

吸波涂层斜入射特性研究

Oblique Incidence Performance of Radar Absorbing Coatings

王晓红, 刘俊能 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

WANG Xiao-hong, LIU Jun-neng

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 简要分析了吸波涂层 (RAC) 的斜入射特性, 研究了几种吸波涂层在不同入射角 (θ_i) 下的吸波性能, 指出在常规进气道等凹型腔体中使用 RAC 的主要要求是提高涂层的垂直极化性能。

关键词: 吸波涂层; 斜入射; 特性

中图分类号: TB34 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 12-0041-03

Abstract: Oblique incidence performance of radar absorbing coatings (RAC) was analyzed. Based on the investigating the reflectivity of RAC at different angles of incidence, the importance of the performance of perpendicular polarization was presented here while RAC was used in aircraft engine ducts.

Key words: radar absorbing coatings; oblique incidence; performance

腔体 (如发动机进气道、雷达舱、座舱等) 散射是作战飞机后向雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS) 的主要贡献者, 进气道后向 RCS 主要由腔体散射和唇口散射构成, 其中进入发动机进气道的电磁波经过腔内壁的多次反射和空气压缩机叶片的反射后, 可在前向产生 10dBsm 以上的 RCS 贡献, 构成了飞机头部区域的一个强散射回波源。分析并降低进气道 RCS 已成为飞机、导弹等隐身技术领域中的一个重要研究课题。因此, 研究并设计出斜入射特性优良的雷达波吸收涂层 (Radar Absorbing Coatings, RAC) 十分重要。

1 RAC 斜入射特性简析

当电磁波入射角 $\theta_i \neq 0$ 时, 对 $N/4$ 波长谐振型 RAC 而言, 可依据斜入射波在多层平板介质中的散射进行分析。文献 [1] 给出了平行极化波与垂直极化波的反射系数振幅:

$$|R| = |R_{\parallel}| = |R_{\perp}| \approx \frac{1 - \cos \theta_i}{1 + \cos \theta_i} \quad (1)$$

其典型的反射系数 $|R| - \theta_i$ 曲线如图 1 所示。

理论分析与实测结果表明, 对于均质单层 RAC, 小角度入射下 (通常 $\theta_i < 20^\circ$), 入射角和极化状态对 RAC 的反射特性影响很小。当 $\theta_i > 20^\circ$ 时, 极化方式和入射角对反射特性影响显著: 电场垂直入射面时 (即垂直极化), 反射系数随入射角增大而增加, 而电场平行入射面时 (即平行极化), 反射系数首先随入射角增大而减小, 但当 θ_i 达到一定值时, 反射

系数又逐渐增加, 其变化趋势如图 2。

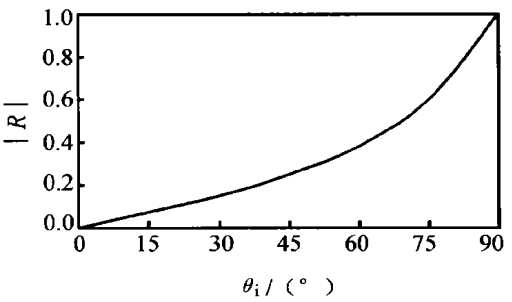


图 1 RAC 反射系数与入射角的关系

Fig. 1 Relationship between reflectance and angles of incidence

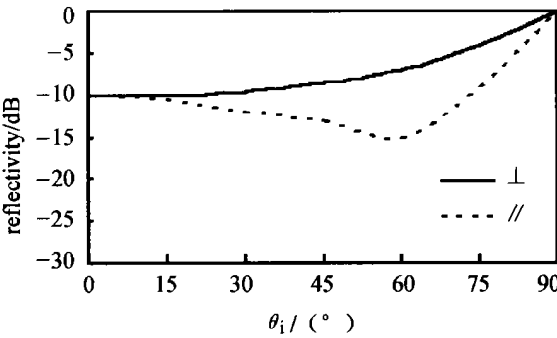


图 2 RAC 反射率—入射角—极化关系曲线

Fig. 2 Relationship among reflectivity—angles of incidence—polarizations

RAC 反射性能的角度特性与其材料的复电磁参数具有下式的关系^[2]:

$$R = 20 \lg \left| \frac{\mu_r \cos \theta_i - \sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\mu_r \cos \theta_i + \sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \right| \quad (2)$$

由此可见，提高 RAC 的磁特性 (μ_r) 有利于改善其斜入射性能。

2 RAC 斜入射特性研究

2.1 RAC 斜入射性能评价

从应用状态及效果分析，RAC 斜入射性能可分为电磁波在不同入射角下投射到材料表面后所产生的前向散射与后向散射两种状态，如图 3。由此在检测 RAC 的斜入射性能时，可采用平板单站（图 3b）、平板双站（图 3a）、两面角单站、两面角双站等方式进行。RAC 斜入射特性应从实用要求进行评价，一般在目标 RCS 减缩研究中，更关心的是后向散射。

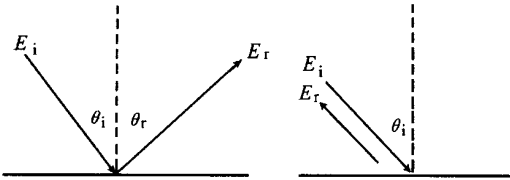


图 3 RAC 斜入射特性的两种状态 (a) 前向散射; (b) 后向散射
Fig. 3 Two cases for oblique incidence performance of RAC
(a) forwardscattering; (b) backscattering

2.2 RAC 斜入射性能

研究中对两种定型薄层 RAC 用平板双站法和两面角单站法进行了反射率—角度特性测试，其结果如图 4、图 5 和表 1。

由图 4、图 5 和表 1 可见，在斜入射状态下，相对法向入射而言，两种 RAC 对垂直极化波的反射率变大，而对平行极化波的反射率变小。由于 1mm 厚 RAC 在 8~12GHz 内的吸波性能优于 0.5mm 厚 RAC，因此其减缩 RCS 效果更好。

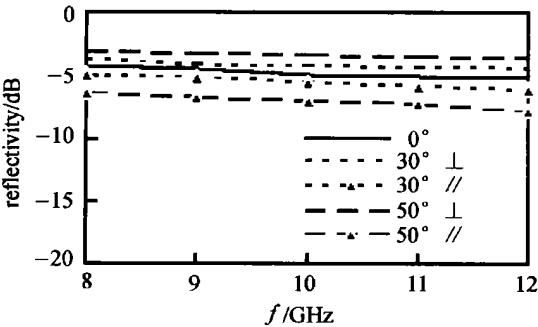


图 4 0.5mm 厚 RAC 斜入射特性 (平板双站)
Fig. 4 0.5mm RAC oblique incidence performance via plate bistatic detection

Plessey 公司生产的一种 1mm 厚表面波吸收材料 (Surface Wave Absorbing Materials, SWAM) 在入射角 0~75° 范围内的反射率频率—角度特性如图 6。

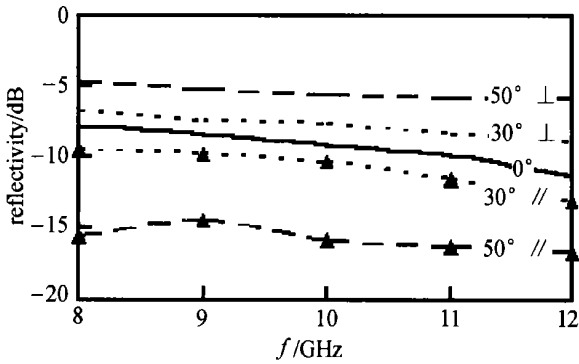


图 5 1mm 厚 RAC 斜入射特性 (平板双站)
Fig. 5 1mm RAC oblique incidence performance via plate bistatic detection

表 1 两种 RAC 两面角单站 RCS 减缩量
Table 1 RCS reduction of RAC coated corner reflectors detected by the monostatic method

厚度/mm	平行极化/ dB		垂直极化/ dB	
	90°	45°	90°	45°
0.5	4.52	8.78	5.2	4.75
1.0	9.23	17.23	10.76	7.44

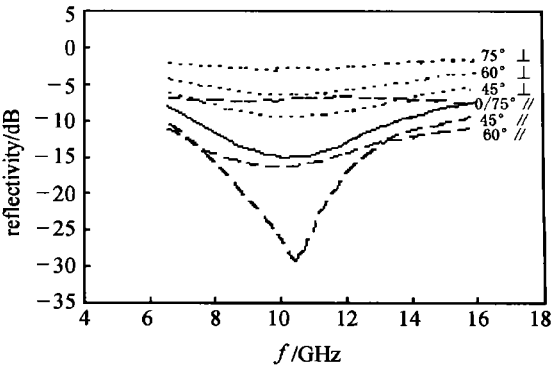


图 6 SWAM 斜入射特性
Fig. 6 SWAM performance at angles of incidence

由图 6 可见，其反射率斜入射特性变化与本研究测试结果是一致的。

2.3 RAC 斜入射特性改进

由金属基底 RAC 的反射率与其电磁参数关系分析可知^[3]，提高斜入射特性的途径之一是提高吸收剂的 μ_r 值以增大材料的波阻抗。对于厚度为 0.5mm 的 RAC 而言，为获得在 8~12GHz 内 60° 入射角、垂直极化状态下达到 6dB 以上的吸收，则 RAC 应具有表 2 所列的复电磁参数。

迄今未找到具有如此高 μ_r 的材料。如能适当放宽厚度限制，可以降低对 μ_r 的要求，则仍可使 RAC 斜入射性能得到改进。

表 2 RAC电磁参数要求

Table 2 Electromagnetic parameters of RAC optimised for oblique incidence of 60°

f / GHz	8	9	10	11	12
μ_r	5.60- j3.60	5.50- j3.00	4.80- j2.70	4.50- j2.42	4.30- j2.00
ϵ_r	34.0- j6.70	33.0- j6.70	30.0- j6.70	29.0- j6.60	27.0- j6.70

由此所计算的反射率—频率—角度特性如图 7。

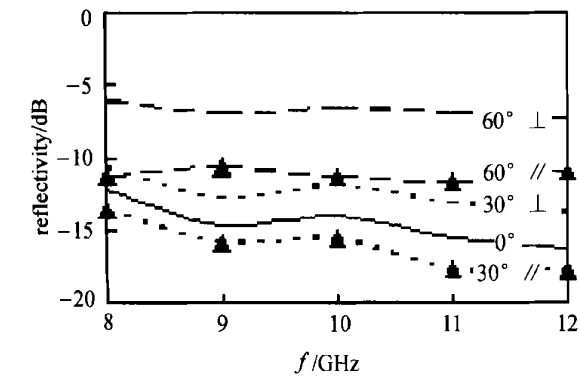


图 7 理论计算的 RAC 斜入射特性
Fig. 7 Theoretic oblique incidence performance of RAC on parameters of table 2

提高 RAC 角度特性的另一种方法是设计多层结构。文献 [4] 提出了具有最佳斜入射性能的宽频 Jaumann 雷达吸收体设计。它是以采用遗传算法 (Genetic Algorithm) 为基础的全局优化法, 所设计的雷达波吸收材料 (Radar Absorbing Materials, RAM) 在两种极化方式下均具有最佳吸波性能。图 8 为采用该方法设计的一种四层吸收材料性能。

这种多层结构极大地改善了 RAC 斜入射特性,

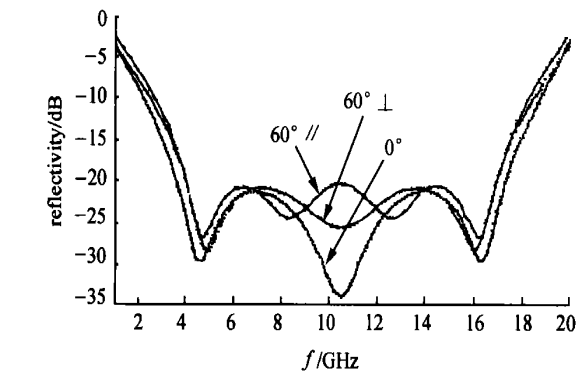


图 8 多层 RAM 斜入射性能
Fig. 8 Performance of a four-layer RAM optimized for oblique incidence of 60°

在厚度允许的条件下具有较佳的减缩 RCS 的效果。

3 结论

(1) 斜入射状态下, 吸波涂层对垂直极化波的吸收性能降低, 而平行极化波性能提高, 但当 $\theta_i \geq 70^\circ$ 下平行极化性能亦下降。因此, 提高 RAC 在垂直极化下的吸波性能是研制高性能 RAC 的关键。

(2) 提高吸波涂层的 μ_r 值是改善薄层 RAC 斜入射性能的基本途径。受现有吸收剂电磁参数所限, 很难在薄层 ($d \leq 0.5\text{mm}$) 情况下达到大入射角下的低反射性能。

(3) 在斜入射下进气道内垂直极化波反射增大, 故采用 RAC 减小进气道后向 RCS 归结为优化设计垂直极化下性能优良的吸波涂料。

参考文献

[1] Ruck G T, et al. Radar cross section handbook [M]. New york: Plenum press, 1970.
[2] Poul E D. Microwave Journal, 1993 (11): 88- 94.
[3] 饶克谨等. GF 报告, 1997.
[4] Chambers B, Tennant A. Design of wideband Jaumann radar absorbers with optimum oblique incidence performance [J]. Electronics Letters, 1994, 30 (18): 1530- 1531.

收稿日期: 2002-10-10; 修订日期: 2002-11-01
作者简介: 王晓红 (1965-), 女, 研究员, 联系地址: 北京 81 信箱 9 分箱 (100095)。

(上接第 38 页)

参考文献

[1] 吴建光, 李建保, 黄勇. 硅酸盐学报, 1990, 18: 72.
[2] G R Ansb, P Chantikul, et al. J Am Ceram Soc, 1981, 64: 533.
[3] J Selsing. J Am Ceram Soc, 1961, 44: 419.
[4] M Taya, S Hayashi. J Am Ceram Soc, 1990, 73: 1382.
[5] D R Lide. CRC handbook of chemistry and physics [M]. 72nd ed, CRC Press, Inc, Boca Raton, FL, 1992.
[6] G W C Kaye, T H Lady. Tables of physical and chemical constants [M]. Longman, London, 1966.
[7] 王宏志. 中国科学院上海硅酸盐研究所博士论文, 1998, 6.
[8] T Ohji, et al. J Am Ceram Soc, 1996, 79: 33.
[9] F Z Chen, W H Tuan. J Eno Ceram Soc, 1999, 19: 463.
[10] S T Oh, et al. J Eno Ceram Soc, 1998, 18: 31.
[11] T Sekino, K Niihara. J Mater Sci, 1997, 32: 3943.
[12] I Levin, W D Kaplan, D G Brandon. J Am Ceram Soc, 1995, 78: 254.

收稿日期: 2001-11-23; 修订日期: 2002-10-25
作者简介: 李国军 (1970-), 男, 工程师, 联系地址: 北京 81 信箱 9 分箱 (100095)。