

文章编号: 1674-8190(2024)06-189-09

## 面向应用的隐身材料评价方法研究

崔译文<sup>1,2</sup>, 李佩珊<sup>1,2</sup>, 麻连凤<sup>1,2</sup>, 周海<sup>1,2</sup>

(1. 航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610091)

(2. 电磁信息控制与效应全国重点实验室, 成都 610091)

**摘要:** 隐身材料的性能验证与评价在高性能隐身材料的研发与应用周期中是至关重要的一环。为解决现有常用的隐身材料性能验证与评价方法存在的内容单一、评价方法不全面等问题, 提出一种面向应用的隐身材料评价方法。该方法通过改进测试板的外形, 尽可能削弱非考核散射源对试验结果的干扰; 进一步采用面积积分法对多波段的测试数据进行面积积分加权赋值, 以实现隐身材料关键性能的综合量化评价。该方法已在某典型隐身作战飞机的隐身材料选优过程中完成应用, 实践表明: 该方法面向实际工程需求, 充分表征了隐身材料在实际应用场景中的关键隐身性能, 具有评价全面、准确的特点, 为全频段综合评估隐身材料的关键吸波性能提供了新途径。

**关键词:** 隐身材料; 电磁散射抑制; 斜入射; 行波衰减; 垂直反射率

**中图分类号:** V218

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.17

## Study on application-oriented evaluation method for stealth materials

CUI Yiwen<sup>1,2</sup>, LI Peishan<sup>1,2</sup>, MA Lianfeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Hai<sup>1,2</sup>

(1. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China)

(2. National Key Laboratory of Electromagnetic Information Control and Effects, Chengdu 610091, China)

**Abstract:** The performance verification and evaluation of stealth materials are a crucial part in the research & development (R&D) and application cycle of high-performance stealth materials. In order to solve the problems such as single content and incomplete evaluation method of stealth materials, a new evaluation method for application-oriented stealth materials is proposed. The method improves the shape of the test specimen to weaken the interference of the non-examination scattering source on the test results as much as possible. In addition, the area integration method is further utilized to weight the area integration of the test data in multiple bands, and a comprehensive quantitative evaluation is made on the key performance of stealth materials. This method has been applied in the optimization process of stealth materials for a typical stealth combat aircraft, and practice has shown that: the method is oriented to practical engineering needs, fully characterizes the key stealth performance of stealth materials in practical application scenarios. It has the characteristics of comprehensive and accurate evaluation, providing a new approach for the comprehensive evaluation of the key absorption performance of stealth materials in all frequency bands.

**Key words:** stealth materials; electromagnetic scattering suppression; oblique incidence; traveling wave attenuation; vertical reflectance

收稿日期: 2024-06-14; 修回日期: 2024-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(62231007)

通信作者: 周海(1969-), 男, 学士, 研究员。E-mail: 13980013571@139.com

引用格式: 崔译文, 李佩珊, 麻连凤, 等. 面向应用的隐身材料评价方法研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 189-197.

CUI Yiwen, LI Peishan, MA Lianfeng, et al. Study on application-oriented evaluation method for stealth materials[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 189-197. (in Chinese)

## 0 引言

在现代战争中,飞行器能否躲避敌方雷达探测、优先发动攻击摧毁高价值目标已成为决定战争能否制胜的关键<sup>[1-3]</sup>。因此,为提高飞行器的作战效率和战场生存力,雷达隐身技术已成为各国军事领域研究的热点。雷达隐身技术就是对目标的雷达特征信号进行有效的控制或抑制的技术,从有效实现途径上主要可分为外形隐身技术和材料隐身技术<sup>[4-5]</sup>。外形隐身技术通过低散射外形设计,实现对特定角域入射电磁波反射回波的严格控制<sup>[6]</sup>。材料隐身技术则是通过隐身材料吸收入射电磁波的能量以减小反射回波的能量<sup>[7]</sup>。通常,为实现飞行器雷达隐身,需以外形隐身为基础,并进一步应用隐身材料。现代战争对飞行器的隐身性能提出了更高的要求,然而受多系统、多性能综合需求约束,外形隐身或已发展到瓶颈期。因此,在外形隐身的基础上,发展具有高性能的隐身材料成为赋予飞行器宽频、极低雷达散射截面积(RCS)的关键途径之一。

在有效开发高性能隐身材料的周期中,除工程需求牵引、隐身材料研发、工程实际应用外,隐身材料的性能验证和评价也是其中至关重要的一环。目前国外并未有公开的关于隐身性能评价方法的文献资料或标准可供参考,国内也仅有以GJB 2038A—2011和GJB 9885—2020为代表的雷达吸波材料反射率和表面波衰减率测试标准<sup>[8-9]</sup>。隐身材料的评价方法通常由材料需求单位根据具体的工程需要进行规定,现有隐身材料的性能验证与评价通常仅限于隐身材料的试板级性能测试,通过对规整样件进行垂直反射率和行波衰减率测试,评价其在特定频点或频段下的垂直反射率或行波衰减率的优劣,从而判断隐身材料的优劣或是否满足工程需求。然而,面对飞行器“宽频、极低RCS”的实际需求,不同部位需要定制化应用具有特定性能(垂直反射率、斜入射反射率、行波衰减率、极化吸收特性)的隐身材料,以控制不同散射源特有的电磁散射特征。高性能隐身材料的验证和评价应针对不同散射源的电磁散射特征开展,并对宽频域的性能进行综合评价。因此,现有常规隐身材料的性能验证与评价方法或已无法完全适应高性能隐身材料的研制应用需求。

为解决目前隐身材料的性能验证、评价方法和飞行器实际隐身需求间不匹配的突出矛盾,本文提出一种面向应用的隐身材料评价方法,该方

法对不同散射源散射特点及隐身材料应用需求进行分类研究分析,并针对性地设计相应的隐身材料验证和评价方法。

## 1 飞行器主要散射源对隐身材料吸波性能的需求

飞行器在满足气动要求的同时,需布局众多功能性部件,致使传统非隐身飞行器外形复杂、机表呈现出散射源众多、散射机理差异大的特点,如图1所示。



图1 传统飞行器机表主要散射类型

Fig. 1 Major scattering types on the surface of conventional aircraft

目前,机表强散射源的抑制主要采用外形隐身和隐身材料相结合的方式<sup>[10]</sup>,如图2所示。采用座舱一体化设计、利用武器内埋、增大机翼后掠角、平行设计、翼身融合等外形隐身技术,可抑制传统飞行器大部分强散射源。而由于强散射源得到有效控制,弱散射源对飞行器隐身性能的影响变得不可忽视。



图2 隐身飞行器机表散射抑制技术

Fig. 2 Reduction technique of aircraft surface scattering in stealth

## 1.1 进气道

进气道因其具有独特的腔体散射特性,与座舱、雷达舱共同构成了飞行器前向三大强散射源。直至今,进气道散射抑制仍然是极具挑战性的研究方向之一。进气道散射主要源于发动机压气机叶片的镜面散射、壁面的漫反射、唇口的边缘绕射等<sup>[11]</sup>,如图3所示。

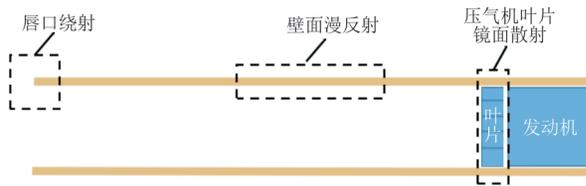


图3 进气道主要散射源

Fig. 3 Main scattering sources of intake

现有的隐身飞机通常利用S形进气道对发动机叶片进行遮挡,减弱镜面强散射<sup>[12]</sup>。相较于直进气道,S形进气道可在前向 $\pm 5^\circ$ 方位角内明显缩减RCS,在 $0^\circ$ 方向RCS缩减约30 dB。同时,S形进气道增加了电磁波在进气道壁面的反射次数,如图4所示。通过进一步在管壁涂覆隐身材料对入射电磁波进行多次吸收,可有效缩减进气道RCS<sup>[13]</sup>。

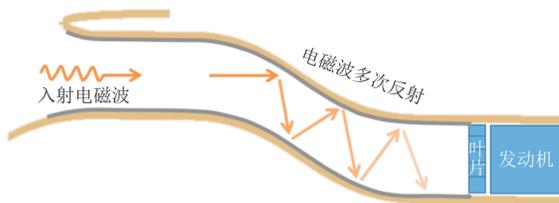


图4 进气道隐身材料对电磁波的多次吸收

Fig. 4 Multiple absorption of electromagnetic wave by inlet stealth material

入射电磁波在S形进气道中的传播具有小角度斜入射和多次反射的特点,因此进气道用隐身材料的斜入射吸收特性应是该类材料的核心吸波性能。

## 1.2 机 表

由于隐身飞行器的强散射源得到有效抑制,弱散射源控制成为进一步提高飞行器隐身性能的难点。表面行波散射作为飞行器弱散射中的重要组成部分,行波散射的抑制对提高飞行器整体隐身性能至关重要。飞行器表面被电磁波照射后极

易激励起表面行波,行波在表面传播过程中遇到不连续表面(缝隙、棱边、材料突变等),会引起较强的电磁波绕射<sup>[14]</sup>,如图5所示。行波的激励与电磁波极化有关,只有入射电磁波电场在沿机表的传播方向上存在电场分量才会产生行波<sup>[15]</sup>。

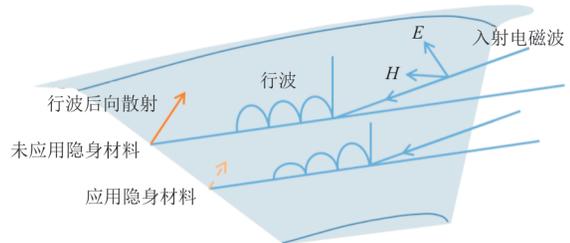


图5 行波散射原理及抑制方法

Fig. 5 Principle and suppression method of traveling wave scattering

在机表涂覆隐身材料是目前有效抑制机表行波散射最主要的方法。表面行波的电磁波能量在机表传输过程中被隐身材料吸收转化成内能,待传输至表面不连续处,其引发的后向散射将得到极大地抑制。因此,机表用隐身材料应具有高效的行波吸收能力,抑制机表不连续处的行波后向散射。

## 2 现有隐身材料评价方法及问题分析

目前常用的隐身材料评价方法是根据GJB 2038A—2011<sup>[8]</sup>和GJB 9885—2020<sup>[9]</sup>对隐身材料垂直反射率、斜入射反射率和行波衰减率进行测试,通过垂直/斜入射反射率和行波衰减率来评价隐身材料的吸波性能。

### 2.1 垂直反射率

垂直反射率可定性表征隐身材料的综合吸波性能,且其具有制样简单、测试便捷、不受电磁波极化的影响等特点,因此,垂直反射率成为评价隐身材料的主要方法之一。

垂直反射率的测试一般基于RCS法或弓形法,通过对比金属板和涂覆隐身材料试板的反射功率 $P_a$ 和 $P_m$ 得到垂直反射率 $\Gamma$ :

$$\Gamma = 10 \lg \left( \frac{P_a}{P_m} \right) \quad (1)$$

目前常用的垂直反射率评价方法主要局限于指定点频或频段,通过对比这些点频或频段下的垂直反射率评价隐身材料吸波性能的优劣。这可

能导致“以点概面”,强调对个别点频强吸收,如图6所示,无法满足现代战争对隐身飞行器“宽频、极低RCS”的隐身需求,不利于筛选评价出具备较宽有效吸收峰的隐身材料。因此,亟需研究一种能反映应用需求的垂直反射率评价方法,引导隐身材料的吸波性能向工程应用的实际需求方向发展。

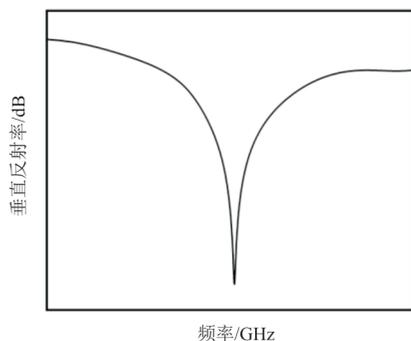


图6 典型垂直反射率曲线  
Fig. 6 Typical vertical reflectance curve

## 2.2 行波衰减率

行波衰减率是表征隐身材料对表面行波抑制能力的重要参数,是机表用隐身材料的关键性能。行波衰减率的测试通常根据GJB 9885—2020<sup>[9]</sup>规定内容开展,如图7所示。在纵电(TM)极化电磁波下,利用RCS法分别测试一定角域范围内涂覆隐身材料前后的行波金属试板的点频RCS,找出两种状态下试板在该频点下距最大后向表面波散射角最近的RCS峰值 $R_{0\max}$ 和 $R_{1\max}$ (一般为侧向角度第一个峰值),如图8所示,则隐身材料在该测试频点的行波衰减率 $\alpha$ 为

$$\alpha = \frac{R_{0\max} - R_{1\max}}{L} \quad (2)$$

式中: $L$ 为试板长度。

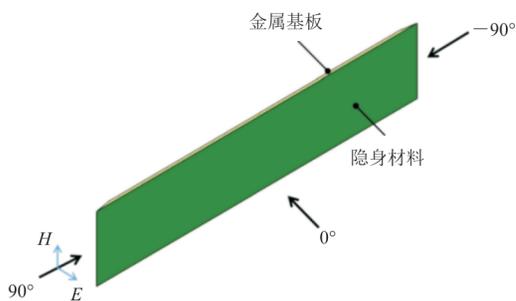


图7 行波衰减率测试示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of traveling wave attenuation ratio test

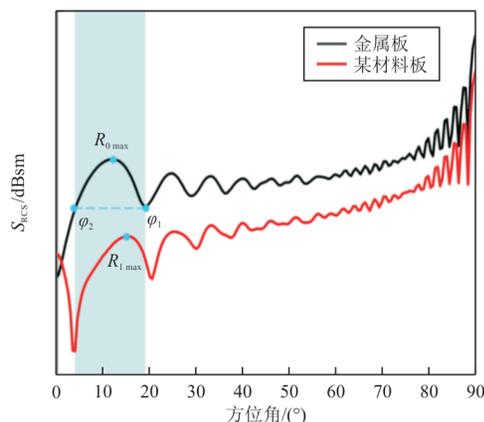


图8 某隐身材料行波衰减仿真曲线  
Fig. 8 Simulation curve of traveling wave attenuation for certain stealth material

上述方法要求隐身材料的厚度一般要小于波长的3%,然而,随着隐身材料厚度增大、类型增多、结构趋于复杂,致使其试板的RCS曲线呈现出波峰冗杂、峰值起伏的特点(如图9所示,图中黑色曲线为金属板行波衰减曲线,其他颜色曲线代表不同材料的行波衰减曲线),难以判断和识别行波峰。此外,上述方法仅对某个角度对应的峰值进行了比较,但在飞行过程中,飞行器后缘对于雷达的俯仰角是在一定范围内不断变化的,通过比较单点峰值得出的行波衰减率不能完全满足实际应用的需求,评价结果不能完全反映隐身材料的实际应用效果。

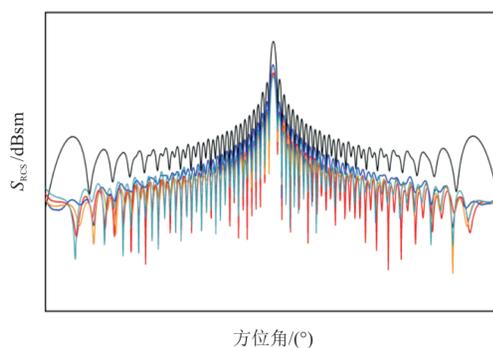
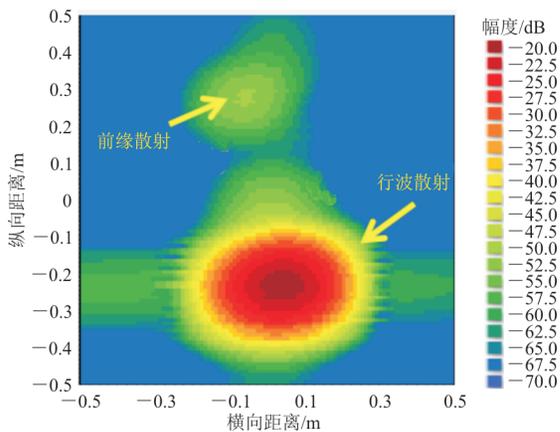
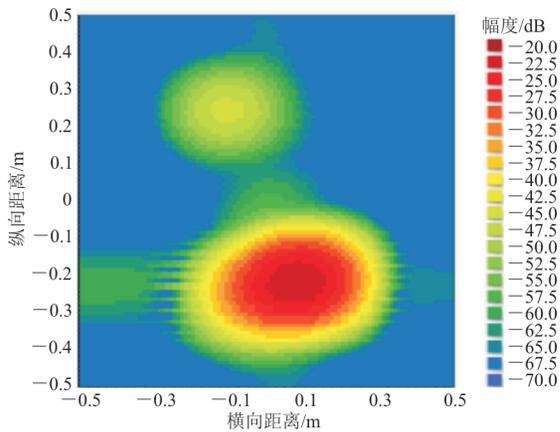


图9 某材料行波衰减测试曲线  
Fig. 9 Traveling wave attenuation test curve of certain material

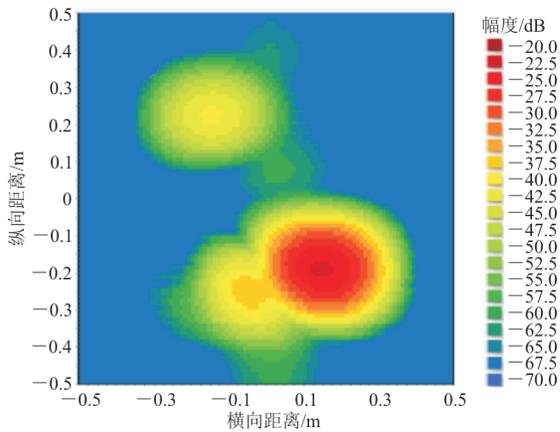
试板前缘产生的后向散射对整体散射的贡献将随着测试角度和测试频率的增大而增大(如图10所示),因此,为尽可能准确地评价隐身材料对行波的吸收能力,应尽量减小前缘散射对试板整体散射的影响。



(a) 测试角度为 75°



(b) 测试角度为 65°



(c) 测试角度为 55°

图 10 金属基板在 8~10 GHz 的仿真成像

Fig. 10 Simulated imaging of metal substrate on 8~10 GHz

### 2.3 斜入射反射率

斜入射反射率的测试方法与垂直反射率测试类似,如图 11 所示,一般采用二面角基板开展隐身材料的斜入射反射率测试,通过对比某测试角度下应用隐身材料前后的反射功率  $P'_a$  和  $P'_m$  得到斜

入射反射率  $\Gamma_1$ :

$$\Gamma_1 = 10 \lg \left( \frac{P'_a}{P'_m} \right) \quad (3)$$

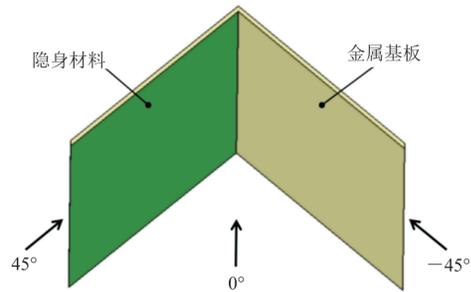


图 11 斜入射反射率测试示意图

Fig. 11 Schematic diagram of oblique incidence reflectance test

某隐身材料斜入射特性仿真曲线如图 12 所示,可以看出:吸波涂层材料的斜入射吸波性能与入射波的极化方式有关。一般地,吸波材料对横电(TE)极化入射电磁波的斜入射吸波性能弱于对 TM 极化入射电磁波的吸波性能<sup>[16]</sup>。因此需要考虑材料的极化特性。

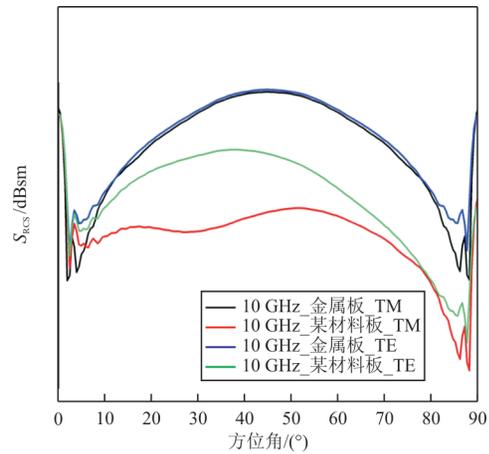


图 12 某材料斜入射吸收特性仿真曲线

Fig. 12 Simulation curve of absorption characteristics of inclined incidence of a certain material

对隐身材料斜入射吸波性能的评价一般是对某些频点下特定角度的斜入射反射率进行表征,进而判断隐身材料斜入射吸波性能的优劣。以进气道用材料为例,入射电磁波在进气道内被多次反射传播过程中,其与进气道壁面的夹角主要分布在 10°~40°范围内,仅以特定角度的斜入射反射率来评价隐身材料的斜入射吸波性能不符合应用部件对隐身材料的性能需求。

### 3 面向应用的隐身材料优化评价方法

#### 3.1 垂直反射率优化评价方法

隐身材料的垂直反射率一般可定性表征其整体的隐身性能,基于此,为缩短研制周期,可测试隐身材料的垂直反射率,通过对比多频点或频段下的垂直反射率,快速评价隐身材料的整体吸波性能。除 RCS 法、弓形法、手持式垂反仪等直接测试获得隐身材料的垂直反射率外,可利用同轴环法或波导法获得隐身材料的电磁参数,进一步采用电磁仿真技术计算该材料的垂直反射率。

为综合评价隐身材料的吸波性能,牵引隐身材料满足宽频强吸收性能,提出采用面积积分方法对垂直反射率测试曲线的所有频段开展加权积分,如图 13 所示。

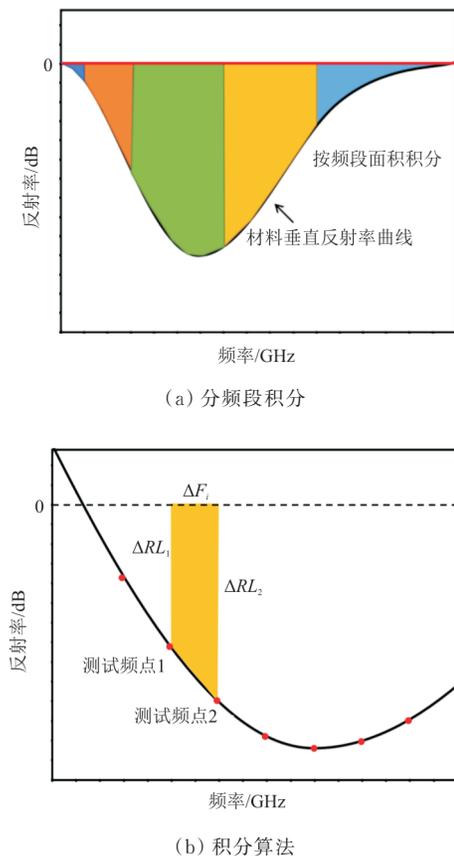


图 13 以  $y=0$  为参考的面积积分示意图

Fig. 13 Schematic diagram of area integral with  $y=0$  as reference

对反射率—频率曲线的所有频段进行面积积分:

$$S_x = \sum_{n=l}^{n=j} \frac{(\Delta RL_n + \Delta RL_{n+1}) \Delta F_i}{2} \quad (4)$$

式中:  $\Delta F_i$  为反射率测试频点的频率间隔;  $\Delta RL_n$  为该测试频点对应反射率与目标曲线的差值;  $l$  为频段的起始频点;  $j$  为频段的终止频点;  $x$  为不同的频段。

根据实际需求分别赋予  $S_x$  不同权重  $W_x$ , 如遴选高频吸波材料时, 赋予 X 波段面积权重为 10, Ku 波段面积权重为 8, S、C 波段面积权重为 7, P、L 波段面积权重为 6, 突出高频吸波要求, 同时提出对其他频段的宽频吸收要求。对各频段面积进行加权求和得到垂直吸波性能指数  $T_y$ :

$$T_y = \sum_{n=P}^{n=K_x} S_x W_x \quad (5)$$

垂直吸波性能指数  $T_y$  表征了隐身材料的综合吸波性能, 具有宽频强吸波性能的隐身材料通常具有较高的垂直吸波性能指数。上述评价方法避免了仅评价单一频段和频点下的垂直反射率而导致隐身材料仅具有窄带极强吸波性能, 可有效牵引隐身材料向宽频强吸收方向发展。

#### 3.2 行波衰减率优化评价方法

电磁波在机表的传播过程中主要产生以行波散射为主的后向散射, 因此行波衰减性能是机表隐身材料的关键吸波能力。

为降低棱边散射可能引起的测试误差, 设计尖角试板 (如图 14 所示), 采用菱形设计将前缘一次散射偏离接收端, 尽量避免对行波散射造成干扰。利用 RCS 法对行波试板进行测试, 以验证隐身材料应用于平面区域的行波衰减能力, 如图 15 所示, 可以看出: 与长方形试板相比, 该尖角试板棱边散射更低, 进一步减弱了对整体 RCS 的影响。

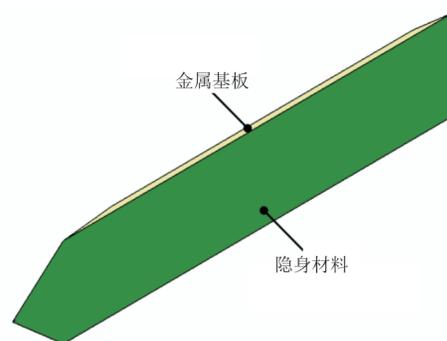


图 14 尖角金属试板

Fig. 14 Sharp-angle metal test plate

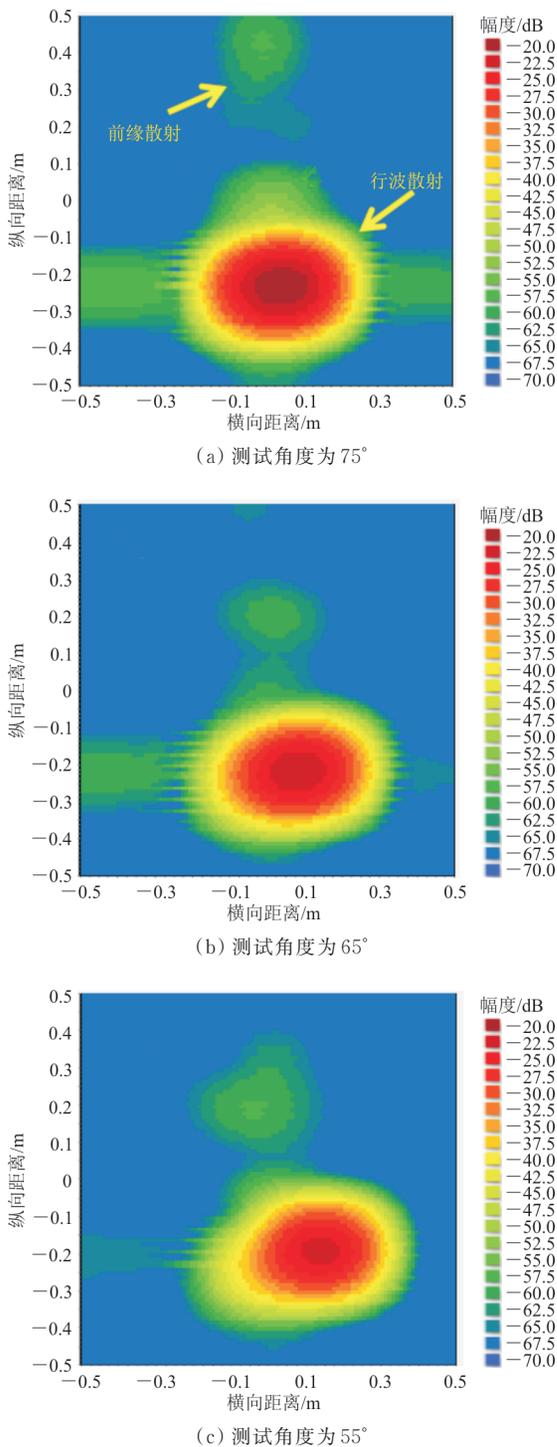


图 15 尖角金属试板在 8~10 GHz 的仿真成像  
Fig. 15 Simulation imaging of sharp-angle metal test plate on 8~10 GHz

为避免传统行波吸收性能评价方法因隐身材料的厚度增大、类型增多而导致难以判断行波峰,更加贴合隐身材料实际的应用情况,对一定角域内的 RCS 值进行求均处理,并对各波段的行波衰减率进行积分、加权,弱化行波峰单一角度和单一

频点对评价整体行波吸收性能的影响。

首先,对单个测试频点下特定角域(如图 8 中  $\varphi_2 \sim \varphi_1$  角域)内金属基板和隐身材料基板的 RCS 分别求均值,得到金属基板 RCS 均值  $R_0$  和隐身材料 RCS 均值  $R_1$ ,则该测试频点的行波衰减率为

$$\alpha' = \frac{R_0 - R_1}{L} \quad (6)$$

对所有频点测试数据进行上述处理得到行波衰减率—频率曲线,并对其所有频段进行面积积分,其公式形式同式(4)。

根据实际工程需求分别赋予  $S_x$  不同权重  $W_x$  (权重赋值可类比垂直反射率优化评价方法中的赋值方法),并进行加权求和得到行波吸收综合性能指数  $T$  ( $T$  的表达式同式(5))。

行波衰减率综合性能指数  $T$  表征了隐身材料的全频段行波衰减能力,有效避免了隐身材料厚度超过行波衰减率测试方法规定的厚度所带来的偶然误差(行波峰的识别问题),充分模拟了实际应用场景,较为真实地反映了隐身材料应用于机体表面的行波衰减性能。

### 3.3 斜入射反射率优化评价方法

与尖角行波板类似,设计尖角二面角吸波材料试板(如图 16 所示),该二面角试板通过菱形设计减缩棱边散射,减弱其对整体散射的影响。同时,由于隐身材料的斜入射吸波性能受入射电磁波极化的影响,在评价隐身材料的斜入射吸波性能时应充分考虑其具有的极化不稳定性。

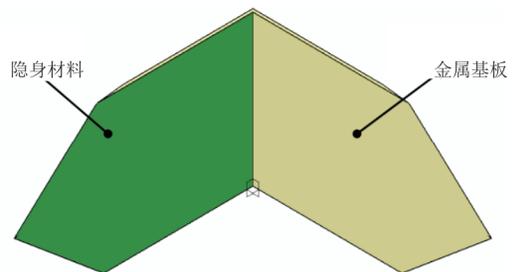


图 16 二面角测试试板  
Fig. 16 Dihedral angle test plate

此外,为定量考察隐身材料是否满足宽频隐身需求,并避免仅考察单一频点/频段引发的误差,采用面积积分方法对斜入射反射率测试曲线的所有频段进行加权积分。首先对测试所得斜入射扫频数据特定角域(如图 12 中  $10^\circ \sim 40^\circ$  角域)进

行 RCS 求均处理,分别得到某测试频点下金属基板 RCS 均值  $R_0$  和隐身材料 RCS 均值  $R_1$ ,该测试频点的斜入射反射率为

$$\Gamma_2 = R_1 - R_0 \quad (7)$$

对所有频点测试数据进行上述处理得到反射率—频率曲线。对反射率—频率曲线的所有频段进行面积积分,其公式形式亦同式(4)。

根据实际工程需求分别赋予  $S_x$  不同权重  $W_x$  (权重赋值可类比垂直反射率优化评价方法中的赋值方法),并进行加权求和得到不同电磁波极化下的斜入射综合吸收性能指数  $T_y$  ( $T_y$  的表达式同式(5),其中  $y$  表示电磁波极化模式 TE、TM)。

类似地,根据实际工程需求分别赋予  $T_y$  不同权重  $W_y$ ,并进行加权求和得到不同电磁波极化下的综合性能指数  $T$ :

$$T = S_{TE} W_{TE} + S_{TM} W_{TM} \quad (8)$$

根据入射电磁波在特定散射源(如进气道)传播的特点,针对性地设计吸波材料斜入射吸波性能的验证和评价方式,通过对斜入射反射率进行多次求均、积分、加权,全面评价隐身材料的宽频吸波性能,避免了仅考察单一频点/频段的斜入射反射率带来的误差。斜入射综合性能指数  $T$  表征了隐身材料对该类散射源隐身需求的满足程度。

### 3.4 应用评价

目前隐身材料的吸波性能和部件应用隐身材料后获得的隐身收益间没有严格的对应关系,因此除上述试板级材料评价方法外,仍需在部件级载体上开展隐身材料应用方案的收益评价。通过对比应用隐身材料前后关注角域的 RCS 均值,进一步评价隐身材料在部件级载体上的隐身收益。

部件级载体需根据实际散射源特点进行针对性设计,模拟应用部位的外形及散射特征,以求隐身材料尽量真实反映实际应用效果。单一载体通常具备对多种隐身材料的验证能力,如图 17 所示,管道载体需根据不同管道形式(如背部、腹部、两侧进气道)进行设计,应尽量降低载体散射对进气道散射的影响,并设置金属进气道终端,以验证隐身材料针对该类管道散射特点的吸收效果。行波验证载体通常根据测试频段设计满足波长比例需求的光顺载体,同时可在载体表面设置缝隙、台阶等缺陷以模拟实际应用条件下隐身材料散射抑制

效果。

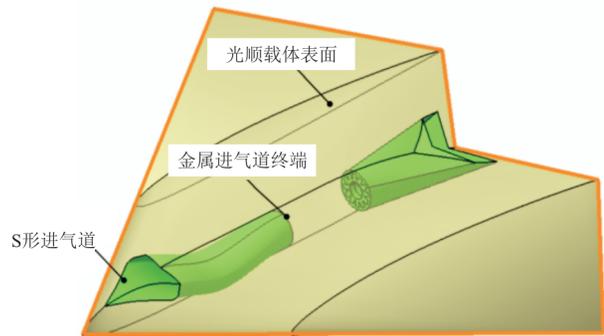


图 17 多功能载体模型

Fig. 17 Multifunctional carrier model

## 4 结论

1) 本文优化了行波衰减率和斜入射反射率测试基板外形,进一步降低了次强散射源对测试结果的干扰。

2) 本文提出了一种面向应用的隐身材料评价方法。通过设计合理的隐身材料关键吸波性能验证方案,使用面积积分、加权求和等方法处理测试数据,得到了隐身材料宽频综合性能指数,该指数充分表征了隐身材料在实际应用中的应用效果,避免了现有评价方法可能带来的偶然性偏差。该方法可用于遴选隐身材料过程中对隐身性能的优选,特别是牵引高性能宽频吸波涂层的研发,已在某典型隐身作战飞机的隐身材料选型过程中完成了应用。

3) 我国在隐身材料研发领域已取得长足进步,但还有很大的发展空间。其中,针对隐身材料的性能评价仍有如下问题亟待解决:

①目前隐身材料的低频性能测试通常基于较大尺寸的试板开展,大尺寸试板制造精度直接影响测试结果,且存在制样成本相对较高、制备周期较长、测试条件受限等问题,如何实现隐身材料低频隐身性能的准确、快速、低成本测试是材料低频性能提升的重要一环。

②隐身材料的吸波性能与材料应用后的 RCS 收益之间尚未建立准确的对应关系,需要在相关载体上开展试验以验证 RCS 收益,导致研制过程中存在周期长、成本高等问题,需要开展新评估方法研究,在隐身材料的吸波性能和应用收益间建立准确的对应关系。

## 参考文献

- [1] 王茜, 梁晓龙, 王宁, 等. 有人/无人机协同空战研究进展综述[J]. 电光与控制, 2024, 31(5): 11-17, 53.  
WANG Han, LIANG Xiaolong, WANG Ning, et al. A review of research progress on MAV/UAV cooperative air combat [J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(5): 11-17, 53. (in Chinese)
- [2] 张亚坤, 曾凡, 戴全辉, 等. 雷达隐身技术智能化发展现状与趋势[J]. 战术导弹技术, 2019(1): 56-63.  
ZHANG Yakun, ZENG Fan, DAI Quanhui, et al. Development status and trend of intelligent radar stealth technology [J]. Tactical Missile Technology, 2019(1): 56-63. (in Chinese)
- [3] 郑景嵩, 潘明, 李金亮, 等. 一种适用于电磁空间对抗的空战优势度评估方法[J]. 电子信息对抗技术, 2023, 38(6): 17-22.  
ZHENG Jingsong, PAN Ming, LI Jinliang, et al. An evaluation method of air combat superiority for electromagnetic space countermeasures [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2023, 38(6): 17-22. (in Chinese)
- [4] ZHOU Z Y, HUANG J. Mixed design of radar/infrared stealth for advanced fighter intake and exhaust system [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 110: 106490.
- [5] WANG C X, CHEN M J, LEI H S, et al. Radar stealth and mechanical properties of a broadband radar absorbing structure [J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 123: 19-27.
- [6] 桑建华, 周海, 陈颖闻. 隐身技术推动新一代飞行器发展 [J]. 航空科学技术, 2012, 23(3): 15-18.  
SANG Jianhua, ZHOU Hai, CHEN Yingwen. Development of new generation air vehicles driven by stealth technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, 23(3): 15-18. (in Chinese)
- [7] AHMAD H, TARIQ A, SHEHZAD A, et al. Stealth technology: methods and composite materials—a review [J]. Polymer Composites, 2019, 40(12): 4457-4472.
- [8] 中国人民解放军总装备部军标出版发行部. 雷达吸波材料反射率测试方法: GJB 2038A—2011[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 2011.  
Military Standard Publishing and Distribution Department of General Equipment Department of the People's Liberation Army. The measurement methods for reflectivity of absorbing material: GJB 2038A—2011[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of General Equipment Department of the People's Liberation Army, 2011. (in Chinese)
- [9] 中国人民解放军总装备部军标出版发行部. 雷达吸波材料表面波衰减率测试方法: GJB 9885—2020[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 2020.  
Military Standard Publishing and Distribution Department of General Equipment Department of the People's Liberation Army. Test method for surface wave attenuation rate of radar absorbing materials: GJB 9885—2020[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of General Equipment Department of the People's Liberation Army, 2020. (in Chinese)
- [10] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 48.  
SANG Jianhua. Low-observable technologies of aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 48. (in Chinese)
- [11] 张乐, 周洲, 许晓平. 进气道进口格栅电磁散射特性及试验验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(3): 361-369.  
ZHANG Le, ZHOU Zhou, XU Xiaoping. Electromagnetic scattering characteristics and experimental verification of inlet grille [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(3): 361-369. (in Chinese)
- [12] WANG B, WANG Q, LI S C. Effect of baffle board on aerodynamic and stealth performance of double S-duct caret intake [J]. Applied Sciences, 2024, 14(9): 3747.
- [13] 高翔, 周红, 邓文剑, 等. 不同进口的双S弯进气道气动及雷达特性研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5): 35-39.  
GAO Xiang, ZHOU Hong, DENG Wenjian, et al. Investigation of aerodynamic and electric scattering characteristics of double S-shaped intake with different inlet shapes [J]. Computer Simulation, 2018, 35(5): 35-39. (in Chinese)
- [14] POLO J A Jr, LAKHTAKIA A. Surface electromagnetic waves: a review [J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(2): 234-246.
- [15] 王超, 李恩, 郑虎. 雷达吸波材料表面波抑制性能测试技术[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(3): 75-78.  
WANG Chao, LI En, ZHENG Hu. Technology of surface wave suppression performance testing for absorbing material [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(3): 75-78. (in Chinese)
- [16] 徐阳秋. 斜入射电磁吸波结构设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
XU Yangqiu. Study on design of oblique incident electromagnetic wave absorbing structure [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)

(编辑:马文静)