介质涂覆位置对二元塞式喷管的电磁散射特性影响*

宋 宇,杨青真,高 翔,施永强,贺榆波

(西北工业大学 动力与能源学院,陕西西安 710129)

摘 要:为研究雷达吸波材料对二元塞式喷管的雷达散射截面积(RCS)的缩减效果,采用阻抗边界 条件的迭代物理光学(IPO)法,对基准模型和7种不同介质涂覆方案的二元塞式喷管进行了电磁散射特 性数值模拟,指出了二元塞式喷管电磁散射的主要贡献源。结果表明:在中心锥和混合器涂覆吸波材 料,对塞式喷管RCS缩减效果有限;中心锥与塞锥、混合器与塞锥的组合涂覆与塞锥单一涂覆的RCS均 值相差不大;全涂覆模型具有最低的RCS均值;塞锥和出口壁面是二元塞式喷管电磁散射的主要来源, 以偏航探测平面水平、垂直极化方式为例,对塞锥和出口壁面组合涂覆模型可分别达到全涂覆的75%和 87%的RCS缩减效果。

关键词: 塞式喷管; 雷达散射截面积; 吸波材料; 阻抗边界条件; 迭代物理光学法
中图分类号: V231 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210509-08
DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210509

Electromagnetic Scattering Characteristics of Binary Plug Nozzle with Coating Medium at Different Part

SONG Yu, YANG Qing-zhen, GAO Xiang, SHI Yong-qiang, HE Yu-bo

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: To research the reduction effect of radar absorbing materials on the radar cross section (RCS) of binary plug nozzles, the iterative physical optics (IPO) method with impedance boundary conditions was used to simulate the electromagnetic scattering characteristics of binary plug nozzles with uncoated and seven different media coating solutions. The main contribution source of electromagnetic scattering of binary plug nozzles is pointed out. The results show that: coating the center cone and the mixer with the absorbing material has limited effect on the RCS reduction of the plug nozzle. The mean value of the RCS of the combined coating of "center cone-plug" and "mixer-plug" is similar to the single coating of the plug cone. The full-coated model has the lowest average RCS. The plug and the outlet wall are the main sources of electromagnetic scattering for the binary plug nozzle. Taking the horizontal and vertical polarization of the yaw detection plane as an example, the "plug and the outlet" combined wall coating model can achieve 73% and 87% RCS reduction effects of the full coating.

Key words: Plug nozzle; Radar cross section; Absorbing material; Impedance boundary condition; Iterative physics optics method

^{*} 收稿日期: 2021-07-28;修订日期: 2021-11-04。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(31020190MS708)。

作者简介: 宋 宇, 硕士生, 研究领域为排气系统气动与隐身。

通讯作者:杨青真,博士,教授,研究领域为发动机进排气系统气动/红外/电磁设计与优化。

引用格式: 宋 宇,杨青真,高 翔,等.介质涂覆位置对二元塞式喷管的电磁散射特性影响[J]. 推进技术, 2022, 43(11):
 210509. (SONG Yu, YANG Qing-zhen, GAO Xiang, et al. Electromagnetic Scattering Characteristics of Binary Plug Nozzle with Coating Medium at Different Part[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11):210509.)

1 引 言

隐身技术自出现以来就得到了迅速的发展,而 实际应用也证明隐身技术大幅度提高军用飞行器的 生存力和杀伤力。飞行器隐身主要包括雷达隐身、 红外隐身、可见光隐身等,其中雷达隐身对飞行器的 威胁最大^[1]。雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)是雷达隐身效果最重要的评价指标。因此,最 大程度上降低飞行器 RCS 的方法和措施成为近年来 各国的研究热点。喷管作为一种典型电大腔体结 构,是飞行器的强散射源^[2]。目前降低喷管RCS的主 要措施有两种:结构改进与涂覆吸波材料。S弯喷管 较传统喷管就具有低电磁散射信号的特征,对喷管 而言是一种结构改进,李岳峰等^[3-4]对不同宽高比、出 口形状的S弯喷管进行了数值模拟,结果表明宽高 比、出口形状等参数对喷管的RCS有影响。郭霄等^[5] 研究了介质涂覆位置对球面收敛喷管 SCFN 的 RCS 的影响,高翔等^[6]研究了双S弯排气系统的介质涂覆 位置对RCS的影响,结果表明不同的介质涂覆位置对 喷管的RCS会产生不同的影响。

塞式喷管是一种新型喷管,在红外与电磁散射 特性方面具有优势。文献[7-8]分别对轴对称塞式 喷管的截断特性进行了试验研究和数值模拟,结果 表明,使用涡流发生器和引入底部排气有助于提高 寨式喷管的气动特性。陈俊等^[9]对二元寨式喷管的 红外辐射特征进行试验研究,得到塞锥冷却对二元 塞式喷管红外辐射特性的影响规律,结果表明二元 塞式喷管在不采取冷却措施时红外特征降低了 12.1%。Dumitrescu等^[10]对塞锥截断长度进行了流场 研究,结果显示在过膨胀工况下,随着塞锥截断量的 增加,观察到了推力的损失。Jeracki等^[11]对二元塞 式喷管气动特性进行了研究,指出在压比为29的超 声速巡航条件下,喷管的推力系数达到了97.4%,比 传统轴对称喷管低1%。Kumar等^[12]设计了一种压比 为20的塞式喷管,对喷管的一些重要设计参数进行 了优化,同时利用CFD软件对其流动特性进行了分 析,结果显示这种喷管具有通过改变外部射流边界 来调节环境的能力。Maiden等^[13]利用风洞研究了二 元塞式喷管内流特性,并对飞行状态下净推力特性 进行了试验研究。结果表明,对于飞行速度超过 Ma0.8,二元塞式喷管在双发结构中净推力性能要高 于轴对称双发结构。Capone 等^[14]与Petit 等^[15]试验了 安装双发轴对称喷管与二元塞式喷管的F-18缩比模 型的推力特性以及后机体阻力特性,结果表明,安装 有二元喷管的后机体阻力明显较小,尤其在无加力 状态下二元塞式矢量喷管具有明显的优势。由于塞锥 的遮挡特性,使得该型喷管具有良好的隐身特性,陈玲 玲等^[16]对轴对称塞式喷管电磁散射特性进行了数值模 拟,结果表明塞式喷管能够有效降低喷管*RCS*。

为了进一步探究塞式喷管的电磁散射特性,本 文以迭代物理光学(Iterative Physical Optics, IPO)法 针对二元塞式喷管进行了数值模拟,引入阻抗边界 条件实现了对涂覆吸波材料的RCS计算,进行了不同 介质涂覆位置的二元塞式喷管的RCS研究。

2 计算方法及物理模型

2.1 计算方法

迭代物理光学(IPO)法^[17]是一种考虑电磁波在 腔体内的多次反射后、通过物理光学近似,以迭代的 方法来求解电场积分方程的一种分析腔体电磁散射 特性的方法。但是传统的 IPO 方法由于考虑了电磁 波在腔体内的多次反射,当计算较深的腔体如进气 道、喷管等时,其收敛速度就会降低,导致计算效率 下降。因此本文在计算过程中引入前后向迭代物理 光学方法和松弛因子。

在计算腔体内壁的感应电流时,电流会随着每次前、后向迭代而更新。在前后向迭代公式中加入 欠松弛因子ω(0 < ω < 1),此时腔体内壁感应电流公 式为

前向迭代:

$$\boldsymbol{J}_{n+1/2}(i) = \boldsymbol{J}_{0}(i)\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{n} \times \sum_{j=1}^{i-1} (\boldsymbol{J}_{n+1/2}(i) \times \nabla G(\boldsymbol{r}_{i} - \boldsymbol{r}_{j}))\Delta S(j) + (1)$$
$$2\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{n} \times \sum_{j=i+1}^{N} (\boldsymbol{J}_{n}(i) \times \nabla G(\boldsymbol{r}_{i} - \boldsymbol{r}_{j}))\Delta S(j)$$

式中i = 1,2,…,N – 1,N(N表示总面元数);n表示迭代次数; ∇ 为哈密顿算子;n为面元法向矢量; r_j 为腔体口径面上任意点的位置矢量; r_i 为腔体内壁面上任意点的位置矢量;G是自由空间格林函数。

后向迭代:

$$J_{n+1}(i) = J_0(i)\omega + 2\omega n \times \sum_{j=1}^{i-1} (J_{n+1/2}(i) \times \nabla G(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j))\Delta S(j) +$$
(2)
$$2\omega n \times \sum_{j=i+1}^{N} (J_{n+1}(i) \times \nabla G(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j))\Delta S(j)$$

式中 $i = N, N - 1, \dots, 2, 1_{\circ}$

根据经验,内部结构不太复杂的腔体 $\omega = 0.8 \sim 0.9$, 较复杂的腔体 $\omega = 0.6 \sim 0.7$ 。因此在本文研究的内容

中松弛因子 $\omega = 0.65$,其中迭代残差设置为0.001,最大迭代次数为4次。

喷管等腔体是飞行器的强散射源之一,虽然在 腔体内部涂覆吸波材料能有效降低其RCS,但是对于 介质涂覆的电大腔体而言,由于计算机的硬件限制, 低频数值方法不适用于对此类问题进行求解。为了 计算电大尺寸腔体内涂有吸波材料的电磁散射特 性,根据文献[18],通过在涂覆区域采用等效阻抗边 界条件处理,其他区域采用IPO方法处理能够有效避 免涂覆层内复杂的电磁波散射计算,进而提升计算 效率。等效阻抗边界条件结合迭代物理光学法可以 在保持合理精度下有效地求解涂覆介质的腔体。

$$Z\eta_{\rm r} = Z_{\rm s} = \left| E_{\rm r} \right| / \left| H_{\rm r} \right| \tag{3}$$

式中 $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 为自由空间的阻抗, η ,为表面的相对阻抗, Z_s 为绝对阻抗。对于理想导体表面, Z_s =0。

一般阻抗边界条件的矢量形式为

 $\mathbf{n} \times \mathbf{E} = Z_{s} \mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{H})$ (4) 式中 E 为电场, H 为磁场。

通常认为Z_s和入射波角度有关,但对于折射率 较大的吸波材料,近似认为Z_s和角度无关,此时

$$Z_{s} = j Z_{\sqrt{\mu_{r}}/\varepsilon_{r}} \tan\left(kt_{\sqrt{\mu_{r}}\varepsilon_{r}}\right)$$
(5)

式中µ,ε,是相对磁导率与相对介电常数,t是涂覆材 料的厚度,k是自由空间的波数。

采用阻抗边界条件的 IPO 方法可以在保证计算 精度的同时,对涂有吸波材料的腔体内部进行有效 的电磁散射特性计算。为验证本文带有阻抗边界条 件 IPO 程序计算的准确性,分别对文献[19]中如图 1 所示内部带有圆台的圆柱腔体和如图 2 所示的内部 全涂覆时圆柱腔体模型^[20]的 *RCS* 进行了计算。图中 sc 为腔体壁面,sa 为透明面(电磁波入射面),圆柱半 径为 60mm,高为 120mm。涂覆材料相对磁导率μ_r= 1.0,相对介电常数 ε_r=6.11-0.78j,厚度为 6mm。图 3, 图 4 为本文开发的 *RCS* 计算软件模拟结果。如图所



Fig. 1 Cylindrical cavity model with round table (mm)

示,数值模拟曲线与文献试验数据曲线吻合较好,验证了本程序对含有介质涂覆的腔体内部 RCS 数值计算的可靠性。







2.2 物理模型

本文以二元喷管为基础,在收敛段加装塞锥。 根据文献[21]中二元塞式喷管几何参数对气动与红 外辐射特性的影响,确定本文的塞锥设计参数为:塞 锥长 700mm,前部角 30°,后部角 20°,塞锥前后缘通 过半径为 30mm的圆弧过渡连接、塞锥高径比 0.5,塞 锥前后缘分别为直径 144mm和 5mm的圆弧。

如图 5 所示,本文喷管全长为 2300mm,内部包含 中心锥、波瓣混合器等部件,收敛段通过圆转方过渡 段与喷管筒体相连。如表 1 所示,本文设计了 7 种涂 覆方案,其中 Model 1 为带塞锥未涂覆的基准模型, Model 2~4 为单一涂覆模型,Model 5~7 为组合涂覆模 型,Model 8 为全涂覆模型,其中"●"表示涂覆区域。



Fig. 4 Fully coated cylindrical cavity model RCS



Fig. 5 Schematic diagram of binary plug nozzle model

 Table 1
 Schematic diagram of coating scheme

Model	Cone	Mixer	Plug	Convergence section	Nozzle barrel	Coating proportion
1	0	0	0	0	0	0
2	•	0	0	0	0	0.04
3	0	•	0	0	0	0.21
4	0	0	٠	0	0	0.12
5	0	0	•	٠	0	0.27
6	•	0	•	0	0	0.16
7	0	•	٠	0	0	0.32
8	•	•	٠	٠	•	1

图 6 为探测平面示意图。由于二元喷管的对称性,本文设置的 RCS 探测条件如表 2 所示。线网格尺

寸为12,满足每平方波长内9~16个三角形面元的要求。壁面网格总数142776。根据发动机排气系统涂 覆材料参数的一般情况,本例选取涂覆材料的相对 磁导率μ_r=1.095-0.3568j,相对介电常数 ε_r=22.7951-2.764j,厚度为1.5mm。



Fig. 6 Schematic diagram of detection angle

3 结果与分析

3.1 偏航探测面

图 7(a)为水平极化方式、偏航方向下不同涂覆 位置下的二元塞式喷管的RCS曲线图,如图所示,当 在0°探测角时, Model 8的 RCS 值最小; Model 6,7的 RCS次之。通过对比0~5°的曲线,含有对塞锥涂覆的 模型都表现出较小的RCS且曲线呈下降趋势,说明涂 覆在此探测范围内能够对电磁波进行很好的吸收; 但与图7(b)所示的垂直极化方式下Model 1~3的RCS 交响分布曲线基本重合的情况相比,在水平极化方 式下 Model 1~3的 RCS 角向分布并不同,说明在小角 度内对深腔内部部件涂覆会存在相反效果,可能是 部件表面"台阶"的问题,因为未涂覆的塞锥在打散 入射波以后,此时的电磁波还处于较强状态,由于波 瓣混合器和中心锥的复杂形状导致涂覆介质不连 续,产生了边缘强散射,同时RCS仿真结果与腔体内 部零件的具体形状也有关系,电磁波在腔体内部的 反射很复杂,因此导致小角度下部分涂覆模型的RCS 结果比未涂覆模型的大。在0~10°探测范围内,所有 模型的RCS值呈现整体下降的趋势,而未对塞锥进行 涂覆的模型都在4°探测角附近曲线出现上探情况。 在10°~20°探测范围内,各模型曲线大体呈现先升后

Table 2 Detection condition

Detection plane	Detection angle/($^{\circ}$)	Detection point interval/(°)	Detection frequency/incident wavelength
Yaw plane	0~30	1	10011-/0.02
Pitch plane	0~30	1	10GHz/0.03m

降再上升的交错趋势;Model 8的曲线在该探测范围 内变化最为平稳,组合涂覆模型次之,这是由于涂覆 面积增大,电磁波在喷管壁面与进口壁面处形成的 角反射器效应被有效抑制。在20°~30°探测范围内, 所有的模型曲线呈先下降后上升再下降趋势;同时 在此探测范围内,Model 5和 Model 8的 RCS 低于其他 模型,说明出口壁面是此时二元塞式喷管 RCS 主要贡 献源,其次贡献源是塞锥。在30°探测角时,Model 8 的 RCS 值最小,组合涂覆模型次之。

图 7(b)为垂直极化下偏航方向下不同模型的 RCS分布曲线图。在 0~30°探测范围内, Model 1~8的 RCS曲线变化趋势较为平稳。在 7°~25°探测范围内, Model 4~8的 RCS值明显低于其他模型, Model 4~8的 共同特点是都对塞锥区域进行了涂覆, 而此时 Model 4~8的 RCS曲线相差并不明显, 这说明此时二元塞式 喷管 RCS 贡献来源最大的是塞锥, 因此在该探测范围 内对塞锥进行涂覆能有效抑制二元塞式喷管的电磁 散射特性。在 25°~30°探测范围内, Model 4~8的 RCS 值较低, Model 1~3的 RCS值较高, 这表明涂覆区域含 有塞锥时能够显著降低高探测角时喷管模型的 RCS; 同时由 Model 1与 Model 4的 RCS曲线可知, 此时高探 测角下塞式喷管的 RCS 值较大, 但只要进行合理涂覆 则可明显降低电磁散射信号。

表3为偏航探测平面水平极化和垂直极化方式 下不同模型的0~30°探测范围内RCS均值表。可以 看出,偏航探测平面内水平极化和垂直极化方式下,



Fig. 7 *RCS* distribution curves of different models in horizontal and vertical polarization in yaw direction

Model 5组合涂覆模型可分别达到 Model 8 全涂覆模型 RCS 缩减效果的 75% 和 87%。但是涂覆吸波材料的面积仅为 27%,由此进一步证明了塞锥和出口壁面是二元塞式喷管电磁散射的主要来源、对塞锥和出口壁面涂覆是获取综合效益最大的方法。

	detection plane	(dBsm)
Model	Horizontal	Vertical
1	7.97	7.38
2	8.84	6.91
3	8.82	6.57
4	-0.05	-3.70
5	-4.37	-8.14
6	0.24	-3.80
7	0.23	-3.80
8	-8.57	-10.43

图 8 为偏航探测平面水平极化方式下 θ=10°时感 应电流密度分布云图。图 8 中 JMOD 为感应电流密 度。由图可知,由于塞锥的遮挡作用,Model 1~8的感 应电流图亮度较低。图 9 为垂直极化方式下偏航方 向 θ=10°时感应电流密度分布云图。Model 4~8的感 应电流分布主要集中在内外涵部分,同时由于对塞 锥涂覆了吸波材料,塞锥表面的感应电流密度分布 云图亮度较低。与其他模型比较可以看出,塞锥是 二元塞式喷管 RCS 的主要贡献源。

3.2 俯仰探测面

图 10(a)为俯仰探测平面水平极化方式下不同 涂覆位置下的二元塞式喷管的 RCS 曲线图。在 0°探 测角附近,由于对塞锥区域进行了涂覆,因此 Model 4~8的 RCS 值低于其他模型。在 10°~25°探测范围 内,这些曲线相互交错,说明此时对其中某些区域进 行涂覆带来的 RCS 收益并不明显。但在 25°~30°探测 范围内,由 Model 5, Model 8的 RCS 曲线低于 Model 4, Model 6, Model 7,说明此时在水平极化波照射下塞锥 和出口壁面形成了角反射器效应,而对这两个区域 涂覆能够对喷管的电磁散射信号进行有效抑制。

图 10(b)为俯仰探测平面垂直极化下不同模型的RCS分布曲线图。在5°~15°探测范围内,Model 1~3的RCS值较高,这表明此极化条件下塞锥是喷管的主要散射源。由 Model 3,Model 4~8曲线可知,对塞锥进行涂覆可达到降低喷管RCS的效果。在25°~30°探测范围内,Model 1~3的RCS曲线呈上升趋势,而其余模型RCS曲线呈下降趋势,这表明对塞锥进行涂覆



Fig. 8 Induced current diagram at $\theta = 10^{\circ}$ in yaw direction and horizontal polarization



and vertical polarization

可有效降低高探测角范围的电磁散射。在整个探测 范围内, Model 2, Model 3的 RCS曲线相差不大, 说明 在垂直极化波条件下, 对中心锥或混合器进行单区 域涂覆对整个喷管 RCS 降低并不明显;同时,虽然 Model 8 全涂覆模型在大部分探测角下 RCS 值最低, 但在部分探测区域内同其他组合涂覆模型的 RCS 值 相差不大,因此综合涂覆吸波材料面积来看,对塞锥 进行涂覆是获取二元塞式喷管低 RCS 特性效益最大 的方法。



Fig. 10 *RCS* distribution curves of different models in horizontal and vertical polarization in pitch direction

表4为俯仰探测平面水平极化和垂直极化方式 下不同模型的 0~30°探测范围内 RCS 均值表。水平 极化和垂直极化方式下,全涂覆模型 Model 8 相比基 准模型 Model 1, RCS 均值降低约 46% 和 84%, 塞锥及 出口壁面组合涂覆模型 Model 5 降低约 38% 和 74%, 而塞锥涂覆模型 Model 4 的缩减效果达到了 26% 和 45%。由此可见,虽然全涂覆模型的RCS缩减效果最 大但综合考虑涂覆吸波材料面积,塞锥和出口壁面 进行涂覆可达到缩减二元塞式喷管 RCS 收益最大的 效果。针对不同涂覆区域对二元塞式喷管的 RCS 有 不同的缩减效果,由 Model 1与 Model 4~8 可以看出, 对二元塞式喷管的RCS贡献来源主要是塞锥,其次是 出口壁面,这是因为不同角度下入射电磁波会在塞 锥与出口壁面处形成角反射器效应。由 Model 5, Model 6模型 RCS 均值可知,在塞锥涂覆基础上涂覆 喷管内部部件,收益不大。

图 11 为俯仰探测平面水平极化方式下 θ=30°时 感应电流密度分布云图。Model 4~8的感应电流密度 分布云图亮度较低,这是由于对塞锥进行了吸波材

detection plane (dBsm)			
Model	Horizontal	Vertical	
1	15.17	16.48	
2	18.23	16.40	
3	17.44	16.32	
4	11.24	8.95	
5	9.37	4.30	
6	12.71	7.54	
7	10.95	7.53	
8	8.19	2.5	

 Table 4
 Mean value of RCS of different model in the pitch

式下 θ=30°时感应电流密度分布云图。可以看出, Model 1~3在塞锥表面和出口壁面产生了较大的感应 电流,这是因为塞锥和出口壁面构成了二面角强散 射区域,同时中心锥、内外涵处也产生了一定的电 流。由于对出口壁面进行了涂覆,Model 5,Model 8 的出口壁面处感应电流小于其他模型。



4 结 论

通过本文研究,得出如下结论:

(1)由于塞锥的遮挡作用,在水平极化和垂直极 化方式下的较小探测范围内,二元塞式喷管具有较 低的 RCS 值,但在部分探测范围内塞锥受到入射波直

8	8.19	2.5
	Contraction of the second seco	
Model 1	Model 2	
	ALL	<i>JMOD</i> /(mA/m ²) 8.0 6.5
Model 3	Model 4	5.0







3.5

2.0

0.5

料的涂覆,由此可见塞锥是塞式喷管的电磁散射信 号的主要贡献源。图12为俯仰探测平面垂直极化方 接照射影响、塞锥与出口壁面构成的角反射器的影响,会使喷管 RCS 增大。

(2)对中心锥和混合器涂覆吸波材料,对二元塞 式喷管 RCS 缩减作用并不明显。在中心锥加塞锥、混 合器加塞锥组合涂覆与塞锥单一涂覆方案相比,RCS 均值相差不大;全涂覆模型在两种极化方式均具有 最低的 RCS。

(3)以偏航探测平面水平、垂直极化下为例,对 塞锥和出口壁面组合涂覆模型可分别达到全涂覆的 75%和87%的 RCS 缩减效果,但是涂覆面积仅为 27%,由此进一步证明了塞锥和出口壁面是二元塞式 喷管电磁散射的主要来源,对塞锥和出口壁面涂覆 是获取综合效益最大的方法。

致 谢:感谢中央高校基本科研业务费专项资金的 资助。

参考文献

- [1] 刘文一,刘 鹏,刘荣丰.飞行器隐身技术关键技术 及其发展趋势[J].科技信息,2011(17):56-56.
- [2] 张鹏飞. 电大尺寸开口腔体 RCS 计算[D]. 西安: 西 安电子科技大学, 2006.
- [3] 李岳锋,杨青真,李 翔,等.不同出口形状S形喷管的RSC特性[J]. 航空动力学报,2013,28(12):2671-2677.
- [4] 李岳锋,杨青真,环 夏,等.出口宽高比对S形二元 收敛喷管雷达散射截面的影响[J].航空动力学报, 2014,29(3):645-651.
- [5] 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):245-253.
- [6]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).
- [7] Khan A, Bhesania A S, Kumar R. An Experimental Study on the Control of Plug Nozzle Jets [J]. Shock Waves, 2021, 31(1): 31-47.
- [8] Nair P P, Suryan A, Kim H D. Computational Study on Flow Through Truncated Conical Plug Nozzle with Base Bleed[J]. Propulsion and Power Research, 2019, 8(2):

108-120.

- [9] 陈 俊,吉洪湖,刘常春.冷却结构塞式喷管红外特 性抑制试验技术研究[J].燃气涡轮试验与研究,2019 (3):18-23.
- [10] Dumitrescu O, Gherman B, Dragan V. Study of Full and Truncated Aerospike Nozzles on Performances at Different Working Conditions [C]. Constanta: IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018.
- [11] Jeracki R J, Johns A L. Preliminary Investigation of Performance of a Wedge Nozzle Applicable to a Supersonic Cruise Aircraft[R]. NASA-TM-X-2169, 1971.
- [12] Kumar K N, Gopalsamy M, Antony D, et al. Design and Optimization of Aerospike Nozzle Using CFD [J]. *Iop* Conference, 2017, 247: 012008.
- [13] Maiden D L, Petit J E. Investigation of Two-Dimensional Wedge Exhaust Nozzles for Advanced Aircraft [J]. Journal of Aircraft, 1976, 13(10): 809-816.
- [14] Capone F J, Hunt B L, Poth G E. Subsonic/Supersonic Nonvectored Aeropropulsive Characteristics of Nonaxisymmetric Nozzles Installed on an F-18 Model [R]. AIAA 81-1445.
- [15] Petit J E, Capone F J. Performance Characteristics of a Wedge Nozzle Installed on an F-18 Propulsion Wind Tunnel Model[R]. AIAA 79-1164.
- [16] 陈玲玲,杨青真,陈立海,等. 轴对称塞式喷管电磁 散射特性数值模拟[J]. 推进技术, 2018, 39(1): 86-91. (CHEN Ling-ling, YANG Qing-zhen, CHEN Lihai, et al. Numerical Simulation of Radar Scatting Characteristics of Axisymmetric Plug Nozzle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(1): 86-91.)
- [17] 高 翔.飞行器/排气系统红外辐射及电磁散射特性数值研究[D].西安:西北工业大学,2016.
- [18] 李岳峰.飞行器/进排气系统气动及电磁辐射特性一体化数值研究[D].西安:西北工业大学,2013.
- [19] 许小艳.开口腔体的 RCS 计算[D].西安:西安电子 科技大学, 2007.
- [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, E85C(9): 1692-1696.
- [21] 陈 俊. 涡扇发动机塞式喷管气动与红外辐射特性研 究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

(编辑:朱立影)