论的平均场近似,磁性纤维和电介

质的平均极化强度为零,即

$$\frac{Pf(\Delta)\varepsilon_m/\varepsilon_e}{3[1+f(\Delta)(\varepsilon_m/\varepsilon_d)g_{//}\cos\Omega]} + 3(1-p)\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_e}{2\varepsilon_e + \varepsilon_d} = 0 \quad (13)$$

式中 $f(\Delta)$ 为在高频下将直流电导率归一化的系数函数, Δ 为纤维半径与趋肤深度的比值, ε_m 、 ε_d 分别为磁性纤维和电介质基体的介电常数, ε_e 为吸波结构隐身材料的有效介电常数。

此式为SDEMT理论(Scale Dependent EMT),该有效媒

质理论给出吸波结构隐身材料的逾渗阈值为 $\frac{9b}{2a}$,这与数值

计算和其他研究给出的逾渗阈值 $\propto b/a$ 相一致。该理论也是目前唯一能正确预测逾渗系统逾渗阈值的有效媒质理论。由该理论可以得出,磁性纤维在体积分数十分低时,吸波结构隐身材料有可能接近或达到逾渗阈值,因而可利用低浓度的磁性纤维实现较高的介电常数,有利于吸波材料的设计。

2.2 有效介导率

磁性纤维-电介质吸波结构隐身材料的一个重要性能,就是尽管组成吸波结构隐身材料的纤维和电介质都是非磁性材料,但在时变磁场的作用下,吸波结构隐身材料呈现很强的顺磁性质。考虑两根平行的纤维,当时变磁场垂直作用于两根纤维所在平面时,两根纤维在相反的方向被磁场诱导出电流,在纤维之间产生位移电流,这就形成了一个“闭合”回路。Lagarkov和Sarychev^[11,12]计算出了这样两根平行纤维的磁矩:

$$m = 2H_0 a^3 C_2 (ka)^2 \frac{\tan(ga) - ga}{(ga)^3} \quad (14)$$

式中 C_2 是平行纤维之间的电容,参数 g 由下式定义,

$$g = \sqrt{\varepsilon_d \mu_e + i \frac{\varepsilon_d}{2\Delta^2 f(\Delta) \ln(d/b)}} \quad (15)$$

d 为纤维之间距离, μ_c 为平行纤维系统的有效磁导率。考虑到纤维在吸波结构隐身材料中的随机分布,最终给出磁性纤维-电介质吸波结构隐身材料的有效磁导率所满足的方程:

$$\mu_e = 1 + \frac{2}{3} p \frac{a^2 \varepsilon_d (ka)^2 \tan(ga) - ga}{b^2 \ln(a/b) (ga)^3} \quad (16)$$

2.3 吸波结构隐身材料的吸波特性

金属衬底的磁性纤维-电介质吸波结构隐身材料的反射率可以由其有效电磁参数导出:

$$R = 20 \log \left(\left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \right) \quad (17)$$

式中,吸波结构隐身材料的输入阻抗由其有效电磁参数决定:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_e}{\epsilon_e}} \tan(ikd\sqrt{\epsilon_e \epsilon_d}) \quad (18)$$

3 吸波结构隐身材料电性能仿真及验证

根据建立的数学模型,完成了极化因子和介电常数随长径比关系仿真分析,结果如图4和图5所示。可以发现,极化因子在一定的长径比范围内随其增大而急剧变小,从而对等效介电常数产生影响;而当极化因子小到一定程度后,介电常数变化趋于平坦。图4、图5是根据匹配原则反推的介电常数和极化因子,图示区间内为满足设计要求的取值范围。因此纤维线度是控制纤维类吸波材料性能的关键。

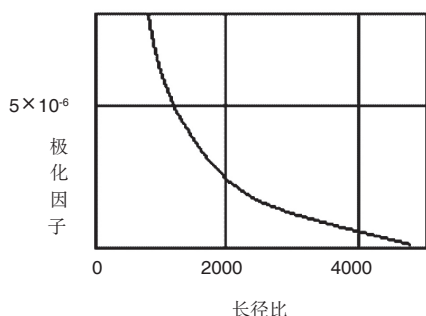


图4 极化因子随长径比变换曲线

Fig.4 The ratio of length to diameter affects the polarization factor

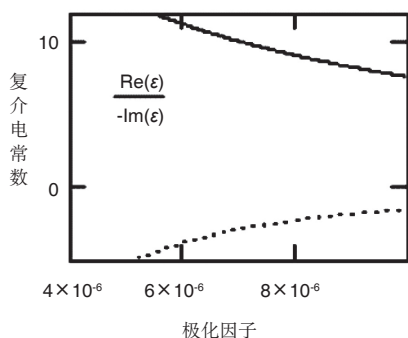


图5 等效介电常数随极化因子变化曲线

Fig.5 The polarization factor affects the equivalent permittivity

当固定吸波结构隐身材料厚度 d 为3mm,假定磁性纤维电导率为 $2 \times 10^5 \text{ s} \cdot \text{m}$ 、长径比为990、体积浓度为 2.1×10^{-4} 时,在8GHz处可获得-15.86dB的反射率。优化磁性纤维的线度(直径、长径比)、体积浓度,可以估算磁性纤维有序、无序排布时吸波结构隐身材料反射率性能。纤维规则/无规则排布

时的吸波结构隐身材料反射率性能对比情形如表1所示,可以看出,当纤维规则排布时,为获取相当的反射率,其体积比浓度更低。

表1 纤维规则/无规则排布吸波材料模拟计算结果($f=10\text{GHz}$)

Table 1 the simulation results of radar wave absorbing material of regular/irregular arrangement of fiber($f=10\text{GHz}$)

| | f/GHz | D/mm | F_v | l/d | r | $R(\text{dB})$ |
|-----|----------------|---------------|----------------------|-------|-------|----------------|
| 规则 | 10 | 4 | 1.5×10^{-5} | 1650 | 0.117 | -18.6363 |
| | | 10 | 1.8×10^{-6} | 4590 | 0.113 | -18.9384 |
| | | 16 | 4×10^{-6} | 1560 | 0.118 | -18.5624 |
| 无规则 | 10 | 4 | 3.5×10^{-5} | 1590 | 0.123 | -18.202 |
| | | 10 | 8.6×10^{-5} | 1030 | 0.121 | -18.344 |
| | | 16 | 1.1×10^{-5} | 1850 | 0.123 | -18.202 |

低浓度、无规则排布磁性纤维的吸波结构隐身材料样品制备,选取羰基 $\text{Fe}_{55}\text{Ni}_{45}$ 纤维为吸收剂^[8,9],磁性纤维重量比为5%。采用波导方法测试其电磁参数,如图6所示。可以看出,磁损耗很小,而介电损耗占据了主导地位。因其导电性及形状各向异性而产生的偶极子谐振作用已占主导,吸波机理有所改变。

将其制备成厚度为3.7mm的复合吸波材料,其反射率曲线如图7所示,两个波段的反射率均小于-5dB。对具有如图6所示的电磁特性材料进行了模拟计算,得到的模拟计算值如图7所示。可以看到,利用电磁参数计算反射率的方法对于低体积比分数各向异性材料同样适用。这证明利用测试的电磁参数模拟计算纤维类吸波材料反射率的有效性。

4 结论

采用经典的有效媒质理论,建立了低浓度低浓度磁性纤维吸波结构材料电性能数学模型,据此,完成了该种吸波结构隐身材料宽频带吸波性能的数值分析及验证,得到如下结论:

(1) 磁性纤维对雷达波具有明显散射现象,随着入射电磁波频率的升高,散射效应变得更加显著;

(2) 利用等效电路模型建立了磁性纤维以低体积分数分布在吸波结构隐身材料基体中的电磁参数与反射率性能,并通过实验验证了低浓度磁性纤维-复合吸波材料的电磁参数、反射率模拟计算的有效性;

(3) 数值计算结果表明,填充比、纤维线度(直径、长径比)和电导率均影响材料的反射率。纤维线度首先影响其极化因子,从而对介电常数产生影响,最终影响吸波结构隐身

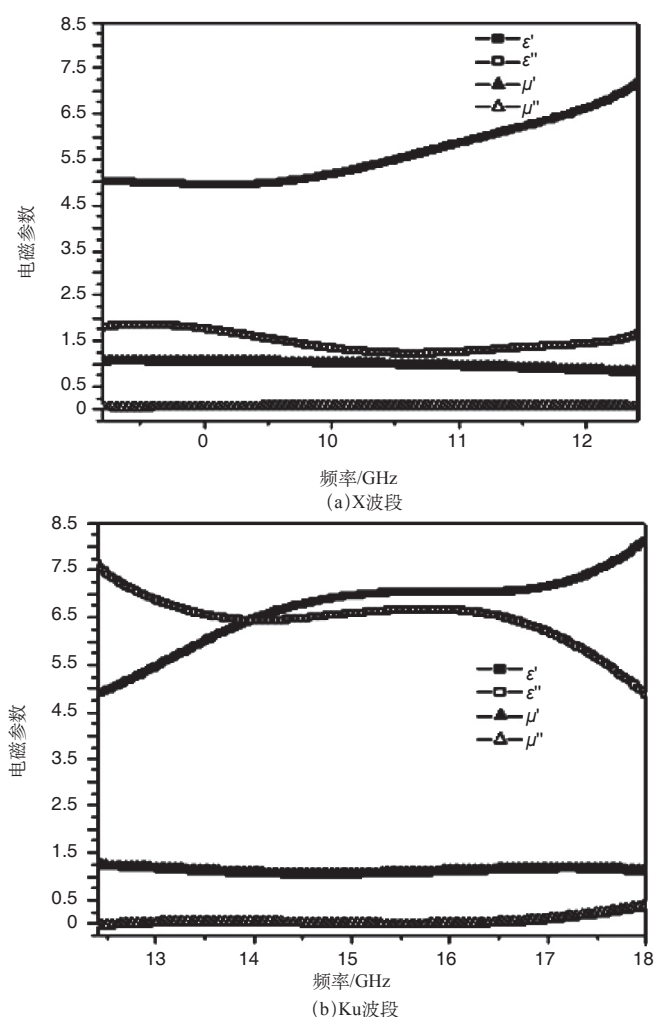


图6 低体积分数无规则排布纤维复合样品X、Ku波段参数

Fig.6 Composite sample X,Ku band parametrics of low volume fraction and irregular arrangement fibrous material

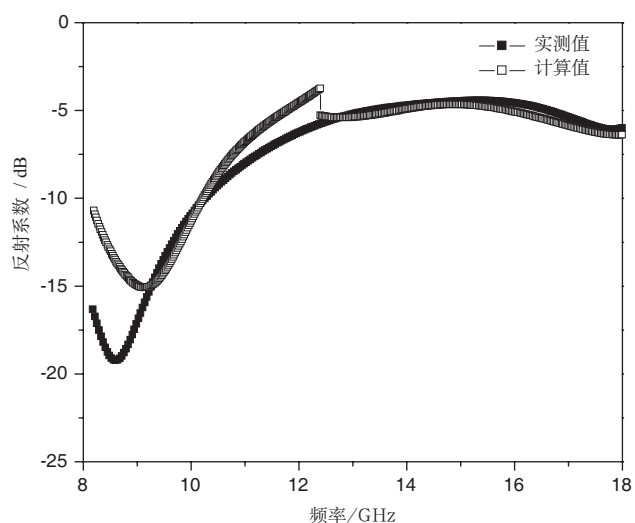


图7 低体积分数无规则排布纤维材料反射率实测曲线与模拟曲线

Fig.7 Reflectivity measured and simulated curve of low volume fraction and irregular arrangement fibrous material.

材料的电性能水平。

AST

参考文献

- [1] HE Yanfei, GONG Rongzhou, NIE Yan, et al. Preparation and microwave absorbing properties of multi-layered radar (microwave) absorbing material composites [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(8): 33-37
- [2] Matytsin S M, Rozanov K N, Sarychev A K, et al. Dielectric permittivity of fiber-filled composites: comparison of theory and experiment [J]. Phys A, 1997, 241(1-2): 58-63.
- [3] Liu L, Matytsin S M, Gan Y B, et al. Effective permittivity of planar composites with randomly or periodically distributed conducting fibers [J]. J Appl Phys, 2005, 98: 063512.
- [4] Neo C P, Varadan V K. Optimization of carbon fiber composite for microwave absorber [J]. IEEE Trans Electromag Compat, 2004, 46(1): 102-106.
- [5] 李享成, 龚荣洲, 冯则坤, 等. 具有雷达波吸收功能的纤维类吸波材料研究 [J]. 舰船电子工程, 2004, 24: 232-236.
LI Xiangcheng, GONG Rongzhou, FENG Zekun, et al. Research on fiber material with the function of radar wave absorbing [J]. Ship Electronic Engineering, 2004, 24: 232-236. (in Chinese)
- [6] Boycer C E, Borchert E J, Kuo R J, et al. Microwave absorber employing acicular magnetic metallic filaments: US, 5085931 [P]. 1992.
- [7] 秦嵘, 陈雷. 国外新型隐身材料研究动态 [J]. 宇航材料工艺, 1997, (4): 17.
QIN Rong, CHEN Lei. Recent development of study on new stealthy materials abroad [J]. Aerospace Materials & Technology, 1997, (4): 17. (in Chinese)
- [8] LI Xiangcheng, GONG Rongzhou, NIE Yan, et al. Electromagnetic properties of Fe55Ni45 fiber fabricated by magnetic field induced thermal decomposition [J]. Mater Chem Phys, 2005, 94(2-3): 408-411.
- [9] LI Xiangcheng, GONG Rongzhou, HE Yanfei, et al. Microwave characterization of carbonyl Fe55Ni45 fiber-filled composites [C]. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings, Beijing: 2005: 914-918.
- [10] Gauss A. RACO, A new type of radar absorbing coating [J]. Technical Report, 1981, 8.
- [11] Lagarkov N, Matytsin S M, Rozanov K N, et al. Dielectric properties

of fiber filled composites [J]. Journal Of Applied Physics, 1998, 84(7): 3806-3814

- [12] Lagarkov N, Sarychev AK. Electromagnetic properties of composites containing elongated conducting inclusions[J]. Physical Review B. 1996, 53(10): 6318-6336.

作者简介

黄全军(1978—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机隐身设计及吸波结构隐身材料设计。

Tel:024-26784155

E-mail:hqj20090130@163.com

Electrical Properties Influence Study of Low Concentrations Magnetic Fiber for Absorbing Structure Stealth Material

HUANG Quanjun^{1,2,*}, GONG Rongzhou³

1.Shenyang Aircraft Design& Research Institute, Shenyang 110035,China

2.Key Laboratory of Science and Technology of Aviation on Stealth Technology,Shenyang 110035,China

3.Optics and Electronic information Institute,Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,China

Abstract: Enhancing the electrical property of absorbing structure stealth materials is closely related to its internal absorbing component, the study found that magnetic fiber shape anisotropy and good electromagnetic properties, absorbing structure combined with stealth materials can be realized with a certain stealth materials absorbing structure and mechanical properties of absorbing capability. Radar absorbing material performance mainly depends on the characteristics of the loss of radar wave absorber. We first took advantage of ripe simulation software, CST, to simulate the interaction between radar wave and magnetic conductive fiber, as a result, we found that the scattering effect is more obvious with the increase of the frequency of the incident electromagnetic wave. What is more, using equivalent circuit model to analyze, we have derived mathematical formula of electromagnetic parameters which is about low concentration of magnetic fiber-filled composite materials. While completing the influence of fiber parameters on the electrical properties of the material, it is gained the influence of magnetic fiber parameters, that is fiber cable degrees (diameter, aspect ratio) will first affect the polarization factor, Thus affecting the effective permittivity; When the polarization factor of a small to a certain extent, The equivalent dielectric constant flattening; In a word, what ultimately affect the absorbing performance of composite absorbing materials is the degree of fiber cable, the electrical conductivity and concentration.

Key Words: magnetic fiber; absorbing structure; stealth material; electrical scattering field; polarization factor; equivalent permittivity

Received: 2014-06-10; Accepted: 2014-07-10

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2011ZF01009)

*Corresponding author. Tel. : 024-26784155 E-mail: hqj20090130@163.com

低浓度磁性纤维对吸波结构隐身材料电性能影响研究

作者: 黄全军, 龚荣洲, HUANG Quanjun, GONG Rongzhou

作者单位: 黄全军, HUANG Quanjun(沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035; 隐身技术航空科技重点实验室, 辽宁 沈阳 110035), 龚荣洲, GONG Rongzhou(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉, 430074)

刊名: 航空科学技术

英文刊名: Aeronautical Science and Technology

年, 卷(期): 2014(8)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hkxjs201408023.aspx