

文章编号: 1000-8055(2006)04-0631-6

无加力涡扇发动机二元喷管的 红外辐射特性实验

罗明东, 吉洪湖, 黄 伟, 蔡 旭, 张 勃, 高 潮
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 对轴对称喷管和一组长宽比分别为 1, 4, 8, 12 和 16 的二元喷管进行了红外辐射特性测试实验研究。喷管中的气流由主流燃气和次流空气组成, 用以模拟涡扇发动机的喷管。得出了二元喷管的红外辐射强度的空间分布, 并且将二元喷管和轴对称喷管的红外辐射强度进行了比较。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 红外辐射; 二元喷管; 涡扇发动机

中图分类号: O343.3; V231.1

文献标识码: A

An experimental investigation on infrared radiation characteristics of 2-D nozzles of turbofan engine afterburner

LUO Ming-dong, JI Hong-hu, HUANG Wei, CAI Xu, ZHANG Bo, GAO Cao
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The infrared radiation characteristics of axisymmetric and 2-D nozzles with aspect ratios of 1, 4, 8, 12 and 16, have been experimentally studied. The nozzle flow is composed of the main gas stream and the secondary air stream in order to simulate the nozzle of turbofan engine. The spatial distributions of the infrared radiation intensity of 2-D nozzles have been obtained, and compared with that of the axially symmetric nozzles.

Key words: aerospace propulsion system; aerospace propulsion system;
infrared radiation; 2-D nozzle; turbofan engine

在目前世界各国采用的军用对空探测器中, 红外探测器占了 30% 左右。有资料表明, 在现代战争中红外制导导弹击落的飞机占被击落飞机总数的 75% 左右^[1], 因此对军用飞机进行红外隐身设计是提高其战场生存力和作战效能的重要措施之一。

军用飞机的红外辐射特征主要由蒙皮的红外辐射和喷管的红外辐射组成。在不太高的飞行马赫数下排气系统的红外辐射是军用飞机的主要红外辐射, 其辐射能量主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段^[2], 相当大一部分现役军用红外探测器内置的 InSb 等探测器对该波段入射能量具有高灵敏度

的响应, 因此如何降低喷管在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射是军用飞机红外隐身的重点研究方向。

目前, 二元喷管技术是飞机主要采用的红外隐身技术之一, 并且通常和涡扇发动机匹配应用于现役隐身飞机中。国内外的学者对二元喷管热喷流的流场特性以及辐射特性进行了大量的实验与计算研究^[3-7]。但是对于二元喷管红外特性的研究则显得比较薄弱, 取得的研究成果仅仅局限于涡喷发动机和尾向可见明火的二元喷管的红外辐射特性^[4,7,8]。关于与无加力涡扇发动机匹配的二元喷管的红外辐射特性的研究还少有报道。

收稿日期: 2006-02-20; 修订日期: 2006-05-30

作者简介: 罗明东(1977-), 男, 四川双流人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事飞行器排气系统红外隐身技术的研究。

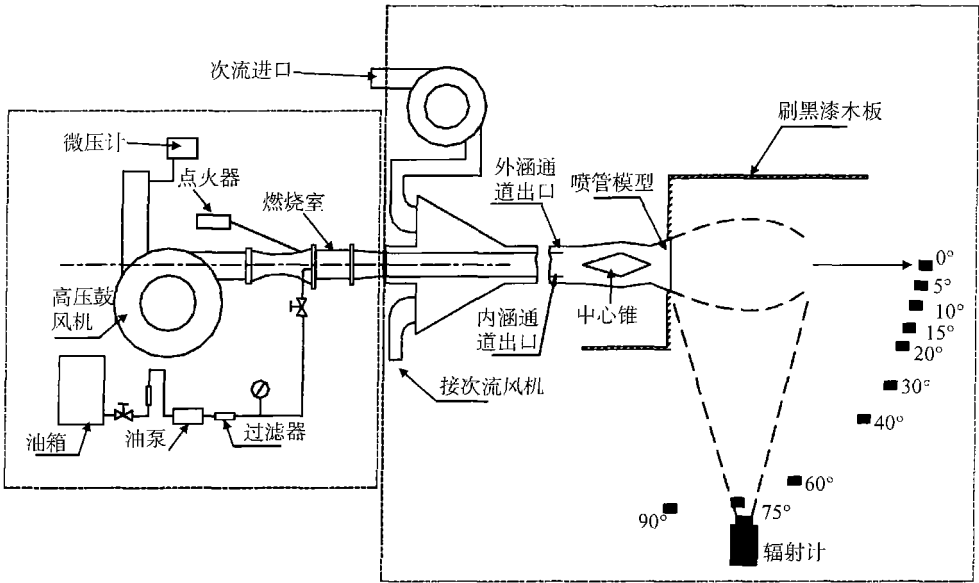


图 1 实验系统的示意图
Fig. 1 Sketch map of experiment system

本文以涡扇发动机的轴对称尾喷管为原型,根据喷管出口面积相等的原则设计了一系列圆转矩形的二元喷管的缩比模型,各个二元喷管出口截面的宽高比分别为 1,4,8,12 和 16,在相近的天气状况(晴天、傍晚、无风),相同的测试距离(15 m),测量了二元喷管在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段内的辐射特性,得出了各个喷管的红外辐射强度的空间分布,并且将二元喷管和轴对称喷管的红外辐射强度进行了比较。

1 实验系统

轴对称喷管和二元喷管红外辐射特性的实验系统由 3 部分组成:热喷流实验台、喷管和测试仪器,本文的实验系统如图 1 所示。

1.1 热喷流实验台

热喷流实验台用于模拟涡扇发动机排气系统,它由 2 个同心的圆管组成,内管模拟发动机的内涵通道,内管与外管形成的环形通道模拟发动机的外涵通道。内涵通道中的燃气由主流风机、燃烧室、供油系统等组成的子系统提供,该通道出口气流的压力和温度分别为 103 246 Pa 和 520 °C;外涵通道中的空气由次流风机提供,该通道出口气流压力为 103 040 Pa,气流温度为环境温度。在内涵道出口下游接了一个腰鼓形段,其中安装有一个不锈钢制作、黑度为 0.65 的中心锥,如图 2 所示,在腰鼓形段后端安装有实验选用的内部刷有防锈漆、黑度为 0.3 的喷管,测量过程

时中心锥表面温度在 380 °C 左右,喷管内壁面温度在 80 °C 左右。中心锥的安装使得在尾向看不见燃烧室内部的明火以模拟非加力状态下涡扇发动机排气系统的红外特征。

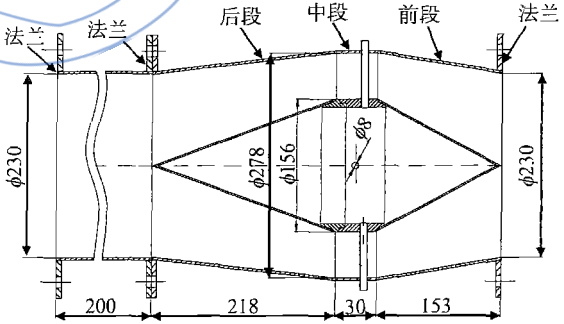


图 2 中心锥的安装(单位:mm)
Fig. 2 Setting of the center body (Unit:mm)

1.2 二元喷管模型

本文以国外某高空长航时无人机采用的高涵道比涡扇发动机尾喷管原型为基础,将其进行缩比得到轴对称喷管模型 AR0,其中 AR0 喷管的进口直径为 230 mm、出口直径为 158 mm、长度为 145 mm;依照进、出口面积和喷管长度相等的原则,将圆形喷口分别改为宽高比分别为 1,4,8,12 和 16 的矩形喷口,根据它们的宽高比分别编号为 AR1,AR4,AR8,AR12 和 AR16,图 3 为 AR0,AR1 和 AR4 喷管的实物照片(从右至左)。

1.3 测试仪器

本文的实验仪器主要有 2 个:(1)傅立叶变换

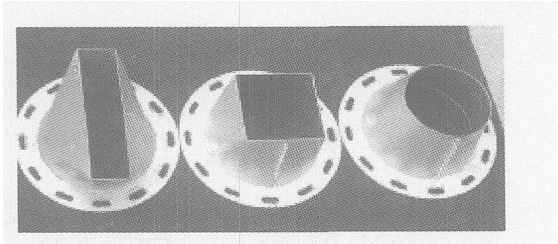


图 3 部分喷管的照片

Fig.3 The photo of some nozzles

光谱红外辐射计。该仪器是一个基于干涉调制分光原理的光谱辐射测量仪器,具有很高的信噪比和分辨率。采用 MCT 和铟化铟(InSb)夹心探测器,使用液氮制冷,测量红外波段范围为 1.25~19.5 μm;(2) HFY-300A 型黑体炉。该黑体炉的工作温度范围的下限为环境温度、上限则为 400 °C,温度分辨率为 0.1 °C,有效辐射面直径为 128 mm,黑度大于 0.95。

2 实验方法

2.1 探测方向的设置

为了研究喷管后半球的红外辐射强度分布,对每一个喷管都测量了后半球不同方向上的红外辐射特性,探测方向的分布如图 4 所示。本文把 0°方向规定为正对喷管轴线的方向,90°方向是与喷管轴线垂直的方向。因为二元喷管的宽边和窄边几何形状上的差异,因此实验中对两个正交的平面内的辐射进行了测量,一个是从宽边一侧探测的对称面,另一个是从窄边一侧探测的对称面。由于宽高比为 1 的 AR1 喷管为正方形出口,在实验中仅测量了一个对称面上的辐射分布。轴对称喷管也仅测了一个对称面上的辐射强度分布。

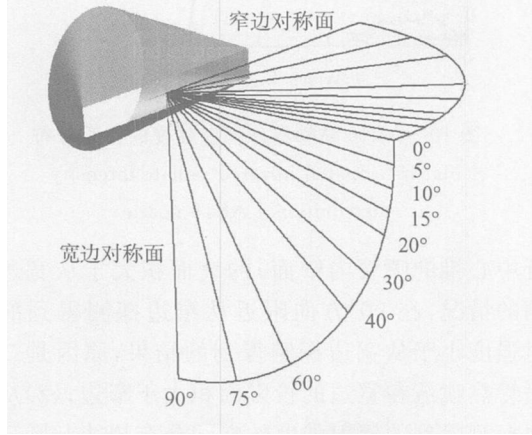


图 4 实验中测量方向的设置

Fig.4 The setting of detect orientation in the experiment

2.2 背景辐射的处理

背景问题始终是困扰地面红外辐射测试研究的一个难题。本文试验中,排气系统缩比模型本身的红外辐射信号在某些角度比较小,背景的干扰如果不能妥善处理,甚至会发生最终测试结果为杂波的现象。本文试验中对背景的处理方法如图 1 所示,把 3 块刷黑的木板放置在喷口周围与仪器探测方向相对的位置上,这样的设置可以屏蔽掉尾喷管外壁面和嘈杂环境的辐射信号,这样设置下得到如图 5 的比较光滑的背景曲线,而且还可以在对排气系统的红外强度测量过程中减少木板本身反射对测试信号的增益。

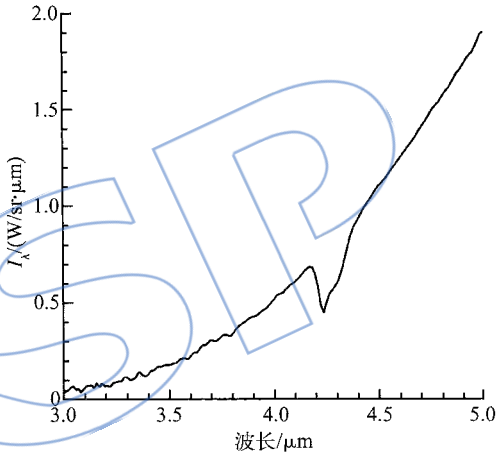


图 5 实验中测得的背景光谱辐射强度

Fig.5 Spectral radiate intensity of the background measured in this experiment

2.3 数据处理

傅立叶变换光谱红外辐射计直接输出的是光阑孔的入射能量的平均光谱辐射亮度 $\overline{L_\lambda}$,单位 W/(sr·cm²·μm),实验需要测得的是尾喷管在探测方向上的辐射强度 I_λ ,单位 W/sr,本文试验中数据处理方法如下:

$$I_\lambda = \beta (\overline{L_{\lambda_0}} - \overline{L_{\lambda_{bj}}}) \Omega R^2 \quad I = \int_0^5 I_\lambda d\lambda$$

式中: I_λ 表示喷管的光谱辐射强度,单位为 W/(sr·μm); $\overline{L_{\lambda_0}}$ 和 $\overline{L_{\lambda_{bj}}}$ 分别代表对喷管和背景进行测量时得到的平均光谱辐射亮度; β 为仪器响应修正系数,用以修正仪器响应衰减带来的测量误差; Ω 为仪器入射立体角,单位为 sr;表示目标与仪器之间距离,单位为 cm。

3 实验结果及分析

3.1 各个喷管的红外辐射强度的空间分布

图 6 为 AR0 喷管和 AR1 喷管在后半球的 3

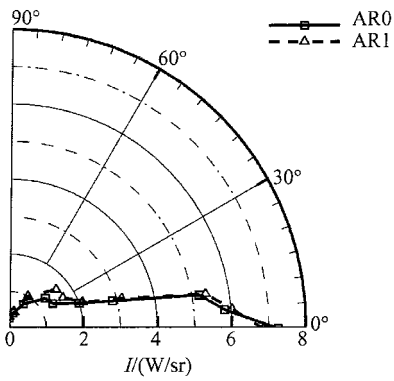


图 6 AR0 和 AR1 喷管红外辐射强度的空间分布
Fig. 6 Spatial infrared radiate intensity distribution of AR0 and AR1 nozzle

~5 μm 波段的空间辐射强度分布图,可以看出圆形的 AR0 喷管和正方形的 AR1 喷管红外辐射强度在各个探测方向的数值都比较接近,因为中心锥表面在正对喷管轴线的 0° 方向的投影面积最大,导致喷管在该方向的辐射强度最高;在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内辐射强度随着角度的增加迅速降低,原因是中心锥的投影面积逐渐减小;在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内辐射强度与 0° 方向的辐射强度相差一个量级左右,原因在这些方向上中心锥的投影面积为零,喷管的红外辐射主要由喷管内壁面和燃气的热辐射组成。

图 7~图 10 分别为 AR4, AR8, AR12 和 AR16 喷管在后半球 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的空间辐射强度分布图。从图中可以看出长宽比大于 1 的二元喷管的空间辐射强度具有一下特点:(1) 后半球的空间辐射强度分布具有明显的非对称性,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向附近从窄边探测得到的辐射强度大于从宽边探测得到的结果,原因是从窄边比探测到的表面有效辐射较高的固体壁面(中心锥表面、较接

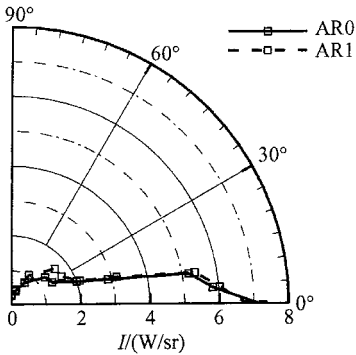


图 7 AR4 喷管红外辐射强度的空间分布
Fig. 7 Spatial infrared radiate intensity distribution of AR4 nozzle

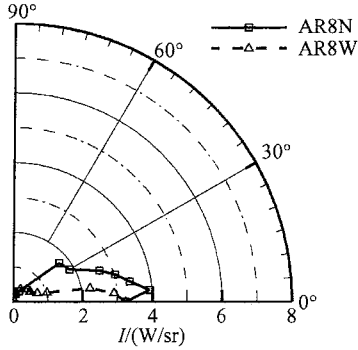


图 8 AR8 喷管红外辐射强度的空间分布
Fig. 8 Spatial infrared radiate intensity distribution of AR8 nozzle

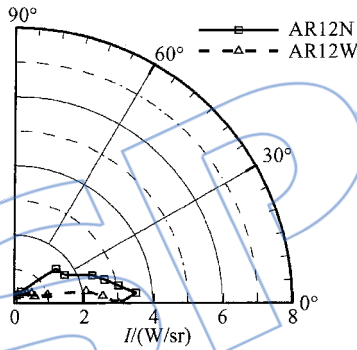


图 9 AR12 喷管红外辐射强度的空间分布
Fig. 9 Spatial infrared radiate intensity distribution of AR12 nozzle

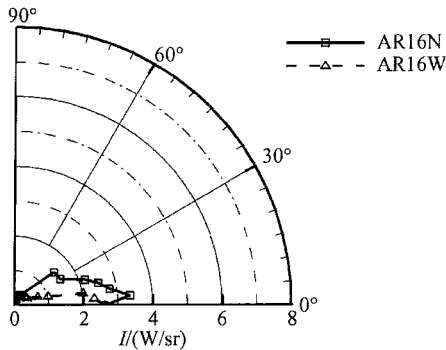


图 10 AR16 喷管红外辐射强度的空间分布
Fig. 10 Spatial infrared radiate intensity distribution of AR16 nozzle

近中心锥的喷管内壁面)的表面积大于从宽边探测的情况,在 90° 方向附近从窄边探测得到的辐射强度小于从宽边探测得到的结果,原因是二元喷管热喷流在宽边的投影面积大于窄边;(2) 从宽边探测得到的辐射强度的空间分布规律与圆喷管和长宽比为 1 的喷管相似,即最大值出现在正对喷管轴线的 0° 方向,在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 方向范围内随着观测角度的增加迅速降低,在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 方向范围辐

射强度与 0° 方向的辐射强度相差一个量级左右,产生这些现象的原因和 AR0, AR1 喷管相同;(3)从窄边探测得到的辐射强度在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 方向范围内随观测角度的增加而增加,原因是在该范围内中心锥表面在观测方向的投影面积的随观测角度的增加而增加,在 $5^\circ \sim 90^\circ$ 方向范围内随着观测角度的增加而降低,总体而言其分布规律与单涵道尾喷管相似,表现为一种“梨”形分布^[9]。

3.2 二元喷管对红外辐射强度的影响

3.2.1 对宽边探测的红外辐射强度的影响

图 11 为从各个喷管宽边探测得到的辐射强度的空间分布,图 12 为从二元喷管宽边探测得到的红外辐射强度的相对值 I_{2D}/I_0 ,图中 I_0 , I_{2D} 分别为轴对称喷管和二元喷管在给定方向的辐射强度。从图中可以看出对于从宽边探测:(1)在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 方向 AR1 喷管的辐射强度小于 AR0 喷管,而在 $5^\circ \sim 90^\circ$ 方向 AR1 喷管导致 AR1 喷管的辐射强度大于 AR0 喷管,其中在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 方向范围内 AR1 喷管的辐射强度比 AR0 喷管高出 25% 左右,原因仪器能够探测到 AR1 喷管较深入一些的内部固体壁面,同时 AR1 喷管对内、外涵气流无明显的加强掺混效果^[4];(2)AR4, AR8, AR12 和 AR16 喷管的红外辐射强度在所有的探测方向均小于 AR0 喷管,并且在 30° 方向附近各个喷管的红外辐射强度的相对值最低,二元喷管能够降低从宽边探测的红外辐射强度的原因是它们增强了内、外涵气流的掺混以及射流与外流的掺混,并且能利用喷管自身的遮挡限制探测器对喷管内有有效辐射较高的固体壁面的探测;(3)在宽高比小于 8 时,二元喷管的红外辐射强度随宽高比的增加而降低,在宽高比大于 8 时二元喷管的红外辐射强度不随宽高比的增加而发生明显变化,AR8 喷管在各个方向的辐射强度降低到 AR0 喷管的 40% 左右。

3.2.2 对窄边探测的红外辐射强度的影响

图 13 为从各个喷管窄边探测得到的辐射强度的空间分布,图 14 为从二元喷管窄边探测得到的红外辐射强度的相对值 I_{2D}/I_0 。从图中可以看出对于从窄边探测:(1)AR4 喷管在 $10^\circ \sim 35^\circ$, AR8, AR12 和 AR16 喷管在 $20^\circ \sim 45^\circ$ 范围内具有红外辐射增强效果,其中 AR8 喷管在 30° 附近的辐射强度为 AR0 喷管的 170% 左右,产生红外辐射增强的原因是二元喷管的中心锥表面在这些方向的投影面积大于轴对称喷管的情况;(2)长宽

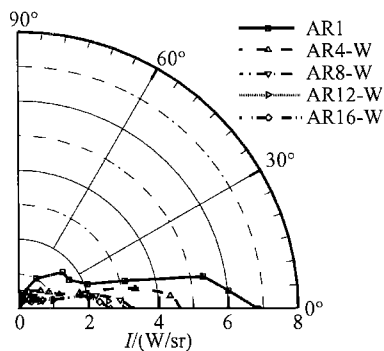


图 11 从各个喷管宽边探测得到的红外辐射强度的空间分布

Fig. 11 Spatial infrared radiate intensity distribution of each nozzle detecting from the wide side

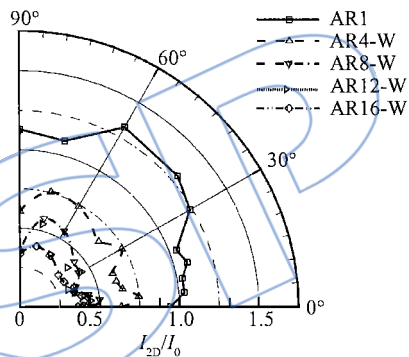


图 12 从宽边探测得到的二元喷管红外辐射强度的相对值

Fig. 12 Relatively infrared radiate intensity of 2-D nozzle detecting from the wide side

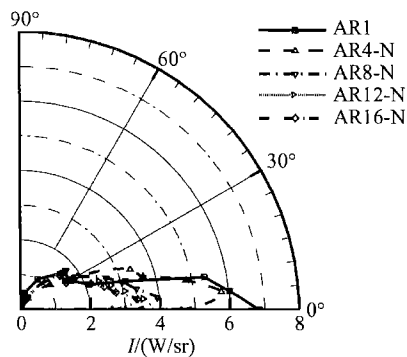


图 13 从各个喷管窄边探测得到的红外辐射强度的空间分布

Fig. 13 Spatial infrared radiate intensity distribution of each nozzle detecting from the narrow side

比大于 1 的二元喷管在前面提到的方向以外,都具有降低红外辐射强度的作用,其中在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 方向将辐射强度降低到轴对称喷管的 40% 左右。

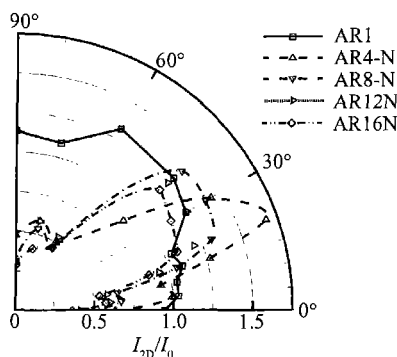


图14 从窄边探测得到的二元喷管红外辐射强度的相对值

Fig. 14 Relatively infrared radiate intensity of 2-D nozzle detecting from the narrow side

4 结 论

(1) 长宽比为1的二元喷管的红外辐射强度空间分布规律与轴对称喷管一致,都是峰值出现在 0° ,并且辐射强度随着探测角度的增加而降低,但是长宽比为1的二元喷管的辐射强度仅在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 方向小于轴对称喷管,而在 $5^\circ \sim 90^\circ$ 方向其红外辐射强度大于圆喷管。

(2) 从长宽比大于1的二元喷管的宽边探测得到的辐射强度的空间分布规律与轴对称喷管一致,并且其辐射强度都小于轴对称喷管,并且在长宽比小于8或等于8时辐射强度随宽高比的增加而降低,而在长宽比大于8时,辐射强度不随宽高比的增加明显变化,其中在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向宽高比为16的二元喷管的辐射强度为轴对称喷管的60%左右。

(3) 从长宽比大于1的二元喷管的窄边探测得到的辐射强度的空间分布规律与涡喷发动机喷管的分布规律的相似,峰值出现在 5° 附近,之后随着观测角度的增加辐射强度迅速降低,在 30° 方向附近长宽比大于1的二元喷管的辐射强度大于轴对称喷管,而在 0° 或 90° 方向附近其辐射强度小于轴对称喷管并且随宽高比的增加而降低,其中宽高比为16的二元喷管在 90° 方向的辐射强度约为轴对称喷管的30%。

(4) 采用大宽高比的二元喷管能够有效降低排气系统的在部分空间方向的红外辐射强度,但是二元喷管对部分角度的红外辐射强度产生增强效果,因此大宽高比二元喷管在飞机上具体应用时,必须与其它红外抑制技术综合使用才能实现全方位的红外抑制。

参考文献:

- [1] 胡传理. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [3] Abolfadl M A. Analysis and design optimization of flow in circular-to-rectangular transition ducts[R]. AIAA-88-0304, 1988.
- [4] 张勃. 大宽高比矩形喷管的射流掺混与红外抑制特性研究[D]. 江苏 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [5] Chu C W, Wun W A. Simple 2D-nozzle plume for IR analysis[R]. AIAA-80-1808.
- [6] 张海星, 张建奇, 杨伟, 等. 二元喷管尾焰红外辐射的理论计算[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(1): 39-42.
Zhang Haixing, Zhang Jianqi, Yang Wei, et al. A theoretical calculation of the IR radiation of the 2D-nozzle plume[J]. Journal of Xidian University, 1998, 25(1): 39-42.
- [7] 山其骥, 卜满. 热喷流红外辐射特性的测试实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(6): 791-796.
Shan Qixiang, Bu Man. The experiment study on the infrared radiation characteristics from hot jet[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 27(6): 791-796.
- [8] 郑礼宝. 全尺寸二元喷管红外辐射特性研究[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 140-142.
Zheng Libao. Infrared emission from turbojet with two-dimensional Nozzle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2002, 23(2): 140-142.
- [9] 金捷, 朱谷君, 徐南荣, 等. 发动机高速排气系统红外辐射特性的数值计算与分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 582-585.
Jin Jie, Zhu Gujun, Xu Nanrong, et al. Numerical simulation of infrared radiation characteristics for aeroengine high-speed exhaust system[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 582-585.