

# 涂覆吸波材料对发动机排气系统雷达散射特性的影响

陈瀚曠<sup>1,2</sup>, 尚守堂<sup>1,2</sup>, 邓洪伟<sup>1,2</sup>, 赵明<sup>1</sup>, 王群<sup>1,2</sup>, 卢浩浩<sup>1,2</sup>

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 2. 航空动力系统与等离子体技术全国重点实验室: 沈阳 110015)

**摘要:** 为了获取涂覆吸波材料对排气系统雷达散射特性影响的规律, 拟定了 3 种吸波材料涂覆方案研究了 3 种不同吸波性能。利用弹跳射线法仿真分析了涂覆吸波材料对排气系统在 1、8、18 GHz 频点, 方位角在  $-40^\circ \sim 40^\circ$  内水平极化与垂直极化雷达散射截面(RCS)的影响。结果表明: 吸波材料涂覆部位不同, 各部件产生的散射回波在腔体中耦合、叠加形成的散射总场随之改变, 导致排气系统 RCS 振荡特性变化, 随着雷达波频率的提高, 对 RCS 振荡特性的影响逐渐变大; 保持相同涂覆方案提高材料吸波性能, 可提高排气系统 RCS 缩减效果但对 RCS 振荡特性没有影响, 将涂覆部位最多方案的材料反射率由  $-4$  dB 降至  $-6$  dB 时, 在 1、8、18 GHz 水平极化的 RCS 均值缩减效果提高至 89%、89%、96%, 垂直极化 3 个频点的 RCS 均值缩减效果提高至 85%、90%、95%。

**关键词:** 吸波材料; 排气系统; 雷达散射特性; 弹跳射线法; 航空发动机

中图分类号: V218

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.01.010

## Influence of Radar Absorbing Coating Materials on Radar Scattering Characteristics of Engine Exhaust System

CHEN Han-ze<sup>1,2</sup>, SHANG Shou-tang<sup>1,2</sup>, DENG Hong-wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Ming<sup>1</sup>, WANG Qun<sup>1,2</sup>, LU Hao-hao<sup>1,2</sup>

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute,

2. National Key Laboratory of Aerospace Power System and Plasma Technology: Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to obtain the influence of radar absorbing coating materials on radar scattering characteristics of engine exhaust system, three absorbing materials coating schemes were formulated and three different absorbing properties were studied. The influences of radar absorbing coating materials on the horizontal polarization and vertical polarization RCS of the exhaust system at frequencies of 1 GHz, 8 GHz, and 18 GHz and azimuth angles ranging from  $-40^\circ$  to  $40^\circ$  were simulated and analyzed by using the shooting and bouncing rays method. The results show that with the change of coating locations of the absorbing materials, the total scattering fields formed by coupling and superposition of scattering echoes generated by various components in the cavity also change, resulting in changes of the RCS oscillation characteristics of the exhaust system; with the increase of radar wave frequency, the impact on the oscillation characteristics gradually increases. While keeping the same coating scheme, improving the radar absorbing performance of the material can increase the RCS reduction effect of the exhaust system without affecting the RCS oscillation characteristics. When the material reflectivity of the coating scheme with the most coating locations is reduced from  $-4$  dB to  $-6$  dB, the average RCS reduction effects of the horizontal polarization at 1 GHz, 8 GHz and 18 GHz are increased to 89%, 89%, and 96%, and the average RCS reduction effects of the vertical polarization of the three frequency points are increased to 85%, 90%, and 95%.

**Key words:** absorbing material; exhaust system; radar scattering characteristics; shooting and bouncing rays; aeroengine

## 0 引言

发动机排气系统由涡轮、加力燃烧室及喷管组成, 具有典型的腔体结构。在 1~18 GHz 内排气系统的雷达散射特征信号对整个作战飞行器后向雷达散

射特征信号产生重要影响。发动机排气系统的雷达隐身特性作为衡量作战飞行器的重要指标已成为飞行器后向雷达隐身特性的关注重点<sup>[1-2]</sup>。

发动机雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)缩减技术主要包括外形设计、吸波材料涂覆 2 类<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2022-09-06 基金项目: 国家级研究项目资助

作者简介: 陈瀚曠(1994), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 陈瀚曠, 尚守堂, 邓洪伟, 等. 涂覆吸波材料对发动机排气系统雷达散射特性的影响[J]. 航空发动机, 2025, 51(1): 70-76. CHEN Hanze, SHANG Shoutang, DENG Hongwei, et al. Influence of radar absorbing coating materials on radar scattering characteristics of engine exhaust system[J]. Aeroengine, 2025, 51(1): 70-76.

外形设计主要通过改变排气系统各部位的结构形状,控制雷达波散射方向,避免散射回波沿入射方向返回,降低被雷达探测、识别的概率。陈立海等<sup>[5]</sup>利用数值模拟研究了喷口修形方式对二元收敛喷管 RCS 的影响,表明对二元喷口进行结构修形,可有效降低喷管在特定探测角度下的 RCS,提高雷达隐身性能;郭霄等<sup>[6]</sup>利用数值模拟方法研究了几何矢量角对球面收敛矢量喷管 RCS 的影响,表明球面收敛矢量喷管的俯仰矢量角在俯仰探测面、偏航探测面下对后向 RCS 均具有缩减作用,而偏航矢量角仅对俯仰探测面 RCS 具有缩减效果;杨胜男等<sup>[7-8]</sup>开展了球面二元矢量喷管电磁散射特性计算及单边膨胀球面二元喷管的雷达隐身修形研究,表明球面收敛二元喷管在垂直极化下边缘绕射场对散射总场的贡献在大角度体现,电磁波入射频率越大后向散射越大。由于发动机排气系统腔体结构内部存在较多散射源,腔体内各结构特征尺寸对不同频率的雷达波敏感度存在较大差异。因此通过外形设计实现宽频段的雷达隐身难度极大。涂覆吸波材料可吸收照射到排气系统各部件表面的雷达波能量,将雷达波能量转化为热能耗散或通过干涉使雷达波相消,减弱散射回波的信号特征<sup>[9]</sup>。因此涂覆吸波材料对缩减发动机排气系统 RCS 具有重要意义与价值。Cui<sup>[10]</sup>和 Yui 等<sup>[11]</sup>开展了高性能吸波材料的研究,结果表明其可以有效吸收雷达波的能量;高翔等<sup>[12]</sup>研究了介质涂覆位置对双 S 弯排气系统在 X 波段雷达散射特性的影响,表明在双 S 弯排气系统内壁面进行介质涂覆对雷达负探测角范围内的 RCS 缩减效果明显;郭霄等<sup>[13]</sup>研究了吸波介质脱落对 X 波段雷达散射特性的影响,表明吸波涂层脱落对球面收敛喷管后向 RCS 角向分布的影响较小,在俯仰探测面当材料脱落概率达到 0.7 时,仍具有 68.19% 的 RCS 缩减能力。

在前期关于涂覆吸波材料缩减发动机雷达特征信号的相关研究中,建立的排气系统物理模型结构简单,研究主要针对单一 X 波段开展,缺乏对包含结构完整的排气系统物理模型开展涂覆吸波材料对不同波段典型频段雷达散射特性的影响研究。针对前期研究存在的不足,本文建立包含涡轮、加力燃烧室、喷管的排气系统物理模型,仿真分析了在不同吸波材料涂覆方案及吸波性能下对排气系统雷达散射特性的影响。

## 1 发动机排气系统物理模型

本文建立的发动机排气系统物理模型如图 1(a)所示。模型包含涡轮叶片、支板、混合器、加力内锥、火焰稳定器、加力筒体、混合器外筒体及喷管。雷达散射特性计算物理模型如图 1(b)所示。由于发动机在装机环境下,筒体外壁面不会被雷达波照射。因此,在仿真计算过程中通常将发动机装配在低散射载体中,并将载体外表面设置为全吸波状态,从而消除外壁面对 RCS 的贡献。

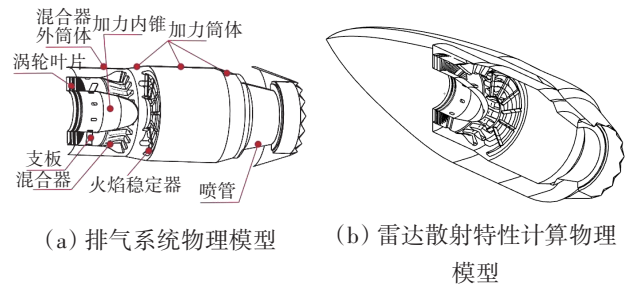


图 1 物理模型

## 2 吸波材料涂覆方案

本文将吸波材料在各频点的反射率设置为 -4 dB,并拟定 4 种吸波材料涂覆方案,见表 1。Case-0 为未涂覆吸波材料的方案,也是本文的基准方案。Case-1 ~ Case-3 为 3 种不同吸波材料涂覆方案,由于混合器外筒体在不同探测方位角分别被混合器、火焰稳定器等结构遮挡,因此本文拟定的 3 种涂覆方案均未考虑在该部位涂覆吸波材料。Case-1 是涂覆部位最多的方案,未在混合器外筒体涂覆吸波材料。在 Case-1 的基础上,Case-2 取消了在涡轮叶片、支板、喷管部位涂覆吸波材料,吸波材料全部涂覆于加力燃烧室各部位。Case-3 在 Case-1 的基础上,取消在涡轮叶片、支板部位涂覆吸波材料,而在加力燃烧室及喷管涂覆吸波材料。

表 1 吸波材料涂覆方案

	涡轮叶片	支板	加力内锥	火焰稳定器	混合器	加力筒体	喷管	混合器外筒体
Case-0	×	×	×	×	×	×	×	×
Case-1	■	■	■	■	■	■	■	×
Case-2	×	×	■	■	■	■	×	×
Case-3	×	×	■	■	■	■	■	×

注: ■ 代表在该位置涂覆吸波材料; × 代表该位置未涂覆吸波材料。

### 3 排气系统物理模型计算方法

本文采用弹跳射线法(Shooting and Bouncing Ray, SBR)对排气系统物理模型进行数值仿真计算。SBR将几何光学法和物理光学法进行结合,利用几何光学法求解入射雷达波在空间中的传播路径,并确定射线最终离开目标的反射路径,进而完成散射场强的更新计算。再利用物理光学法对射线最终离开目标的区域进行散射场的场强计算,然后把每根射线得到的散射场场强叠加起来,最终得到目标总的RCS。SBR较好地兼顾了复杂腔体散射的计算精度与计算效率,包含了对计算模型射线管的生成及跟踪、射线场强跟踪和远区散射场积分计算3部分<sup>[14-16]</sup>。

(1)射线管的生成及跟踪。离散入射雷达波,构造射线管,利用一系列紧密相连的射线管模拟雷达波入射到表面时的情况。通过对所有射线管进行路径追踪实现模拟雷达波在目标的传播过程。

(2)射线场强跟踪。对射线管与目标表面的交点场强进行跟踪计算,可求得电磁场的幅度。雷达波经过一次反射后,射线及场强信息进行更新,反射射线更新为入射射线,反射场强更新为入射场强,如此迭代直到射线脱离目标或射线达到终止条件。

(3)远区散射场积分计算。根据对射线路径跟踪和场强跟踪的分析,可求出射线经过多次反射回到射线口面时的电场分布,将口面上的电场等效为磁流源,对感应电流进行口径积分,得到目标体的远区散射场

$$\mathbf{E}_s = j \frac{\rho(-jkR)}{2\pi R} [(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}_i) \cdot \mathbf{s}] \cdot \mathbf{s} \cdot \iint \exp[-jk(\mathbf{i} - \mathbf{s}) \cdot \mathbf{r}_a] dS_a \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_s$ 为远区散射场; $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{s}$ 分别为沿着入射方向、散射方向的单位矢量; $\mathbf{n}$ 为面元法矢; $\mathbf{H}_i$ 为入射波的磁场强度; $R$ 为场点到原点的路径长度; $S_a$ 为明区面元; $r_a$ 为场点距该面元的距离长度。

最后,将所有射线管得到的散射场进行矢量叠加,得到目标体的远区散射总场

$$\mathbf{E}_T^{\text{SBR}} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_s \quad (2)$$

式中:第1个求和号表示对每条射线管散射场的叠加;第2个求和号表示对每条射线管照亮面元的散射场的叠加, $n$ 为每条射线管照亮的面元总数量; $m$ 为射线管总数。

### 4 计算方法验证

角反射结构是一种强散射源,在本文建立的发动机排气系统模型中,火焰稳定器、喉道截面与喷管扩张段壁面均形成了角反射结构。为了验证本文采用的SBR的计算精度,以角反射器为例(蓝色区域为涂敷吸波材料的区域,黄色区域为未涂覆隐身材料的金属区域)如图2所示,进行了数值仿真计算与试验测试结果的对比验证。

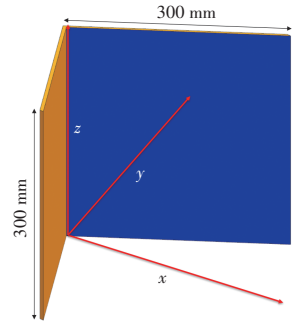


图2 角反射器模型

试验测试RCS分布曲线与数值仿真计算RCS分布曲线的对比情况如图3所示。从图中可见,在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 内,数值计算的RCS分布规律与试验测试的RCS分布规律基本一致。由于角反射器实物表面特性与仿真计算中设定的表面特性存在差异,测试数据与仿真数据的RCS数值略有偏差但偏差较小,数值计算的结果与试验结果吻合相对较好,从而验证了本文采用的计算方法SBR具有较好的计算精度。

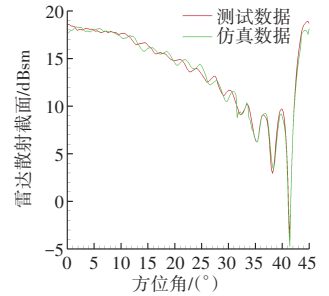


图3 测试与仿真数据 RCS 分布曲线对比

### 5 计算边界条件

雷达散射特性计算探测点布置方式如图4所示。本文将俯仰角设置为 $0^\circ$ ;将水平探测面的探测方位角设置为 $-40^\circ \sim 40^\circ$ ;方位角间隔设置为 $0.2^\circ$ 。设置的雷达布站方式为单站,表示天线与接收机处于同一方位。设置计算的极化方式为水平极化、垂直极化,频点选择为L波段1 GHz、X波段8 GHz、Ku波段18 GHz。

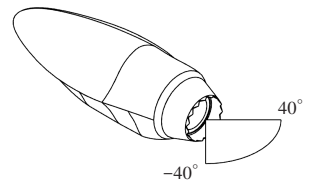


图4 雷达散射特性计算探测点

### 6 计算结果分析

#### 6.1 RCS分布规律分析

##### 6.1.1 涂覆方案对RCS影响分析

为了获取雷达波频率变化对排气系统在不同涂覆方

案下 RCS 分布规律的影响,本文对 4 种方案在 1、8、18 GHz 频点的雷达散射特性开展仿真计算,对所有雷达散射特性的计算结果均进行了无量纲处理。RCS 分布曲线的纵坐标无量纲雷达散射截面定义为  $RCS/RCS_{max}$ ,  $RCS_{max}$  为基准方案 Case-0 在该极化方式下整个探测角域内雷达散射截面的最大值(单位为 dBsm)。

在 1 GHz 频点下,不同吸波材料涂覆方案对 RCS 分布规律的影响如图 5 所示。

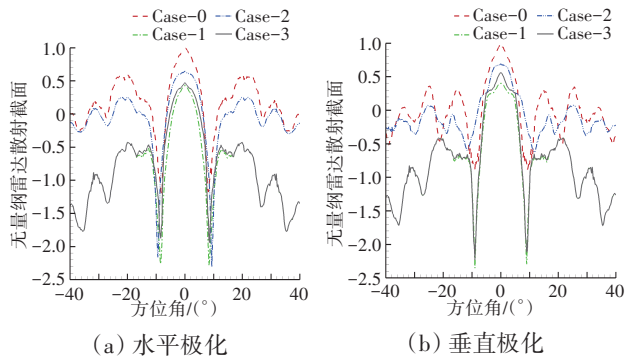


图 5 材料涂覆方案对 1 GHz 频点 RCS 的影响

从图中可见,在水平极化方式下,4 种方案的 RCS 分布规律较为接近,表明对于 1GHz,在排气系统不同部位涂覆吸波材料对 RCS 分布规律影响较小。随着入射方位角的改变,雷达波照射到排气系统的部位发生改变,产生回波的散射方向及在排气系统腔体内部的散射路径均出现变化,因此 RCS 分布规律呈较强的振荡特性。由于在排气系统正后向,喉道截面、加力内锥、支板等部件的结构形成了镜面散射源,雷达波照射上述部件形成了信号特征较强的散射回波,4 种方案在方位角为  $0^\circ$  时均形成最强的 RCS 散射峰值。方位角在  $-24^\circ \sim -18^\circ$  和  $18^\circ \sim 24^\circ$  2 个对称的角域内,形成了信号特征较强且角域较宽的散射峰值。由于喉道截面与扩张段壁面形成了角反射结构,产生了信号特征较强的散射回波,与腔体内部其他部件产生的回波信号及喷管外表面产生的回波信号叠加形成的散射总场信号特征较大。随着入射方位角增大,雷达波主要照射到加力筒体、部分火焰稳定器及喷管,结构形状变化较大的涡轮、混合器、加力内锥等部位无法被雷达波直接照射,因此 RCS 的振荡幅度减弱。综合  $-40^\circ \sim 40^\circ$  方位内的计算结果,与未涂覆吸波材料的基准方案 Case-0 相比,在不同部位涂覆吸波材料的 3 种方案对 RCS 均有缩减效果。其中涂覆部位最多的 Case-1 对 RCS 缩减效果最好,在整个探测角域

内 RCS 值明显低于基准方案 Case-0 的 RCS 值。与 Case-1 相比,Case-3 未在涡轮叶片和支板部位涂覆吸波材料,当方位角在  $-18^\circ \sim 18^\circ$  内, RCS 有所增加,而在其余方位角, RCS 与 Case-1 完全一致。由于方位角在  $-18^\circ \sim 18^\circ$  内雷达波直接照射上述 2 个部位或雷达波照射到其他部位,在腔体内部多次散射过程中到达叶片及支板,因此在涡轮叶片、支板的涂覆吸波材料对  $-18^\circ \sim 18^\circ$  范围内的 RCS 具有缩减效果。Case-2 对排气系统的 RCS 也具有一定缩减效果,然而与另外 2 种涂覆方案相比,缩减效果相对较差。由于该方案未在喷管部位涂覆吸波材料,而喷管部位在整个探测角域内均是较强的雷达波散射源,未在该部位涂覆吸波材料对整个探测角域的 RCS 缩减均有不利影响。且随着探测方位角的增大,喷管逐渐成为整个排气系统信号特征最强的散射源,因此在  $\pm 30^\circ$  之后 Case-2 对 RCS 的缩减效果相对较差。

对于垂直极化,4 种方案的的振荡特性及部分散射波峰、波谷分布角度与水平极化存在差异,其中 Case-0、Case-2 的差异大于另外 2 种涂覆方案,而 Case-1 ~ Case-3 对排气系统 RCS 的缩减效果与水平极化规律类似。Case-1 是 RCS 缩减效果较好的方案,Case-2 是 RCS 缩减效果相对较差的方案。且在  $-40^\circ \sim -36^\circ$ 、 $-22^\circ \sim -18^\circ$ 、 $-12^\circ \sim -8^\circ$ 、 $8^\circ \sim 12^\circ$ 、 $18^\circ \sim 22^\circ$ 、 $36^\circ \sim 40^\circ$  范围内,Case-2 的 RCS 大于 Case-0 的。由于雷达波在腔体内部散射过程中,当雷达波相向运动时存在相消的情况。在不同部位涂覆材料可改变雷达波在腔体内的散射路径,导致在部分角域下,Case-0 由于雷达波相消效果较强, RCS 反而小于 Case-2 的。

在 8、18GHz 频点下不同吸波材料涂覆方案对 RCS 分布规律的影响如图 6、7 所示。

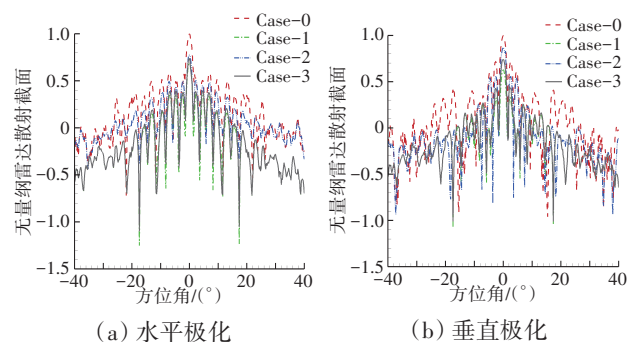


图 6 材料涂覆方案对 8 GHz 频点 RCS 的影响

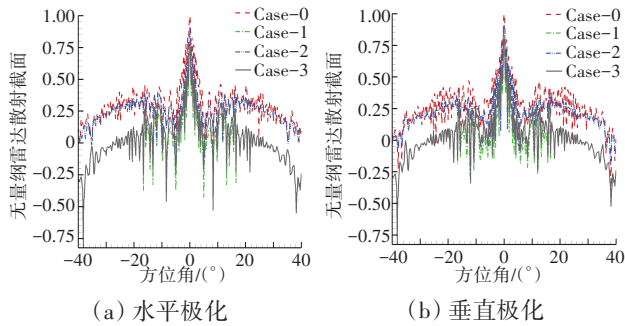


图7 材料涂覆方案对18 GHz频点RCS的影响

随着频率的增加,雷达波波长减小,腔体内结构细节特征及各部位的耦合作用对雷达波散射影响效果增强。与各方案1 GHz计算结果相比,RCS振荡特性明显增强,形成的散射波峰、波谷数量明显增加。在不同频点下,雷达波直接照射的部件一致,因此涂覆吸波材料对不同频点RCS的缩减角域影响范围一致。不同波长雷达波照射排气系统各部件后产生的散射机理不同,其中差异最大的为涡轮叶片及火焰稳定器。在1 GHz频点,雷达波照射到叶片及火焰稳定器后主要发生边缘绕射、行波散射。而在8、18 GHz频点,随着雷达波波长减小,可逐渐沿不同叶片的缝隙进入照射叶片表面及火焰稳定器端面照射凹槽结构,散射回波能量明显增加,导致后续雷达波散射路径及在空间叠加形成的散射总场方向及幅值均发生变化。其中在方位角为 $0^\circ$ 附近,火焰稳定器与涡轮叶片产生的散射回波较强,散射波峰的RCS数值有所升高。随着方位角的增大,RCS分布规律呈振荡下降的趋势。由于雷达波频率的变化改变了腔体部分结构的散射机理,导致不同吸波材料涂覆方案对RCS振荡特性及散射峰值的分布角度产生影响。随着频率增加,排气系统自身的RCS振荡特性增强且涂覆吸波材料后对散射路径的影响变大,导致对RCS振荡特性及散射波峰、波谷分布角度的影响随之增强。

### 6.1.2 吸波性能对RCS影响分析

为了获取材料吸波性能提升对3个频点RCS缩减效果的影响。在Case-1的基础上,将材料反射率分别设置为-5、-6 dB,并对3个频点开展雷达散射特性仿真计算。

在1、8、18 GHz频点下材料的不同吸波性能对RCS分布规律的影响如图8~10所示。

在水平与垂直极化方式下,不同吸波性能对3个

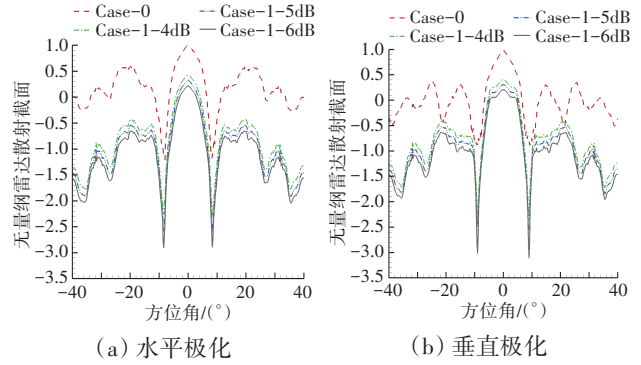


图8 材料吸波性能对1 GHz频点RCS的影响

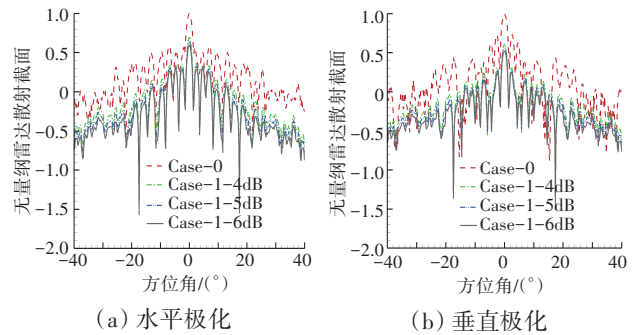


图9 材料吸波性能对8 GHz频点RCS的影响

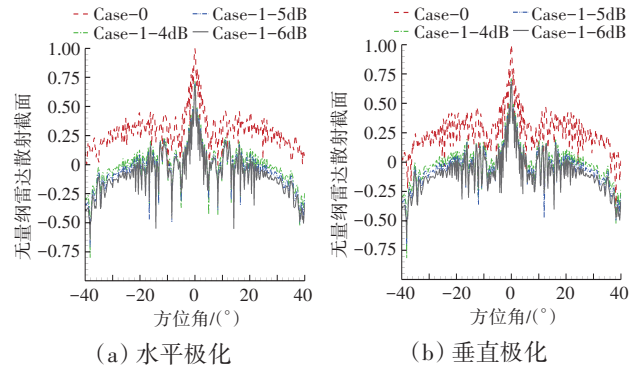


图10 材料吸波性能对18 GHz频点RCS的影响

频点的RCS分布规律影响情况相同。当隐身材料涂覆部位一致时,提高材料的吸波性能,3个频点水平极化及垂直极化的RCS进一步下降,而RCS的振荡特性、散射波峰与波谷分布角度均保持一致。由于增强材料吸波能力,雷达波照射到涂覆吸波材料部位的能量被更多的吸收消耗,而对回波散射路径没有影响,叠加形成的散射总场仅有幅度特征的缩减而方位特征无变化。

### 6.2 RCS均值降幅分析

涂覆隐身材料对方位角在 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 内RCS均值降幅的影响见表2。本文在计算的3个频点下,与基准方案Case-0相比,所有涂覆隐身材料方案的RCS均值均下降,其中Case-1涂覆部位最多,RCS均值降

表 2 涂覆隐身材料对方位角在 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 内 RCS 均值降幅的影响

频点	极化方式	RCS 均值降幅/%				
		Case-1	Case-2	Case-3	Case-1-5 dB	Case-1-6 dB
1 GHz	水平极化	83	42	79	86	89
	垂直极化	75	32	71	81	85
8 GHz	水平极化	77	52	73	81	89
	垂直极化	84	54	75	88	90
18 GHz	水平极化	93	63	87	95	96
	垂直极化	93	51	85	94	95

幅最大。将吸波材料反射率由 $-4$  dB 降至 $-6$  dB 时, 3 个频点的 RCS 均值幅值进一步下降。在 1、8、18 GHz 水平极化的 RCS 均值缩减效果分别由 83%、77%、93% 提高至 89%、89%、96%, 在垂直极化 3 个频点的 RCS 均值缩减效果分别由 75%、84%、93% 提高至 85%、90%、95%。

## 7 结论

(1) 涂覆吸波材料对缩减排气系统水平极化与垂直极化的 RCS 具有明显效果。增加了吸波材料涂覆部位, 使 3 个频点的 RCS 缩减效果也随之提高。吸波材料涂覆部位不同, 雷达波在空间中耦合、叠加形成的散射总场发生变化。因此 RCS 振荡幅度与散射波峰、波谷的分布角度均发生改变, 且随频率的提高影响效果也提高。

(2) 在不同部位涂覆吸波材料对 RCS 缩减角域的影响范围有差异。随着方位角的增大, 雷达波照射到叶片、支板的能量逐渐减弱, 方位角在 $\pm 18^\circ$  范围之外, 雷达波无法到达叶片及支板。因此在涡轮叶片、支板涂覆吸波材料对方位角在 $\pm 18^\circ$  范围内的 RCS 具有缩减效果。

(3) 方位角在 $\pm 30^\circ$  之后, 雷达波无法照射到加力内锥、火焰稳定器等加力燃烧室的强散射源。因此在加力燃烧室涂覆吸波材料对方位角在 $\pm 30^\circ$  之后的 RCS 缩减效果逐渐减弱。

(4) 在整个探测范围内喷管喉道截面与外调节片均是强散射源, 因此在喷管涂覆吸波材料对整个计算角域内的 RCS 均有缩减效果。随方位角的增大, 喷管回波信号特征占比增大, 对 RCS 的缩减效果随之提高。

(5) 保持相同涂覆方案, 进一步降低材料各频点的雷达波反射率, 雷达波照射到涂覆材料部位的能量

被更多消耗, RCS 缩减效果随之提高。而回波的散射路径没有变化, 因此叠加形成的散射总场仅有幅度特征的缩减而无方位的变化。

(6) 当吸波材料反射率由 $-4$  dB 降至 $-6$  dB 时, 在 1、8、18 GHz 水平极化的 RCS 均值缩减效果最大可提高至 89%、89%、96%, 在垂直极化 3 个频点的 RCS 均值缩减效果最大可提高至 85%、90%、95%。

## 参考文献:

- [1] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 1-149.  
SANG Jianhua. Aircraft stealth technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 1-149. (in Chinese)
- [2] 张考, 马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 1-353.  
ZHANG Kao, MA Dongli. Survivability and stealth design of military aircraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-353. (in Chinese)
- [3] 尚守堂, 曹茂国, 邓洪伟, 等. 航空发动机隐身技术研究及管理工作探讨[J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 6-9.  
SHANG Shoutang, CAO Maoguo, DENG Hongwei, et al. Discussion on aeroengine stealth technology research and management[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 6-9. (in Chinese)
- [4] 邓洪伟, 尚守堂, 金海, 等. 航空发动机隐身技术分析论述[J]. 航空科学技术, 2017, 28(10): 1-7.  
DENG Hongwei, SHANG Shoutang, JIN Hai, et al. Analysis and discussion on stealth technology of aero engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2017, 28(10): 1-7. (in Chinese)
- [5] 陈立海, 杨青真, 陈玲玲, 等. 不同喷口修形的二元收敛喷管 RCS 数值模拟[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 513-520.  
CHEN Lihai, YANG Qingzhen, CHEN Lingling, et al. Numerical simulation of RCS for 2-D convergent nozzle with different trailing edges[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 513-520. (in Chinese)
- [6] 郭霄, 杨青真, 施永强, 等. 几何矢量角对球面收敛矢量喷管 RCS 的影响研究[J]. 推进技术, 2018, 39(4): 785-791.  
GUO Xiao, YANG Qingzhen, SHI Yongqiang, et al. Effects of vector angle on RCS of spherical convergent flap nozzle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(4): 785-791. (in Chinese)
- [7] 杨胜男, 尚守堂, 邵万仁, 等. 球面收敛二元喷管电磁散射特性[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12): 2983-2991.  
YANG Shengnan, SHANG Shoutang, SHAO Wanren, et al. Electromagnetic scattering characteristics for spherical convergent flap nozzle [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(12): 2983-2991. (in Chinese)
- [8] 杨胜男, 邵万仁, 尚守堂, 等. 单边膨胀球面二元喷管雷达隐身修形研究[J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 55-62.  
YANG Shengnan, SHAO Wanren, SHANG Shoutang, et al. Study on radar stealth shaping for single expansion ramp with spherical 2-D nozzle

- zle[J]. *Aeroengine*, 2016, 42(5): 55-62. (in Chinese)
- [9] 徐剑盛, 周万城, 罗发, 等. 雷达波隐身技术及雷达吸波材料研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(5): 46-49.
- XU Jiansheng, ZHOU Wancheng, LUO Fa, et al. Research progress on radar stealth technique and radar absorbing materials[J]. *Materials Reports A*, 2014, 28(5): 46-49. (in Chinese)
- [10] Cui T J. Microwave metamaterials[J]. *National Science Review*, 2018, 5(2): 134-136.
- [11] Yu Y, Luo G Q, Yu W, et al. 3-D frequency-selective resonator based on magnetic materials and meanderline[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7694-7699.
- [12] 高翔, 施永强, 杨青真, 等. 介质涂覆位置对双S弯排气系统电磁散射特性影响研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(2): 24103-1-24103-10.
- GAO Xiang, SHI Yongqiang, YANG Qingzhen, et al. Electromagnetic scattering characteristics of double S-shaped exhaust nozzle with different coating medium parts[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(2): 24103-1-24103-10. (in Chinese)
- [13] 郭宵, 杨青真, 文振华, 等. 吸波材料脱落对球面收敛喷管电磁散射特性的影响[J]. *航空学报*, 2021, 42(6): 411-418.
- GUO Xiao, YANG Qingzhen, WEN Zhenhua, et al. Influence of RAM abscission on electromagnetic scattering characteristic of cavity[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(6): 411-418. (in Chinese)
- [14] Baik C W, Jeon S G, Kim D H, et al. Third-harmonic frequency multiplication of a two-stage tapered gyrotron TWT amplifier[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 52(5): 829-838.
- [15] 何之媛, 王蕊, 王谷, 等. 基于高频混合方法的复杂目标与背景复合电磁散射研究[J]. *空天防御*, 2020, 3(3): 78-82.
- HE Zhiyuan, WANG Rui, WANG Gu, et al. Composite electromagnetic scattering of complex target and background based on high frequency mixing method[J]. *Air and Space Defense*, 2020, 3(3): 78-82. (in Chinese)
- [16] Buddendick H, Eibert T F. Acceleration of ray-based radar cross section predictions using monostatic-bistatic equivalence[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 320-329.

(编辑: 贺红井)