航 空 学 报　　　　Apr. 25 2017 Vol. 38 No. 4
Acta Aeronautica et Astronautica Sinica　　　　ISSN 1000-6893 CN 11-1929/V

http://hkxb.buaa.edu.cn hkxb@buaa.edu.cn

DOI: 10.7527/S1000-6893.2016.0295

介质涂覆位置对球面收敛喷管电磁散射特性影响

郭霄*，杨青真，施永强，杨惠成，白进

西北工业大学 动力与能源学院，西安 710029

摘　要：外形设计和隐身材料使用是缩减目标雷达散射截面积(RCS)的两种常用方法。为了研究雷达吸波材料(RAM)对于球面收敛矢量喷管(SCFN)的RCS减缩效果，采用引入阻抗边界条件后的迭代物理光学(IPO)法，研究了球面收敛二元喷管及8种吸波材料涂覆方案的电磁散射特性，并获得了X波段下9种模型的后向RCS随探测角度的变化规律。研究结果表明：吸波材料涂覆可以有效地缩减球面收敛喷管的RCS，合理的涂覆方案可以在保证RCS缩减效果的基础上，降低吸波材料的使用量；相比全涂覆方案，仅在喷管出口和球面段进行涂覆，可以在吸波材料减少30%使用量的情况下，达到全涂覆方案80%的缩减效果。

关键词：迭代物理光学；阻抗边界条件；雷达吸波材料；球面收敛矢量喷管；雷达散射截面积

中图分类号：V231　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-6893(2017)04-320430-09

飞机发动机喷管是典型的腔体结构，腔体结构是一种强散射源，对于飞机的目标雷达散射截面积(RCS)有巨大的贡献，对喷管进行RCS缩减可以有效地缩减飞机的目标RCS[1]。球面收敛矢量喷管(SCFN)的收敛段采用万向节的球形结构，扩张段则采用矩形截面。SCFN可以兼顾轴对称截面结构矢量效率高、压力分布均匀以及矩形截面结构易于与机身进行一体化设计，是唯一列入美国IHPTET计划的矢量喷管[2]。国内外学者针对SCFN的流动特性开展了研究，Taylor针对9种不同的SCFN进行了实验研究，对球面收敛段与矩形扩张段链接设计给出了大量的参考结论[3-4]。张靖周等通过实验的手段获得了SCFN的热射流特征，观察到了出口截面的“马鞍”形异形总压分布以及热射流的不对称分布[5]。王宏亮研究了喉部不同的宽高比对SCFN喷管流动特性的影响[6]。对于SCFN喷管的电磁隐身特性，崔金辉等将射线追踪法应用在SCFN的电磁散射特性计算中[7-9]。杨胜男等研究了SCFN喷管的电磁散射特性，计算了不同频率下的SCFN的RCS特性，得到了频率对SCFN喷管电磁特性的影响[10]。SCFN是重要的矢量喷管，但从已经公开的研究资料来看其气动特性研究有待补充，雷达散射特性研究仍需完善，介质涂覆的研究还未开展。如何对SCFN喷管进行有效的涂覆不仅对于SCFN的隐身特性具有重要的意义，同时对于SCFN喷管的气动设计具有重要的参考价值[11-12]。

本文以迭代物理光学(Iterative Physical Optics, IPO)法为基础，通过引入阻抗边界条件实现涂覆吸波材料的电大尺寸腔体电磁散射特性计算，研究了不同涂覆位置对SCFN RCS的影响。

收稿日期：2016-05-11；**退修日期**：2016-10-14；**录用日期**：2016-11-10；**网络出版时间**：2016-11-21 14:44

网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20161121.1444.016.html

* **通讯作者**. E-mail: gx_19880013@163.com

引用格式：郭霄，杨青真，施永强，等. 介质涂覆位置对球面收敛喷管电磁散射特性影响[J]. 航空学报，2017，38(4)：320430. GUO X，YANG Q Z，SHI Y Q，et al. Electromagnetic scattering characteristics of spherical convergent vector nozzle with coating medium at different parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2017，38(4)：320430.

http://hkxb.buaa.edu.cn

1 计算方法

IPO 法是建立在物理光学近似的基础之上，考虑腔体壁面之间的电磁波多次反射，通过迭代方法求解电场积分方程，进而求解得到腔体的电磁散射场的一种电磁数值计算方法[13]。IPO 用光学电流与修正电流叠加来近似目标表面的真实电流，因此 IPO 法可以解决深度较大的腔体散射问题。为了提高 IPO 法的迭代计算效率，在迭代计算中引入前后向迭代物理光学方法和松弛因子技术[14]。

为了能够计算涂覆有吸波材料的电大尺寸腔体电磁散射问题，在 IPO 的基础之上引入阻抗边界条件。阻抗边界条件最早由 Leontovich 提出，在此基础上，国内外的科研工作者对阻抗边界进行了深入的研究，使其能够满足介质涂覆数值模拟计算[15-19]。

一般阻抗边界条件的矢量形式为

$$\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{E} = Z_s \boldsymbol{n} \times \boldsymbol{n} \times \boldsymbol{H} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 分别为电场和磁场；$\boldsymbol{n}$ 为面元法向矢量；Z_s 为绝对阻抗。

通常认为绝对阻抗 Z_s 和入射波角度有关。对于折射率较大的吸波材料，可以近似认为 Z_s 与入射角度无关，因此可得

$$Z_s = \mathrm{j}Z_0 \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}\tan(kt\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}) \tag{2}$$

式中：ε_r、μ_r 为相对磁导率和相对介电常数；t 为涂覆吸波材料的厚度；k 为自由空间波数；Z_0 为自由空间波阻抗。

阻抗边界条件避免了对于吸波材料内部复杂的电磁波计算分析，从而简化了计算。在满足下述条件基础上，阻抗边界条件适用于计算涂覆介质的非理想导体、粗糙表面以及等离子体等：涂覆层介质的折射系数和损耗较大；涂覆层表面的曲率半径远大于吸波材料的波长；在涂覆材料表面，外部场在和波长相比拟的尺度范围内变化平缓。采用阻抗边界条件的 IPO 法可以在保证计算精度的情况下对涂覆吸波材料的腔体目标进行有效的计算。

为了验证本文开发的结合阻抗边界条件的 IPO 法对介质涂覆的单端开口腔体的计算精度问题，对如图 1 所示的全涂覆单端开口圆柱腔体计算模型进行了数值模拟[20]。图 1 中 sc 面为腔体壁面，sa 面为腔体口径面，圆柱底面半径 $R=60$ mm，圆柱高为 120 mm。腔体内壁全部涂覆吸波材料，$\mu_r=1.0$，$\varepsilon_r=6.11-\mathrm{j}0.78$；吸波材料厚度为 6 mm。图 2 为本文开发的软件的计算结果与试验测试结果的 RCS 曲线；图中纵坐标为雷达散射截面积，横坐标 θ 为探测角；从图中可以看出在计算的角度范围内，数值计算的结果与试验结果吻合相对较好。

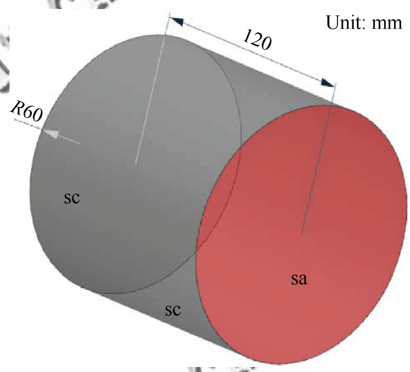

图 1 验证模型

Fig. 1 Test model

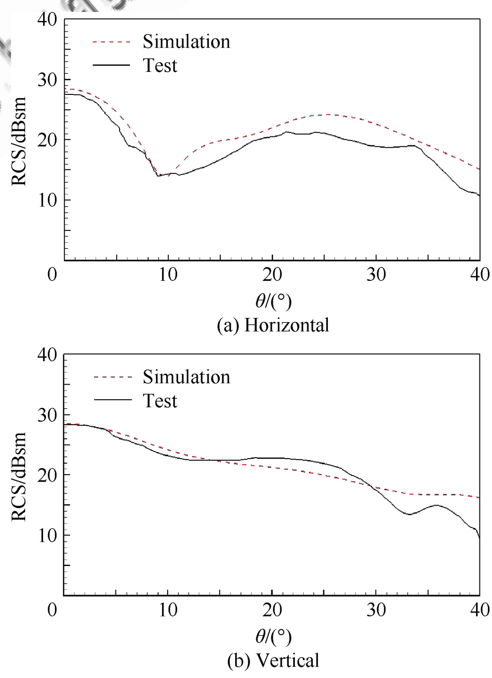

图 2 水平和垂直极化方式下 RCS 曲线

Fig. 2 RCS curves in horizontal and vertical polarization

2 研究对象

本文以球面收敛二元矢量喷管为研究对象，在喷管进口处安装了环形混合器和中心锥。由于SCFN内部的结构没有被完全几何遮挡，在设计介质涂覆方案时，需要考虑中心锥外表面和混合器内外壁面。根据SCFN喷管自身的几何特征，将喷管壁面分为3个区域(如图3所示)。本文共设计了9种涂覆方案(如表1所示)。Model 0为无涂覆的基准模型，Model 2为全涂覆模型；Model 1、Model 3、Model 4和Model 5为对喷管某一位置进行涂覆的模型；Model 6、Model 7与Model 8为对喷管壁面进行组合涂覆的模型。以全涂覆方案的涂覆面积为基准面积1，其他涂覆方案的面积与全涂覆相比确定其涂覆面积比例。

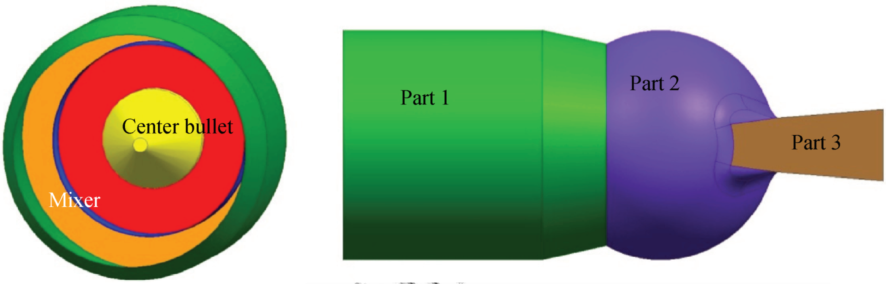

图3 雷达吸波材料涂覆区域示意图

Fig. 3 Illustration of radar absorbing material coating part

表1 不同涂覆方案涂覆位置

Table 1 Coating part in different coating program

Model No.	Part 1	Part 2	Part 3	Center bullet	Mixer	Coating area
Model 0	○	○	○	○	○	0
Model 1	○	●	○	○	○	0.258 7
Model 2	●	●	●	●	●	1
Model 3	○	○	○	●	●	0.192 2
Model 4	○	○	●	○	○	0.131 8
Model 5	●	○	○	○	○	0.417 3
Model 6	○	●	●	○	○	0.390 5
Model 7	●	●	○	○	○	0.676 0
Model 8	●	●	●	○	○	0.807 8

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。

http://hkxb.buaa.edu.cn
http://hkxb.buaa.edu.cn

3 结果与分析

图4为雷达探测角度示意图。本文计算条件设置如下：俯仰和偏航探测面探测角计算范围：0°～40°；入射波波长$\lambda=0.03$ m；每个平方波长上有16个网格，壁面网格总数为34 454。

3.1 俯仰探测面

图5(a)为俯仰探测面水平极化方式下不同涂覆方案下的球面收敛矢量喷管RCS曲线。从图中可以看出，在0°探测角下，Model 0的RCS

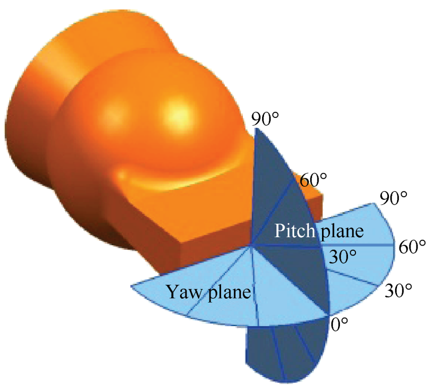

图4 雷达探测角设置示意图

Fig. 4 Setting of radan detecting angles

最大;Model 2 的 RCS 最小;涂覆吸波材料的模型的 RCS 均比基准模型的 RCS 要小。在 0°～40° 探测角范围,Model 0 的 RCS 在大部分探测角下大于其他模型的 RCS;Model 1、Model 4 和 Model 5 三种模型仅对外壁面的单个位置进行了涂覆,在 0°～5° 范围内,3 种模型的 RCS 相差较小,随着探测角的增加,3 种模型的 RCS 的差异增大,这是因为,在较小的探测角下,电磁波直接照射的主要部位是喷管进口端面的平板,在大角度下,电磁波可以直接照射喷管壁面的不同位置,在不同位置涂覆吸波材料,对电磁波的消减作用不同;Model 2、Model 6、Model 7 和 Model 8 为组合涂覆方案,在 0° 探测角下,这 4 种模型的 RCS 小于上述 4 种单独涂覆方案的 RCS,这是因为涂覆面积的增大之后,对多次反射的电磁波也有较好的吸收;Model 2 和 Model 7 的涂覆方案对 RCS 的缩减效果类似,在这两种方案中,均对喷管出口位置涂覆了吸波材料。在 0°～15° 探测角范围内,随着探测角的增大,所有模型的 RCS 呈现下降的趋势。在 15°～25° 探测角范围内,SCFN 进口壁面部分与喷管壁面会形成角反射器效应,在该探测角范围会出现一个 RCS 峰值区域。在整个探测角区域内,Model 1、Model 3、Model 4 和 Model 5 的 RCS 角向分布相似;Model 2、Model 6、Model 7 与 Model 8 的 RCS 角向分布相似。在大角度探测角范围内(30°～40°),不同模型的 RCS 角向分布差异较大,Model 1、Model 3、Model 5 与 Model 0 的 RCS 角向分布相似,Model 2、Model 6、Model 7 与 Model 8 对 RCS 的缩减效果较好。

图 5(b)为俯仰探测面垂直极化方式下不同模型的 RCS 角向分布曲线。在 0°～40° 范围内,所有模型的 RCS 随着探测角的增大而减小;Model 3 的 RCS 角向分布与 Model 0 基本重合,只有在个别探测角下存在差异,这说明单纯涂覆喷管内部组件中心锥和混合器对于喷管的 RCS 缩减作用不明显。Model 1 与 Model 0 的角向分布曲线也基本重合,这与水平极化方式下模型的 RCS 角向分布不同,这是因为 SCFN 和所涂覆的吸波材料都具有一定的极化特性。Model 4、Model 5 的 RCS 角向分布说明涂覆吸波材料对缩减 RCS 有一定的效果,但是从图上看效果并不明显,在较大的探测角下,涂覆吸波材料之后的模型 RCS 会大于 Model 0 的 RCS;Model 2、Model 6、Model 7 与 Model 8 对 RCS 的缩减效果相比只涂覆单一位置的模型 Model 1、Model 3、Model 4 与 Model 5 要好;在 15°～25°范围内,Model 2 和 Model 7 有很明显的 RCS 缩减效果。

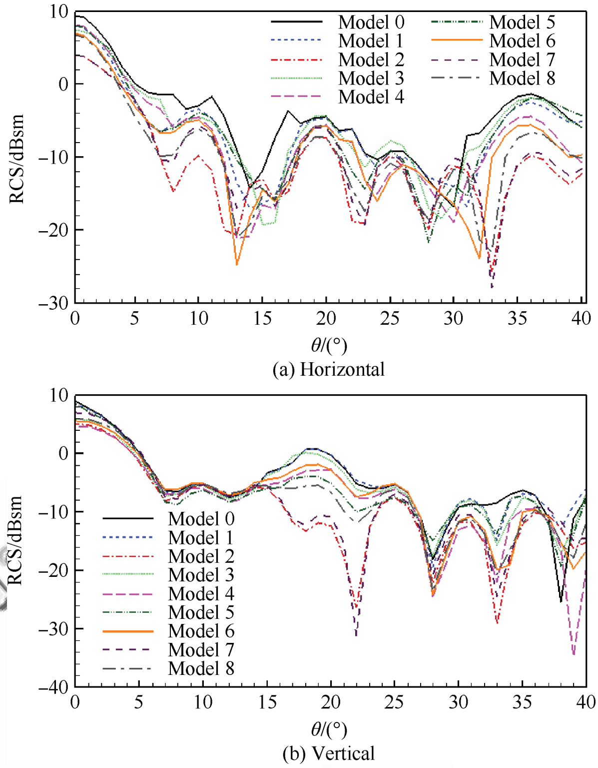

图 5 俯仰探测面水平和垂直极化方式下不同模型 RCS 角向分布曲线

Fig. 5 RCS curves of different models in horizontal and vertical polarization in pitch plane

图 6(a)为俯仰探测面水平极化方式下 $\theta=20°$ 时电流分布云图;图中 JMOD 为感应电流密度分布。在该探测角下,喷管二元出口上壁面、喷管进口端面区域和 Part 1 区域的部分壁面能够被入射电磁波直接照射,在被直接照射到的区域涂覆吸波材料可以直接吸收入射的电磁波,从而也降低了经过壁面反射的电磁波的强度,降低了模型的 RCS;在模型进口端面直接照射区域会出现一个中等电流强度区域,这主要是模型进口底面和环形混合器壁面形成了一个二面角区域,二面角区域是强散射结构;Model 1 和 Model 5 中等电流强度区域所占面积大,且电流强度峰值较大,

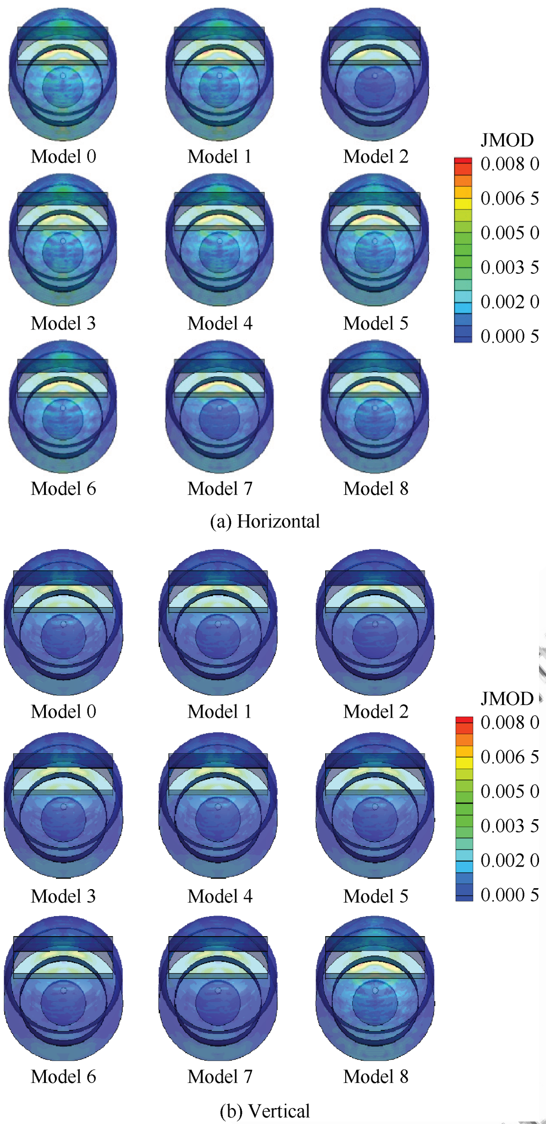

图 6 俯仰探测面水平和垂直极化方式下 $\theta=20^\circ$ 时电流分布

Fig. 6 Current distribution at $\theta=20^\circ$ in horizontal and vertical polarization in pitch plane

Model 2 的该区域所占面积最小；Model 3、Model 4、Model 6、Model 7 和 Model 8 的中等电流强度区域所占的面积大小接近，但是电流峰值大小有差异。图 6(b) 为俯仰探测面垂直极化方式下 $\theta=20^\circ$ 时不同模型的壁面电流分布云图。在垂直极化方式下，不同模型的中等电流强度区域相比水平极化方式下的模型的中等电流强度区域向上移动，这说明模型具有一定的极化特性。不同模型的中等电流强度区域位置差别不大。

在本文中，为方便比较不同涂覆方案对于 RCS 均值的缩减效果，缩减效果定义为

$$A=\frac{\sigma_n-\sigma_0}{\sigma_0} \tag{3}$$

式中：A 为缩减效果；σ_n 为不同涂覆方案下模型的 RCS 均值；σ_0 为基准模型的 RCS 均值。

表 2 和表 3 为俯仰探测面两种极化方式下不同探测角范围内模型的 RCS 均值。SCFN 喷管在较小的探测角范围内具有较大的 RCS 均值，随着探测角范围的增大，喷管模型的均值减小。涂覆吸波材料对于 RCS 都具有一定的缩减作用，不同的涂覆方案对于 RCS 的缩减作用不一样；在两种极化方式下，Model 2 对于 RCS 的缩减作用最为明显，在水平极化方式下，Model 7 可以达到全涂覆模型 90% 的 RCS 缩减效果，节省了 33% 的吸波材料使用；在垂直极化方式下，Model 6 相比全涂覆方案减少了 60% 的吸波材料使用，但是可以达到全涂覆方案 75% RCS 缩减效果。

表 2 俯仰探测面水平极化方式下不同探测角度范围内模型 RCS 均值

Table 2 Average RCS of models with different detective angles under horizontal polarization in pitch plane

Model No.	RCS/dBsm			
	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$
Model 0	4.687 9	2.249 5	0.691 6	−0.026 6
Model 1	3.067 2	0.571 2	−0.932 6	−1.625 1
Model 2	−0.293 5	−2.810 5	−4.300 4	−5.309 9
Model 3	3.167 7	0.681 5	−0.840 5	−1.455 9
Model 4	3.416 6	0.813 6	−0.759 3	−1.664 4
Model 5	3.250 8	0.715 1	−0.863 8	−1.470 4
Model 6	2.061 9	−0.483 7	−2.013 4	−2.917 6
Model 7	−0.157 0	−2.541 0	−4.000 1	−4.988 5
Model 8	1.655 7	−0.922 6	−2.487 9	−3.430 4

表 3 俯仰探测面垂直极化方式下不同探测角度范围内模型 RCS 均值

Table 3 Average RCS of models with different detective angles under vertical polarization in pitch plane

Model No.	RCS/dBsm			
	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$
Model 0	3.666 7	1.748 7	0.342 2	−0.698 8
Model 1	3.345 5	1.490 5	0.119 4	−0.907 6
Model 2	0.981 3	−1.372 1	−2.883 4	−3.974 0
Model 3	1.710 3	0.138 0	−1.194 5	−2.220 7
Model 4	1.804 6	−0.035 4	−1.372 4	−2.467 6
Model 5	1.905 8	1.830 9	0.330 6	−0.717 4
Model 6	1.684 9	−0.177 9	−1.527 0	−2.640 7
Model 7	2.851 8	0.374 3	−1.175 7	−2.281 6
Model 8	2.058 5	−0.177 1	−1.650 8	−2.760 7

http://hkxb.buaa.edu.cn

3.2 偏航探测面

图 7(a)为偏航探测面在水平极化方式下不同模型的 RCS 角向分布曲线。在 0°～40° 探测角范围内，不同模型的 RCS 角向分布规律相似；在大部分探测角下，Model 0 都具有最大的 RCS；Model 1、Model 3、Model 4 与 Model 5 和 Model 0 的角向 RCS 分布差别较小，在较大探测角下，Model 4 和 Model 5 的 RCS 会大于 Model 0 的 RCS；Model 6、Model 7 和 Model 8 的模型 RCS 角向分布接近，对 RCS 具有相对较好的 RCS 缩减效果，Model 7 具有更好的缩减效果；Model 7 的 RCS 角向分布接近全涂覆模型，在大部分探测角范围内都具有相对较好的 RCS 缩减作用。

图 7(b)为偏航探测面在垂直极化方式下不同涂覆模型的 RCS 角向分布曲线。在 0°～40° 范围内，在大部分探测角下，Model 0 的模型 RCS 大于涂覆吸波材料的模型；Model 4 和 Model 0 的 RCS 角向分布较为相似，Model 1 只有在较大的探测角度下才体现出一定的 RCS 缩减作用，而 Model 3 只有在 $\theta=15°$ 附近体现出一定的缩减作用。在较小的探测角范围内，Model 1～Model 8 都不具有较好的 RCS 缩减作用。在较大的探测角度下，组合涂覆方案的 RCS 缩减效果更好，这是因为组合涂覆能够覆盖更多的喷管壁面区域。

图 8 为偏航探测面不同极化方式下 $\theta=20°$ 时不同模型的电流分布云图。对于所有模型，在被入射电磁波直接照射的区域会出现一个中等强度电流区域，但是电流强度小于俯仰探测面下的电流强度；在偏航平面下，壁面上的电流强度较小；在 Model 2 和 Model 7 的壁面电流强度明显要小于其他模型的壁面电流强度。

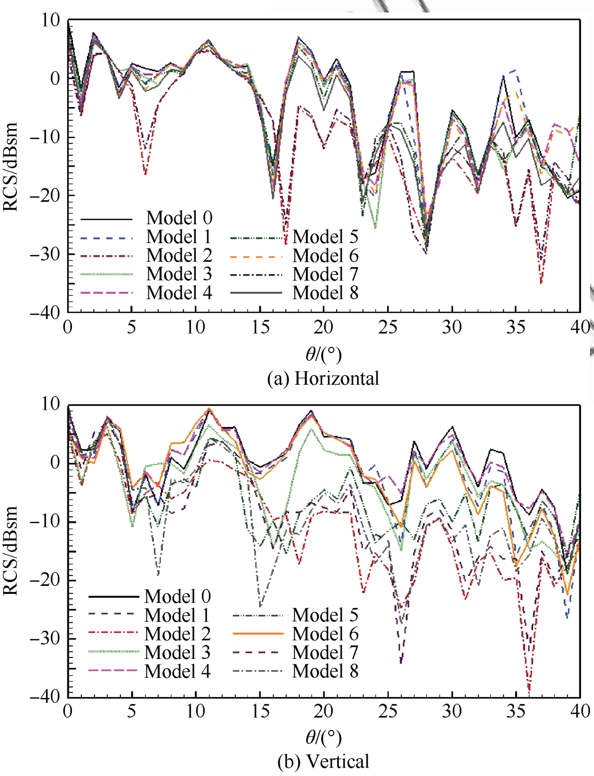

图 7 偏航探测面水平和垂直极化方式下不同模型 RCS 角向分布曲线

Fig. 7 RCS curves of different models in horizontal and vertical polarization in yaw plane

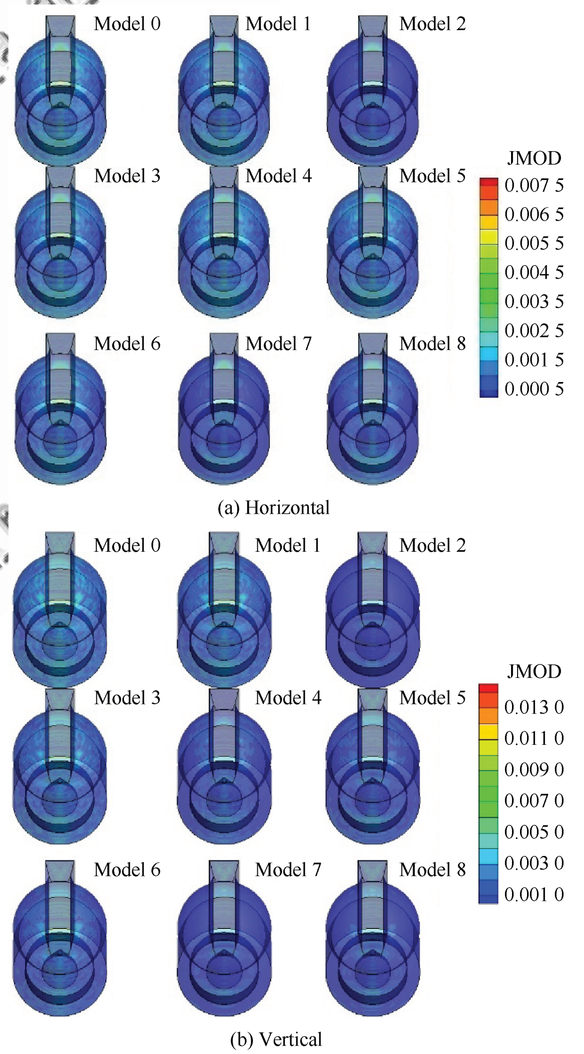

图 8 偏航探测面水平和垂直极化方式下 $\theta=20°$ 时电流分布

Fig. 8 Current distribution at $\theta=20°$ in horizontal and vertical polarization in yaw plane

表 4 和表 5 为偏航探测面两种极化方式下不同探测角范围内的模型 RCS 均值。可以看出，在两种极化方式下，Model 2 在各个探测角范围内都具有最好的 RCS 缩减效果；Model 7 可以达到全涂覆方案 90% 的缩减效果。

表 4 偏航探测面水平极化方式下不同探测角度范围内模型 RCS 均值

Table 4 Average RCS of models with different detective angles under horizontal polarization in yaw plane

Model No.	RCS/dBsm			
	$\theta=10°$	$\theta=20°$	$\theta=30°$	$\theta=40°$
Model 0	3.833 7	4.811 3	4.143 8	3.238 9
Model 1	3.776 2	4.590 4	3.765 9	2.710 3
Model 2	0.572 0	−0.904 6	−2.445 4	−3.617 8
Model 3	2.059 3	2.345 8	1.679 7	0.694 3
Model 4	3.049 5	2.729 5	1.427 54	0.958 2
Model 5	3.214 6	1.652 4	0.257 9	−0.677 9
Model 6	3.807 8	4.521 1	3.541 2	2.429 6
Model 7	2.203 2	0.955 6	−0.562 9	−1.736 6
Model 8	2.182 3	0.867 1	−0.644 8	−1.762 5

表 5 偏航探测面垂直极化方式下不同探测角度范围内模型 RCS 均值

Table 5 Average RCS of models with different detective angles under vertical polarization in yaw plane

Model No.	RCS/dBsm			
	$\theta=10°$	$\theta=20°$	$\theta=30°$	$\theta=40°$
Model 0	4.386 9	3.798 0	2.604 4	1.527 9
Model 1	3.850 0	3.459 2	2.190 1	1.224 2
Model 2	1.396 5	0.551 3	−1.029 2	−2.204 6
Model 3	3.468 9	3.137 4	1.885 3	0.727 1
Model 4	3.162 2	2.948 5	1.684 4	0.583 0
Model 5	3.401 2	2.776 8	1.407 7	0.284 5
Model 6	3.129 9	2.869 6	1.589 1	0.546 6
Model 7	1.469 6	0.614 0	−0.920 3	−2.080 6
Model 8	2.780 0	2.137 0	0.702 6	−0.445 6

4 结 论

本文对无吸波材料涂覆的 SCFN 和 8 种不同涂覆方案的 SCFN 进行了电磁散射特性的数值仿真。

1）在两个探测平面下，无论是水平极化还是垂直极化方式下，随着探测角范围的增大，所有模型的 RCS 均值都减小，在较大的探测角下，SCFN 喷管具有较小的 RCS。

2）对喷管内部的混合器和中心锥表面涂覆吸波材料，对于 SCFN 的 RCS 缩减作用并不明显。

3）在两个探测面内，表面全涂覆吸波材料的模型 Model 2，明显具有较小的 RCS。

4）与表面全涂覆吸波材料的方案 Model 2 相比，只在球面收敛段和喷管平直段涂覆吸波材料的 Model 7 减少了 33% 吸波材料用量，但可达到前者 90% 的 RCS 缩减量。

致 谢

感谢西北工业大学材料学院罗发教授提供的耐高温吸波材料及相应物性参数用于仿真及试验研究，感谢西北工业大学无人机特种技术重点实验室为后续的实验测试提供技术支持。

参 考 文 献

[1] 张考，马东立. 军用飞机生存力与隐身飞机设计[M]. 北京：国防工业出版社，2002：54-55.
ZHANG K, MA D L. Military aircraft survivability and stealth design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 54-55 (in Chinese).

[2] 梁春华，靳宝林，李雨桐. 球面收敛调节片推力矢量喷管的发展[J]. 航空发动机，2002(3)：55-58.
LIANG C H, JIN B L, LI Y T. Development of spherical convergent flap nozzle[J]. Aeroengine, 2002(3): 55-58 (in Chinese).

[3] TAYLOR J G. International performance of a hybrid axisymmetric/nonaxisymmetric convergent divergent nozzle: NASA TM-420[R]. Washington, D.C.: NASA, 1991.

[4] BERRIER B L, TAYLOR J G. International performance of two nozzles utilizing gimbal concepts for thrust vectoring: NASA TP-2991[R]. Washington, D.C.: NASA, 1990.

[5] 张靖周，谢志荣，郑礼宝. 球面收敛二元扩张矢量喷管热射流特征的实验研究[J]. 燃气涡轮实验与研究，2004，17(3)：6-9.
ZHANG J Z, XIE Z R, ZHENG L B. Experimental investigation on hot-jet characteristics of 2-D convergent-divergent vector nozzle[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(3): 6-9 (in Chinese).

[6] 王宏亮. 球面收敛二元喷管气动和红外辐射特性数值计

算[D]. 南京：南京航空航天大学，2007：24-29.

WANG H L. Numerical Investigation on the aerodynamic and infrared radiation characteristics of spherical convergent flap nozzle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 24-29 (in Chinese).

[7] 崔金辉，尚守堂，杨青真，等. 射线追踪法在球面收敛调节片喷管 RCS 计算中的应用[J]. 航空动力学报，2014，29(11)：2613-2620.

CUI J H, SHANG S T, YANG Q Z, et al. Application of ray-tracing method in calculating RCS for spherical convergent flap nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(11): 2613-2620 (in Chinese).

[8] 崔金辉，杨青真，陈立海，等. 球面收敛调节片喷管 RCS 数值模拟研究[J]. 航空发动机，2012，38(2)：46-50.

CUI J H, YANG Q Z, CHEN L H, et al. Numerical simulation of RCS for spherical convergent flap nozzle[J]. Aeroengine, 2012, 38(2): 46-50 (in Chinese).

[9] 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 L H, YANG Q Z, CHEN L L, 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).

[10] 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 S N, SHANG S T, SHAO W R, et al. Electromagnetic scattering characteristics for spherical convergent flap nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(12): 2983-2991 (in Chinese).

[11] 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 X, SHI Y Q, YANG Q Z, 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).

[12] 王龙，钟易成，张堃元. 金属/介质涂覆的 S 形扩压器电磁散射特性[J]. 物理学报，2012，61(23)：193-201.

WANG L, ZHONG Y C, ZHANG K Y. Electromagnetic scattering study for metal/dielectric coated inlet diffuser[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(23): 193-201 (in Chinese).

[13] FEMANDO O, JOSE L, ROBERT J B. An iterative physical optics approached for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(4): 356-361.

[14] ROBERT J B, TOMAS L. Forward-backward iterative physical optics algorithm for computing the RCS of open ended cavities[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 793-799.

[15] BERNARD J M L. Diffraction by metallic wedge covered with a dielectric material[J]. Wave Motion, 1987, 9(6): 543-551.

[16] ROJAS R G, Al-HEKAIL Z. Generalized impedance/resistive boundary conditions for electromagnetic scattering problems[J]. Radio Science, 1989, 24(1): 1-12.

[17] SENIOR T B A, VOLAKIS J L. Derivation and application of a class of generalized boundary conditions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(12): 1566-1572.

[18] MARCEAUX O, STUPFEL B. High-order impedance boundary conditions for multilayer coated 3-D objects[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(3): 429-436.

[19] 罗威，高正平，张怀武. 介质涂覆电大复杂腔体散射的快速求解[J]. 电波科学学报，2008，23(1)：168-173.

LUO W, GAO Z P, ZHANG H W. Fast calculation of scattering of dielectric coated electrically large complex cavities[J]. Chinese Journal of Radio Scinence, 2008, 23(1): 168-173 (in Chinese).

[20] TADOKORO M, HONGO K. Measurement of RCS from a dielectric coated cylindrical cavity and calculation using IPO-EIBC[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2002, 85(9): 1692-1696.

（责任编辑：苏磊）

http://hkxb.buaa.edu.cn http://hkxb.buaa.edu.cn

Electromagnetic scattering characteristics of spherical convergent vector nozzle with coating medium at different parts

GUO Xiao*, YANG Qingzhen, SHI Yongqiang, YANG Huicheng, BAI Jin

School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710029, China

Abstract: Shape design and stealth materials are generally used to reduce the radar cross section (RCS) of the target. To investigate the reduction effect of radar absorbing material (RAM) on the RCS of the spherical convergent vector nozzle (SCFN), the electromagnetic scattering characteristics of SCFN without coating radar absorbing material and eight coating solutions are studied and the backward RCS changing rule of the nine models in X band are obtained by using the iterative physics optics (IPO) with impedance boundary condition. The results show that coating the RAM can effectively reduce the RCS of the SCFN. A reasonable coating program can reduce the usage of the RAM and ensure the RCS reduction effect at the same time. It is found that 80% reduction effect of the RCS can be achieved and 30% less RAMs are used by coating only the wall of the spherical area and nozzle exit.

Keywords: iterative physics optics; impedance boundary condition; radar absorbing material; spherical convergent vector nozzle; radar cross section

http://hkxb.buaa.edu.cn
http://hkxb.buaa.edu.cn

Received: 2016-05-11; **Revised**: 2016-10-14; **Accepted**: 2016-11-10; **Published online**: 2016-11-21 14:44
URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20161121.1444.016.html
* **Corresponding author**. E-mail: gx_19880013@163.com