

文章编号:1000-6893(2000)03-0241-04

# 机翼涂敷吸波材料减缩雷达散射截面的研究

马东立, 武哲

(北京航空航天大学 513 教研室, 北京 100083)

## STUDY ON REDUCTION OF RCS BY COATING RADAR ABSORBING MATERIAL FOR METAL WINGS

MA Dong-li, WU Zhe

(Faculty 513, Beijing Univ. of Aero. and Astro., Beijing 100083, China)

**摘要:** 推导出了光滑凸体金属表面涂敷吸波材料时的后向雷达散射截面(RCS)公式。对一系列涂敷吸波材料的金属平板进行了RCS测试和理论计算。为提高计算精度,给出计算RCS的工程修正方法。在此基础上,对机翼前后缘局部涂敷吸波材料。研究结果表明,机翼前后缘涂敷吸波材料可以有效地控制RCS。

**关键词:** 机翼; 雷达散射截面; 吸波材料; 涂敷; 隐身技术

中图分类号: V218 文献标识码: A

**Abstract:** A formulation of radar cross section (RCS) for smooth convex metal objects coated with radar absorbing material (RAM) is derived. RCS has been measured and calculated for a series of metal planes coated with RAM. To improve accuracy of calculation, an engineering correction is given. Finally, the wing is coated with RAM at its leading edge and trailing edge. The result of study shows that RCS is efficiently controlled by coating RAM at the leading edge and the trailing edge of the metal wing.

**Key words:** wing; radar cross section; radar absorbing material; coating; stealth technique

国内外一些学者对金属目标表面涂敷吸波材料问题进行了研究<sup>[1~5]</sup>,给出了一些理论上的严格解,为解决涂敷问题奠定了基础。但是,在应用这些严格解时会遇到困难,因为这些严格解往往是以无穷级数形式给出的,从这些解中也较难看出影响雷达散射特性的因素。

本研究给出简洁的金属目标表面涂敷吸波材料的后向RCS的计算公式,便于数值计算。对一系列平板进行测试和理论计算。在此基础上,对某机翼模型局部涂敷吸波材料,得到机翼涂敷吸波材料减缩RCS的一些结论。

## 1 理论计算方法

由Stratton-Chu方程可以得到远场区的后向散射电场为

$$E_s = \frac{jk_0 e^{jk_0 R}}{4\pi R} \oint_S [(Z_0 \mathbf{n} \times \mathbf{H}) - i(Z_0 \mathbf{n} \times \mathbf{H})i - i \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E})] e^{ikr_i} dS \quad (1)$$

式中: $S$ 是照明面面积; $i$ 是入射方向的单位矢量; $\mathbf{n}$ 是涂层表面单位法矢; $Z_0$ 是自由空间阻抗; $k_0$ 是自由空间的波数。

求解散射电场的关键是要给出积分表面上电

磁场的分布。若用 $e_i$ 表示入射电场方向,则入射平面波可表示为

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{e}_i E_0 e^{jk_0 ri} = \mathbf{e}_i E_i \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{i} \times \mathbf{e}_i E_i / Z_0 \quad (3)$$

如图1,引入局部坐标系

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{e}_{\perp} &= \mathbf{i} \times \mathbf{n} / |\mathbf{i} \times \mathbf{n}| \\ \mathbf{e}_{\parallel} &= \mathbf{i} \times \mathbf{e}_{\perp} \\ \mathbf{i} &= \mathbf{e}_{\perp} \times \mathbf{e}_{\parallel} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

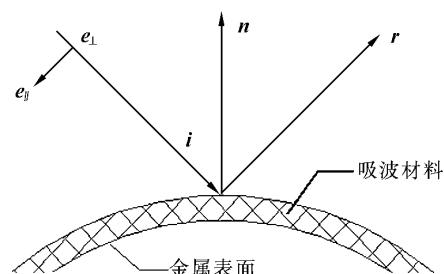


图 1 局部坐标系

经推导得到涂层表面上的切向电磁场为

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \times \mathbf{E} &= \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r) = \\ &= (1 + R_{\perp})(\mathbf{e}_i \mathbf{e}_{\perp}) \mathbf{n} \times \mathbf{e}_{\perp} E_i - \\ &\quad (1 + R_{\parallel})(\mathbf{e}_i \mathbf{e}_{\parallel}) (\mathbf{n} \mathbf{i}) \mathbf{e}_{\perp} E_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$Z_0(\mathbf{n} \times \mathbf{H}) = Z_0 \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_i + \mathbf{H}_r) =$$

$$= (1 - R_{\perp})(\mathbf{e}_i \mathbf{e}_{\perp}) (\mathbf{n} \mathbf{i}) \mathbf{e}_{\perp} E_i -$$

$$(1 - R_{\parallel})(e_i e_{\parallel}) n \times e_{\perp} E_i \quad (6)$$

式中:  $E_i$ ,  $H_r$  分别是涂层表面反射电场和磁场;  $R_{\perp}$ ,  $R_{\parallel}$  分别是垂直极化(电极化)、平行极化(磁极化)的电场反射系数。

将式(5)和式(6)代入式(1)后, 按如下定义求后向 RCS 的平方根

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2 \sqrt{\pi} R \frac{E_i e_i}{E_0 e^{jk_0 R}} \quad (7)$$

经推导, 得到光滑金属表面涂敷吸波材料的后向 RCS 平方根为

$$\sqrt{\sigma} = \frac{jk_0}{\sqrt{\pi}} \cdot$$

$$\oint_S [(e_i e_{\perp})^2 R_{\perp} + (e_i e_{\parallel})^2 R_{\parallel}] (\mathbf{n} i) e^{jk_0 r_i} dS \quad (8)$$

特别地, 对于金属平板表面涂敷吸波材料, 有

$$\sqrt{\sigma} = - \frac{e^{jk_0 r_0 i}}{2 \sqrt{\pi} \tan \theta} [(e_i e_{\perp})^2 R_{\perp} + (e_i e_{\parallel})^2 R_{\parallel}] \cdot \sum_{m=1}^N (e_{\perp} \mathbf{a}_m) e^{jk_0 r_m i} \frac{\sin(k_0 \mathbf{a}_m \mathbf{i})}{k_0 \mathbf{a}_m \mathbf{i}} \quad (9)$$

式中:  $\theta = \cos^{-1}(\mathbf{n} \mathbf{i})$ ;  $r_0$  是局部坐标系原点相对全局坐标系原点的位置矢量;  $\mathbf{a}_m$  是平板多边形第  $n$  条边的矢量;  $r_m$  是平板多边形第  $n$  条边中点的位置矢量;  $N$  是平板多边形的边数。

若用  $A$  表示涂敷平板面积, 当垂直入射涂敷平板时,  $R_{\perp} = R_{\parallel} = R$ , 后向雷达散射截面的平方根简化为

$$\sqrt{\sigma} = - \frac{jk_0 A}{\sqrt{\pi}} e^{jk_0 r_0 i} R \quad (10)$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan(\sqrt{\mu_r \epsilon_r} k_0 d) - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan(\sqrt{\mu_r \epsilon_r} k_0 d) + 1} \quad (11)$$

根据上述推导所得到的计算公式, 再由面元法既可计算任意光滑曲面全涂敷或部分涂敷吸波材料的 RCS。

## 2 计算和测试结果分析

(1) 金属平板涂敷吸波材料 选用边长  $a$  分别为 31, 63, 125, 250 及 375mm 的正方形金属平板涂敷吸波材料进行了测试和计算。涂敷厚度为  $d = 1.7$ mm, 吸波材料的相对介电常数为  $\epsilon_r = 12.75 \angle -0.65^\circ$ , 相对磁导率为  $\mu_r = 1.492 \angle -36.2^\circ$ , 测试波长  $\lambda = 3.2$ cm。图 2 给出了 125mm × 125mm 平板散射的理论计算和实验的比较, 计算中考虑了棱边绕射。图中  $\theta = 0^\circ$  为垂直入射涂敷表面时的状态, RCS 的值为  $-13.8$ dB ·

$m^2$ ;  $\theta = 180^\circ$  为垂直入射未涂敷表面时的状态, RCS 的值为  $4.2$ dB ·  $m^2$ 。从图 2 可以看出涂敷吸波材料的效果。

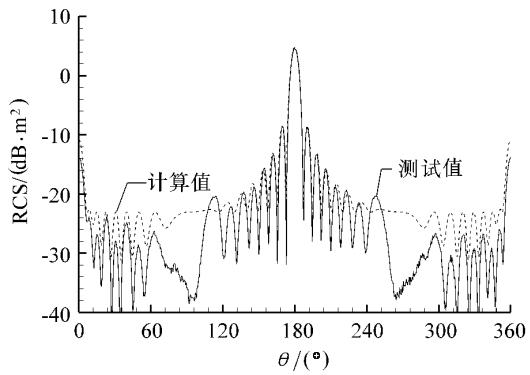


图 2 125mm × 125mm 平板散射的理论计算和实验的比较

表 1 给出了垂直入射涂敷金属平板表面时 RCS 的理论计算与实验的差值。由式(10)可以推

表 1 垂直入射涂敷金属平板时 RCS 的计算与实验比较

$a/\text{mm}$	$\sigma(\text{实验值})/(\text{dB} \cdot \text{m}^2)$	$\sigma(\text{计算值})/(\text{dB} \cdot \text{m}^2)$	差值/dB
31	-34.00	-32.00	-2.00
63	-24.10	-21.85	-2.25
125	-13.80	-10.79	-2.99
250	-5.58	0.95	-6.53
375	0.94	7.93	-6.99

出, 涂敷吸波材料时 RCS 的减缩量为  $|R|^2$ , 即对于金属平板涂敷相同厚度、相同电磁性能的吸波材料来说, 在一定的入射频率下 RCS 的减缩量应该是一定的。然而由表 1 可以看出, 随着涂敷面积的增大, RCS 的减缩量也增大。假如是棱边的影响, 那么随着涂敷面积的增大, 它的影响应该是越来越小, 而不应该越来越大, 何况实验值比理论计算值偏小。因此, 这种解释难以成立。对这一现象的机理还有待进一步研究。为了进行工程估算, 不妨对反射率进行如下修正:  $R = bA^k R$ , 其中:  $A$  是平板涂敷面积;  $b, k$  是与涂敷材料有关的常数。

(2) 涂敷厚度 利用前面介绍的计算方法计算了相对介电常数为  $\epsilon_r = 12.75 \angle -0.65^\circ$ , 相对磁导率为  $\mu_r = 1.492 \angle -36.2^\circ$  的吸波材料的吸波性能。图 3 给出了  $|R|^2$  随  $d/\lambda$  变化的计算结果。由图 3 可知, 在  $d/\lambda$  为特定值时,  $|R|^2$  最小。即, 对于给定入射频率时, RCS 的减缩量对涂敷厚度很敏感。因此, 在使用吸波材料时要正确选择涂敷厚度。针对不同频率的雷达, 应选取一个最佳的涂

敷厚度。如,对于上述吸波材料,针对频率  $f=9.375\text{GHz}$  的入射波,应选取  $d=1.7\text{mm}$ 。

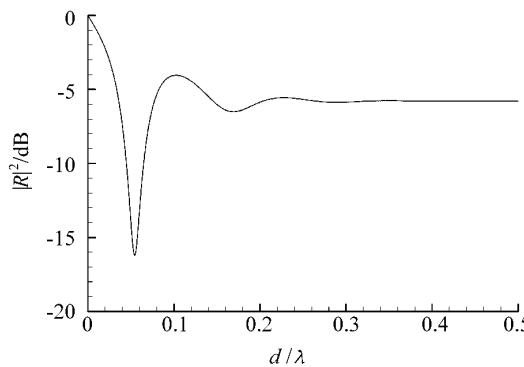


图 3  $|R|^2$  随  $d/\lambda$  变化曲线

(3) 机翼涂敷吸波材料 整个机翼全部涂敷 RAM, 显然可以使机翼在整个空间范围内减缩 RCS。但是,这样会造成飞机的重量大幅度上升,使飞机的飞行性能严重下降,是不可行的。以往的研究表明,在重点姿态角范围内,机翼前后缘的散射是应该控制的对象。为此,对机翼前后缘涂敷了吸波材料,并且与未涂敷情况进行比较。图 4 和图 5 分别给出了某机翼模型的散射特性在水平极化和垂直极化状态下局部涂敷吸波材料与未涂敷情

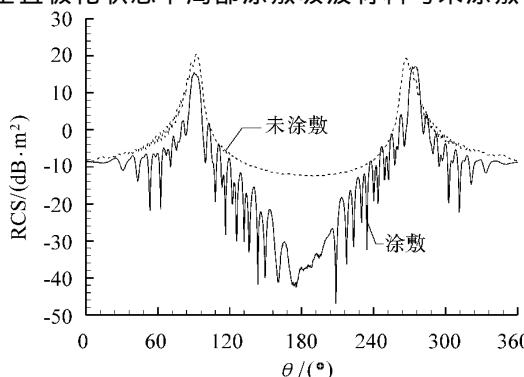


图 4 某机翼模型的 RCS 随  $\theta$  的变化曲线(水平极化)

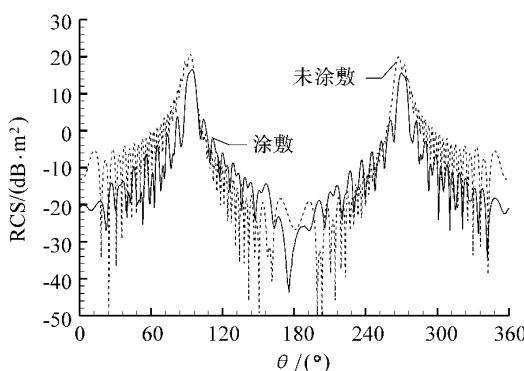


图 5 某机翼模型的 RCS 随  $\theta$  的变化曲线(垂直极化)

况的比较。俯仰角  $\theta=0^\circ$  对应于照射机翼前缘的情况,俯仰角  $\theta=180^\circ$  对应于照射机翼后缘的情况。结果表明,对于水平极化,涂敷吸波材料对于前缘散射波峰无明显效果,但能显著降低后缘散射波峰;对于垂直极化,涂敷吸波材料能显著降低前后缘散射波峰,而且也能有效地抑制掠入射时产生的行波。

### 3 结 论

(1) 给出一种适于数值计算的金属目标表面涂敷吸波材料的后向 RCS 的计算公式。

(2) 对于给定入射频率时,  $|R|^2$  对涂敷厚度  $d$  很敏感。因此,在使用 RAM 时要正确选择涂敷厚度。选取的涂敷厚度  $d$  应使  $|R|^2$  最小。

(3) 对于水平极化,涂敷吸波材料能显著降低后缘散射波峰;对于垂直极化,涂敷吸波材料能显著降低前后缘散射波峰,而且也能有效地抑制掠入射时产生的行波。

### 参 考 文 献

- [1] Richmond J H. Scattering by a ferrite-coated conducting sphere [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1987, 35(1): 73~79.
- [2] Bhattacharyya A K. Effects of ground plane and dielectric truncations on the efficiency of a printed structure [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1991, 39(3): 303~308.
- [3] M Xiaoyi. An efficient formulation to determine the scattering characteristics of a conducting body with magnetic coatings [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1991, 39(4): 448~454.
- [4] Hashimoto O. A method for designing wave absorbers for cylindrical objects [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1991, 39(6): 854~857.
- [5] Meyer F J C. Application of the 2D finite-element/boundary-element method to scattering from coated aerofoils [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 1994, 7(4): 163~167.

#### 作者简介:



马东立 1966 年生,博士。现任北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系副教授。主要研究方向是飞机设计、飞行器隐身技术和作战效能研究。发表论文 20 余篇,获部级成果奖 3 项。联系电话:(010)82317503,E-mail:donglim@china.com

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

---

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

---

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>